

Hauptgebiet 1: Schweißprozesse und Ausrüstung



Die in den SFI-Unterlagen/CD-ROM "SFI-Aktuell" enthaltenen Normenauszüge sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden der Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Hauptgebiet 1: Schweißprozesse und -ausrüstung

Kapitel	Thema
1.01	Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik
1.02	Autogenschweißen und verwandte Verfahren
1.03	Elektrotechnik, ein Überblick
1.04	Der Lichtbogen
1.05	Stromquellen für das Lichtbogenschweißen
1.06	Einführung in das Schutzgasschweißen
1.07	WIG-Schweißen
1.08-1	MIG/MAG-Schweißen
1.08-2	Fülldrahtschweißen
1.09	Lichtbogenhandschweißen
1.10	Unterpulverschweißen
1.13	Schneiden und andere Nahtvorbereitungsverfahren

Inhalt

1	Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik	2
1.1	Was ist Schweißtechnik	2
1.2	Geschichte der Schweißtechnik.....	2
1.3	Anwendungsgebiete der Schweißtechnik	4
1.4	Definition Schweißen nach DIN EN 14610	6
1.4.1	Metallschweißen	6
1.5	Löten	12
1.5.1	Weichlöten	12
1.5.2	Hartlöten	12
1.6	Kleben.....	17
2	Grundbegriffe der Schweißverfahren.....	18
2.1	Einteilung nach Art der Energieträger.....	18
2.2	Einteilung nach dem Zweck des Schweißens.....	19
2.2.1	Verbindungsschweißen.....	19
2.2.2	Auftragschweißen	20
2.3	Einteilung nach dem physikalischen Ablauf des Schweißens	20
2.3.1	Schmelzschweißen	20
2.3.2	Pressschweißen.....	21
2.4	Einteilung nach dem Grad der Mechanisierung.....	22
3	Begriffsdefinitionen	23
4	Kurzzeichen, Ordnungsnummern, Kennzahlen.....	25
5	Übersicht über die Metallschweißverfahren.....	27
6	Auswahl der Schweißverfahren.....	29
7	Arbeitsschutz - Arbeitssicherheit.....	33
8	Testfragen.....	34

1 Allgemeine Einführung in die Schweißtechnik

1.1 Was ist Schweißtechnik

Beschreibung: Schweißtechnik

Schweißtechnik ist die Summe von Kenntnissen und Erfahrungen, die von den Fachleuten im Laufe vieler Jahrzehnte für die Anwendung von schweißtechnischen Prozessen erarbeitet und zusammengetragen worden sind.

Neben dem Schweißen spielt das Löten (Unterrichtseinheit 1.16), Kleben (Unterrichtseinheit 1.18), mechanische Fügen und Schneiden (Kapitel 1.13) eine wesentliche Rolle in der industriellen Anwendung.

1.2 Geschichte der Schweißtechnik

Von den Sumerern zu den Lasern

Am Anfang war das Feuer! Auch in der Schweißtechnik war diese ursprüngliche Energiequelle lange Zeit die einzige Nutzbare und das liegt ca. 6000 Jahre zurück.

Verbindungen zweier metallischer Werkstücke wurden zu der Zeit durch das Feuerschweißen hergestellt. Die beiden Teile wurden im Feuer erhitzt und durch Aufbringen einer äußeren Kraft miteinander verbunden.



Quelle: Seminarvortrag „Feuerschweißen von Stefan Griwenka

Abbildung 2: Feuerschweißen

Einen Eindruck über die geschichtliche Entwicklung der Schweißtechnik soll die nachfolgende Chronologie zeigen, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebet.

- **um 4000 v. Chr.** Sumerien: geschweißte Teile (Gold mit Gold)
- **um 2700 v. Chr.** Hartlöten in Ägypten und Mesopotamien
- **um 2700 v. Chr.** Ägypten: Anwendung des Feuerschweißens beim Bau einer kupfernen Hauptwasserleitung und bei der Herstellung von Schmuck und Verzierungen aus Gold
- **um 700 v. Chr.** Delhi: Die Kutub Säule, ein aus Gusseisen verschweißter, 16 m hoher Obelisk



- **um 79 v. Chr.** Pompeji: feuergeschweißte Rohrleitung
-
-
-
- **1782** – Der Göttinger Physiker **Christoph Lichtenberg** verschweißt eher zufällig zwei Metallteile (Uhrfeder und Messerklinge) mit Hilfe von Elektrizität, die er durch Reibung erzeugt.
- **1809** – Der englische Physiker **Humphry Davy** setzt den Lichtbogen als Lichtquelle ein und stellt seine Ablenkung durch Magnete fest.
- **1867** – **Elihu Thomson** entdeckt das elektrische Widerstandsschweißen von Stahl.
- **1881 bis 1887** – Der Russe **Nikolai Nikolajewitsch Bernados** gilt als Erfinder des Lichtbogens. Mit **Karol Stanislaw Olszewski** erprobt er das erste Lichtbogenhandschweißverfahren.
- **1890** – Die am weitesten verbreitete Technik des Lichtbogenschweißens entwickelt der russische Ingenieur **Nikolai Gawrilowitsch Slawjanow**.
- **1895** – **Hans Goldschmidt** entwickelt das Thermitschweißen (Aluminothermisches Schweißen).
- **1948 bis 1950** – Das sog. **S.I.G.M.A.**-Verfahren (**Shielded Inert Gas Metal Arc**), heute MSG-Schweißen genannt, wurde in den USA zum ersten Mal angewendet. 1950 erfolgte die Einführung in Deutschland.
- **1951** – Das Plasmaschweißen, das jüngste eigenständige Schutzgasschweißverfahren, wird entwickelt. Der Begriff des thermischen Plasmas wurde allerdings schon 1928 vom Physiker **Irving Langmuir** eingeführt.
- **1951** – Entwicklung des Elektroschlackeschweißens
- **1956** – Das Reibschweißen wird in der UdSSR und in den USA entwickelt.
- **1957** – Das Ultraschallschweißen wird entwickelt.
- **1957** – Erste Elektronenschweißanlagen in der Industrie.
- **1961** – Das Laserschweißen wird entwickelt.
- **1970-1980** – Die Impulsvarianten der Lichtbogenschweißverfahren entstehen.
- **1990** – Neue Hochleistungsvarianten des MAG-Schweißens wurden entwickelt, wie das T.I.M.E.- oder "Rapid Melt"-Verfahren. Das in den 70er Jahren entwickelte "High Deposition Welding" war ein Vorläufer dieser Techniken.
- **1995** – Patentierungsveröffentlichung des **Friction Stir Welding (FSW)** durch das TWI (The Welding Institute UK)
- **2003** – Lichtbogenschweißen wird auch in der Zahntechnik verwendet.
- **ab 2005** – Entwicklung energiearmer Verfahren wie EB-Non-Vac, Hybride Verfahren, Lichtbogenlöten, CMT, Cold-Arc u.a.

1.3 Anwendungsgebiete der Schweißtechnik

Die Bereiche, in denen die Schweißtechnik zum Einsatz kommt, sind sehr vielschichtig. Dabei wird durch die Schweißtechnik in den einzelnen Branchen in Deutschland eine Wertschöpfung von ca. $21 \cdot 10^9$ Euro pro Jahr erreicht. Die Anzahl der Beschäftigten liegt hier bei 360.000 Personen.

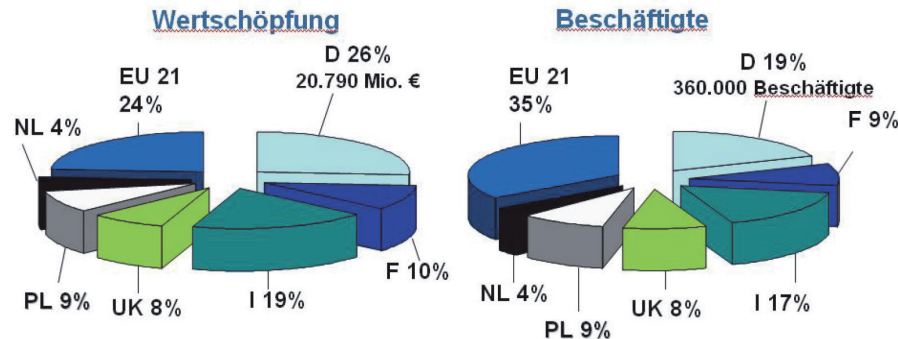


Abbildung 3: Wertschöpfung aus der Schweißtechnik (DVS-Studie von 2012)

Im Bereich des Fahrzeugbaus ist die Schweißtechnik in den verschiedensten Varianten sehr verbreitet und die Wertschöpfung bei der Menge an produzierten Fahrzeugen am größten. Auch in neuen Bereichen der Kleinteil-Fügetechnik zeigt die Schweißtechnik eindrucksvoll ihre Möglichkeiten.

Die Schweißtechnik findet Verwendung in nahezu allen Branchen der Industrie, beispielsweise im

- Stahlbau
- Behälterbau
- Automobilbau
- Schienenfahrzeugbau
- Offshore
- Maschinenbau
- Medizintechnik
- usw.

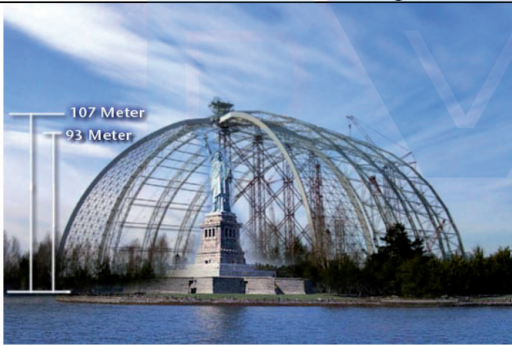
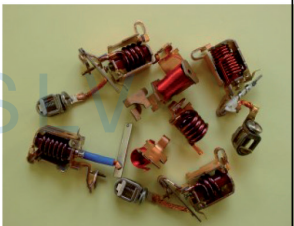
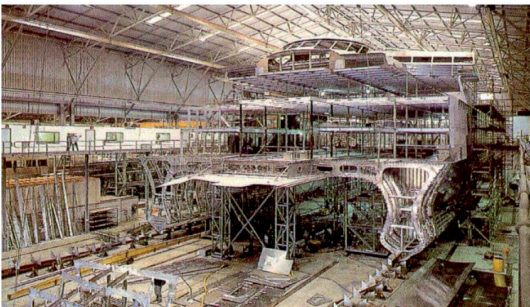
		
Kühlbehälter aus rostfreiem Stahl Behälterbau	Braunkohlebagger im Tagebau Maschinenbau	Glas-Stahl- Verarbeitung
		
Large Millimeter Telescope auf dem Gipfel des erloschenen Vulkans Sierra Negra in Puebla, Mexico		Kleinteil-Fügetechnik
		
Stahlbau	Behälterbau (Gießpfannen)	Kleinteil-Fügetechnik
		
Schiffbau aus Aluminium		Brückenbau

Abbildung 4: Anwendungsbeispiele aus der Schweißtechnik

1.4 Definition Schweißen nach DIN EN 14610

SCHWEISSEN:

Ein Vorgang, der Werkstoff(e) unter Anwendung von Wärmeenergie und/oder Druck derart vereinigt, dass sich ein kontinuierlicher innerer Aufbau der verbindenden Werkstoffe ergibt. Schweißzusatz, dessen Schmelztemperatur von gleicher Größenordnung ist wie die der (des) Grundwerkstoffe(s), kann zugeführt werden. Das Ergebnis des Schweißens ist die Schweißnaht.

Kurz gesagt: Schweißen ist ein Fügen mit dem Ergebnis einer stoffschlüssigen, nicht lösbaren Verbindung!

Die DIN EN 14610 definiert Metallschweißprozesse, unterteilt je nach den physikalischen Eigenschaften und je nach dem relevanten Energieträger.

Die Schweißtechnik beschränkt sich jedoch nicht nur auf das Schweißen von Metallen; Kunststoff und Keramik können ebenfalls schweißtechnisch gefügt werden (siehe Kap. 1.17 und 1.18).

1.4.1 Metallschweißen

Vorgang, der Metall(e) unter Aufwand von Wärme und/oder Druck derart verbindet, dass sich ein kontinuierlicher innerer Aufbau des verbundenen Metalls bzw. der verbundenen Metalle ergibt.

Anmerkung 1: Schweißzusatz, dessen Schmelztemperatur von gleicher Größenordnung ist wie die der (des) verbundenen Grundwerkstoffe(s), kann zugeführt werden. Das Ergebnis des Schweißens ist die Schweißnaht.

Anmerkung 2: Diese Definition schließt Beschichten ein.

Das Metallschweißen wird in zwei Hauptkategorien – **Schmelzschweißen** und **Pressschweißen** – aufgeteilt:



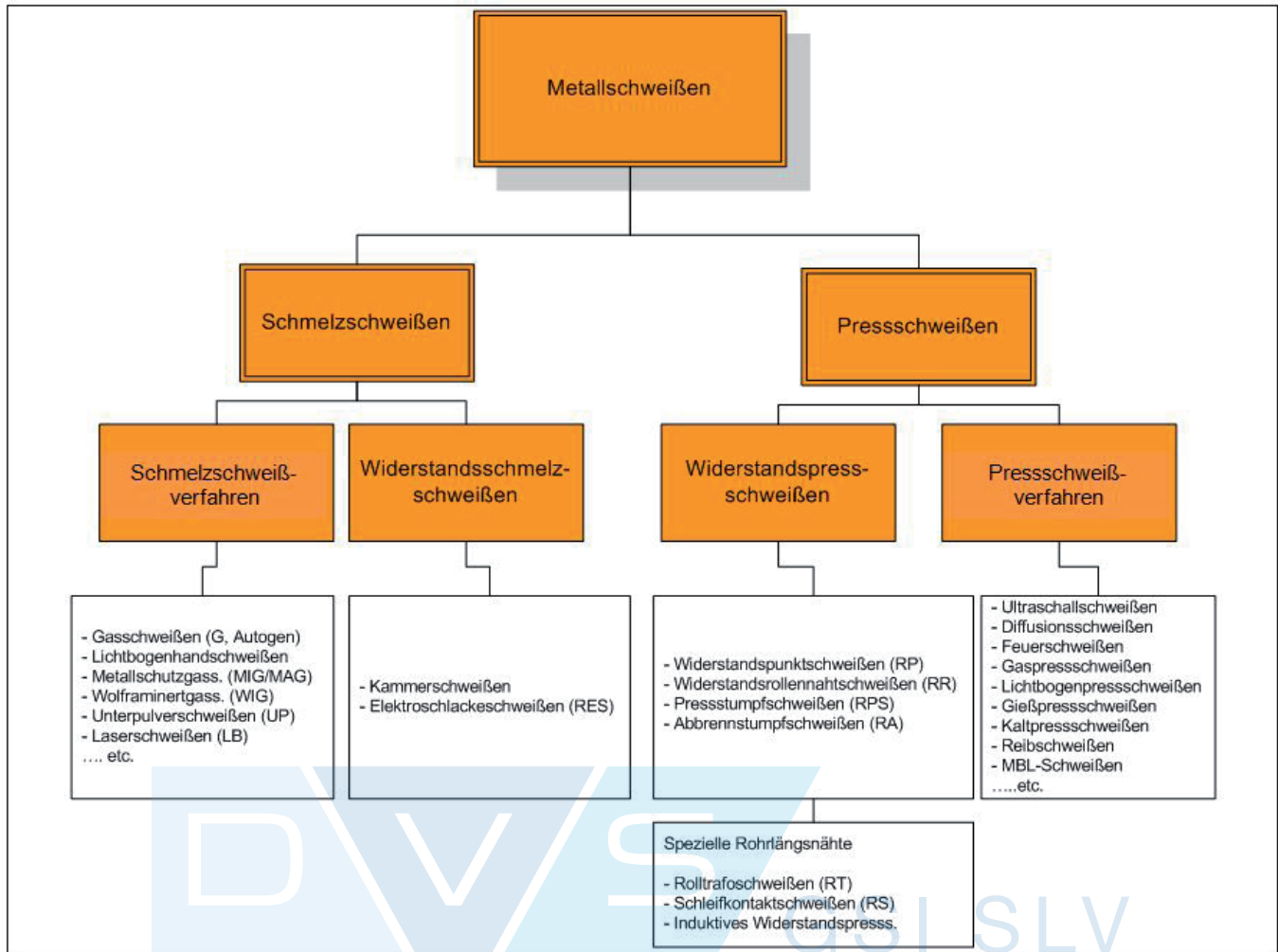


Abbildung 5: Aufteilung des Metallschweißens

1.4.1.1 Schmelzschweißen

Schweißen ohne Aufwenden äußerer Kraft, wobei die Fügefläche(n) angeschmolzen werden muss (müssen); meist – jedoch nicht notwendigerweise – wird geschmolzener Schweißzusatz zugeführt (siehe Abbildung 9 bis 11).



Abbildung 9: MAG-Schweißen

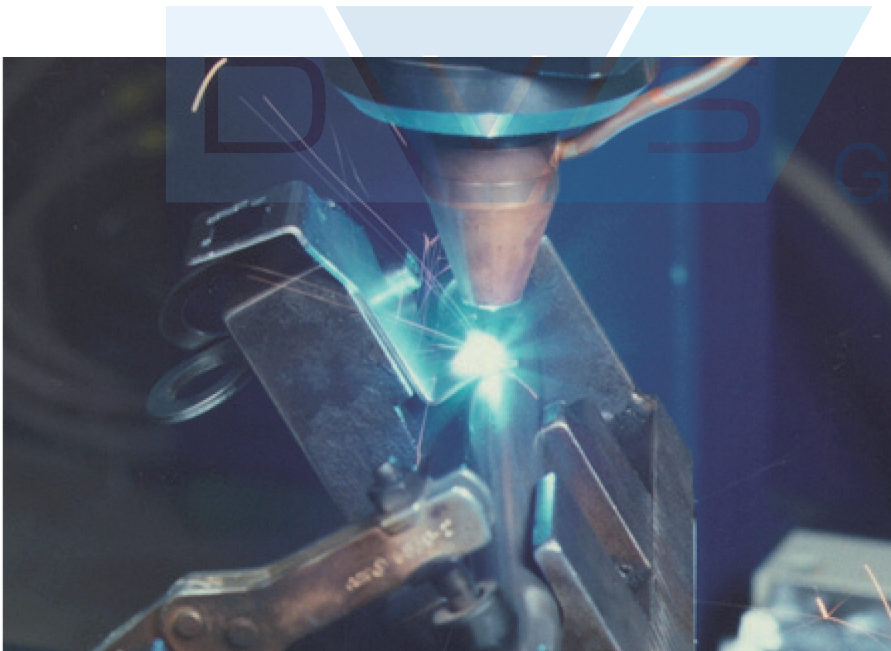


Abbildung 10: Laserschweißen



Abbildung 11: WIG-Schweißen



1.4.1.2 Pressschweißen

Schweißen, wobei ausreichend äußere Kraft aufgewendet wird, um an beiden Fügeflächen eine mehr oder weniger starke plastische Verformung zu bewirken – im Allgemeinen ohne Zugabe von Schweißzusatz (siehe Abbildungen 6 bis 8)



Abbildung 6: Lichtbogen-Bolzenschweißen



Abbildung 7: Abbrennstumpfschweißen



Abbildung 8: Widerstandspressschweißen (Bonden)

Anmerkung: Meist – jedoch nicht notwendigerweise – werden die Werkstücke an den Fügeflächen erwärmt, um das Verbinden zu ermöglichen oder zu erleichtern.



1.5 Lötén

Ein weiteres thermisches Fügeverfahren ist das **Lötén**. Dieses Fügeverfahren zeichnet sich besonders durch eine hohe Flexibilität der lötbaren Werkstoffe und den möglichen Werkstoffkombinationen aus. Im Gegensatz zum Schweißen, dem es in der Regel zu einem Aufschmelzen der zu verschweißenden Werkstoffe kommt (mit Ausnahme einiger Pressschweißverfahren), bleiben die Werkstoffe beim Lötén in der festen Phase. Der Bindeprozess beruht hauptsächlich auf Diffusionsvorgängen.

Lötén ist ein Fügeprozess, bei dem ein geschmolzenes Lot genutzt wird, das eine Liquidustemperatur besitzt, die tiefer ist als die Solidustemperatur der/des Grundwerkstoffe(s). Das geschmolzene Lot benetzt die Oberflächen der/des Grundwerkstoffe(s) und wird während oder bei Ende des Aufheizens in einen engen, zwischen den zu fügenden Teilen befindlichen Spalt hineingezogen (oder, falls vorab eingelegt, dort gehalten). Hauptvarianten des Löténs sind das Weich- und Hartlötén. Weitere Informationen siehe Kap. 1.16.

Anmerkung 1: Üblicherweise werden diese Prozesse bei Metallen verwendet, sie können aber auch für Nichtmetalle eingesetzt werden. Die Lote besitzen immer eine andere chemische Zusammensetzung als die zu verbindenden Komponenten.

Anmerkung 2: Wenn die Prozesse ohne Kapillarkräfte erfolgen, werden sie oft als Fugenlötén bezeichnet.

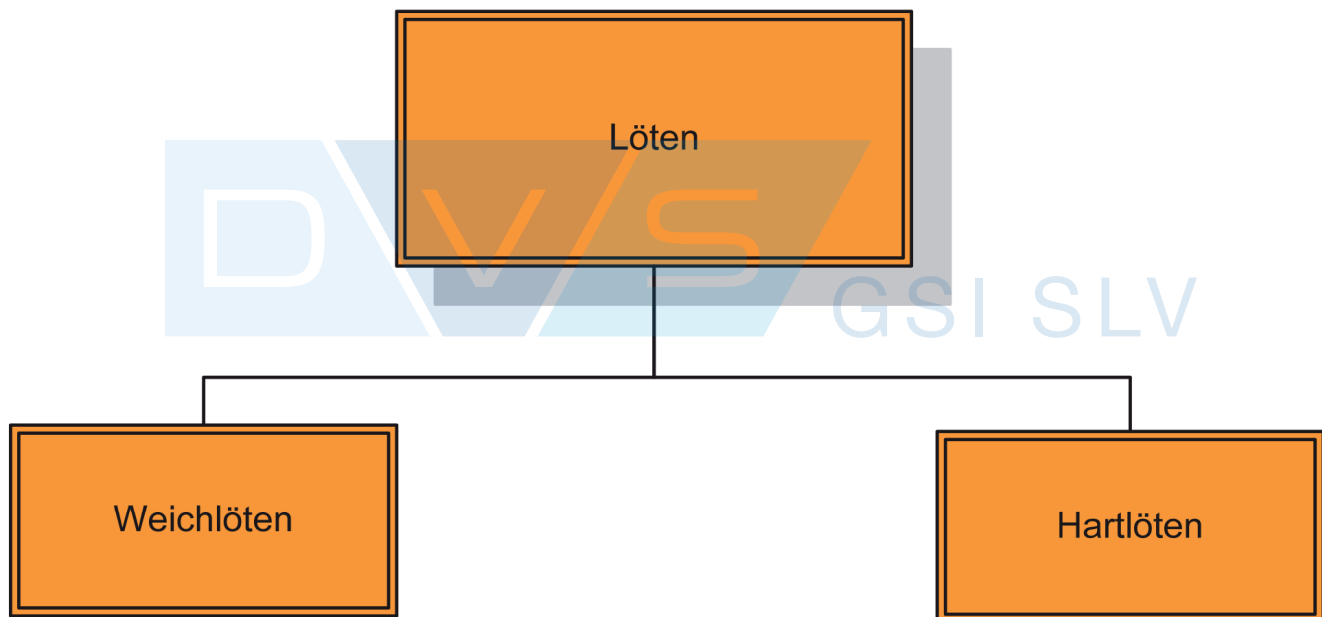


Abbildung 12: Unterteilung des Löténs

1.5.1 Weichlötén

Fügeprozess mit Loten deren Liquidustemperatur bei 450°C oder darunter liegt.

1.5.2 Hartlötén

Fügeprozess mit Loten deren Liquidustemperatur oberhalb 450°C liegt.

Das Weich- und Hartlöten lässt sich noch in weitere Untervarianten bzw. Anwendungstechniken einteilen:

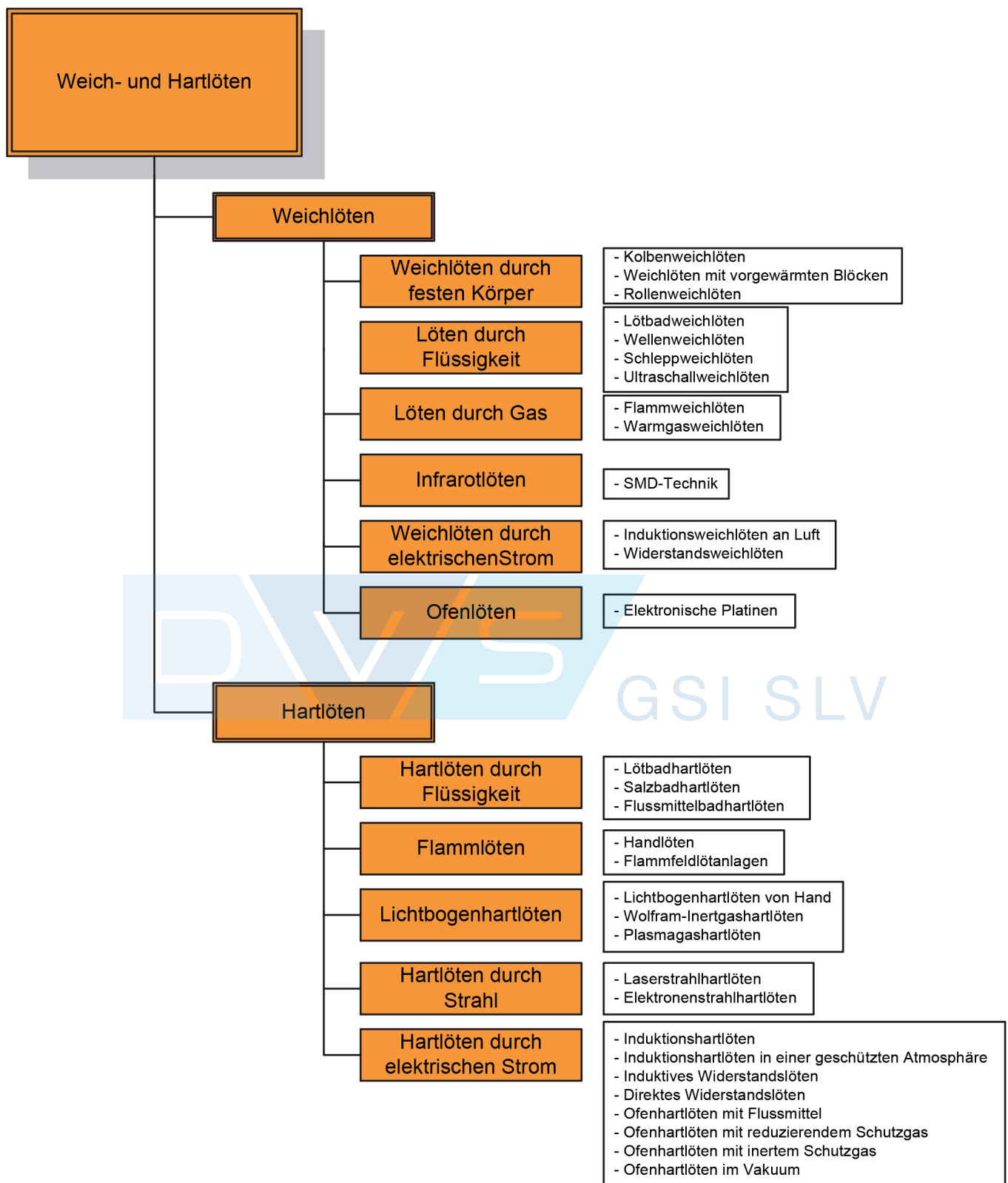


Abbildung 13: Varianten des Lötens

Nachfolgend sind einige Beispiele des Lötens – Weich- und Hartlötens – gezeigt.

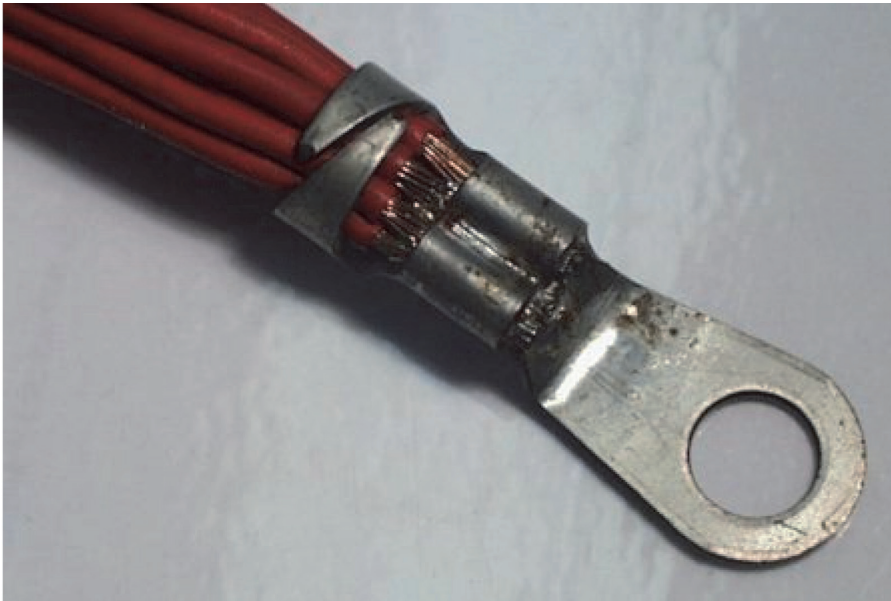


Abbildung 14: Weichlötverbindung eines Kabelanschlusses

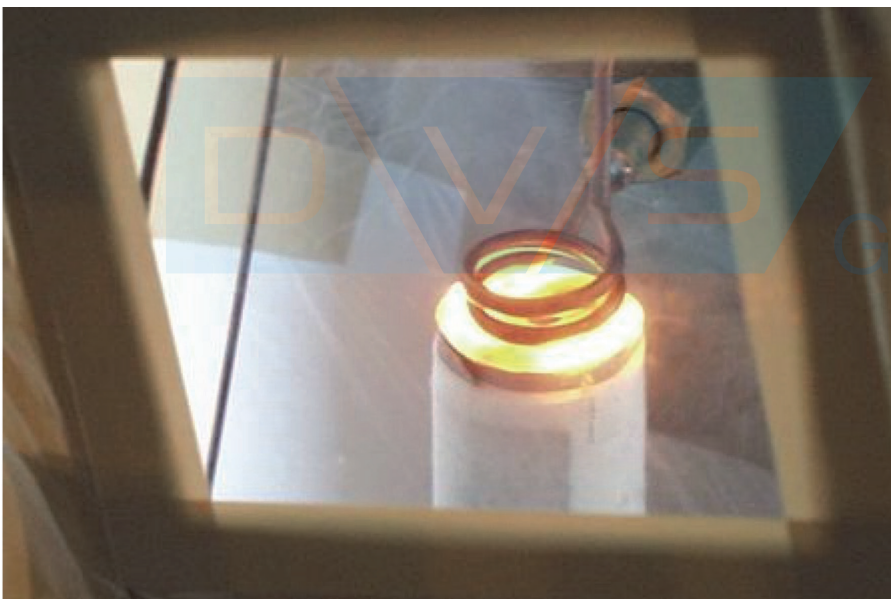


Abbildung 15: Induktions-Hochtemperaturlöten unter Wasserstoff



Abbildung 16: Lötverbindung an einem Wärmetauscher



Abbildung 17: Löten von verzinkten Bauteilen

Anmerkung: Mittels Lichtbogenlötprozess vorbelotete, verzinkte Bauteile. Die eigentliche Lötung erfolgt im Durchlaufofen.

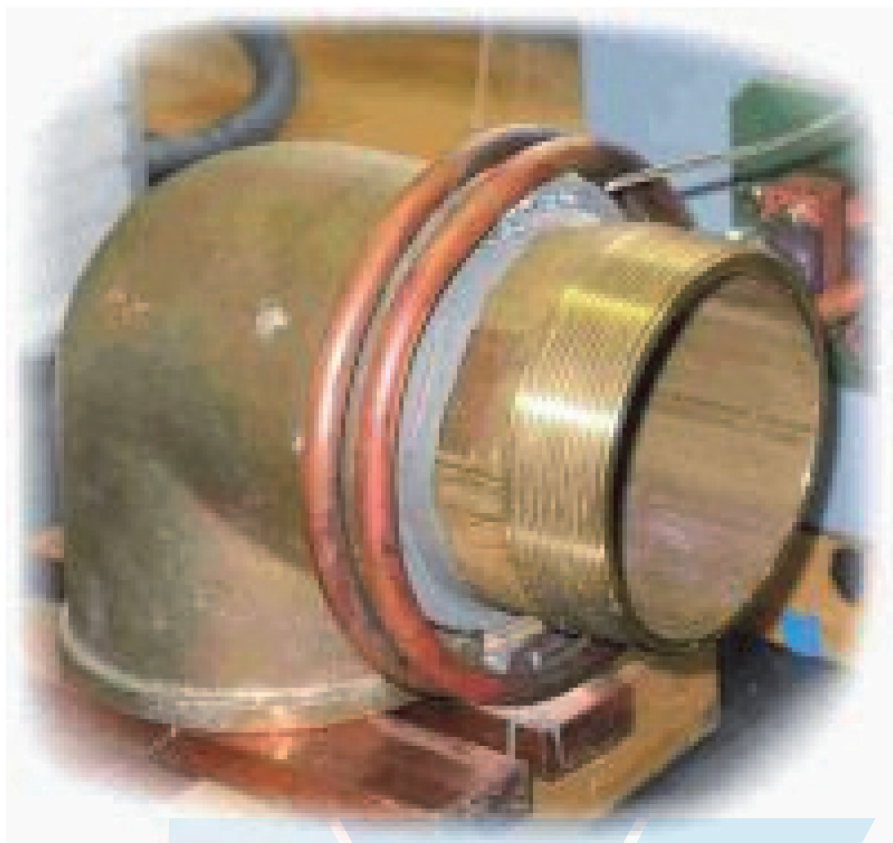


Abbildung 18: Induktionslötén



Abbildung 19: Aluminium-Weichlötén

1.6 Kleben

Unter Kleben versteht man die Herstellung einer festen Verbindung zwischen den Fügeteilen durch einen synthetischen Werkstoff (Klebstoff), der infolge einer physikalisch-chemischen Härtingsreaktion verfestigt wird und die Teile durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) sowie durch zwischen- und innermolekulare Kräfte im Klebstoff (Kohäsion) miteinander verbindet.

Anmerkung: Im Gegensatz zum Schweißen oder Löten ist das Kleben kein thermisches Verfahren.

Neben der Ausbildung zum IWE gemäß IIW Guideline for International Welding Engineers, Technologists, Specialists and Practitioners wird die Ausbildung zum Klebfachingenieur gemäß DVS/EFW 3309 angeboten.

Die Abbildungen 20 bis 21 zeigen exemplarisch einige Anwendungsbeispiele für die Klebetechnik.



Abbildung 20: Strukturelevante Klebung einer Pkw-Windschutzscheibe



Abbildung 21: Klebtechnische Versorgung einer Schnittwunde

Da der Haftvorgang beim Kleben durch chemische Prozesse erfolgt, muss bei der Auswahl des Klebstoffes Folgendes berücksichtigt werden:

- Wie hoch ist die Belastung, die maximal auf die Klebschicht einwirkt? Nicht jeder Kleber hat die gleichen Dehnungs-/Zugfestigkeiten.
- Welche Materialien werden verwendet? Für Materialien gibt es spezielle Klebstoffe, die den jeweiligen chemischen Eigenschaften angepasst sind.
- Wie hoch ist die Umgebungstemperatur? Manche Klebstoffe erreichen ihren maximalen Aushärtungsgrad oder die größte Festigkeit erst bei hohen Temperaturen.
- Gibt es sonstige Einflüsse wie Feuchtigkeit, extreme Sonneneinstrahlung oder Gasatmosphäre? Unter Umständen kann ein Klebstoff dadurch sehr schnell seine Haftungseigenschaften verlieren.

Eine zu (be)klebende Fläche muss vor dem eigentlichen Klebvorgang grundsätzlich vorbehandelt werden. Zur Vorbehandlung gehören:

- Reinigen der Oberfläche (eventuell mit Lösungsmitteln), um Staub, Fett oder andere Rückstände zu beseitigen.
- Aufrauen der Oberfläche durch Schleifen oder Bürsten, um die Haftung der Klebmasse zu gewährleisten.
- Eventuell Spezialbehandlungen wie Beflammen, Ätzen oder Beizen.

2 Grundbegriffe der Schweißverfahren

2.1 Einteilung nach Art der Energieträger

In der DIN EN 14610 werden die Schweißverfahren nach Energieträgern systematisch unterteilt:

Definition Energieträger

Physikalisches Phänomen, das die zum Schweißen erforderliche Energie entweder durch Übertragen auf das (die) Werkstück(e) oder durch Umsetzen im (in den) Werkstück(en) verfügbar macht.

Folgende Energieträger mit ihren zugehörigen Ordnungsnummern werden in der Norm verwendet:

- | | |
|---|--|
| 1 | Feste Körper (Heizelementschweißen) |
| 2 | Flüssigkeit (aluminothermisches Schweißen) |
| 3 | Gas (Gasschmelzschweißen) |
| 4 | Elektrische Gasentladung (Lichtbogenschweißen) |
| 5 | Strahlung (Laserschweißen) |
| 6 | Bewegung von Masse (Reibschweißen) |
| 7 | Elektrischer Strom (Widerstandspressschweißen) |
| 8 | Unbestimmt |

Anmerkung:

Beim Schweißen mit festem Körper, Flüssigkeit, Gas oder elektrischer Gasentladung wird die zum Schweißen erforderliche Energie dem (den) Werkstück(en) (von außen) zugeführt; beim Schweißen durch Strahlung, Bewegung von Masse oder elektrischem Strom entsteht dagegen die Wärmeenergie (bzw. mechanische Energie beim Kaltpressschweißen) durch Energieumsetzung innerhalb des Werkstückes.

Für feste Körper, Flüssigkeit und Gas ist der Wärmehalt das entscheidende Merkmal. Elektrische Gas-

entladung und Stromdurchgang sind Mechanismen, die der Schweißzone die Energie bewegter Ladungsträger zuführen. Im Falle der elektrischen Gasentladung geschieht dies durch Plasma oder Funken, im Falle des elektrischen Stromes durch Widerstandserwärmung, wobei der Strom entweder infolge von Leitfähigkeit oder durch Induktion zustande kommt.

Strahlung ist Energiefortleitung im Sinne der Ausbreitung der Wellen von Licht oder von Ladungsträgern. Für Bewegung von Masse sind die entscheidenden Merkmale Kraft und Verlagerung je Zeit; unterschiedliche Bewegungstypen sind Translation, Rotation und Oszillation.

2.2 Einteilung nach dem Zweck des Schweißens

Unterschieden wird hier zwischen dem Verbindungs- und dem Auftragschweißen.

2.2.1 Verbindungsschweißen

Verbindungsschweißen ist das Erzeugen einer unlösbaren Verbindung zwischen zwei oder mehr Werkstücken durch Schweißen.

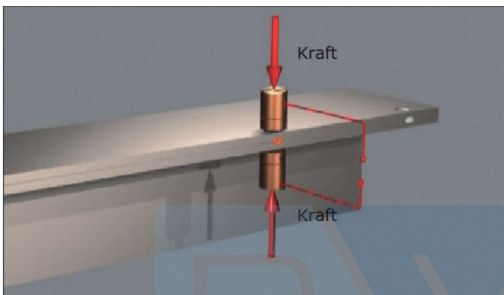


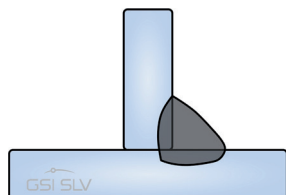
Abbildung 22: Widerstandspunktschweißen als Beispiel zum Verbindungsschweißen

Beim Verbindungsschweißen werden hauptsächlich folgende Nahtarten angewendet:

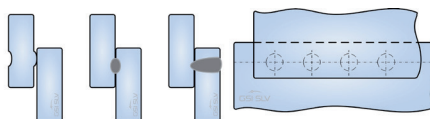
1. Stumpfnähte



2. Kehlnähte



3. sonstige Nähte



z.B. Punktnaht

Die Nahtart wird z.B. bestimmt durch

- die Art des Schweißstoßes
- Art und Umfang der Vorbereitung, z. B. Fugenform
- den Werkstoff
- das Schweißverfahren

2.2.2 Auftragschweißen

Auftragschweißen ist das Erzeugen einer Schicht aus Metall auf einem Werkstück durch Schweißen, um gewünschte Eigenschaften und Abmessungen zu erhalten.

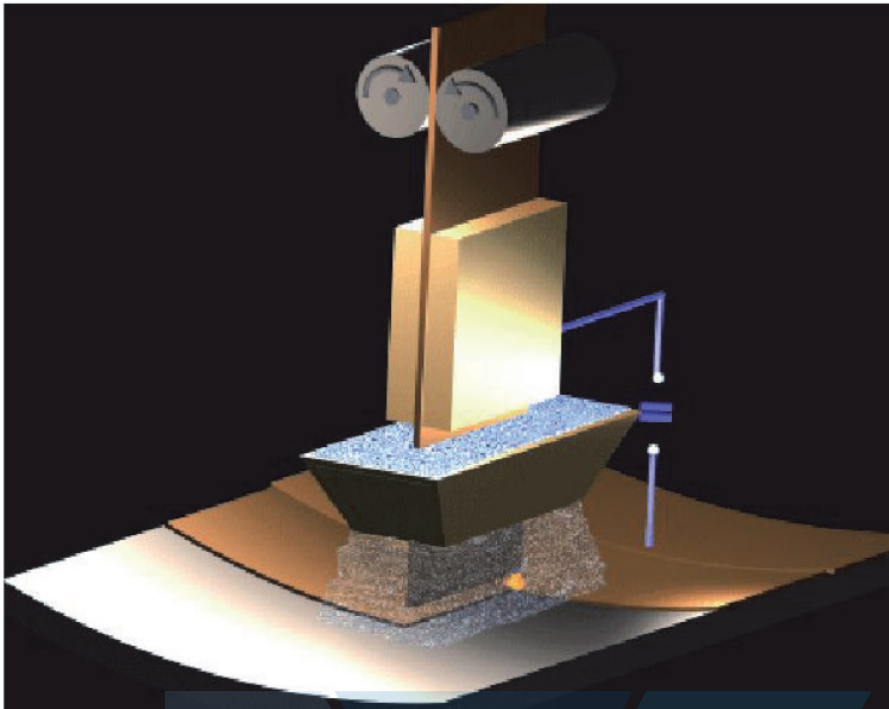


Abbildung 23: UP-Bandplattieren

Sind Grund- und Auftragwerkstoff artfremd, wird z. B. unterschieden zwischen

- Auftragschweißen von Panzerungen: Auftragen eines gegenüber dem Grundwerkstoff vorzugsweise verschleißfesteren Werkstoffes
- Auftragschweißen von Plattierungen: Auftragen eines gegenüber dem Grundwerkstoff vorzugsweise chemisch beständigeren Werkstoffes
- Auftragschweißen von Pufferschichten: Auftragschweißen einer Zwischenschicht (Schwarz-Weiß-Verbindung)
- Auftragschweißung als Reparaturschweißung (Verschleiß)

Hiermit soll zwischen den beiden Werkstoffen eine beanspruchungsgerechte Bindung erzielt werden.

2.3 Einteilung nach dem physikalischen Ablauf des Schweißens

Hier wird zwischen dem Press- und dem Schmelzschweißen unterschieden. Bei beiden Verfahren können Schweißzusätze verwendet werden.

2.3.1 Schmelzschweißen

Schmelzschweißen ist Schweißen ohne Aufwenden äußerer Kraft, wobei die Fügefläche(n) angeschmolzen werden muss (müssen); gewöhnlich – jedoch nicht notwendigerweise – wird geschmolzener Schweißzusatz zugeführt.

Einige Schmelzschweißverfahren, bezogen auf ihre Energieträger, zeigt folgende Tabelle:

Tabelle 1: Einige Schmelzschweißverfahren und ihre Energieträger

Schmelzschweißverfahren	Energieträger
Laserschweißen	Strahlung
Lichtbogenschmelzschweißen	elektrische Gasentladung
Schutzgasschweißen	elektrische Gasentladung
Widerstandsschmelzschweißen	elektrischer Strom
Unterschieneschweißen	elektrische Gasentladung
Unterpulverschweißen	elektrische Gasentladung
Lichtstrahlschweißen	Strahlung
Gießschmelzschweißen	Flüssigkeit
Schwerkraftlichtbogenschweißen	elektrische Gasentladung
Gasschmelzschweißen	Gas
Plasmaschweißen	elektrische Gasentladung

2.3.2 Pressschweißen

Schweißen, bei dem ausreichend äußere Kraft aufgewendet wird, um an beiden Fügeflächen eine mehr oder weniger starke plastische Verformung zu bewirken, im Allgemeinen ohne Zusatz von Schweißzusatz.

Anmerkung: Gewöhnlich – **jedoch nicht notwendigerweise** – werden die Werkstücke an den Fügeflächen erwärmt um das Verbinden zu ermöglichen oder zu erleichtern.

Einige Pressschweißverfahren, bezogen auf ihre Energieträger, zeigt folgende Tabelle:

Tabelle 2: Einige Pressschweißverfahren und ihre Energieträger

Pressschweißverfahren	Energieträger
Lichtbogenbolzenschweißen	elektrische Gasentladung
Reibschweißen	Bewegung von Masse
Abbrennstumpfschweißen	elektrischer Strom
Buckelschweißen	elektrischer Strom
Feuerschweißen	Bewegung von Masse
Magnetimpulsschweißen	Bewegung von Masse
Widerstandspressstumpfschweißen	elektrischer Strom
Sprengschweißen	Bewegung von Masse
Punktschweißen	elektrischer Strom

2.4 Einteilung nach dem Grad der Mechanisierung

Die Schweißverfahren lassen sich auch nach ihrem Mechanisierungsgrad einteilen. Dies ist in der folgenden Tabelle exemplarisch an den beiden Schmelzschweißverfahren WIG und MSG dargestellt.

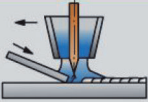
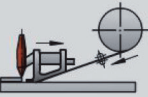
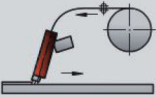
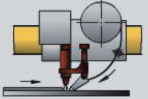
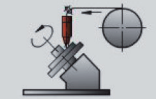
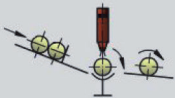
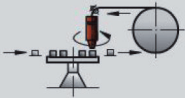
Benennung Kurzzeichen	Beispiele Schutzgasschweißen		Bewegungs-/Arbeitsabläufe		
	Wolfram- Inertgasschweißen WIG (141)	Metall- Schutzgasschweißen MSG (13)	Brenner-/ Werkstückführung	Zusatzvorschub	Werkstück- handhabung
Handschiessen (manuelles Schweißen)		-	Manuell	Manuell	Manuell
Teilmechanisches Schweißen			Manuell	Mechanisch	Manuell
Vollmechanisches Schweißen			Mechanisch	Mechanisch	Manuell
Automatisches Schweißen			Mechanisch	Mechanisch	Mechanisch

Abbildung 24: Einteilung der Schweißverfahren nach dem Mechanisierungsgrad

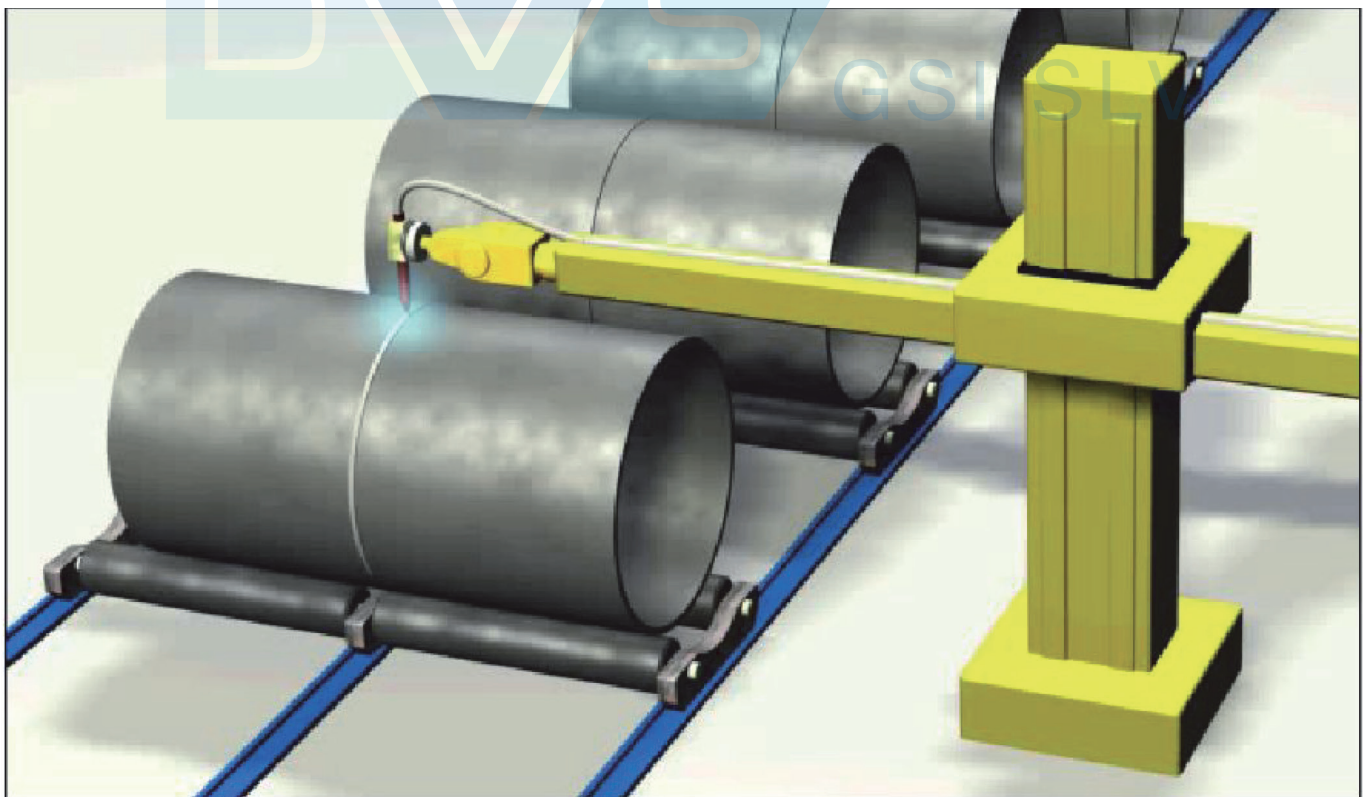


Abbildung 25: Automatisches Schweißen mit Schweißmast

3 Begriffsdefinitionen

Nachfolgend sind beispielhaft und zum besseren Verständnis einige gängige Begriffe aus der tagtäglichen Nutzung der Schweißtechnik wiedergegeben:

Abbrand:	Als Abbrand bezeichnet man den Verlust von Legierungselementen durch den Schweißprozess
Anlaufstück:	Metallstück (gegebenenfalls aus einem anderem geeigneten Werkstoff), das so vor dem Schweißnahtanfang angebracht wird, dass der volle Schweißgutquerschnitt erreicht wird.
Artfremde Werkstoffe:	Werkstoffe, die sich in ihrer Zusammensetzung oder ihrer Schweißeignung wesentlich unterscheiden.
Artgleiche Werkstoffe:	Werkstoffe, die sich in ihrer Zusammensetzung oder ihrer Schweißeignung unwesentlich unterscheiden.
Aufmischen:	Unvermeidbares Aufnehmen von Grundwerkstoff, Schweißzusatz oder von Werkstoff aus bereits geschweißten Raupen oder Lagen in der Schweißzone.
Auftragschweißung:	Durch Schweißen hergestellte Beschichtung.
Auslaufstück:	Metallstück, das so hinter dem Schweißnahtende angebracht ist, dass der volle Schweißgutquerschnitt bis zum Schweißnahtende vorhanden ist und so das Entstehen von Endkratern verhindert wird. Es ist nach dem Schweißen sauber abzutrennen.
Beidseitiges Schweißen:	Schweißen, wobei die Schweißnaht von beiden Seiten des Werkstückes aus hergestellt wird.
Brenneranstellwinkel:	Winkel zwischen der Mittellinie des Schweißbrenners und einer Bezugsebene am Werkstück, projiziert in eine zur Schweißrichtung senkrechte Ebene.
Einlagenschweißung:	Schweißen, wobei die Schweißnaht oder die Beschichtung in einer Lage hergestellt wird.
Einseitiges Schweißen:	Schweißen, wobei die Schweißnaht von einer Seite des Werkstückes aus hergestellt wird.
Gleichzeitig – beidseitiges Schweißen:	Schweißen, wobei die Schweißnaht durch gleichzeitiges Schweißen von beiden Seiten des Werkstückes aus hergestellt wird.
Grundwerkstoff:	Werkstoff, aus dem das zu schweißende Werkstück besteht, wobei Beschichtungen nicht berücksichtigt sind.
Heftschweißen:	Festlegen der zu fügenden Werkstücke bzw. Baugruppen in ihrer vorgesehenen Zuordnung zueinander durch Schweißpunkte oder kurze Schweißnähte.
Mehrlagenschweißen:	Schweißen, wobei die Schweißnaht oder die Beschichtung in mehr als zwei Lagen hergestellt wird. <u>Anmerkung:</u> Die Benennung kann auch nach der Zahl der Lagen erfolgen (z. B. Dreilagenschweißen).
Pilgerschrittschweißen:	Ausführungsart des Schweißens, wobei kurze Nahtstücke entgegen der Hauptschweißrichtung derart geschweißt werden, dass das Ende eines Nahtstückes den Nahtanfang des jeweils vorhergehenden überlappt.
Reines Schweißgut:	Nach dem Schweißen erstarrter Schweißzusatz. Elemente können auch aus zum Schweißen verwendeten Hilfsstoffen stammen.
Schmelzlinie:	Grenze zwischen dem beim Schweißen geschmolzenen Werkstoff und dem fest gebliebenen Werkstoff.
Schweißbad:	Beim Schweißen geschmolzener Werkstoff

Schweißbadsicherung:	Hilfsmittel aus geeignetem Stoff, das das Durchfallen des Schweißbades während des Schweißens verhindert; es kann gleichzeitig zum Formen der Wurzellage dienen.
Schweißeignung:	Die Schweißeignung ist eine Werkstoffeigenschaft. Sie wird auch beeinflusst von der Fertigung und in geringem Maße von der Konstruktion.
Schweißen in Lage und Gegenlage:	Schweißen, wobei die Schweißnaht von beiden Seiten des Werkstückes aus je einer Lage hergestellt wird, die jeweils aus nur einer Raupe besteht.
Schweißgeschwindigkeit:	Geschwindigkeit, mit der der Schweißvorgang in Schweißrichtung fortschreitet.
Schweißgut:	Nach dem Schweißen erstarrter Werkstoff, bestehend aus Grundwerkstoff oder Schweißzusatz und Grundwerkstoff. Elemente können auch aus Beschichtungen und/oder Hilfsstoffen stammen.
Schweißhauptzeit:	Zeit, während der der Schweißvorgang abläuft.
Schweißnaht:	Bereich der Schweißverbindung, in dem das Werkstück oder die Werkstücke am Schweißstoß vereinigt sind.
Schweißprozess:	Vorgang des Schweißens.
Schweißraupenfolge:	Reihenfolge, in der die Raupen einer Schweißnaht bzw. einer aufgetragenen Schicht geschweißt werden.
Schweißstoß:	Der Schweißstoß ist der Bereich, in dem die Teile durch Schweißen miteinander verbunden werden. Die Stoßart wird durch die konstruktive Anordnung der Teile zueinander bestimmt.
Schweißzone:	Örtlich begrenzter Bereich, in dem der Werkstoff während des Schweißens in den flüssigen Zustand versetzt wird bzw. in dem die Bindung zustande kommt.
Schweißzusatz:	Werkstoff, aus dem der Schweißzusatz besteht.
Vorwärmtemperatur (T_p):	Temperatur des Werkstückes in der Schweißzone unmittelbar vor Beginn des Schweißvorganges. <u>Anmerkung:</u> Sie wird üblicherweise als Minimalwert angegeben und ist gewöhnlich mit der minimalen Zwischenlagentemperatur identisch.
Wärmeeinflusszone (WEZ):	Bereich des fest gebliebenen Grundwerkstoffes, der durch die beim Schweißen eingebrachte Energie thermische Gefügeänderungen erfahren hat.
Wurzelschutz:	Schweißhilfsstoff (z. B. Formiergas), um eine Oxidation der Nahtunterseite zu verhindern und die Gefahr des "Durchfallens" zu mindern.
Zubrand:	Unterschied zwischen dem niedrigeren Legierungsgehalt des Schweißzusatzes vor dem Schweißen und dem höheren des reinen Schweißgutes.
Zweilagenschweißen:	Schweißen, wobei die Schweißnaht oder die Beschichtung in zwei Lagen hergestellt wird.
Zwischenlagentemperatur (T_i):	Temperatur in einer Mehrlagenschweißung und im angrenzenden Grundwerkstoff unmittelbar vor dem Schweißen der nächsten Lage. <u>Anmerkung:</u> Sie wird normalerweise als Maximalwert angegeben (siehe DIN EN ISO 13916).

4 Kurzzeichen, Ordnungsnummern, Kennzahlen

Vor dem Hintergrund der Harmonisierung des europäischen Binnenmarktes und den bis dato national unterschiedlichen Bezeichnungen und Abkürzungen der Schweiß- und Lötprozesse, erarbeitete das ISO/TC 44 "Schweißen und verwandte Verfahren" ein international gültiges System von Ordnungsnummern für alle Schweiß- und Lötprozesse.

Die gültigen Ordnungsnummern für die Schweißprozesse sind in der DIN EN ISO 4063 festgelegt.

Alle Schweißverfahren, die mit der Kennzahl 1 beginnen, gehören zu den Lichtbogenschweißverfahren. Weiterhin gehören die Verfahren beginnend mit 11 zu den Metall-Lichtbogen-Schweißverfahren, die kein Schutzgas benötigen, z. B. 111 Lichtbogen-Handschweißen.

Alle Unterpulververfahren sind mit der Kennzahl 12 versehen, so z. B.:

121 UP-Schweißen mit Massivdrahtelektrode,

122 UP-Schweißen mit Massivbandelektrode.

Die MSG-Verfahren sind mit der Kennzahl 13 versehen, so z. B.:

131 MIG mit Massivdrahtelektrode

135 MAG mit Massivdrahtelektrode

136 MAG mit schweißpulvergefüllter Drahtelektrode

Alle Widerstands-Schweißverfahren beginnen mit der Kennzahl 2, wobei die Punktschweißverfahren die Kennzahl 21 haben.

In den Tabellen sehen Sie einige ausgesuchte Verfahren und deren Kurzzeichen und Kennzahlen.



Tabelle 3: Beispiele von Schmelz- und Pressschweißprozessen

Schweißprozess DIN EN 14610	Kurzzeichen	Kennzahl nach DIN EN ISO 4063
Metall-Lichtbogenschweißen ohne Gasschutz	-	11
Lichtbogenhandschweißen	E	111
Metall-Lichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode ohne Schutzgas	MF	114
Unterpulverschweißen	UP	12
Metall-Schutzgasschweißen mit Massivdrahtelektrode	MSG	13
Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode	MAG	135
Metall-Inertgasschweißen mit Massivdraht- oder Massivstabzusatz	MIG	131
Wolfram-Schutzgasschweißen	-	14
Wolfram-Inertgasschweißen	WIG	141
Plasmaschweißen	PW	15
Laserstrahlschweißen	-	52
Elektronenstrahlschweißen	-	51
Widerstandsschweißen	R	2
Widerstandspunktschweißen	RP	21
Buckelschweißen	RB	23
Widerstandsbolzenschweißen	-	26
Rollennahtschweißen	RR	22
Abbrennstumpfschweißen	RA	24
Pressstumpfschweißen	RPS	25
Elektroschlackeschweißen	RES	72
Reibschweißen	FR	42
Sprengschweißen	S	441

5 Übersicht über die Metallschweißverfahren

Abbildung 26 zeigt eine detaillierte Übersicht verschiedener Schmelzschweißverfahren und Abbildung 27 einige schematische Darstellungen.

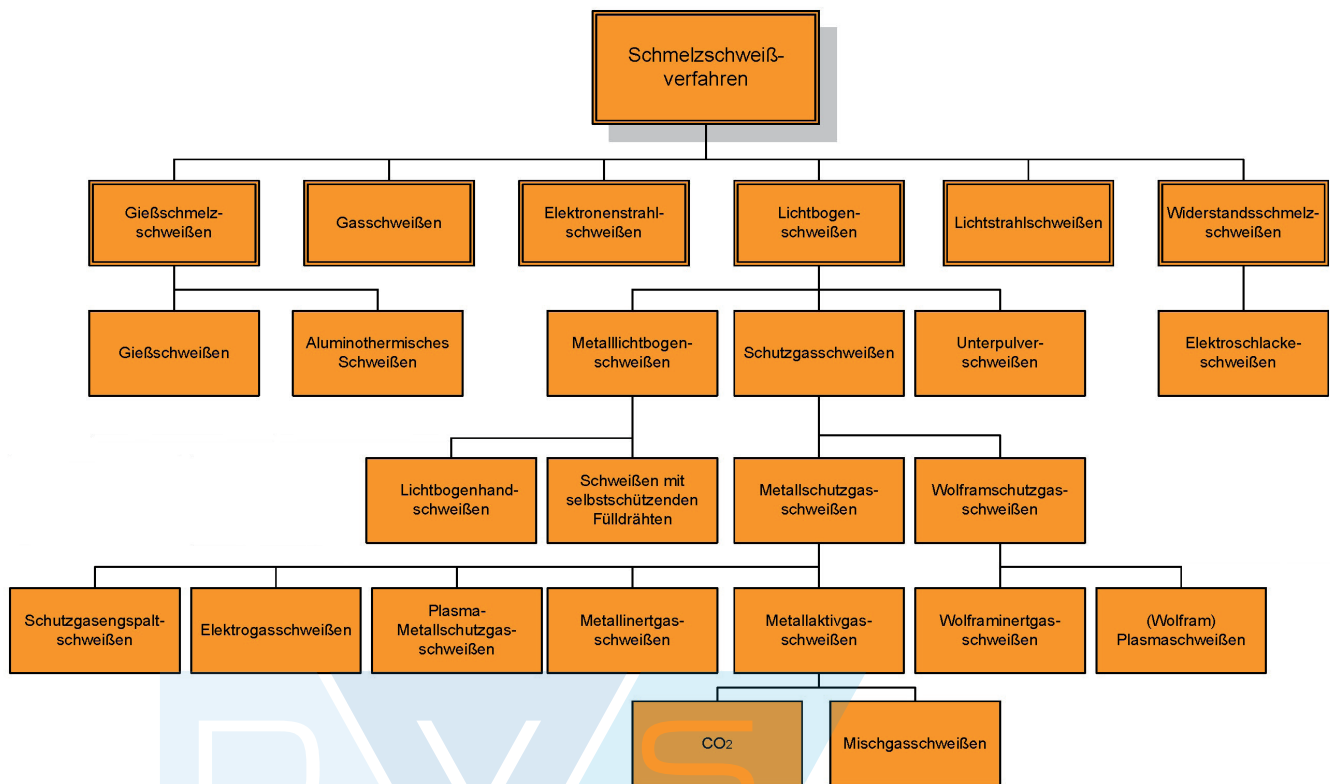


Abbildung 26: detaillierte Übersicht verschiedener Schmelzschweißverfahren

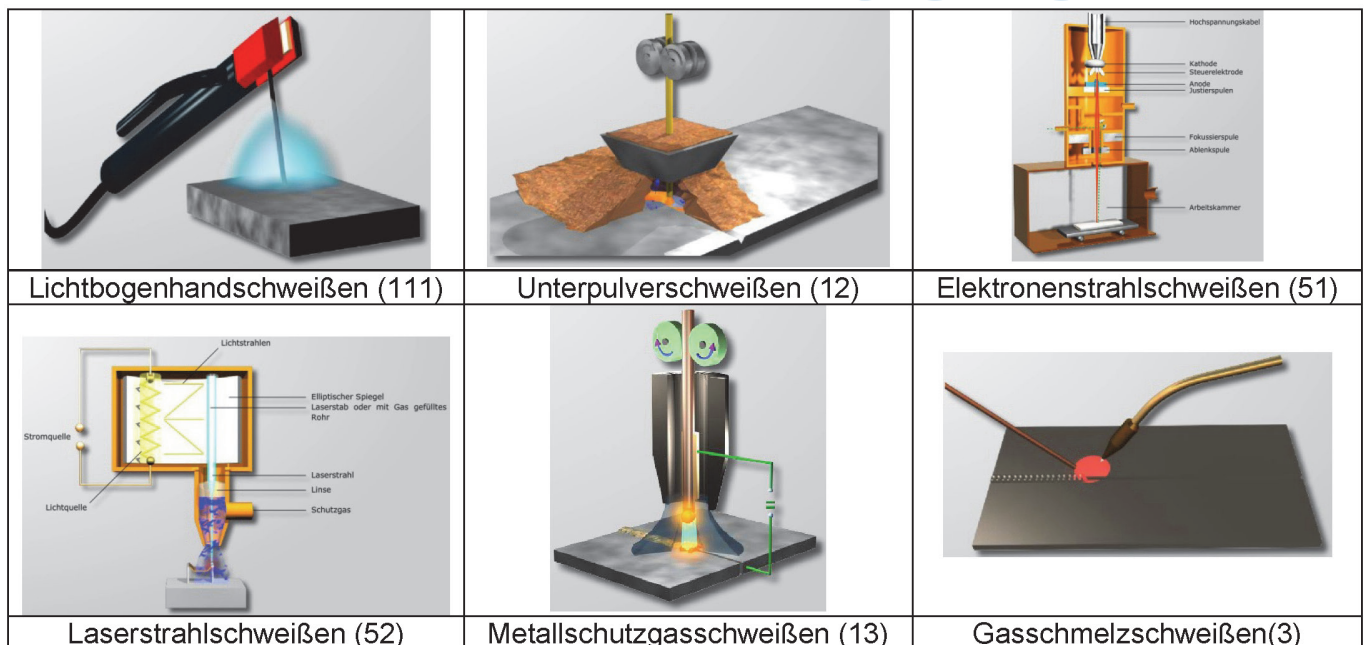


Abbildung 27: Beispielhafte, schematische Darstellung von Schmelzschweißprozessen

Abbildung 28 zeigt eine Übersicht über Pressschweißverfahren und Abbildung 29 einige schematische Darstellungen.

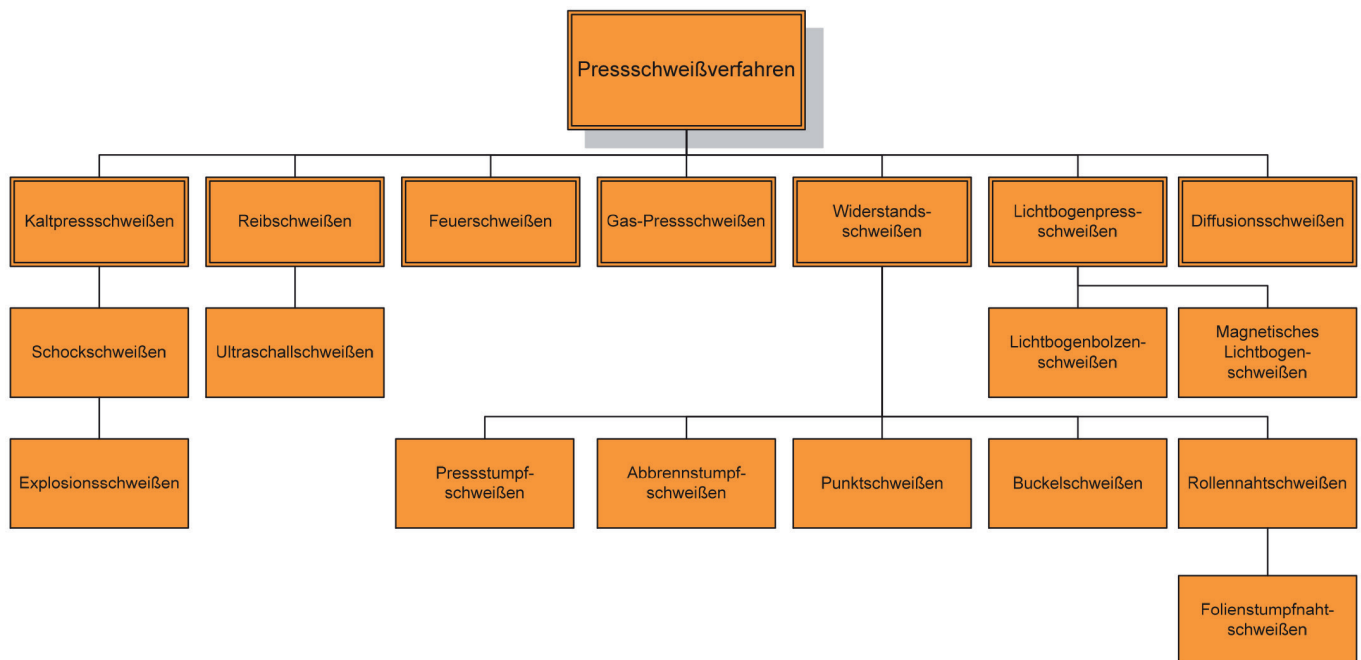


Abbildung 28: detaillierte Übersicht verschiedener Pressschweißverfahren

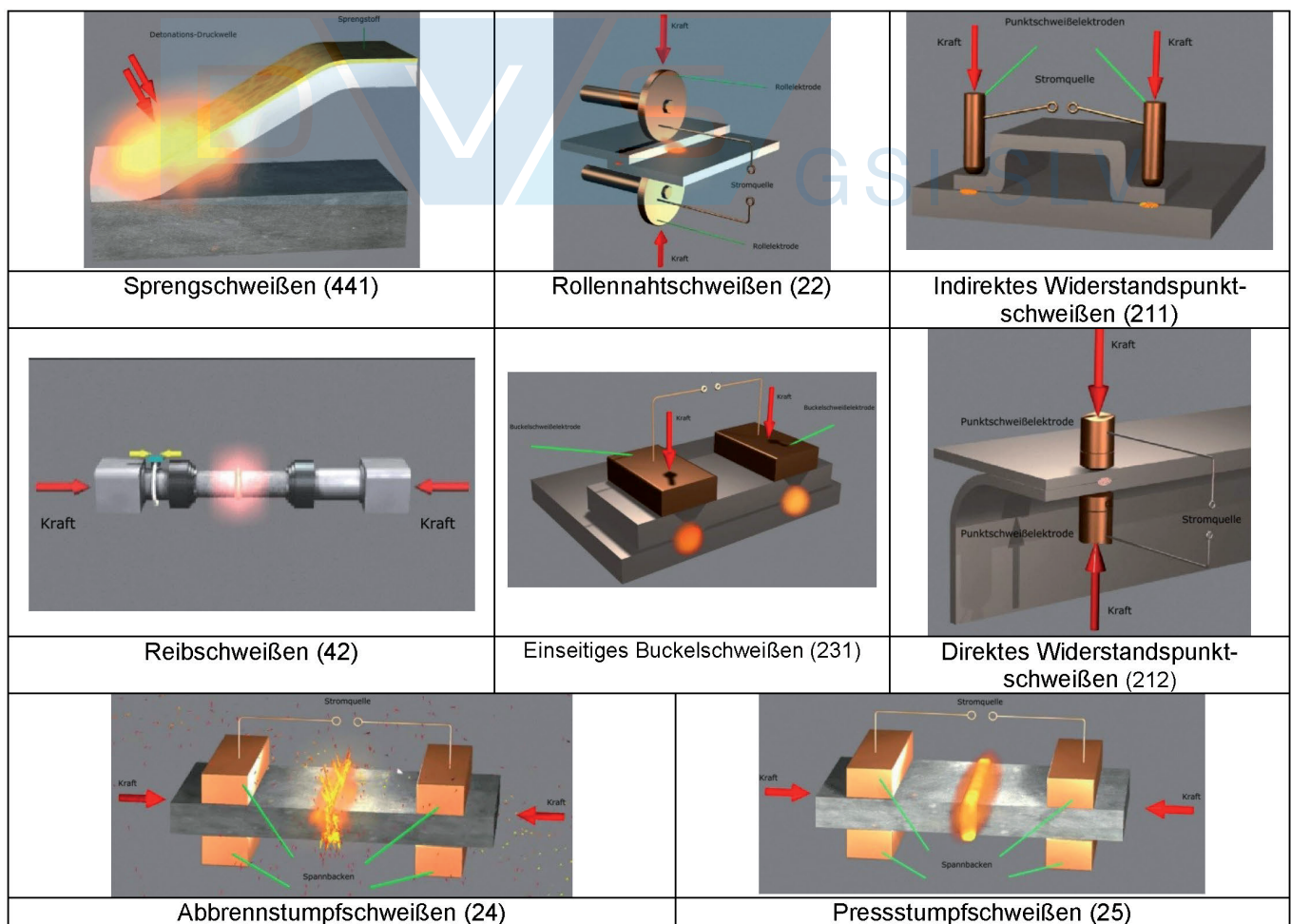
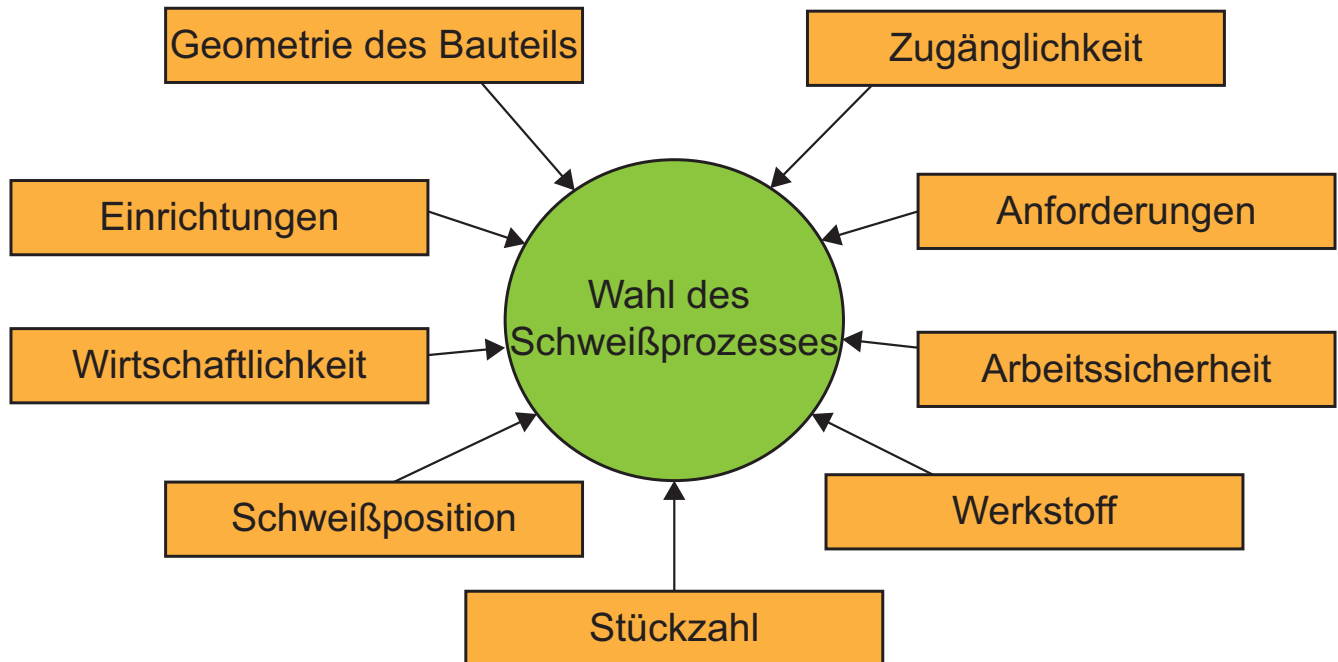


Abbildung 29: Beispielhafte, schematische Darstellungen von Pressschweißprozessen

6 Auswahl der Schweißverfahren

Bei der Auswahl der Schweißverfahren sollten folgende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

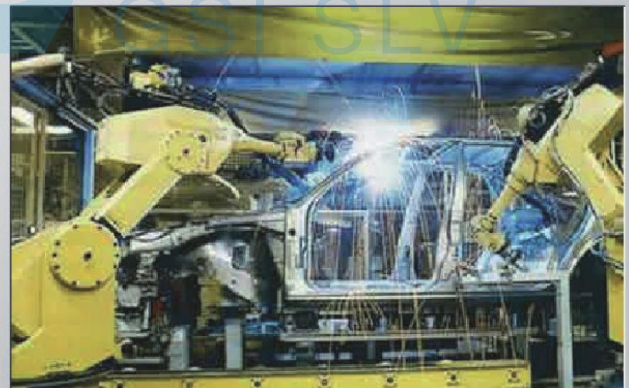


- Stückzahl: Insbesondere die Stückzahl und der Automatisierungsgrad eines Schweißverfahrens entscheiden die Auswahl.

Stückzahl

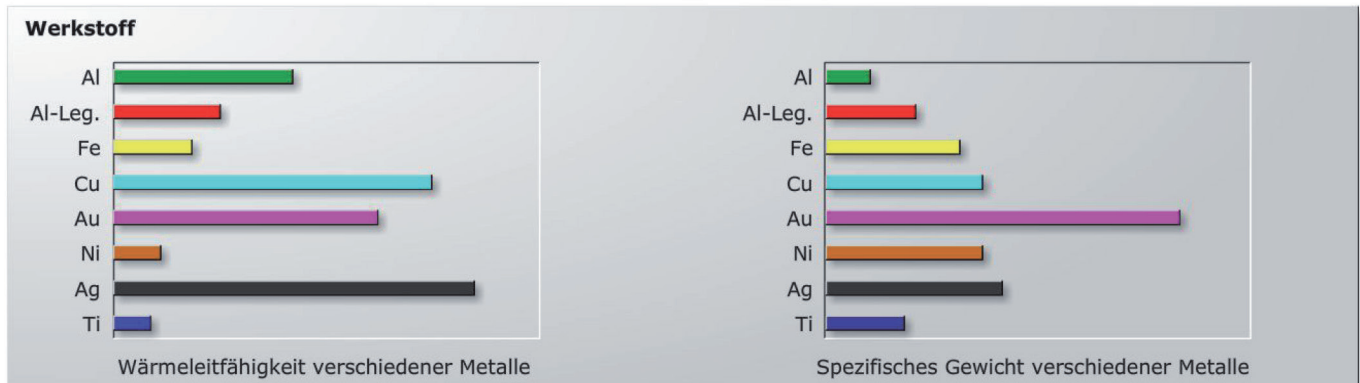


Schiffbau

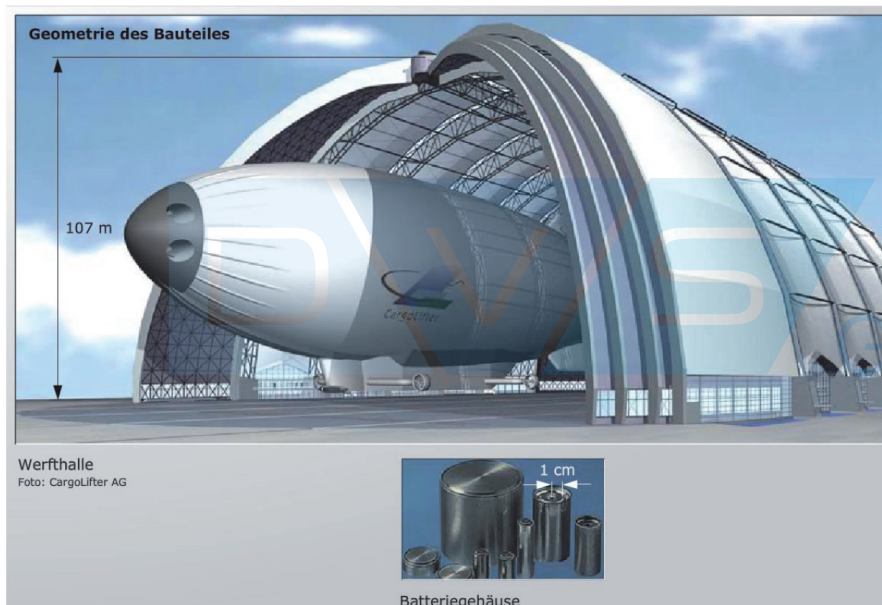


Autoindustrie

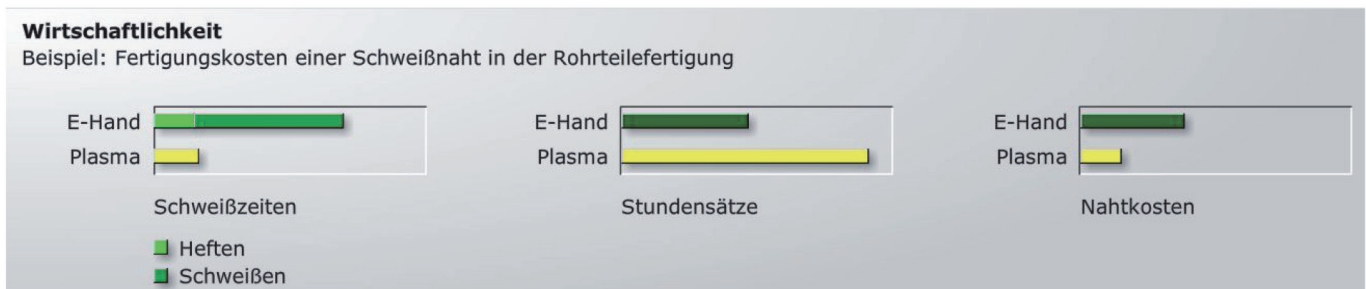
- Werkstoff: Nicht mit allen Schweißverfahren lassen sich bestimmte Werkstoffkombinationen schweißtechnisch verbinden.



- Geometrie des Bauteils: Insbesondere die Größe der Bauteile ist ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des Schweißverfahrens.



- Wirtschaftlichkeit: Kosten für Investition, Betrieb, Hilfs- und Zusatzwerkstoffe.

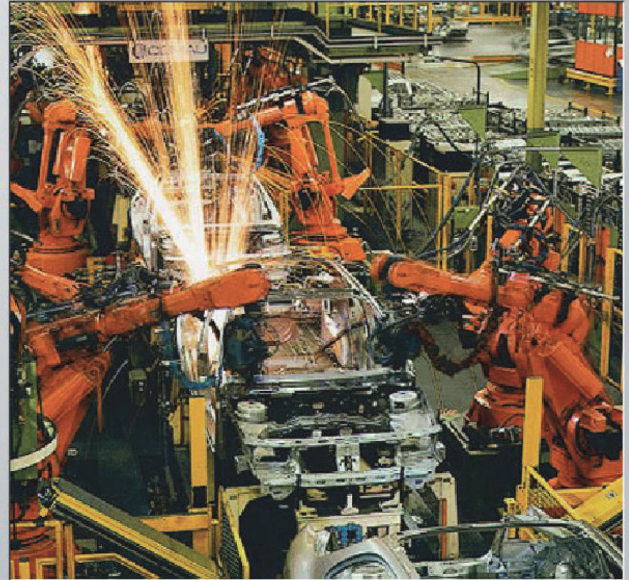


- Einrichtung: Berücksichtigung, ob und wie weit ein Schweißprozess durch entsprechende Einrichtungen realisiert werden kann.

Einrichtung



Plattform zum Verlegen von Offshore-Leitungen
Foto: EUROPIPE GmbH, Ratingen



Schweißroboter

- Anforderungen: Berücksichtigung von Betriebsanforderungen sowie Betriebsumgebung.

Anforderungen



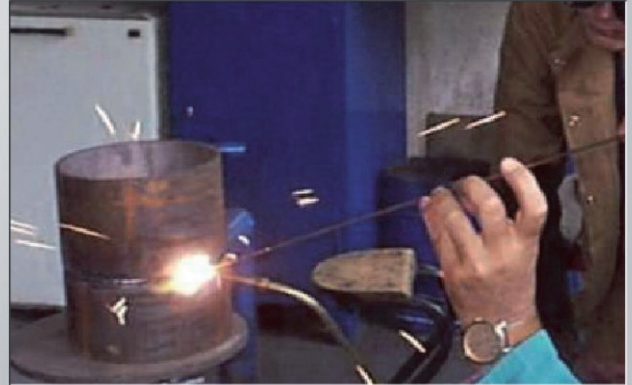
Pfannen für den Transport von flüssigen Stahl
Foto: ThyssenKrupp Stahl AG



Pipelines in arktischen Regionen
Foto: EUROPIPE GmbH, Ratingen

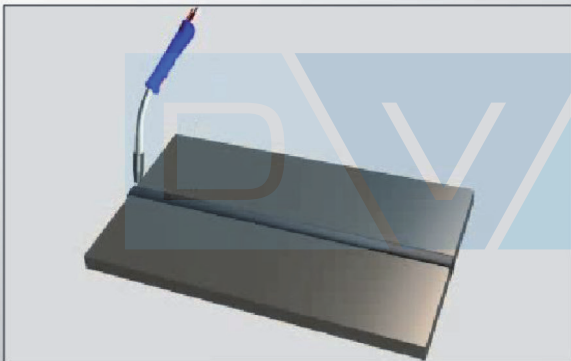
- Zugänglichkeit: Insbesondere bei beschränkter Zugänglichkeit muss die Auswahl des Schweißverfahrens zu den geforderten Schweißnahtqualitäten passen.

Zugänglichkeit



- Schweißposition: Nicht jedes Schweißverfahren lässt sich in jeder beliebigen Schweißposition anwenden.

Schweißposition



Eine Abgrenzung der Anwendungsbereiche der Schweißprozesse kann nach folgenden Gesichtspunkten/ Einflussfaktoren vorgenommen werden:

- nach den zu verschweißenden **Werkstoffen**
- nach der **Bauteilform** (Geometrie, Abmessungen) und den **Blech- oder Nahtdickenbereichen**
- nach der **Wirtschaftlichkeit** (Leistungsfähigkeit in Nahtlänge/Zeit, Abschmelzmenge/Zeit, Fertigungskosten)
- nach der **Menge/Zeit** (benötigte Stückzahl)
- nach **Fertigungsgesichtspunkten** oder nach der vorhandenen **Gerätetechnik** (Einzelfertigung, Serienfertigung, Massenfertigung)
- nach anderen **technologischen Gesichtspunkten** (Qualitätsanforderungen, Prüfumfang, Zuverlässigkeit)
- nach **konstruktiven Gesichtspunkten**, nach der **Art der Belastung** (vorwiegend statisch, schwingend, Lebensdauer, Zuverlässigkeit)

Das Merkblatt DVS 2938 "TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE KRITERIEN ZUR AUSWAHL DER FÜGEVERFAHREN IM FEINBLECHBEREICH BIS 3mm EINZELDICKE" zeigt, welche technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkte für den Dünnblechbereich zu berücksichtigen sind.

7 Arbeitsschutz - Arbeitssicherheit

Wie in vielen Bereichen der Arbeitswelt, finden sich auch in der Schweißtechnik viele Gefahren, die des Schweißers Gesundheit, sogar Leib und Leben bedrohen. Hierbei sind die akuten Verletzungsmöglichkeiten durch Hitze, elektrischen Strom oder durch Quetschen genauso zu sehen wie langfristig krank machende Rauche, Gase und Stäube. Aber auch Strahlung und elektromagnetische Emissionen mit ihrer kumulativen negativen Wirkung können die Gesundheit des Schweißpersonals gefährden (siehe auch Unterrichtseinheit 4.05).



8 Testfragen

1. Welche der folgenden Aussagen zum Schweißen sind richtig?

- ☐ Beim Schweißen wird immer ein Schweißzusatz verwendet.
- ☐ Beim Schweißen mit Kraft wird nie ein Schweißzusatz verwendet.
- ☐ Beim Schweißen mit Kraft wird immer ein Schweißzusatz verwendet.
- ☐ Schweißen ist das Vereinigen von Werkstoffen, häufig unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft, mit oder ohne Schweißzusatz.
- ☐ Durch Schweißhilfsstoffe kann das Schweißen erleichtert oder ermöglicht werden.

2. Welche der folgenden Aussagen zum Löten sind richtig?

- ☐ Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird dabei überschritten.
- ☐ Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird dabei nicht überschritten.
- ☐ Eine Anwendung des Lötens ist auch das Beschichten eines Werkstoffes.
- ☐ Löten kann nicht zum Beschichten eines Werkstoffes verwendet werden.
- ☐ Löten ist ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen und Beschichten.

3. Welche Aussagen zum Pressschweißen sind richtig?

- ☐ Es wird immer eine äußere Kraft benötigt.
- ☐ Es wird immer mit Zusatzwerkstoff gearbeitet.
- ☐ Beide Fügeflächen erfahren eine plastische Verformung.
- ☐ Es wird immer unter Schutzgas geschweißt.
- ☐ Der Lichtbogen kann als Energieträger eingesetzt werden.

4. Wie sind die Bewegungs- und Arbeitsabläufe beim vollmechanisierten WIG-Schweißen bzw. MSG-Schweißen definiert?

- ☐ Brennerführung mechanisch
- ☐ Brennerführung von Hand
- ☐ Schweißzusatzvorschub von Hand
- ☐ Schweißzusatzvorschub mechanisch
- ☐ Werkstückhandhabung von Hand

5. Welche der folgenden Aussagen über die Kennzahlen der Schweißverfahren sind richtig?

- ☐ Alle Lichtbogenschweißverfahren beginnen mit der Kennzahl 3.
- ☐ Alle Lichtbogenschweißverfahren beginnen mit der Kennzahl 1.
- ☐ Alle MSG-Verfahren beginnen mit der Kennzahl 13.
- ☐ Alle MSG-Verfahren beginnen mit der Kennzahl 32.
- ☐ Alle Unterpulververfahren beginnen mit der Kennzahl 12.

6. Die Widerstandsschweißverfahren werden mit welchen Buchstaben bezeichnet?

- ☐ R
- ☐ W
- ☐ WS
- ☐ RA
- ☐ RP

7. Welche der folgenden Schweißverfahren gehören zu den Schmelzschweißverfahren?

- ☐ Gasschweißen
- ☐ Reibschweißen
- ☐ Lichtbogenhandschweißen
- ☐ Unterpulverschweißen
- ☐ Abbrennstumpfschweißen

8. Der Lichtbogen wird als Energieträger bei welchen der folgenden Schweißverfahren eingesetzt?

- ☐ Wolframinertgasschweißen
- ☐ Rollennahtschweißen
- ☐ Punktschweißen
- ☐ Gasschweißen
- ☐ Metalllichtbogenschweißen

9. Typische Vertreter der Pressschweißverfahren sind:

- ☐ Punktschweißen
- ☐ Buckelschweißen
- ☐ MSG-Schweißen
- ☐ Feuerschweißen
- ☐ Autogenschweißen

10. Nach welchen Kriterien kann man das anzuwendende Schweißverfahren auswählen?

- ☐ Größe der Fertigungshalle
- ☐ Geometrie des Bauteils
- ☐ Qualifikation der Aufsichtsperson
- ☐ Wirtschaftlichkeit des Verfahrens
- ☐ Zugängigkeit der Schweißnaht

11. Welche Aussagen zum Schmelzschweißen sind richtig?

- ☐ Es wird immer ein äußere Kraft benötigt.
- ☐ Es kann mit Zusatzwerkstoff gearbeitet werden.
- ☐ Der Lichtbogen kann als Energieträger genutzt werden.
- ☐ Beide Fügeflächen werden aufgeschmolzen.
- ☐ Es kann nur mit inerten und aktiven Schutzgasen gemäß DIN EN ISO 14175 geschweißt werden.

12. Welche Aussagen zum Kleben sind richtig?

- ☐ Kleben ist ein thermisches Verfahren.
- ☐ Es entsteht eine feste, unlösbare Verbindung.
- ☐ Es wird ein synthetischer Klebstoff verwendet.
- ☐ Die Sauberkeit der Klebflächen spielt keine Rolle.
- ☐ Die Umgebungstemperatur darf beliebig hoch sein.

13. Schweißen wird unterteilt nach

- ☐ der Art des Energieträgers.
- ☐ dem physikalischen Ablauf des Schweißens.
- ☐ dem Grad der Mechanisierung.
- ☐ der Größe des Schmelzbades.
- ☐ der Handfertigkeit des Schweißers/Bedieners.

14. Welche Aussagen zum Auftragschweißen sind richtig?

- ☐ Der Grund- und Auftragwerkstoff sind immer artfremd.
- ☐ Panzerungen werden zum Verschleißschutz eingesetzt.
- ☐ Plattierungen werden zum Verschleißschutz eingesetzt.
- ☐ Der Aufmischungsgrad sollte möglichst groß sein.
- ☐ Der Aufmischungsgrad sollte möglichst gering sein.



Inhalt

1	Schweißgase	1
1.1	Acetylen (C_2H_2)	1
1.2	Propan (C_3H_8)	3
1.3	Erdgas (Methan) (CH_4)	3
1.4	Wasserstoff (H_2)	3
1.5	Ethylen (C_2H_4)	3
1.6	Propylen (C_3H_6)	3
1.7	Sauerstoff (O_2)	4
1.8	Umgang mit Druckgasflaschen	5
2	Acetylen-Sauerstoff-Flamme	6
2.1	Einstellen der Flamme	6
3	Druckminderer (DIN EN ISO 2503)	7
4	Schläuche und Schlauchanschlüsse für Gase	9
5	Schweißbrenner (Saug- oder Injektorbrenner) DIN EN ISO 5172	10
5.1	Aufbau und Wirkungsweise	10
5.1.1	Fehlfunktionen am Saugbrenner	12
6	Sicherheitseinrichtungen	13
7	Gasschweißen	15
7.1	Wirtschaftlicher Anwendungsbereich	15
7.2	Arbeitstechniken (NL/NR-Schweißen)	15
7.2.1	Nachlinksschweißen	15
7.2.2	Nachrechtsschweißen	15
7.3	Schweißstäbe zum Gasschweißen (DIN EN 12536)	16
7.4	Bezeichnung der Gasschweißstäbe	16
7.5	Kennzeichnung	16
7.6	Fugenformen beim Gasschweißen	17
8	Verwandte Verfahren	18
8.1	Flammrichten	18
8.1.1	Arbeitsregeln beim Flammrichten	19
8.2	Löten	22
8.3	Autogenes Brennschneiden	23
8.4	Flammwärmen	23
8.5	Flammstrahlen	24
8.6	Trennen mit der Sauerstofflanze	25
9	Literatur	26
10	Testfragen	27

Die Autogentechnik umfasst alle Arbeitsverfahren, bei denen Werkstoffe der Einwirkung einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme oder einer Brenngas-Luft-Flamme ausgesetzt sind. Als Schweißgase bezeichnet man alle in der Autogentechnik verwendeten Brenngase und reinen Sauerstoff.

1 Schweißgase

1.1 Acetylen (C_2H_2)

Acetylen kann als Brenngas für alle Arbeiten in der Autogentechnik verwendet werden. Zum Gasschweißen wird ausschließlich Acetylen verwendet. Gründe hierfür sind die hohe **Flammentemperatur** sowie die hohe **Flammenleistung** des Gases. Weitere Vorteile sind die konzentrierte Wärmeeinbringung und die reduzierende Wirkung der Flamme.

Acetylen ist eine chemische Verbindung aus Kohlenstoff und Wasserstoff. Es entsteht, wenn Calciumcarbid mit Wasser zusammen gebracht wird. Als Nebenprodukt erhält man Kalkschlamm. Acetylen wird zunehmend auch aus Erdöl hergestellt.

Eigenschaften und Gefahren beim Umgang mit Acetylen

Acetylen ist ein farbloses, ungiftiges, aber schwach narkotisches Gas. In reinem Zustand ist es geruchlos. Das handelsübliche Acetylen enthält Spuren von Verunreinigungen, die dem Gas seinen knoblauchähnlichen Geruch geben. Es neigt unter erhöhten Druck- und Temperaturverhältnissen zum Zerfall in seine Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff. Der höchstzulässige Überdruck in Versorgungsleitungen ist daher begrenzt auf

maximal 1,5 bar Überdruck

Acetylen ist bei Konzentrationen von 2,4 bis 80% in Luft explosiv. Es ist leichter als Luft und steigt nach oben. Es reagiert mit Kupfer und Kupferlegierungen mit über 70% Kupferanteil sowie mit Silber und Silberlegierungen.

Speicherung von Acetylen

Acetylen zerfällt bei höherem Druck in seine Bestandteile Kohlenstoff und Wasserstoff und muss daher anders als alle anderen Brenngase gespeichert werden. Um den Zerfall zu verhindern, muss Acetylen in vielen kleinen Kammern gespeichert werden. Dies erreicht man durch eine **poröse Masse**, die in die Stahlflasche eingebracht wird. Um das Speichervermögen noch zu erhöhen, wird dieser porösen Masse **Aceton** beigegeben, in dem sich das Acetylen löst.

Acetylenflasche

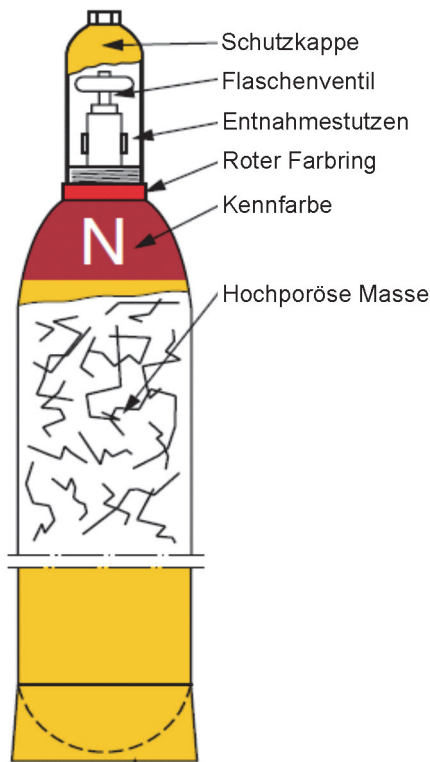


Abbildung 1: Acetylenflasche

Tabelle 1: Lieferarten (Druckgasflasche, Lösungsmittel Aceton)

Typ	Rauminhalt (Liter)	Gewicht mit Füllung (kg)	Fülldruck (bar)	Acetylen-Inhalt (kg)
10	10	23	18	1,6
20	20	42	18	3,3
40	40	74	18	6,3
48	40	76	19	8,0
50	50	77	19	10,0

Das Lösungsvermögen von Aceton ist temperatur- und druckabhängig. 1 Liter Aceton löst ca. 25 Liter Acetylen bei 15°C und 1 bar Druck. Bei einem Druck von ca. 20 bar kann so 1 Liter Aceton bis zu 500 Liter Acetylen lösen. Neben dem Druck ist das Lösungsvermögen temperaturabhängig.

Niedrige Temperaturen: Hohes Lösungsvermögen
Hohe Temperaturen: Niedriges Lösungsvermögen

Folge:

Änderung des Flaschendruck bei gleichem Inhalt. So sinkt z. B. der Flaschendruck einer neu gefüllten Acetylenflasche von ca. 19 bar bei 20°C auf ca. 12 bar bei Temperaturen unter 0°C ab. Die Inhaltskontrolle über den Flaschendruck ist daher nur bedingt möglich.

Arbeitsregeln

- Die Entnahmemenge ist bei **Dauerbetrieb auf 500 bis 700 l/h** begrenzt. Kurzzeitig (bis 20 min.) dürfen **1000 l/h** entnommen werden. (Die angegebenen Werte beziehen sich auf die 40-l-Flasche).
- Beim Überschreiten der höchstzulässigen Entnahmemenge kann das Lösungsmittel das Acetylen nicht schnell genug freigeben. Es wird aus der Flasche gesaugt und beschädigt Druckminderer, Sicherheitseinrichtungen und den Brenngasschlauch.
- Wird eine größere Menge Acetylen benötigt, sind mehrere Einzelflaschen mithilfe von Flaschenkuppelungen miteinander zu verbinden. Dabei ist auf annähernd gleichen Inhaltsdruck und die gleiche Art des Lösungsmittels zu achten. Alternative: Flaschenbündel verwenden.

Berechnungsbeispiel für die Entnahmemenge:

Formel: Mittelwert des Schweißbrenners x 100

z. B. Brennergröße 4 - 6:

$$\frac{(4 + 6)}{2} = 5 \times 100 = 500 \text{ l/h}$$

z. B. Brennergröße 20 - 30:

$$\frac{(20 + 30)}{2} = 25 \times 100 = 2500 \text{ l/h}$$

Da im letzten Beispiel die zulässige Entnahmemenge aus einer Einzelflasche erheblich überschritten wird, sind im Dauerbetrieb **4 Flaschen** zusammen zu koppeln.

1.2 Propan (C_3H_8)

Propan ist ein farbloses, ungiftiges, aber schwach narkotisches Gas. Propan wird hauptsächlich aus Erdöl erzeugt. Es ist einfach zu handhaben, da es im flüssigen Zustand bei Raumtemperatur unter seinem eigenen Dampfdruck von nur 7 bar gelagert werden kann. Propanflaschen dürfen keinen hohen Temperaturen ausgesetzt werden. Bei höheren Temperaturen dehnt sich das Gas aus und füllt das gesamte Flaschenvolumen aus. Es besteht die Gefahr des Platzens der Flasche. Propan hat einen höheren Heizwert als Acetylen, es hat aber eine wesentlich geringere Flammenleistung, die beim Schweißen von besonderer Bedeutung ist. Es ist daher nicht zum Schweißen geeignet. Die Flammentemperatur ist niedriger als bei der Acetylen-Sauerstoff-Flamme, die zur Verbrennung erforderliche Sauerstoffmenge ist fast viermal so hoch wie bei Acetylen. Propan hat eine niedrige Explosionsgrenze sowie eine hohe Dichte. Unkontrolliert ausströmendes Gas sammelt sich in tiefer gelegenen Stellen.

1.3 Erdgas (Methan) (CH_4)

Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan. Die Zusammensetzung hängt vom Erdgasvorkommen ab, sodass auch die Verbrennungseigenschaften unterschiedlich sind. Erdgas wird hauptsächlich für Heizzwecke verwendet. Es kann in komprimierter Form in Flaschen gelagert werden, wird aber in der Regel direkt über Rohrleitungen zu den Kunden geliefert. Methan ist ein leichtes Gas und seine untere Explosionsgrenze ist höher als bei den meisten anderen Gasen. Der Heizwert ist niedrig und in der Primärflamme wird wenig Wärme erzeugt.

1.4 Wasserstoff (H_2)

Wasserstoff ist ein farbloses, geruchloses und ungiftiges Gas. Es ist das leichteste aller Gase. Es ist ein sehr leicht entzündbares Gas und brennt mit einer nicht sichtbaren Flamme. Wasserstoff wird industriell durch Elektrolyse des Wassers erzeugt. Es wird gasförmig unter hohem Druck in Flaschen oder im flüssigen Zustand transportiert.

1.5 Ethylen (C_2H_4)

Ethylen ist ein farbloses Gas mit süßlichem, leicht modrigem Geruch. Es ist schwach giftig. Es kann beim Brennschneiden und ähnlichen Verfahren eingesetzt werden. Der Heizwert ist in etwa gleich wie bei Acetylen, jedoch wird eine geringere Wärmemenge in der Primärflamme erzeugt.

1.6 Propylen (C_3H_6)

Propylen ist ein farbloses Gas mit leicht süßlichem Geruch. Es ist ungiftig, hat aber einen schwachen narkotischen Effekt. Es kann beim Brennschneiden und ähnlichen Verfahren eingesetzt werden. Propylen wird als Flüssiggas geliefert. Die Eigenschaften sind denen von Propan ähnlich.

Tabelle 2: Physikalische Eigenschaften von Brenngasen

Brenngas	Heizwert MJ/m ³	Verbrennungs- geschwindigkeit m/s	Flammen- temperatur °C	Flammen- leistung kW/cm ²	Dichte kg/m ³	Explosions- grenzen an Luft %
Wasserstoff	10,8	8,9	2.500	13,98	0,08	4,0...74,5
Acetylen	57,0	13,5	3.150	42,74	1,09	2,4...80,0
Propan	93,2	3,7	2.750	10,27	1,88	2,0...9,5
Erdgas	36,0	3,3	2.770	8,51	0,67	5,0...15,0

1.7 Sauerstoff (O₂)

Sauerstoffherstellung/Eigenschaften/Speicherung

Die Gewinnung des Sauerstoffs erfolgt fast ausschließlich durch Luftverflüssigung mit anschließender Zerlegung der Luft in ihre Bestandteile. Dies geschieht aufgrund der unterschiedlichen Siedepunkte der einzelnen Komponenten. Der so gewonnene Sauerstoff weist eine Reinheit von 99,999% (5.0) auf. Die Standardreinheit von in Flaschen abgefülltem Sauerstoff ist 99,5% (2.5).

Eigenschaften und Gefahren beim Umgang mit Sauerstoff

Sauerstoff ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas mit einer Dichte von 1,43 kg/m³ (schwerer als Luft). Verbrennungsreaktionen laufen schon bei geringfügig erhöhtem Sauerstoffanteil schneller als in Luft ab. Bei Sauerstoffkonzentrationen ab 30% können sie explosionsartig vor sich gehen.

- Bei Berührung von unter Druck stehendem Sauerstoff mit Fett oder Öl kann es zu einer Selbstentzündung kommen.
- Die maximale Entnahmemenge ist abhängig von der Flaschengröße und der maximalen Durchflussmenge des Druckminderers. Überhöhte Entnahmemengen führen zur Vereisung und zum Einfrieren des Druckminderers.
- Sauerstoffflaschenventile langsam öffnen, sonst kann es durch den Druckstoß zum Ausbrennen des Druckminderers kommen.
- Sauerstoff niemals zum Belüften von Behältern, Räumen usw. verwenden. Im Vergleich zur Luft sind folgende Wirkungen des Sauerstoffs zu berücksichtigen:

- Die erforderlichen Zündenergien sind wesentlich geringer,
- Die Zündtemperaturen der Stoffe liegen niedriger,
- Die Verbrennungstemperaturen und Verbrennungsgeschwindigkeiten erreichen höhere Werte.

Speicherung von Sauerstoff

Sauerstoff wird unter hohem Druck in gasförmigem Zustand in der Stahlflasche gespeichert. Stand der Technik sind heute überwiegend Gasflaschen mit einem Fülldruck von 200 bar. Neuere Flaschen auch 300 bar.

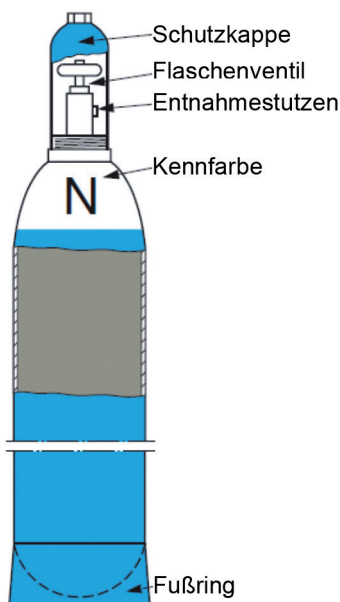


Tabelle 3: Stahlflaschen für gasförmigen Sauerstoff

Typ	Flaschenvolumen (Liter)	Inhaltsdruck (bar)	Sauerstoffmenge (Liter)
50	50	200	10.000
40	40	150	6.000
10	10	200	2.000

Die maximale Entnahmemenge ist abhängig von der Flaschengröße und der Durchflussmenge des Druckminderers.

Abbildung 2: Sauerstoffflasche

Die Speicherung kann auch in flüssiger Form in wärmeisolierten Tanks erfolgen. In einem Verdampferteil wird der flüssige Sauerstoff in gasförmigen zurückverwandelt. Dabei ergibt 1 Liter flüssiger Sauerstoff etwa 850 Liter gasförmigen Sauerstoff.

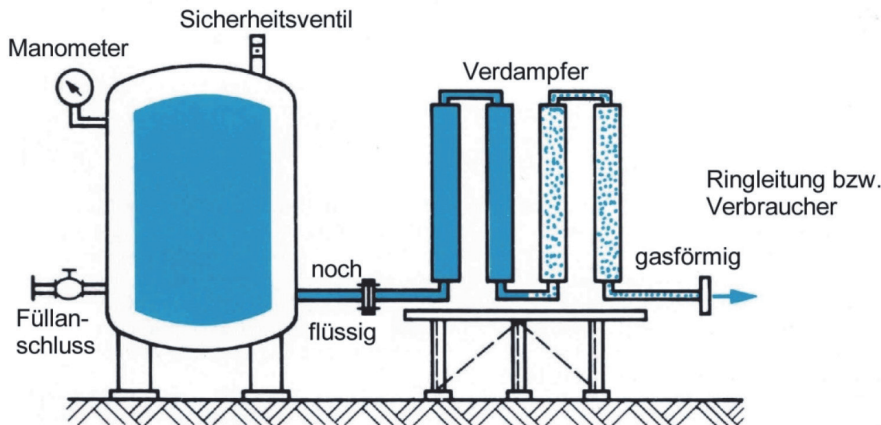


Abbildung 3: Kaltvergaseranlage

1.8 Umgang mit Druckgasflaschen

- Druckgasflaschen dürfen nicht geworfen, gestoßen oder liegend gerollt werden.
- Nur mit aufgeschraubter Schutzkappe transportieren, lagern und bereitstellen.
- Gegen Umfallen mit Ketten oder Schellen schützen.
- Nicht in Ecken oder im Bereich von Treppen und engen Durchgängen aufstellen.
- Sauerstoffflaschen nicht ruckartig öffnen (Stauwärme).
- Vor starker Erwärmung schützen.
- Das Umfüllen von großen in kleine Flaschen erfordert spezielle Fachkenntnisse und ist daher nicht zulässig.
- Beim Transport von Gasflaschen im öffentlichen Straßenverkehr ist die Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit der Eisenbahn und im Binnenschiffsverkehr (GGVSEB) zu beachten.
- Druckgasflaschen müssen regelmäßig geprüft werden.

2 Acetylen-Sauerstoff-Flamme

Die Flamme entsteht durch Zünden des Gasgemisches, das aus der Brennerdüse ausströmt. Die Flamme besteht aus dem Flammenkegel, und der Beiflamme. Im Flammenkegel erfolgt eine Teilverbrennung des Acetylens mit dem aus der Flasche zugeführten Sauerstoff. In der Beiflamme erfolgt unter Sauerstoffentnahme aus der Luft die vollständige Verbrennung des Gases. Die Höchsttemperatur beträgt ca. 3200°C in einem Abstand von 2 bis 5 mm nach dem Flammenkegel. Die Schweißflamme hat nicht nur die Aufgabe, die Verbindungsflächen und den Zusatzwerkstoff aufzuschmelzen, sondern auch das Schweißbad vor den schädlichen Einflüssen aus der Luft zu schützen.

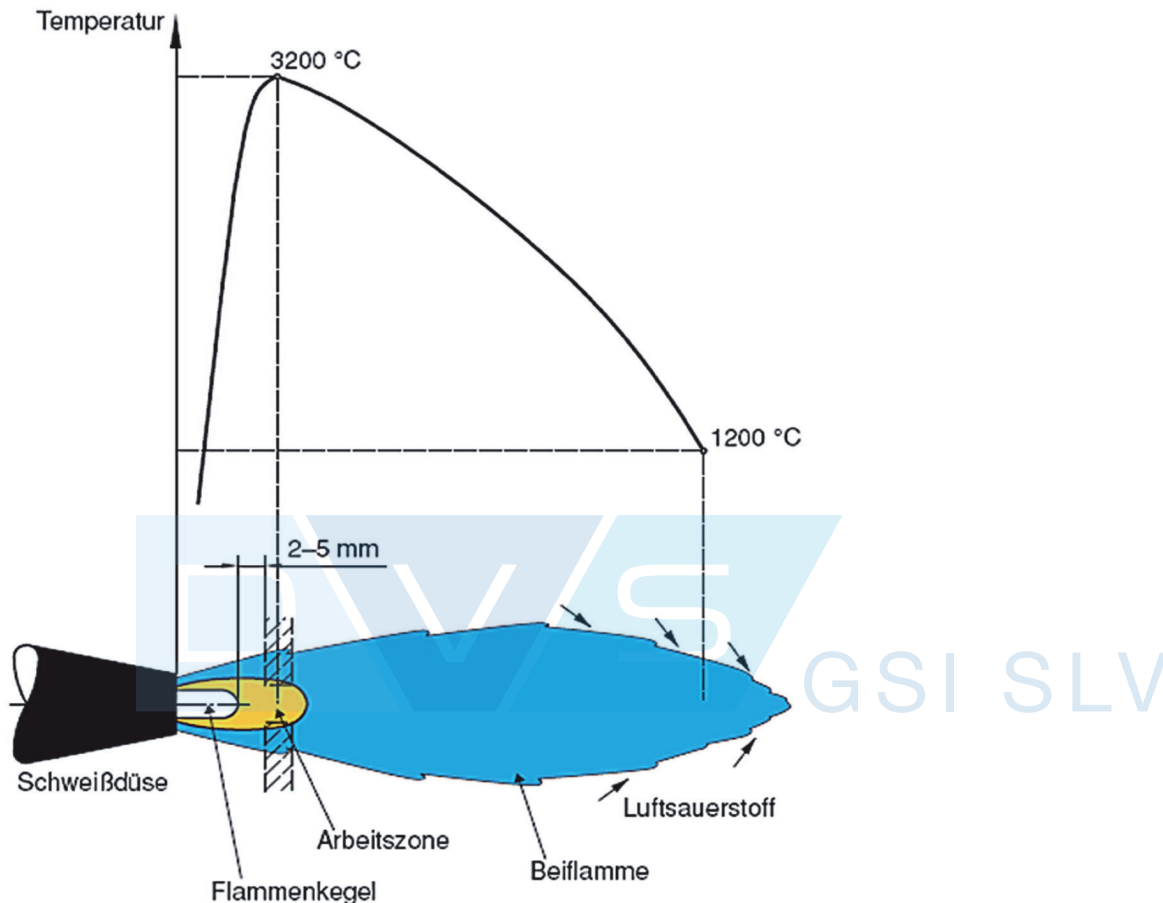


Abbildung 4: Acetylen-Sauerstoff-Flamme

2.1 Einstellen der Flamme

- Zum Schweißen von Eisenwerkstoffen wird das Verhältnis Acetylen/Sauerstoff 1:1 eingestellt (normale Flamme).
- Acetylenüberschuss wirkt aufkohlend und aufhärtend.
- Sauerstoffüberschuss führt zur Oxidation (Verbrennung) des Werkstoffs.
- Die Flamme kann durch die Einstellung unterschiedlicher Gasmengen an den Regelventilen hart oder weich eingestellt werden.

3 Druckminderer (DIN EN ISO 2503)

Der Druckminderer hat die Aufgabe, den Flaschendruck auf den Arbeitsdruck zu vermindern und diesen während der Gasentnahme konstant zu halten.

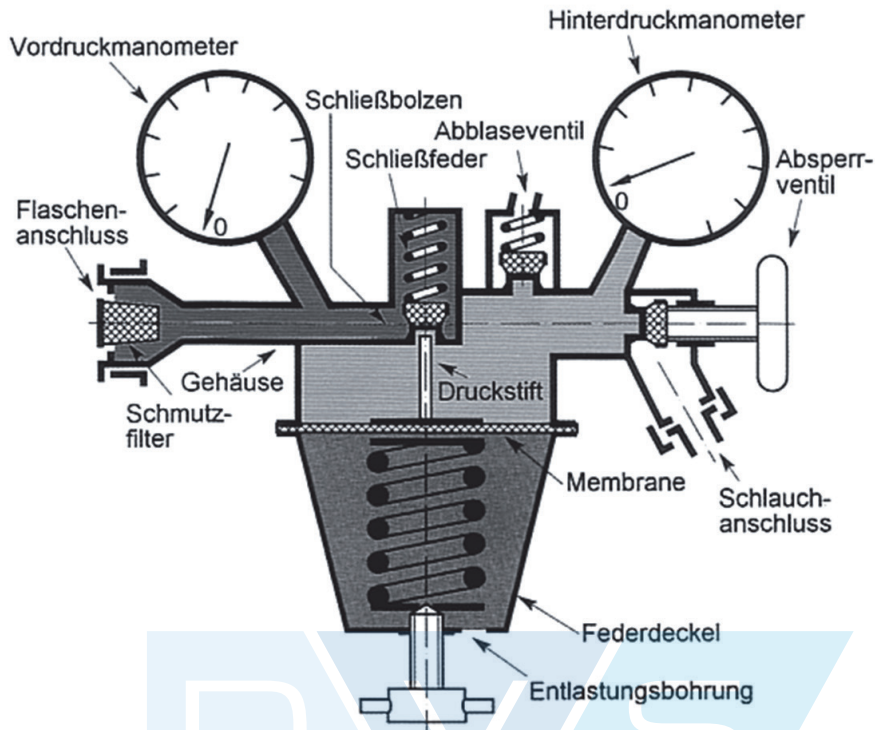


Abbildung 5: Druckminderer

Konstruktionsmerkmale

- Sauerstoffdruckminderer müssen ausbrennsicher sein, alle Teile sind öl- und fettfrei zu halten.
- Acetylendruckminderer müssen so konstruiert und hergestellt sein, dass der maximale Hinterdruck von **1,5 bar** nicht überschritten werden kann.
- Ein Schmutzfilter muss eingebaut sein.

Tabelle 4: Erkennungsmerkmale von Druckminderern

Beschriftung	Sauerstoff	Acetylen	Propan
Kennbuchstabe	O	A	P
Flaschenanschluss	R ¾" Rechtsgewinde	Spannbügelanschluss	W 21,8 x 1/14" Linksgewinde
Schlauchanschluss	Rechtsgewinde	Linksgewinde	Linksgewinde

Arbeitsweise

Der Druckminderer ist ein membrangesteuertes Ventil. Wenn die Einstellschraube hineingedreht wird, wird über Stellfeder, Membrane und Regelventilstift das Regelventil angehoben und geöffnet. Über die Einstellschraube wird somit der Arbeitsdruck eingestellt. Das strömende Gas übt einen Gegendruck auf die Membrane aus. Während der Gasentnahme herrscht an der Membrane Gleichgewicht zwischen der Kraft der Stellfeder und dem Gasgegendruck und der Kraft der Regelventilfeder.

Arbeitsregeln

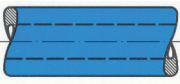
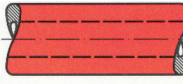
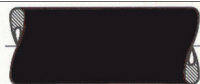
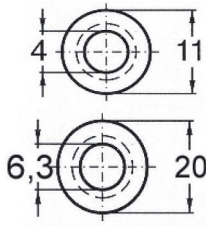
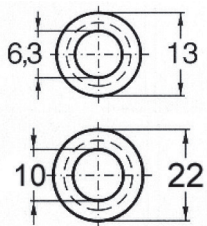
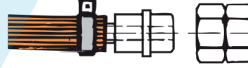
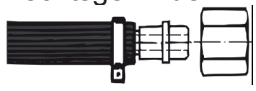
- Vor dem Anschließen des Druckminderers den Flaschenanschluss auf Sauberkeit prüfen (ausblasen) und die Dichtung kontrollieren.
- Die Einstellschraube ist zu entlasten, wenn der Druckminderer nicht in Betrieb ist.
- Für Dichtheitsprüfungen ist Lecksuchspray zu verwenden. Seifenlauge ist bei Sauerstoff wegen möglicher Fettbestandteile nicht zulässig.



4 Schläuche und Schlauchanschlüsse für Gase

Schlauchleitungen nach DIN EN ISO 3821 sind farblich den einzelnen Gasen bzw. Gasgruppen zugeordnet.

Tabelle 5: Kennfarben und Nennweiten von Gasschläuchen

Merkmale	Sauerstoff	Acetylen, Wasserstoff	Propangas, Erdgas	Schutzgase
Innendurchmesser in mm	4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0;			
Kennfarbe	blau	rot	orange	schwarz
Beispiele				
				
Anschlüsse	Rechtsgewinde 	Linksgewinde mit Kerbe 	Linksgewinde mit Kerbe 	Rechtsgewinde 

Folgende **Arbeitsregeln** sind zu beachten.

- Angebrannte und poröse Gasschläuche müssen ausgewechselt werden.
- Zur Befestigung darf kein Bindendraht verwendet werden.
- Gasschläuche dürfen nicht über die Flaschen gehängt werden.
- Zur Verbindung von Gasschläuchen sind Doppelschlauchtüllen zu verwenden.
- Bei Acetylen darf kein Kupfer oder kupferhaltige Werkstoffe mit mehr als 70% Kupfer verwendet werden.
- Die Mindestlänge der Gasschläuche beträgt drei Meter.

5 Schweißbrenner (Saug- oder Injektorbrenner) DIN EN ISO 5172

Im Schweißbrenner werden Acetylen und Sauerstoff miteinander gemischt. Das Mischungsverhältnis wird konstant gehalten. Die Strömungsgeschwindigkeit des Gasgemisches wird der Zündgeschwindigkeit angepasst und der Flammenkegel wird geformt.

5.1 Aufbau und Wirkungsweise

Der Schweißbrenner besteht aus den Hauptteilen Griffstück (mit Schlauchanschlüssen und Brennventilen) und dem Schweißeinsatz (mit Injektor, Mischdüse, Mischrohr und Schweißdüse). Der Injektor besteht aus der Druck- und der Saugdüse.

Durch die Druckdüse strömt der Sauerstoff mit einem Arbeitsdruck von 2,5 bar. Der Sauerstoff bewirkt durch seine hohe Strömungsgeschwindigkeit beim Austreten aus der Druckdüse eine Saugwirkung im Bereich der Saugdüse. Acetylen strömt mit einem Druck von 0,2 bis 0,7 bar in die Saugdüse und wird durch den Sauerstoffstrahl in die Mischdüse gesaugt, im Mischrohr mit Sauerstoff gemischt und beim Austritt aus der Schweißdüse gezündet.

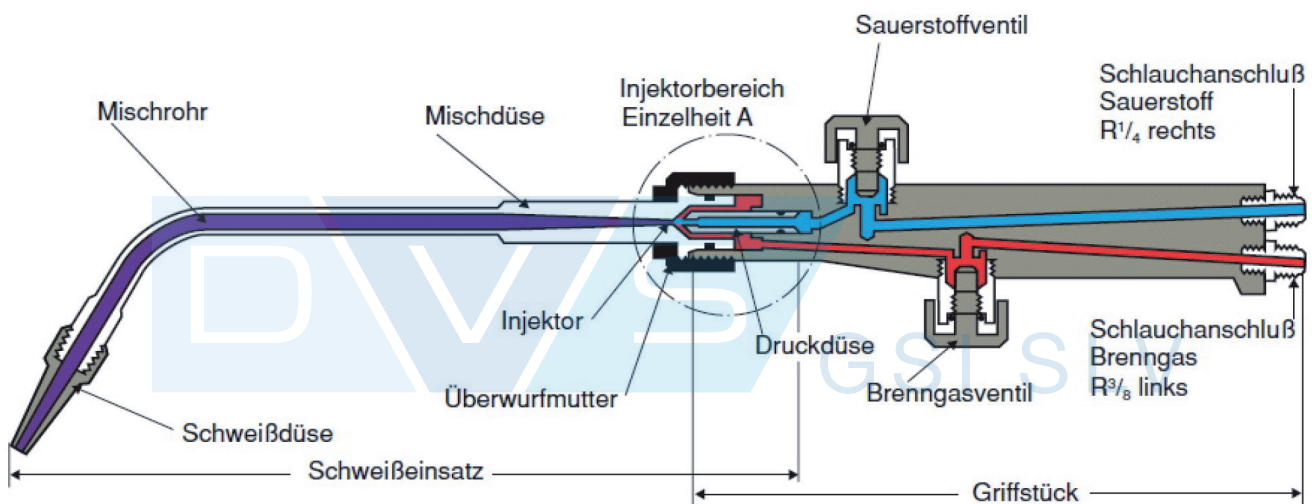


Abbildung 6: Schweißbrenner

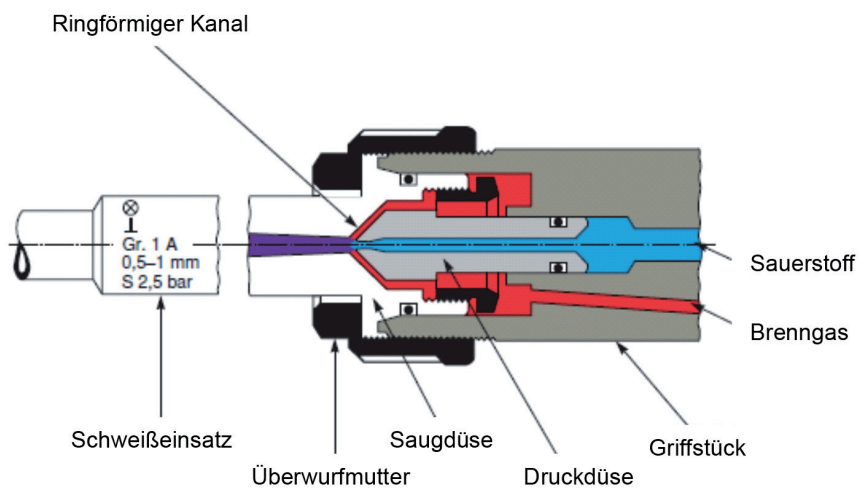


Abbildung 7: Injektorbereich eines Saugbrenners (Einzelheit A)

Beschriftung:	⊗	= Herstellerzeichen
	A	= Gasart (Acetylen)
	i	= Injektorbrenner (Saugbrenner)
	1	= Größe 1, Werkstückdicke von 0,5 bis 0,1 mm, die mit diesem Schweißeinsetz geschweißt wird
	S 2,5 bar	= einzustellender Arbeitsdruck bei Sauerstoff



5.1.1 Fehlfunktionen am Saugbrenner

Abknallen

Merkmal:	Knallendes Geräusch, explosionsartiges Verspritzen des Schmelzbades
Ursache:	Ausströmgeschwindigkeit geringer als Zündgeschwindigkeit (Flamme zu klein eingestellt); Brennerspitze ausgeweitet
Verhalten:	Brennerspitze austauschen, Flamme größer einstellen

Rückzündung

Merkmal:	Schlagartiges Verlöschen der Flamme, deutliches schrilles Pfeifen, starke Erwärmung des Schweißesatzes
Ursache:	Zu starke Erwärmung des Schweißesatzes, mehrere Abknaller in Folge, lockere Schweißdüse (Brennerspitze)
Verhalten:	Sofort beide Ventile am Griffstück schließen und den Brenner kühlen.

Flammenrückschlag

Merkmal:	Lauter Explosionsknall, Zerbersten des Acetylschlauchs an mehreren Stellen, starke Rußentwicklung, eigenartiger Geruch
Ursache:	Starke Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit, insbesondere bei großen Brennern, fortdauernde Rückzündung, undichte Verbindung zwischen Griffstück und Schweißesatz, z.B. lockere Überwurfmutter.
Verhalten:	Sofort beide Flaschenventile schließen. Druckminderer bei der Acetylenflasche abbauen und die Flasche kontrollieren

Prüfen des Saugbrenners

Die Funktionsfähigkeit des Saugbrenners kann mittels **Saugprobe** geprüft werden.

Vorgehensweise:

1. Sauerstoff betriebsfertig machen, d.h. Druck einstellen.
2. Acetylenzufuhr absperren (Flasche schließen).
3. Acetylschlauch am Griffstück abschrauben.
4. Acetylen- und Sauerstoffventil am Griffstück öffnen.

Bei einwandfreiem und funktionsfähigem Schweißbrenner ist nun am Acetylenanschluss des Griffstücks eine deutliche Saugwirkung spürbar.

Arbeitsregeln

- Überwurfmutter am Griffstück fest anziehen.
- Drücke richtig einstellen (Sauerstoff gemäß Einprägung, Acetylen ca. 0,4 bar).
- **Reihenfolge beim Zünden der Flamme:** Zuerst Sauerstoffventil am Griffstück, dann Acetylenventil öffnen, Flamme zünden und einstellen.
- **Reihenfolge beim Löschen der Flamme:** Zuerst Acetylenventil, dann Sauerstoffventil schließen.

6 Sicherheitseinrichtungen

Fehlerhafte Bedienung oder mangelhafte Wartung von Schweiß- oder Schneideinrichtungen können Flammendurchschläge vom Brenner bis in die Brenngasflasche zur Folge haben. Dabei kann es zum Ausbrennen von Druckminderer und Manometer, zum Platzen des Schlauches, zur Zerstörung des Schweißbrenners oder zur Flaschenexplosion kommen. Gründe für Flammenrückschläge sind zum Beispiel verschmutzte Brennerdüsen, lockere Verschraubungen zwischen Schweiß- oder Schneideinsatz und Griffstück oder defekte Dichtungen im Bereich des Brenners. Diese Fehler können nicht immer ausgeschlossen werden, so dass entsprechende Sicherheitseinrichtungen erforderlich werden. Unfallverhütungsvorschriften schreiben vor, dass jede Entnahmestelle für Verbrauchsgeräte (z.B. Schweißbrenner), in denen Acetylen mit Sauerstoff oder Druckluft verbrannt wird, mit einer Sicherheitseinrichtung auszurüsten ist. Dabei werden an Acetylenflaschenbatterie- und Einzelflaschenanlagen unterschiedliche Anforderungen gestellt.

Entnahmestellensicherungen für Flaschenbatterieanlagen

An jeder Entnahmestelle einer Acetylenflaschenbündel- oder Acetylenflaschenbatterieanlage muss eine Sicherheitseinrichtung eingebaut sein.

- Sie muss Folgendes verhindern: Flammendurchschläge vom Brenner in das Leitungsnetz
- Rücktritt von Sauerstoff in das Leitungsnetz für Brenngas
- Nachströmen von Brenngas nach einem Flammenrückschlag

Die Sicherheitseinrichtungen sind dazu mit einer Flammensperre (Sintermetall), einem Gasrücktrittsventil und einer Nachströmsperre ausgerüstet.

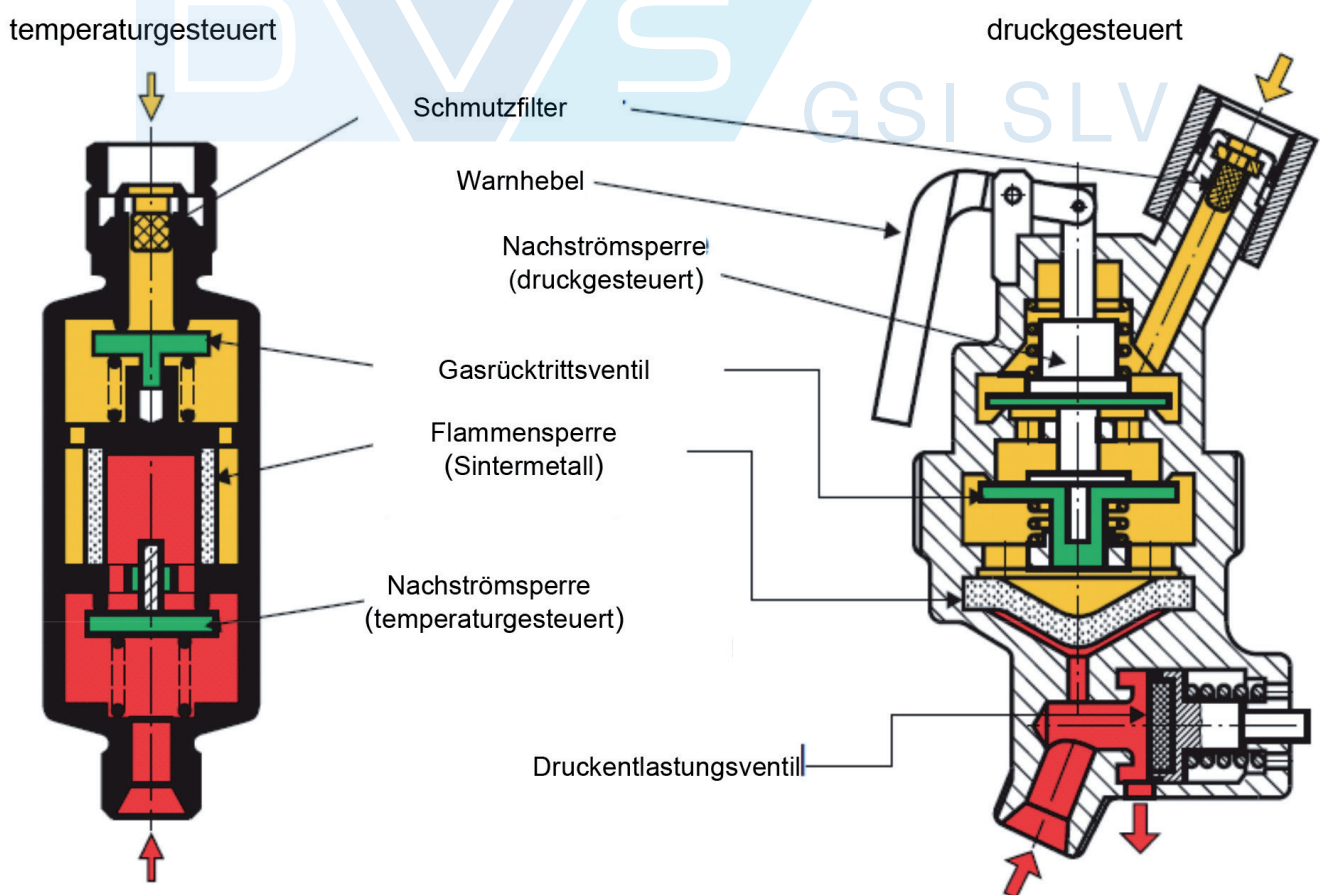


Abbildung 8: Entnahmestellensicherungen

Absicherung von Einzelflaschen

Wenn aus einer Acetylenflasche nur ein einzelnes Verbrauchsgerät versorgt wird, kann anstelle der Entnahmestellensicherung eine **Einzelflaschensicherung** verwendet werden. Sie schützt vor Gasrücktritt und Flammendurchschlag, sie hat jedoch keine Nachströmsperre.

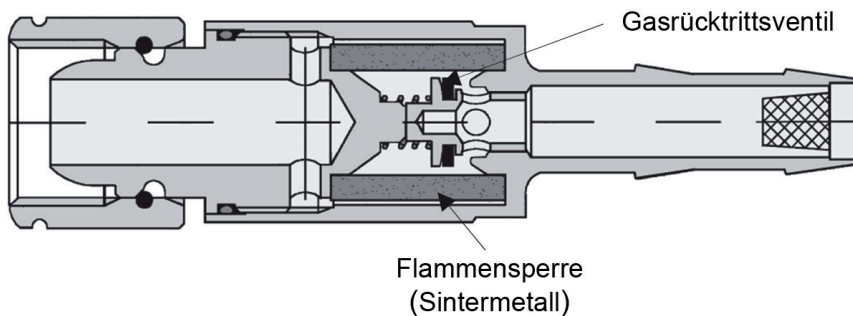


Abbildung 9: Einzelflaschensicherung

Einbaumöglichkeiten

Einzelflaschensicherungen können eingebaut werden

- unmittelbar nach dem Druckminderer
- in den Schlauch
- unmittelbar an das Griffstück

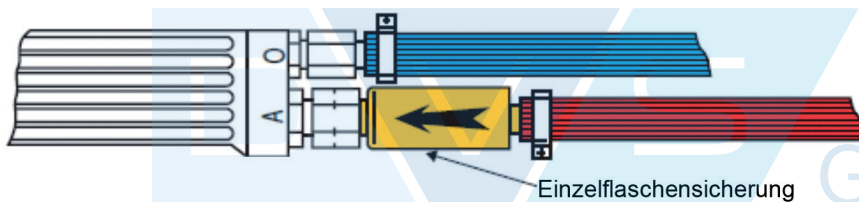


Abbildung 10: Einzelflaschensicherung am Griffstück

Versorgung mehrerer Verbraucher aus einer Einzelflasche

Unter Berücksichtigung der zulässigen Entnahmemenge einer Acetylenflasche (max. 700 l/h bei Dauerbetrieb) ist es möglich, zum Beispiel zwei Schweißbrenner an eine Acetylenflasche anzuschließen. Die Absicherung gegen Flammendurchschläge ist mit zwei Entnahmestellensicherungen vorzunehmen. Einzelflaschensicherungen sind hier nicht ausreichend.

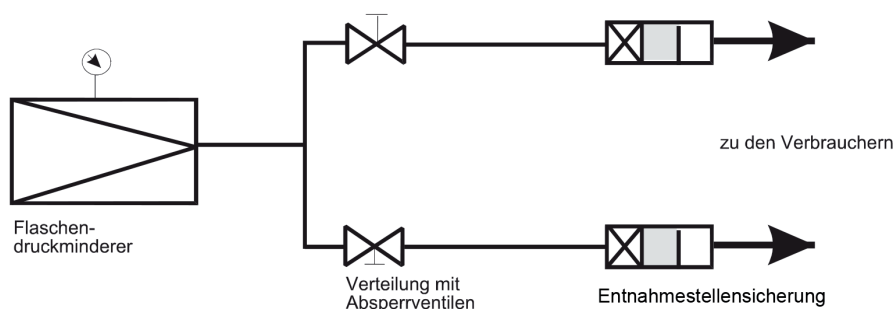


Abbildung 11: Versorgung mehrerer Verbraucher aus einer Acetylenflasche

Wiederkehrende Prüfung von Sicherheitseinrichtungen

Sicherheitseinrichtungen gegen Flammendurchschlag sind nach dem Stand der Technik mindestens einmal jährlich auf Sicherheit gegen Gasrücktritt, Dichtheit und Durchflussmenge zu prüfen.

7 Gasschweißen

Beschreibung des Schweißprozesses

Die Wärmequelle zum Schweißen ist eine Flamme, die mit dem Brenngas Acetylen und reinem Sauerstoff erzeugt wird. Die Gase strömen im Mischungsverhältnis von 1:1 durch den Schweißbrenner. Das Acetylen wird nach dem Austritt aus dem Schweißbrenner gezündet und verbrannt. Die Flammentemperatur beträgt ca. 3200°C. Um das Acetylen vollständig zu verbrennen, wird Sauerstoff aus der Luft benötigt. Der zum Schweißen erforderliche Zusatzwerkstoff wird zusätzlich zugegeben.

7.1 Wirtschaftlicher Anwendungsbereich

- Schweißen von Blechen und Rohren aus unlegiertem Stahl bis ca. 5 mm
- Reparaturschweißungen
- Rohrleitungsbau, Installationsbereich

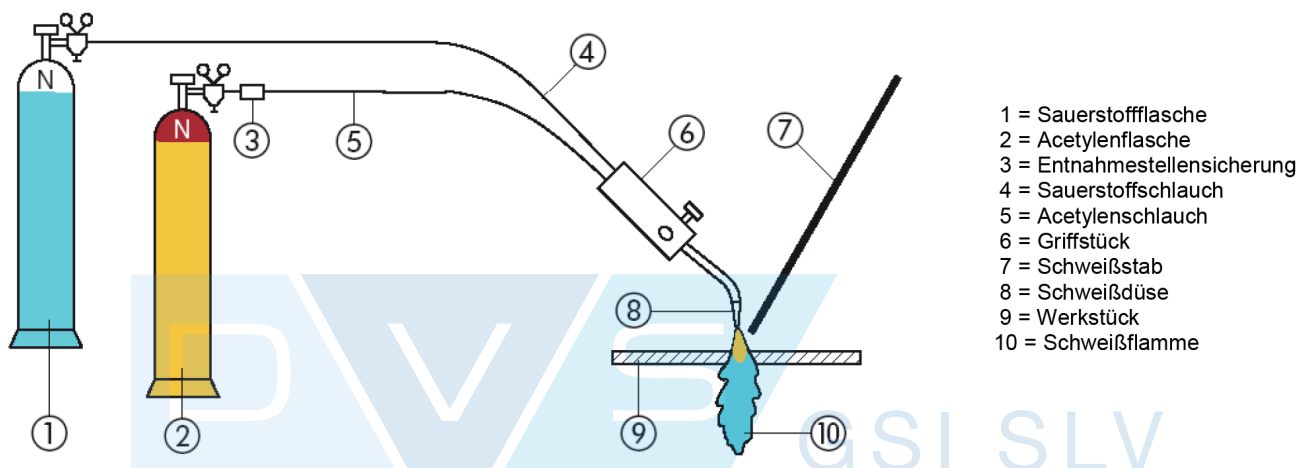


Abbildung 12: Einzelteile einer Einzelflaschenanlage

7.2 Arbeitstechniken (NL/NR-Schweißen)

Für das Herstellen von Schweißverbindungen gibt es zwei Arbeitstechniken:

7.2.1 Nachlinksschweißen

Schweißbrenner geradlinig führen, Schweißstab tupfend bewegen (der Schweißbrenner folgt dem Schweißstab).

Vorteile: Glatte oder nur leicht geschuppte Nahtoberfläche, günstiger Einsatz bis 3 mm Werkstückdicke.

Nachteile: Leicht verlaufendes Schmelzbad, schlecht kontrollierbares Durchschweißen.

7.2.2 Nachrechtsschweißen

Schweißbrenner geradlinig führen, Schweißstab kreisförmig rühren (der Schweißstab folgt dem Schweißbrenner).

Vorteile: Gezielte Wärmeeinbringung, sicheres Durchschweißen, geringere Abkühlgeschwindigkeit, bessere Schutzwirkung der Flamme.

Nachteile: Unter 3 mm Werkstückdicke schwierig anzuwenden. Hohe Anforderungen an die Handfertigkeit des Schweißers.

7.3 Schweißstäbe zum Gasschweißen (DIN EN 12536)

Zum Verbindungsschweißen der allgemeinen Baustähle und warmfester Stähle sind die Schweißstäbe in sechs Schweißstabklassen eingeteilt.

Auskunft darüber, welche Stahlsorten mit den entsprechenden Schweißstabklassen zu koordinieren sind, gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 6: Zuordnung von Gasschweißstäben zu verschiedenen Grundwerkstoffen

Stahlart		Allgemeine Baustähle nach DIN EN 10025			Stahlrohre für Rohrleitungen nach DIN EN 10208		Rohre nach DIN EN 10216			Blech und Band aus warmfesten Stählen nach DIN EN 10028			
Stahlsorte		S 185 ¹⁾	S 235 S 275	S 355	L 235 L 245 L 290 L 360	P 235	P 265	16Mo3	P 235 P 265	P 295	16Mo3	13CrMo4-5	10CrMo9-10
Geeignete Schweißstab- klasse	I	X			X								
	II	X	X		X								
	III	X	X	X	X	X							
	IV	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
	V											X ²⁾	
	VI												X ²⁾
¹⁾ Der Stahl S185 ist nur bedingt schweißgeeignet. ²⁾ Mehrlagenschweißung Hinweis: Das Gasschweißen an warmfesten Stählen, z.B. 13CrMo4-5 usw., entspricht nicht mehr dem Stand der Technik. Die Zuordnung der entsprechenden Schweißstäbe ist daher eher theoretischer Natur.													

7.4 Bezeichnung der Gasschweißstäbe

Die Bezeichnung setzt sich zusammen aus der Benennung, der DIN EN-Nummer, dem Kurzzeichen für das Gasschweißen und der Schweißstabklasse.

Beispiel: **Schweißstab DIN EN 12536-O III**

7.5 Kennzeichnung

Die Schweißstäbe müssen mit einer dauerhaften, deutlich erkennbaren Klassenkennzeichnung (Einprägung in römischen Ziffern) versehen sein. Eine zusätzliche Farbkennzeichnung an den Stabenden ist möglich.

7.6 Fugenformen beim Gasschweißen

- Die zu wählende Fugenform ist abhängig von Werkstoff
- Werkstoffdicke
- Schweißverfahren
- Schweißposition
- Zugänglichkeit

In DIN EN ISO 9692 sind die Fugenformen für die Schweißverfahren enthalten.

Tabelle 7: Fugenformen für Stumpfnähte, einseitig geschweißt (Maße in mm)

Naht				Fugenform					Bemerkungen
Werkstückdicke t	Benennung	Symbol	Darstellung	Schnitt	Maße				
					Winkel α	Spalt b	Steghöhe c	Flankenhöhe h	
t ≤ 2	Bördelnaht				-	-	-	-	Meist ohne Zusatzwerkstoff
t ≤ 4	I-Naht				-	b = t	-	-	-
t > 4	V-Naht	∇			30° ≤ α ≤ 60°	b ≤ 4	c ≤ 2	-	

Tabelle 8: Fugenformen für Kehlnähte, einseitig geschweißt

Naht				Fugenform		
Werkstückdicke t	Benennung	Symbol	Darstellung	Schnitt	Maße	
					Winkel α	Spalt b
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Kehlnaht, T-Stoß				$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$	$b \leq 2$ (anzustreben ist $b = 0$)
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Kehlnaht, Überlappstoß				-	$b \leq 2$ (anzustreben ist $b = 0$)
$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Kehlnaht, Eckstoß				$60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	$b \leq 2$

8 Verwandte Verfahren

8.1 Flammrichten

Entstehung von Schrumpfungen und Spannungen im Werkstück

Wenn ein Metall gleichmäßig erwärmt wird, dehnt es sich aus, es wird größer. Mit nachfolgender Abkühlung schrumpft es wieder. Wenn die ursprüngliche Temperatur erreicht wird, weist es wieder die anfänglichen Maße auf. Es ist gegenüber dem Ausgangszustand nicht geschrumpft. Anders verhält sich das Werkstück, wenn die Ausdehnung behindert ist oder das Bauteil nur teilweise erwärmt wird. Beim Erwärmen wird an der weichsten Stelle – dem Punkt der Erwärmung – eine Aufstauchung eintreten, beim Abkühlen schrumpft das Werkstück um den aufgestauchten Bereich, es verkürzt sich. Es entstehen Krümmungen, bzw. Spannungen wenn das Werkstück fest eingespannt ist.

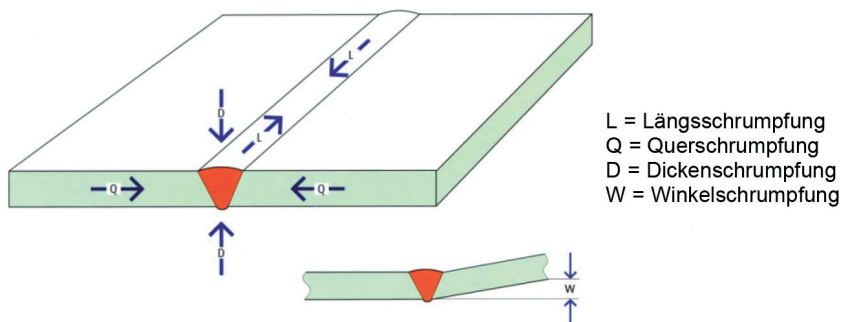


Abbildung 13: Schrumpfungsarten

Richtvorgang

Beim Flammrichten wird das Bauteil schnell, gezielt und örtlich bis in den plastischen Bereich erwärmt. Die Temperatur, bei der eine plastische Verformung auftritt, liegt bei Stahl etwa bei 550°C, bei Aluminium und seinen Legierungen bei etwa 350 bis 400°C. Dabei tritt infolge behinderter Wärmeausdehnung (eine wichtige Voraussetzung für den Flammrichterfolg) eine Aufstauchung ein. Um eine Aufstauchung zu erreichen, können Hilfsmittel erforderlich werden, die die Ausdehnung behindern. Während des Abkühlens ergibt sich eine Kürzung im Werkstück um den aufgestauchten Anteil, die zu der gewünschten Längen- oder Formänderung führt. Im Gegensatz zum mechanischen Richten, bei dem die „kurze Seite“ gestreckt wird, erfolgt beim Flammrichten eine Verkürzung der „langen Seite“. Das Endresultat des Richterfolgs wird erst mit dem Erreichen der Umgebungstemperatur sichtbar.

Vier Faktoren bewirken das Flammrichten:

Erwärmung ⇒ behinderte Ausdehnung ⇒ Aufstauchung ⇒ Verkürzung beim Abkühlen

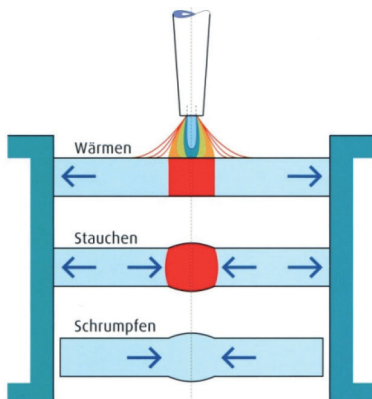


Abbildung 14: Erwärmung und behinderte Ausdehnung

8.1.1 Arbeitsregeln beim Flammrichten

1. Messen

Durch das Vermessen des Werkstücks werden die Form und die Größe der Maßabweichung festgestellt. Beim Flammrichten können Werkstücke nur gekürzt werden. Schweißnähte ziehen sich nach dem Schweißen zusammen und sind kürzer als ihre Umgebung. Deshalb nie auf Schweißnähten wärmen. Flammrichtfigur und ihre Lage festlegen und ggf. anzeichnen.

2. Behinderung der Wärmeausdehnung

Während des Anwärmvorgangs dehnt sich das Werkstück aus. Um einen guten Richterfolg zu erreichen, muss die Ausdehnung behindert werden. Dies kann durch das Eigengewicht und die Form des Bauteils oder durch zusätzliche Maßnahmen erfolgen.

3. Auswahl des Brenngases und des Brenners

Als Brenngas wird Acetylen empfohlen. Andere Brenngase, z.B. Propan oder Erdgas haben eine zu geringe Flammenleistung und Flammentemperatur, um eine schnelle und konzentrierte Erwärmung zu erzielen. Es werden Bereiche neben der Richtstelle mit erwärmt. Als Folge können Ausbeulungen auftreten. Die Brennergröße richtet sich nach der Größe der Konstruktion, dem Werkstoff und der Materialdicke.

4. Örtlich begrenzten Wärmestau erzeugen

Der Richterfolg hängt von einem örtlichen und gezielten Wärmestau ab. Die Bereiche sind klein zu halten. Mehrere kleine Wärmefiguren wirken besser als eine große. Wärmekeile müssen scharf begrenzt sein. An der Flammrichtstelle muss der Werkstoff plastifiziert werden. Im plastischen Bereich ist die Streckgrenze sehr niedrig, wodurch der Werkstoff im erwärmten Bereich aufgestaucht wird. Während des Abkühlens schrumpft der Werkstoff und bringt die gewünschte Formänderung.

5. Schrumpfen

Der Werkstoff schrumpft, solange er noch nicht seine Umgebungstemperatur erreicht hat. Spannmittel, die zur Ausdehnungsbehinderung verwendet wurden, lockern sich allmählich. Durch Abkühlen mit Druckluft oder Wasser kann der Richtvorgang beschleunigt, jedoch nicht verbessert werden. Der Richterfolg ist durch Nachmessen zu kontrollieren. Erst danach wird eine ggf. erforderliche neue Richtstelle festgelegt.

Behinderung der Wärmeausdehnung

Das Aufstauchen der Richtstelle ist Voraussetzung für den Richterfolg. Wenn das Bauteil nicht steif genug ist, um die Wärmeausdehnung während des Erwärmungsvorgangs zu behindern, muss dies durch zusätzliche Maßnahmen erfolgen. Eine zusätzliche Behinderung der Wärmeausdehnung von außen ist an weniger steifen Bauteilen von entscheidender Bedeutung.

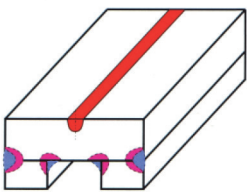


Abbildung 15: Behinderung durch das Eigengewicht

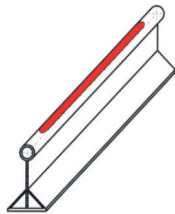


Abbildung 16: Behinderung durch die Eigensteifigkeit

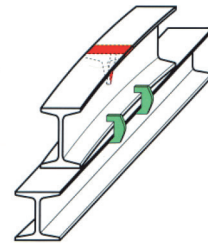


Abbildung 17: Behinderung durch zusätzliche Einspannung

Wärmefiguren beim Flammrichten

Zur Erzielung eines möglichst guten Richterfolges werden je nach Bauteil und Verformung verschiedene Wärmefiguren angewendet. Die Wärme kann als Wärmepunkt, Wärmestrich, Wärmekeil, Wärmeoval oder als Kombination aus mehreren Wärmefiguren eingebracht werden.

Wärmepunkt

Der Wärmepunkt wird vorzugsweise beim Flammrichten dünner Bleche, bei der Beseitigung von Beulen verwendet. Er muss klein sein. Das Werkstück wird durchwärmt, um eine flächige Verkürzung des Bauteils zu erzielen. Viele kleine Punkte sind effektiver als wenige Große. Gewärmt wird vom äußeren Bereich zur Mitte hin.

Das Richten von Bauteilen kann unter Zuhilfenahme von Lochplatten erfolgen. Die Ausdehnungsbehinderung erfolgt durch das Verspannen des Bauteils zwischen einer Lochplatte und einer Gegenplatte. Die Bohrungen in der Lochplatte geben den Abstand zwischen den einzelnen Wärmepunkten vor.

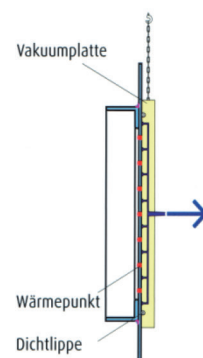
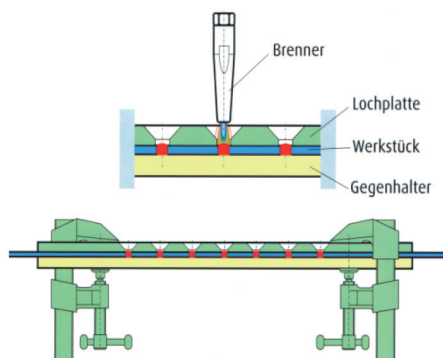
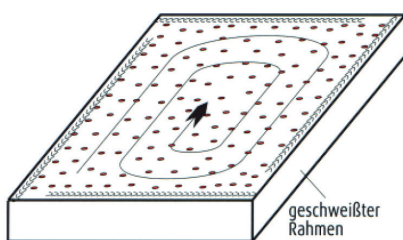


Abbildung 18: Wärmepunkte

Wärmeoval

Rohre lassen sich einfach und wirkungsvoll mit der Flamme richten. Die hauptsächliche Anwendung liegt in der Beseitigung von Verformungen, wie sie durch das einseitige Anschließen von Rohrabzweigen entstehen. Diese Verformung wird dadurch behoben, dass auf der Gegenseite des Rohranschlusses eine Wärmestelle in Form eines Ovals eingebracht wird. Die Rohrwandung wird durchgewärmt.

Die Grundregel lautet: Die lange Seite des Ovals immer in Rohrlängsrichtung.

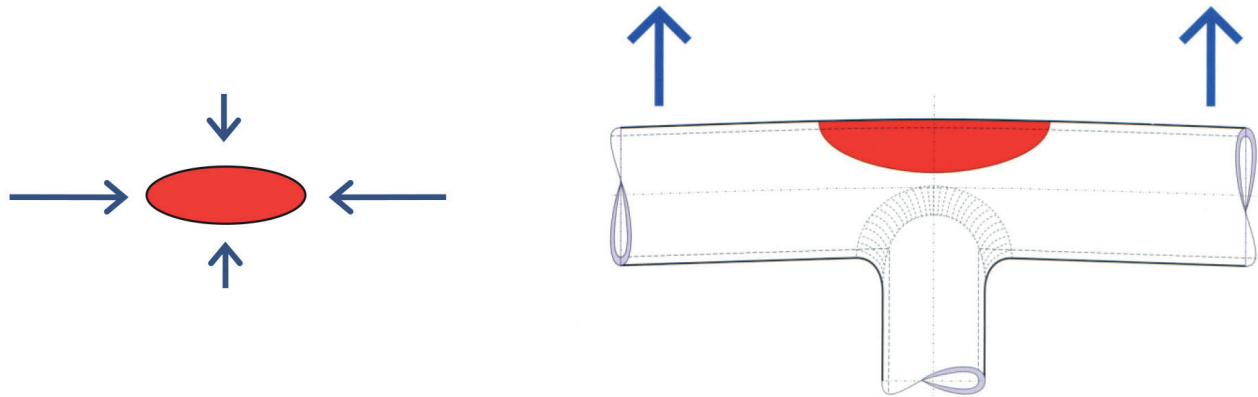


Abbildung 19: Wärmeoval

Wärmestriche zur Beseitigung von Winkelverzug

Der Winkelverzug ist die häufigste und die am deutlichsten sichtbare Verformungsart. Er kann in vielen Fällen dadurch beseitigt werden, dass ein oder mehrere parallel gezogene Wärmestriche auf der Gegenseite gezogen werden. Er ist dann besonders wirkungsvoll, wenn nur $1/3$ der Werkstückdicke auf Flammrichttemperatur erwärmt wird. Blechdicken ab 4 mm werden mit 3 Parallelstrichen gerichtet. Fünf-Strich-Wärmestraßen kommen ab etwa 8 mm Blechdicke zur Anwendung.

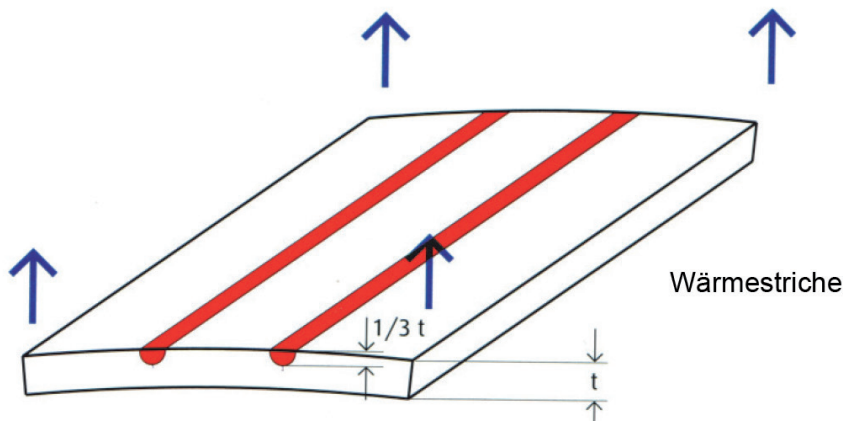


Abbildung 20: Wärmestriche

Wärmekeil

Der Wärmekeil ist die Wärmefigur mit der höchsten Richtwirkung. Er wird vorwiegend an Profilen und hochkantstehenden Lamellen zur Erzielung großer Verformungen eingesetzt. Das Bauteil wird immer, von der Keilspitze ausgehend, bis zur Grundlinie gleichmäßig durchwärmt. Es ist darauf zu achten, dass die Form und die Größe des Keils zum Bauteil passt. Der Wärmekeil muss scharf begrenzt, spitz und lang sein. Die Höhe des Keils ist so zu wählen, dass die Keilspitze die Biegelinie des Profils knapp überschreitet. Bei dieser Vorgehensweise nutzt man die Steifigkeit nicht erwärmter Werkstoffbereiche als Ausdehnungsbehinderung.

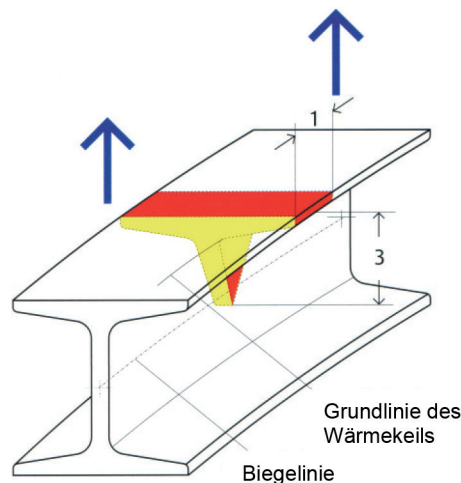


Abbildung 21: Wärmekeil

Es ist ratsam, die Form des Wärmekeils beidseitig am Bauteil anzuzeichnen, um eine möglichst genau gegenüberliegende Erwärmung sicherzustellen. Es wird von der Keilspitze zur Grundlinie des Keils erwärmt (beste Aufstauchung).

8.2 Löten

Löten ist ein thermisches Verfahren zum Fügen und Beschichten von Werkstoffen mithilfe eines geschmolzenen Zusatzwerkstoffes – dem Lot – und gegebenenfalls von Flussmitteln.

Die Arbeitstemperatur des Lotes liegt unterhalb der Schmelztemperatur der zu verbindenden Werkstoffe. Das Lot diffundiert in die Korngrenzen ein. Es entsteht eine Haftung und eine Art Legierungsbildung zwischen Grundwerkstoff und Lot. Die Festigkeit der Lötstelle hängt im Wesentlichen von der Ausbildung der Lötstelle, den Eigenschaften des Lotes und dem Grundwerkstoff ab.

In der Löttechnik wird je nach Arbeitstemperatur des Lotes zwischen Weichlöten, Hartlöten und Hochtemperaturlöten unterschieden.

Weitere Informationen siehe Kapitel 1.16.

8.3 Autogenes Brennschneiden

Das autogene Brennschneiden ist ein thermisches Trennverfahren, bei dem der größte Teil der für den Prozessablauf notwendigen Energie aus der bei der Verbrennung des Werkstoffes frei werdenden Wärme stammt. Der zu schneidende Werkstoff wird örtlich, auf der Werkstückoberfläche, durch eine Brenngas-Sauerstoff-Flamme auf Entzündungstemperatur erwärmt und dann im Sauerstoffstrahl verbrannt. Die bei der Verbrennung des Werkstoffs entstehende Wärme ermöglicht eine fortlaufende Verbrennung in die Tiefe und in Vorschubrichtung. Das autogene Brennschneiden hat den größten Anwendungsbereich in Bezug auf die Werkstückdicke. Standardbrenner sind in der Regel für den Bereich von 3 bis 300 mm, Sonderbrenner bis 1000 mm und mehr geeignet. Weitere Informationen siehe Kapitel 1.13.

8.4 Flammwärmen

Unter dem Begriff „Flammwärmen“ kann man alle Anwendungen nennen, bei denen die Flamme Wärme in ein Werkstück einleitet, ohne es zu schmelzen.

Beim Flammwärmen wird das Werkstück erwärmt, um seine Eigenschaften zu verändern, z. B. den Formänderungswiderstand zu verringern. Es wird auch zum Vorwärmen beim Schweißen, Schneiden usw. angewendet.

Das Flammwärmen wird auch bei der Warmformgebung, z.B. beim Biegen und Aushalsen von Rohren, usw. eingesetzt. Hierbei wird der zu verformende Bereich örtlich auf die richtige Temperatur erwärmt. Die Warmformtemperatur liegt bei ca. 900°C. Dabei werden einfache Schweißbrenner, aber auch Spezialbrenner eingesetzt. Beim Wärmen sehr großer Teile sind die Brenner oft wassergekühlt und der Zünd- und Löschvorgang erfolgt automatisch.

Das Flammwärmen kann sowohl von Hand als auch mechanisiert durchgeführt werden. Die Messung der Temperatur wird mit Thermo-Schmelz-Stiften, Feder- oder Kontakt-Thermometern vorgenommen.

- Bei der Auswahl der Brenngase für die unterschiedlichen Verfahren müssen bestimmte Faktoren in Betracht gezogen werden: Ist ein schneller und konzentrierter Wärmevorgang von Bedeutung?
- Ist das Durchwärmen des Werkstücks von Bedeutung?
- Spielt der Wasserdampfanteil in der Flamme eine Rolle?

Tabelle 9 : Flammentemperaturen und Wasserdampfanteil

Flammenart	Flammentemperatur °C	Wasserdampfanteil in der Flamme %
Acetylen/Sauerstoff	3.150	ca. 3,5
Acetylen/Druckluft	2.300	
Propan/Sauerstoff	2.800	ca. 30
Propan/Druckluft	1.925	
Methan/Sauerstoff	2.770	ca. 40

8.5 Flammstrahlen

Beim Flammstrahlen werden mithilfe von Brenngas-Sauerstoff-Brennern unerwünschte Oberflächenschichten entfernt. z.B. Rost, Zunder, Farbe usw.

Der Flammstrahlhandbrenner wird nach der Einstellung leicht auf die zu bearbeitende Oberfläche aufgesetzt. Dabei gleitet der Brennerkopf auf dem Beton oder Stahl.

Beim Maschinenbrenner haben die Düsen einen Abstand von etwa 1,2 bis 2 cm vom Beton.

Der Flammstrahlbrenner muss zur Oberfläche einen Neigungswinkel von etwa 45 Grad haben und die Spitzen der Flammenkegel müssen die Oberfläche berühren.

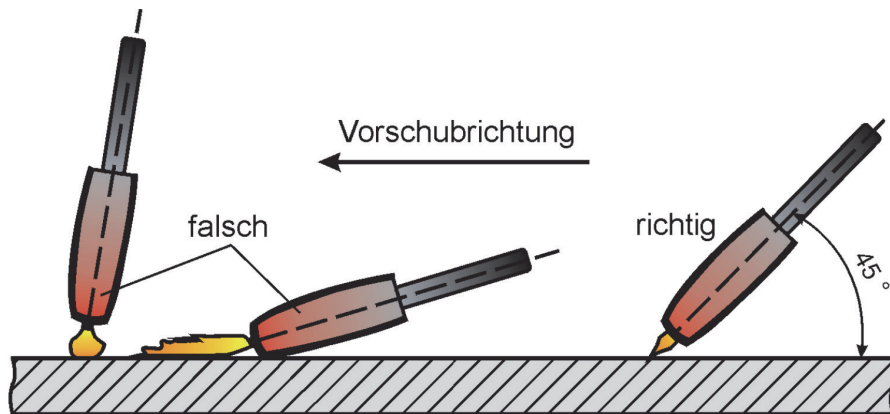


Abbildung 22: Flammstrahlen

Arbeitsweise

Der Flammstrahlbrenner darf nicht verkantet aufgesetzt werden, die Flamme muss gleichmäßig über die ganze Breite des Brenners wirken. Bei Stahl ist ein Schrägstellen des Brenners in Vorschubrichtung erforderlich, bei Beton dagegen nicht.

Der Brennergang beträgt auf Stahl 3,0 bis 5,0 m/min, auf Beton 1,0 bis 3,0 m/min.

Ausbildung

Fachpersonal zum Flammstrahlen kann nach Richtlinie DVS 1147 – Flammstrahlen – ausgebildet werden.

8.6 Trennen mit der Sauerstofflanze

Das Brennbohren mit der Sauerstofflanze ist ein thermisches Trennverfahren. Es findet Anwendung zum Brennbohren von mineralischen oder metallischen Werkstoffen. Zum Brennbohren werden Sauerstoff-Kernlanzen oder Sauerstoff-Pulverlanzen eingesetzt, wobei vornehmlich Kernlanzen zum Einsatz kommen.

Geräte und Zubehör

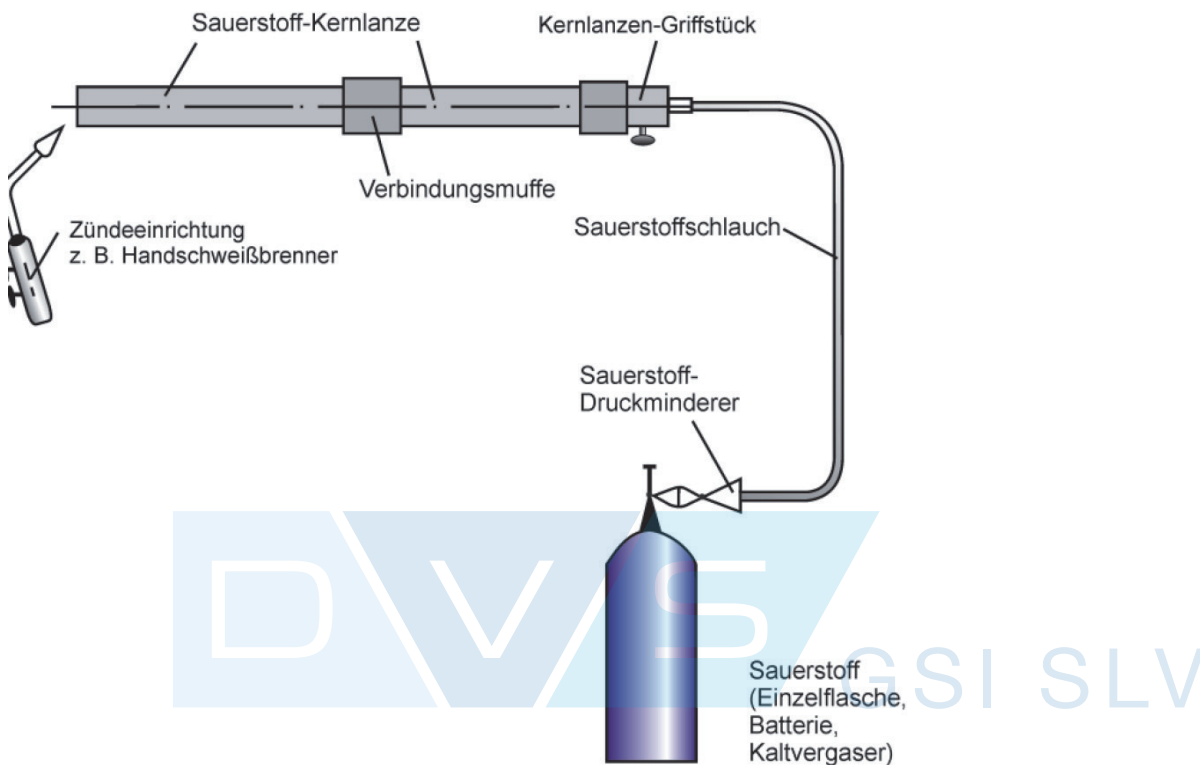


Abbildung 23: Sauerstofflanze

Arbeitsweise

Nach dem Entzünden (Entzündungstemperatur ca. 1200°C) mithilfe eines Schweiß- oder Schneidbrenners wird die Sauerstoff-Kernlanze gegen den Werkstoff (Beton, Stein, Metall) gedrückt. Durch die ständige Verbrennung des Eisens im Sauerstoffstrom ist genügend Wärme vorhanden, den Werkstoff örtlich aufzuschmelzen. Das entstehende Eisenoxid bildet mit dem Werkstoff (z.B. Gesteinsschmelze) eine dünnflüssige Schlacke, die vom Sauerstoffstrom weg befördert wird. Auf diese Weise entsteht eine Bohrung, die beliebig tief eingebracht werden kann.

9 Literatur

1. DIN EN ISO 2503: Druckregler für Gasflaschen für Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren.
2. DIN EN ISO 5172: Gasschweißgeräte; Brenner für Schweißen, Wärmen und Schneiden.
3. DIN EN 12536: Stäbe zum Gasschweißen von unlegierten und warmfesten Stählen.
4. Merkblatt DVS 0201: Technische Gase für Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren: Sauerstoff
5. Merkblatt DVS 0202: Technische Gase für Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren: Acetylen
6. Flammrichten: Werksbilder Linde AG (Grundlagen des Flammrichtens).



10 Testfragen

1. Acetylen zerfällt bei höherem Druck. Welchen Wert darf der Arbeitsdruck deshalb nicht überschreiten?

- ☐ 1,5 bar (Überdruck)
- ☐ 2,5 bar (Überdruck)
- ☐ 15,0 bar (Überdruck)
- ☐ 19,0 bar (Überdruck)

2. Weshalb wird zum Schweißen Acetylen als Brenngas verwendet?

- ☐ Wegen der guten Zündfähigkeit
- ☐ Wegen der niedrigen Zündtemperatur
- ☐ Wegen der hohen Flammenleistung
- ☐ Wegen der geringen Dichte

3. Mit welchen Folgen ist zu rechnen, wenn Sauerstoff in großen Mengen aus der Flasche entnommen wird?

- ☐ Flaschenventil und Druckminderer können einfrieren
- ☐ Das Aceton wird mitgerissen
- ☐ Die Flasche erwärmt sich stark
- ☐ Es hat keine negativen Folgen

4. Was unternehmen Sie bei einer Rückzündung im Schweißbrenner?

- ☐ Acetylen- und Sauerstoffflasche schließen
- ☐ Brenner pfeifen lassen
- ☐ Entnahmestellensicherung einbauen
- ☐ Beide Ventile am Griffstück schließen und den Brenner kühlen

5. Welche Aufgabe hat die Entnahmestellensicherung?

- ☐ Einen gleichmäßigen Gasdurchfluss sicherzustellen
- ☐ Eine normale Flammeneinstellung zu ermöglichen
- ☐ Auftretende Flammenrückschläge und Gasrücktritte abzufangen
- ☐ Einen Schlauchbrand zu löschen

6. Wodurch kann ein Acetylenzerfall eingeleitet werden?

- ☐ Durch zu geringe Gasentnahme
- ☐ Durch zu starke äußere Erwärmung der Flasche
- ☐ Durch ruckartiges Öffnen des Flaschenventils
- ☐ Durch zu große Gasentnahme

7. Welche der nachfolgend aufgeführten Richtfiguren eignet sich besonders gut zum Flammrichten von Trägern?

- ☐ Wärmepunkt
- ☐ Wärmestrich
- ☐ Wärmekeil
- ☐ Wärmeoval



Inhalt

1	Einleitung	1
2	Ohmsches Gesetz, Leitungswiderstand, Reihenschaltung	1
3	Parallelschaltung, elektrische Leistung	3
4	Elektrische Arbeit (Energie), Stromwärme	4
5	Kapazität, Kondensator	5
6	Induktivität, Spule, Drossel	7
7	Elektromagnetismus	8
8	Transformator	9
9	Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld (Motorprinzip)	10
10	Induktion der Bewegung (Generatorprinzip)	11
	10.1 Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung	12
11	Kennwerte einer Wechselspannung	12
12	Effektivwert (quadratischer Mittelwert) des Stromes	14
13	Leistungen im Wechselstromkreis, $\cos \phi$	15
14	Dreiphasenwechselstrom – Drehstrom	18
15	Diode und Gleichrichter	20
16	Thyristor und Transistor	21
17	Gefahren beim Umgang des Menschen mit der elektrischen Spannung und dem elektrischen Strom, Gesundheits- und Arbeitsschutz	23
18	Literatur	24
19	Testfragen	27

1 Einleitung

Die für das Schweißen benötigte Prozesswärme wird zu einem großen Teil aus elektrischer Energie gewonnen. Die Kenntnis über die Elektrizität ist zum Verständnis der Verhältnisse im Lichtbogen, im Schweißstromkreis sowie der Stromquellen von enormer Bedeutung.

Anhand kleiner Beispiele soll der Schweißaufsichtsperson das nötige Rüstzeug zum Verständnis der folgenden Kapitel des Hauptgebietes „Schweißprozesse und -ausrüstung“ aber auch der Bereiche der Mess- und Prüftechnik im HG „Fertigung und Anwendungstechnik“ gegeben werden.

2 Ohmsches Gesetz, Leitungswiderstand, Reihenschaltung

Die Darstellung der aufgeführten Themen anhand einer kleinen Beispielrechnung.

Mithilfe eines elektrischen Rasenmähers soll eine Wiese geschnitten werden.

Der Rasenmäher ist über eine Kabeltrommel an eine Schukosteckdose $U = 230 \text{ V}$ angeschlossen. Die Länge der Leitung auf der Kabeltrommel beträgt 100 m .

Kann es sein, dass der Spannungsabfall über die Verlängerungsleitung so groß ist, dass die Spannung, die am Motor "ankommt", zu gering ist?

Skizze

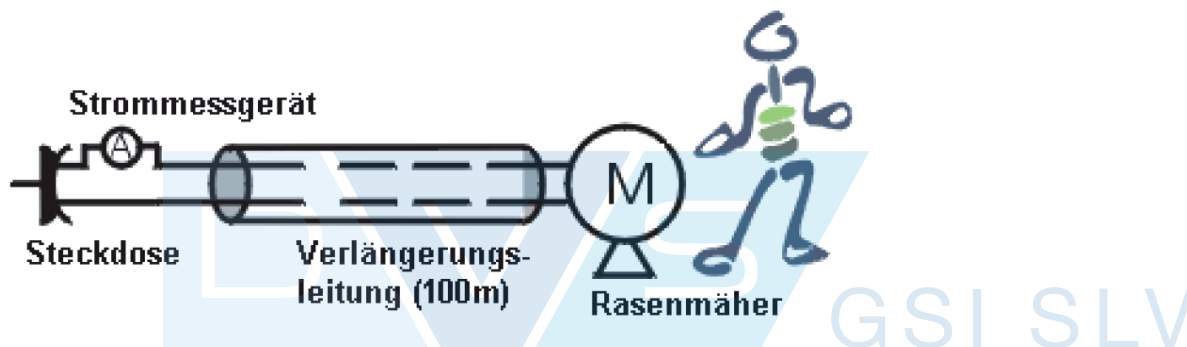


Abbildung 1: Reihenschaltung

Bei handelsüblichen Verlängerungsleitungen beträgt der Querschnitt der Einzelader $A = 1,5 \text{ mm}^2$.

Die Leitung besteht aus Kupfer, mit einer Leitfähigkeit Kupfer $\chi_{\text{Cu}} = 56 \text{ [m}/\Omega \cdot \text{mm}^2]$.

Die Schukosteckdose führt eine Netzspannung von $U_{\text{ges}} = 230 \text{ V}$.

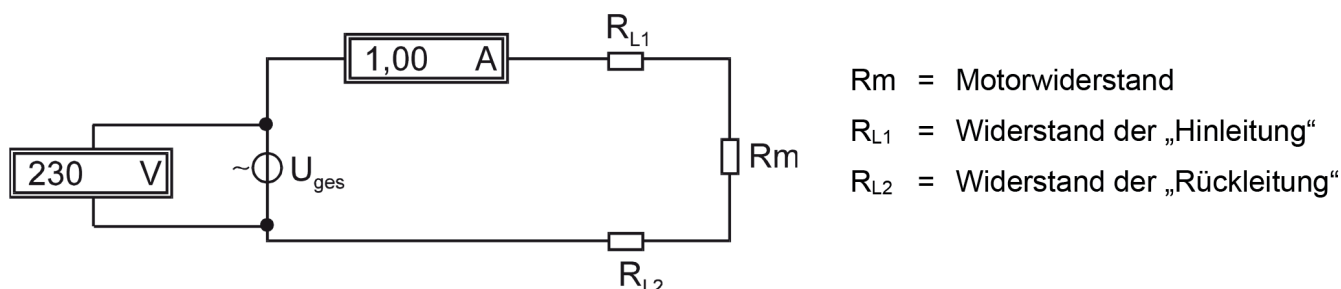


Abbildung 2: Reihenschaltung mit drei Widerständen

Die Addition der Einzelspannungsabfälle über den Widerständen ist gleich der „treibenden“ Spannung.

$$U_{ges} = U_{RL1} + U_{Rm} + U_{RL2}$$

Der Strom in einer Reihenschaltung ist in jedem Widerstand gleich groß.

$$I_{ges} = I_{RL1} = I_{Rm} = I_{RL2}$$

Der Gesamtwiderstand ist gleich der Summe der Teilwiderstände

$$R_{ges} = R_{L1} + R_m + R_{L2}$$

Somit kann der Spannungsabfall über den Zuleitungen nach dem **Ohmschen Gesetz** berechnet werden.

$$I = \frac{U}{R} \Rightarrow U_{abf} = I_{ges} \cdot (R_{L1} + R_{L2}) \quad (R_{L1} + R_{L2}) = \text{Gesamtwiderstand der Verlängerungsleitung}$$

Der *Leitungswiderstand* wird berechnet nach

$$\text{Leitungswiderstand} = \frac{\text{Gesamtleitungslänge}}{\text{Leitfähigkeit} \cdot \text{Querschnitt}}$$

Länge	l	[m]
Fläche	A	[mm ²]
Leitfähigkeit	σ (Sigma)	$\left[\frac{m}{\Omega * mm^2} \right]$

$$R_L = \frac{l}{\sigma \cdot A}$$

Die Leitfähigkeit σ ist der Kehrwert des spezifischen Widerstandes. Der spezifische Widerstand gibt an, wie groß der Widerstand eines Leiters der Länge 1 m bei einem Querschnitt von 1 mm² und einer Umgebungstemperatur von 20°C ist.

Das Problem der unzulässig hohen Spannungsabfälle im Reihenstromkreis kann im Schweißstromkreis zur Verringerung der Lichtbogenleistung führen. Zu hohe Widerstände beim Stromübergang in der Stromkontaktdüse, in Querschnitt und Länge falsch ausgelegte Sekundärleitungen sowie verschmorte oder nicht richtig passende Steckkontakte sind hierfür Beispiele.

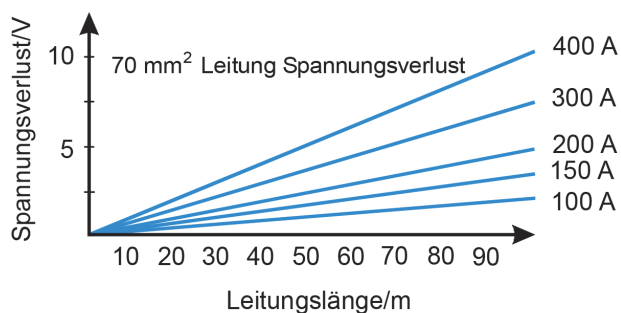


Abbildung 3: Spannungsverlust über den Schweißleitungen in Abhängigkeit der Leitungslänge bei verschiedenen Strömen

3 Parallelschaltung, elektrische Leistung

Drei elektrische Verbraucher sollen gemeinsam an einer Schukosteckdose betrieben werden, die mit einer Schmelzsicherung $I = 13\text{ A}$ abgesichert ist.

Die Typenschilder weisen folgende Leistungsaufnahme auf:

Betonmischer	$P_1 = 1000\text{ W}$
Heizstrahler	$P_2 = 1500\text{ W}$
Lichtstrahler	$P_3 = 500\text{ W}$

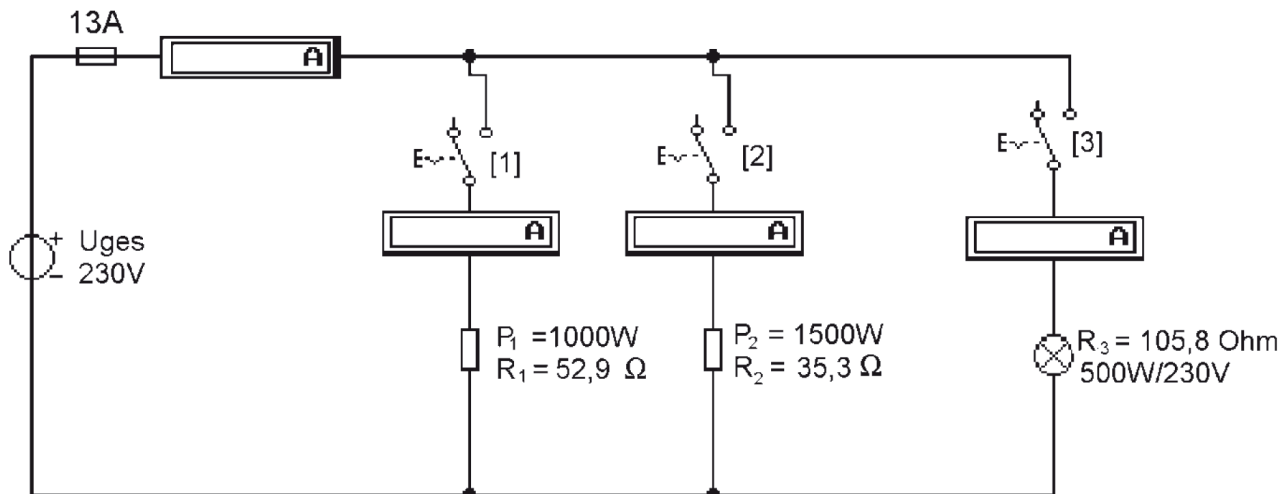


Abbildung 4: Parallelschaltung von drei Widerständen

Frage: Reicht die 13 A Schmelzsicherung für den Gesamtstrom I_{ges} ?

Die elektrische Leistung P_{el} erhält man, indem man die am Verbraucher anliegende Spannung mit der Stromaufnahme multipliziert.

$$P_{el} = U \cdot I [W]$$

In einer Parallelschaltung liegen alle Widerstände an derselben Spannung.

$$U_{ges} = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3}$$

Der Gesamtstrom ist gleich der Summe der Teilströme.

$$I_{ges} = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3}$$

Der Kehrwert des Gesamtwiderstandes ist gleich der Summe der Kehrwerte der Einzelwiderstände.

$$\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Der Gesamtwiderstand ist kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

Ist der Gesamtstrom höher als 13 A?

$$I_{ges} = \frac{U_{ges}}{R_{ges}} = \text{---} = \text{---} A \quad \text{bzw.} \quad I_{ges} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{U_{ges}} = \text{---} = \text{---} A$$

4 Elektrische Arbeit (Energie), Stromwärme

Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten.

Hebt man einen Körper hoch oder bewegt ihn, so wird dabei mechanische Arbeit verrichtet. Diese Arbeit W_{mech} hängt ab von der aufgewendeten Kraft F und dem zurückgelegten Weg s .

Ähnliche Überlegungen führen auch zum Begriff der elektrischen Arbeit. Werden unter dem Druck der elektrischen Spannung U Ladungsträger mit der Elektrizitätsmenge Q ($Q/\text{Zeit} = \text{Strom}$) bewegt, so wird dabei ebenfalls eine Arbeit verrichtet, nämlich die elektrische Arbeit W_{el} .

Mittels eines Elektromotors soll ein Behälter mit einem Gewicht (Gewichtskraft) von $F = 4186 \text{ N}$ um $s = 1 \text{ m}$ angehoben werden.

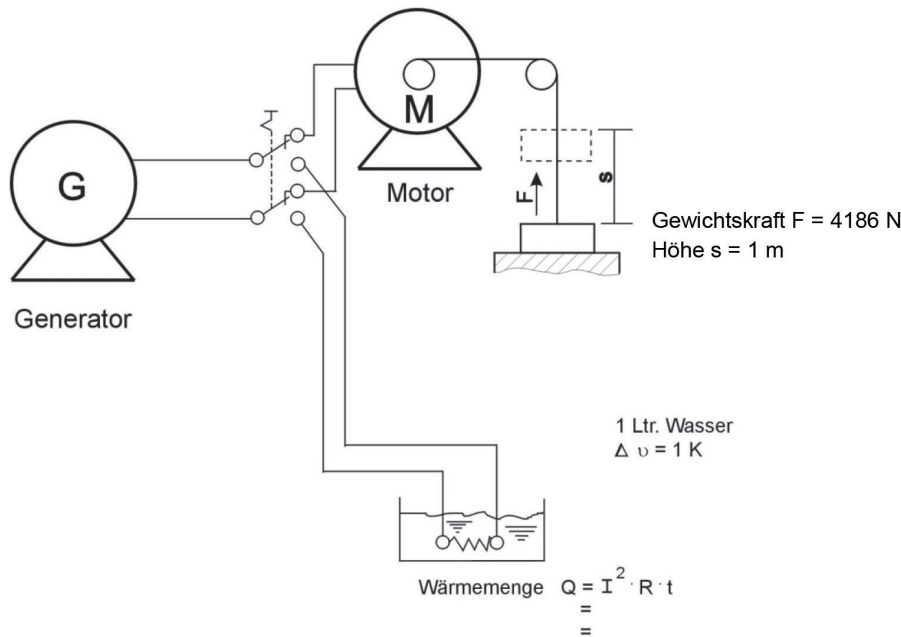


Abbildung 5: Elektrische Arbeit, mechanische Arbeit, Stromwärme

Dazu muss der Generator, der den Motor speist, für einen Zeitraum von $t = 18,2 \text{ s}$ eine Spannung von $U = 230 \text{ V}$ und einen Strom von $I = 1 \text{ A}$ abgeben.

$$\text{Elektrische Arbeit } W_{el} = U \cdot I \cdot t [Ws]$$

Mit der gleichen Energiemenge, nämlich $W_{el} = 4186 \text{ Ws}$ kann man die Masse von 1 kg Wasser um 1 K erwärmen. Die dazu benötigte Wärmemenge beträgt 1 kcal bzw. 4186 Joule .

$$\text{Stromwärme } Q = I^2 R \cdot t [J]$$

$$1 \text{ Ws} \hat{=} 0,001 \text{ kWs} \hat{=} \frac{0,001 \text{ kWs}}{3600 \text{ s}} = 0,278 \cdot 10^{-6} \text{ kWh}$$

5 Kapazität, Kondensator

Unter einem Kondensator versteht man zwei ungleichartig elektrisch geladene Körper, die einen bestimmten Abstand voneinander besitzen. In den meisten Fällen sind es parallel zueinander stehende Platten. Der Kondensator hat die Fähigkeit, elektrische Energie, zeitlich begrenzt, in Form eines elektrischen Feldes speichern zu können. Seine Kapazität und die Höhe der angelegten Spannung bestimmen wie viel Energie er speichern kann.

$$W_{el} = 1/2 \cdot C \cdot U^2$$

Die Kapazität des Kondensators hängt von der Größe der Platten und ihrem Abstand sowie dem Material zwischen den Platten ab.

Bei Anlegen einer Gleichspannung fließt – abgesehen von einem Ladestrom – kein elektrischer Strom über den Kondensator.

Nach beendeter Aufladung hat die Ladespannung des Kondensators die Höhe der Ausgangsspannung der Quelle angenommen.

Strom und Spannung verlaufen bei diesem Vorgang zeitlich entgegengesetzt. *Der Strom eilt vor!*

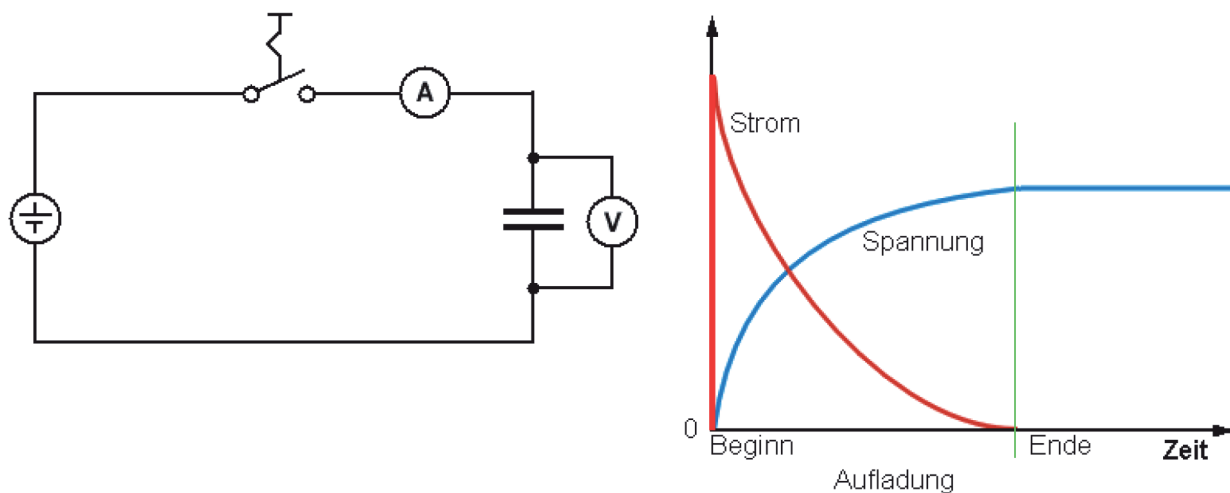


Abbildung 6: Kondensator Aufladekurve

Größe	—	Kapazität
Formelzeichen	—	C
Einheit	—	Farad [As/V]

Schaltzeichen:



Abbildung 7: Kondensator

6 Induktivität, Spule, Drossel

Bei Anlegen einer elektrischen Gleichspannung an eine Spule fließt durch die Spule ein elektrischer Strom, der ein Magnetfeld erzeugt. Die Spule hat die Fähigkeit, elektrische Energie, zeitlich begrenzt, in Form eines magnetischen Feldes speichern zu können.

$$W_{el} = 1/2 \cdot L \cdot I^2$$

Bei Abschalten des Stromes bricht das Magnetfeld zusammen. Die Energie, welche die Spule gespeichert hat, wird wieder abgegeben.

Strom und Spannung an der Spule verlaufen zeitlich entgegengesetzt, jedoch in anderer Richtung als beim Kondensator.

Der Strom eilt nach!

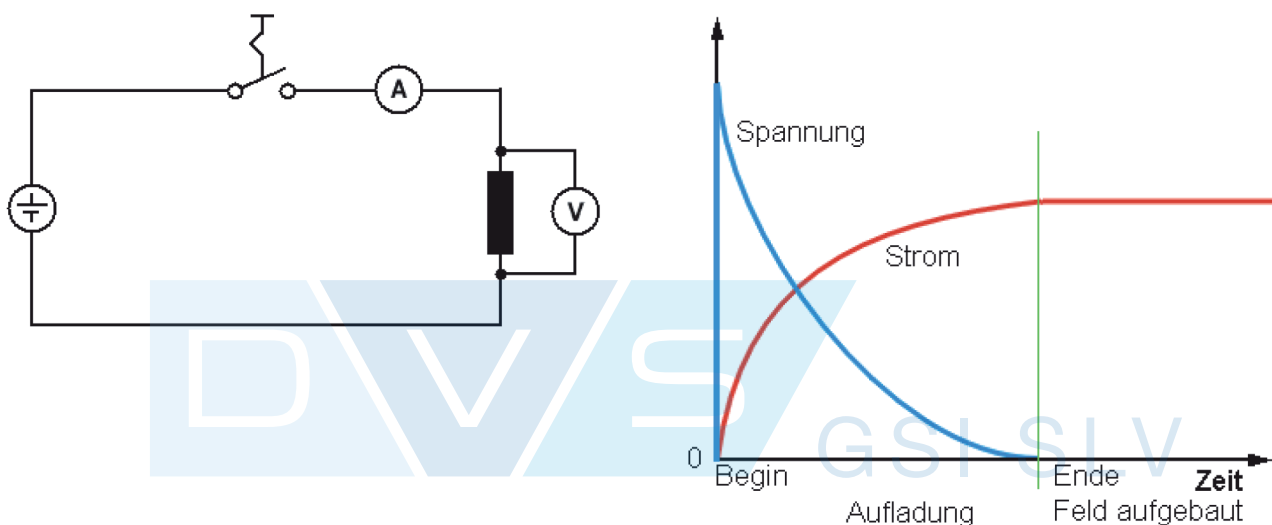


Abbildung 8: Induktivität im Gleichstromkreis

Größe	—	Induktivität
Formelzeichen	—	L
Einheit	—	Henry, H
		$\left[\frac{V_s}{A} \right]$

Schaltzeichen:

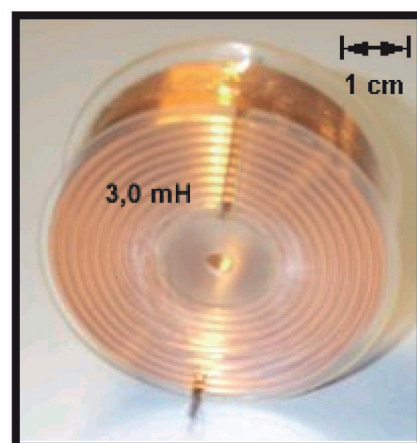


Abbildung 9: Spule

7 Elektromagnetismus

Um jeden Leiter in dem ein Strom fließt, wird sich ein magnetisches Feld bilden, dass den Leiter ringförmig umschließt.

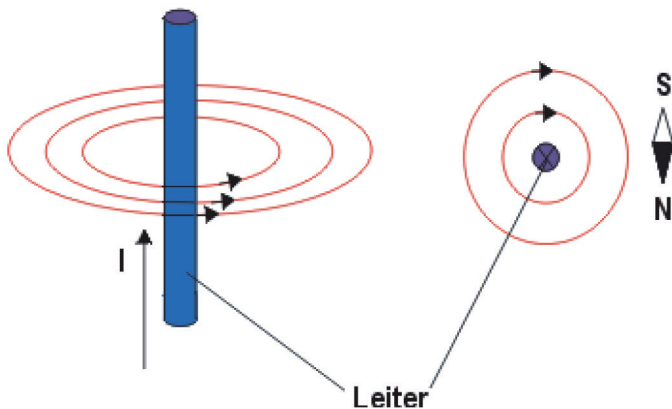


Abbildung 10: Verlauf der magnetischen Feldlinien um einen stromdurchflossenen Leiter

Formt man den Draht zur Spule, so entsteht ein dem Stabmagneten ähnliches Feld.



Abbildung 11: Verlauf der magnetischen Feldlinien bei einer Spule

Zwei parallel verlaufende stromdurchflossene Leiter erzeugen eine Kraftwirkung.

STROM => MAGNETISCHES => FELD => KRAFT

Zwischen Stromleitern mit gleicher Stromrichtung wirken anziehende, mit entgegengesetzter Stromrichtung abstoßende Kräfte.

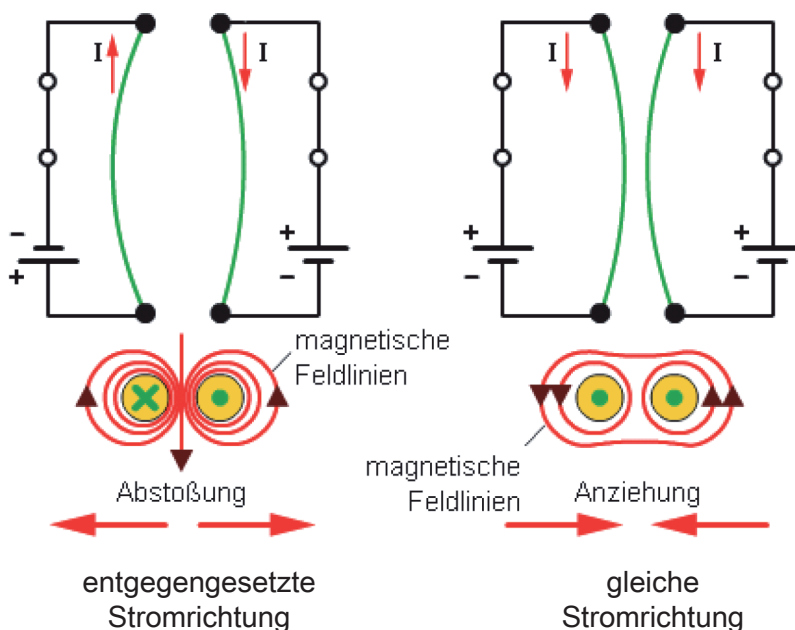


Abbildung 12: Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen parallelen Leitern

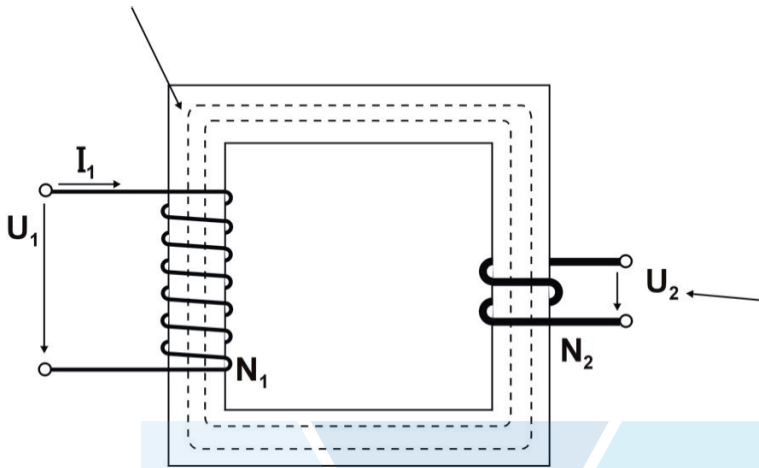
8 Transformator

Magnetischer Fluss

Jeder stromdurchflossene Leiter erzeugt ein Magnetfeld.

Die Intensivität des Magnetfeldes, der magnetische Fluss Φ [sprich phi] wird wie folgt berechnet:

$$\Phi = \frac{I_1 \cdot N_1}{R_m}$$



Z = Scheinwiderstand $[\Omega]$

Φ = magnet. Fluss [Vs]

I_1 = Primärstrom [A]

N_1 = Windungszahl auf der Primärseite

R_m = magnetischer Widerstand $\left[\frac{A}{Vs} \right]$

$$4,44 = \sqrt{2} \cdot \pi$$

f = Frequenz [Hz]

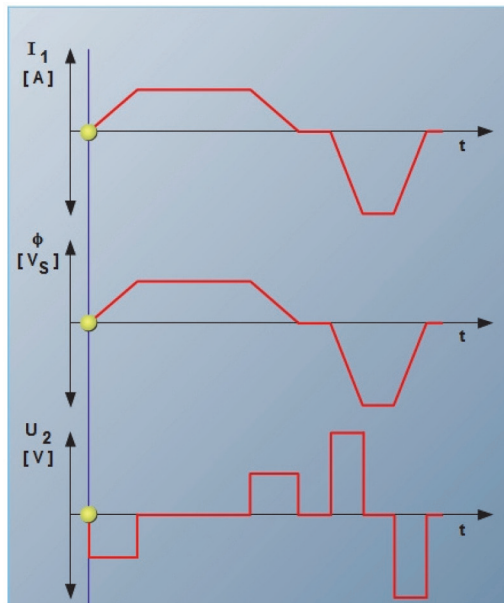
$$U_2 = -N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

SPANNUNG => STROM => Magnetischer Fluss => SPANNUNG

$$U_1 \Rightarrow I_1 \left[\frac{U_1}{Z} \right] \Rightarrow \Phi \left[\frac{I_1 \cdot N_1}{R_m} \right] \Rightarrow U_2 \left[-N_2 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \right] \quad \text{oder} \quad U_2 = 4,44 \cdot \Phi \cdot N_2 \cdot f$$

Induktionsspannung

In einer Spule wird eine Spannung induziert, wenn sich in dieser Spule der magnetische Fluss Φ ändert.



U_2 induzierte Spannung (V)

$\Delta\Phi$ magnet. Flussänderung (Vs)

Δt Zeit [s]

N_2 Windungszahl auf der Sekundärseite

Transformatorgesetz

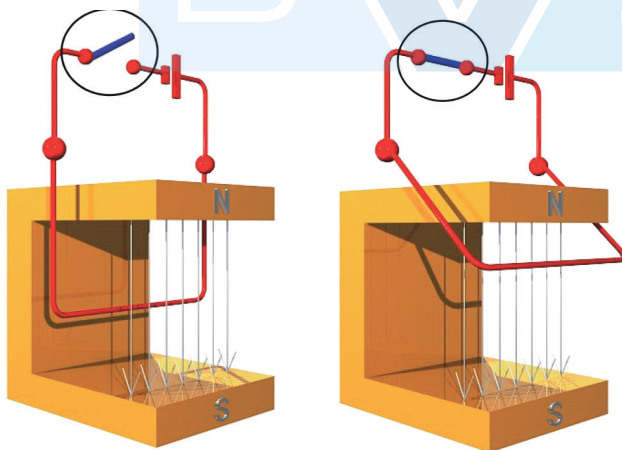
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Abbildung 14:

Verlauf der elektromagnetischen Größen bei einem Transformator

9 Kraftwirkung auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld (Motorprinzip)

Stromdurchflossene Leiter werden im Magnetfeld abgelenkt.



F = Ablenkkraft [N]
 B = magnetische Flussdichte $\left[\frac{V \cdot s}{m^2} \right]$

l = wirksame Leiterlänge [m]

I = Strom [A]

$$F = B \cdot l \cdot I$$

Abbildung 15: Auslenkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld

10 Induktion der Bewegung (Generatorprinzip)

Wird ein Leiter in einem Magnetfeld senkrecht zum Magnetfeld bewegt, so wird in ihm während der Bewegung eine Spannung erzeugt (induziert).

Spannungsmessgerät

Spannungsmessgerät

U = induzierte Spannung [V]

B = magnetische Flussdichte $\left[\frac{V \cdot s}{m^2} \right]$

v = Geschwindigkeit $\left[\frac{m}{s} \right]$

l = wirksame Leiterlänge [m]

$$U = B \cdot l \cdot v$$

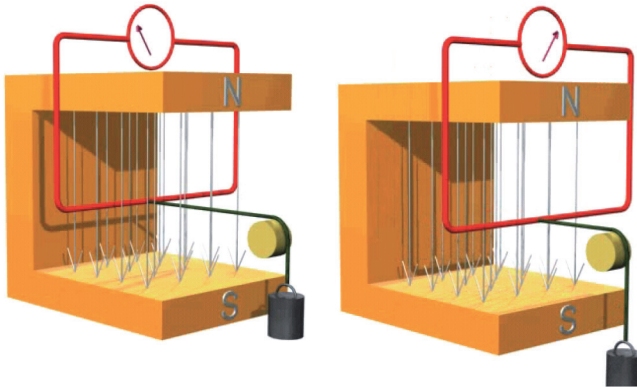


Abbildung 16: Spannungserzeugung durch Bewegung eines Leiters im Magnetfeld



10.1 Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung

Die wichtigste Möglichkeit zur Erzeugung einer sinusförmigen Spannung bietet das Prinzip der Induktion der Bewegung, bei der mechanische Arbeit in elektrische Energie gewandelt wird. Um dies zu erreichen, muss ein Leiter in einem Magnetfeld gedreht werden.

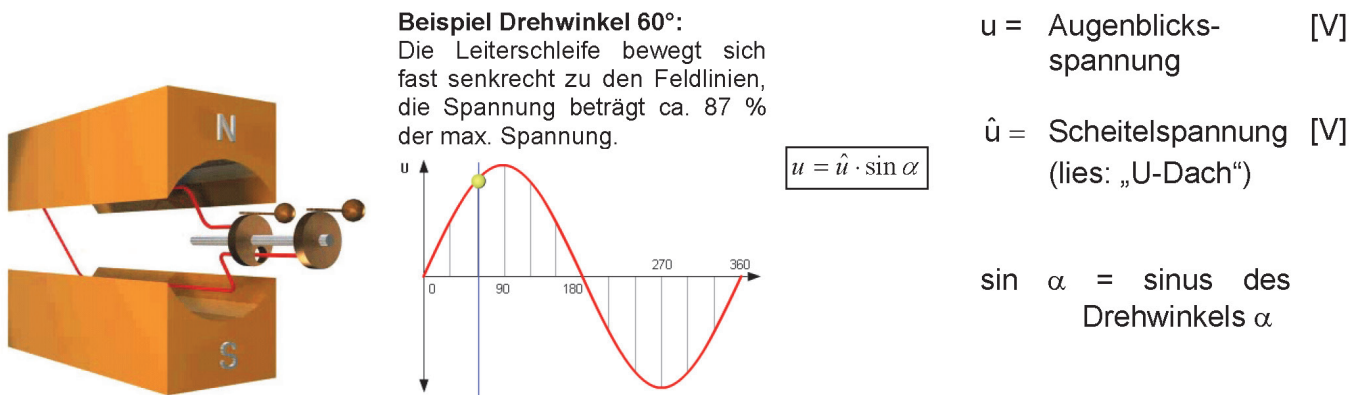


Abbildung 17: Anordnung zur Erzeugung einer sinusförmigen Wechselspannung

Bei gleichförmiger Drehung einer Leiterschleife in einem homogenen Magnetfeld ändern sich die induzierte Spannung und die Stärke des Induktionsstromes wie der Sinus des Drehwinkels.

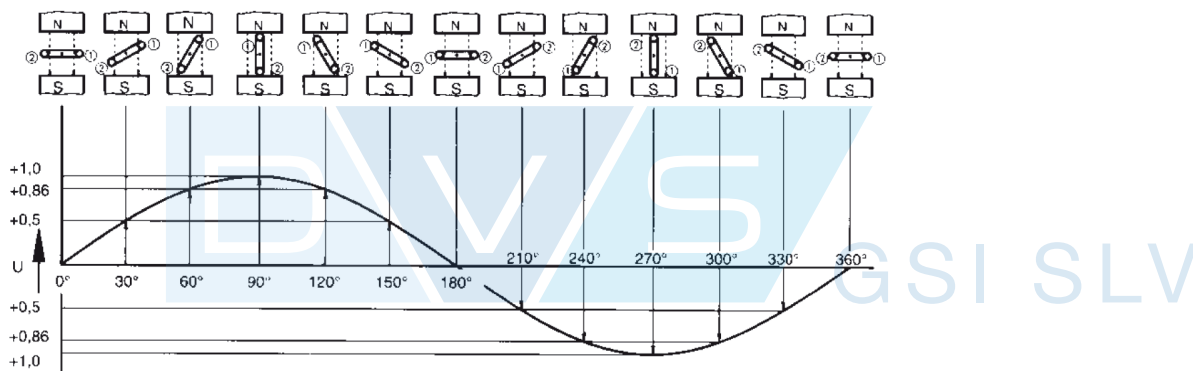


Abbildung 18: Induzierte Momentanspannungen in Abhängigkeit vom Drehwinkel der Leitschleife

11 Kennwerte einer Wechselspannung

Amplitude, Augenblickswert

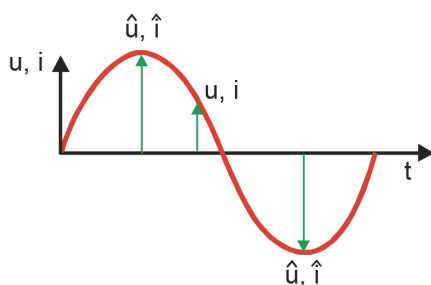


Abbildung 19: Amplitude und Momentanwert bei sinusförmigen Wechselspannungen

Die Amplitude (Maximalwert, Scheitelwert) stellt den Höchstwert einer Sinusfunktion dar. Die Amplitude der Spannung wird mit $\hat{u}$ (sprich: u-Dach) gekennzeichnet.

Augenblickswert (Momentanwert) ist der im betrachteten Augenblick vorhandene Wert. Augenblickswerte der Spannung werden mit u gekennzeichnet.

Das Gleiche gilt natürlich auch für die entsprechenden Ströme.

Periode, Frequenz, Phase

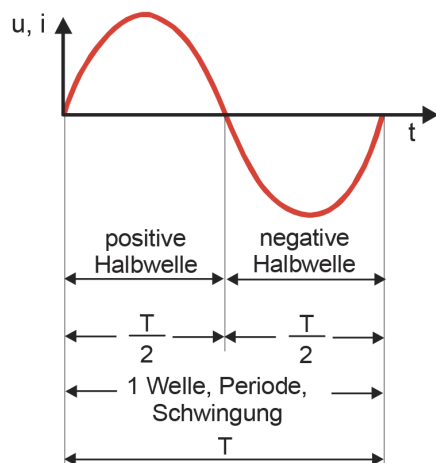


Abbildung 20: Periode und Periodendauer bei sinusförmiger Wechselspannung

Periode, Periodendauer

Die positive und die negative Halbwelle zusammen, d.h. das Hin- und Herpendeln der Elektronen bezeichnet man als Schwingung oder Welle oder Periode.

Die Zeitdauer, die zum Durchlaufen einer Periode benötigt wird, bezeichnet man als Periodendauer T . Die Periodendauer wird in Sekunden angegeben.

Frequenz

Die Frequenz gibt die Zahl der Perioden an, die in einer Sekunde durchlaufen werden.

Die Einheit der Frequenz ist das Hertz (Kurzzeichen: Hz).

Somit gilt:

1 Hz ist 1 Schwingung
in 1 Sekunde

f Frequenz in Hz

T Periodendauer in s

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{s}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

12 Effektivwert (quadratischer Mittelwert) des Stromes

Der Effektivwert (wirksamer Wert) eines Wechselstromes ist der Zahlenwert, der in einem Widerstand die gleiche Wärmewirkung hervorruft wie ein gleich großer Gleichstrom.

Die Wärmearbeit in einem Widerstand R

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

lässt sich grafisch veranschaulichen. Man geht dabei zweckmäßig von einem Widerstand $R = 1 \Omega$ und einer bestimmten Zeitdauer $t = \text{Periodendauer } T$ aus.

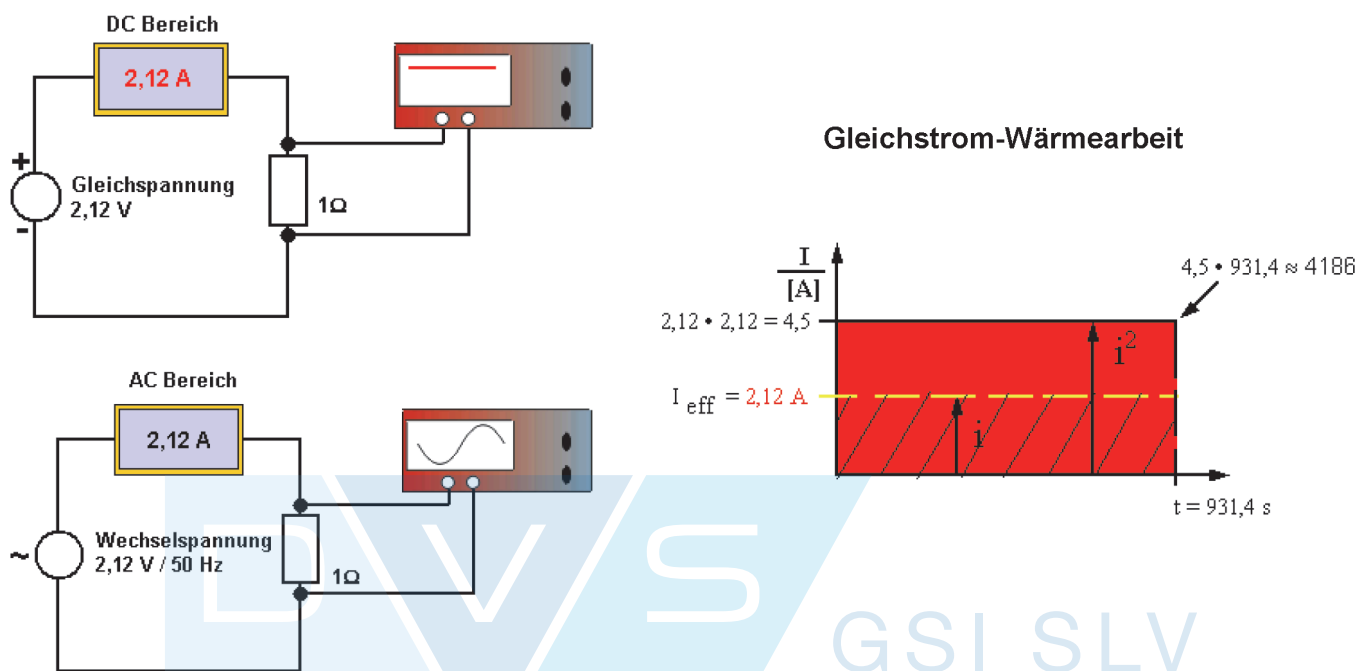


Abbildung 21: Ermittlung der Gleichstrom/Wechselstrom-Wärmearbeit

Der Flächeninhalt des Rechteckes $I^2 \cdot t$ versinnbildlicht die Wärmearbeit, die der Gleichstrom I in der Zeit T im Widerstand $R = 1 \Omega$ verrichtet hat.

Wechselstrom-Wärmearbeit

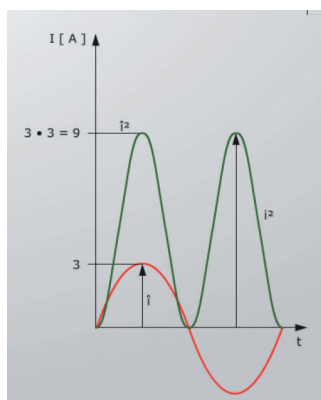


Abbildung 22: Darstellung der Wechselstrom-Wärmearbeit

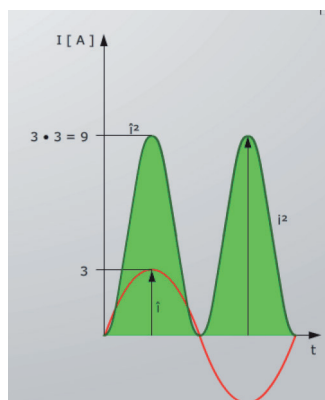
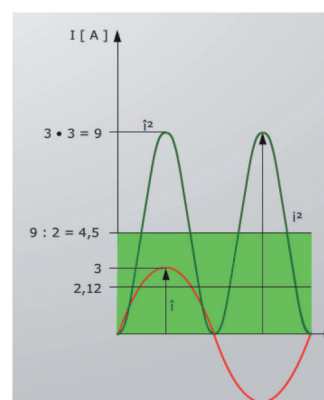


Abbildung 23: Umlegen der Fläche der Wechselstrom-Wärmearbeit in ein Rechteck mit dem gleichen Flächeninhalt wie bei der Gleichstrom Wärmearbeit



13 Leistungen im Wechselstromkreis, $\cos \phi$

Gedankenmodell:

Ein idealer Transformator mit einem thermischen Wirkungsgrad von 100%, (keine thermischen Verluste), einem Übersetzungsverhältnis von $\ddot{u} = 100$ und einem $\cos \phi$ (sprich phi) von 0,84 wird an eine Versorgungsspannung von 100 V angeschlossen.

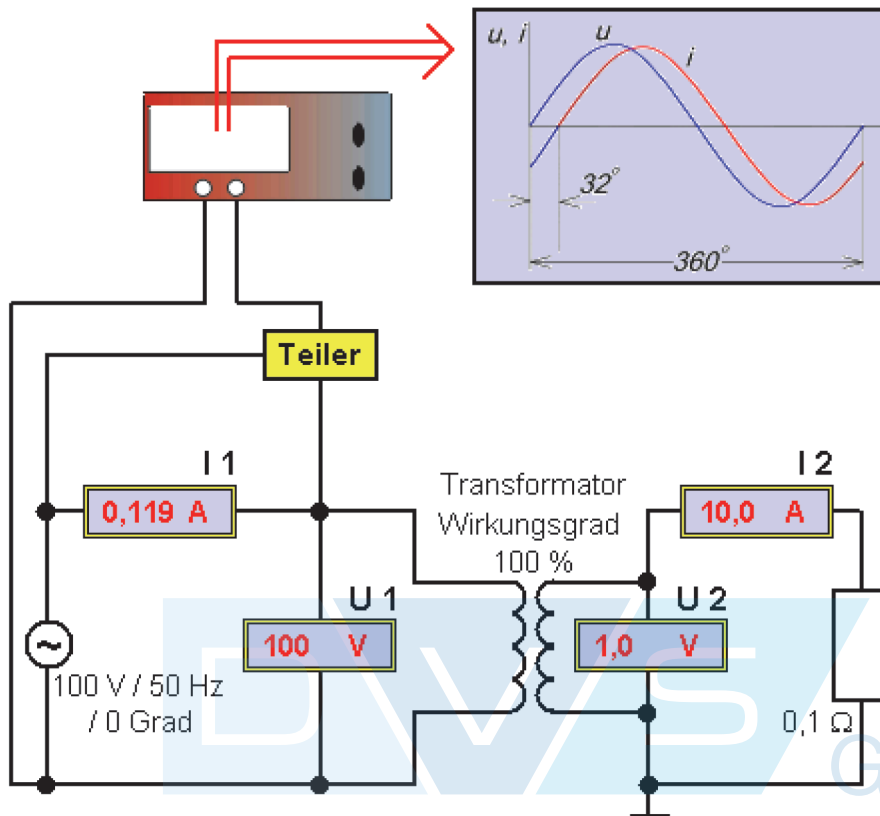


Abbildung 24: Messaufbau zur Ermittlung der Höhe des $\cos \phi$

Die elektrische Leistung, die im ohmschen Widerstand auf der Sekundärseite in Wärme umgewandelt wird, kann berechnet werden nach:

$$P = I^2 \cdot R = (10A)^2 \cdot 0,1\Omega = 10W \quad P \text{ Wirkleistung [W]}$$

oder

$$P = I \cdot U = 10A \cdot 1V = 10W$$

Die Leistungsaufnahme (Primärseite) des Transformators beträgt

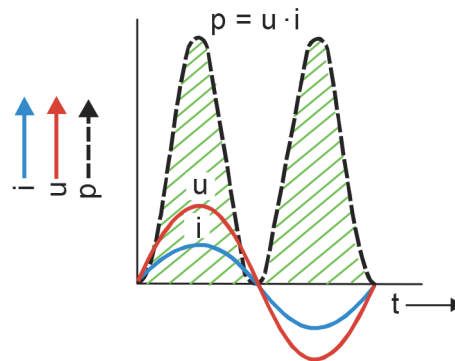
$$S = U \cdot I = 100V \cdot 0,119A = 11,9VA \quad S \text{ Scheinleistung [VA]}$$

Da der Transformator keine eigenen Wärmeverluste hat, bleibt die Frage nach der Differenz zwischen Leistungsaufnahme (11,9 VA) und Leistungsabgabe (10 W).

Leistung bei Wirklast (Stromfluss durch Ohmschen Widerstand)

Strom und Spannungsverläufe sind phasengleich, die Nulldurchgänge finden zum gleichen Zeitpunkt statt.

Multipliziert man zusammengehörige Augenblickswerte von Spannung und Strom, so erhält man die Augenblickswerte der Leistung. Bildet man über diesen den arithmetischen Mittelwert, erhält man die Wirkleistung.



$$\text{Wirkleistung } P = U \cdot I_R$$

Abbildung 25: Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf bei Wirklast

Leistung bei einer idealen Spule (induktive Belastung)

Strom und Spannungsverläufe sind nicht phasengleich, die Nulldurchgänge finden zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt. Der Strom eilt der Spannung um 90° nach.

Die Leistungskurve weist positive und negative Leistungszeitflächen auf.

Da positive Leistung gleichbedeutend ist mit aus dem Netz entzogener Leistung (Wirkleistung P), muss negative Leistung entsprechend an das Netz zurückgegebene Leistung sein.

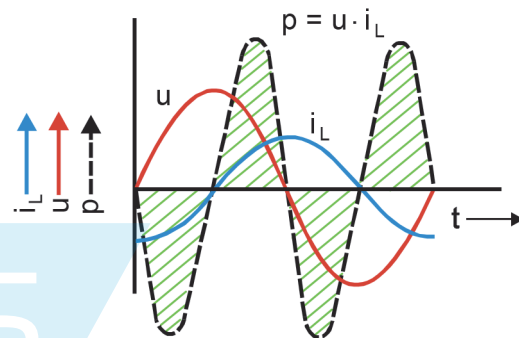


Abbildung 26: Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf bei induktiver Belastung

Die Leistung, die kurzzeitig dem Netz entzogen (dem Netz entliehen) wird, dient zum Aufbau des Magnetfeldes der Spule; die elektrische Leistung, die anschließend wieder zurückgeliefert wird, entsteht beim Abbau des Magnetfeldes.

Diese Leistung pendelt also dauernd zwischen Generator und Verbraucher hin und her. Man nennt diese nicht in Wirkung (Wärme, Licht usw.) wandelbare Leistung *induktive Blindleistung*. Der arithmetische Mittelwert der Leistungskurve ($p(t)$) ist gleich Null, das bedeutet die Wirkleistungsaufnahme des Stromkreises ist gleich Null.

Induktive Blindleistung

$$Q_L = U \cdot I_L$$

Q_L = induktive Blindleistung [var]

I_L = induktiver Strom

Der zur Berechnung der Blindleistung eingesetzte induktive Blindstrom eilt der treibenden Spannung um 90° el. nach. Werden Kondensatoren eingesetzt, tritt kapazitiver Blindstrom auf. Bei der Multiplikation des, der Spannung um 90° el. vorausseilenden kapazitiven Blindstroms I_C mit der Spannung U, erhält man die kapazitive Blindleistung Q_C .

$$Q_C = U \cdot I_C$$

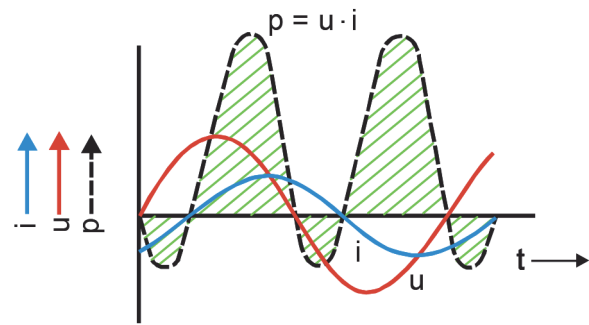
Q_C = kapazitive Blindleistung [var]

I_C = kapazitiver Strom

Leistung bei Belastung durch Wirkwiderstand und induktiven Widerstand

Bei dem Beispiel der mit 100 V gespeisten Transformatorschaltung wird das Netz belastet durch Wirk- (Widerstand R) und Blindleistung. Die resultierende Gesamtleistungsaufnahme wird mit *Scheinleistung* bezeichnet.

$$S = U \cdot I$$



Strom und Spannungsverläufe sind auch bei dieser Belastungsart nicht phasengleich, die Nulldurchgänge finden zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt.

Der Strom eilt der Spannung um einen Phasenverschiebungswinkel $0^\circ < \phi < 90^\circ$ nach.

Abbildung 27: Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf einer verlustbehafteten Spule

Die Leistungskurve weist positive und negative Leistungszeitflächen auf, die aber nicht gleich groß sind. Die Leistungskurve verläuft im Wesentlichen oberhalb der Zeitachse. Es treten also Wirk- und Blindleistungen auf. Bildet man über die Leistungskurve den arithmetischen Mittelwert, erhält man den Wirkleistungsanteil.

Die Scheinleistung kann ermittelt werden nach

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

S	Scheinleistung	[VA]
P	Wirkleistung	[W]
Q	Blindleistung	[var]

Demnach können die Leistungen auch in ein Leistungs-dreieck eingesetzt werden.

In dem Leistungs-dreieck kommt dem Winkel ϕ bzw. dem Cosinus des Winkels eine besondere Bedeutung zu. Er stellt den Leistungsfaktor der Schaltung dar.

$$\cos \phi = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$$

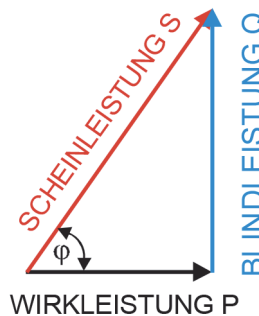
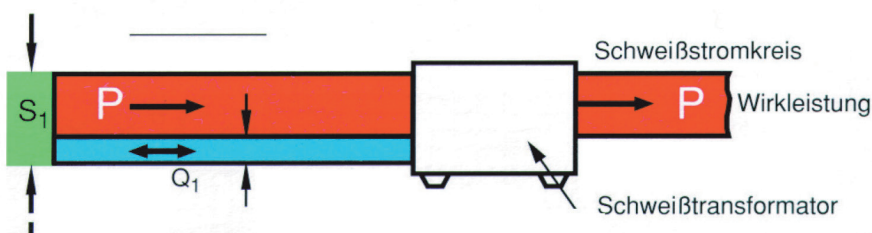


Abbildung 28: Leistungs-dreieck

Da die Wirkleistung weitgehend mit der Schweißleistung und die Scheinleistung mit dem Anschlusswert der Stromquelle gleichgesetzt werden kann, erlaubt ein $\cos \phi$ nahe 1 eine gute Ausnutzung des Versorgungsnetzes.



Bei dem Beispiel der mit 100 V gespeisten Transformatorschaltung beträgt der $\cos \phi$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{10,0W}{11,9VA} = 0,84$$

Dieser Wert ergibt einen Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung von

$$\cos \phi = 0,84 \hat{=} \phi = 32$$

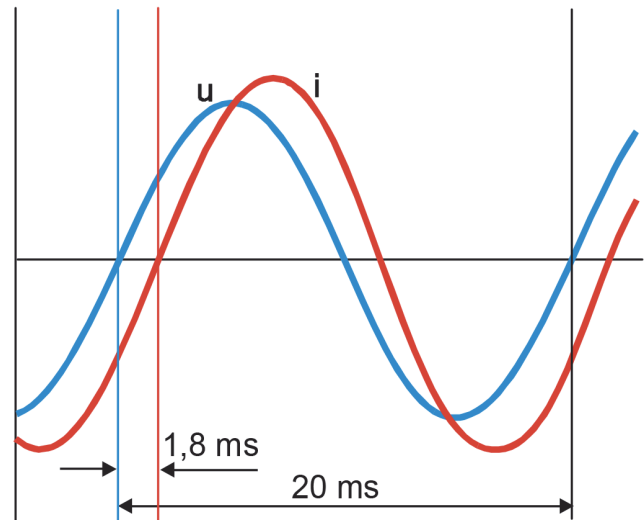


Abbildung 29: Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung
20 ms entspricht 360°
1,8 ms entspricht 32°

14 Dreiphasenwechselstrom – Drehstrom

Zum Transport zwischen Energieerzeuger (Generator im Kraftwerk) und Energieabnehmer (z.B. eine MSG-Stromquelle) wird das Drehstromnetz benutzt. Am Anfang steht der Drehstromgenerator.

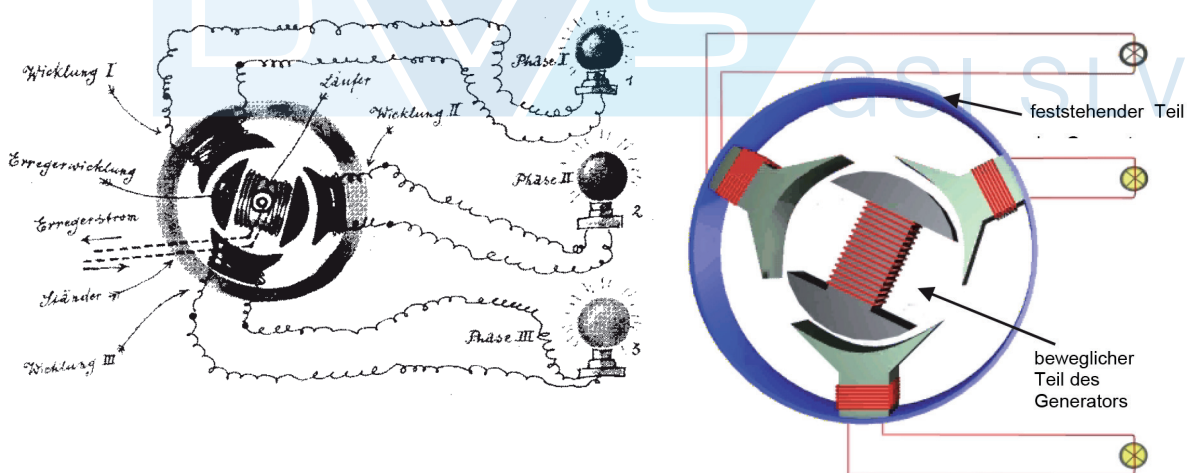


Abbildung 30: Prinzipschaltung eines Drehstromgenerators

Bei der Drehung eines Magnetfeldes werden in drei räumlich um 120° versetzten Spulen drei um 120° elektrisch gegeneinander phasenverschobene sinusförmige Wechselspannungen erzeugt.

Zum Fortleiten des Dreiphasenwechselstromes sind ursprünglich sechs Leitungen notwendig. Damit erhält man die **unverkettete** oder offene **Dreiphasenschaltung**.

Durch das „**Verkett**en“ der Leitungen erhält man die **Sternschaltung**, bei der nur die drei bzw. vier Leitungen erforderlich sind.

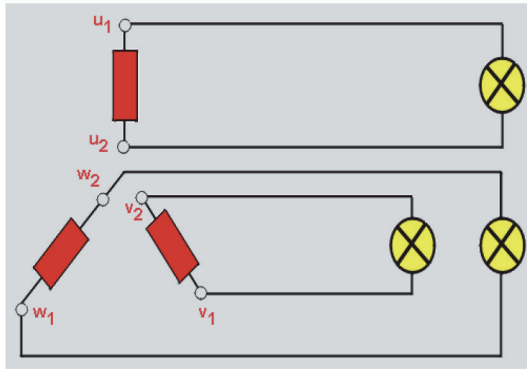


Abbildung 31: Unverkettetes Dreiphasensystem

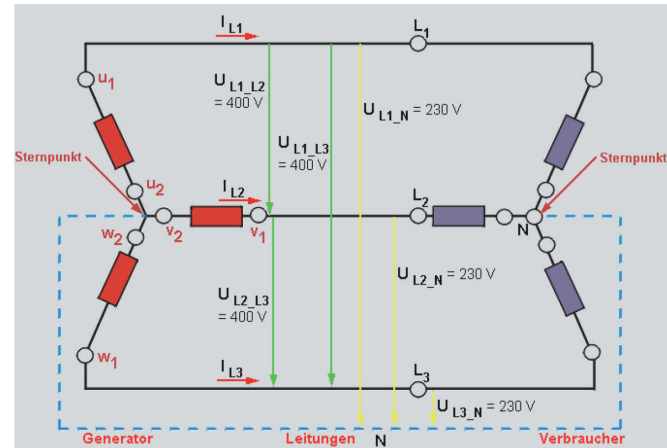


Abbildung 32: Erzeuger und Verbraucher in verketteter Sternschaltung

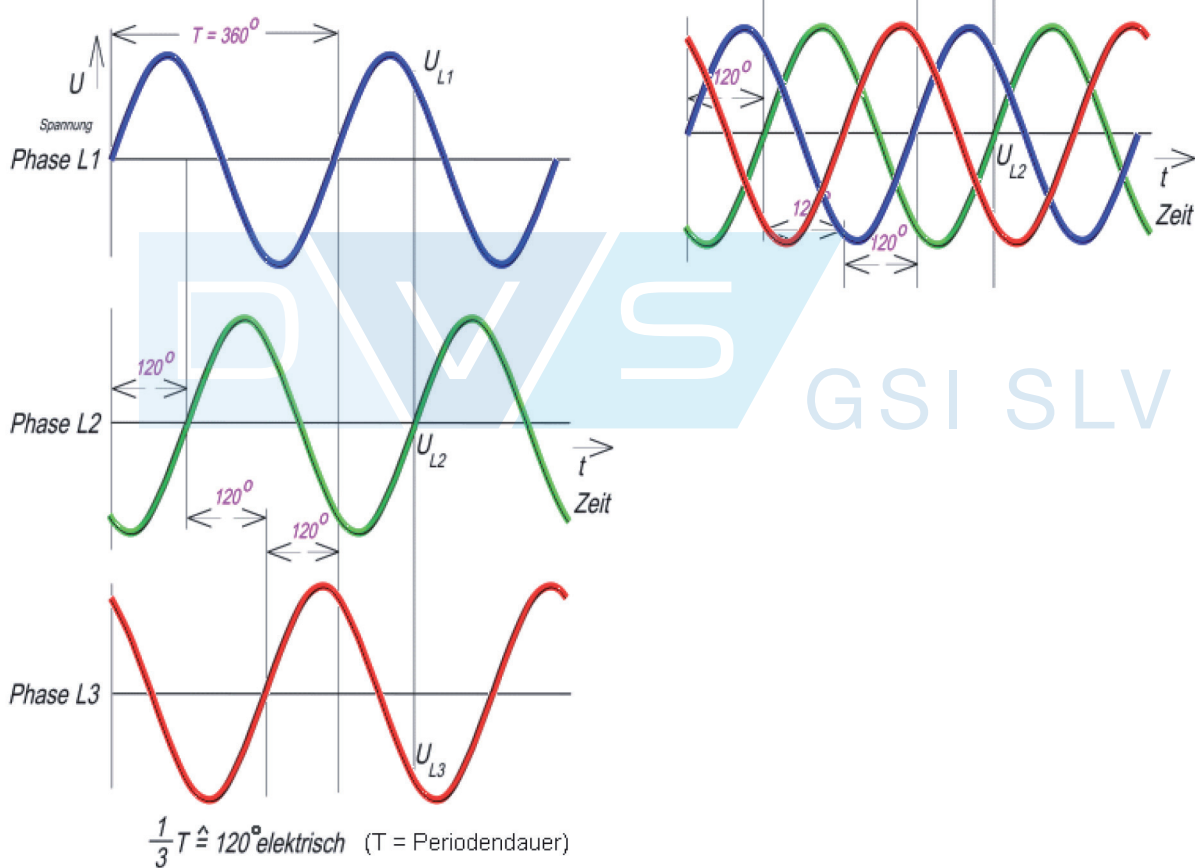


Abbildung 33: Darstellung der Dreiphasenwechselspannung

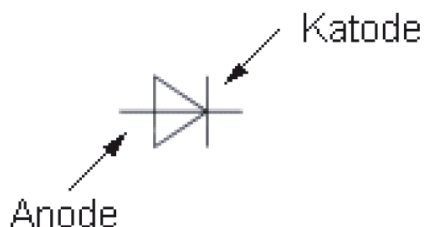
Merke:

- Die 3 Phasenspannungen haben die gleiche Frequenz.
- Die 3 Phasenspannungen haben den gleichen Spitzenwert.
- Die 3 Phasenspannungen sind um 120° zeitlich gegeneinander verschoben.

15 Diode und Gleichrichter

Diode

Dioden sind vergleichbar mit Rückschlagventilen. Es handelt sich um Halbleiterbauelemente, die den elektrischen Strom in Flussrichtung durchlassen, während sie in Sperrichtung den elektrischen Strom blockieren.



Bei der einfachsten Gleichrichterschaltung mit nur einer Diode wird nur die positive Halbwelle dem Belastungswiderstand zugeführt, während der negativen Halbwelle fließt kein Strom durch den Verbraucher.

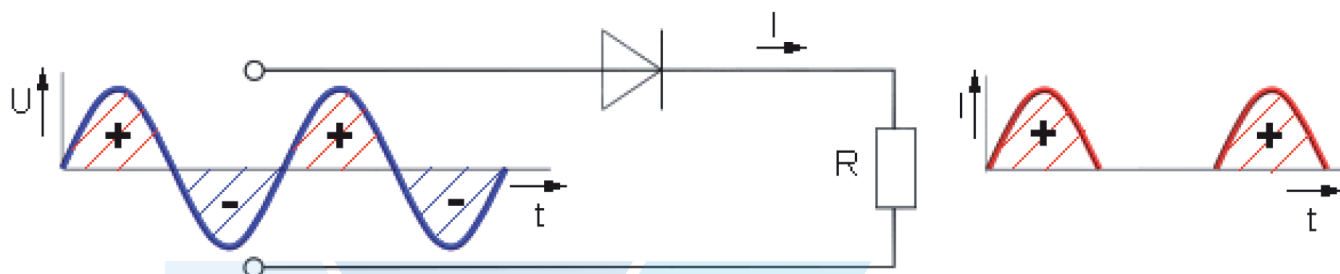


Abbildung 34: Einweg-Gleichrichter

Wechselstrom-Brückengleichrichter

Bei der Wechselstrom-Brückengleichrichterschaltung wird die negative Halbwelle der Wechselspannung durch den Gleichrichter „hochgeklappt“ und wird somit zu einer positiven Stromzeitfläche durch den Verbraucher.

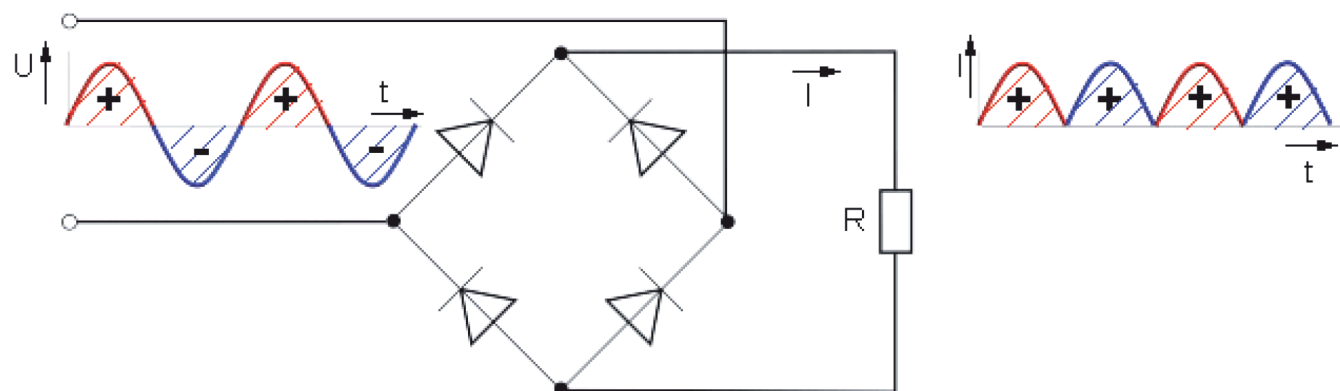


Abbildung 35: Brücken-Zweiweg-Gleichrichter

Drehstrom-Brückengleichrichter

Für den Lichtbogen wird ein Strom gebraucht, in dem nur noch geringe Anteile des Wechselstromes zu finden sind. Die „Restwelligkeit“ W soll gering sein. Als Restwelligkeit wird das Verhältnis Wechselstromanteil I_{AC} zu Gleichstromanteil I_{DC} bezeichnet.

$$W = \frac{I_{AC}}{I_{DC}} [\%]$$

Je kleiner der Zahlenwert der Restwelligkeit ist, umso "besser" arbeitet der Gleichrichter. Bei der Wechselstrom-Brückengleichrichterschaltung liegt er bei 48%.

In den Lichtbogenstromquellen kommen Drehstrom-Brückengleichrichter zum Einsatz. Die Restwelligkeit beträgt nur noch 4,2%.

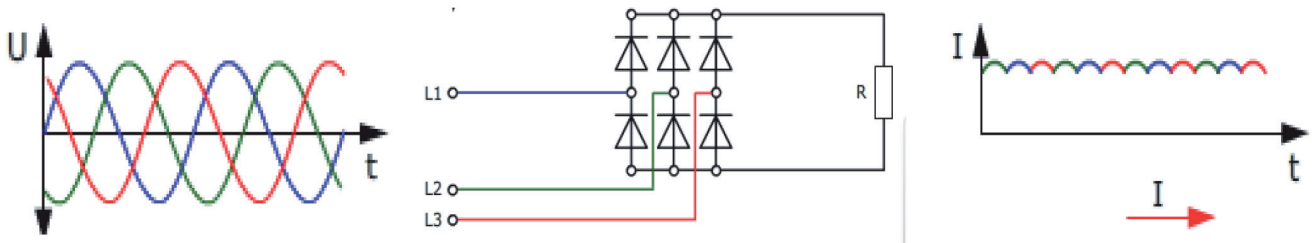


Abbildung 36: Drehstrom Brücken-Gleichrichterschaltung

16 Thyristor und Transistor

Thyristor



Thyristoren sind vergleichbar mit Rückschlagventilen, die gleichzeitig die Durchflusszeit steuern können; sie sind also steuerbare Gleichrichterelemente. Bei der positiven Halbwelle des Wechselstroms kann Strom fließen, wenn am Thyristor eine Steuerspannung anliegt. Der Zeitpunkt, wann die Steuerspannung anliegt, kann gewählt werden (Zündzeitpunkt). Damit kann der Effektivwert der elektrischen Leistung schnell, stufenlos und fast ohne Verluste gesteuert werden. Die negative Halbwelle wird grundsätzlich gesperrt.

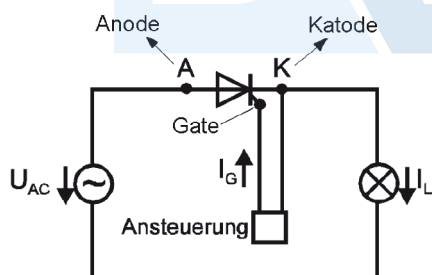


Abbildung 37: Thyristorschaltung

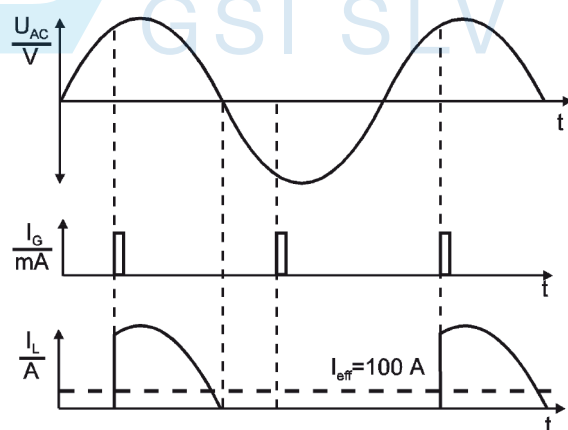


Abbildung 38: Speisespannung U_{AC} , Zündsteuerstrom I_G , Laststrom I_L

Transistor



Transistoren sind vergleichbar mit extrem schnell reagierenden Durchflussventilen. Sie sind also steuerbare Halbleiterelemente, die in einer Schaltzeit von wenigen Mikrosekunden Ströme bis zu 300 A je Transistor schalten können. Sie sind gewissermaßen sehr schnell veränderliche ohmsche Widerstände. Bei getakteten Stromquellen dienen sie auch als schnelle EIN-/AUS-Schalter.

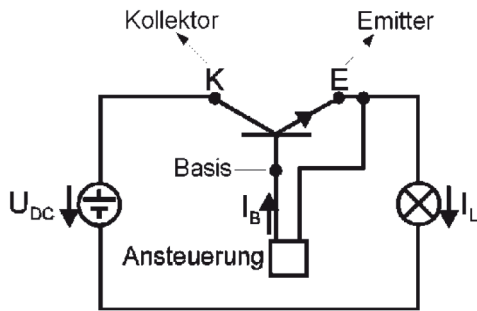


Abbildung 39: Transistorschaltung

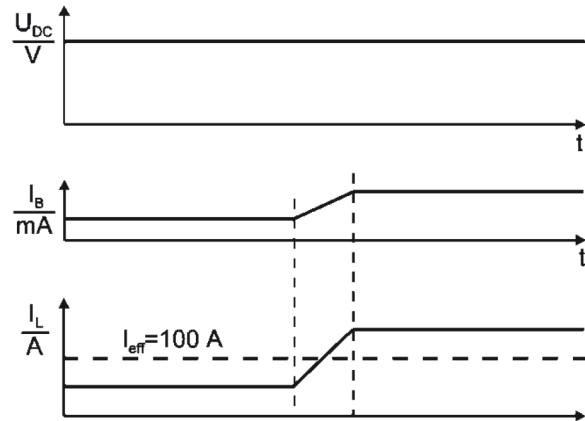


Abbildung 40: Speisespannung U_{DC} , Steuerstrom I_B , Laststrom I_L

Die „Grundversionen“ der Transistoren stellen die sogenannten bipolaren Typen. Sie zeichnen sich durch ihre leichte Ansteuerbarkeit aus.

Die Feldeffekttransistoren (FET) zählen zu den unipolaren Transistoren. Sie haben einen so hohen Eingangswiderstand, dass man sie leistungslos steuern kann. Es fließt praktisch kein Steuerstrom, es wird nur eine Steuerspannung an den Eingang gelegt.

In den modernen Stromquellen werden als Leistungstransistoren IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) eingesetzt. Sie sind eine „Kreuzung“ der bipolaren Transistoren mit einem speziellen Feldeffekttransistor (MOS-FET). Ihr Hauptanwendungsbereich liegt bei höheren Spannungen, ab einigen 100 V hohen Leistungen (geschaltete Ströme maximal bis 4 kA) und Arbeitsfrequenzen bis max. 200 kHz.

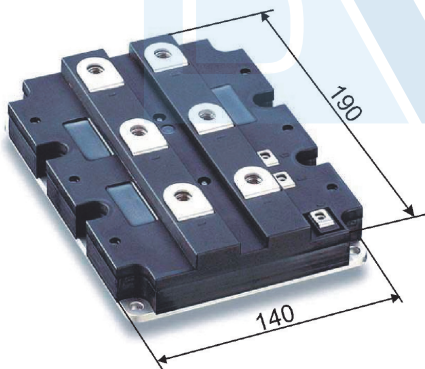


Abbildung 41: Abbildung vom IGBT ABB 5SNA 2400E120100 (Spannung $V_{CE} = 1200$ V, Strom $I_c = 2400$ A)

17 Gefahren beim Umgang des Menschen mit der elektrischen Spannung und dem elektrischen Strom, Gesundheits- und Arbeitsschutz

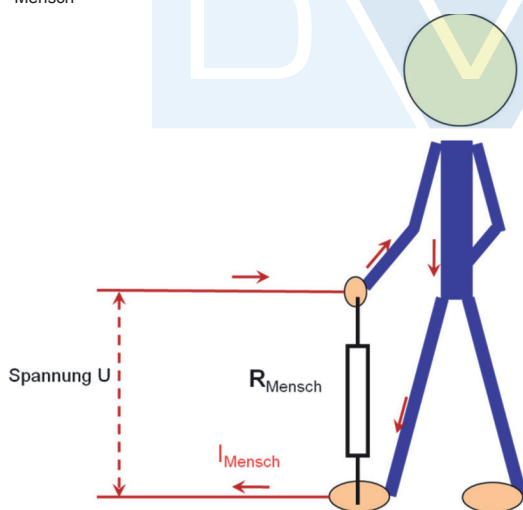
Hierzu gibt es eine gesonderte SFI-Unterrichtseinheit, die sich mit den Gefahren, sowie mit dem Gesundheits- und Arbeitsschutz beim Schweißen beschäftigt.

Gefahr durch die elektrische Spannung

- Durchströmung des menschlichen Körpers
- AC gefährlicher als DC

Gefahrenvermeidung

- Arbeitsschutzkleidung!!
- bewirkt die Vergrößerung des Widerstands Mensch R_{Mensch} und daraus folgt eine
- Verkleinerung des Stromes I_{Mensch} durch den Menschen.



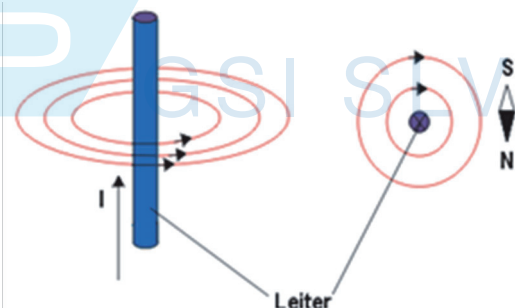
a. Gefährdung durch die elektrische Spannung

Gefahr durch den elektrischen Strom

- Bei DC-Strömen nahezu keine Gefahr, wenn kein Wechselstromanteil ($< dI/dt$) vorhanden ist
- Wechselstrom (AC) mit hohen Frequenzanteilen
 - großes dI/dt
 - z.B. Stromimpulse $\gg 10 \text{ kA}$
 - z.B. Widerstandsschweißen $> 60 \text{ kA}$

Gefahrenvermeidung

- Bedienungsanleitung lesen Abstand zu stromführenden Teilen halten!
- magnet. Feldstärke $H \sim 1/I^2$, I = Abstand vom Leiter. Die Feldstärke nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab. Oft reichen deshalb schon wenige cm Abstand aus, um eine Gefährdung zu vermeiden.



Transformatorprinzip

- b. Gefährdung durch magnetische Felder

Abbildung 42: Gefährdung des Menschen durch elektrische Einflüsse

18 Literatur

1. Heinz Meister: Elektrotechnische Grundlagen; Vogel Buchverlag Würzburg



Auflistung Formelzeichen, Einheiten und Gesetze der Elektrotechnik

	Formelzeichen	Einheiten
Spannung	U	V
Strom	I	A
Wirkwiderstand	R	Ω
elektrische Leitfähigkeit	σ	$\frac{m}{\Omega \cdot mm^2}$
Wirkleistung	P_{el}	W
elektrische Arbeit	W_{el}	Ws oder kWh
Wärmemenge	Q	Joule oder kJ
Kapazität	C	Farad F [As/V]
Induktivität	L	Henry H [Vs/A]
Scheinwiderstand	Z	Ω
magnetischer Fluss	Φ	Vs
magnetischer Widerstand	R_m	A/Vs
Frequenz	F	Hz
magnetische Flussdichte	B	Vs/m ²
Scheinleistung	S	VA
Blindleistung	Q_{el}	var
cos phi	cos ϕ	
Periodendauer	T	s
	Gesetze	
Reihenstromkreis	$U_g = U_1 + U_2 + U_3$	
	$I_g = I_1 = I_2 = I_3$	
	$R_g = R_1 + R_2 + R_3$	
Parallelstromkreis	$U_g = U_1 = U_2 = U_3$	
	$I_g = I_1 + I_2 + I_3$	
	$R_g = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$	
Ohmsches Gesetz	$I = \frac{U}{R}$	
Leitungswiderstand	$R_L = \frac{l}{\sigma \cdot A}$	
Wirkleistung	$P_{el} = U \cdot I$	
elektrische Arbeit	$W_{el} = U \cdot I \cdot t$	

Wärmemenge	$Q = I^2 R \cdot t [J]$	
induzierte Spannung	$U_2 = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	
induzierte Spannung	$U_2 = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot \phi \cdot f \cdot N_2$	
Transformatorhauptgleichung	$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_2}{I_1}$	
Frequenz	$f = \frac{1}{T}$	
quadratischer Mittelwert (Effektivwert)	$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt}$	
arithmetischer Mittelwert	$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i \cdot dt$	
Gleichrichtwert	$ \bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i \cdot dt$	
cos phi	$\cos \varphi = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$	
Wirkleistung im Wechselstromkreis	$W_{el} = U \cdot I \cdot \cos \phi$	
Blindleistung	$Q_{el} = U \cdot I \cdot \sin \phi$	
Scheinleistung	$S = U \cdot I$	
Scheinleistung	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	

19 Testfragen

1. Was sind die wichtigsten elektrischen Größen im Grundstromkreis?

- ☐ die Spannung U
- ☐ das Ohmsche Gesetz
- ☐ die Stromstärke I
- ☐ der Schweißstromkreis
- ☐ der Widerstand R

2. Der elektrische Widerstand ist

- ☐ eine Leistung.
- ☐ der Quotient aus Spannung und Stromstärke.
- ☐ umso kleiner, je größer die Querschnittsfläche ist.
- ☐ proportional zur Strömung des Gases im Schlauch.
- ☐ umso größer, je länger ein Schweißkabel ist.

3. Die Reihenschaltung von 4 unterschiedlichen Widerständen

- ☐ ist der Gesamtwiderstand gleich der Summe aller Teilwiderstände.
- ☐ ist der Spannungsabfall über allen Widerständen gleich.
- ☐ fließt durch alle Widerstände der gleiche Strom.
- ☐ ist die Summe aller Leitwerte.
- ☐ ist der Gesamtwiderstand kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.

4. Bei der Parallelschaltung von 2 unterschiedlichen Widerständen

- ☐ beträgt der Gesamtwiderstand $(R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$.
- ☐ ist die Höhe des Gesamtwiderstandes die Summe aller Widerstände.
- ☐ ist der Gesamtwiderstand kleiner als der kleinste Einzelwiderstand.
- ☐ ist die Spannung über alle Widerstände gleich.
- ☐ beträgt der Gesamtwiderstand bei gleichen Widerständen $2 \cdot R$

5. Das Magnetfeld

- ☐ umgibt einen stromdurchflossenen Leiter.
- ☐ ist um einen elektrischen Leiter proportional zu der über den Leiter abfallenden Spannung.
- ☐ Auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkt im Magnetfeld eine Kraft ($F = B \cdot I \cdot l$).
- ☐ entsteht beim Reiben eines Gummistabes auf einem Fell.
- ☐ um einen elektrischen Leiter ist proportional zu dem in dem Leiter fließenden Strom.

6. Welche Aussage zur elektrischen Arbeit ist richtig?

- ☐ Der von der Energieversorgung vorgeschriebene „Zähler“ zeigt die verbrauchte elektrische Leistung an.
- ☐ Aus der Angabe W_{el} 40 kWh und der dazu gehörigen Zeitangabe $t = 30$ min kann die elektrische Leistung berechnet werden.
- ☐ Die Stromwärme kann nach folgender Formel berechnet werden $Q = I^2 \cdot R \cdot t$.
- ☐ Die Zahlenwerte der Einheit Ws, Joule und Nm können nur mit Umrechnungsfaktoren gegeneinander verrechnet werden.
- ☐ Die Stromwärme kann nach folgender Formel berechnet werden $Q = U^2 \cdot R \cdot t$.

7. Welche Aussagen sind richtig?

- ☐ Der Gleichstrom fließt immer in eine Richtung.
- ☐ Der Gleichstrom wechselt seine Polarität alle 50s.
- ☐ Bei einem Drei-Phasen-Stromnetz spricht man von Drehstrom.
- ☐ Der $\cos \phi$ ist der Leistungsfaktor, und ϕ die Phasenverschiebung zwischen U und I.
- ☐ Der $\cos \phi$ ist der Wirkungsgrad eines Gerätes.

8. Wie berechnet sich die elektrische Leistung P?

- ☐ $P = U \cdot I$
- ☐ $U = R \cdot I$
- ☐ $P = I^2 \cdot R$
- ☐ $P = U^2 \cdot R^{-1}$
- ☐ $P = I^2 \cdot R \cdot t$

9. Was versteht man unter einem elektrischen Bauelement?

- ☐ Transformator
- ☐ Schweißzange
- ☐ Spule
- ☐ Kondensator
- ☐ die Leitungsisolierung

10. Der Kondensator

- ☐ speichert die elektrische Energie proportional zu U^2 .
- ☐ speichert die elektrische Energie proportional zu I^2 .
- ☐ ist ein Halbleiterbauelement.
- ☐ ist ein „Phasenschieber“, verzögert das Ansteigen der Spannung gegenüber dem Strom.
- ☐ ist ein „Phasenschieber“, verzögert das Ansteigen des Stroms gegenüber der Spannung.

11. Die Induktivität

- ☐ speichert die elektrische Energie proportional zu U^2 .
- ☐ speichert die elektrische Energie proportional zu I^2 .
- ☐ ist ein Halbleiterbauelement.
- ☐ ist ein „Phasenschieber“, verzögert das Ansteigen der Spannung gegenüber dem Strom.
- ☐ ist ein „Phasenschieber“, verzögert das Ansteigen des Stroms gegenüber der Spannung.

12. Der Transformator

- ☐ überträgt nur Wechselstromsignale.
- ☐ überträgt nur Gleichstromsignale.
- ☐ Beim Transformator verhält sich die Ausgangsspannung zur Eingangsspannung wie die Eingangswindungszahl zur Ausgangswindungszahl.
- ☐ Beim Transformator verhält sich die Eingangsspannung zur Ausgangsspannung wie die Eingangswindungszahl zur Ausgangswindungszahl.
- ☐ Bei einem Transformator ist das Stromverhältnis wie das Spannungsverhältnis., jedoch umgekehrt.

13. Was ist ein elektronisches Bauelement?

- ☐ Diode
- ☐ Drossel
- ☐ Thyristor
- ☐ Transistor
- ☐ Transformator

14. Welche Aussagen sind richtig?

- ☐ Dioden werden zum Gleichrichten von elektrischen Wechselgrößen (Spannung, Strom) verwendet.
- ☐ Der Einweggleichrichter hat die geringste Welligkeit.
- ☐ Die Drehstrombrückenschaltung hat die geringste Welligkeit.
- ☐ Der Transistor ist ein mechanischer Schalter.
- ☐ Der Transistor kann wie ein analog veränderbarer Widerstand oder als Schalter verwendet werden.

15. Wodurch wird der Mensch beim Umgang mit der Elektrizität gefährdet?

- ☐ durch hohe elektrische Spannungen bei zu geringem Abstand zu spannungsführenden Bauteilen,
- ☐ beim Berühren von unter Spannung (z.B. 150 V AC) stehender elektrischer Bauteile,
- ☐ durch gleichstromführende isolierte Schweißkabel,
- ☐ durch den Aufenthalt in der Nähe wechselstromführender Leitungen mit sehr großen Stromamplituden und großem di/dt ,
- ☐ beim Beachten der Sicherheitsvorschriften und dem Tragen von Handschuhen, Sicherheitsschuhen, Arbeitsschutzkleidung.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Physikalische Grundbegriffe	2
3	Wie entsteht der Lichtbogen – Zündmechanismen	6
4	Spannungsverlauf im Lichtbogen	8
5	Der Lichtbogen im Magnetfeld	10
6	Der Lichtbogen mit nichtabschmelzender Elektrode (WIG, Plasma)	11
6.1	WIG-Schweißen	11
6.2	Plasma-Schweißen	12
7	Der Lichtbogen beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode (MSG-Schweißen)	13
7.1	MIG-Schweißen	13
7.2	MAG-Schweißen	13
7.3	Lichtbogenzündung	13
7.4	Lichtbogenkennlinie und Kräfte im Lichtbogen	13
7.5	Prozessdynamik	14
7.6	Lichtbogenformen beim MSG-Schweißen	15
8	Wechselstromschweißen	16
9	Die Besonderheiten des Lichtbogens beim Lichtbogenhandschweißen	17
10	Die Besonderheiten des Lichtbogens beim UP-Schweißen	17
11	Die Besonderheiten des Lichtbogens beim Bolzenschweißen	17
12	Gefahren bei der Anwendung des Lichtbogens beim Fügen (Schweißen) und Trennen (Schneiden) von Metallen	18
13	Literatur bzw. weitergehende Informationen zum Schweißlichtbogen	20
14	Testfragen	21

1 Einleitung

Der Lichtbogen ist eine besondere Form der selbstständigen Gasentladung mit relativ großen Strömen (von 1 A bis 1500 A) und niedrigen Brennspannungen (von 15 V bis 50 V). Der elektrische Strom fließt über die Plasmasäule, den Lichtbogen. Dieses Plasma entspricht einem elektrisch leitfähigen heißen Gas. Die Größe des fließenden (Schweiß-)Stromes bestimmt die Plasmatemperatur. Diese Wärmeenergie wird zum Verbinden oder Trennen von Metallen durch örtlich begrenztes Schmelzen genutzt.

Der Lichtbogen wird heute hauptsächlich angewendet in Verbindung mit

- nichtabschmelzenden Elektroden (z.B. beim WIG- und Plasma-Schweißen),
- abschmelzenden Elektroden (z.B. beim Lichtbogenhand-, MSG- und UP-Schweißen),
- Bolzenschweißen,
- Plasma-Schneiden,
- Plasmaspritzen.

In diesem Kapitel werden wichtige Grundlagen zu Vorgängen der Entstehung der elektrischen Gasentladung und des Hochtemperaturplasmas erläutert.



2 Physikalische Grundbegriffe

Atom

Das Atom ist das kleinste Teilchen eines chemischen Elementes, das noch dessen chemische Eigenschaften besitzt. Die wichtigsten Bestandteile eines Atoms sind der Atomkern mit Protonen und Neutronen, sowie die Elektronenhülle mit den Elektronen. Die Protonen haben eine positive und die Elektronen eine negative Ladung. Neutronen sind elektrisch neutral. Protonen und Neutronen bestimmen die Masse des Atoms. Auf Bahnen (Schalen) um den Atomkern, in der Atomhülle, bewegen sich die Elektronen. Von elektrisch neutralen Atomen spricht man, wenn die Zahl der Protonen gleich der Zahl der Elektronen ist. Bei Edelgasen sind zudem alle Elektronenschalen vollständig mit Elektronen besetzt. Dadurch sind sie chemisch inaktiv (inert).

Ion

Von einem Ion spricht man immer dann, wenn sich auf den Elektronenschalen mehr oder weniger Elektronen befinden als positive Ladungsträger (Protonen) im Kern.

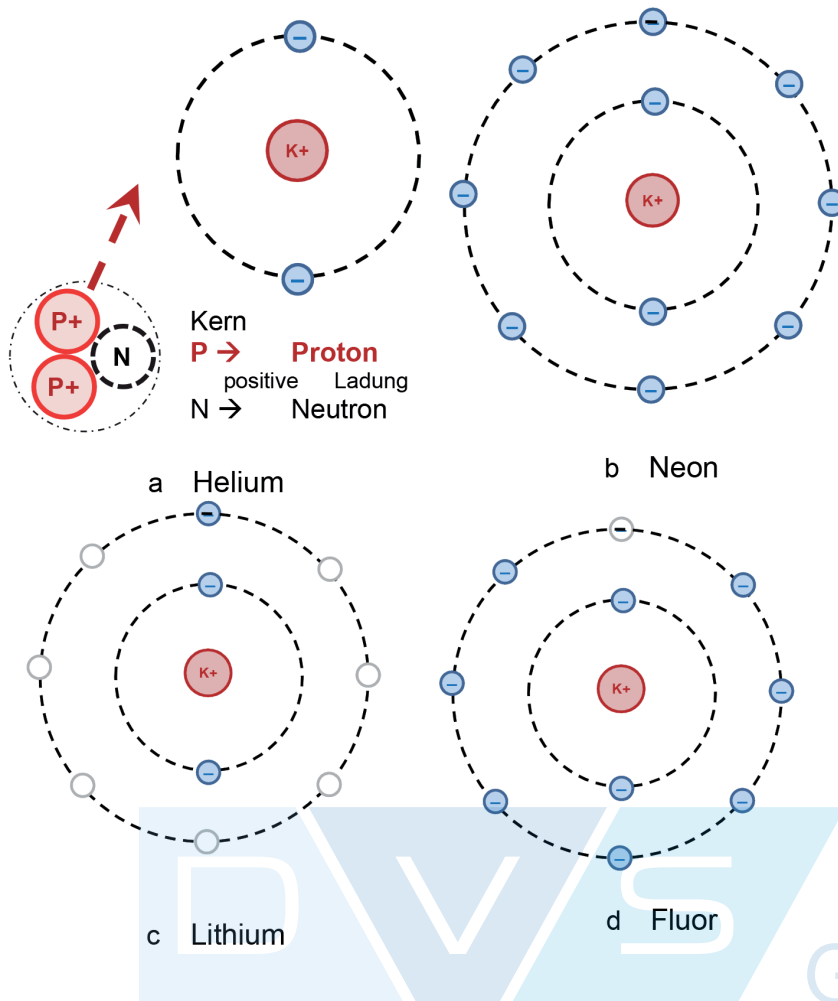
positive Ionen $\oplus$

- Auf der äußeren Schale fehlt mindestens 1 Elektron, die Kernladung überwiegt.
- ⇒ Das Ion ist elektrisch positiv geladen.
- Dieses Ion wird als Kation bezeichnet, weil es sich in Richtung Kathode bewegt.

negative Ionen $\ominus$

- Auf der äußeren Schale befindet sich mindestens 1 Elektron mehr, die Zahl der Elektronen überwiegt.
- ⇒ Das Ion ist elektrisch negativ geladen.
- Dieses Ion wird als Anion bezeichnet, weil es sich in Richtung Anode bewegt.

Von einer Ionisierung spricht man dann, wenn Atome z.B. durch den „Beschuss“ mit Elektronen oder Ionen angeregt werden, Elektronen abzugeben oder aufzunehmen, sodass sie selbst zu Ionen werden. Freie Ionen entstehen aber auch durch den Vorgang der Dissoziation, z.B. bei der Lösung von Salzen (z.B. NaCl) in Wasser.



$K^+ \rightarrow$ der Atomkern hat eine positive Ladung. Die Anzahl der Protonen ist gleich der Zahl der Elektronen
 $\rightarrow$ das Atom ist nach außen elektrisch neutral.

Abbildung 1: Das Atommodell (schematisch)

Molekül

Ein Molekül ist eine chemische Verbindung von mindestens 2 Atomen. Man unterscheidet im Wesentlichen zwei Bindungsarten:

- Atombindung $\rightarrow$ z.B. Wasserstoff als Molekül H_2 .
- Ionenbindung $\rightarrow$ z.B. NaCl

Vergleich

Atom $\leftarrow : \rightarrow$ Elektron

Wasserstoffatom

Durchmesser, Wirkdurchmesser

$\Rightarrow$ ca. 20000 : 1

Masse

$\Rightarrow$ ca. 20000 : 1

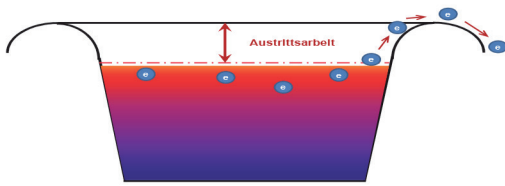


Abbildung 2: Der Potentialtopf (Modell)

Austrittsarbeit, typische Werte

- Cu	4,3–4,50 eV
- Al	3,2–4,00 eV
- W	4,56–4,60 eV
- Ag	4,05–4,50 eV
- Ni	5,00 eV
- K	2,25 eV
- Na	2,28 eV
- Cs	1,7–2,14 eV
- Ba	1,8–2,52 eV

Austrittsarbeit

Unter Austrittsarbeit versteht man die Energie, die erforderlich ist, um Elektronen z.B. aus einem Metall an die Oberfläche zu bringen. Abbildung 2 zeigt sehr anschaulich anhand des Potentialtopf-Modells die „Größe“ dieser erforderlichen Arbeit. In der nebenstehenden Tabelle werden einige konkrete Zahlenwerte zu Austrittsarbeiten angegeben. Entscheidend sind vor allem die Relationen der verschiedenen Werkstoffe, z.B. Wolfram W und Barium Ba.

Fazit: Je kleiner die Austrittsarbeit, je weniger Energie muss aufgebracht werden, um freie Elektronen aus der Metalloberfläche der Kathode austreten zu lassen,

→ umso sicherer das Zündverhalten,

→ umso höher die Strombelastbarkeit der Kathode.

Beim WIG-Schweißverfahren werden durch die Einlagerung von z.B. „seltenen Erden“ in die Wolframelektrode Verbesserungen beim berührungslosen Zünden des Lichtbogens mit einem Hochspannungsimpuls erreicht (siehe Kapitel 1.06 WIG-Schweißen).

Das Plasma

- ist der 4. Aggregatzustand (Abbildung 3)
- ist ein vollständig oder teilweise ionisiertes Gas

→ und besteht vorwiegend aus Elektronen und Ionen sowie aus Atomen und Molekülen

→ und erscheint nach außen elektrisch neutral

→ und verhält sich aber gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern wie ein elektrischer „Leiter“

- kann nach dem Druck eingeteilt werden in Nieder-, Normal- und Hochdruckplasma
- wird je nach Temperatur als kaltes oder heißes Plasma bezeichnet.

Beim Lichtbogenschweißen entsteht das Plasma (der Lichtbogen) durch eine elektrisch angeregte selbstständige Gasentladung und entspricht so in der Regel einem Hochtemperaturplasma bei Normaldruck (Atmosphärendruck)

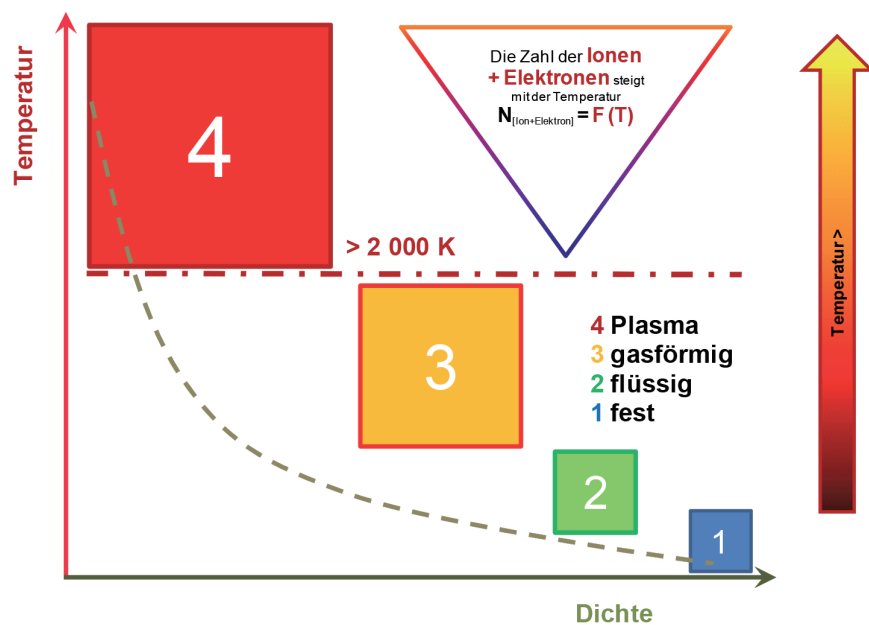


Abbildung 3: Aggregatzustände



3 Wie entsteht der Lichtbogen – Zündmechanismen

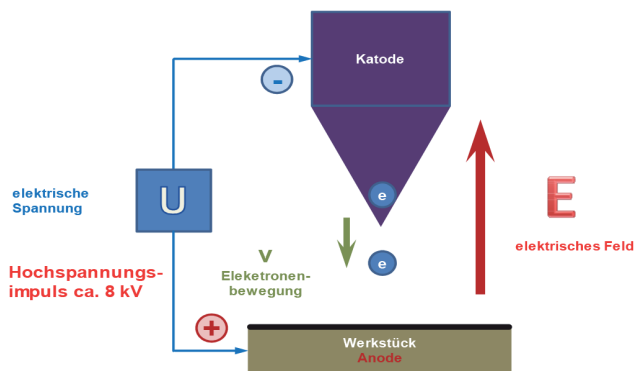


Abbildung 4: Zündung des Lichtbogens mittels Feldemission

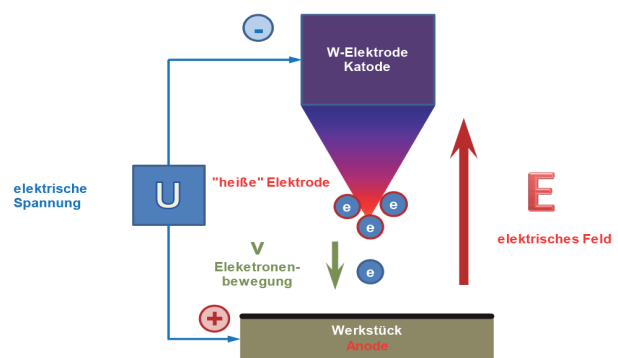


Abbildung 5: Die thermische Emission

Feldemission (Abbildung 4)

In der Elektrotechnik versteht man unter dem Begriff der Feldemission das Austreten von Elektronen aus einer metallischen Oberfläche (Leiter), der Kathode, beim Vorliegen einer hohen elektrischen Feldstärke.

Am Beispiel der berührungslosen Zündung des Lichtbogens beim WIG-Schweißen sollen die wichtigsten Anforderungen beschrieben werden:

- Beim WIG-Schweißen werden Wolfram-Elektroden als Kathode verwendet. Sie haben eine sehr hohe Austrittsarbeit (siehe Tabelle in Abbildung 2). Durch die Einlagerung von Werkstoffen mit niedriger Austrittsarbeit z.B. den „Seltenen Erden“ wird das Austreten von Elektronen erleichtert und damit eine sichere Zündung des Lichtbogens gewährleistet.
- Die spitze Ausformung der Elektrode ermöglicht eine hohe elektrische Feldstärke.
- Zur Einleitung des Zündvorgangs wird ein hoher Zündspannungsimpuls (ca. 8 kV) zwischen Kathode und Anode angelegt.
- Je kleiner der Elektroden-Werkstück-Abstand ist, umso schneller ist eine Zündung des Lichtbogens möglich.
- Beim WIG-Schweißen wird vorwiegend Argon als Schutzgas eingesetzt. Der Lichtbogen zündet leichter als bei der Verwendung von Helium. Reines Helium erfordert höhere Leerlaufspannungen.

Der Vorgang der berührungslosen Zündung des Lichtbogens

- Aufgrund des Hochspannungsimpulses bildet sich ein ionisierter, leitfähiger Kanal zwischen der Elektrode und dem Werkstück aus.
- Es entsteht zunächst eine sogenannte „kalte“ Entladung.
- Diese „kalte“ Entladung führt bei einer entsprechenden Leerlaufspannung der Schweißstromquelle zur Zündung des („heißen“) Schweißlichtbogens.

Thermische Emission (Abbildung 5)

Wird die Elektrode (Kathode) stark erwärmt ($>> 1.000\text{ K}$), so erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass die in Metallen frei beweglichen Elektronen aus der Metalloberfläche der Elektrode austreten können. Es entsteht eine Art Raumladung unmittelbar an der Oberfläche. Durch das Anlegen eines elektrischen Feldes werden die Elektronen aus der „heißen“ Oberfläche heraus beschleunigt.

Die thermische Emission ist für die Aufrechterhaltung eines Plasmas (Schweißlichtbogen) von entscheidender Bedeutung aber auch für den Berührungszündvorgang (siehe Abschnitt 5.3). Die heiße Kathode liefert in jedem Fall die Elektronen für den Lichtbogen.

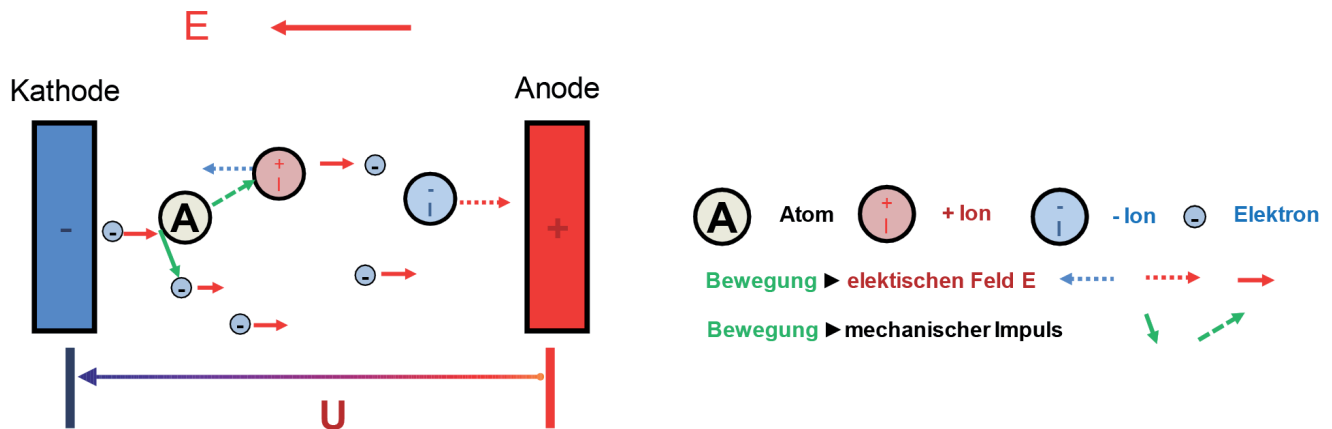


Abbildung 6: Die Stoßionisation

Stoßionisation (Abbildung 6)

Sobald zwischen den Elektroden (Kathode, Anode) freie Ladungsträger, vorwiegend Elektronen, aufgrund der Feld- oder der thermischen Emission entstanden sind, werden diese im elektrischen Feld beschleunigt. Sie treffen auf Atome und/oder Moleküle. Es entstehen Ionen und weitere freie Elektronen. Dieser Vorgang wird als Stoßionisation bezeichnet. Da in der Regel mehrere Elektronen freigesetzt werden, wird der Prozess sehr stark beschleunigt (Lawineneffekt). Es entsteht auf diese Weise sehr schnell ein stromführender „Kanal“ (Plasma), der Lichtbogen.

Die Stromleitung im Lichtbogenplasma

Die Stromleitung im Plasma erfolgt durch Ionen und Elektronen. An den Randzonen der Anode und der Kathode erfolgt der Ladungsaustausch mit den Ionen (Anionen und Kationen), denn aus der Kathode werden nur Elektronen in das Plasma „injiziert“ und die Anode „saugt“ wiederum nur Elektronen aus dem Plasma ab. In den mit der Schweißstromquelle verbundenen Leitern erfolgt der Ladungstransport (Stromfluss) ebenfalls ausschließlich über Elektronen.

4 Spannungsverlauf im Lichtbogen

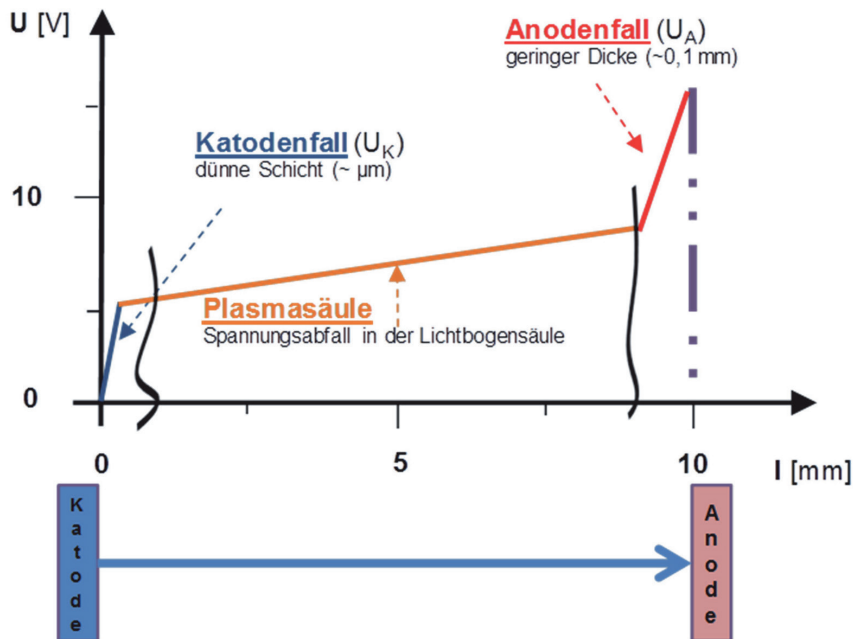


Abbildung 7: Spannungsverlauf im Lichtbogen (schematische Darstellung)

Der Lichtbogen wird durch drei Bereiche charakterisiert, die sehr schmalen Fallgebiete vor der Kathode und der Anode und die Lichtbogensäule. Die Fallgebiete werden im Wesentlichen durch „Ionenwolken“ gebildet. Sie wirken sich „bremsend“ auf den Elektronenfluss aus und bewirken damit den höheren Spannungsabfall gegenüber der längeren Plasmasäule (Abbildung 7). Die Fallgebiete können durch die bisher bekannten physikalischen Modelle nur sehr unzureichend beschrieben werden. Zwischen den beiden Fallgebieten befindet sich die Plasmasäule. Bei einem überwiegenden Gasplasma (WIG-, Plasma-Schweißverfahren) wird der Spannungsabfall vor allem durch das Prozessgas bestimmt (z.B. Ar und He). Bei Lichtbögen mit abschmelzender Elektrode hat zusätzlich der Metalldampf einen entscheidenden Einfluss auf den elektrischen Widerstand (Spannung) der Plasmasäule. Auch Zusatzelemente, wie sie beim UP-Schweißen (Pulver), E-Hand-Schweißen (Elektrodenumhüllung) und Fülldrahtschweißen (Drahtfüllung) oder ähnlichen Beimischungen eingesetzt werden, beeinflussen den Spannungsabfall, sowohl in den Fallgebieten als auch in der Plasmasäule.

Temperaturen

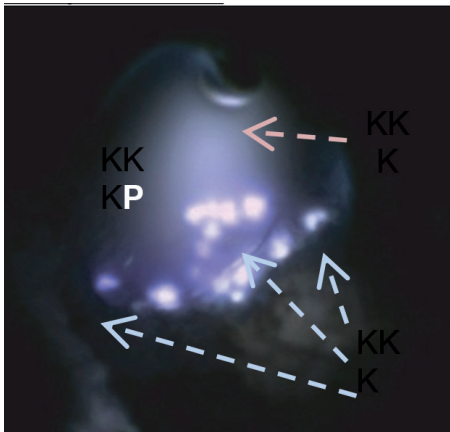


Abbildung 8: MSG-Lichtbogen

A Anodenfleck ca.	4.000 K
P Plasmasäule ca.	20.000 K
K Kathodenfleck (Hotspots) ca.	3.600 K

Die Anode hat im Allgemeinen eine höhere Temperatur als die Kathode, weil hier in der Regel schnelle Elektronen und Ionen in einem sehr kleinen Bereich auf der Oberfläche auftreffen, während aus der Kathode die Elektronen an sehr schnell wandernden Punkten austreten und durch das Austreten der Elektronen gleichzeitig an der Oberfläche einen Kühleffekt erzeugen.

Alle Temperaturen werden zudem von den Schweißprozessen und deren Randbedingungen, z.B. Prozessgas, Pulver, Werkstoffe oder/und anderen Einflüssen bestimmt.

5 Der Lichtbogen im Magnetfeld

Im Lichtbogen bewegen sich die Elektronen und Ionen entsprechend ihrer negativen bzw. positiven Ladungen von der Kathode zur Anode bzw. umgekehrt. Wie bereits in Kapitel SFI 1.03 Abschnitt 3 beschrieben, entsteht um jeden stromdurchflossenen Leiter ein rotationssymmetrisches Magnetfeld. Analog verhält es sich bei einem stromführenden Plasma, dem Lichtbogen. Aufgrund der sehr beweglichen Plasmasäule kann der Lichtbogen deshalb leicht durch ein Magnetfeld abgelenkt werden. Abbildung 9 zeigt die Drei-finger-Regel in Bezug auf die Wirkung der drei Vektoren Strom(-dichte) $\vec{j}$, der magnetischen Flussdichte $\vec{B}$ und der daraus resultierenden Kraft $\vec{F}$.

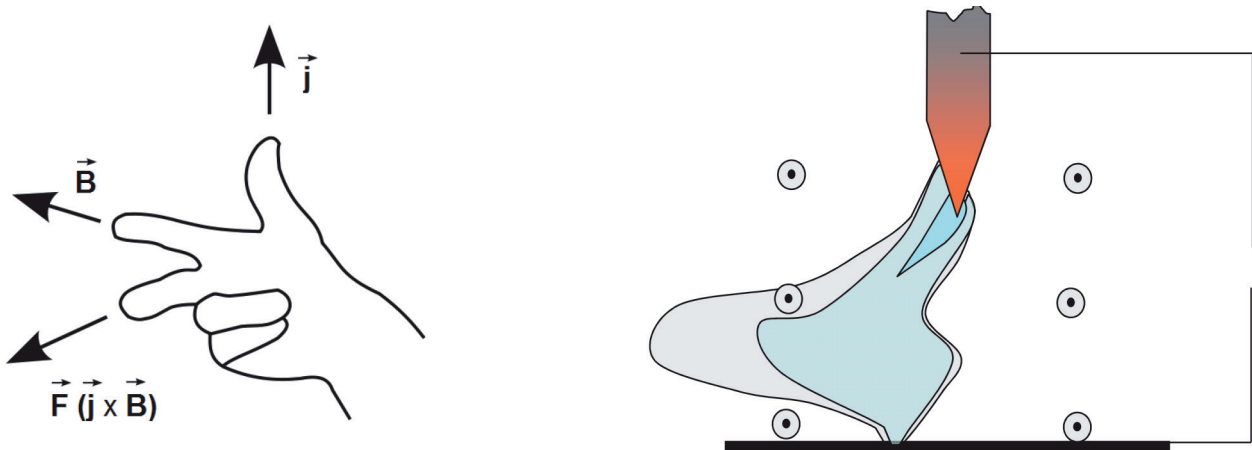


Abbildung 9: Lichtbogen im Magnetfeld

Die gerichtete Ablenkung des Lichtbogens durch ein magnetisches Feld

- wird auch als magnetisches Pendeln des Lichtbogens bezeichnet, kann z.B. beim WIG- und MSG-Schweißen zum besseren Aufschmelzen der Flanken für das Engspaltschweißen genutzt (siehe Unterrichtseinheiten 1.07 und 1.08.1) werden.
- wird beim magnetisch bewegten Lichtbogen (MBL-Schweißen) z.B. für das Verschweißen von Rohren verwendet. Der Lichtbogen rotiert um die zu verschweißenden Rohrenden aufgrund der symmetrischen Anordnung eines Magnetfeldes (Unterrichtseinheit 1.12-2).
- wird auch beim Bolzenschweißen (Hülsenschweißen) verwendet, um eine verbesserte Nahtqualität zu erreichen (Unterrichtseinheit 1.12-2).

Durch magnetische Fremdfelder können aber auch Fehlschweißungen entstehen. Aufgrund der deutlich sichtbaren Ablenkung des Lichtbogens, ähnlich einer angeblasenen Kerzenflamme, bezeichnet man diese Erscheinung auch als Blaswirkung.

- So entstehen z.B. beim Schweißen von Nähten an vormagnetisierten Blechen aufgrund der magnetischen Ablenkung des Lichtbogens aus der Schweißfuge Bindefehler.
- Eine Ablenkung des Lichtbogens kann auch aufgrund einer ungünstigen Verlegung des Schweißstromrückleiters entstehen, weil der Strom des Rückleiters ein für den Lichtbogen störendes Magnetfeld erzeugt.

6 Der Lichtbogen mit nichtabschmelzender Elektrode (WIG, Plasma)

6.1 WIG-Schweißen

Der Lichtbogen entsteht zwischen der Wolframelektrode als Kathode und dem Werkstück als Anode. Als Prozessgase werden im Wesentlichen Inertgase, wie Argon, Helium und Gemische aus beiden verwendet. Das Lichtbogenplasma wird vor allem in seiner äußeren geometrischen Form, der Temperatur (Energie) durch das Prozessgas bestimmt. Der Anteil von Metaldampf bzw. Metall-Ionen im Plasma ist vergleichsweise zu den Verfahren mit abschmelzender Elektrode gering.

Die Zündung des Lichtbogens erfolgt in zwei verschiedenen Formen:

1. berührungslos

→ mittels eines Hochspannungsimpulses, wie bereits weiter oben beschrieben.

→ Der Lichtbogen zündet infolge der Feldemission.

2. mittels Kurzschlusszündung:

→ Die Wolfram-Elektrode wird auf das Werkstück aufgesetzt, dann wird der Schweißstrom eingeschaltet. Ein programmierbarer Kurzschlussstrom erwärmt die Elektrode. Wird jetzt die Elektrode abgehoben, erfolgt aufgrund der thermischen Emission und aufgrund der sprunghaft ansteigenden Schweißspannung mithilfe der unterstützenden Wirkung der Feldemission die Zündung des Lichtbogens. Aufgrund der sehr großen Wärme an der Spitze der Elektrode ist die erforderliche Zündspannung sehr niedrig.

→ Die Lichtbogenzündung erfolgt in einem Zusammenspiel aus thermischer Emission und Feld emission.

Achtung: Bei der Verwendung von hohen Heliumanteilen (>90%) im Prozessgas wird die berührungslose Zündung aufgrund der höheren erforderlichen Zündspannung gegenüber Argon-reichen Prozessgasen erschwert.

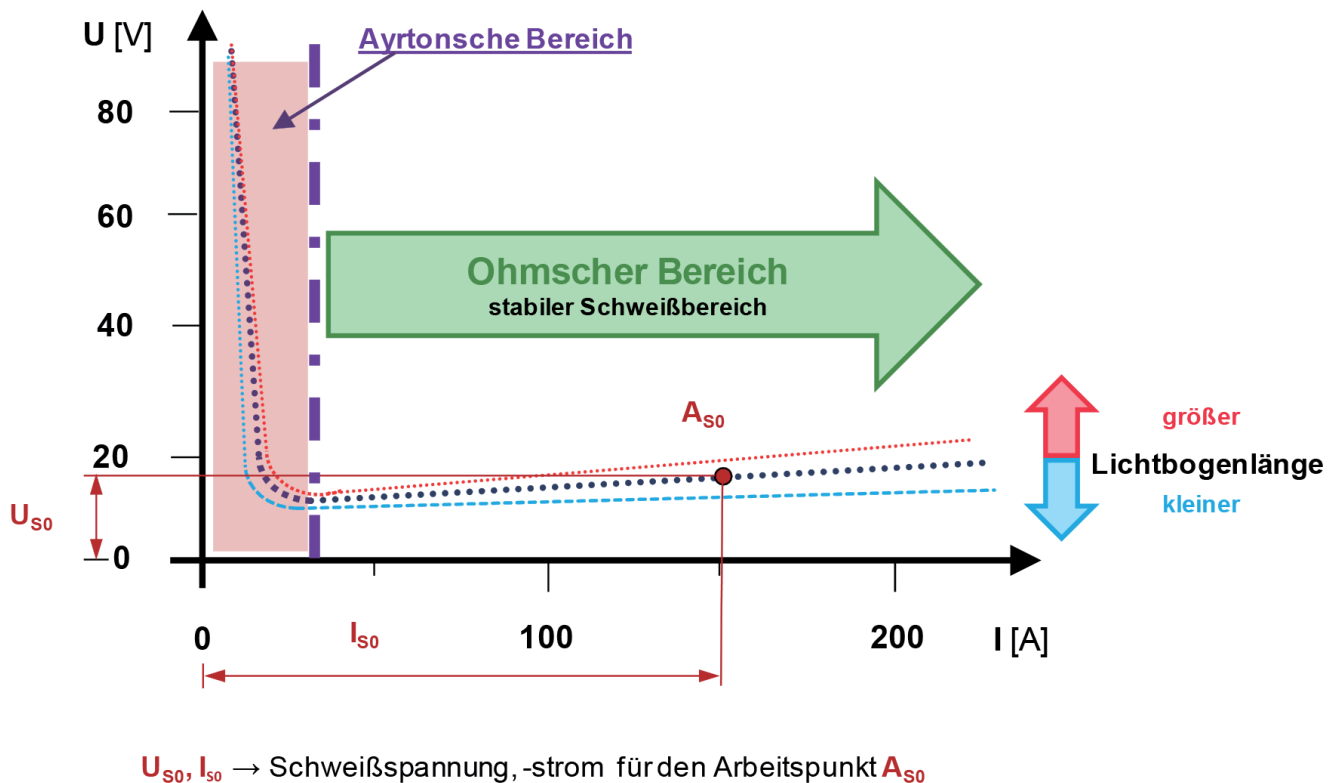


Abbildung 10: I-U-Kennlinie für das WIG-Schweißen, Schutzgas Argon

Die Strom-Spannungs-Kennlinie (Abbildung 10)

Die Strom-Spannungs-Kennlinie besteht aus zwei Bereichen. Der Ayrtonsche Bereich der Kennlinie ist für das Schweißen ungeeignet. Ab ca. 50 A steigt die Lichtbogenspannung nahezu proportional mit dem Strom an, deshalb auch die Bezeichnung Ohmscher Bereich. Die Lichtbogenspannung wird größer bei einem längeren Lichtbogen (rote Kurve) und wird kleiner bei einer geringeren Lichtbogenlänge (blaue Kurve). Wird statt des Prozessgases Argon Helium verwendet, ist die Lichtbogenspannung bei gleicher Lichtbogenlänge deutlich größer. Der charakteristische Verlauf ist aber vergleichbar.

6.2 Plasma-Schweißen

Das Plasma-Verfahren unterscheidet sich vom WIG-Verfahren dadurch, dass der Lichtbogen durch eine zusätzliche Plasma-Düse eingeschnürt wird. Die Zündung dieses Plasma-Lichtbogens erfolgt in zwei Stufen. Zunächst wird ein Pilotlichtbogen mit einem Hochspannungsimpuls gezündet. Dieses Plasma ionisiert die Strecke zwischen Kathode und Anode für den eigentlichen Plasma-Lichtbogen. Danach erfolgt in der 2. Stufe die Zündung des eigentlichen Plasma-Lichtbogens allein durch das Anlegen der Leerlaufspannung beim Einschalten der Schweißstromquelle (Kapitel 1.12-1).

7 Der Lichtbogen beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode (MSG-Schweißen)

7.1 MIG-Schweißen

Der Lichtbogen bildet sich zwischen der abschmelzenden Drahtelektrode als Anode und dem Werkstück als Kathode. Als Prozessgas (Inertgas) wird überwiegend Argon verwendet. Der Lichtbogen besteht aus einem Plasmaanteil, der im Wesentlichen durch die Verdampfung des Metalls am tropfenablösenden Drahtende entsteht und einem zweiten Teil, der durch die Zusammensetzung des Prozessgases bestimmt wird.

7.2 MAG-Schweißen

Das MAG-Schweißen unterscheidet sich vom MIG-Schweißen durch das verwendete Prozessgas. Es enthält Aktivgasanteile, z.B. CO_2 , O_2 usw.

7.3 Lichtbogenzündung

Die Zündung des Lichtbogens beim MSG-Schweißen erfolgt immer durch die Bildung eines Kurzschlusses zwischen Anode (Draht) und Kathode (Werkstück). Es werden zwei Arten unterschieden:

Gesteuerte Kurzschlusszündung

→ Der Draht bildet während der Bewegung in Richtung Werkstück zunächst einen Kurzschluss zwischen der Draht-Elektrode und dem Werkstück als Gegenelektrode. In dieser Phase wird der Kurzschlussstrom stark begrenzt. Aufgrund der hohen Stromdichte an der Spitze des Drahts entsteht hier dennoch eine sehr starke Erwärmung an der Oberfläche der Drahtelektrode, ohne dass dadurch eine Schmelze entsteht. Nach einer von den Prozessgrößen, wie Höhe des Kurzschlussstromes, Draht-Werkstoff usw., bestimmten Zeit wird der Draht rückwärts bewegt. Die Kurzschlussbrücke reißt auf. In diesem Augenblick wird der Lichtbogen infolge des Zusammenspiels der thermischen Emission mit der Feldemission gezündet.

Kurzschlusszündung

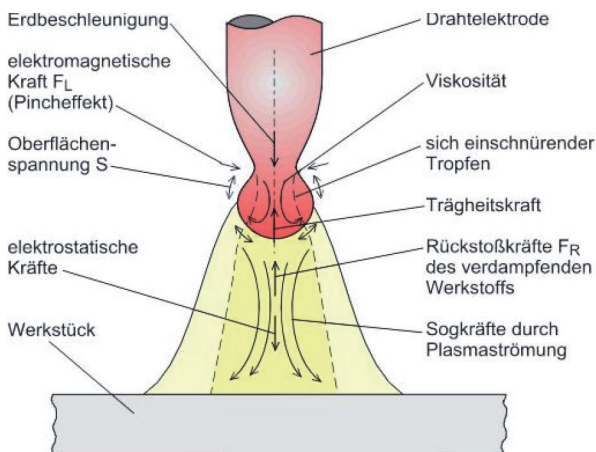
→ Auch hier wird infolge der Bewegung des Drahtes mit dem Werkstück zunächst ein Kurzschluss zwischen Draht und Werkstück erzeugt. Der Kurzschlussstrom steigt schnell auf große Werte an. Der Draht schmilzt aufgrund der großen Stromdichte meist nahe an der Werkstückoberfläche. Die Kurzschlussbrücke reißt auf und ein Lichtbogen entsteht. Auch hier erfolgt die Zündung des Lichtbogens in Kombination mit der thermische Emission und der Feldemission.

7.4 Lichtbogenkennlinie und Kräfte im Lichtbogen

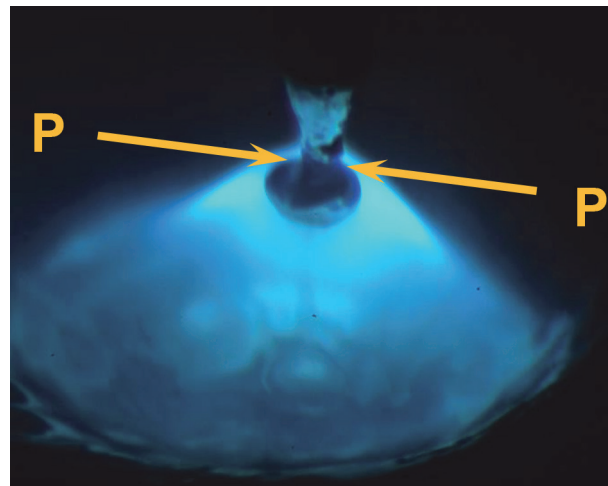
Der Kennlinienverlauf beim MSG-Schweißen ist vergleichbar mit dem des WIG-Schweißens. Aufgrund des zusätzlichen Metaldampfes im Lichtbogen ändern sich die Spannungsabfälle im Anoden- und Kathodenfall sowie in der Lichtbogensäule. Einflussgrößen sind:

- Stromdichte (Drahtdurchmesser)
- die Art des Prozessgases → inerte Gase, Argon-reiche Mischgase, Kohlendioxid
- zu verschweißender Werkstoff

Kräfte im Lichtbogen



a) schematische Darstellung



b) HG-Aufnahme eines Impulslichtbogens
P Pinchkraft = F_L Lorentzkraft

Abbildung 11: Kräfte im Lichtbogen beim MSG-Schweißen

In Abbildung 11a sind die Kräfte beim MSG-Schweißen dargestellt. Wesentlichen Einfluss auf die Ablösung der Tropfen hat die magnetische Lorentzkraft (F_L), auch als Pinchkraft (P) bezeichnet, auf den Werkstoffübergang vom Drahtende in das Schmelzbad, d.h. je größer der Schweißstrom wird, umso größer wird die Lorentzkraft. Durch entsprechend programmierte Stromimpulse (Impulsbreite, -amplitude usw.) kann so die Tropfenablösung beeinflusst werden. Entscheidend für einen stabilen Lichtbogen ist auch die Verwendung von geeigneten Prozessgasen (Unterrichtseinheit 1.06). Die zu verschweißenden Werkstoffe haben nicht nur durch ihre Dampfbildung und ihre unterschiedlichen Bestandteile auf den Lichtbogen selbst einen Einfluss, sondern auch aufgrund von z.B. der Viskosität und der Oberflächenspannung auf die Tropfenablösung, sie wirken der Lorentzkraft entgegen oder unterstützen sie. Je größer die Lichtbogenlänge ist, umso stärker werden die Sogkräfte, d.h. es kann Sauerstoff aus der Luft den Prozess stören. Die Schweißgeschwindigkeit erzeugt vor allem Querkkräfte im Lichtbogen, die bei sehr hohen Geschwindigkeiten auch die Prozessstabilität beeinflussen können.

7.5 Prozessdynamik

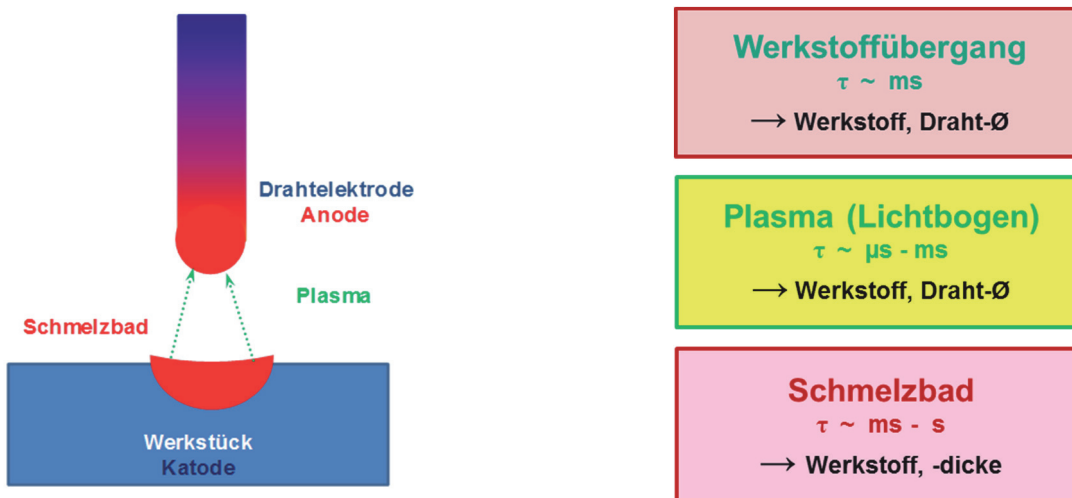


Abbildung 12: Zeitkonstanten im MSG-Lichtbogen

Die Prozessdynamik beim MSG-Schweißen ist durch folgenden drei charakteristischen Bereiche gekennzeichnet:

1. den Werkstoffübergang. Die Zeitkonstante für die Tropfenablösung liegt in der Größenordnung von $\tau \sim 1 \text{ ms}$ bis 10 ms . Sie wird bestimmt durch:

- den Drahtdurchmesser,
- die Werkstoffzusammensetzung und
- das Prozessgas.

2. das Plasma, den Lichtbogen. Die dynamische Zeitkonstante τ liegt zwischen wenigen μs bis ca. 1 ms .

3. das Schmelzbad im Grundwerkstoff. Diese Zeitkonstante τ kann in sehr weiten Grenzen unterschiedliche Werte annehmen $\sim 1 \text{ ms}$ bis $\sim 1 \text{ s}$. Sie wird bestimmt durch:

- die Dicke des Grundwerkstoffs,
- die Werkstoffzusammensetzung
- die Wärmeableitung (z.B. Befestigungselemente)
- u.a.

In den Bereich 1 und 2 können moderne Schweißgeräte den Werkstoffübergang sehr gut steuern.
Stichwort → Energiereduzierte Prozesse (Kapitel 1.08).

7.6 Lichtbogenformen beim MSG-Schweißen

Für den MSG-Schweißprozess lassen sich prinzipiell 5 Lichtbogenübergangsformen klassifizieren. Sie werden vor allem durch die Drahtvorschubgeschwindigkeit (Schweißstrom) bestimmt: Durch die Anwendung prozessgeregelter Schweißgerätetechnik können die Lichtbogenformen modifiziert und die Anwendungsbereiche erweitert werden.

- | | |
|---------------------------|--|
| 1. Kurzlichtbogen | → Der Werkstoffübergang (Tropfenübergang) erfolgt während der Kurzschlussphase. Die Kurzschlussphase und die Brennphase lösen sich regelmäßig ab. |
| 2. Übergangslichtbogen | → Der Werkstoffübergang erfolgt sporadisch mit und ohne Kurzschlussbildung. Der Tropfenübergang ist unregelmäßiger. Diese Lichtbogenform wird in der Praxis nicht verwendet und durch andere Formen, z.B. durch den Impulslichtbogen, ersetzt. |
| 3. Impulslichtbogen | → Der Werkstoffübergang ist sehr regelmäßig. Die Tropfenablösung erfolgt aufgrund der unterstützenden Wirkung der Stromimpulse auf die Pinchkraft immer kurzschlussfrei. Im Idealfall geht pro Impuls ein Tropfen in das Schmelzbad über. |
| 4. Sprühlichtbogen | → Der Werkstoffübergang erfolgt aufgrund der sehr hohen Stromdichte an der Drahtelektrode in Form kleiner Tropfen ohne Kurzschlussbildung. |
| 5. Rotierender Lichtbogen | → Der Werkstoffübergang erfolgt bei weiterer Erhöhung der Stromdichte in Form einer rotierenden Tropfenkette nahezu ohne Kurzschlussbildung. |

8 Wechselstromschweißen

WIG-Schweißen

Beim Verbindungsschweißen von überwiegend aluminium- und magnesiumhaltigen Werkstofflegierungen wird bevorzugt das WIG-Wechselstromschweißen angewendet.

- Wird der Aluminiumgrundwerkstoff als Kathode geschaltet, so wird durch das Auftreffen der „schweren“ Ionen auf die Metalloberfläche die Oxidhaut aufgebrochen. Dieser Prozess wird als Reinigungseffekt auf der Oberfläche von Aluminiumwerkstoffen bezeichnet.
- Die positive Polung der Wolframelektrode bewirkt gegenüber der negativen Polung eine viel stärkere Erwärmung der Wolframspitze und erfordert deshalb zur besseren Wärmeableitung größere Elektrodendurchmesser für die Wolframelektrode.
- Wird Aluminiumgrundwerkstoff als Anode geschaltet, wird aufgrund der sehr starken Bündelung im Bereich der Anode ein tieferer Einbrand erreicht.
- Die negativ gepolte Wolframelektrode bleibt kälter.
- Im Nulldurchgang des Schweißstromes, beim Wechsel der Polarität, erlischt der Lichtbogen und zündet bei einem steilen Nulldurchgang der Spannung sofort wieder. Nur bei „flachen“ Nulldurchgängen (sinusförmig) muss die Wiederzündung mit der unterstützenden Wirkung durch Hochspannungsimpulse erfolgen.

MSG-AC-Schweißen



Abbildung 13: MSG-AC-Lichtbogen

Aufgrund der unterschiedlichen Funktionsmechanismen an der Kathode mit auf einer „großen“ Fläche verteilten Hotspots (Elektronenaustritte) bzw. der Anode mit einem auf einer „kleinen“ Fläche konzentrierten Elektroneneintritt kann mit dem Polaritätswechsel der Wärmeeintrag in das Werkstück bzw. in die Drahtelektrode zusätzlich gesteuert werden.

Aus der Abbildung 13 wird deutlich, wenn die Drahtelektrode positiv (Anode) gegenüber dem Werkstück gepolt ist, treten die Elektronen in einem sehr eng begrenzten Bereich in den Draht ein. Dadurch wird das Drahtende wärmer als bei der umgekehrten Polarität. Die Pinchkräfte können sehr viel besser unterstützt werden. Ist die Drahtelektrode dagegen als Kathode wirksam, wandern die Kathodenansatzpunkte auf der Drahtoberfläche hin und her. Der Draht wird gleichmäßiger über eine größere Fläche erwärmt. Der Topfen wird größer und ist auch kälter. Die Pinchkräfte sind deutlich geringer. Wird jetzt wieder die Polarität gewechselt, so kann dieser große Tropfen mit einer geringeren Impulsenergie abgelöst werden. Es kann dadurch mit einer geringeren Energieeinbringung in den Grundwerkstoff geschweißt werden.

9 Die Besonderheiten des Lichtbogens beim Lichtbogenhandschweißen

Der Lichtbogen wird immer über einen Kurzschluss gezündet. Die Berührungsstelle wird aufgrund der hohen Stromdichte schnell erwärmt und durch ein schnelles Abziehen der Elektrode wird der Kurzschluss unterbrochen und damit der Lichtbogen gezündet.

Der Lichtbogen wird durch Elemente aus der Umhüllung der Elektroden stabilisiert. Die Umhüllung bestimmt auch, mit welcher Polarität geschweißt werden kann. Verschiedene Typen sind auch Wechselstrom-tauglich (Unterrichtseinheit 1.09).

10 Die Besonderheiten des Lichtbogens beim UP-Schweißen

Auch beim UP-Schweißen wird der Lichtbogen immer durch einen Kurzschluss gezündet. Die Kurzschlussbrücke wird aufgrund des hohen Stromes aufgeschmolzen. Nach dem Aufbrechen des Kurzschlusses entsteht der Lichtbogen. Aufgrund des Überdeckens des Lichtbogens mit Pulver bildet sich eine Kaverne, in der der Lichtbogen von der Umgebungsluft abgeschirmt brennt. Die erstarrende Schmelze in der Nahtfuge wird mit einer Schlacke überdeckt. Im UP-Pulver sind auch stabilisierende Elemente für den Lichtbogen enthalten (Kapitel 1.10).

11 Die Besonderheiten des Lichtbogens beim Bolzenschweißen

Beim Bolzenschweißen werden mittels eines Lichtbogens (Gewinde-)Bolzen und Stifte mit einem Grundwerkstoff verschweißt (Kapitel 1.12-2).

Zündung des Lichtbogens

→Kurzschlusszündung

der Zündverlauf ist ähnlich dem MSG-Schweißen, der Kurzschlussstrom ist deutlich größer

→Hubzündung

die Hubzündung entspricht beim MSG-Schweißen der LIFTARC-Zündung mit anderen Prozessparametern

Schweißlichtbogen

→Der Schweißlichtbogen entspricht dem Kurz- und Sprühlichtbogen beim MSG-Schweißen bei einer deutlich kürzeren Lichtbogenlänge und im Allgemeinen bei größeren Schweißströmen.

→ Für das „Hülsen“-Schweißen wird um die Hülse (kleine Rohre) eine Magnetspule angeordnet. Der Lichtbogen wird zur Rotation gebracht und ermöglicht dadurch eine sehr gleichförmige Erwärmung der Fügefläche.

12 Gefahren bei der Anwendung des Lichtbogens beim Fügen (Schweißen) und Trennen (Schneiden) von Metallen

Temperatur

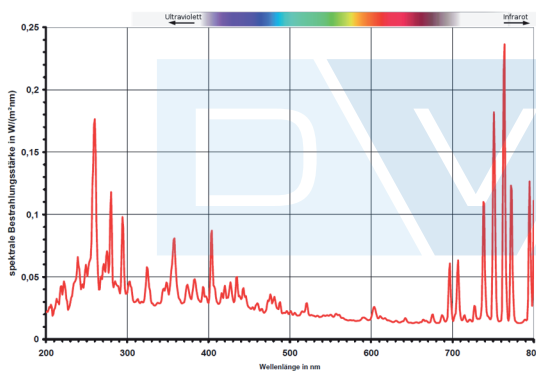
Im Lichtbogen entstehen hohe Temperaturen $\gg 1.000\text{ K}$, deshalb ist auf die Vorschriften des Brand-schutzes besonders zu achten.

- Eine berührungslose Wärmeübertragung erfolgt über die Wärmestrahlung des Lichtbogens.
- Indirekt werden vom Lichtbogen andere Blechteile erwärmt.
- Beim Lichtbogenhandschweißen ist auf die entsprechende Ablage der Schweißelektrode zu achten.
- Beim Schweißen können „heiße“ Spritzer entstehen.

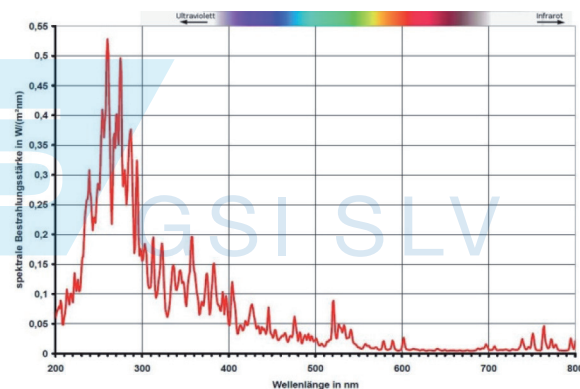
Strahlung

Beim WIG-, Plasma-, MSG- und Lichtbogenhandschweißen entsteht eine Strahlung mit einer:

- hohen Intensität im sichtbaren Bereich $\rightarrow$ Verblendungsgefahr für die Augen
- hohen Intensität im unsichtbaren Bereich
- - UV Ultravioletter Bereich $\rightarrow$ sehr stark Augen und Haut schädigend
- - IR Infrarotstrahlung $\rightarrow$ starke Erwärmung der Haut



a) WIG-Schweißen von CrNi (Schweißstrom: 180 A)



b) MSG-Schweißen von CrNi (Schweißstrom: 180 A)

Abbildung 14: Strahlungsspektrum beim Lichtbogenschweißen

In Abbildung 14 werden Strahlungsspektren von einem WIG- und einem MSG-Lichtbogen gezeigt. Insbesondere beim MSG-Verfahren ist deutlich die sehr hohe Intensität im Bereich der UV-Strahlung zu erkennen, während beim WIG-Schweißen ein höherer Anteil der Infrarotstrahlung auftritt.

Tabelle 1: Strahlenarten und ihre Gefährdungen

Strahlenart		λ in nm	Gefährdungen
UV	C	100-280	Hornhaut, Bindehaut
	B	280-315	Augenlinse, Ozonbildung, Haut
	A	315-380	Netzhaut
sichtbares Spektrum		380-750	Netzhaut
IR	A	750-1400	Netzhaut, Glaskörper
	B	1400-3000	Augenlinse
	C	3000-1 E6	Hornhaut, Bindehaut

In Tabelle 1 werden konkrete Gefährdungsmöglichkeiten durch die verschiedenen Strahlungsarten aufgezeigt.

Deshalb ist das Tragen von Schutzkleidung und Schutzgläsern (DIN EN 166/169) zum Augenschutz für den Schweißer bzw. von Personen, die ständig in dem Schweißbereich arbeiten, unerlässlich.

Entstehung von Schadstoffen

Aufgrund der starken Hitzeentwicklung durch den Lichtbogen entstehen

- Feinstäube, feinste Partikel im Mikrometerbereich
- Reaktionsprodukte von Gasen, Metallen usw.

Die Art und Menge der Schadstoffe ist von vielen Faktoren abhängig:

- vom Schweiß-, Schneidverfahren
- von den Prozessgasen
- von den zu verarbeitenden Werkstoffen

13 Literatur bzw. weitergehende Informationen zum Schweißlichtbogen

1. Schellhase, M.: Der Schweißlichtbogen - ein technologisches Werkzeug, DVS-Verlag, Düsseldorf 1985
2. Cramer, H. und Pommer, S.: Überblick über moderne Lichtbogenprozesse und deren Werkstoffübergänge beim MSG-Schweißen, DVS Congress, Hamburg 26.-29.09.2011. Weitergehende Informationen GSI NL SLV München, Schachenmeierstraße 37, D-80636 München, www.slv-muenchen.de
3. M. Schnick: Visualisierung der Schutzgasabdeckung beim Lichtbogenschweißen, Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2012, Dresden 29. und 30.03.2012. Zusätzliche Informationen auch unter <http://micron.mw.tu-dresden.de/fue/fuetec.htm>
4. D. Uhrandt: Emissionsspektroskopie an MSG-Schweißlichtbögen, Dresdner Fügetechnisches Kolloquium 2012, Dresden 29. und 30.03.2012. Zusätzliche Informationen INP Greifswald e.V., Felix-Hausdorf-Straße 2, D-17489 Greifswald, www.inp-greifswald.de



14 Testfragen

1. Welche Aussagen sind richtig?

- ☐ Atome bestehen aus Elektronen, Protonen, und Neutronen.
- ☐ Ionen sind Anionen oder Kationen.
- ☐ Atome sind geladene Teilchen.
- ☐ Moleküle bestehen aus Ionen.
- ☐ Elektronen sind schwerer als Protonen.

2. Was versteht man unter dem Begriff Plasma?

- ☐ einen 4. Aggregatzustand
- ☐ ein inertes Gas
- ☐ einen plastischen Werkstoff
- ☐ ein ionisiertes Gas
- ☐ eine unterkühlte Flüssigkeit

3. Welche Aussagen sind falsch?

- ☐ Die elektrische Leitfähigkeit des Plasma entspricht einem elektrischem Leiter.
- ☐ Das Plasma wird durch ein Magnetfeld abgelenkt.
- ☐ Die Blaswirkung des Lichtbogens wird durch die heiße Schmelze hervorgerufen (Thermik).
- ☐ Die PINCH-Kraft bezeichnet das Wegspringen der Tropfen (Spritzerbildung).
- ☐ Die PINCH-Kraft bezeichnet die magnetische Wirkung des Schweißstromes infolge der Lorentzkraft bei der Ablösung des Topfens vom Draht.

4. Was sind Ladungsträger im Lichtbogen?

- ☐ schnell bewegte Atome
- ☐ Ionen
- ☐ Moleküle
- ☐ Elektronen
- ☐ Kationen

5. Was bedeutet Ionisation für einen Lichtbogen?

- ☐ Spaltung von Atomen im Zündvorgang eines Lichtbogens
- ☐ Zerlegung eines molekularen Gases in atomare Bestandteile
- ☐ Bildung von freien Ladungsträgern im Lichtbogen, der dadurch elektrisch leitend wird
- ☐ Aufreißen der Oxidhaut beim Aluminium

6. Das Zünden eines Schweißlichtbogens kann erfolgen durch

- ☐ einen eingeleiteten Kurzschluss
- ☐ die Gasvorströmung
- ☐ einen Hochspannungsimpuls, berührungslos
- ☐ einen langen Lichtbogen
- ☐ einen Pilotlichtbogen

7. Welche Begriffe sind Bestandteil des Schweißlichtbogens?

- ☐ Impulslichtbogen
- ☐ Lichtbogensäule
- ☐ Kurzlichtbogen
- ☐ Anoden- und Kathodenfallgebiete
- ☐ Ayrtonscher Bereich

8. Welche Schweißverfahren verwenden kein Schutzgas (extern)?

- ☐ WIG-Schweißen
- ☐ Plasma-Schweißen
- ☐ MSG-Schweißen
- ☐ E-Hand-Schweißen
- ☐ UP-Schweißen

9. Welcher Lichtbogen ist kein MSG-Lichtbogen?

- ☐ Kurzlichtbogen
- ☐ Hochspannungslichtbogen
- ☐ Sprühlichtbogen
- ☐ Pilotlichtbogen
- ☐ Impulslichtbogen

10. Welche Wirkungen des Schweißlichtbogens können den menschlichen Körper schädigen?

- ☐ Emission von UV-Strahlung
- ☐ Spannungsabfall im Lichtbogen
- ☐ Wärmestrahlung im Infrarotbereich
- ☐ Erzeugung von Feinstaub
- ☐ Lichtstrahlung, Strahlung im sichtbaren Bereich

11. Zur persönlichen Schutzausrüstung des Schweißers gehören?

- ☐ Handschuhe
- ☐ Schürze als Schutz gegen radioaktive Strahlung des Lichtbogens
- ☐ Schutzgläser gegen erhöhte UV-Strahlung aus dem Lichtbogen
- ☐ wasserfeste Kleidung
- ☐ schwer entflammbare Kleidung

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Der Schweißstromkreis	2
3	Funktionsprinzipien von Schweißstromquellen	3
3.1	Der Schweißtransformator	3
3.1.1	Das Prinzip	3
3.1.2	Stellprinzipien	4
3.2	Schweißgleichrichter	5
3.3	Elektronische Stromquellen	6
3.3.1	Thyristorschweißgleichrichter	6
3.3.2	Transistorschweißstromquelle	7
3.4	Schweißumformer	13
4	Die technischen Daten (Leistungsschild)	15
5	Schweißeigenschaften von Schweißstromquellen für das Lichtbogenschweißen	18
5.1	Statische Kennlinie	18
5.1.1	Flache Kennlinie	18
5.1.2	Fallende Kennlinie	20
5.2	Dynamische Eigenschaften	21
5.3	Synergie-Kennlinie	23
6	Einschaltdauer	24
7	Genormte Arbeitsspannung / Lichtbogenkennlinie	26
8	Leerlaufspannung	28
9	Netzanschluss der Quelle	30
10	Kühlart	31
11	Schutzart	32
12	Prüfung von Schweißstromquellen	33
13	Literatur	34
14	Testfragen	35

1 Einleitung

Ausgehend von dem Grundstromkreis in der Elektrotechnik (Skript SFI 1.03 Abb. 1) wird in diesem Kapitel 1.05 näher auf die Anforderungen an Stromquellen für das Lichtbogenschweißen eingegangen.

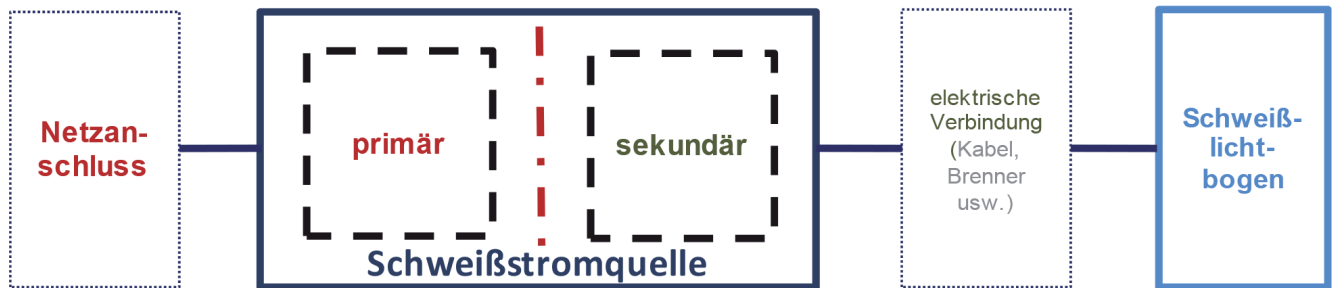


Abbildung 1: Die Stromquelle für das Lichtbogenschweißen

Welche Anforderungen müssen von einer Stromquelle für das Lichtbogenschweißen erfüllt werden?

Netzanschluss	Schweißstromquelle	Elektrische Verbindung	Schweißlichtbogen
Netzspannung Netzstrom Anschlussleistung	galvanische Trennung von Eingangsnetz und Schweißkreis Arbeitsschutz	Schweißkabel-anschlüsse	verfahrensangepasste Schweißeigenschaften
z.B.: 4(5)-Leitersystem) U_N 400 V, I_N 3 x 32 A 2(3)-Leitersystem U_N 230 V, I_N 16 A	Bedienbarkeit, Einstell- hilfen (Programme) Schnittstellen, z.B. Ro- boter, Datenerfassung, -Sicherung, Kalibrierung	Steckdosen genormte Steckverbin- der	Leerlauf ($R \rightarrow \infty$) Zündhilfe ($U_z \sim 8$ kV) Kurzschluss ($R \rightarrow \sim 0$) dynamische, statische Kennlinien Prozessstabilität, z.B. Spritzervermeidung

Tabelle 1: Anforderungen an eine Stromquelle für das Lichtbogenschweißen

2 Der Schweißstromkreis

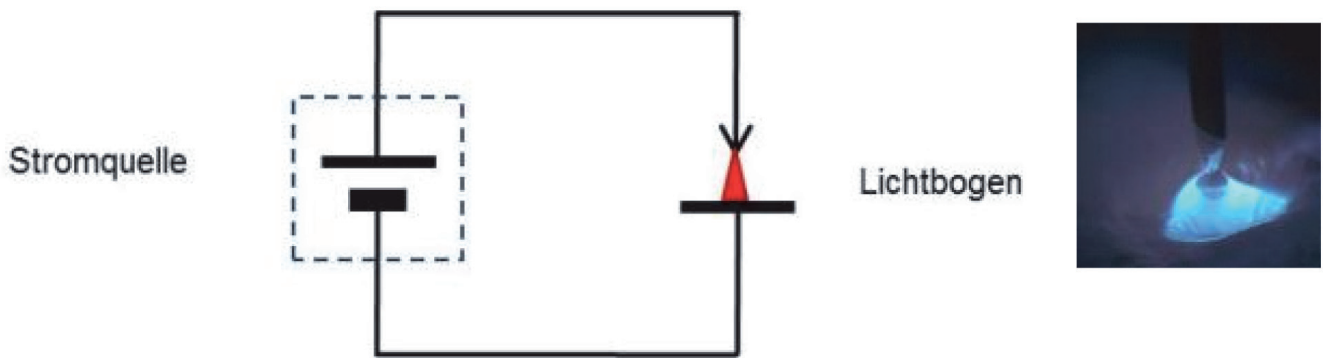
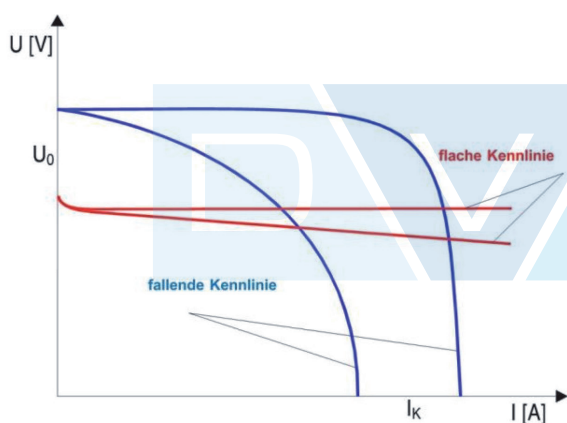


Abbildung 2: Grundstromkreis beim Schweißen

In der Schweißtechnik werden für jedes Schweißverfahren entsprechende statische Kennlinien verwendet. Unter einer Kennlinie versteht man den Strom-Spannungs-Verlauf bei der Änderung des Lastwiderstandes (Lichtbogen). Von einer flach fallenden Kennlinie spricht man, wenn mit zunehmendem Strom die Spannung nahezu konstant ist oder sich nur um wenige Volt/100 A verringert (in Abbildung 3 rot dargestellt). Wenn dagegen mit steigender Last ($R \rightarrow 0 \Omega$) die Spannung stetig abnimmt, bezeichnet man diese Kennlinie als fallende. Der Strom erreicht einen stabilen Grenzwert (Abbildung 3 blaue Kennlinie).



flach fallende Kennlinie:

MSG-Schweißen
UP-Schweißen

steil fallende Kennlinie:

Lichtbogenhand-
schweißen
UP-Schweißen
WIG-Schweißen
Plasma-Schweißen

a) statische Kennlinien von Schweißstromquellen

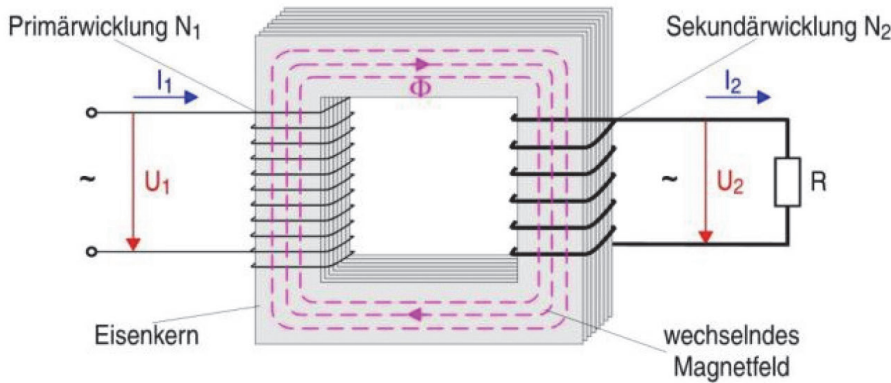
b) Schweißprozesse

Abbildung 3: Zuordnung Stromquellenkennlinien – Schweißprozesse

3 Funktionsprinzipien von Schweißstromquellen

3.1 Der Schweißtransformator

3.1.1 Das Prinzip



Induktionsgesetz

$$U_2 \sim -d\Phi/dt$$

U_1 / I_1 Primär-Spannung / Strom

U_2 / I_2 Sekundär-Spannung / Strom

N_1 Primär-Windungszahl

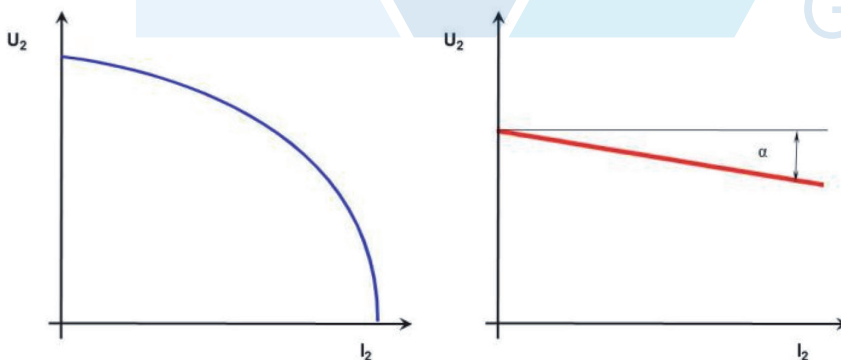
N_2 Sekundär-Windungszahl

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Abbildung 4: Transformator-Prinzip

Der Transformator überträgt keinen Gleichstrom (Gleichspannung)!

Durch die Anordnung der Primär- zur Sekundärwicklung kann bei einem Transformator als Schweißstromquelle eine flache oder eine fallende Kennlinie erzeugt werden. Der Schweißtransformator mit fallender Kennlinie wird für das AC-WIG-, UP- und Lichtbogenhandschweißen verwendet. Beim AC-WIG-Schweißen muss zusätzlich ein Kondensator in Reihe geschaltet werden, da aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens des positiven und negativen Stromanteils an der Wolframelektrode ein Gleichstromanteil entsteht, der den Trafo schädigen kann.



α Kennlinien-Neigungswinkel, Funktion der Kopplung zwischen Primär und Sekundärwicklung sowie der ohmschen Verluste in den Spulenwiderständen

a) steil fallende Kennlinie
Primär und Sekundärspule sind weit voneinander entfernt → „weicher“ Trafo

b) flach fallende Kennlinie
Primär und Sekundärspule sind eng ineinander verschachtelt → „harter“ Trafo, je größer α , um so „weicher“ der Trafo

Abbildung 5: Transformator-Kennlinie

Die Netzspannung (Primärspannung) beträgt in der Regel im 1-Phasen-Netz (L1/N/PE) 230 V bzw. im Drehstromnetz (L1/L2/L3/N/PE) zwischen zwei Leitern (z.B. L1/L2) 400 V. Abweichende Spannungen (z.B. in der chemischen Industrie) können leicht durch entsprechend angepasste Windungsanzapfungen realisiert werden! Der Schweißtransformator erfüllt im einfachsten Fall vier Bedingungen:

1. die Anpassung der Netzspannung an die Schweißspannung ($U_s \rightarrow U_s \ll U_N$ und $I_s \gg I_N$)
2. die Gewährleistung „optimaler“ Schweißeigenschaften $\rightarrow$ gutes Zünden, geringe Spritzer
3. den Arbeitsschutz $\rightarrow$ Berührungsspannung (Leerlaufspannung (U_0)) $\rightarrow U_0 \leq 80 \text{ V AC!}$
4. die galvanische Trennung zwischen dem Netzspannungs- und dem Schweißkreis

Die Netzabsicherungen der Standarddrehstromsteckdosen, wie 16, 32, bzw. 63 A usw., verhindern die Entnahme eines zu hohen Stromes aus der Netzzuleitung. Dies bedeutet im Einzelfall auch die Begrenzung der Einschaltdauer der Stromquelle, wenn die thermische Wirkung des Stromes die Sicherungsscharakteristik überschreitet. **Grundsätzlich gilt aber: Die (Netz-)Sicherung dient dem Schutz der Netz-Leitung $\rightarrow$ Brandschutz!**

3.1.2 Stellprinzipien

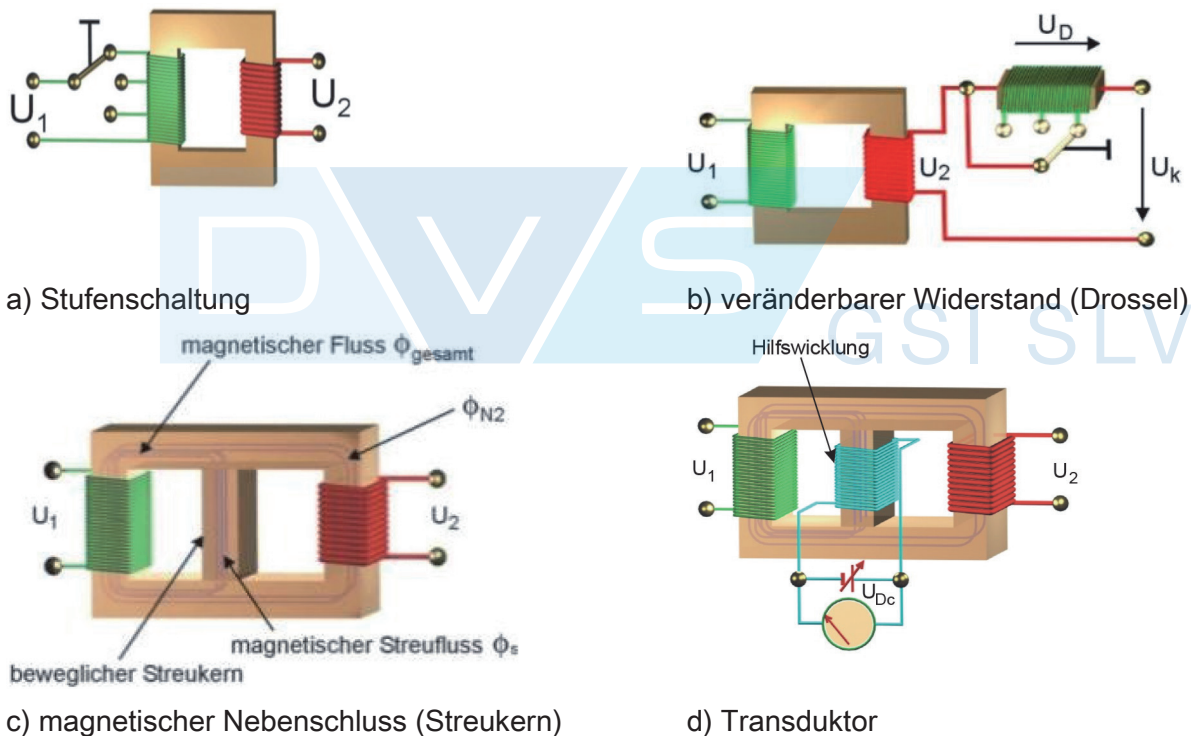


Abbildung 6: Transformator-Stellprinzipien

a Stufenschalter

Durch die Stufenschaltung wird das Übersetzungsverhältniss des Transformators verändert. Die Schweißspannung kann in diskreten Spannungsstufen eingestellt werden.

Vorteile:

- robuste und sehr preiswerte Lösung für einfache Anwendungen
- wird noch häufig für MSG-Schweißgleichrichter (s. Abschnitt 3.2 Schweißgleichrichter) verwendet

Nachteile:

- Anwendungseinschränkungen durch begrenzte Stufenzahl, zu große Spannungssprünge
- je kleiner die Spannungssprünge desto größer die Zahl der erforderlichen Windungsanzapfungen; der Herstellungsaufwand erhöht sich
- die Leerlaufspannung wird durch die vorgewählte Stufe bestimmt $U_0 \neq \text{konstant}$

b Veränderbarer Widerstand (Drossel)

Durch die Anordnung eines veränderbaren Widerstandes im Schweißkreis kann der Arbeitspunkt (Schweißspannung und -strom) beim Schweißen eingestellt werden. Besonders wirksam ist die Verwendung einer Drossel in einem Wechselstromkreis. Der ohmsche Anteil ist dann sehr viel kleiner. Die Drossel erwärmt sich daher weniger als ein reiner ohmscher (Gleichstrom-)Widerstand.

c Magnetischer Nebenschluss (Streukern)

Die Sekundärspannung U_2 ist eine Funktion des magnetischen Flusses ϕ_2 . Durch einen Streukern (bewegliches Blechpaket) wird dessen Lage im Magnetkreis des Transformators bestimmt, wie viel des primär erzeugten Teils des magnetischen Flusses ϕ_1 abgeleitet wird. Das bedeutet, dass bei einem vollständigen „Eintauchen“ des Streukerns der abgeleitete Fluss durch das Verhältnis der magnetischen Querschnittsfläche des Nebenschlusskerns und des Kerns der Sekundärspule bestimmt wird ($\phi_1 - \phi_s = \phi_2$). $\phi_{2\min}$ entspricht dem minimalen Schweißstrom. Ist der Streukern vollständig aus dem magnetischen Kreis entfernt, so wird der gesamte magnetische Fluss $\phi_1 \sim \phi_2$ ($\phi_s = 0$) die Sekundärspule durchdringen. Der Schweißstrom erreicht jetzt seinen Maximalwert $I_{2\max} \rightarrow \phi_1 = \phi_{2\max}$.

d Transduktor

Das Stellprinzip des Transduktors beruht auf der Tatsache, dass der Eisenkern bei einer starken magnetischen Überflutung in die Sättigung kommt, d.h. dieser Eisenkern verhält sich dann wie Luft ($R_{\text{magnFe}} \sim R_{\text{magnLuft}}$). Ersetzt man nun die mechanische Verstellung des magnetischen Nebenschlusses (Abschnitt c.) durch einen elektrisch veränderbaren Magnetkreis, so erhält man den Transduktor. Der Transduktor hat eine Hilfswicklung, durch die ein Steuergleichstrom fließt und damit den magnetischen Fluss ϕ_s in gleicher Weise steuern kann. Es wird so der magnetische Widerstand des magnetischen Nebenschlusses gesteuert. Der Transduktor wird auch als Magnetverstärker bezeichnet, da mit einer kleinen Leistung eine große Leistung gesteuert werden kann. Dieses Stellprinzip ermöglicht eine elektrische Steuerung ohne zusätzliche mechanische Eingriffe. Dadurch ist eine Fernsteuerung möglich, ein erster Schritt in Richtung elektronischer Stromquellen.

3.2 Schweißgleichrichter

Der Schweißgleichrichter besteht aus einem Transformator und einem nachgeschalteten Brückengleichrichter. Durch den Gleichrichter wird der Wechselstrom in einen Gleichstrom umgewandelt. Die Restwelligkeit ist bei einem Drehstromvollbrückengleichrichter sehr niedrig (4%). Durch die Schweißkreisdrossel kann die Stromwelligkeit noch weiter reduziert werden. Die Größe der Drossel beeinflusst die Schweißseigenschaften ganz wesentlich. Beispielsweise wird für die Zündung des MSG-Lichtbogens eine möglichst kleine Induktivität benötigt, während im laufenden Schweißprozess dann mit einer größeren Induktivität gearbeitet wird. Deshalb werden häufig sogenannte elektronische Drosseln eingesetzt, mit deren Hilfe dann die Größe der Induktivität und damit die Dynamik an die verschiedenen Prozessbedingungen während des Schweißens angepasst werden können.

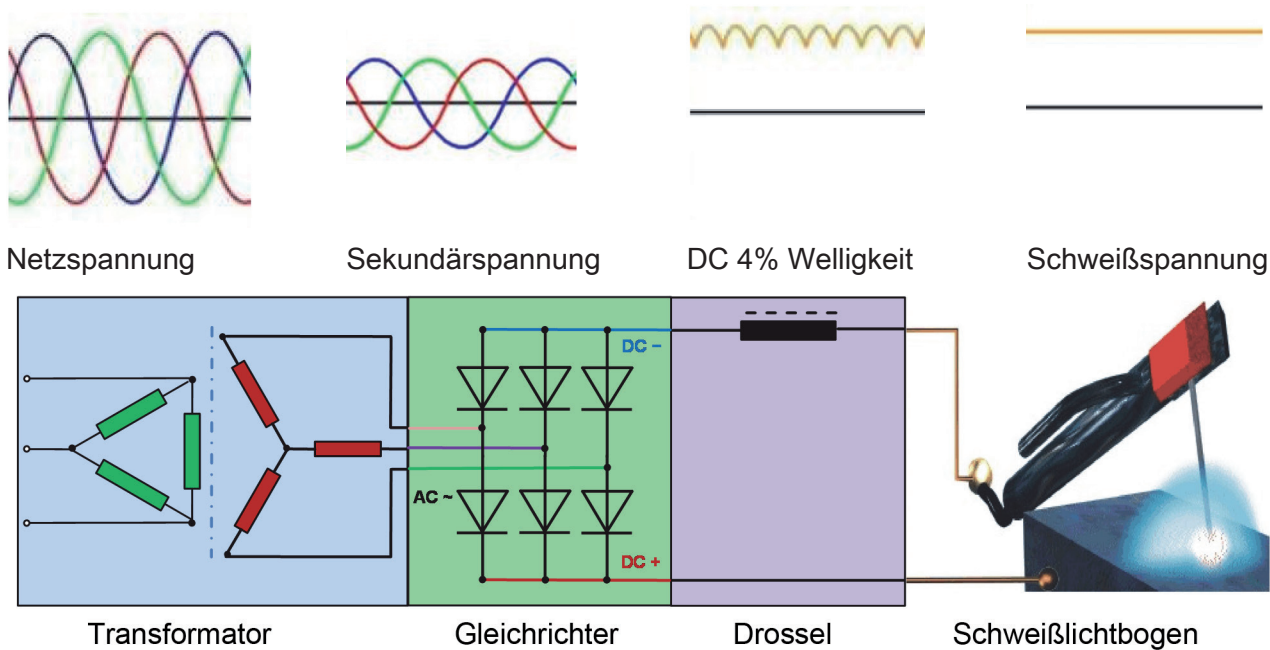


Abbildung 7: Schweißgleichrichter-Prinzip

3.3 Elektronische Stromquellen

In elektronischen Stromquellen werden zur Einstellung / Regelung der/des Schweißspannung/-stroms steuerbare elektronische Bauelemente (Thyristor, Transistor) verwendet. Dabei bestimmen zwei charakteristische Bauelemententypen das Stellprinzip:

1. Thyristorschweißgleichrichter (netzsynchrone Regelung/Steuerung)
2. Transistorstromquellen (Regelung unabhängig von Frequenz und Phase des Eingangsnetzes)

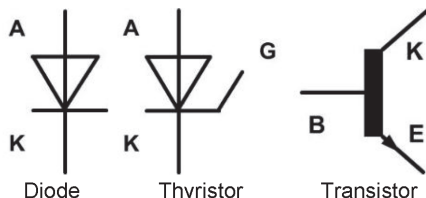


Abbildung 8: Elektronische Bauelemente

3.3.1 Thyristorschweißgleichrichter

Thyristorstromquellen gleichen in ihrem Aufbau dem Schweißgleichrichter (s. Abs. 3.2). Die Dioden in dem Gleichrichterblock können dann entweder zur Hälfte oder voll durch Thyristoren (halb- bzw. vollgesteuerte Drehstrombrücken) ersetzt werden. Die Funktion des Thyristors entspricht zunächst der einer Diode, aber nur dann, wenn er über das Gate (Steuerelektrode G) während der positiven Halbwelle angesteuert wird. Durch die elektronische Steuerung lässt sich die Schweißspannung (der Schweißstrom) synchron zur Netzfrequenz steuern. Nachteil dieses Stellprinzips ist vor allem die erhöhte Welligkeit gegenüber ungesteuerten Gleichrichtern, d.h., die Schweißkreisdrossel muss in der Regel größer als bei einem ungesteuerten Schweißgleichrichter (Diode) sein. Für einfache Anwendungen, Lichtbogenhand-, WIG-, MSG-Schweißen, werden sie auch heute noch verwendet. Insbesondere beim UP-Schweißen im Bereich großer Schweißströme ist zurzeit ein wirtschaftlicher Einsatz noch gegeben.

3.3.2 Transistorschweißstromquelle

In der Transistorschweißstromquelle werden Transistoren zur Steuerung der elektrischen Leistung für den Schweißlichtbogen verwendet. Transistor ist dabei der Überbegriff (s. Teil SFI 1.03 Grundlagen der Elektrotechnik) für ein stetig steuerbares elektronisches Halbleiterbauelement. Die Ausgangsspannung, der -strom und die dynamischen Kennwerte werden durch ein oder mehrere Prozessorsysteme inzwischen fast ausschließlich digital geregelt. Dadurch werden komplexere Einflussmöglichkeiten auf den Schweißprozess geschaffen.

Es werden drei unterschiedliche Schaltungsprinzipien angewendet:

1. Ausgehend von dem Schweißgleichrichter wird ein Transistor als analoges Stellglied nachgeschaltet. Der Transistor arbeitet wie ein veränderbarer Widerstand. Die sekundäre Drossel kann entfallen bzw. wird durch einen Filter mit einer Schutzeinrichtung gegenüber Überspannungen ersetzt. → Analoge Transistorschweißstromquelle
2. Der Aufbau ist vom Prinzip her gleich wie 1., jedoch arbeitet der Transistor jetzt als „schneller Schalter“. → Sekundär getaktete Transistorschweißstromquelle
3. Die primär getaktete Transistorschweißstromquelle verwendet ein grundsätzlich ähnliches Prinzip. Jeder tragbare PC wird heute mit einer ähnlichen Stromversorgung betrieben. → Inverter – primär getaktete Transistorschweißstromquelle

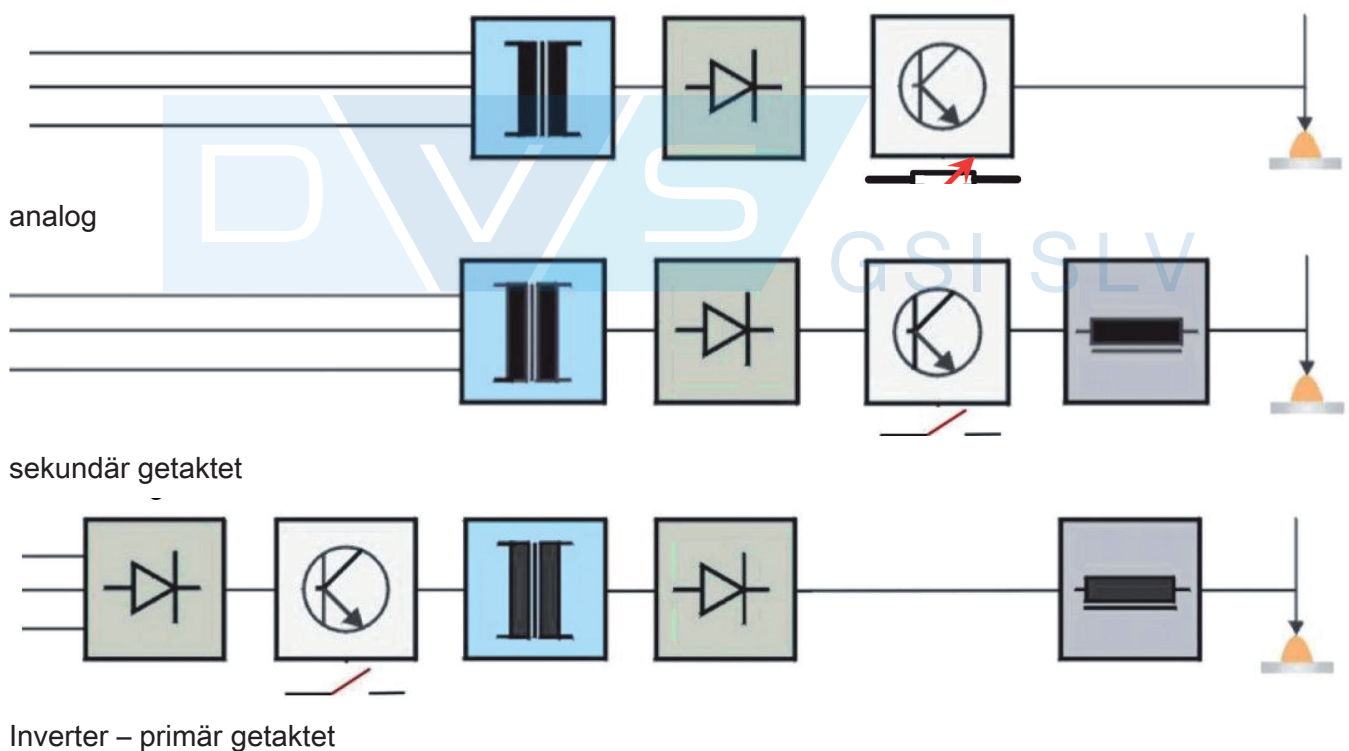


Abbildung 9: Elektronische Schweißstromquelle – Transistorschweißstromquelle

1. Analoge Transistorschweißstromquelle,
2. Sekundär getaktete Transistorschweißstromquelle,
3. Primär getaktete Transistorschweißstromquelle (Inverter)

Durch die Kombination unterschiedlicher Stellprinzipien können weitere Varianten realisiert werden. Zwei davon sollen hier näher erläutert werden:

4. die Transistorschweißstromquelle in Hybridform,
5. die kombinierte primär und sekundär getaktete Transistorschweißstromquelle.

3.3.2.1 Analoge Transistorschweißstromquelle

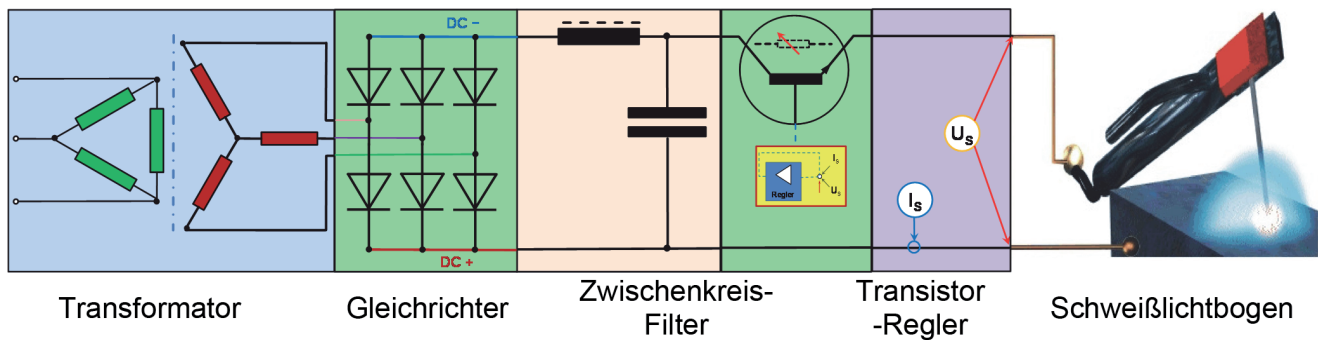


Abbildung 10: Analoge Transistorschweißstromquelle (Prinzip)

Die Analogstromquelle verwendet den Transistor auf der Sekundärseite eines Transformators mit nachgeschaltetem Gleichrichter. Der erste Teil ist vergleichbar mit dem eines Schweißgleichrichters. Es entfallen der Stufenschalter und die eigentliche Schweißkreisdrossel. Der Zwischenkreisfilter (Drossel und Kondensator) dient zur Glättung der Zwischenkreisspannung. Der nachgeschaltete Transistor ist in Reihe mit dem Schweißlichtbogen angeordnet. Die Funktion ist vereinfacht als veränderbarer Widerstand zu betrachten. Die reale Wirkungsweise ist aber erheblich komplexer, so kann auch das dynamische Übergangsverhalten – z.B. Kurzschluss $\leftrightarrow$ Lichtbogen – beeinflusst werden. Die Wirkung ist dann vergleichbar einer elektrischen Drossel.

Die Steuer-/Regelelektronik kann innerhalb weniger Mikrosekunden über das Leistungsteil (Transistoren) auf den zeitlichen Verlauf von Schweißstrom und -spannung Einfluss nehmen. Störgrößenbedingte Strom- oder Spannungsschwankungen können so schnell ausgeregelt werden. Die Reaktionszeit liegt bei 40 bis 50 μ s. Insbesondere beim MSG-Schweißen ergeben sich dadurch völlig neue Regelstrategien. Der Prozess wird dadurch nahezu frei von Spritzern und gleichzeitig ermöglicht die schnelle Regelung eine deutlich höhere Prozessstabilität bei reduzierter Wärmeeinbringung.

- Vorteile: sehr schnelle Regelung, Regelzeiten $\ll 100 \mu$ s
- elektronische Regelung $\rightarrow$ digitale Prozesssteuerung
- für alle Schweißverfahren geeignet
- Nachteile: hohe Verlustleistung im Transistor $\rightarrow$ Wasserkühlung
- schlechter elektrischer Wirkungsgrad $< 50\%$
- sehr viel teurer als alle anderen elektronischen Stellprinzipien

Die analoge Transistorschweißstromquelle wird auch heute noch als Universalstromquelle in der Forschung angewendet.

3.3.2.2 Sekundär getaktete Transistorschweißstromquelle

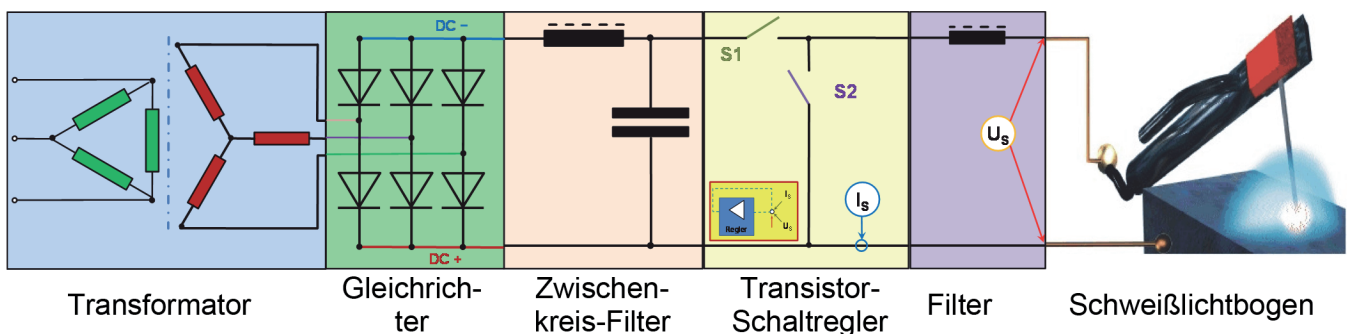


Abbildung 11: Sekundär getaktete Transistorschweißstromquelle (Prinzip)

Das Stellprinzip beruht auf einer Tastverhältnissteuerung (Pulsweitenmodulation) zwischen "EIN" und "AUS". So entstehen nach dem Transistorsteller Spannungsimpulse gleicher Höhe aber unterschiedlicher

Breite. Durch die nachfolgende Drossel wird aus diesen Impulsen ein Gleichstrom mit einer geringen Welligkeit entsprechend dem Tastverhältnis und der Taktfrequenz erzeugt. Je nach Taktfrequenz können Regelzeiten von wenigen 100 μs erreicht werden.

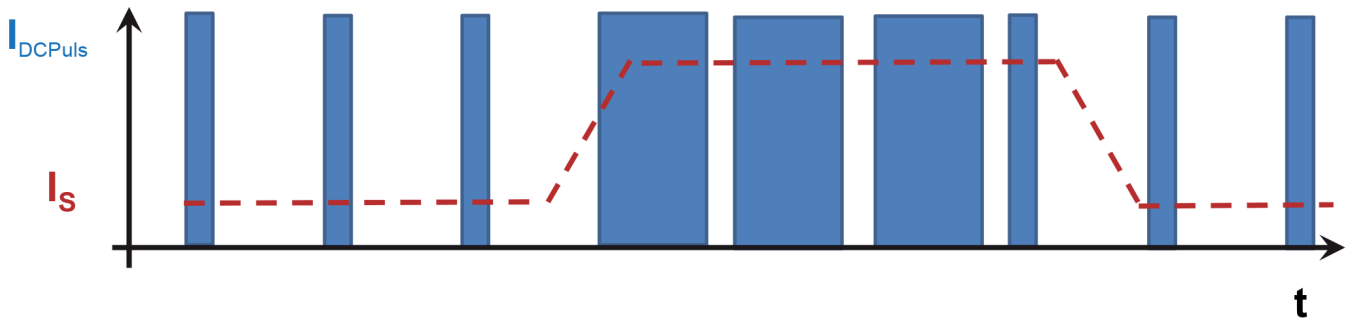


Abbildung 12: Pulsbreitenmodulation (Prinzip)

Abbildung 12 zeigt das Prinzip der Stromregelung durch eine Pulsmodulation. Die zeitlichen Abstände der Impulse, die positive Flanke, sind konstant, während die abfallende Flanke die Änderung des Mittelwerts bestimmt. Die rote Linie entspricht dem „gefilterten“ Schweißstrom nach der Drossel. Aufgrund der hohen Frequenz (z.B. 50 kHz) ist nur eine sehr kleine Drossel erforderlich. Sie hat im Gegensatz zu den in normalen Schweißgleichrichter eingebauten nahezu keinen Einfluss auf die Schweißeigenschaften.

Der Leistungsfaktor $\cos \phi$ wird im Wesentlichen durch den Netztransformator bestimmt. Für den Wirkungsgrad η der Schweißstromquelle haben neben dem Netztransformator vor allem die Dioden einen entscheidenden Einfluss.

Vorteile:

- schnelle Regelung, Regelzeiten $< 300 \mu\text{s}$
- elektronische Regelung $\rightarrow$ digitale Prozesssteuerung
- für alle Schweißverfahren geeignet

Nachteile:

- höherer Aufwand als bei einem Schweißgleichrichter
- höhere Fertigungs-, Materialkosten $\rightarrow$ Tendenz fallend abhängig von Rohstoffpreisen und Lohnkosten
- Volumen und Masse sind größer als bei einer primär getakteten Transistorschweißstromquelle

3.3.2.3 Primär getaktete Transistorschweißstromquelle – Inverter

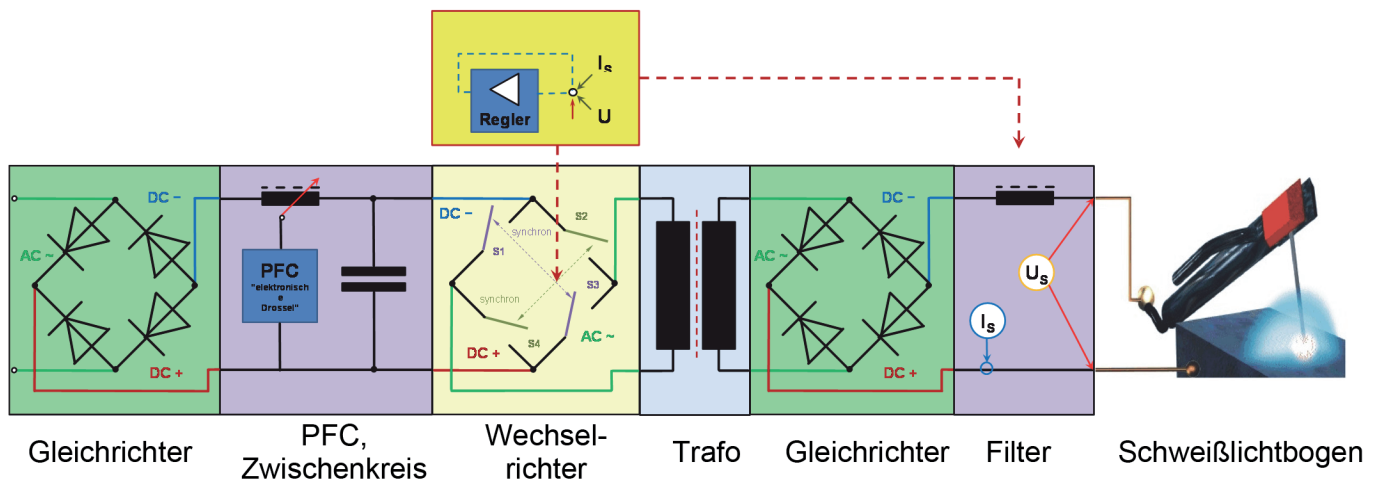


Abbildung 13: Primär getaktete Transistorschweißstromquelle – Inverter (Prinzip)

Bei einem Inverter wird zunächst die Netzeingangswechselspannung mittels Gleichrichter in eine Gleichspannung umgewandelt, die anschließend mittels Wechselrichter wieder in eine Wechselspannung mit einer höheren Frequenz umgeformt wird. Über den Transformator erfolgt zum einen die galvanische Trennung zwischen Eingangs-(Netz)- und Ausgangs-(Schweiß)kreis und zum anderen die Spannungstransformation Netz- zu Schweißspannung.



Auch beim Inverter wird das Prinzip der Pulsbreitenmodulation verwendet (s. Abbildung 14).

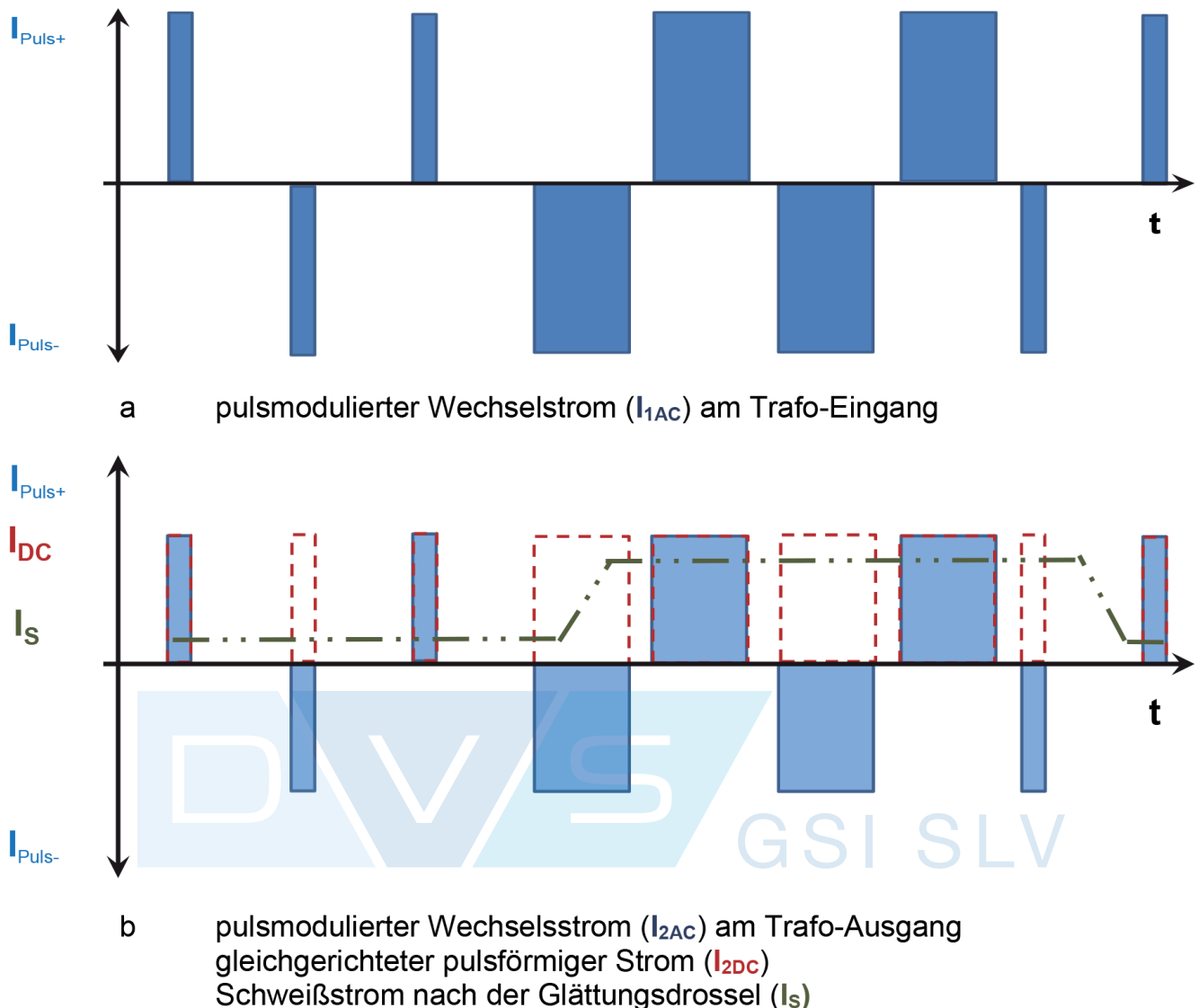


Abbildung 14: Inverter – Prinzip der Pulsmodulation

Abbildung 15 verdeutlicht den Unterschied zwischen einem Trafo eines klassischen Schweißgleichrichters mit einer Betriebsfrequenz von 50 Hz und einem Inverter mit einer Taktfrequenz von 50 kHz. Neben der Gewichts- und Volumeneinsparung ist vor allem der bessere Wirkungsgrad zu nennen.

Der PFC (Power Factor Correction) sorgt dafür, dass der Eingangswechselstrom phasengleich mit der Eingangswechselspannung verläuft. Dadurch wird gewährleistet, dass der $\cos \phi$ als auch der λ -Faktor eins werden. Es wird so möglich, aus dem Einphasennetz die maximal mögliche Leistung zu entnehmen. Das bedeutet z.B., bei 230 V Netzspannung können mit 200 A Verbindungsnahte geschweißt werden.

- Vorteile: schnelle Regelung, Regelzeiten $< 300 \mu s$
- elektronische Regelung $\rightarrow$ digitale Prozesssteuerung
- die Stromquellen sind kleiner, leichter und haben eine geringere Verlustleistung (höherer elektrischer Wirkungsgrad)
- für alle Schweißverfahren geeignet
- Die Schweißstromquelle kann unabhängig von der Netzfrequenz (50/60 Hz) in einem weiten Spannungsbereich eingesetzt werden.

- Nachteile: höherer Aufwand als bei einem Schweißgleichrichter oder auch bei sekundär getakteten Transistorstromquellen → höherer Preis
- höhere Fertigungs-, Materialkosten → Tendenz fallend abhängig von Rohstoffpreisen und Lohnkosten
- Die Anpassung an höhere Netzeingangsspannungen ($> 400 \text{ VAC}$) ist nicht immer gegeben.

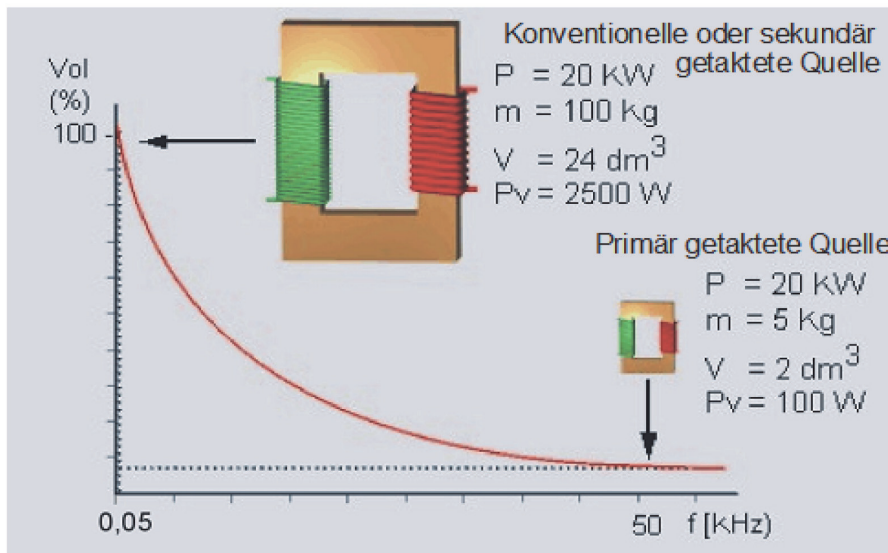


Abbildung 15: Vergleich klassischer (50 Hz-)Trafo und Inverter (50 kHz-)Trafo

3.3.2.4 Hybridquellen

Hybridquellen sind Schweißstromquellen aus einer Kombination von einem klassischen Schweißgleichrichter mit einem elektronischen Stellglied, z.B. einem Transistor. Der Transistor kann dann als Schalter oder analog als elektronischer Regelwiderstand arbeiten. Der Vorteil liegt vor allem in der geringeren Leistung, die der Leistungstransistor ertragen muss. Zum Beispiel wird der Kurzschlussstrom beim MSG-Kurzlichtbogenschweißen von der klassischen Stromquelle geliefert, während die Impulse über den elektronischen Steller erzeugt werden. Je nach der Lage des momentanen Arbeitspunktes arbeitet nur der Analogteil (klassischer Schweißgleichrichter) allein oder es wird der elektronische Teil (Transistor) zugeschaltet.

3.3.2.5 Kombiniert primär und sekundär getaktete Quellen

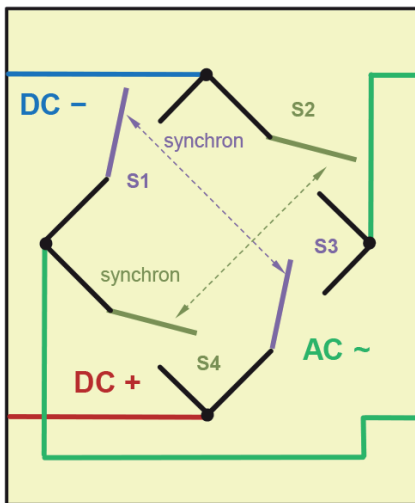


Abbildung 16: Sekundärschalteinheit

Für das WIG-AC-Aluminiumschweißen ist es beispielsweise erforderlich, einen Wechselstrom zur Verfügung zu stellen. Hierzu wird bei den elektronischen Schweißstromquellen, z.B. bei einer primär oder sekundär getakteten Transistorstromquelle, ein zusätzlicher Wechselrichter nachgeschaltet. Abbildung 16 zeigt den schematischen Aufbau dieses Wechselrichters. Die Transistoren (Schalter) S1/S3 bzw. S2/S4 werden immer gleichzeitig EIN- bzw. AUS-geschaltet. Wenn S1/S3 eingeschaltet sind, öffnen die beiden Schalter S2/S4 bzw. entsprechend umgekehrt. Dadurch kann, ohne die Schweißelektroden zu tauschen, die Polarität gewechselt werden.

Beim WIG-AC-Schweißen wird eine Schaltfrequenz von ca. 25 bis 200 Hz verwendet. Dabei kann die Wechselspannung, der -strom von einer reinen Sinus- über Trapez- bis zu einer steilen Rechteckform eingestellt werden. Die Rechteckform ist beim Nulldurchgang der Spannung für eine schnelle Wiederrzündung von Vorteil. Der Schalldruck ist aber sehr hoch. Im Gegensatz dazu hat die Sinusform den geringeren Schalldruck, aber die schlechtere Wiederrzündung. Durch die elektronische Erzeugung der Wechselspannung können die positive und die negative Halbwelle getrennt voneinander an die Erfordernisse des Schweißprozesses angepasst werden. Abbildung 17 zeigt die symbolische Darstellung.

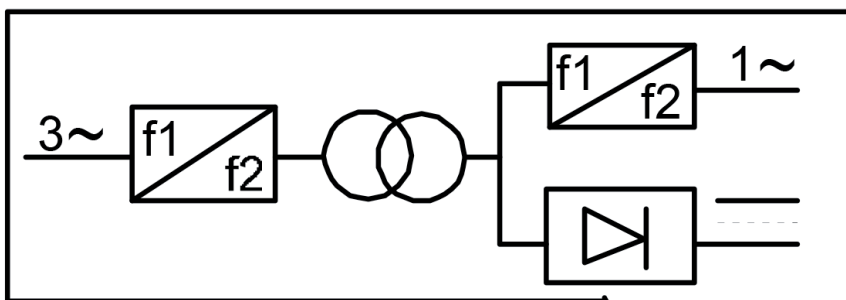


Abbildung 17: Symbol einer primär/sekundär getakteten Quelle

3.4 Schweißumformer

Der Schweißumformer entspricht einem Generator, wie er zur Stromerzeugung verwendet wird. Dieser Generator hat für die Schweißtechnik einen modifizierten Aufbau mit spezifischen Strom-Spannungskennlinien, z.B. eine flache Kennlinie für das MSG-Schweißen oder eine fallende Kennlinie für das Lichtbogenhandschweißen. Aggregate sind Generatoren, die von einem Verbrennungsmotor (Diesel) angetrieben werden. Die Bezeichnung Umformer bezieht sich auf Generatoren, die starr mit einem Elektromotor gekoppelt sind. Die Baugröße wird durch die abzugebende Schweißleistung und die Drehzahl des Generators bestimmt. Je größer die Drehzahl umso kleiner ist die Baugröße. Gleichstrom-Schweißgeneratoren

sind die ältesten Schweißstromquellen zum Lichtbogenschweißen.

Heute werden Aggregate überwiegend noch dort eingesetzt, wo kein elektrischer Netzanschluss zur Verfügung steht, z.B. auf Baustellen im unwegsamen Gelände. Es gibt zwei Schweißgeneratortypen:

1. Bürstenschweißgeneratoren; Sie erzeugen einen reinen Gleichstrom mit einer nur sehr geringen Welligkeit.
2. bürstenlose Schweißgeneratoren; Sie erzeugen einen Wechselstrom, der in einem nachgeschalteten Gleichrichterblock gleichgerichtet und anschließend durch eine Schweißkreisdrossel geglättet wird. Im Schweißverhalten unterscheiden sich beide Generatortypen nur wenig. Der bürstenlose Schweißgenerator hat ein besseres Zündverhalten. Durch den Wegfall der Kollektoren und Kohlebürsten ist er praktisch wartungsfrei.

Vorteile:

- im rauen Baustellenbetrieb ist er für viele Schweißverfahren, insbesondere für das Lichtbogenhandschweißen gut einsetzbar
- Aggregate sind netzunabhängig verwendbar
- kurzzeitige Unterbrechungen der Netzspannung können aufgrund der Trägheit des mechanischen Rotationsystems gut überbrückt werden (elektrischer Motorbetrieb)
- für Schweißverfahren mit fallender und flacher Kennlinie geeignet

Nachteile:

- große Masse, großes Volumen, großer Geräuschpegel
- schlechtes Regelverhalten → mehr Spritzer als elektronische Stromquellen beim MSG-Schweißen
- kein MSG-Impulsschweißen
- heute kaum noch im Einsatz → Generatoren sind auf Baustellen für viele Geräte erforderlich, z.B. Schleifgeräte, Lampen usw.; elektronische Stromquellen können auch sehr stabil an mobilen Stromgeneratoren arbeiten.

4 Die technischen Daten (Leistungsschild)

Die „Technischen Daten“ für den Anwender sind in der Gerätebeschreibung (Betriebsanleitung) der Stromquelle nach den einschlägigen Normen aufgrund der EC-Kennzeichnung dokumentiert. An jeder Stromquelle ist ein gesetzlich vorgeschriebenes Leistungsschild mit den wichtigsten technischen Daten in Kurzform angebracht.

allgemeine Daten

Gerätehersteller / -Vertreiber	
Typenbezeichnung	Fabrikations-Nr.
Stromquellenbauart	gefertigt nach Norm

Schweißdaten

GeräteKennlinie	Einstellbereich $I_{2min}/U_{2min} - I_{2max}/U_{2max}$				
	Frequenz [Hz]		X [%]	Y [%]	Z [%]
Schweißverfahren	Schweißspannung	S.-Strom I_2	XX [A]	YY [A]	ZZ [A]
	Leerlaufspannung U_0 [V]	S.-Spannung U_2	XX [V]	YY [V]	ZZ [V]

Netzanschlussdaten

Netzanschluss, 1 / 3-Leiter	Leistungsfaktor $\cos \varphi (I_2)$				
	Netzspannung U_1 [V]	Netzstrom I_1	XXX [A]	YYY [A]	ZZZ [A]
Kühlart	Netzfrequenz [Hz]	Scheinleistung S_1	XXXX [kVA]	YYYY [kVA]	ZZZZ[kVA]
Isolations-Klasse (Trafo)					
Blindleistung Q [kvar]	Schutzgrad IPXX				

Abbildung 18: Leistungsschild für Schweißstromquellen

Angabe der elektrischen Kennwerte zur Auswahl und zum Vergleich von Schweißstromquellen. Der Aufbau des Schildes ist in der EN 60974-1 (entspricht IEC 60974-1 bzw. VDE 0544-1) genormt. Das Leistungsschild muss an jeder Schweißstromquelle befestigt oder aufgedruckt sein und ist in drei Teile gegliedert:

1. oberer Teil (allgemeine Daten): enthält Namen des Herstellers, Vertreibers oder Importeurs und Angaben zur Kennzeichnung des Schweißgerätes.
2. mittlerer Teil (Schweißdaten): enthält Informationen zum Schweißstromkreis.
3. unterer Teil (Netzanschluss): Angaben zum Netzanschluss u.a. wie Schutzgrad, Kühlart usw.

Schweißtransformator	- Stufengeschalteter Transformator - Streukerntransformator - Transduktor 
Schweißgleichrichter	- Stufengeschalteter Gleichrichter - Gleichrichter mit Streukerntransformator - Mit Vormagnetisierung (Transduktor) - Thyristorisierte Gleichrichter - Analogstromquelle   
getaktete Quellen	- Sekundär getaktete Quellen - Primär getaktete Quellen (Inverter)  
Schweißsumformer	- Mit Elektromotor - Mit Verbrennungsmotor (Schweißaggregat)  

Tabelle 2: Übersicht der Schweißstromquellen, Bauarten in symbolischer Darstellung

In Abbildung 19 werden typische Beispiele für Leistungsschilder aus der Praxis gezeigt. Die Darstellungen sind nicht immer einheitlich und können bei tragbaren Schweißinvertern aufgrund ihrer sehr kleinen Bauweise sehr klein ausfallen.

Hersteller, Handelsunternehmen usw.		K GMBH	
EN 60974 - 1		804 40 10 00	
Fabr.-No. 160		40 A / 15 V - 400 A / 34 V	
		X	%
		60%	100%
U ₀ V		I ₂ A	400 A 310 A
67		U ₂ V	34,0 V 30 V
cos φ 0,97			
Schutzart IP 23		U ₁ V	T 32 A
Kühlart F		I ₁ A	28
Isol.-KL. F		I ₁ A	19
Q kVar		50Hz	S ₁ kVA
Baujahr 2002		Schalt.-No. 2675	CE S
		SL.-Nr.	

IEC974-1	
~57-89Hz	10A/10.4V to 300A/22.0V
X	40% 60% 100%
U ₀ V	I ₂ 300A 245A 190A
58...68	U ₂ 22.0V 19.8V 17.6V
~57-89Hz	10A/20.4V to 250A/30.0V
X	40% 60% 100%
U ₀ V	I ₂ 250A 204A 158A
58...68	U ₂ 30.0V 28.2V 26.3V
U ₁ =380V	I ₁ 20.0A 15.3A 11.1A
U ₁ =415V	I ₁ 18.3A 14.0A 10.2A
50/60 Hz	
IP21	

Abbildung 19: Beispiel eines Leistungsschildes für Schweißstromquellen

Symbol		Stellprinzip		Kennlinie		Netzrückwirkung	Anwendung	Masse	Dynamik	
				stat.	universal					
Umformer				Ankerverstellung		hoher primärer Einschallstrom cos φ	mechanisiert Handschweißung	~4	wird durch den konstruktiven Aufbau bestimmt, während des Schweißens in der Regel nicht veränderbar	
				sekundär						
				primär						
Transformator				mechan		cos φ		~1,5		
				Stufenschaltung		cos φ		~2		
				Streukern		hoher primärer Einschallstrom		~3		
				elektrisch				1		
				Transduktor				~2		
Gleichrichter				mechan		cos φ		~3		
				Stufenschaltung		cos φ		1		
				Streukern		cos φ		~2		
				elektrisch				~3		
				Transduktor				~3		
Thyristor				netzsynchrone Phasenaschnitt		cos φ		~1,3	~10 ms	
				elektronische Regelung						
Transistor				elektronische Regelung		cos φ, λ	Roboter	~2	< 100 μs	
				sekundär						
				primär						
analoge				"veränderbarer Widerstand"		cos φ, λ	Roboter	~1,3	< 200 μs	
				Pulsweitensteuerung		λ		~0,3	< 200 μs	

h - horizontale oder flache Kennlinie f - fallende Kennlinie

5 Schweiß Eigenschaften von Schweißstromquellen für das Lichtbogenschweißen

Die Schweiß Eigenschaften von Schweißstromquellen für das Lichtbogenschweißen werden durch unterschiedliche Begriffe charakterisiert:

- die statische Strom-Spannungskennlinie – das Verhalten von Spannung (U) und Strom (I) einer Schweißstromquelle bei Änderung der Lichtbogenlast (Widerstand). Sie kann mittels eines veränderbaren ohmschen Lastwiderstandes durch Strom- und Spannungsmessungen ermittelt werden.
- das zeitliche (dynamische) Verhalten von Strom und Spannung bei Vorgängen im Lichtbogen, z.B. bei einem Kurzschluss.
- die aufeinander abgestimmte Einstellung von Schweißparametern – Synergiekennlinie.

5.1 Statische Kennlinie

Die statische Kennlinie einer Schweißstromquelle wird durch den konstruktiven Aufbau und/ oder durch den elektrischen Regelkreis bestimmt. Bei einem Schweißtrafo z.B. entsteht die fallende Kennlinie durch die geringere Kopplung zwischen Primär- und Sekundärwicklung. Transistorstromquellen haben dagegen immer einen Regelkreis. Der Schweißstrom und die -spannung werden „gemessen“ und die Ausgangskennlinie entspricht dann einer ausgewählten Form, fallend oder flach, Strom (I) oder Spannung (U) geregelt.

5.1.1 Flache Kennlinie

Bei einer flachen oder horizontalen Kennlinie (**Abbildung 20**) ändert sich die Spannung mit steigender Belastung ($R_1 < R_0$) nur wenig. Die Spannung bestimmt den Schweißprozess.

Der Neigungswinkel α der Kennlinie wird bei klassischen Stromquellen im Wesentlichen durch die internen Widerstände und die Kopplung des Trafos bestimmt. Der Kurzschlussstrom, Schnittpunkt mit x-Achse, liegt in der Regel weit außerhalb des Arbeitsbereiches und wird durch den konstruktiven Aufbau sowie die Trägheit der Netzsicherung bestimmt.

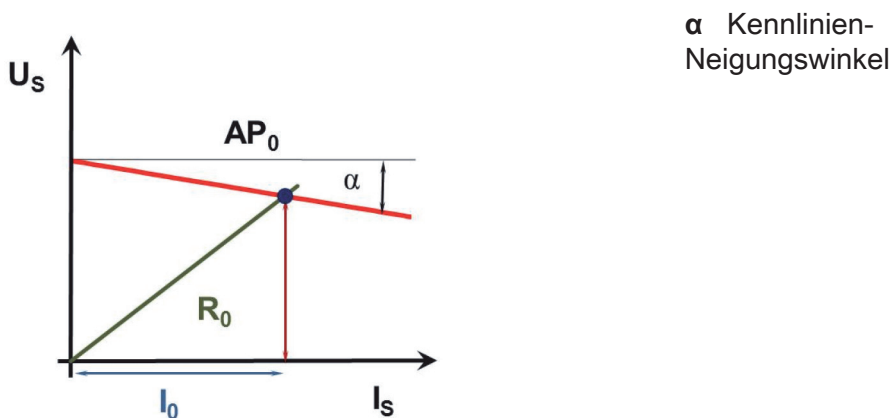
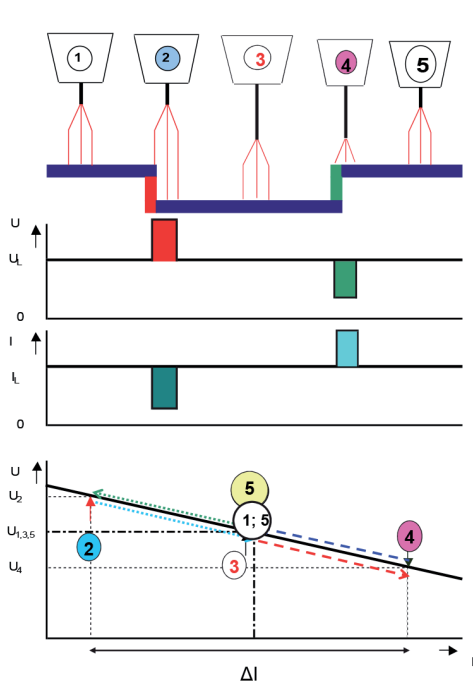


Abbildung 20: Die flache Kennlinie

Das MSG-Schweißen – Regelvorgang bei Änderung der Lichtbogenlänge ΔI -Regelung



AP1 Arbeitspunkt zu Beginn des Schweißens, Drahtvorschubgeschwindigkeit und Schweißspannung werden eingestellt.

AP2 Aufgrund des Lichtbogenlängensprungs ($U_2 > U_1$) wandert der AP 1 nach AP2 $\rightarrow I_s$ wird kleiner.

AP3 Aufgrund des geringeren Schweißstromes ist die Abschmelzleistung geringer $\rightarrow$ Lichtbogenlänge wird kürzer. Es wird der AP 3 erreicht, der aufgrund der größeren freien Drahtlänge nicht identisch mit AP1 ist.

AP4 Aufgrund des Lichtbogenlängensprungs ($U_4 < U_3$) wandert der AP 3 nach AP4 $\rightarrow I_s$ wird größer.

AP5 Aufgrund des größeren Schweißstromes ist die Abschmelzleistung größer $\rightarrow$ Lichtbogenlänge wird kürzer. Es wird der AP 5 erreicht, der identisch mit AP1 ist.

Die ΔI -Regelung wird auch als innere Regelung bezeichnet, weil der Regelprozess allein von der Stromquelle und deren Kennlinie abhängt.

Abbildung 21: ΔI -Regelung

Die ΔI -Regelung wird auch als innere Regelung bezeichnet, weil der Regelprozess allein von der Stromquelle und deren Kennlinie abhängt.

Bei Kennlinien, die durch einen Regler (z.B. Transistorstromquellen) erzeugt werden, kann der Neigungswinkel α als ein zusätzlicher Parameter ausgewählt werden (z.B. 1V/100A). Der max. Kurzschlussstrom wird elektronisch begrenzt. Er wird zum einen durch die max. Belastbarkeit der Bauelemente der Stromquelle und zum anderen nach den technologisch Erfordernissen beim Schweißen bestimmt.

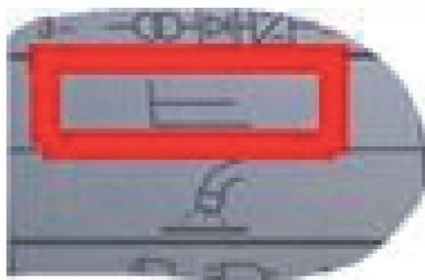


Abbildung 22: Flache Kennlinie Symbol

5.1.2 Fallende Kennlinie

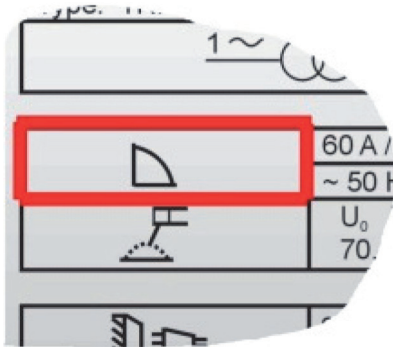


Abbildung 23: Fallende Kennlinie Symbol

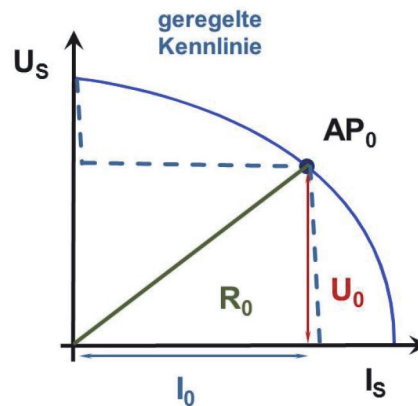


Abbildung 24: Fallende Kennlinie

Über eine fallende Kennlinie verfügt eine Stromquelle mit einem „konstanten“ Strom, d.h., bei größerer Last wird die Spannung am Lichtbogen kleiner, während sich der Strom nur wenig ändert. Die höchste Konstanz wird mit elektronisch geregelten Stromquellen erreicht, in Abbildung 25 gestrichelt dargestellt. Die blaue Linie entspricht z.B. der eines Trafos mit Streukernverstellung,

Die Lichtbogenlänge wird sowohl beim Lichtbogenhand- als auch beim WIG-Schweißen entscheidend durch die manuelle Führung (den Abstand) der Elektrode zum Werkstück bestimmt. Beim vollmechanischen/automatisierten Schweißen muss durch einen zusätzlichen äußeren Regelkreis die Lichtbogen-spannung und damit die Lichtbogenlänge konstant gehalten werden (ΔU -Regelung). Der Abstand des Brenners kann über eine zusätzliche Sensorik konstant gehalten werden.

Diese Möglichkeit wird vorrangig beim UP-Schweißen mit großen Draht- oder Bandquerschnittsflächen bevorzugt. Die Vorschubgeschwindigkeit der abschmelzenden Elektrode wird abhängig von der Lichtbogen-spannung geregelt.

Tritt eine Änderung der Lichtbogenlänge l_{LB0} im eingestellten Arbeitspunkt AP_0 auf, so entsteht aufgrund des steil fallenden Verlaufes der Belastungskennlinie der Schweißstromquelle vor allem eine Schweißspannungsänderung $\Delta U_{1/2}$. Dabei führt eine Verlängerung des Lichtbogens ($l_{LB1} > l_{LB0}$) zu einer Verschiebung des Arbeitspunktes $AP_0 \rightarrow AP_1$. Das bedeutet eine Spannungserhöhung um $+\Delta U_1$. Um diese Differenz wieder zu verkleinern, wird mittels des Reglers die Drahtvorschubgeschwindigkeit $v_{D0} \rightarrow v_{D1}$ erhöht. ΔU_1 wird so wieder zu ~ 0 reduziert, die ursprüngliche Lichtbogenlänge l_{LB0} wird wieder erreicht.

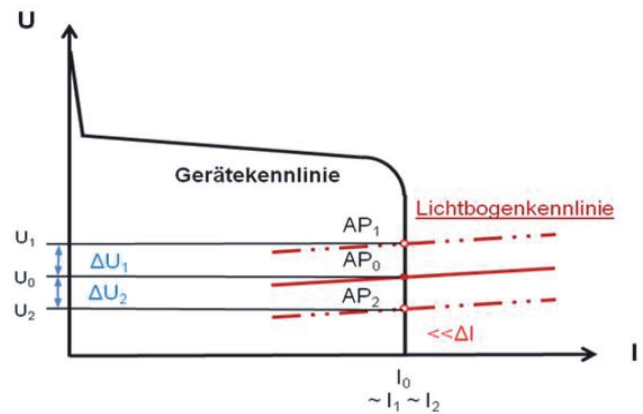


Abbildung 25: ΔU -Regelung, fallende Kennlinie

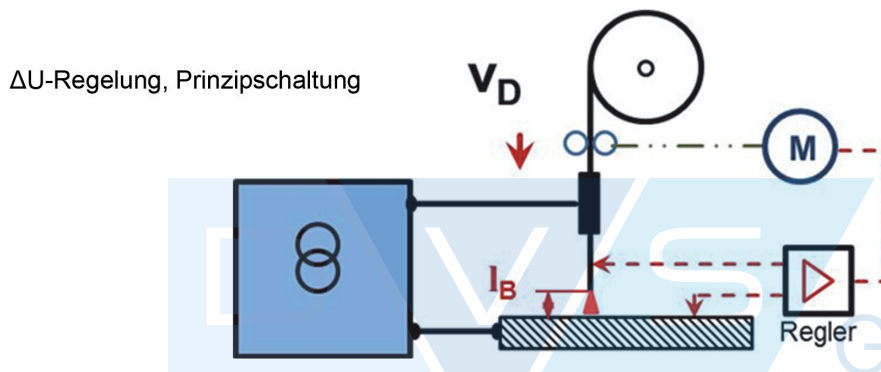


Abbildung 26: ΔU -Regelung, Prinzipschaltung

5.2 Dynamische Eigenschaften

Die dynamischen Eigenschaften einer Schweißstromquelle werden ganz entscheidend durch das Stellprinzip oder/und den konstruktiven Aufbau bestimmt. Zum Beispiel ist bei einem Schweißgleichrichter die Glättungsdrossel ganz entscheidend für die dynamischen Eigenschaften, wie Zündverhalten und Spritzerbildung beim MSG-Kurzlichtbogen. Bei einem Inverter ist die Drossel für die Schweißeigenschaften nahezu ohne Bedeutung. Die Dynamik wird fast ausschließlich durch die Regeldynamik der elektronischen Stromquelle bestimmt und kann an den Schweißprozess daher optimal angepasst werden.

- **MSG-Schweißen** Kurzschlusszündung des Lichtbogens
- MSG-Kurzlichtbogen → Wiederzündverhalten nach Kurzschluss → Spritzervermeidung (Abbildung 25)
- MSG-Impulslichtbogen → Realisierung von Strom- oder Spannungsimpulsen (Abbildung 28)
- MSG-AC-Schweißen → schnelle Wiederzündung im Nulldurchgang

Zusatzinduktivitäten, z.B. aufgerollte Schweißkabel sind zu vermeiden. Sie verändern die Schweißeigenschaften!

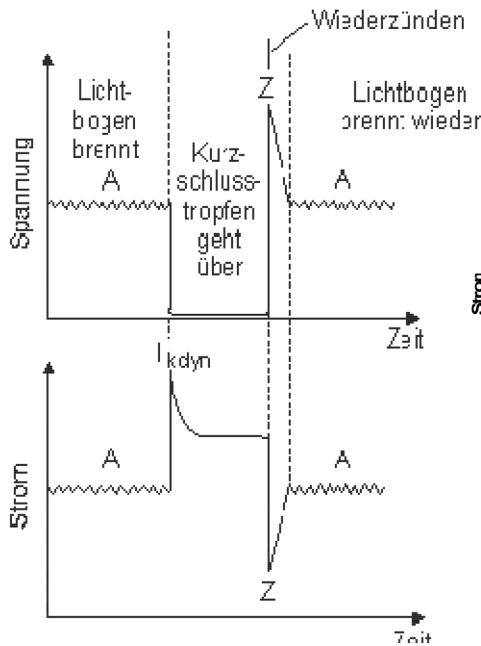


Abbildung 27: Parameterverlauf Kurzlichtbogen

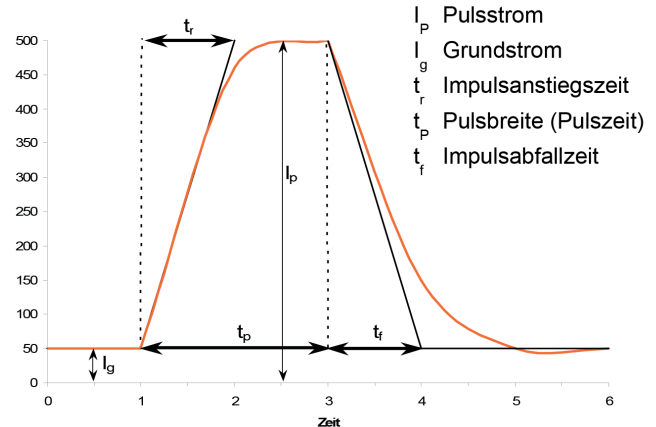


Abbildung 28: Parameterverlauf Impulslichtbogen

WIG-Schweißen / Plasma-Schweißen

- **Lichtbogenzündung**
 - elektronische Stromquellen ermöglichen einen sehr schnellen Stromanstieg, sodass auch eine Kurzschlusszündung möglich wird, ohne dass zwangsläufig Wolframeinschlüsse entstehen müssen.
 - mittels Hochspannungsimpuls → berührungslose Lichtbogenzündung
 - Zündung auch beim WIG-AC-Schweißen mit DC → höhere Leerlaufspannung → bessere Zündeeigenschaften
- **AC-Schweißen**
 - hohe Spannungs- und Stromanstiegsgeschwindigkeit → sichere Wiederzündung des Lichtbogens im Nulldurchgang, ohne zusätzliche Hochspannungsimpulse (HF)
 - schnelle Umschaltung von AC- in den sicheren zulässigen DC-Betrieb bei Stromunterbrechung (Leerlauf)

Lichtbogenhandschweißen

Ähnlich wie beim MSG-Schweißen wird der Schweißprozess durch die Dynamik der Stromquelle bestimmt. Die Induktivität in den klassischen Schweißstromquellen ist dabei von entscheidendem Einfluss. Insbesondere beim Einphasennetzanschluss (230 VAC) sind die Schweißeigenschaften durch den Einsatz von Invertern ganz entscheidend verbessert worden, sichere Zündung des Lichtbogens sowie größerer Schweiß- und Kurzschlussstrom.

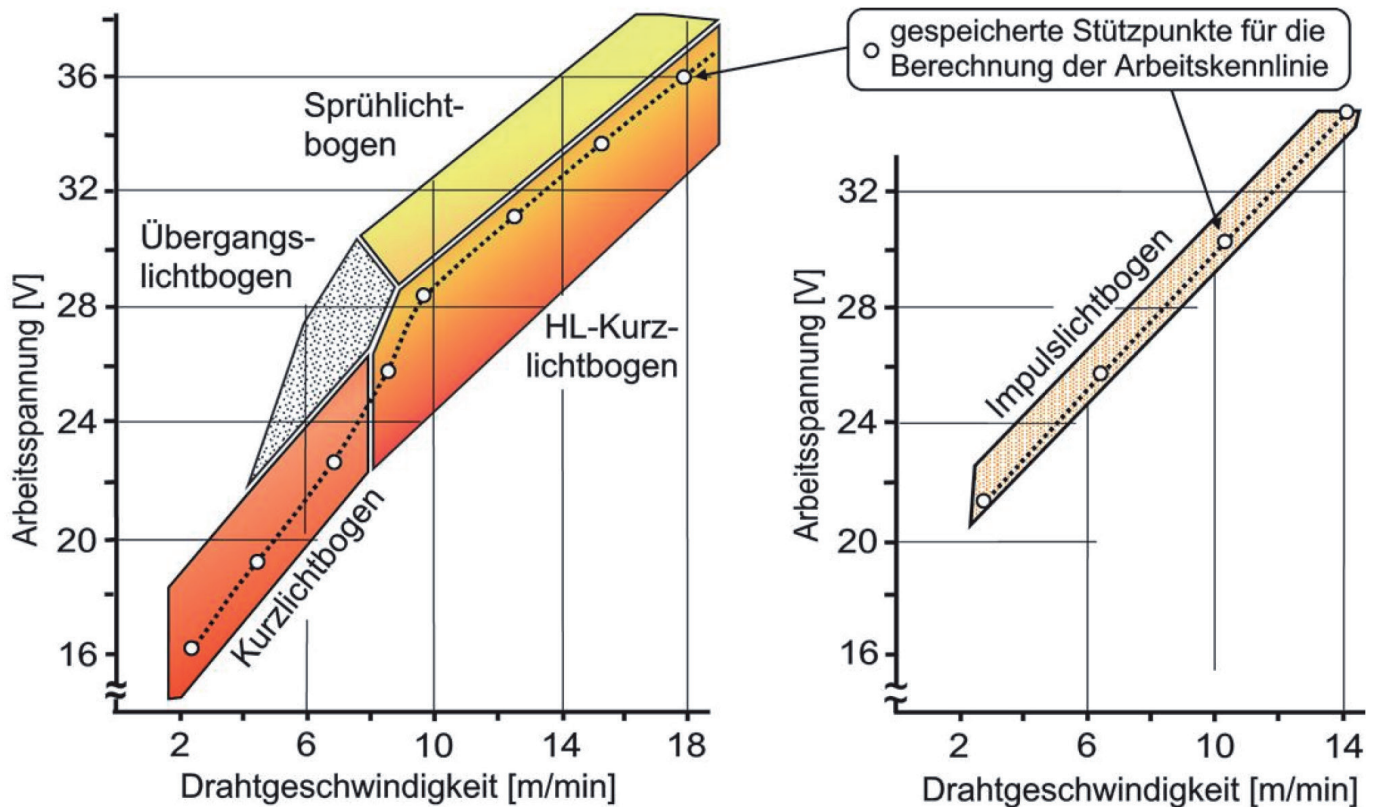


Abbildung 29: Beispiele für eine Synergie-Kennlinie

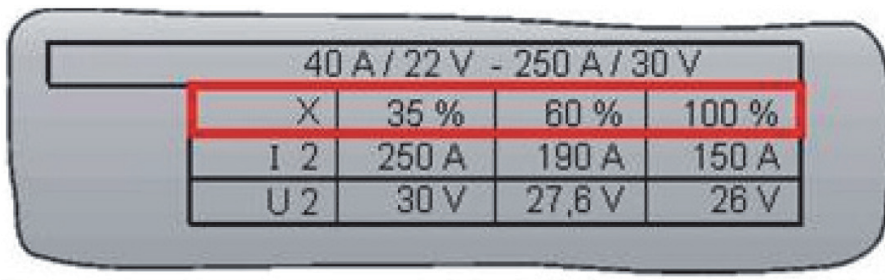
5.3 Synergie-Kennlinie

Die Synergie-Kennlinie ist, wie das Abbildung 29 zeigt, eine Datenbank mit gespeicherten Arbeitspunkten für das MSG-Schweißen. Sie sind in der Regel durch entsprechende Schweißversuche ermittelt worden. Die Zwischenwerte werden durch einen vom Gerätehersteller vorgegebenen Algorithmus berechnet.

Synergie-Kennlinien

- erleichtern die Auswahl geeigneter Parameter für unterschiedliche Schweißaufgaben → abrufen erprobter Datensätze aus einem Datenspeicher
- ermöglichen eine einfache Vorgehensweise nach der Schweißaufgabe, z.B. Kehlnaht mit den Angaben: Werkstoff, -dicke, Drahtwerkstoff, -durchmesser usw. Die Schweißparameter werden dann automatisch ausgewählt und können über Korrekturmenüs in einem geringen Maße verändert werden.
- können aber auch an spezifische Besonderheiten des Anwenders angepasst werden → dies erfordert Zugriffsmöglichkeiten auf das Programm und entsprechend ausgebildetes Fachpersonal

6 Einschaltdauer



40 A / 22 V - 250 A / 30 V			
X	35 %	60 %	100 %
I 2	250 A	190 A	150 A
U 2	30 V	27,6 V	26 V

Abbildung 30: Leistungsschild Einschaltdauer

Fließt ein Strom durch einen ohmschen Widerstand entsteht Wärme. Wird von einer Stromquelle eine bestimmte Leistung abgefordert, werden ihre Komponenten wie Transformator, Dioden, Leistungsteile so lange erwärmt, bis sich ein thermisches Gleichgewicht zwischen erzeugter Verlustwärme und abgeführter Wärme einstellt.

Der höchste Schweißstrom, der dem Leistungsschild (siehe Zeile Einstellbereich) zu entnehmen ist, kann nicht für einen unbegrenzten Zeitraum abgefordert werden. Wird für einen zu langen Zeitraum der Quelle ein zu hoher Strom entnommen, würden deren elektrotechnische Komponenten thermisch überlastet. Das bedeutet ihre Grenztemperatur, die durch die Isolationsklassen (z.B. bei einem Transformator F = 155°C) kenntlich gemacht wird, würde überschritten.

Um eine thermische Überlastung zu vermeiden, dürfen je nach Größe des Schweißstroms bestimmte Einschaltzeiten nicht überschritten werden.

Definition der Einschaltdauer:

$$\text{Einschaltdauer}(ED) = \frac{\text{Schweißzeit}}{\text{Spieldauer}} \cdot 100\%$$

Spieldauer = 10 min

Spieldauer = Summe aller Schweiß- und Pausenzeiten bis zu einer Dauer von 10 min.

Die Spieldauer von 10 min gilt für die Lichtbogenverfahren. Beim Widerstandspressschweißverfahren mit einer Spieldauer von 1 min gerechnet.

Die zulässige Stromhöhe bei vorgegebener Einschaltdauer kann wie folgt berechnet werden:

$$I_S = I_D \cdot \sqrt{\frac{100\%}{ED\%}}$$

I_S = Schweißstrom

I_D = Dauerstrom

Bei Stromquellen für den Handschweißbetrieb werden die Strom-/Spannungskennwerte für 35%, 60% und 100% ED auf dem Leistungsschild angegeben.

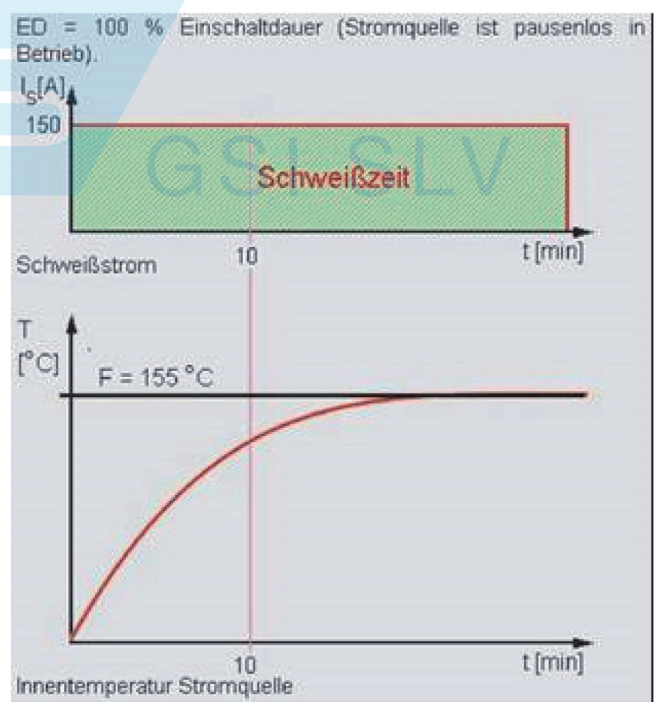


Abbildung 31: Beispiel für Schweißstrom- und Temperaturverlauf bei einer Einschaltdauer von 100%

$$I_s = 150 \text{ A} \cdot \sqrt{\frac{100 \%}{35 \%}} = 254 \text{ A} \approx 250 \text{ A}$$

X	35 %	60 %	100 %
I 2	250 A	190 A	150 A
U 2	30 V	27,6 V	26 V

Stromquellen, die auch für das mechanisierte und automatische Schweißen geeignet sind (z.B. MSG-Verfahren), werden in der Regel für längere Schweißzeiten eingesetzt. Typische Werte auf dem Leistungsschild sind 60 % und 100 % ED.

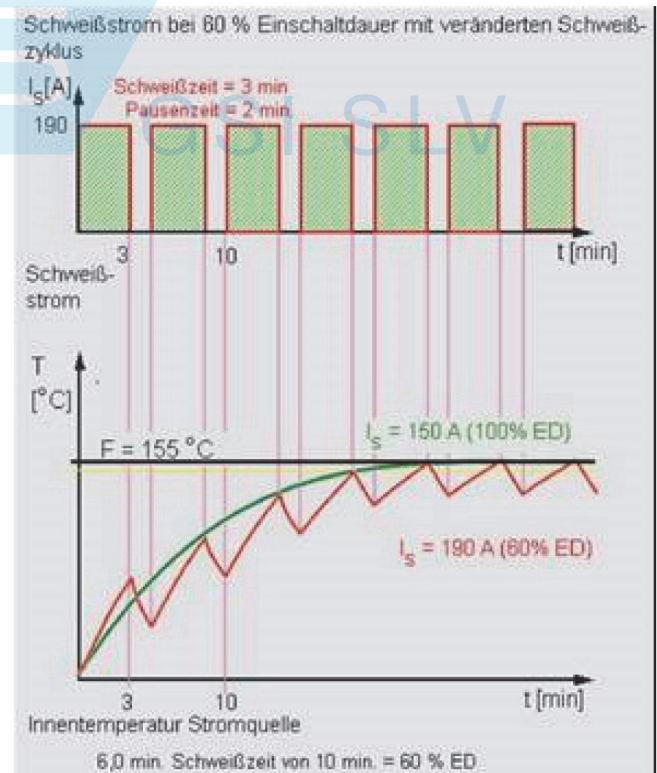
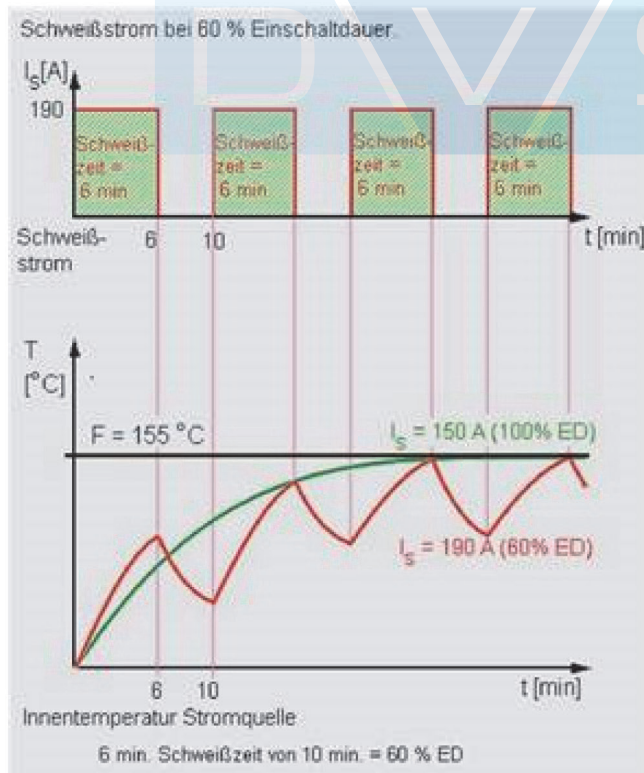
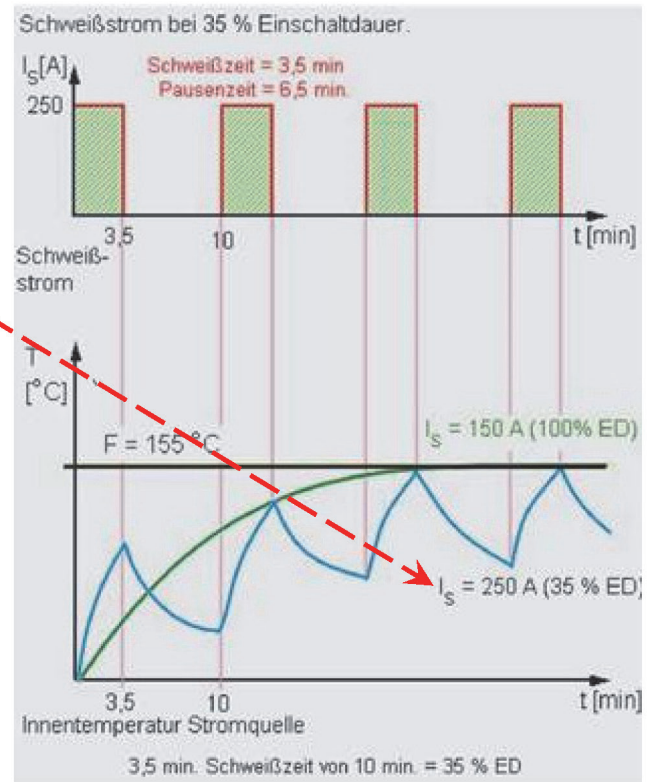


Abbildung 32: Beispiele für Schweißstrom- und Temperaturverläufe bei einer Einschaltdauer (ED) von 35% und 60%

7 Genormte Arbeitsspannung / Lichtbogenkennlinie

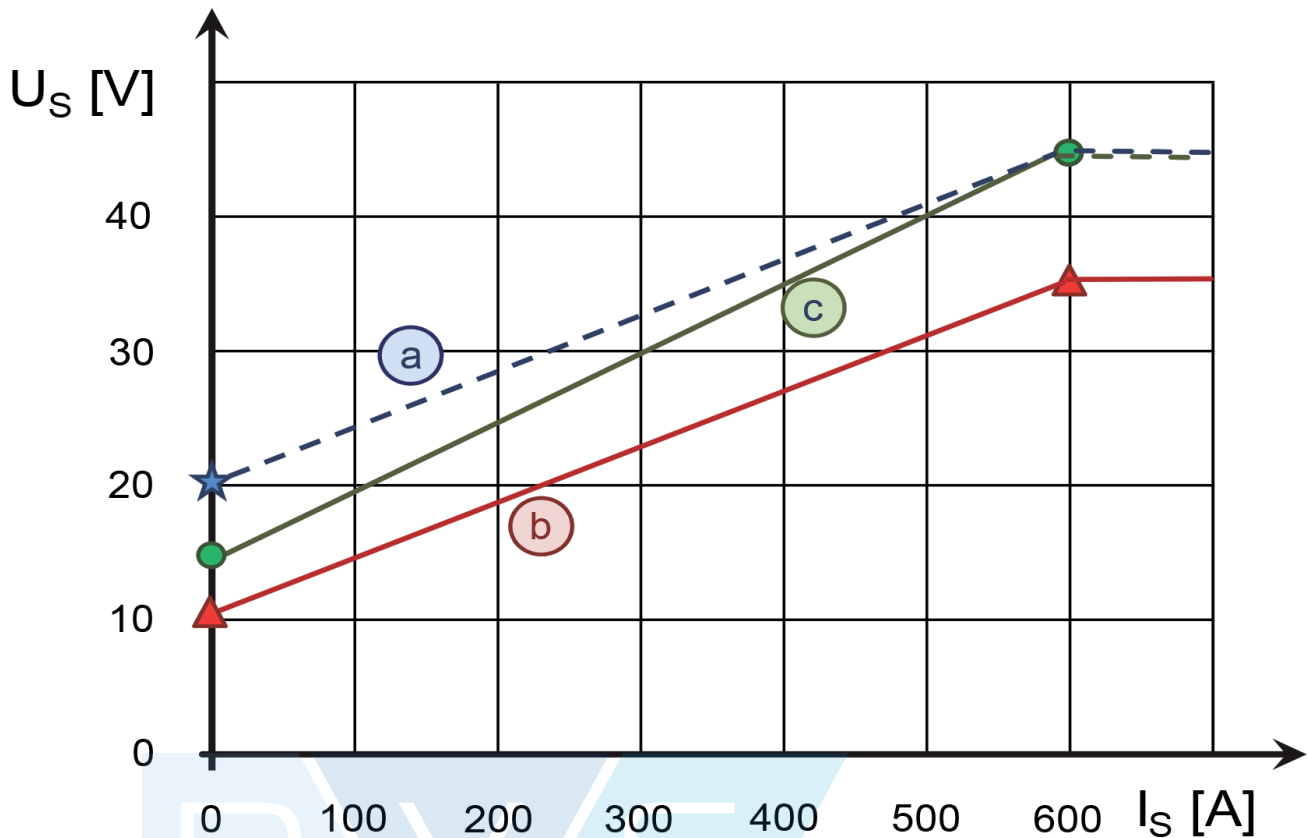


Abbildung 33: Genormte Arbeitsspannungskennlinien für verschiedene Prozesse nach EN 60974-1

a Lichtbogenhandschweißen

$$U_2 = 20V + 0,04 \frac{V}{A} \cdot I_2$$

bis 44 V > 600 A → konstant U_2
= 44 V

b WIG-Schweißen

$$U_2 = 10V + 0,04 \frac{V}{A} \cdot I_2$$

bis 34 V > 600 A → konstant U_2
= 34 V

c MSG-Schweißen

$$U_2 = 14V + 0,05 \frac{V}{A} \cdot I_2$$

bis 44 V > 600 A → konstant U_2
= 44 V

UP-Schweißen

mit fallender Kennlinie wie **a**
mit flacher Kennlinie wie **c**

Beispiel für die Ermittlung der Schweißstrom-Bemessungswerte bei einer Quelle zum E-Handschweißen.

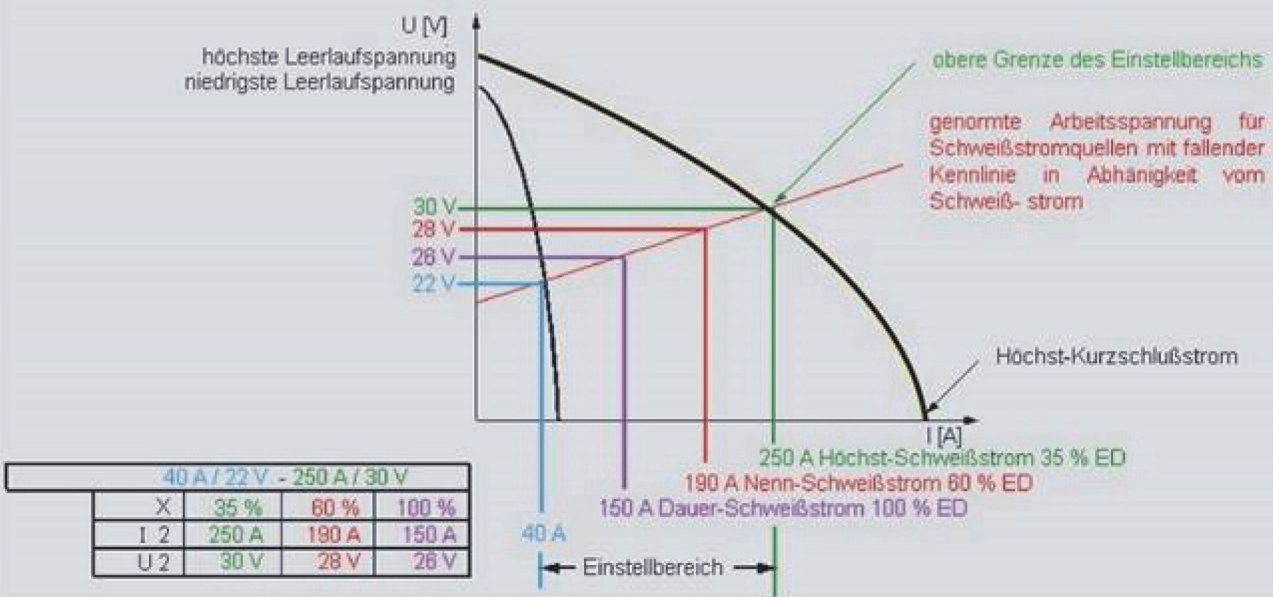


Abbildung 34: Beispiel für die Ermittlung der Schweißstrom-Bemessungswerte bei einer Quelle zum Lichtbogenhandschweißen

8 Leerlaufspannung

Als Leerlaufspannung gilt die Spannung zwischen den beiden Schweißbuchsen für Brenner und Werkstückklemme der Schweißstromquelle oder an den Enden Schweißleitungen zur Schweißstelle (Brenner, Werkstück), wenn der Schweißstromkreis "offen" ist, d.h., kein Schweißstrom fließt. Insbesondere beim Lichtbogenhandschweißen entsteht beim Wechseln der Schweißelektrode eine Gefährdung des Schweißers infolge der Leerlaufspannung.

Um eine Gefährdung des Schweißers auszuschließen, darf nach der Berufsgenossenschaftlichen Regel DGUV Regel 100-500 Kapitel 2.26, die einstellbare Leerlaufspannung unter Berücksichtigung von Einsatzbedingungen und Spannungsart die in der Tabelle angegebenen Höchstwerte nicht überschreiten.

Einsatzbedingungen		Spannungsart		Höchstwerte in [V]	
				Scheitelwert	Effektivwert
a	Erhöhte elektrische Gefährdung *)	DC	Gleich	113	
		AC	Wechsel	68	48
b	Ohne erhöhte elektrische Gefährdung	DC	Gleich	113	
		AC	Wechsel	113	80
c	Begrenzter Betrieb erhöhte elektrische Gefährdung	DC	Gleich	113	
		AC	Wechsel	78	55
d	Lichtbogenbrenner maschinell geführt	AC	Gleich	141	
		DC	Wechsel	141	100
e	Plasmaschneiden *)	DC	Gleich	500	
		AC	Wechsel		
f	Unter Wasser mit Personen im Wasser	DC	Gleich	65	
		AC	Wechsel	unzulässig	unzulässig

*)

S

Stand vom 04.2011

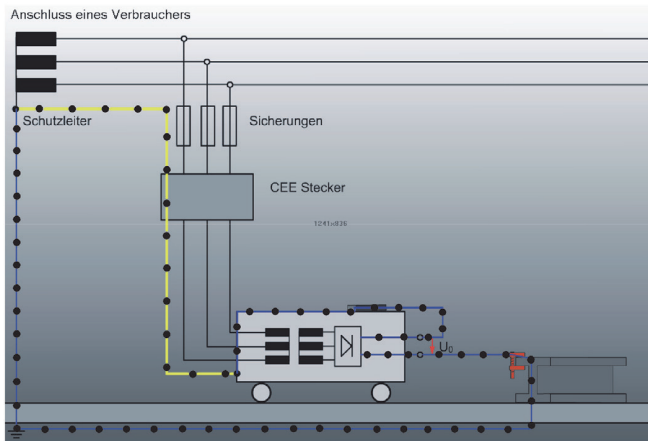
Tabelle 3: Zulässige Leerlaufspannung für Lichtbogenschweißstromquellen

Liegt die Schweißaufgabe im Bereich erhöhter elektrischer Gefährdung (leitfähige Umgebung, begrenzte Raumgröße, arbeitsbedingte Zwangshaltung, hohe Umgebungstemperatur oder Luftfeuchtigkeit) dürfen nur Stromquellen eingesetzt werden, deren Leerlaufspannungswert 113 V Gleichspannung, bzw. 48 V Effektivwert Wechselspannung nicht überschreiten. Diese Grenzwerte müssen auch im Fehlerfall eingehalten werden. Stromquellen, die diese Bedingungen erfüllen, erhalten als Kennung folgendes Zeichen:

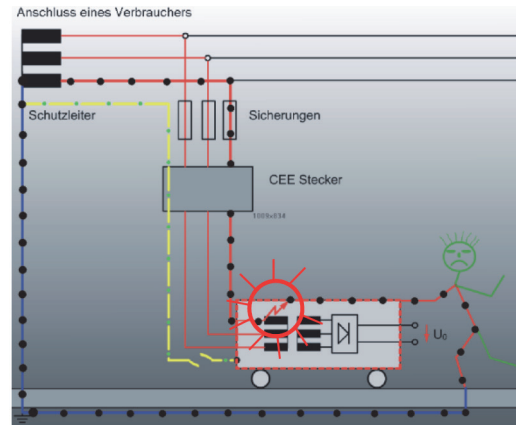
S

Laut BGR 500 dürfen die Höchstwerte der Leerlaufspannung von Schweißstromquellen überschritten werden, wenn sie mit selbsttätig wirkenden und sich selbst überwachenden „Leerlaufspannungsminde-rungs-einrichtungen“ ausgerüstet sind. Sie werden auch als Gefahrenminderungseinrichtung bezeichnet, weil beim AC-Schweißen immer eine Gleichspannung als Leerlaufspannung ansteht (siehe auch Tabelle 3). Der AC-Prozess beginnt erst mit dem Beginn des Schweißstromes und schaltet sofort wieder um (DC), wenn der Stromfluss unterbrochen wird.

Die Funktion der Gefahrenminderungseinrichtung muss ohne Anwendung von Werkzeug überprüfbar sein. Empfohlen wird eine vierteljährliche Prüfung der Schutzmaßnahmen gegen gefährliche Körperströme. Diese relativ kurzen Überwachungszeiträume sind angebracht, z.B. kann es durch Unachtsamkeit beim Umgang mit dem Elektrodenhalter zum Stromfluss über den Schutzleiter der Quelle und damit zu dessen Abbrennen kommen. Im Fehlerfall ist die Schutzart Schutzerdung nicht mehr wirksam und der Schweißer im höchsten Maße gefährdet.



Bei eingeschalteter Quelle liegt der Elektrodenhalter auf dem Gehäuse.



Durch den hohen Stromfluss, es können Ströme über 50 A auftreten, brennt der Schutzleiter durch.

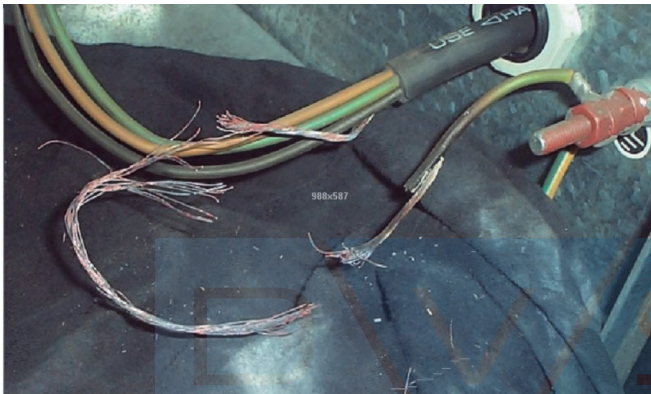
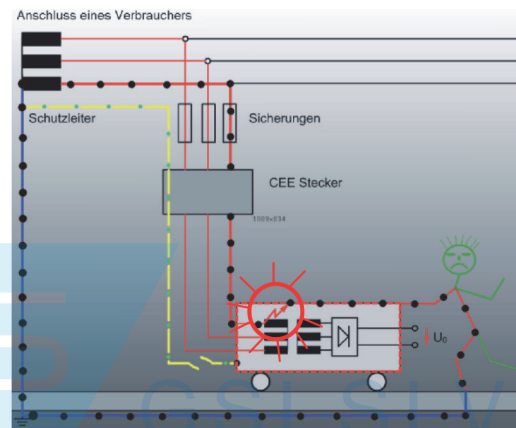


Foto abgebrannter Schutzleiter.



Im Falle eines Gehäuseschlusses kann es zu einer Körperdurchströmung kommen.

Abbildung 35: Zerstörung des Schutzleiters durch „vagabundierende“ Ströme (Potenzialverschleppung)

9 Netzanschluss der Quelle

Leistungsfaktor $\cos \phi$

		X	35%	60%	100%
U_0 V	60	I_2	250 A	200 A	150 A
		U_2	30 V	28 V	26 V
$\cos. \phi$ 0,68 (150 A) $\cos. \phi$ 0,82 (250 A)					
U_1 V	220	T 35 A	43	35,5	27
	380	T 20 A	25	20,5	15,5
50 Hz		S_1	16,3 kVA	13,5 kVA	10,3 kVA

Abbildung 36: Leistungsschild Leistungsfaktor $\cos \phi$

Der Leistungsfaktor $\cos \phi$ gibt an, wie viel Prozent der aufgenommenen Scheinleistung (S_1 in kVA) in Wirkleistung (P in kW) umgesetzt wird. Typische Werte für den $\cos \phi$:

Schweißtransformatoren: 0,40 - 0,80

Schweißgleichrichtern: 0,80 - 0,95

Transistorisierten Schweißstromquellen: 0,90 - 0,99

Praktisch betrachtet bedeutet das, dass ein Schweißtransformator, der an einem 32-A-Netzanschluss betrieben wird, durch einen Inverter gleicher Schweißleistung ersetzt werden kann, der nur einen 16-A-Anschluss benötigt. Der Inverter hat gleichzeitig einen höheren elektrischen Wirkungsgrad und besitzt eine geringere Masse.

Anschluss und Absicherung der Schweißstromquelle

			$\cos. \phi$ 0,68 (150 A)	$\cos. \phi$ 0,82 (250 A)
U_1 V	220	I_1 A	43	35,5
	380	I_1 A	25	20,5
50 Hz		I_1 A		15,5
		S_1	16,3 kVA	13,5 kVA
				10,3 kVA

Abbildung 37: Anschluss und Absicherung der Schweißstromquelle

Dem Feld mit dem Stecker-Symbol kann entnommen werden, ob die Schweißstromquelle an Wechselstrom, 2-Leiter-Netzanschluss (L1, N; L1 oder L2), das entspricht dem 1-Phasenbetrieb, oder an Drehstrom, 3-Leiter-Netzanschluss (L1, L2, L3, (N)) betrieben wird. Die Schweißstromquelle muss vom Betriebselektriker mit dem vorgeschriebenen Netzstecker an das Leitungsnetz angeschlossen werden.

10 Kühlart

Die Kennbuchstaben AF (früher nur F) bedeuten, dass bei der höchsten zulässigen Leistungsentnahme aus der Quelle die Komponenten wie Transformator und elektrische Leistungssteller (Dioden, Transistoren) auf Fremdkühlung mittels Ventilatoren angewiesen sind. Abhängig von den Umgebungsbedingungen des Einsatzortes der Quelle muss der Innenraum (Lüftungskanäle) regelmäßig gereinigt werden.

Alternative keine Zwangslüftung:

Kühlart S bedeutet Selbstkühlung, der Lüfter entfällt!

Kühlart S



11 Schutzart



Abbildung 38: Schutzart

Die Kennziffern für die Schutzart sagen aus, in welcher Form das Gehäuse der Quelle einen **Berührungsschutz** gegenüber unter Spannung stehender bzw. sich gefährlich bewegender Teilen bietet. Auch der Schutz der Quelle gegenüber dem **Eindringen von Flüssigkeiten** in das Innere des Gerätes wird über die Kennziffer angegeben.

Dabei entspricht die an erster Stelle stehende Ziffer der Schutzart des Berührungs- und Fremdkörperschutzes und die an zweiter Stelle dem Grad gegen schädliches Eindringen von Wasser.

Nach der DIN EN 60974-1 müssen Stromquellen in **geschlossenen Räumen** mindestens einen Schutzgrad von **IP 21** haben.

Für den Betrieb einer Stromquelle für das Lichtbogenschweißen **im Freien** muss mindestens ein Schutzgrad von **IP 23** gegeben sein.

Die erste Kennziffer 2X bedeutet: "den Schutz gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser größer als 12 mm, das Verhindern des Eindringens von Fingern oder ähnlichen Gegenständen".

Die zweite Kennziffer X1: "den Schutz gegen das Eindringen tropfenden Wassers (Tropfwasser), das senkrecht fällt. Es darf keine schädliche Wirkung haben." Die zweite Kennziffer X3: "den Schutz gegen das Eindringen von Wasser, das in einem beliebigen Winkel bis 60° zur Senkrechten (Sprühwasser) fällt. Es darf keine schädliche Wirkung haben".

Zum Beispiel kann eine Verminderung der Spannungsfestigkeit aufgrund der Bildung eines leitfähigen Wasserfilms entstehen! → Zerstörung der Stromquelle durch einen Spannungsüberschlag.

12 Prüfung von Schweißstromquellen

- Die BGR 500 schreibt regelmäßige Prüfungen der Schweißstromquellen für das Lichtbogenschweißen vor. Die wichtigsten elektrischen Prüfungen sind: Schutzleiterprüfung
- Isolationsprüfung
- Ableitstrom
- Überprüfung der Funktion der Gefahrenminderungseinrichtung

Insbesondere in einer Umgebung mit einer erhöhten Verschmutzung durch Staub oder Ähnliches ist in regelmäßigen Abständen ein Ausblasen der Schmutzablagerungen erforderlich.

Die konkreten Regelungen hierfür beschreibt DIN EN 60974-4.



13 Literatur

1. Rosenfeld, W. und Baum, L.: „Neue WIG- und MSG-Schweißstromquellen“, Basisinfo, 38. 38. Sonder-
tagung „Schweißen im Behälter- und Anlagenbau“ 02. - 05. März 2010 in München.
2. DIN EN 60974-4:2011 (VDE 0544-4) **Lichtbogenschweißeinrichtungen** Teil 4: Wiederkehrende
Inspektion und Prüfung



14 Testfragen

1. Was versteht man unter einer Schweißstromquelle für das Lichtbogenschweißen?

- ☐ die elektrische Energiequelle für den Lichtbogen.
- ☐ Die Schweißstromquellen sind nur für das Gleichstromschweißen geeignet.
- ☐ ein für die Schweißtechnik spezifisch hergestelltes Gerät für die Steuerung und Regelung des Schweißprozesses
- ☐ die „Blackbox“ als Bindeglied zwischen elektrischem Versorgungsnetz und Lichtbogen
- ☐ Die Stromquelle ist immer ein Umformer.

2. Welche Funktionen hat eine Stromquelle zu erfüllen?

- ☐ die galvanische Trennung von Netzspannungseingang und Schweißspannungsausgang
- ☐ die Begrenzung der Leerlaufspannung
- ☐ Der Lüfter dient der Verbesserung der Raumluft.
- ☐ den Schweißstrom und die -spannung entsprechend den Prozessbedingungen zu steuern und zu regeln
- ☐ Netzstörungen in den Schweißprozess zu übertragen.

3. Welche Stellprinzipien für Strom und Spannung werden für elektronische Schweißstromquellen verwendet?

- ☐ der Transformator mit Streukern,
- ☐ der Inverter als primär getaktete Transistorstromquelle mit einer Pulsweitenregelung,
- ☐ der Schweißgleichrichter mit Stufenschalter,
- ☐ der Schweißgleichrichter mit Thyristoren mit Phasenanschnittsteuerung,
- ☐ der Umformer mit einer Bürstenverstellung.

4. Der Inhalt eines Leistungsschildes ist nach DIN EN IEC 60974-1 festgelegt. Welche Aussagen zum Leistungsschild sind richtig?

- ☐ Auf ihm sind die technischen Daten in Kurzform aufgeführt.
- ☐ Es beinhaltet nur die Schweißleistung in Watt.
- ☐ Die Schweißverfahren werden durch symbolische Zeichen gekennzeichnet.
- ☐ Die Angabe der Höhe der Leerlaufspannung ist nur bei Wechselstrommaschinen vorgesehen.
- ☐ Hersteller- oder Händlerangaben dürfen auf dem Leistungsschild NICHT aufgeführt werden.

5. Welche Arten von Kennlinien fallen unter den Begriff "Schweißstromkennlinie"?

- ☐ die statische Strom-Spannungs-Kennlinie (flach, fallend) der Schweißstromquelle,
- ☐ Es ist ein Begriff für ein Schweißverfahren,
- ☐ Zuordnung der Netzspannung zum Schweißstrom,
- ☐ die dynamische Erfassung des Verlaufes von Schweißstrom und Schweißspannung.
- ☐ Die Synergie-Kennlinie gibt das Regelverhalten der Stromquelle im Störfall an.

6. Welche Aussage ist richtig?

- ☐ Die Konstantspannungs-Kennlinie wird zum MSG-Schweißen verwendet.
- ☐ Die Konstantspannungs-Kennlinie wird zum E-Schweißen verwendet.
- ☐ Die Konstantspannungs-Kennlinie wird zum Plasma-Schweißen verwendet.
- ☐ Die fallende Kennlinie wird zum MSG-Schweißen verwendet.
- ☐ Die fallende Kennlinie wird zum WIG-Schweißen verwendet.

7. Das Impulsschweißen

- ☐ stellt hohe Anforderungen an Schweißstromquellen bezüglich schneller Strom- und Spannungsregelung.
- ☐ funktioniert auch ohne Prozessgas,
- ☐ funktioniert mit argonreichen Prozessgasen
- ☐ kann nur mit primär getakteten Stromquellen durchgeführt werden.
- ☐ ist eine spezielle Form des MSG-Schweißens.

8. Welche Regelung wird in der Schweißtechnik angewendet?

- ☐ Die ΔI -Regelung für das MSG-Schweißen
- ☐ Die ΔI -Regelung für das UP-Schweißen
- ☐ Die ΔI -Regelung für das E-Schweißen
- ☐ Die ΔU -Regelung für das MSG-Schweißen
- ☐ Die ΔU -Regelung für das E-Schweißen

9. Was versteht man unter den folgenden Begriffen?

- ☐ [S]-Kennzeichnung → die Stromquelle hat eine Leerlaufspannung von ≤ 113 V DC für Gleichspannung und einen Effektivwert von ≤ 48 V AC bei Wechselspannung,
- ☐ [S]-Kennzeichnung → ist das Zeichen für Selbstkühlung.
- ☐ [S]-Kennzeichnung → ist das Zeichen für eine Gefahrenminderungseinrichtung, z.B. die Umschaltung von DC-Betrieb im Leerlauf in den AC-Betrieb im Schweißbetrieb und umgekehrt.
- ☐ Potentialverschleppung → ist ein messtechnisches Problem.
- ☐ Potentialverschleppung → tritt immer dann auf, wenn der von der Klemmenspannung der Stromquelle getriebene Strom sowohl über die Masserückleitung als auch über den Schutzleiter (PE-Leiter) fließt. Hierbei kann der PE Leiter zerstört werden.

10. Welche Aussage ist falsch?

- ☐ Die ED ist ein Begriff für den Lüfterbetrieb.
- ☐ ED ist die Einschaltdauer und entspricht der Schweißzeit bezogen auf 10 min Spieldauer, der Rechenwert wird in Prozent angegeben.
- ☐ Der Schutzgrad IP23 ist nur für den Betrieb der Schweißstromquelle in geschlossenen Räumen geeignet.
- ☐ Kühlart AF ist die Bezeichnung für Kühlung ohne Lüfter.
- ☐ Kühlart S ist die Bezeichnung für ein Gerät ohne Lüfter (Selbstkühlung).

11. Welche Aussagen zur Leerlaufspannung einer Schweißstromquelle sind richtig?

- ☐ Die Leerlaufspannung wird auch als Netzeingangsspannung bezeichnet.
- ☐ Die Leerlaufspannung muss auf dem Leistungsschild angegeben werden.
- ☐ Die Höhe der Leerlaufspannung beschränkt den Einsatz der Schweißstromquelle.
- ☐ Die Höhe der Leerlaufspannung ist ohne Bedeutung für den praktischen Einsatz der Schweißstromquelle.
- ☐ Nur für das WIG-Verfahren ist die Leerlaufspannung wichtig.



Inhalt

1	Einteilung der Schutzgasschweißprozesse	1
1.1	Metall-Schutzgasschweißen (MSG).....	1
1.2	Wolfram-Schutzgasschweißen (WSG)	2
1.3	Plasma-Metall-Schutzgasschweißen (MSGP)	3
1.4	Wolfram-Plasmaschweißen (WP)	3
2	Schutzgase	4
2.1	Anforderungen an Schutzgase	4
2.2	Eigenschaften der Schutzgase	5
2.3	Wärmeleitfähigkeit von Schutzgasen und Zumischkomponenten	6
2.4	Einteilung und Bezeichnung der Schutz-, bzw. Prozessgase nach DIN EN ISO 14175.....	7
3	Beispiele für die Einteilung und Bezeichnung der Schutzgase nach DIN EN ISO 14175	9
3.1	Beispiele für die Einteilung.....	9
3.2	Beispiele für die Bezeichnung.....	9
4	Auswahl von Schutzgasen	11
4.1	Aktive Schutzgase zum MAG-Schweißen von Stählen	11
4.1.1	Argon/CO ₂ -Gemische	11
4.1.2	Argon/Sauerstoff-Gemische.....	11
4.1.3	Argon/Kohlendioxid/Sauerstoff-Gemische	11
4.1.4	Kohlendioxid (CO ₂)	11
4.2	Inerte Schutzgase zum WIG-Schweißen	12
4.2.1	Argon	12
4.2.2	Helium, Argon/Helium-Gemische.....	12
4.2.3	Argon/Wasserstoff-Gemische	12
4.2.4	Hochreines Argon (mindestens 4.8)	12
4.3	Inerte Schutzgase zum MIG-Schweißen	12
4.3.1	Argon	13
4.3.2	Helium.....	13
4.3.3	Argon/Helium-Gemische	13
5	Schutzgase und Gasgemische in Abhängigkeit vom Schweißprozess und Werkstoff	14
6	Schutzgasmenge und Schutzgasmengeneinstellung	15
6.1	Schutzgasmengeneinstellung	15
6.1.1	Durchflussmengeneinstellung mit Staudüse.....	15
6.1.2	Gasmengeneinstellung mit Schwebekörper	15
7	Transport und Lagerung der Schutzgase.....	16
7.1	Speicherung der Gase in Gasflaschen	16
7.2	Verflüssigte Gase (z.B. O ₂ , Ar, N ₂ und CO ₂)	16
8	Umgang mit Druckgasflaschen	17
9	Farbkennzeichnung von Gasflaschen	17
10	Gefahrgutaufkleber	18
11	Testfragen	19

1 Einteilung der Schutzgasschweißprozesse

Die Bezeichnung Schutzgasschweißen ist ein Sammelbegriff für alle Lichtbogenschweißprozesse, bei denen mit schützenden Gasen die Schweißstelle vor den schädigenden Einflüssen der Luft geschützt wird. Eine Unterteilung der verschiedenen Schutzgasschweißprozesse in zwei Hauptgruppen wird nach dem Abschmelzverhalten der Elektrode vorgenommen, von der aus der Lichtbogen zum Werkstück brennt.

- Metallschutzgasschweißen (Kurzzeichen: MSG), abschmelzende Metalledrahtelektrode
 - Wolframschutzgasschweißen (Kurzzeichen: WSG), nicht abschmelzende Wolframelektrode
- Eine genaue Einteilung zeigt Abbildung 1.

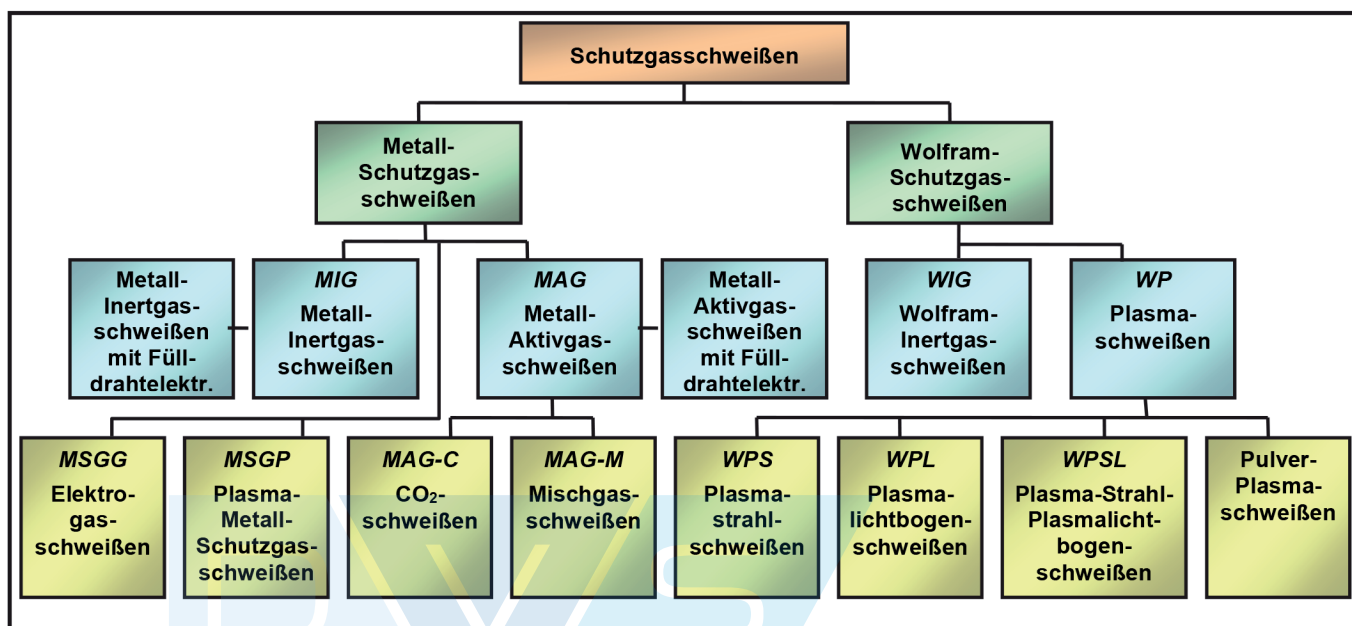


Abbildung 1: Einteilung der Schutzgasschweißprozesse

1.1 Metall-Schutzgasschweißen (MSG)

Beim Metall-Schutzgasschweißen wird in die Prozesse Metall-Aktivgasschweißen (MAG) und Metall-Inertgasschweißen (MIG) mit den nachfolgenden Prozessvarianten unterschieden.

Prozessnummern nach DIN EN ISO 4063 (Auswahl)

Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode:	135
Metall-Aktivgasschweißen mit schweißpulvergefüllter Fülldrahtelektrode:	136
Metall-Aktivgasschweißen mit metallpulvergefüllter Fülldrahtelektrode:	138
Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode:	131

Die Wärmequelle zum Schweißen ist ein Lichtbogen, der zwischen dem kontinuierlich zugeführten Zusatzwerkstoff und dem Grundwerkstoff brennt. Um das Schmelzbad vor den schädigenden Einflüssen der Umgebungsluft zu schützen, wird ein Schutzgas benötigt. Beim **MIG-Schweißen** von Nichteisenmetallen werden dazu Argon, Helium oder Gemische aus beiden verwendet. Beim **MAG-Schweißen** werden aus metallurgischen oder technologischen Gründen aktive Schutzgase verwendet. Beim Schweißen von unlegierten, niedrig legierten und hoch legierten Stählen verwendet man aktive Schutzgase; CO₂, (MAG-C), Argon-CO₂-Gemische, Argon-Sauerstoff-Gemische und Mehrkomponenten-Gase (MAG-M).

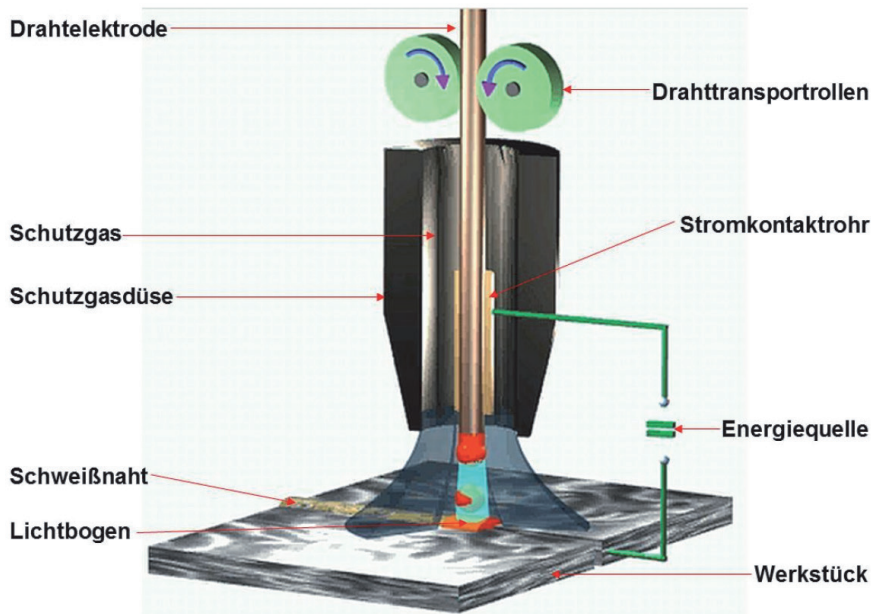


Abbildung 2: Prinzip Metall-Schutzgasschweißen

1.2 Wolfram-Schutzgasschweißen (WSG)

Die Wärmequelle zum Schweißen ist ein Lichtbogen, der zwischen einer nicht abschmelzenden Wolframelektrode und dem Werkstück brennt. Der Zusatzwerkstoff wird beim manuellen Schweißen von Hand in den Lichtbogen geführt und dort abgeschmolzen. Die glühende Wolframelektrode, das Schmelzbad und die angrenzenden Werkstoffbereiche werden durch inertes Schutzgas vor Lufteinwirkung geschützt. Als Schutzgase werden Argon, Helium, oder Gemische aus beiden, für bestimmte Werkstoffe werden auch Argon-Wasserstoff-Gemische verwendet. Die thermische Belastbarkeit der Wolframelektrode ist begrenzt. Das beschränkt einerseits die Abschmelzleistung und die Schweißgeschwindigkeit, lässt andererseits aber ein präzises Modellieren der Schweißnaht zu, auch bei ungenauer Nahtvorbereitung.

Prozessnummern nach DIN EN ISO 4063 (Auswahl)

Wolfram-Inertgasschweißen mit Massivstabzusatz: 141

Wolfram-Inertgasschweißen ohne Schweißzusatz: 142

Wolfram-Inertgasschweißen mit Fülldraht oder Füllstabzusatz: 143

Wolfram-Inertgasschweißen mit reduzierenden Gasanteilen im ansonsten inerten Schutzgas: 145

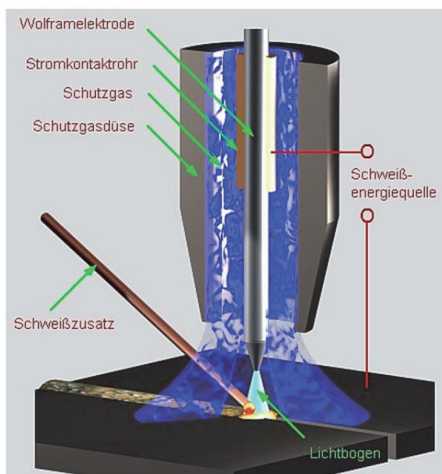


Abbildung 3: Prinzip des WSG-Schweißens

1.3 Plasma-Metall-Schutzgasschweißen (MSGP)

Dieses Verfahren ist eine Kombination aus Metallschutzgasschweißen und Plasmaschweißen. Am Nahtanfang kann der ringförmige Plasmalichtbogen den Grundwerkstoff aufschmelzen, bevor die Drahtelektrode abgeschmolzen wird. Als Stromquellen kommen zwei voneinander unabhängige Einheiten zum Einsatz, wobei die Plasmastromquelle mit steil fallender Kennlinie, die MSG-Schweißstromquelle mit steil fallender oder flach fallender Kennlinie arbeitet.

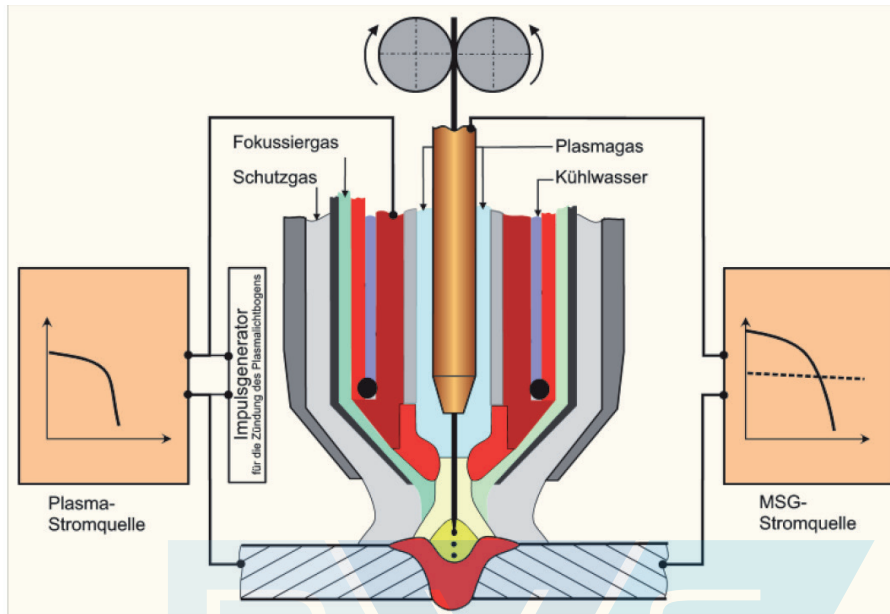


Abbildung 4: Plasma-Metall-Schutzgasschweißen

1.4 Wolfram-Plasmaschweißen (WP)

Der Lichtbogen brennt entweder zwischen einer Wolframelektrode und einer wassergekühlten Kupferdüse (WPS) oder dem Werkstück (WPL) in inerter Gasatmosphäre. Die Kupferdüse schnürt den Lichtbogen ein und erhöht die Leistungsdichte.

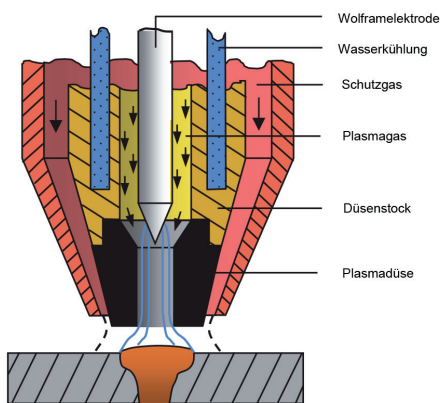


Abbildung 5: Wolfram-Plasma-Schweißen

2 Schutzgase

Beim Schutzgasschweißen ist eine Abschirmung der Schmelze vor den schädlichen Einflüssen der Luft nötig. Würde die Luft nicht verdrängt, käme es vor allem zu Stickstoff- und ggf. zu Sauerstoffeinschlüssen. Das Schweißgut würde verspröden. Das Schmelzbad, der abschmelzende Zusatzwerkstoff oder die nichtabschmelzende Wolframelektrode werden durch Schutzgase geschützt.

2.1 Anforderungen an Schutzgase

Aktive Schutzgase sind Gase, die im Lichtbogen chemische und physikalische Wechselwirkungen mit dem Zusatz- und dem Grundwerkstoff hervorrufen.

Inerte Schutzgase sind Gase, die keine chemische Reaktion beim Schweißen eingehen.

Die Schutzgase zum Schweißen und Schneiden unterscheiden sich:

1. im Reaktionsverhalten beim Schweißen (inert, oxidierend, reaktionsträge, reduzierend)
2. in der Dichte (schwerer/leichter als Luft)
3. in der Wärmeleitfähigkeit und dem Wärmeinhalt
4. in der Ionisationsenergie bzw. der Dissoziationsenergie und damit in der Lichtbogenleistung, bezogen auf eine bestimmte Lichtbogenlänge (Lichtbogenkennlinie)
5. in der Siedetemperatur



2.2 Eigenschaften der Schutzgase

Welche Gase oder Gasgemische als Schutzgase geeignet sind, hängt hauptsächlich vom Werkstoff ab. Da viele Werkstoffgruppen mit mehreren Schutzgasen geschweißt werden können, müssen bei der Auswahl des Schutzgases viele Zusammenhänge berücksichtigt werden. Schutzgase sind in DIN EN ISO 14175 genormt. In der Norm sind die in der Praxis häufig zur Anwendung kommenden Schutzgase nach ihrem chemischen Verhalten und nach ihrer Zusammensetzung eingeteilt.

Tabelle 1: Eigenschaften der Gase nach DIN EN ISO 14175

Gasart	Chem. Zeichen	Spezifische Eigenschaften bei 0°C und 1,013 bar (0,101 MPa)			Reaktionsverhalten beim Schweißen
		Dichte (Luft = 1,293) [kg/m³]	Relative Dichte zu Luft	Siedetemperatur [°C]	
Argon	Ar	1,784	1,380	- 185,9	inert
Helium	He	0,178	0,138	- 268,9	inert
Kohlendioxid	CO ₂	1,977	1,529	- 75,5 ¹⁾	oxidierend
Sauerstoff	O ₂	1,429	1,105	- 183,0	oxidierend
Stickstoff	N ₂	1,251	0,968	- 195,8	reaktionsträge ²⁾
Wasserstoff	H ₂	0,090	0,070	- 252,8	reduzierend

¹⁾ Sublimationstemperatur
²⁾ Das Verhalten von Stickstoff verändert sich bei verschiedenen Materialien und die Auswirkung kann negativ sein.

Der erhebliche Unterschied in der Dichte zwischen Argon und Helium hat Auswirkungen auf die benötigte Schutzgasmenge. Wird Helium oder ein hoch-heliumhaltiges Schutzgas verwendet, muss – bei Verwendung eines auf Argon ausgelegten Manometers – die Schutzgasmenge ca. 2-3-mal vergrößert werden. Auf Grund der unterschiedlichen Dichten von Argon und Helium sind bei der Einstellung von Gasdurchflussmengenmessern, die für Argon kalibriert sind, Korrekturfaktoren zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Dichte und Korrekturfaktoren in Abhängigkeit vom Heliumanteil im Argon

Gas bzw. Gasgemisch	Dichte bei 15°C, 1 bar [kg/m³]	Korrekturfaktor abgelesene Menge multipliziert mit
100% Ar	1,78	1,00
75% Ar + 25% He	1,29	1,14
50% Ar + 50% He	0,92	1,35
25% Ar + 75% He	0,54	1,75
100% He	0,17	3,16

Beispiel: Helium-/Argon-Gemisch

Gas	abgelesene Menge	Korrekturfaktor	tatsächl. Gasmenge
25% Ar + 75% He	12 l/min	1,75	21 l/min

2.3 Wärmeleitfähigkeit von Schutzgasen und Zumischkomponenten

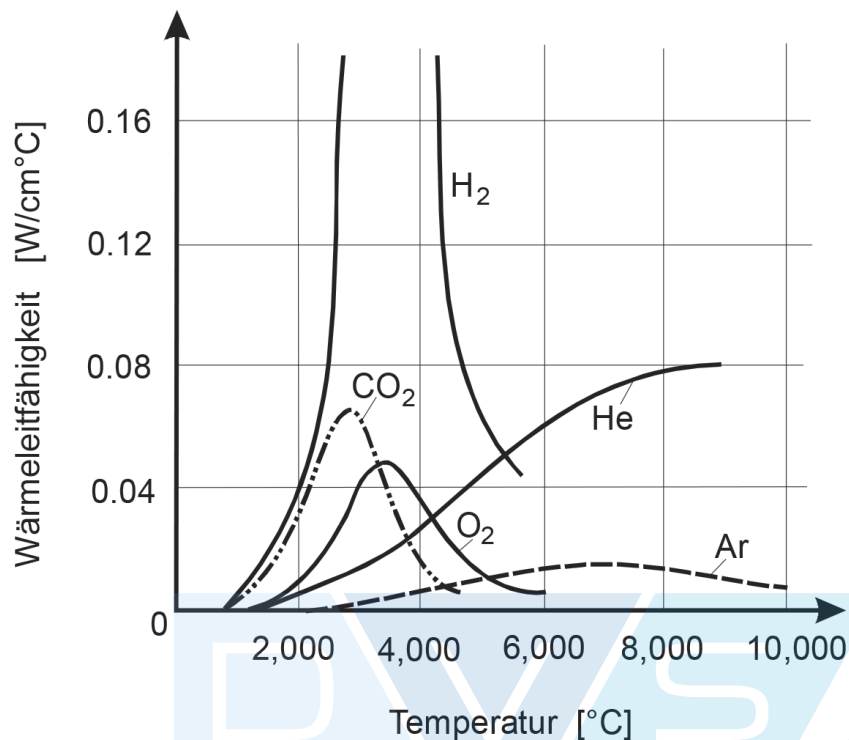


Abbildung 6: Wärmeleitfähigkeit von Schutzgaskomponenten (nach Linde)

Die Wärmeleitfähigkeit des Schutzgases beeinflusst Nahtformung, Schweißbadtemperatur, Schweißbadentgasung und Schweißgeschwindigkeit. So lassen sich Schweißgeschwindigkeit und Einbrandverhalten beim MIG- und WIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen durch Helium-Zugabe oder beim WIG-Schweißen austenitischer CrNi-Stähle durch Wasserstoffzugabe beachtlich steigern.

Chemische Eigenschaften beeinflussen das metallurgische Verhalten und die Nahtoberfläche. So führen Sauerstoff und Kohlendioxid beispielsweise zum Abbrand von Legierungselementen und zu dünnflüssigen Schmelzbädern; beide Gase wirken oxidierend. Wasserstoff ist ein reduzierendes Gas; Argon und Helium reagieren nicht mit Metallen – sie sind inert.

2.4 Einteilung und Bezeichnung der Schutz-, bzw. Prozessgase nach DIN EN ISO 14175

Gase und Mischgase sind nach der Norm (DIN EN ISO 14175), gefolgt von dem Symbol für das Gas nach Tabelle 3 einzuteilen.

Anmerkung: Die Einteilung basiert auf dem Reaktionsverhalten des Gases oder des Mischgases.

Hauptgruppe

Die für die Hauptgruppe verwendeten Buchstaben und Zahlen lauten:

I: Inerte Gase und inerte Mischgase;

M1, M2 und M3: Oxidierende Mischgase mit Sauerstoff und/oder Kohlendioxid;

C: Stark oxidierende Gase und stark oxidierende Mischgase;

R: Reduzierende Mischgase;

N: Reaktionsträges Gas oder reaktionsträges Mischgas mit Stickstoff;

O: Sauerstoff;

Z: Mischgase mit Komponenten, die in Tabelle 3 nicht enthalten sind oder Mischgase, deren Zusammensetzung außerhalb der in Tabelle 3 aufgeführten Bereiche liegt.



Untergruppe

Die Hauptgruppen – außer Z – sind in Untergruppen aufgeteilt, entsprechend dem Vorhandensein und dem Gehalt verschiedener Komponenten, die das Reaktionsverhalten beeinflussen (siehe Tabelle 3). Die angegebenen Werte sind Nennwerte.

Tabelle 3: Einteilung der Prozessgase zum Verbindungsschweißen und für verwandte Prozesse

Symbol		Komponenten in Volumen-Prozent (nominell)					
Hauptgruppe	Untergruppe	oxidierend		inert		reduzierend	reaktionsträge
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂
I	1			100			
	2				100		
	3			Rest	0,5 ≤ He ≤ 95		
M1	1	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5		Rest ^a		0,5 ≤ H ₂ ≤ 5	
	2	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5		Rest ^a			
	3		0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	Rest ^a			
	4	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	Rest ^a			
M2	0	5 < CO ₂ ≤ 15		Rest ^a			
	1	15 < CO ₂ ≤ 25		Rest ^a			
	2		3 < O ₂ ≤ 10	Rest ^a			
	3	0,5 ≤ CO ₂ ≤ 5	3 < O ₂ ≤ 10	Rest ^a			
	4	5 < CO ₂ ≤ 15	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	Rest ^a			
	5	5 < CO ₂ ≤ 15	3 < O ₂ ≤ 10	Rest ^a			
	6	15 < CO ₂ ≤ 25	0,5 ≤ O ₂ ≤ 3	Rest ^a			
	7	15 < CO ₂ ≤ 25	3 < O ₂ ≤ 10	Rest ^a			
M3	1	25 < CO ₂ ≤ 50		Rest ^a			
	2		10 < O ₂ ≤ 15	Rest ^a			
	3	25 < CO ₂ ≤ 50	2 < O ₂ ≤ 10	Rest ^a			
	4	5 < CO ₂ ≤ 25	10 < O ₂ ≤ 15	Rest ^a			
	5	25 < CO ₂ ≤ 50	10 < O ₂ ≤ 15	Rest ^a			
C	1	100					
	2	Rest	0,5 ≤ O ₂ ≤ 30				
R	1			Rest ^a		0,5 ≤ H ₂ ≤ 15	
	2			Rest ^a		15 < H ₂ ≤ 50	
N	1						100
	2			Rest ^a			0,5 ≤ N ₂ ≤ 5
	3			Rest ^a			5 < N ₂ ≤ 50
	4			Rest ^a		0,5 ≤ H ₂ ≤ 10	0,5 ≤ N ₂ ≤ 5
	5					0,5 ≤ H ₂ ≤ 50	Rest
O	1		100				
Z	Mischgase mit Komponenten, die nicht in der Tabelle aufgeführt sind oder Mischgase mit einer Zusammensetzung außerhalb der angegebenen Bereiche. ^b						
^a		Für diese Einteilung darf Argon teilweise oder vollständig durch Helium ersetzt werden.					
^b		Zwei Mischgase mit derselben Z-Einteilung dürfen nicht gegeneinander ausgetauscht werden.					

3 Beispiele für die Einteilung und Bezeichnung der Schutzgase nach DIN EN ISO 14175

3.1 Beispiele für die Einteilung

Die Einteilung erfolgt nach der Norm, gefolgt von dem Symbol für das Gas oder das Mischgas (Hauptgruppe und Untergruppe)

Beispiel 1: Mischgas mit 6% Kohlendioxid, 4% Sauerstoff und Rest Argon

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – M25

Beispiel 2: Mischgas mit 30% Helium und Rest Argon:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – I3

Beispiel 3: Mischgas mit 5% Wasserstoff und Rest Argon:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – R1

Beispiel 4: Mischgas mit 0,05% Sauerstoff und Rest Argon:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – Z

3.2 Beispiele für die Bezeichnung

Dem Symbol für das Basis-Gas müssen die Symbole für die anderen Komponenten in abnehmender Folge ihres Prozentgehaltes und danach die Werte für die Nenn-Zusammensetzung in Volumenprozent folgen, getrennt durch einen Schrägstrich.

Beispiel 1: Mischgas mit 6% Kohlendioxid, 4% Sauerstoff und Rest Argon

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – M25

Bezeichnung: DIN EN ISO 14175 – M25 – ArCO – 6/4

Beispiel 2: Mischgas mit 30% Helium und Rest Argon:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – I3

Bezeichnung: DIN EN ISO 14175 – I3 – ArHe – 30

Beispiel 3: Mischgas mit 5% Wasserstoff und Rest Argon:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – R1

Bezeichnung: DIN EN ISO 14175 – R1 – ArH – 5

Beispiel 4: Mischgas mit 7,5% Argon, 2,5% Kohlendioxid und Rest Helium:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – M12

Bezeichnung: DIN EN ISO 14175 – M12 – HeArC – 7,5/2,5

Für Mischgase mit Komponenten, die in Tabelle 3 aufgeführt sind, deren Gehalte aber außerhalb der angegebenen Bereiche liegen, muss der Buchstabe Z dem Symbol für das Basis-Gas vorangestellt werden. Danach folgen die Symbole für die Komponenten, wie oben angegeben, gefolgt von den Werten für die Nenn-Zusammensetzung in Volumen-Prozent, getrennt durch einen Schrägstrich.

Beispiel 5: Mischgas mit 0,05% Sauerstoff und Rest Argon:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – Z

Bezeichnung: DIN EN ISO 14175 – Z – ArO – 0,05

Für Mischgase mit Komponenten, die in Tabelle 3 nicht aufgeführt sind, muss der Buchstabe Z dem Symbol für das Basis-Gas vorangestellt werden. Danach folgen die Symbole für die Komponenten, wie oben angegeben, aber mit einem Plus-Zeichen vor der nicht aufgeführten Komponente, gefolgt von den Werten für die Nenn-Zusammensetzung in Volumen-Prozent, getrennt durch einen Schrägstrich.

Beispiel 6: Mischgas mit 0,05% Xenon, chemisches Zeichen Xe, Rest Argon:

Einteilung: DIN EN ISO 14175 – Z

Bezeichnung: DIN EN ISO 14175 – Z – Ar+Xe – 0,05



4 Auswahl von Schutzgasen

4.1 Aktive Schutzgase zum MAG-Schweißen von Stählen

Schutzgase, die mit der abschmelzenden Drahtelektrode und dem Schweißbad Verbindungen eingehen, werden als aktive Schutzgase bezeichnet (**MAG=Metall-Aktivgasschweißen**). Als aktives Schutzgas kommt CO_2 und als Komponenten in Mischgasen mit hohen Argonanteilen kommen O_2 und/oder CO_2 zur Anwendung. Das chemische Verhalten von sauerstoffabgebenden Schutzgasen wird „oxidierend“ genannt. Sie werden überwiegend für Stähle eingesetzt (Tabelle 5).

4.1.1 Argon/ CO_2 -Gemische

Für unlegierte und niedrig legierte Stähle kommen Ar/ CO_2 -Gemische mit CO_2 -Anteilen von 4 bis 25% zur Anwendung. (Häufig verwendetes Schutzgas: 82%Ar, 18% CO_2). Dieser Schutzgastyp ist für Masivdrahtelektroden und die meisten Fülldrahtelektroden gut geeignet. Im Vergleich mit reinem Argon wird bei steigendem CO_2 -Anteil das Einbrandprofil tiefer und breiter, die Porenhäufigkeit geringer und die Schlackenmenge größer. Beim Schweißen im Kurzlichtbogen eignen sich Ar/ CO_2 -Gemische gut für Dünnblechverbindungen und Spaltüberbrückungen.

Der Sprühlichtbogen ist nur mit einem begrenzten CO_2 -Anteil im Schutzgas möglich. Bei CO_2 -Anteilen über 20% sind auch bei hohen Stromstärken Kurzschlüsse beim Tropfenübergang vorhanden.

Der Tropfenübergang beim Impulslichtbogen wird mit zunehmendem CO_2 -Anteil schwieriger. Auch hier darf der CO_2 -Anteil nicht über 20% liegen.

Beim Schweißen von hoch legierten, austenitischen CrNi-Stählen darf der CO_2 -Anteil im Schutzgas nicht über 5% liegen, da es sonst an den Korngrenzen zu einer Chromverarmung und zur Entstehung von interkristalliner Korrosion kommen kann. Standard ist hier argonreiches Mischgas mit einem CO_2 -Anteil von 2,5%.

4.1.2 Argon/Sauerstoff-Gemische

Sauerstoffanteile von 1 bis 12% kommen beim Schweißen von Stählen zur Anwendung. Im Vergleich zu reinem Argon ergeben sich Nähte mit tieferem und breiterem Einbrand und ein stabilerer Lichtbogen. Mit zunehmendem Sauerstoffanteil nimmt die Oberflächenspannung der Schmelze ab. Dadurch bilden sich flache und glatte Nähte, insbesondere in waagerechter Schweißposition.

Für den Kurzlichtbogen sind Argon/Sauerstoff-Gemische gut geeignet. Sprüh- und Impulslichtbogen sind sehr stabil. Der Sprühlichtbogenbereich beginnt schon bei niedrigeren Stromstärken.

4.1.3 Argon/Kohlendioxid/Sauerstoff-Gemische

Gebräuchliche Zusammensetzungen sind Argon mit 3 bis 8% Sauerstoff und 5 bis 15% CO_2 . Diese Gemische sind für unlegierte und niedrig legierte Stähle geeignet. Im Kurzlichtbogen sind sie besonders für Dünnblechschweißungen und zur Spaltüberbrückung geeignet. Im Sprühlichtbogen ist der Tropfenübergang kleinvolumig und spritzerarm.

4.1.4 Kohlendioxid (CO_2)

100% CO_2 wird hauptsächlich für unlegierte Stähle verwendet. Das Einbrandprofil wird bei gleicher Stromstärke deutlich breiter als bei argonreichen Mischgasen. Die Tropfenablösung ist auch bei höheren Stromstärken nicht kurzschlussfrei. Dadurch kommt es zu verstärkter Spritzerbildung und grobschuppiger

geren Nähten. Ein impulsgesteuerter Tropfenübergang ist in reinem CO₂ nicht möglich.

4.2 Inerte Schutzgase zum WIG-Schweißen

Im Gegensatz zum MAG-Schweißen kommen beim WIG-Schweißen ausschließlich inerte Gase, die keine Reaktion mit anderen Stoffen eingehen, zur Anwendung. Oxidierende Komponenten, wie sie beim MAG-Schweißen verwendet werden, würden beim WIG-Schweißen selbst in geringen Mengen die Wolframelektrode zerstören (Tabelle 4).

4.2.1 Argon

Argon ist das am häufigsten verwendete Schutzgas für das WIG-Schweißen. Diese Tatsache resultiert aus folgenden Vorteilen:

- Inertes Gas, keine Reaktionen mit W-Elektroden und Schmelzbad
- Gute Schutzwirkung durch hohe Dichte
- Leichtes Zünden des Lichtbogens durch niedrige Ionisationsspannung
- Stabiler Lichtbogen auch bei Wechselstrom
- Günstiger Preis

4.2.2 Helium, Argon/Helium-Gemische

Durch die Verwendung von Helium oder Argon-Helium-Gemischen ergibt sich infolge höherer Lichtbogenspannung bei gleicher Stromstärke ein höherer Wärmeeintrag. Damit können einerseits bessere Einbrandverhältnisse und andererseits höhere Schweißgeschwindigkeiten erreicht werden. Nachteile sind das schlechtere Zündverhalten des Lichtbogens und die geringere Dichte.

4.2.3 Argon/Wasserstoff-Gemische

Auch durch den Einsatz von Argon-Wasserstoff-Gemischen kann bei bestimmten Werkstoffen der Wärmeeintrag ebenso verbessert werden. Zusätzlich wird die reduzierende Wirkung des Wasserstoffes ausgenutzt. Die Anwendung solcher Gasgemische ist jedoch auf austenitische CrNi-Stähle, Nickel und Nickelbasislegierungen beschränkt.

4.2.4 Hochreines Argon (mindestens 4.8)

Bei einigen Schweißaufgaben, z.B. beim Schweißen von Titan, ist neben hochreinem Argon (mind. 4.8) als Schutzgas auch für einen Nachlaufschutz, den sogenannten sekundären Gasschutz zu sorgen. Dieser soll die erstarrte Schweißnaht und die Wärmeeinflusszone so lange schützen, bis der Werkstoff soweit abgekühlt ist, dass keine Oxidation mehr auftreten kann.

4.3 Inerte Schutzgase zum MIG-Schweißen

Schutzgase, die mit dem flüssigen Schweißbad keine Verbindung eingehen, werden als inerte Schutzgase bezeichnet. Die Gase der Gruppen I1 bis I3 werden speziell für Werkstoffe wie Aluminium und Kupfer eingesetzt, die aus metallurgischen Gründen keine aktive Komponente vertragen.

4.3.1 Argon

Argon lässt sich gut ionisieren, die Wärmeleitfähigkeit ist jedoch gering.

Der Kurzlichtbogen ist möglich, ergibt aber bei gut wärmeleitfähigen Werkstoffen häufig Bindefehler. Sprüh- und Impulslichtbogen sind gut einstellbar. Die Impulstechnik bietet zusätzlich zur Spritzerreduzierung den Vorteil, dass auch mit dickeren Elektroden an dünnen Blechen gearbeitet werden kann. Argon kann für alle metallischen Werkstoffe eingesetzt werden, vorrangig jedoch bei NE-Metallen.

4.3.2 Helium

Helium besitzt eine hohe Wärmeleitfähigkeit. Dies wirkt sich günstig auf das Einbrandprofil aus. Bei Verwendung von Helium oder Mischgasen mit hohem Heliumanteil kann daher an dickeren, gut wärmeleitfähigen NE-Metallen das Vorwärmen oft entfallen. Die Porensicherheit ist gut.

Wegen des höheren Preises, des sehr unruhig brennenden Lichtbogens, der geringen Dichte und der daraus resultierenden höheren Schutzgasmenge (siehe Tabelle 2) kommt Helium allein als Schutzgas beim MIG-Schweißen eher selten zur Anwendung.

4.3.3 Argon/Helium-Gemische

Beim MIG-Schweißen von NE-Metallen, wie Aluminium und Kupfer, werden neben Argon auch häufig Argon/Helium-Gemische verwendet. Durch den Heliumanteil wird der Lichtbogen energiereicher. Man erreicht einen tieferen und breiteren Einbrand als bei Verwendung von Argon. Als weiterer Vorteil ist die bessere Porensicherheit zu nennen.

5 Schutzgase und Gasgemische in Abhängigkeit vom Schweißprozess und Werkstoff

Um die unterschiedlichen Eigenschaften und Auswirkungen der Schutzgase optimal nutzen zu können, ist es erforderlich, die Wahl des Schutzgases bzw. Gasgemisches in Abhängigkeit vom Schweißprozess und vom Werkstoff vorzunehmen.

Tabelle 4: Schutzgase beim WIG-Schweißen in Abhängigkeit vom Werkstoff (Auswahl)

Werkstoff	Schutzgas	Wurzelschutzgas
Unlegierte und niedrig legierte Stähle	Argon	N ₂ 90% + H ₂ 10%
Austenitische CrNi-Stähle	Argon Ar 98% + H ₂ 2% Ar 95% + H ₂ 5%	Argon N ₂ 90% + H ₂ 10% Ar 90% + H ₂ 10%
Hoch legierte rost-, säure- und hitzebeständige Stähle; hochwarmfeste und kaltzähe Stähle	Argon	Argon N ₂ 90% + H ₂ 10% Ar 90% + H ₂ 10%
Aluminium, Al-Legierungen, Kupfer und Cu-Legierungen, Nickel und Ni-Legierungen	Argon 100% Ar 75% + He 25% Ar 50% + He 50% Ar 25% + He 75% Helium	Argon
Gasempfindliche Werkstoffe wie Titan, Tantal u.a.	Argon mit Reinheitsgrad > 4.8	Argon mit Reinheitsgrad > 4.8
Duplex- und Super-Duplex-Stähle	ArgonAr + N ₂ ≤ 5%	Argon

Tabelle 5: Schutzgase beim MSG-Schweißen in Abhängigkeit vom Werkstoff (Auswahl)

Werkstoff	MIG	MAG	Wurzelschutzgas
Unlegierte und niedrig legierte Stähle		Ar 92% + O ₂ 8% Ar 82% + CO ₂ 18% Ar 90% + CO ₂ 5% + O ₂ 5% Ar 82% + CO ₂ 14% + O ₂ 4% CO ₂ 100%	
Hoch legierte, rost-, säure- und hitzebeständige Stähle; hochwarm-feste und kaltzähe Stähle		Ar 97% + O ₂ 3% Ar 98 % + CO ₂ 2% Ar 69% + He 30% + O ₂ 1%	Argon N ₂ 90% + H ₂ 10% Ar 90% + H ₂ 10%
Aluminium, Al-Legierungen, Kupfer und Cu-Legierungen	Argon 100% Ar 50% + He 50%		Argon
Nickel und Ni-Legierungen	Argon 100%		Argon
Gasempfindliche Werkstoffe wie Titan, Tantal u.a.	Argon mit Reinheitsgrad ≥ 4.8		Argon mit Reinheitsgrad ≥ 4.8

6 Schutzgasmenge und Schutzgasmengeneinstellung

Die Schutzgasmenge ist von folgenden Faktoren abhängig:

- Dem Schweißprozess und der Schmelzbadgröße
- Dem Drahtelektrodendurchmesser beim MSG-Schweißen
- Der Schutzgasart und der Schutzgaszusammensetzung
- Der Größe der Gasdüse

Als grober Richtwert kann beim MAG-Schweißen der Schutzgasbedarf mit der Formel
Drahtelektrodendurchmesser mal 10 – 12 berechnet werden.

Beispiel: Drahtelektrodendurchmesser = 1,2 mm; Schutzgasbedarf = 14 l/min.

Beim WIG-Schweißen kann bei Verwendung von Argon als Schutzgas der Gasdüseninnendurchmesser als Berechnungsgrundlage verwendet werden. Das heißt, bei einem Gasdüseninnendurchmesser von 8 mm werden 8 l/min. eingestellt.

6.1 Schutzgasmengeneinstellung

Zur Verringerung des Flaschendruckes, der in Flaschen bis zu 300 bar betragen kann, ist ein Druckminderer erforderlich, der das Gas auf den gewünschten Druck reduziert und anschließend eine zur jeweiligen Schweißaufgabe passende Mengeneinstellung ermöglicht.

6.1.1 Durchflussmengeneinstellung mit Staudüse

In der Schutzgaszuführung ist eine kalibrierte Staudüse mit kleinem definiertem Strömungsquerschnitt eingebaut. Damit wird die Durchflussmenge abhängig vom Gasdruck. Mit der Druckeinstellschraube am Druckminderer wird der erforderliche Gasdruck eingestellt, das Gasmengenmanometer zeigt die strömende Gasmenge an.

6.1.2 Gasmengeneinstellung mit Schwebekörper

Der Druck wird konstant eingestellt. Durch Verstellen des Regulierventils werden der Strömungsquerschnitt und damit der Gasdurchfluss verändert. Das strömende Schutzgas hebt im kegelförmigen Messrohr einen Schwebekörper entsprechend der Durchflussmenge an. Die Gasmenge wird an der Oberkante der Kugel abgelesen.

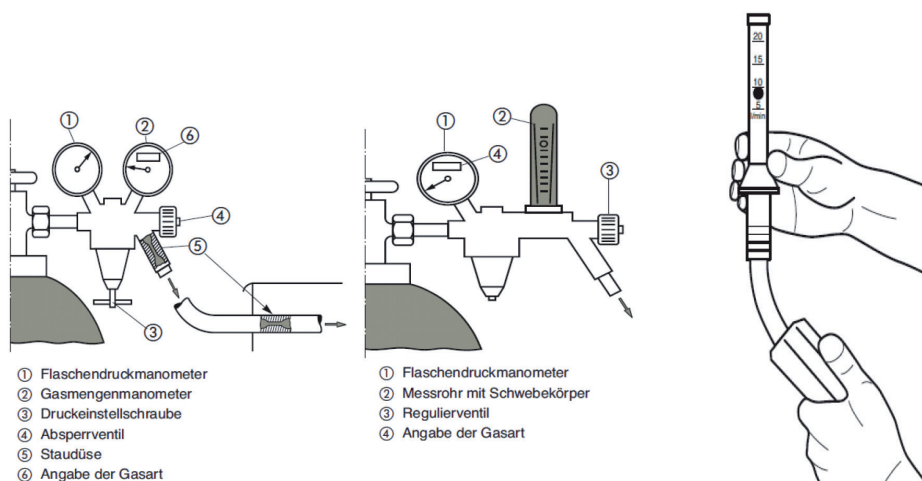


Abbildung 7: Gasmengeneinstellung und Gasmengenanzeige

7 Transport und Lagerung der Schutzgase

7.1 Speicherung der Gase in Gasflaschen

Sauerstoff, Argon, Stickstoff und Wasserstoff sind Gase, die sich bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck im gasförmigen Zustand befinden und hauptsächlich in Stahlflaschen geliefert werden. Der höchstzulässige Überdruck beträgt je nach Flaschentyp 200 oder 300 bar.

CO₂ geht bei ca. 54 bar Überdruck und einer Temperatur von +15°C in den flüssigen Zustand über. In einer mit verflüssigtem Gas gefüllten Flasche ist das Gas bis auf ein geringes Gaspolster vollständig verflüssigt.

In Tabelle 6 sind für verschiedene Schutzgase die Inhalte von Gas in Abhängigkeit der Flaschengröße und des Flaschendrucks angegeben.

Tabelle 6: Speicherung der Gase

Argon, Helium, Mischgase: gasförmig			
Flascheninhalt in l	10	20	50/50
Fülldruck in bar	200	200	200/300
Gasinhalt in m ³	2	4	10/15
Kohlendioxid: flüssig			
Flascheninhalt in kg	10	20	30
Flascheninhalt in l	13	26	40
Gasinhalt in m ³	5	11	16

Bei größeren Entnahmemengen kann das Flaschenventil vereisen. Bei verflüssigten Gasen z.B. CO₂ wird daher eine Vorwärmeinrichtung vor dem Druckminderer empfohlen.

7.2 Verflüssigte Gase (z.B. O₂, Ar, N₂ und CO₂)

Verschiedene Gase werden bei entsprechend niedrigen Temperaturen in isolierten Tanks gespeichert. Vor der Verwendung müssen die Flüssiggase in den gasförmigen Aggregatzustand umgewandelt werden.

Zur Herstellung von Mischgasen über Mischgeräte müssen die flüssigen Gaskomponenten, zum Beispiel Argon und CO₂, vor dem Mischen in den gasförmigen Zustand umgewandelt werden. Argon-Sauerstoffgemische können auch vorgemischt flüssig gelagert werden, ohne ein Mischgerät für die Versorgung zu verwenden.

8 Umgang mit Druckgasflaschen

Druckgasflaschen müssen schonend transportiert werden und dürfen nicht geworfen oder liegend gerollt werden. Beim Transport und der Lagerung muss stets die Ventilschutzkappe aufgeschraubt sein. Gasflaschen sind gegen übermäßige Wärmeeinwirkung, Schlag und Stoß zu schützen. Stehende Flaschen müssen durch Ketten oder Schellen gegen Umfallen gesichert sein. In Arbeitsräumen dürfen nur die zum fortlaufenden Gebrauch benötigten Gasflaschen aufgestellt werden, ein Ansammeln von Flaschen ist zu vermeiden. Das Umfüllen von großen in kleine Flaschen erfordert spezielle Fachkenntnisse und ist daher nicht zulässig. Flaschenlager müssen stets gut durchlüftet sein. Die Dichte der einzelnen Schutzgase unterscheidet sich zum Teil erheblich von der Dichte der Luft. Schutzgase, die schwerer sind als Luft, verdrängen die Atemluft und stellen eine Gefahr für das Personal dar. Wasserstoffhaltige Schutzgase können gefährliche Konzentrationen an Knallgas in der Luft bilden.

Die Kennzeichnung von Druckgasflaschen erfolgt nach DIN EN ISO 13769.

Auf der Flaschenschulter sind z.B. das Prüfdatum, Leergewicht, Fassungsraum und Flascheninhaltsdruck eingepreßt.

9 Farbkennzeichnung von Gasflaschen

Die Farbkennzeichnung erfolgt nach DIN EN 1089-3 entsprechend der Gasart durch Anstrich der Flaschenschulter oder der ganzen Flasche. Die Farbkennzeichnung dient nur als zusätzliche Information. Die einzig verbindliche Kennzeichnung ist der Gefahrgutaufkleber.

	Stickstoff  schwarz	Wasserstoff  rot
Sauerstoff (technischer)  weiß blau (grau)	Kohlendioxid  grau	Formiergas (Gemisch Stickstoff/Wasserstoff)  rot
Acetylen  kastanienbraun kastanienbraun	Helium  braun	Gemisch Argon/Kohlendioxid  leuchtendgrün
Argon  dunkelgrün	Xenon, Krypton, Neon  leuchtendgrün	Druckluft  leuchtendgrün

Abbildung 10: Farbkennzeichnung von Gasflaschen

10 Gefahrgutaufkleber

Der dargestellte Gefahrgutaufkleber (im Beispiel für Acetylen) erfüllt die Anforderungen der Transportvorschriften (GGVSEB).

Das Etikett ist mit dem Signalwort „Gefahr“ versehen. Darüber befinden sich die Gefahrensymbole. Links die Gefahren- und Sicherheitshinweise (P- und H-Sätze). Rechts ergänzende Hinweise.



Abbildung 11: Gefahrgutaufkleber



11 Testfragen

1. Welche Aufgaben hat das Schutzgas beim MSG- und WSG-Schweißen?

- ☐ Kühlung der Elektrode
- ☐ Schutz der Elektrode und des Schmelzbades vor den schädigenden Einflüssen der Luft
- ☐ Es verhindert die Entstehung von Schweißrauchen.
- ☐ Es kühlt den Schweißbrenner, dadurch kann immer ohne wassergekühlte Brenner gearbeitet werden.

2. Welche Schutzgase kommen beim MAG-Schweißen zur Anwendung?

- ☐ Argon und Helium
- ☐ Stickstoff und Wasserstoff
- ☐ Kohlendioxid und Mischgase
- ☐ Krypton und Xenon

3. Weshalb können zum WIG-Schweißen nur inerte Schutzgase verwendet werden?

- ☐ Aktive Schutzgase zerstören die Wolframelektrode.
- ☐ Inerte Schutzgase verbessern das Einbrandprofil.
- ☐ Inerte Schutzgase sind kostengünstiger als aktive Gase.
- ☐ Bei der Verwendung von aktiven Schutzgasen entstehen Poren in der Schweißnaht.

4. Was bedeutet die Bezeichnung M21 bei einem Schutzgas?

- ☐ Das Schutzgas hat eine Zusammensetzung von 75-82% Argon, Rest CO₂.
- ☐ Das Schutzgas hat eine Zusammensetzung von 82% CO₂, Rest Argon.
- ☐ Das Schutzgas ist zum WIG-Schweißen von Stählen gut geeignet.
- ☐ Es handelt sich um ein Mischgas der Hauptgruppe M2, Untergruppe 1.

5. In welcher Form wird CO₂ in Gasflaschen gespeichert?

- ☐ Flüssig
- ☐ Gasförmig
- ☐ Gelöst
- ☐ Fest, in Form von Trockeneis

6. Wie werden Gasflaschen verbindlich gekennzeichnet?

- ☐ Durch einen entsprechenden Farbanstrich auf der Flaschenschulter.
- ☐ Durch den Gefahrgutaufkleber.
- ☐ Durch Einprägung der Gasbezeichnung auf der Flaschenschulter.
- ☐ Durch den Farbanstrich auf der Flaschenschulter.

7. Welche Formen der Gasversorgung sind für kleinere und mittlere Betriebe in der Regel die richtige Wahl?

- ☐ Zentrale Gasversorgung mit Kaltvergaseranlage
- ☐ Zentrale Gasversorgung mit Bündelanlage
- ☐ Einzelflaschenversorgung
- ☐ Zentrale Gasversorgung mit Flaschenbatterie

8. Welche Aussagen zum MSG-Schweißen sind richtig?

- ☐ Es handelt sich um einen Schutzgasprozess mit abschmelzender Drahtelektrode.
- ☐ Die Drahtelektrode ist gleichzeitig der Zusatzwerkstoff.
- ☐ Es kommen nur inerte Schutzgase zum Einsatz.
- ☐ Es kann nur in PA-Position eingesetzt werden.
- ☐ Es wird in MIG- und MAG-Schweißen unterteilt.

9. Welche Aussagen zum WSG-Schweißen sind richtig?

- ☐ Es handelt sich um einen Schutzgasprozess mit abschmelzender Drahtelektrode.
- ☐ Es kommen inerte Schutzgase zum Einsatz.
- ☐ Es wird unterteilt in WIG- und Plasmaschweißen.
- ☐ Schweißen in PA-Position ist in der Praxis nicht möglich.
- ☐ Es kann auch ohne Zusatzwerkstoff geschweißt werden.

10. Welche Schutzgase kommen beim MIG-Schweißen zur Anwendung?

- ☐ Acetylen
- ☐ Argon (I1)
- ☐ Argon-Helium-Gemische (I3)
- ☐ Argon mit geringen Mengen CO_2 oder O_2
- ☐ Reines CO_2 (C1)

11. Beim MSG-Schweißen kommen neben Massivdrähten auch welche anderen Elektroden zum Einsatz?

- ☐ Wolfram-Elektroden
- ☐ mit Schweißpulver gefüllte Fülldrahtelektroden
- ☐ mit Metallpulver gefüllte Fülldrahtelektroden
- ☐ Graphit-Elektroden
- ☐ Wolfram-Elektroden mit Dotierungen

12. Welche Schutzgase kommen beim WIG-Schweißen von Baustählen zum Einsatz?

- ☐ Argon
- ☐ Argon- CO_2 -Gemische
- ☐ Argon-Helium-Gemische
- ☐ Argon- H_2 -Gemische
- ☐ Argon mit geringen Mengen an Sauerstoff

13. Welche Aussagen zum Wolfram-Plasma-Schweißen sind richtig?

- ☐ Der Lichtbogen wird mechanisch eingeschnürt
- ☐ Es hat im Vergleich zum WIG-Schweißen eine geringere Energiedichte
- ☐ Es kommen zwei, in der Regel inerte, Gase zum Einsatz
- ☐ Der Lichtbogen brennt zwischen der abschmelzenden Wolfram-Elektrode und dem Werkstück.
- ☐ Die Einschnürdüse ist immer wassergekühlt.

Inhalt

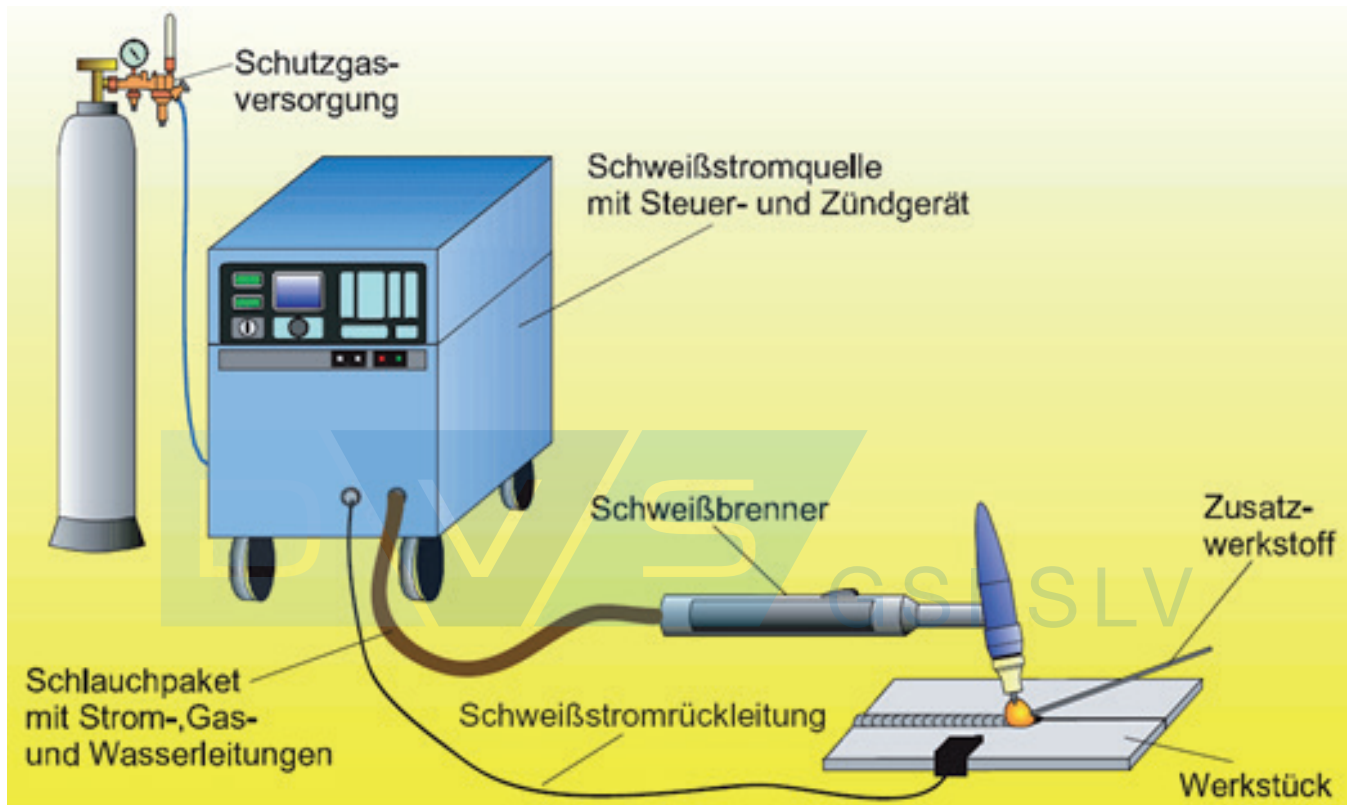
1	Prinzip	1
2	Schweißanlage und Schweißprozess	1
3	Eingesetzte Schutzgase und Anwendung des Verfahrens.....	3
4	WIG-Schweißbrenner (Bauarten).....	3
4.1	Luftgekühlte WIG-Brenner sind bis zu einer Lichtbogenstromstärke von ca. 250 A einsetzbar. 4	
4.2	Wassergekühlte WIG-Brenner werden bei hoher Lichtbogenleistung und Einschaltdauer eingesetzt.	4
5	Wolframelektroden.....	5
5.1	Endformen der Elektroden	7
5.2	Kennzeichnung von Wolfram-Elektroden gemäß DIN EN ISO 6848	8
6	Einfluss der Schutzgase auf das Einbrandprofil	9
7	Zünden von WIG-Lichtbögen	9
7.1	Berührungslose Zündung.....	9
7.2	Kurzschlusszündung (Lift-Arc-Zündung).....	10
8	Formieren.....	11
8.1	Formiergase und Arbeitssicherheit	11
8.2	Vorrichtungen zum Formieren	14
9	WIG-Schweißen von Aluminium	17
9.1	Überblick.....	17
10	WIG-Aluminiumschweißen mit Wechselstrom.....	17
11	WIG-Aluminiumschweißen mit Gleichstrom	19
12	Schweißnahtvorbereitung beim WIG-Aluminiumschweißen	22
13	Schweißfehler.....	23
14	Varianten des WIG-Schweißens	26
14.1	Mögliche Mechanisierungsgrade des WIG-Schweißens	27
15	Verfahrensvarianten des WIG-Schweißens	28
15.1	WIG-Impulsschweißen.....	28
15.2	WIG-Schweißen mit Zusatzdraht.....	30
15.2.1	WIG-Schweißen mit Kaltdraht.....	30
15.3	WIG-Schweißen am drehenden Bauteil.....	31
15.4	WIG-Orbitalschweißen.....	32
15.5	WIG-Orbital-Engspaltschweißen.....	36
15.6	WIG-Heißdrahtschweißen.....	38
15.7	WIG-Mehrkathodenschweißen	39
15.8	WIG-Schweißen mit einer Doppelgasdüse	41
15.9	WIG-Punktschweißen	42
15.10	WIG-Schweißen mit zwei Brennern gleichzeitig	43
15.11	WIG-Stichlochschiweißen.....	44
16	Testfragen.....	46

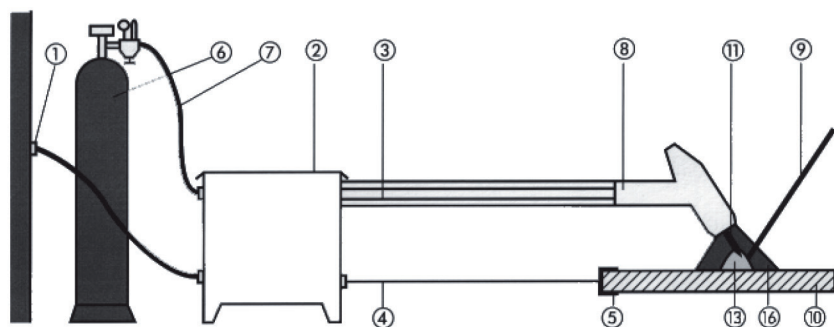
1 Prinzip

Im Schweißbrenner ist eine Wolframelektrode eingespannt, in die der Schweißstrom eingeleitet wird. Zwischen der Wolframelektrode und dem Werkstück entsteht ein Lichtbogen, der den Grundwerkstoff aufschmilzt und den zugeführten Schweißstab abschmilzt. Aus dem Schweißbrenner strömt inertes Schutzgas und schirmt die glühende Wolframelektrode und das Schweißbad vor Luftzutritt ab.

2 Schweißanlage und Schweißprozess

Eine WIG-Schweißanlage besteht aus folgenden Komponenten:





- | | |
|--|--------------------------------|
| 1 Netzanschluss | 8 Schweißbrenner |
| 2 Schweißstromquelle | 9 Schweißstab |
| 3 Schweißstromleitung (Elektrode) | 10 Werkstück |
| 4 Schweißstromleitung (Werkstück) | 11 Wolframelektrode |
| 5 Werkstückklemme | 12 Spannhülse und Stromleitung |
| 6 Schutzgasflasche mit Druckminderer und Gasmengenmesser | 13 Lichtbogen |
| 7 Schutzgasschlauch | 14 flüssiges Schweißgut |
| | 15 festes Schweißgut |
| | 16 Schutzgasmantel |

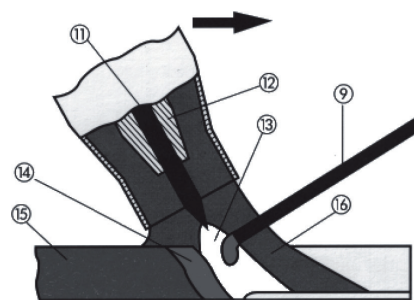


Abbildung 1: Schema der WIG-Schweißanlage mit Schweißprozess



3 Eingesetzte Schutzgase und Anwendung des Verfahrens

Beim Wolfram-Inertgasschweißen kommen nur inerte Schutzgase zur Anwendung, denn die glühende Wolframelektrode darf keinen chemischen Reaktionen ausgesetzt werden: – Argon (Ar) – Helium (He) – Gemische Argon (Ar) und Helium (He) sowie Wasserstoff (H_2).

Mit dem Wolfram-Inertgasschweißen können Stähle und Nichteisenmetalle in allen Positionen verschweißt werden. Wirtschaftlicher Einsatz ist bei Bauteildicken von 0,5 bis 5 mm; bei dickeren Werkstücken werden nur die Wurzellagen mit dem Schweißprozess ausgeführt. Wichtige Anwendungsbereiche sind Luft- und Raumfahrttechnik, Feinwerktechnik, Chemieanlagenbau, Apparatebau und Behälterbau.

4 WIG-Schweißbrenner (Bauarten)

Beim WIG-Schweißen werden in Abhängigkeit von den geforderten Lichtbogenleistungen gas- oder wassergekühlte Brenner eingesetzt. Der prinzipielle Aufbau eines Brenners stellt sich wie folgt dar:

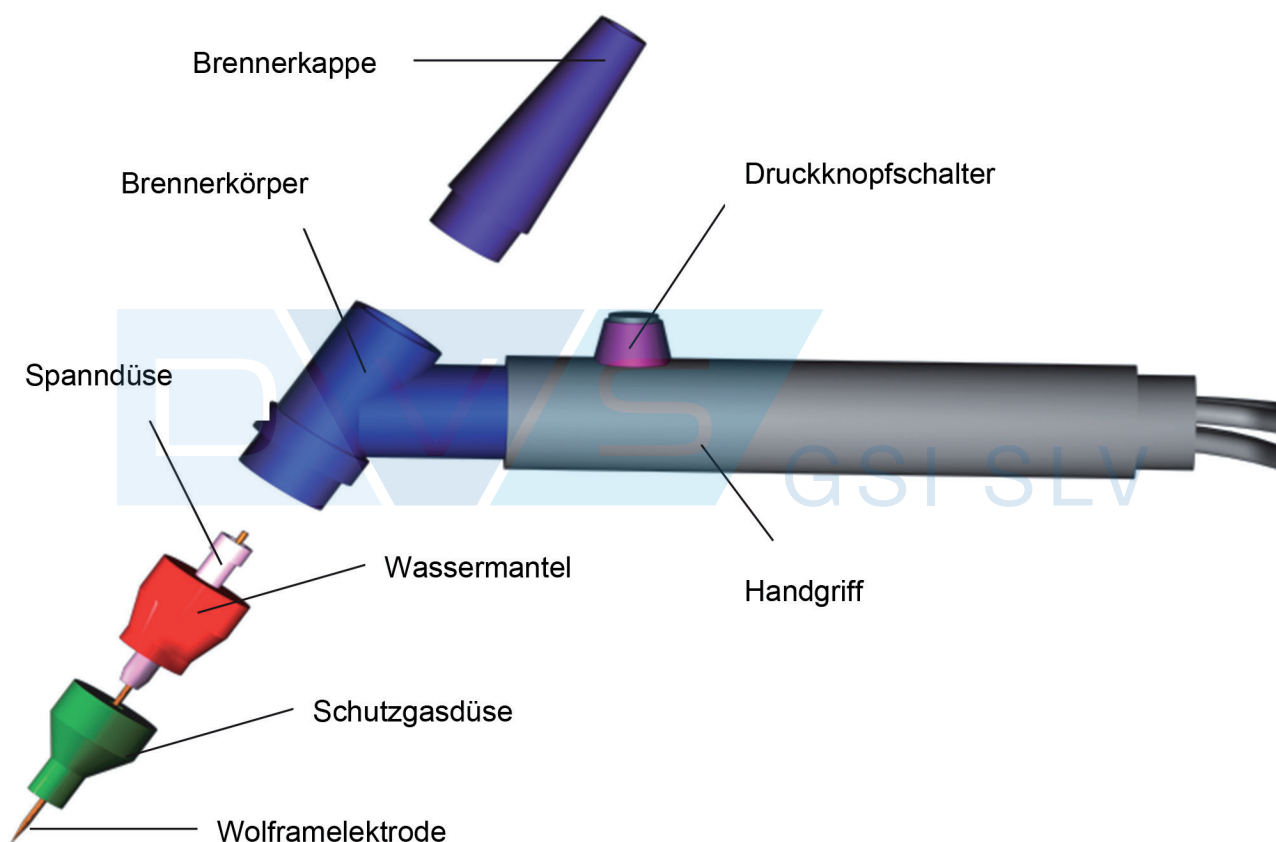


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Brenners

4.1 Luftgekühlte WIG-Brenner sind bis zu einer Lichtbogenstromstärke von ca. 250 A einsetzbar.

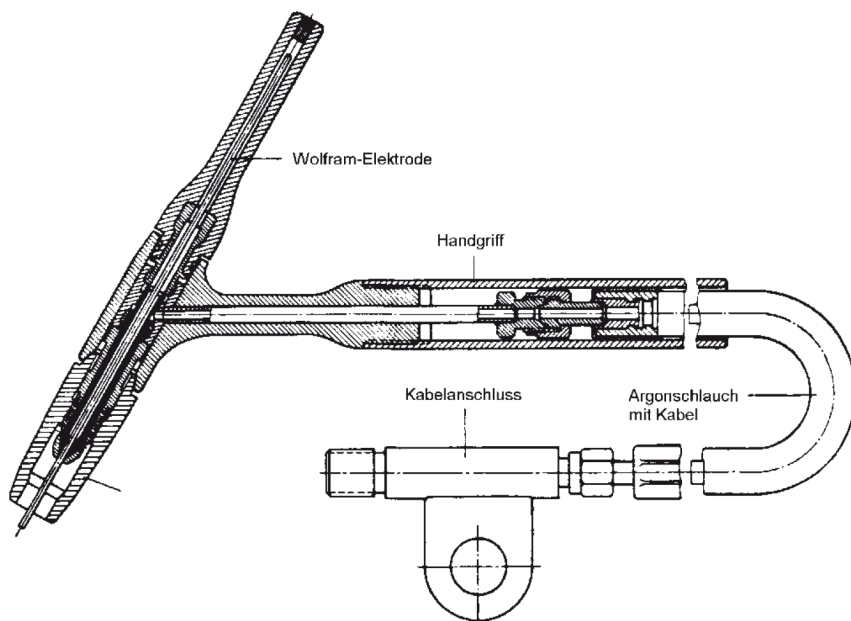


Abbildung 3: Schnitt durch einen luftgekühlten Brenner

4.2 Wassergekühlte WIG-Brenner werden bei hoher Lichtbogenleistung und Einschaltdauer eingesetzt.

Abbildung 4 zeigt den Schnitt eines wassergekühlten Brenners.

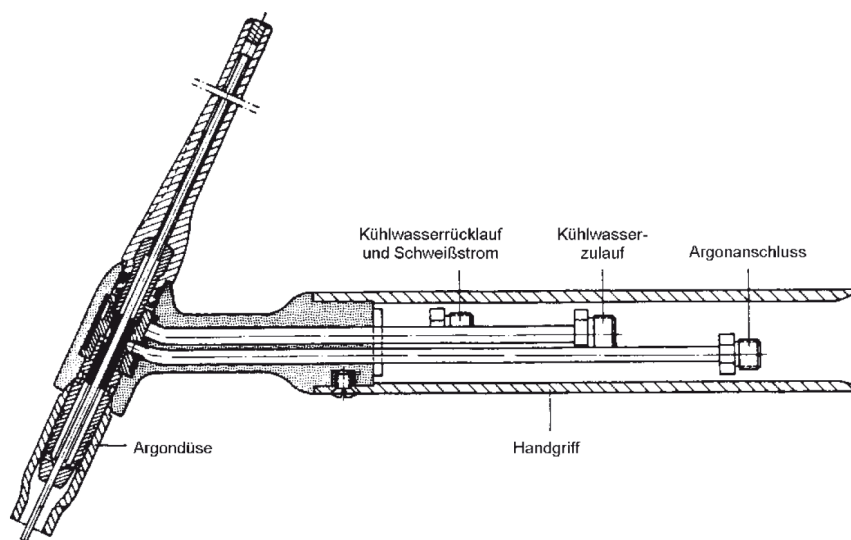


Abbildung 4: Schnitt durch einen wassergekühlten WIG-Brenner

5 Wolframelektroden

Die Güte einer WIG-Schweißnaht hängt im Wesentlichen von der Wolframelektrodenart und Elektrodenform ab. Es werden reine Wolframelektroden von solchen mit Oxidzusätzen unterschieden. Die Unterschiede zwischen diesen Elektrodensorten liegen in der Elektronenaustrittsarbeit (Abbildung 7). Hieraus wird ersichtlich, dass die reine Wolframelektrode ca. 1000°C heißer wird als eine Wolfram-Thorumelektrode, um einen stabil brennenden Lichtbogen zu erreichen. Die erforderliche Stromdichte für diesen Lichtbogen liegt bei der reinen W-Elektrode in der flüssigen Phase der Elektrodenenden, während bei der thorierten Elektrode die erforderliche Austrittsarbeit im festen Zustand des Elektrodenwerkstoffs erfolgt. Aus Tabelle 1 sind die empfohlenen Lichtbogenstromwerte in Abhängigkeit der Elektrodendurchmesser, Stromart und Polung zu ersehen. Thorium wird in zunehmendem Maße durch andere Oxide ersetzt.

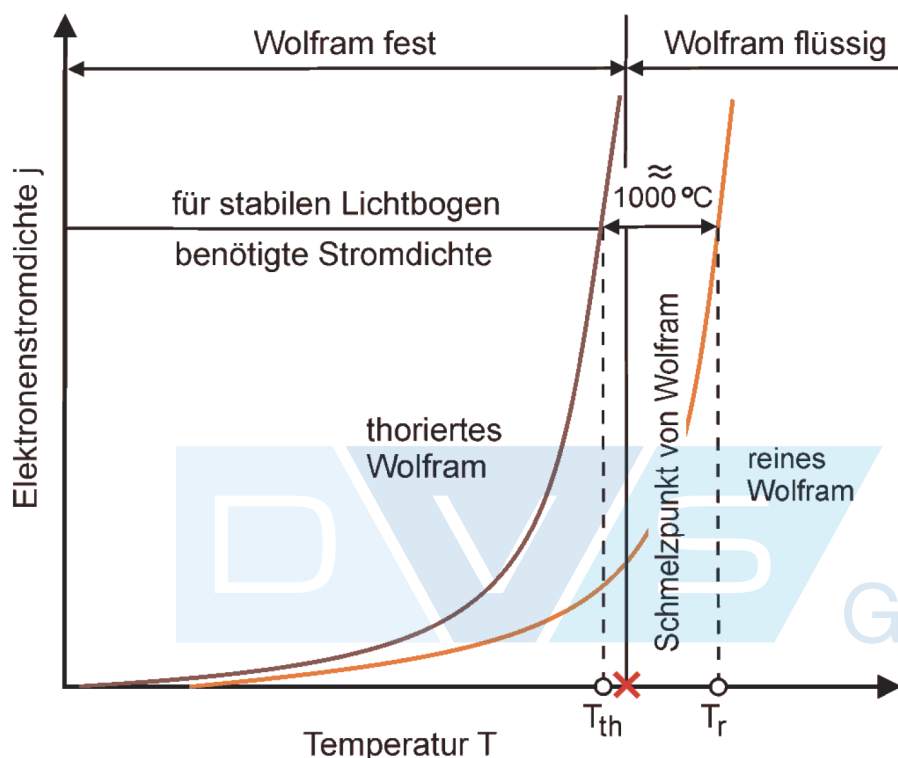


Abbildung 5: Elektronenemission: Dichte j des Elektronenstromes als Funktion der Temperatur T an reinen und an thorierten Wolframelektroden:

T_{th} : Temperatur der thorierten Elektrode beim Schweißen

T_r : Temperatur der reinen Wolframelektrode beim Schweißen

Tabelle 1: Ungefähre Stromstärkebereiche in Abhängigkeit vom Elektrodendurchmesser (Auszug aus DIN EN ISO 6848)

Elektroden- durchmesser mm	Gleichstrom				Wechselstrom	
	A				A	
	negative Polung (-)		positive Polung (+)		reines Wolfram	Wolfram mit Oxidzusätzen
	reines Wolfram	Wolfram mit Oxidzusätzen	reines Wolfram	Wolfram mit Oxidzusätzen		
0,25	bis 15	bis 15	nicht anwendbar	nicht anwendbar	bis 15	bis 15
0,30	bis 15	bis 15	nicht anwendbar	nicht anwendbar	bis 15	bis 15
0,50	2 bis 20	2 bis 20	nicht anwendbar	nicht anwendbar	2 bis 15	2 bis 15
1,0	10 bis 75	10 bis 75	nicht anwendbar	nicht anwendbar	15 bis 55	15 bis 70
1,5	60 bis 150	60 bis 150	10 bis 20	10 bis 20	45 bis 90	60 bis 125
1,6	60 bis 150	60 bis 150	10 bis 20	10 bis 20	45 bis 90	60 bis 125
2,0	75 bis 180	100 bis 200	15 bis 25	15 bis 25	65 bis 125	85 bis 160
2,4	120 bis 220	150 bis 250	15 bis 30	15 bis 30	80 bis 140	120 bis 210
2,5	130 bis 230	170 bis 250	17 bis 30	17 bis 30	80 bis 140	120 bis 210
3,0	150 bis 300	210 bis 310	20 bis 35	20 bis 35	140 bis 180	140 bis 230
3,2	160 bis 310	225 bis 330	20 bis 35	20 bis 35	150 bis 190	150 bis 250
4,0	275 bis 450	350 bis 480	35 bis 50	35 bis 50	180 bis 260	240 bis 350
4,8	380 bis 600	480 bis 650	50 bis 70	50 bis 70	240 bis 350	330 bis 450
5,0	400 bis 625	500 bis 675	50 bis 70	50 bis 70	240 bis 350	330 bis 460
6,3	550 bis 875	650 bis 950	65 bis 100	65 bis 100	300 bis 450	430 bis 575
6,4	575 bis 900	750 bis 1 000	70 bis 125	70 bis 125	325 bis 450	450 bis 600
8,0						650 bis 830
10,0						
ANMERKUNG Da wo keine Werte angegeben sind, stehen keine Angaben zur Verfügung.						

5.1 Endformen der Elektroden

Die Endform der Wolframelektrode hat einen Einfluss auf die Lichtbogenform und somit auf die Form des Wärmestromes zum Werkstück (siehe Abbildung 8). Das Elektrodenende wird im Wesentlichen von der Stromart und Polung sowie von der thermischen Belastung durch die Höhe der Stromstärke bestimmt. Bei Gleichstrom Minus-Polung kann in unteren Stromstärkebereichen eine kegelförmige Endform erhalten bleiben. Mit Erhöhung der Lichtbogenstromstärke verflüssigt sich die Elektroden Spitze und verformt sich zu einer Halbkugel mit einem Durchmesser von etwa der Elektrodendicke (siehe Abbildung 9).

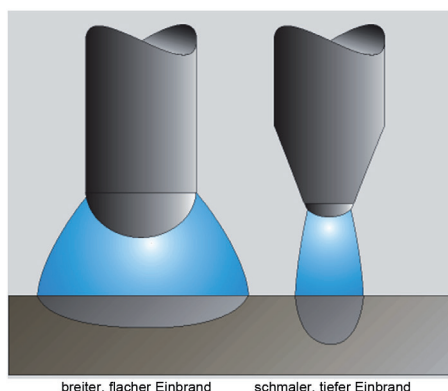


Abbildung 6: Abhängigkeit des Einbrandes beim WIG-Schweißen von der Elektrodenform bei gleichem Schweißstrom

Verfahrens- variante	Wolfram mit Oxidzusätzen	zu niedrig	Strom richtig	zu hoch
Gleichstrom	thorisiert			
Wechsel- strom	rein			
	thorisiert			

Abbildung 7: Ausbildung der Elektrodenendform bei unterschiedlicher Stromstärke

Die Ausbildung der Elektrodenenden sind bei anderen Oxidzusätzen ähnlich.

5.2 Kennzeichnung von Wolfram-Elektroden gemäß DIN EN ISO 6848

Nach Tabelle 2 müssen Wolframelektroden je nach ihrer chemischen Zusammensetzung mit einem farbigen Ring an einem Elektrodenende gekennzeichnet werden.

Die Breite eines jeden farbigen Ringes muss mindestens 3mm betragen. Alternativ können Wolframelektroden ihre eigenen Kurzzeichen haben, die in die Oberfläche der Elektrode in der Nähe von wenigstens einem Ende geätzt sind.

Tabelle 2: Anforderungen an die chemische Zusammensetzung für Wolframelektroden (Auszug aus DIN EN ISO 6848)

Elektroden- werkstoff	Kurz- zeichen	Anforderung an die chemische Zusammensetzung				Kennfarbe
		Oxidzusatz		Max. Verunrei- nungen in %	Wolframgehalt in %	
		Hauptoxide	Gehalt in %			
Rein-Wolfram	WP	Keine	n.a. ¹⁾	0,1	Rest	Grün 
Wolfram mit Tho- riumoxid	WT 10 WT 20 WT 30	ThO ₂	0,8 – 1,2 1,7 – 2,2 2,8 – 3,2	0,1	Rest	Gelb  Rot  Violett 
Wolfram mit Zir- koniumoxid	WZr 3 WZr 8	ZrO ₂	0,15 – 0,5 0,7 – 0,9	0,1	Rest	Braun  Weiß 
Wolfram mit Lan- thanoxid	WLa 10 WLa 15 WLa 20	La ₂ O ₃	0,8 – 1,2 1,3 – 1,7 1,8 – 2,2	0,1	Rest	Schwarz  Gold  Blau 
Wolfram mit Cer- oxid	WCe 20	CeO ₂	1,8 – 2,2	0,1	Rest	Grau 

¹⁾ = nicht anwendbar

¹⁾ = nicht anwendbar

6 Einfluss der Schutzgase auf das Einbrandprofil

Die Form des Lichtbogens wird wesentlich von der Schutzgasart bestimmt. Dabei wirken sich die physikalischen Eigenschaften der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten, bei aktiven Gasen auch der Dissoziation aus.

Abbildung 10 zeigt die Einbrandprofile von Blindraupen und Abbildung 11 von Kehlnähten am Grundwerkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) von WIG-Schweißungen unter verschiedenen Schutzgasen.

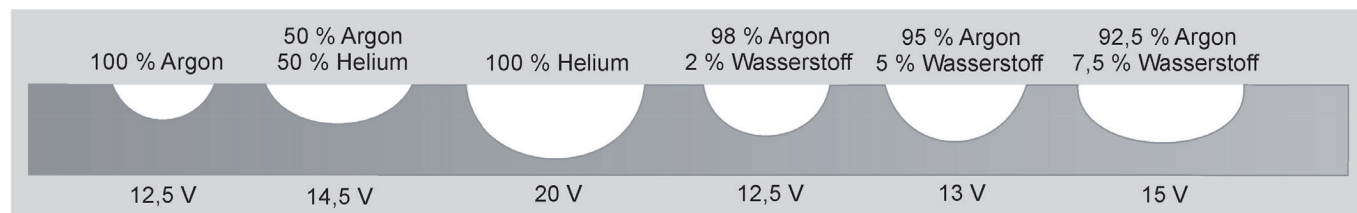


Abbildung 8: Einbrandprofile beim WIG-Schweißen mit verschiedenen Schutzgasen an einem 5 mm dicken Blech, Stromstärke 130 A, Lichtbogenlänge 4 mm, Schweißgeschwindigkeit 15 cm/min

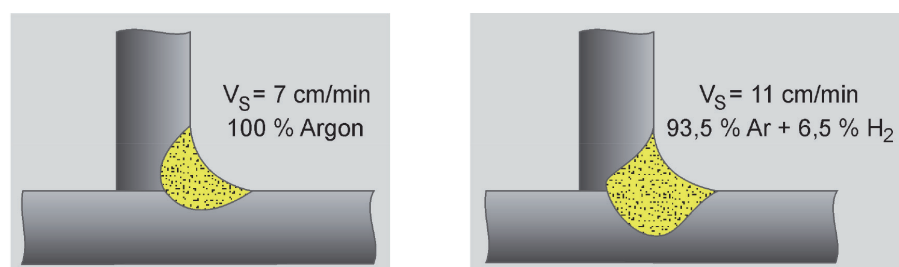


Abbildung 9: Einbrandprofile WIG-Schweißen unter verschiedenen Schutzgasen, Grundwerkstoff 1.4301

7 Zünden von WIG-Lichtbögen

Ein WIG-Lichtbogen kann berührungslos oder mit Berührung des Werkstücks durch die Wolframelektrode gezündet werden.

7.1 Berührungslose Zündung

Die berührungslose Zündung hat Vorteile durch das Vermeiden von Wolframpartikeln im Nahtbereich und dadurch, dass keine besondere Brennerbewegung für die Zündung erforderlich ist.

Die Ionisation des Lichtbogenraumes (Schaffung von Ladungsträgern) für die berührungslose Zündung erfolgte früher durch Hochfrequenz, heute überwiegend durch hochfrequente Hochspannungsimpulse. Die Bezeichnung HF-Zündung wird jedoch allgemein auch für die Hochspannungs-Impulszündung mit verwendet. Die HF-Zündung und die Hochspannungs-Impulszündung führen aufgrund ihrer Spannungsamplitude, dem Energieinhalt der Impulse und der kurzzeitigen hochfrequenten elektromagnetischen Abstrahlung zu speziellen Gefahren für den Menschen und für empfindliche elektronische Geräte. Die elektronischen Geräte in der Nähe (einige Meter) der Schweißstromkabel und des Brenners müssen störfest (für industrielle Umgebung geeignet) sein, damit es nicht zu Fehlfunktionen oder Defekten kommt. Die berührbaren Bereiche des WIG-Brenners, des Brennerkabels und von Steckern müssen gut isoliert sein, damit es nicht zu ungewollten Hochspannungsüberschlägen (Funken) kommt. Einwandfreie trockene isolierende Handschuhe bei manueller Brennerführung sollten selbstverständlich sein.

Es kann firmenspezifische oder berufsgenossenschaftliche Einschränkungen bezüglich der erlaubten Verwendung der HF-Zündung geben.

Die maximale Spannungsamplitude (und der zulässige Energieinhalt) für die HF-Zündung ist für die entsprechenden Geräte normativ geregelt und beträgt bei manuell geführten Brennern 12 kV (Kilovolt) und für mechanisiert geführte Brenner bis 20 kV. Die Gerätehersteller raten überwiegend davon ab, die Brennersteuerleistungen für andere Zwecke als für den manuellen Start mittels der Bedientaster der Brenner zu verwenden.

Stromquellen für das WIG-Schweißen unterstützen die HF-Zündung meistens durch einen besonderen Zündstrom, welcher eingestellt oder durch Auswahl der Nadeldicke beeinflusst werden kann.

Aufgrund der technischen und normativen Grenzen für die HF-Zündung und den örtlichen Gegebenheiten kann es vereinzelt sein, dass die HF-Zündung nicht ausreichend gut funktioniert. Folgende Hinweise können gegeben werden:

- Die HF-Zündung wird mit zunehmendem Helium-Anteil im Schutzgas schlechter. Mit entsprechendem Aufwand ist es hilfreich, unter Reinargon zu zünden und dann auf Helium umzuschalten.
- Typ und Zustand (richtiger Anschliff) der Wolframnadel beeinflussen die Zündung.
- Ein leitfähiger Ring um den vorderen Bereich der Schutzgasdüse verändert die elektrische Feldausbildung und kann als Zündhilfe wirken.
- Das Brennerkabel sollte möglichst nicht in enger Nachbarschaft zu anderen elektrischen Leitern (auch isolierte Kabel, Kabelkanäle etc.) sein, da die HF-Zündenergie sich dort verschleppen kann.
- Die Zündfunken können Oberflächenbereiche außerhalb der späteren Schweißnaht durch Mikrokra-ter schädigen. Zündfunken suchen zwar den kurzen, aber den elektrisch für sie günstigsten Weg und bevorzugen scharfe Spitzen, Kanten und bestimmte Oberflächeneigenschaften (teilweise Oxide).

Eine berührungslose Zündung, welche die beschriebenen Probleme zu Teil vermeidet, ist mit speziellen Brennern möglich, in denen (ein vorher gezündeter) Pilot-Lichtbogen brennt, welcher wiederum den Hauptlichtbogen zünden kann. Diese Art der berührungslosen Zündung ist vor allem im Microplasma-Schweißen üblich.

7.2 Kurzschlusszündung (Lift-Arc-Zündung)

Die Zündung des Lichtbogens erfolgt hier, indem durch Kurzschluss der Elektrode mit dem Werkstück eine örtliche Erhitzung erfolgt und beim Auflösen des Kurzschlusses die Funkenbildung den Lichtbogen zündet. Hierzu ist eine entsprechende Bewegung erforderlich. Dies kann leichtes Berühren, Kratzen oder Drücken/Halten und bewusstes Abheben nach einer kurzen Verweilzeit sein.

Stromquellen für das WIG-Schweißen unterstützen die Kurzschlusszündung durch einen besonderen Zündstrom, welcher eingestellt oder durch Auswahl der Nadeldicke beeinflusst werden kann.

Tabelle 3: Einfluss verschiedener Gase auf Zündverhalten Lichtbogenstabilität, Nahtform und Schweißgeschwindigkeit

Einfluss/ Schutzgas	Zünden	Lichtbogen- stabilität	Nahtbreite	Einbrand	Schweißge- schwindigkeit
Argon	XXX	XXX	XX	XX	XX
Argon/Wasser- stoff-Gemische	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Helium	X	X	XXX	XXX	XXX
Helium/Argon- Gemisch 25/75	XX	XXX	XXX	XX	XXX
Helium/Argon- Gemisch 50/50	X	XX	XXX	XXX	XXX

8 Formieren

Formiert wird fast ausschließlich beim Schweißen von hochlegierten Stählen. Durch das Formieren wird vor allen Dingen ein Gasschutz an der Schweißnahtwurzel erreicht. Ohne diesen Gasschutz kann es zu einer Oxidation (Anlauffarben, die prinzipiell bei nicht optimalem Gasschutz auch im Bereich der Schweißnahtoberfläche auftreten können) im Bereich der Schweißnahtwurzel kommen. Anlauffarben sind dünne Oxidschichten, die sich durch Erwärmung an der Oberfläche von Cr-Ni-Stählen bilden, wenn die Luft Zutritt hat. Sie müssen entfernt, oder besser noch, ihre Entstehung verhindert werden, damit sich die chemisch beständige passive Oberflächenschicht ausbilden kann, die für die Korrosionsbeständigkeit dieser Werkstoffe verantwortlich ist.

Die Anlauffarben können durch Strahlen, Schleifen oder Beizen (Achtung: Beizreste sorgfältig entfernen, da sonst Korrosionsgefahr) entfernt werden. Im Inneren von Rohren und Behältern ist dies meist nicht möglich; sodass hier das Formieren Abhilfe schaffen kann. Das Formieren hat bereits beim Heften zu erfolgen.

In gewissem Umfang kann durch den Gasdruck an der Nahtwurzel auch eine Stützwirkung auf das Schweißgut ausgeübt und dadurch ein zu starkes Durchsacken und eine Formung der Schweißnahtwurzel erreicht werden.

8.1 Formiergase und Arbeitssicherheit

Argon und Stickstoff sind nicht giftig und nicht brennbar. Zu beachten ist jedoch, dass beim Formieren von Behältern der Sauerstoff verdrängt wird und dass beim Arbeiten in solchen Behältern Sauerstoffzufuhr (Luft; **kein reiner Sauerstoff!!**) erforderlich ist, um Erstickungsgefahr zu vermeiden.

Wasserstoffhaltige Formiergase (um eine oxidfreie Nahtwurzel zu erhalten) sind in Abhängigkeit des Wasserstoffgehaltes brennbar.

Die EN ISO 14175 schreibt deshalb für Formiergase mit über **10% Wasserstoffanteil** vor, dass **abgefackelt** werden muss. Dies ist meist nur durch Verwendung einer konstant brennenden Zündflamme zu gewährleisten.

Brennbare Gasgemische sind dann gegeben, wenn der Wasserstoffanteil in der Luft zwischen 4 und 75 Vol. % liegt.

Beim Formieren von Bauteilen mit schwer zugänglichen Bereichen, die ein sicheres Verdrängen der Luft nicht gewährleisten, sollten Formiergase mit weniger als 4% Wasserstoff oder ausschließlich Argon bzw. Stickstoff verwendet werden.

Entscheidenden Einfluss auf die Wirksamkeit des Formierens hat der Restsauerstoff im formierten Bereich.

Beim Schweißen von rostbeständigen Stählen wird in der Regel eine genügende Verdünnung erreicht, wenn das ca. 2,5 bis 3-fache des geometrischen Volumens des Formiergases eingesetzt wird.

Beispiel:

Rohrinnendurchmesser	=	132 mm			
Spülstrecke	=	1000 mm			
Rohrvolumen	=	14 l			
Gasdurchfluss	=	10 l/min			
Spülfaktor	=	2,5			
Gasvolumen 2,5 x 14	=	35 l	Spülzeit 35 : 10	=	3,5 min

Welches Schutzgas zum Formieren bei welchen Werkstoffen sinnvoll ist, enthält die Tabelle 4.

Tabelle 4

Wurzelschutzgase	Werkstoffe
Argon-Wasserstoff-Gemische	austenitische Cr-Ni-Stähle Ni und Ni-Basis-Werkstoffe
*) Stickstoff-Wasserstoff-Gemische	Stähle mit Ausnahme hochfester Feinkornbaustähle, austenitische Cr-Ni-Stähle
Argon	austenitische Cr-Ni-Stähle, austenitisch-ferritische Stähle (Duplex), gasempfindliche Werkstoffe (Titan, Zirkonium, Molybdän), wasserstoffempfindliche Werkstoffe (hochfeste Feinkornbaustähle, Kupfer und Kupferlegierungen, Aluminium und Aluminiumlegierungen sowie sonstige NE-Metalle), ferritische Cr-Stähle
*) Stickstoff	austenitische Cr-Ni Stähle, austenitisch-ferritische Stähle (Duplex)
*) Bei titanstabilisierten rostbeständigen Stählen tritt bei Anwendung von Stickstoff bzw. Stickstoff-Wasserstoffgemisch Titan-Nitrid-Bildung auf der durchgeschweißten Wurzel auf (Gelbfärbung). Das Belassen dieses Titan-Nitrides muss von Fall zu Fall entschieden werden.	

Beim Formieren von z.B. größeren Behältern ist die relative Dichte der verwendeten Gase zum Formieren zu beachten.



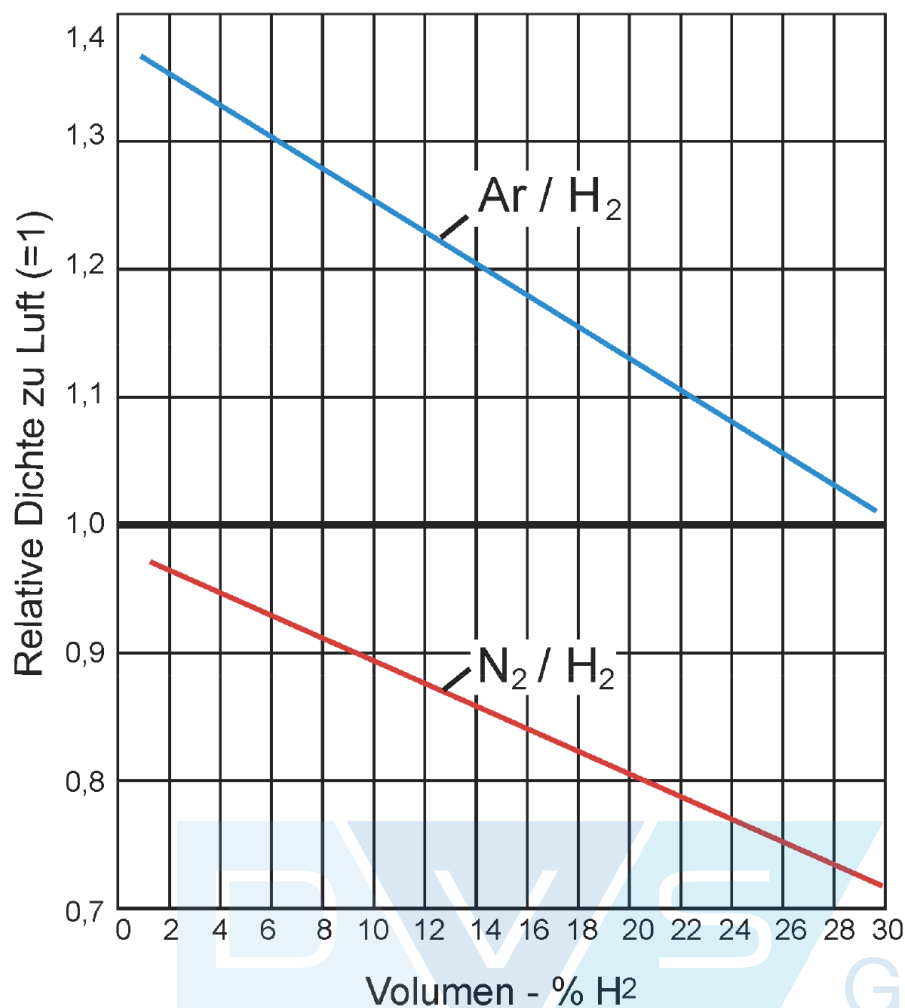


Abbildung 10: Relative Dichte verschiedener Gase, die zum Formieren verwendet werden

8.2 Vorrichtungen zum Formieren

Im Folgenden sind einige Beispiele von Formiermöglichkeiten und -einrichtungen dargestellt.

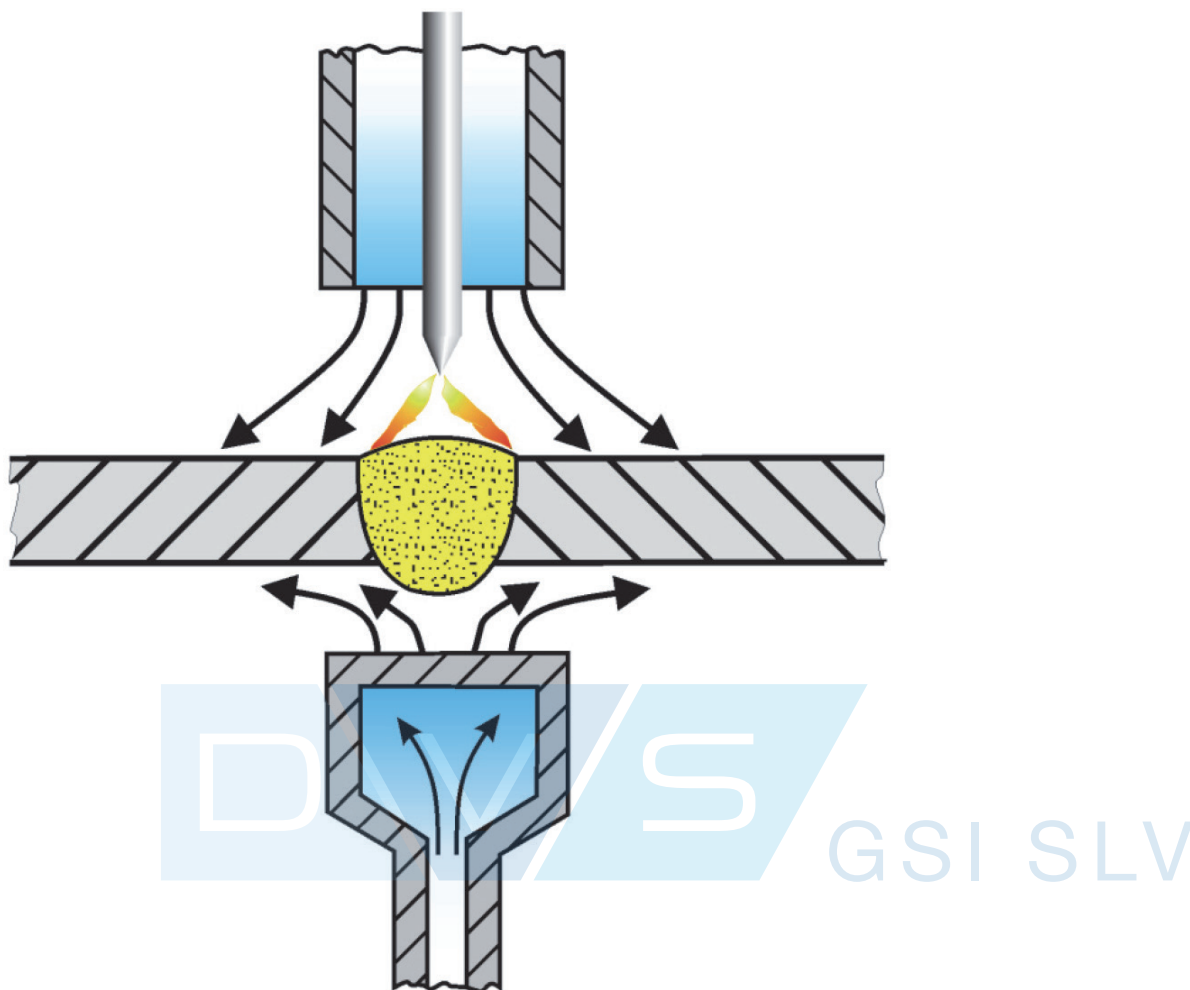


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Einsatzes von Schutzgasen zum Schutz der Ober- und Unterseite beim Schweißen von Blechen

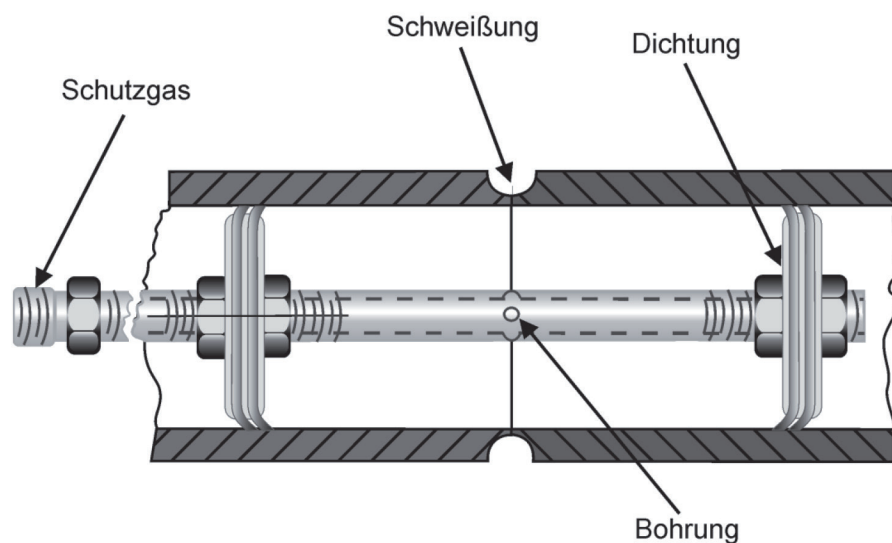
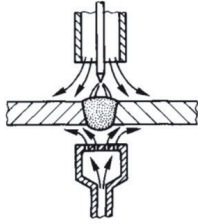
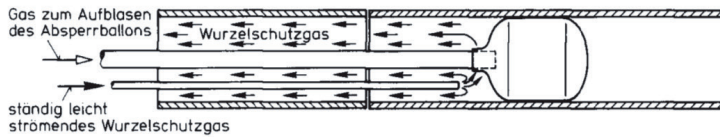


Abbildung 12: Formiervorrichtung für Rohrabschnitte

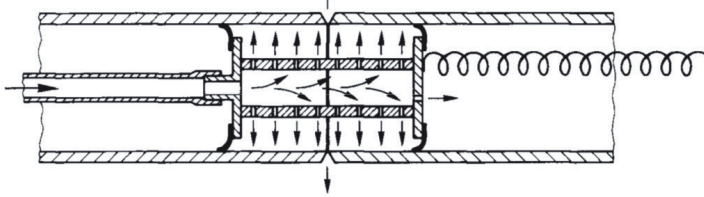
Anordnung A



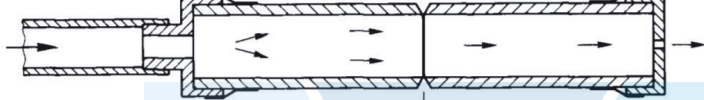
Anordnung B



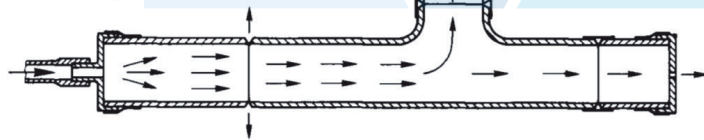
Anordnung C



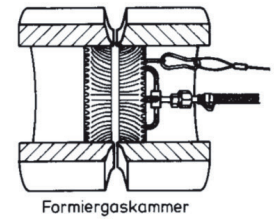
Anordnung D



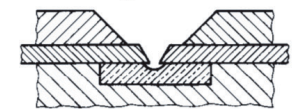
Anordnung E



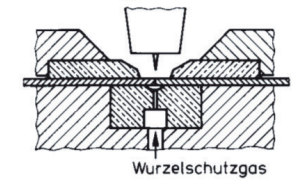
Anordnung F



Anordnung G



Anordnung H



Anordnung I

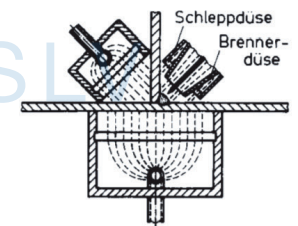


Abbildung 13: Unterschiedliche Möglichkeiten zum Formieren



Abbildung 14: Anlauffarben und bereits erfolgte Korrosion durch nicht geeigneten Gasschutz



Abbildung 15: „Verbrannte“ Schweißnahtwurzel durch absolut ungenügenden Gasschutz



9 WIG-Schweißen von Aluminium

9.1 Überblick

Für die schweißtechnische Verarbeitung kommen folgende Aluminiumwerkstoffe in Betracht:

- A.** Reinaluminium (Al 99,9; Al 99,5 usw.) mit hoher Korrosionsbeständigkeit, aber geringer Festigkeit (80 N/mm^2), die durch Kaltverformen (Walzen usw.) erhöht werden kann (130 N/mm^2). Die Kaltverfestigung geht beim Schweißen im Nahtbereich verloren.
- B.** Naturharte Aluminiumlegierungen (AlMn; AlMg 3 usw.) Höhere Festigkeit durch Legierungselemente (240 N/mm^2). Durch Kaltverformen ist eine Festigkeitssteigerung möglich (320 N/mm^2), die durch Schweißen im Nahtbereich wieder verloren geht.
- C.** Aushärtbare Aluminiumlegierungen (AlMgSi1; AlZnMg1 usw.) Durch Wärmebehandlungen (Ausscheidungs Vorgänge) werden gute Festigkeitseigenschaften erreicht (380 N/mm^2). Der Festigkeitsverlust nach dem Schweißen im Nahtbereich kann durch Warmauslagern ($100 \text{ bis } 250^\circ\text{C}$) oder durch Lagern bei Raumtemperatur teilweise rückgängig gemacht werden.

Die Hauptschwierigkeiten beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen beruhen auf der hohen Schmelztemperatur der Oxidhaut. Diese wird beim WIG-Schweißen üblicherweise nicht durch Flussmittel (wie beim Gasschweißen, das für Aluminium aber kaum noch eingesetzt wird), sondern durch physikalische Effekte bei der Einwirkung des elektrischen Stromes im Bereich des Lichtbogenfußpunktes zerstört. Voraussetzung für Schweißverbindungen ohne Oxideinschlüsse und damit auch ohne Bindefehler ist eine Vorbehandlung vor allem der Werkstücke im Nahtbereich und eventuell des Zusatzwerkstoffes möglichst kurz vor dem Schweißen durch Beizen oder mechanisch, z.B. Bürsten. Es werden Bürsten mit Borsten aus hochlegiertem Werkstoff verwendet, die keinesfalls auch zum Bürsten von Eisenwerkstoffen benutzt werden dürfen.

10 WIG-Aluminiumschweißen mit Wechselstrom

Die Wechselstromschweißung wird derzeit in der praktischen Fertigung am häufigsten eingesetzt. Während der positiven Halbwelle tritt der Reinigungseffekt auf, während der negativen Halbwelle kann die vorher stark aufgeheizte Wolframelektrode wieder abkühlen. Somit sind bei der Wechselstromschweißung die Vorteile der beiden Gleichstrompolungsarten vereinigt. Da bei jedem Stromnulldurchgang der Lichtbogen erlischt (Abbildung 18), wurde früher üblicherweise mit einer Hochfrequenzüberlagerung (150 kHz bei $1500 \text{ bis } 2000 \text{ V}$) gearbeitet, um ein Wiederzünden des Lichtbogens zu erleichtern. Diese Geräte wurden inzwischen ersetzt durch Impulsgeneratoren, die nicht mehr konstant, sondern nur noch im Rhythmus der Netzfrequenz hochfrequente Spannungsimpulse abgeben (Abbildung 19) und somit z.B. den Rundfunk- oder Fernsehempfang in der näheren Umgebung weniger stören und dem gemäß nicht mehr bei der Bundespost angemeldet werden müssen.

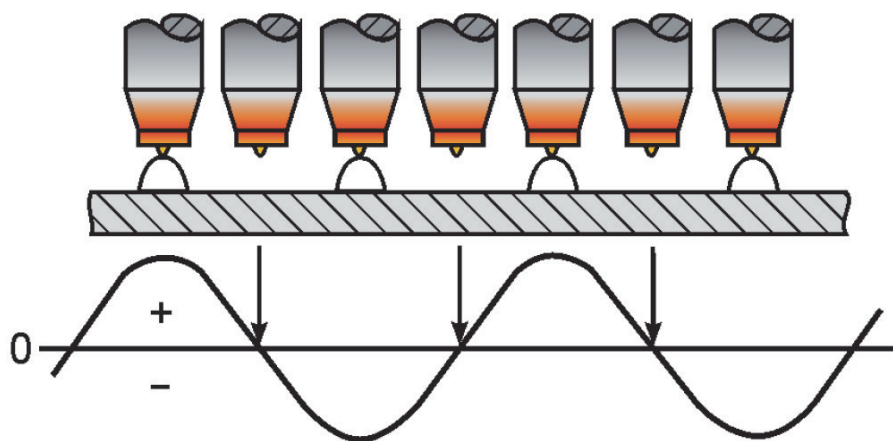


Abbildung 16: WIG-Lichtbogen bei Wechselstrom

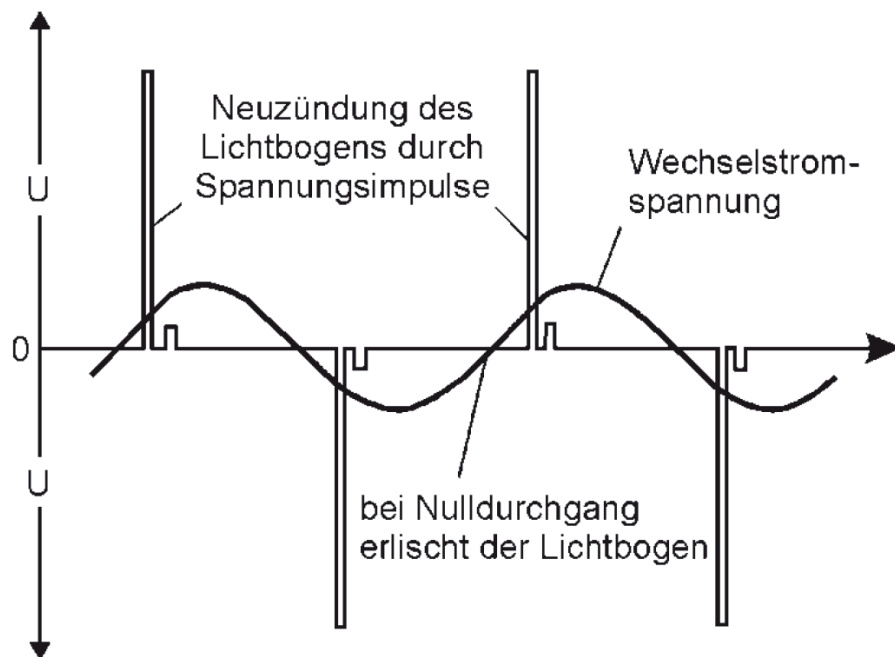


Abbildung 17: Impulsgenerator; Spannungsimpulse

Tabelle 5: Richtwerte für das WIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Wechselstrom

Werkstück- dicke mm	Fugen- form	Wolfram- Elektroden- durchmes- ser mm	Schweiß- strom *) A	Schweiß- stabdurch- messer mm	Argonver- brauch L/min	Lagenzahl
1	II	1,6	50 ... 60	2	4 ... 5	1
2	II	2,4	60 ... 90	2	5 ... 6	1
3	II	2,4	90 ... 150	3	5 ... 6	1
4	II	3,2	150 ... 180	3	6 ... 8	1
6	V	3,2	180 ... 240	4	8 ... 10	2
8	V	4,0	200 ... 280	4	8 ... 10	2
10	V	4,8	260 ... 350	5	10 ... 12	2 ... 3
12	V	6,4	320 ... 400	5	12 ... 14	3

*) Werte für Stumpfnähte; bei Kehlnähten sind sie um 10% bis 20% zu erhöhen.

11 WIG-Aluminiumschweißen mit Gleichstrom

Bei der Gleichstromschweißung treten aufgrund physikalischer Gegebenheiten an Anode (+) und Katode (-) unterschiedliche Temperaturen auf, Abbildung 18 und 19.

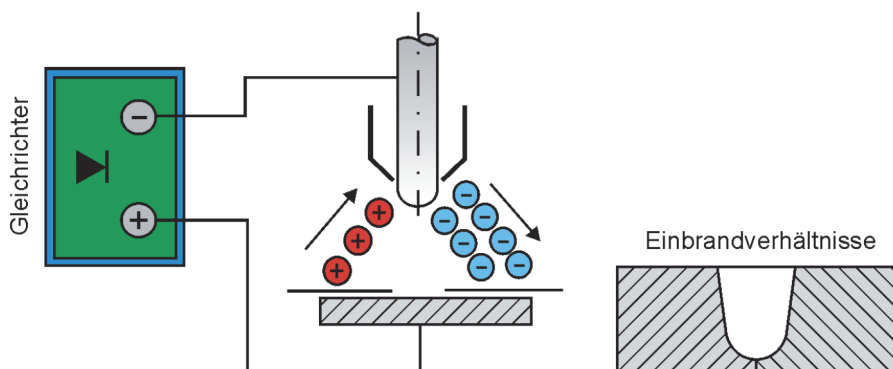


Abbildung 18: Gleichstromlichtbogen, Elektrode als Katode (-); Einbrandverhältnisse

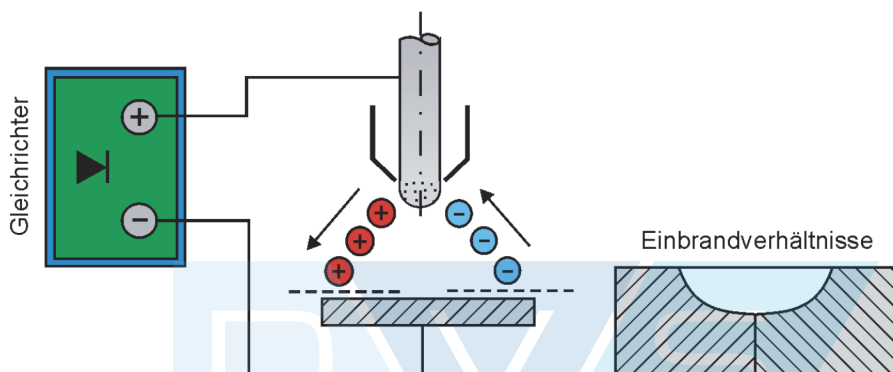


Abbildung 19: Gleichstromlichtbogen, Elektrode als Anode (+); Einbrandverhältnisse

Bei der in Abbildung 18 gezeigten Anordnung mit der Elektrode als Katode treffen die emittierten Elektronen auf dem als Anode gepolten Werkstück auf und erzeugen an der Auftreffstelle, durch Umwandlung von kinetischer Energie, viel Wärme und damit einen tiefen Einbrand. Die Elektrodenspitze wird hierbei vergleichsweise nur wenig erwärmt, da hier die Gasionen auftreffen, die zum einen im Vergleich zu den Elektronen zwar eine größere Masse aufweisen, zum anderen aber bei Weitem nicht so zahlreich und vor allem nicht so schnell wie die Elektronen sind. Die Oxidhaut wird bei dieser Polung nicht zerstört, sodass Verfahren mit dieser Polungsart zunächst für das Schweißen von Aluminium ungeeignet erscheinen.

Bei der in Abbildung 19 gezeigten Anordnung mit der Elektrode als Anode, treffen die emittierten Elektronen auf die Elektrode auf und erwärmen sie stark. Das als Katode gepolte Werkstück erwärmt sich vergleichsweise nur wenig. Es entsteht daher nur ein flacher Einbrand.

Bei dieser Polung tritt ein "Reinigungseffekt" auf, d.h. die Oxidhaut wird aufgerissen und entfernt. Dieser Effekt wird dadurch erklärt, dass die vergleichsweise schweren Ionen auf die Oxidhaut auftreffen und diese zerstören. Bei dieser Polung führt die hohe thermische Belastung der Wolframelektrode jedoch zu einer schnellen Zerstörung derselben.

Unter Verwendung dieser Polungsart werden vereinzelt Schweißungen durchgeführt, indem man für dünne Bleche unverhältnismäßig dicke Wolframelektroden einsetzt. Von technischer Bedeutung ist das WIG-Schweißen mit dieser Polungsart jedoch nicht. Bezüglich der WIG-Schweißung bei negativer Polung der Elektrode setzt sich in letzter Zeit eine Methode durch, bei der anstelle des sonst üblichen Inertgases Argon das Gas Helium verwendet wird. Dies ist in einigen besonderen physikalischen Eigenschaften dieses Gases begründet. Durch die im Vergleich zu Argon höhere Ionisationsenergie ergibt sich eine etwa 75% höhere Schweißspannung bei gleichen Stromstärkewerten (Abbildung 20) und damit auch eine größere Wärmezufuhr in das Werkstück. Die höhere Wärmeleitfähigkeit des Heliums ist ein weiterer Vorteil gegenüber dem Argon. Ein Nachteil beim Helium, hervorgerufen durch die schlechtere elektrische Leitfähigkeit, ist der unruhigere Lichtbogen und

das schwierigere Zünden beim WIG-Schweißen. In vielen Fällen ergeben Gemische aus Argon und Helium einen brauchbaren Kompromiss. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist noch zu berücksichtigen, dass Helium teurer ist als Argon, und dass aufgrund des geringeren spezifischen Gewichtes vergleichsweise mehr Helium als Argon zum Gasschutz eingesetzt werden muss.

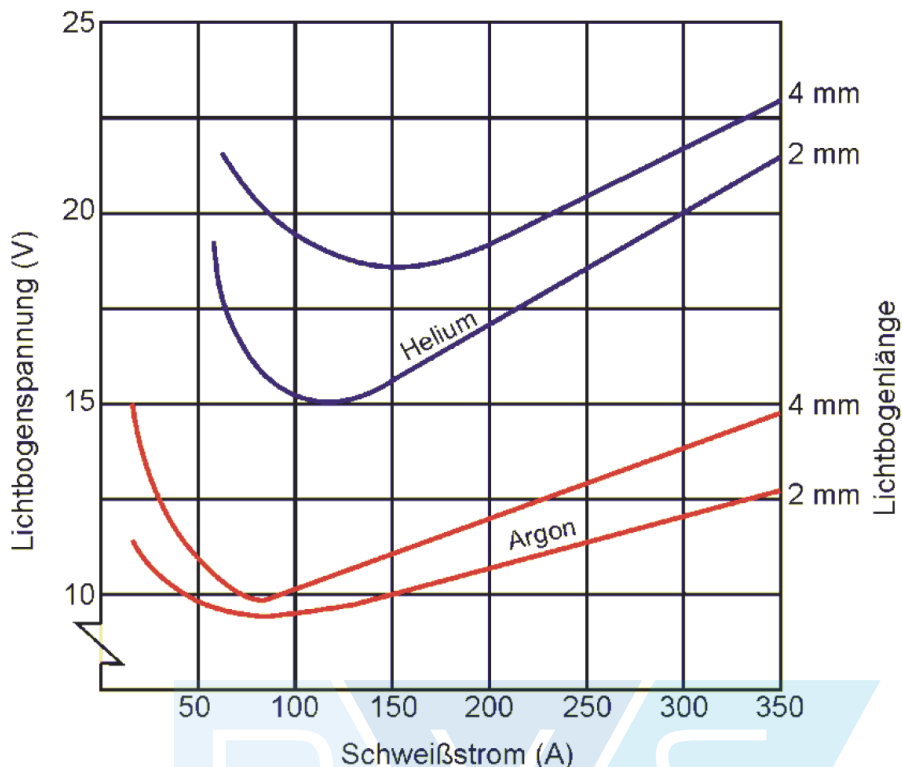


Abbildung 20: Verhältnis Lichtbogenlänge zu Schweißstrom bei Verwendung verschiedener Gase (nach Schöbel)

Die höhere Energieeinbringung mittels Helium ermöglicht höhere Schweißgeschwindigkeiten (Tabelle 6), geringere Vorwärmtemperaturen bei gleichem Einbrand (Abbildung 23) und eine geringere Porenneigung durch ein heißeres Schmelzbad mit geringerer Viskosität und besseren Entgasungsmöglichkeiten.

Tabelle 6: WIG-Schweißen von AlMg3, Doppel-V-Naht, 16 mm Blechdicke

Gasart	Schweißstrom (A)	Schweißspannung (V)	Schweißgeschwindigkeit (cm/min)
Argon	400	29	45
Argon + 30% Helium		30,5	50
Argon + 70% Helium		33	60

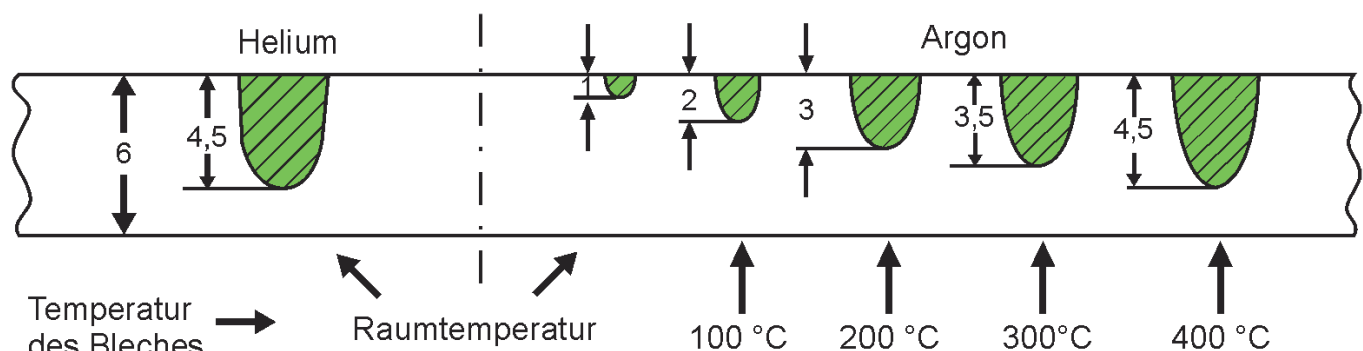


Abbildung 21: Beeinflussung des Einbrandes durch Vorwärmen

Man kann davon ausgehen, dass sich die WIG-Schweißung von Aluminiumwerkstoffen unter Verwendung von Helium in zunehmendem Maße durchsetzen wird, insbesondere bei der maschinellen Schweißung. In Tabelle 7 sind Richtwerte für das Schweißen mit Gleichstrom aufgeführt.

Tabelle 7: Richtwerte für die WIG-Schweißung von Aluminiumwerkstoffen mit Gleichstrom

Werkstückdicke mm	Fugenform	Wolframelektroden		Schweißstrom A	Schweißgeschwindigkeit cm/min	Heliumverbrauch l/min	Lagenzahl
		Ø mm	Grad				
1	II	1,6	90	85	120	15	1
2	II	2,4	90	110	100	15	1
3	II	2,4	90	150	80	15	1
4	II	2,4	90	180	80	15	1
5	II	2,4	90	200	70	20	1+1
6	II	3,2	90	220	70	20	1+1
8	II	3,2	60	265	60	25	1+1
10	II	4,0	60	320	50	25	1+1



12 Schweißnahtvorbereitung beim WIG-Aluminiumschweißen

Die Nahtvorbereitung ist genormt nach DIN EN ISO 9692-3. Tabelle 8 zeigt in Anlehnung an die Norm einige gebräuchliche Fugenformen.

Tabelle 8: Fugenformen für Stumpfnähte, einseitig geschweißt (Auszug aus DIN EN ISO 9692-3)

Schweißnaht					Fugenform					Empfohlener Schweißprozess ^c	Bemerkungen
Ref.-Nr. ^a	Werkstückdicke t	Benennung	Symbol ^b	Darstellung	Schnitt	Öffnungswinkel Flankenwinkel α, β	Stegabstand b	Steghöhe c	Andere Maße		
1.1	$t \leq 2$	Bördelnaht				—	—	—	—	141	
1.2	$t \leq 4$	I-Naht				—	$b \leq 2$	—	—	141	Brechung an der Wurzel-seite wird empfohlen.
	$2 \leq t \leq 4$	I-Naht mit Unterlage				—	$b \leq 1,5$	—	—	131	
1.3	$3 \leq t \leq 5$	V-Naht				$\alpha \geq 50^\circ$	$b \leq 3$	$c \leq 2$	—	141	
		V-Naht				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 2$		—	131	
		V-Naht mit Unterlage				$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$	$b \leq 4$	$c \leq 2$	—	131	

13 Schweißfehler

Bezüglich der Schweißfehler soll hier unterschieden werden zwischen allgemeinen Schweißfehlern durch falsche Brenner- und Stabführung, durch Mängel in der Werkstückvorbereitung und im Gasschutz und zusätzlichen Fehlern, die bei der Aluminiumschweißung auftreten. Entsprechende Angaben sind in Tabelle 9 bis 11 wiedergegeben.

Tabelle 9: Fehler durch Mängel in der Schweißnahtvorbereitung und im Gasschutz

Fehlerbild	Ursachen	Abhilfe
Oberfläche matt, Nahtränder rau, mangelhafter Fluss	mangelnde Vorbereitung von Nahtbereich und Schweißstab (nicht metallisch blank)	bürsten, schmirgeln, beizen, strahlen
Poren	Werkstück verschmutzt, Öl, Fett, Farbe, Feuchtigkeit	reinigen, Handschuhe sauber?
Oberfläche oxidiert, matt, mangelhafter Schmelzfluss	Luft im Argon, undichte Schläuche und Gasdüsen saugen Luft an, eingewirbelte Luft, Zugluft, Brennerabstand zu groß, Argonstrom zu stark	Kontrolle Argonweg, Brennerneigung, Zug, Ventilatorwind, Düsengröße, Argon l/min
weißlicher Rauch, Elektrodenspitze oxidiert	Argonmangel	
Unterseite Anlauffarben, grau verzundert, rau, verbrannt	mangelnde Wurzelspülung	
dunkle Niederschläge, Poren, unruhiger Lichtbogen	Wasserundichtigkeit im Brenner, Kondenswasser im Brenner	Brenner kontrollieren, Wassermagnetventil schließt während Schweißpausen nicht, Elektrode erneut vorbereiten
Lichtbogen flackert, Niederschlag von Metaldampf, geringerer Einbrand	verunreinigte Elektrodenspitze	

Tabelle 10: Allgemeine Fehler durch Brenner- und Stabführung

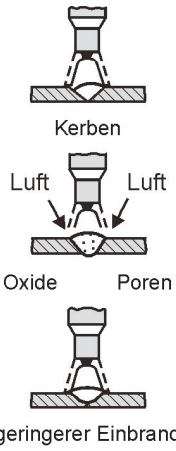
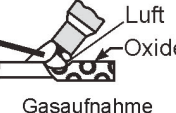
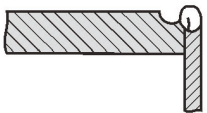
Fehler	mögliche Auswirkungen
 zu langer Lichtbogen	
 zu große Brennerneigung	
 Brenner verkantet	
 Brenner versetzt	
 Drahtende verlässt nach dem Abschmelzen den Schutzbereich	

Tabelle 11: Typischer Fehler beim WIG-Schweißen von Aluminiumwerkstoffen

Oxideinschlüsse	Ursachen
	zu wenig Schweißstrom – zu großer Spalt, untere Stegkante nicht gebrochen
	Nahtbereiche nicht gereinigt, das heiße Stabende wird nach dem Eintauchen aus dem Schutzgasbereich geführt und nach Reaktion mit dem Luftsauerstoff wieder in die Schmelze gebracht
 ohne Fugenvorbereitung, ohne Schweißzusatz	Reinigungswirkung des Lichtbogens reicht nicht wesentlich unter die Schmelzmulde
 beidseitig nacheinander geschweißt	I-Naht an zu dicken Werkstücken
	negative Vorgabe
 beidseitig gleichzeitig geschweißt	I-Naht an zu dicken Blechen
 Poren	eingebrachter Wasserstoff, Feuchtigkeit in Oxidschichten, Fett und Farbrückstände im Schweißbereich auf Staboberfläche, undichte Wasserkühlung, Kondenswasser im Brennerkopf (wenn Kühlwasserumlauf während Schweißpausen nicht unterbrochen wird) unstabiler Lichtbogen während des Schweißens, besonders an Ansatzstellen und beim Überschweißen von Heftstellen zu hohe Abkühlgeschwindigkeit: Poren im Übergang Naht - Grundwerkstoff werden durch nicht genügend entgasten Grundwerkstoff verursacht.

Eine Ursache für metallurgische Poren ist immer im Werkstoff gelöster und beim Schweißen aufgenommener Wasserstoff, der beim Erstarren der Schmelze nicht entweichen konnte. Der Grund hierfür liegt im Löslichkeitssprung für Wasserstoff bei Änderung des Aggregatzustandes fest (0,036 ml / 100 g Al) gegenüber flüssig (0,7 ml / 100 g Al-Schmelze) und weiterhin in der starken Zunahme der Löslichkeit der Schmelze bei steigender Temperatur auf etwa 50 ml / 100 g Al kurz vor Erreichen der Siedetemperatur. Dies bedeutet einen Anstieg der H₂-Löslichkeit vom Schmelz- zum Siedepunkt um das 70-fache, bei Stahl hingegen nur um das 1,6-fache, Abbildung 24. Insbesondere Reinst- und Reinaluminium neigen zur Porenbildung in der Schweißnaht. Das Ausgasen wird durch höhere Wärmeeinbringung (Vorwärmen 100 bis 250°C) und niedrigere Schweißgeschwindigkeit verbessert.

Die Vermeidung von Poren erfordert äußerste Sauberkeit hinsichtlich Fett, Öl, Feuchtigkeit u.Ä. im Bereich der Schweißnaht und beim Zusatzwerkstoff.

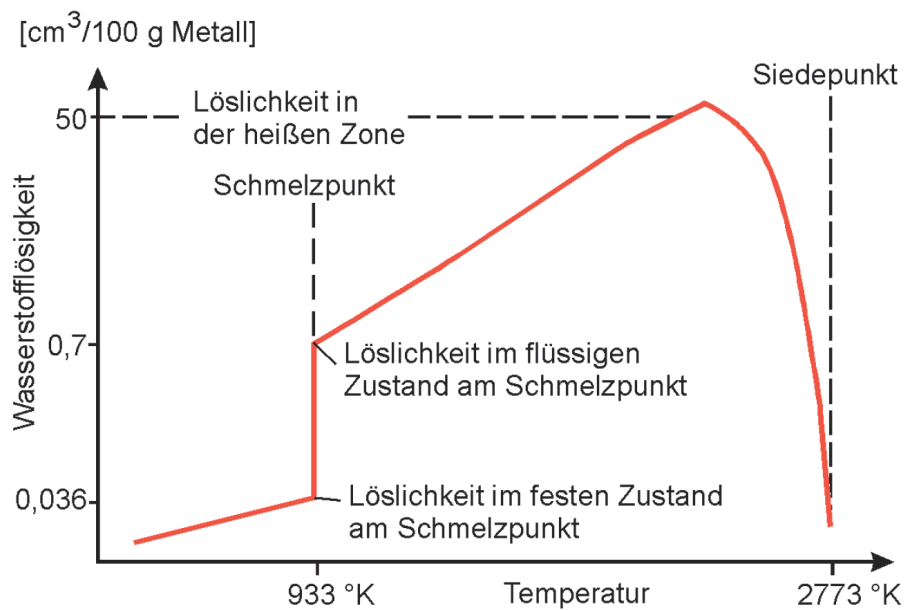


Abbildung 22: Die charakteristische H₂-Löslichkeit in Aluminium in Abhängigkeit von der Temperatur



14 Varianten des WIG-Schweißens

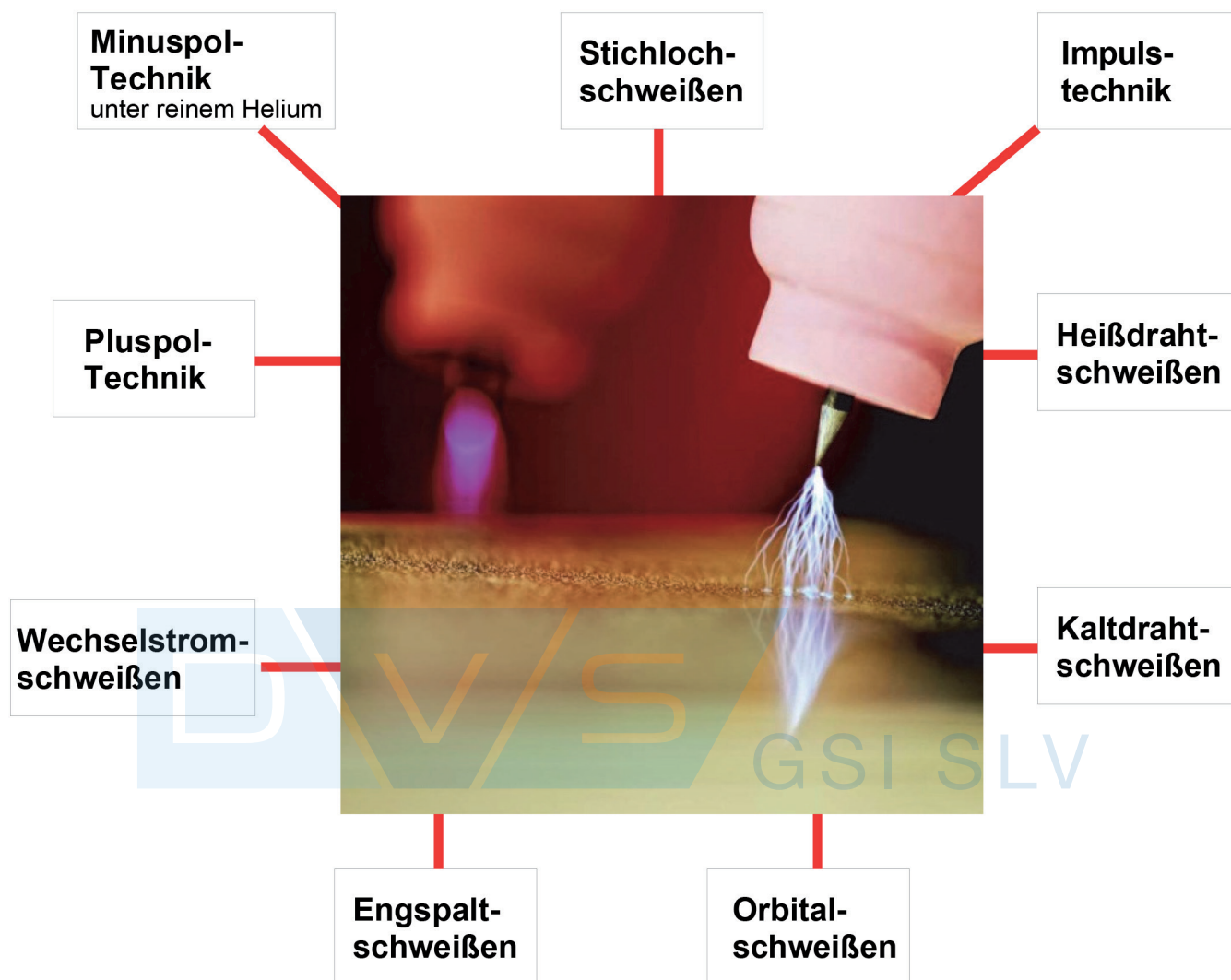
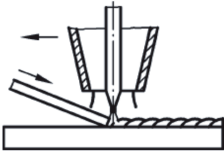
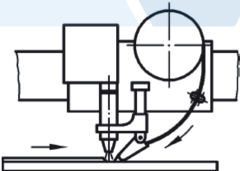
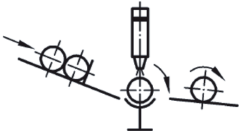


Abbildung 23: Verfahrensvarianten des WIG-Schweißens

14.1 Mögliche Mechanisierungsgrade des WIG-Schweißen

- Handschweißen
- teilmechanisches Schweißen
- vollmechanisches Schweißen
- automatisches Schweißen

Tabelle 12: Beispiele für die Einteilung nach dem Grad der Mechanisierung (Auszug aus DIN 1910-100:2008-02)

Benennung	Wolfram-Inertgasschweißen	Bewegungs-/ Arbeitsabläufe		
Kurzzeichen	WIG (141)	Brenner-/ Werkstückführung	Zusatzvorschub	Werkstückhandhabung
Handschweißen (manuelles Schweißen)		manuell	manuell	manuell
teilmechanisches Schweißen		manuell	mechanisch	manuell
vollmechanisches Schweißen		mechanisch	mechanisch	manuell
automatisches Schweißen		mechanisch	mechanisch	mechanisch

15 Verfahrensvarianten des WIG-Schweißens

15.1 WIG-Impulsschweißen

Das WIG-Impulslichtbogenschweißen, das ein nur durch Stromart modifiziertes, relativ neues Lichtbogenschweißverfahren ist, unterscheidet sich gerätetechnisch vom WIG-Gleichstromschweißen lediglich durch eine spezielle Stromquelle, in der z.B. sinusförmige oder rechteckige Gleichspannungs- bzw. Gleichstromimpulse mit einstellbaren Impulsparametern (Impulsamplitude, Impulsfrequenz, Tastverhältnis) erzeugt werden.

Beim Pulsen wird während des Impulses mit hohem Strom der Schweißstelle viel Wärme zugeführt. Der Werkstoff wird aufgeschmolzen.

In der Impulspause mit niedrigem Strom wird nur wenig Wärme in das Werkstück eingebracht. Das Schweißbad bleibt vergleichsweise kalt. Die niedrigen Ströme in der Grundzeit dienen nur zum Erhalten des Lichtbogens, um Unterbrechungen und Zündschwierigkeiten zu vermeiden.

Beim Schweißen mit Zusatzwerkstoff wird dieser wie der Grundwerkstoff in der Impulsphase aufgeschmolzen. Die Impulsfrequenz liegt üblicherweise zwischen 0,5 und 10 Hz.

Die Wärmeführung kann in weiten Grenzen durch die Wahl der Zeiten und Stromwerte verändert werden.

Eine Schweißnaht kann im Extremfall aus nebeneinanderliegenden, sich überlappenden Schmelzschweißpunkten bestehen.

Mithilfe des WIG-Impulslichtbogenschweißens kann der Anwendungsbereich des WIG-Verfahrens zu niedrigen Leistungen und Werkstoffdicken hin ausgeweitet und das Schweißnahtaussehen nochmals verbessert werden.

- Die wesentlichen Schweißparameter sind: Impulsstromstärke I_p
- Grundstromstärke I_G
- Impulsstromzeit t_p
- Grundstromzeit t_G
- Impulsfrequenz $f_p = 1/t_c$ (t_c = Periodendauer)

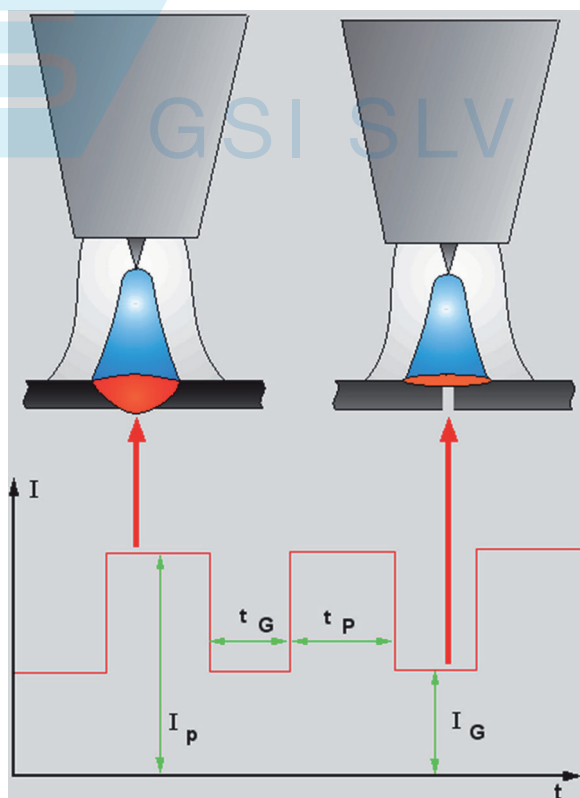


Abbildung 24: Schweißparameter

Im Vergleich des WIG-Schweißens mit gleichförmigen zum pulsformigen Lichtbogen zeigen sich nachstehende Vor- und Nachteile.

Vorteile des WIG-Impulslichtbogenschweißens:

- Möglichkeiten der geringeren Energieeintragsleistung
- besseres Tiefen-/Breitenverhältnis bei größeren Wanddicken
- stabilerer Lichtbogen
- gleichmäßigere Wurzel Ausbildung
- bessere Zwangslageneignung
- geringerer Verzug der Werkstücke
- bessere Modellierbarkeit des Schmelzbades
- bessere Spaltüberbrückbarkeit

Nachteile:

- Schweißgeräte sind teurer
- Einstellung der Geräte ist schwieriger



15.2 WIG-Schweißen mit Zusatzdraht

Immer wenn beim Schweißen eine Fuge gefüllt werden muss, z.B. eine Y-Naht oder eine Kehlnaht geschweißt wird, oder eine ausreichende Naht- und Wurzelüberhöhung gefordert wird, ist Zusatzwerkstoff erforderlich.

15.2.1 WIG-Schweißen mit Kaltdraht

Schweißen mit Kaltdraht ist die häufigste WIG-Anwendung. Dabei kann der Zusatzdraht manuell oder mechanisch zugeführt werden. Durch die Trennung von Lichtbogenwärme und Zusatzdraht wird beim WIG-Schweißen der Draht erst zugeführt, wenn sich ein ausreichend großes Schweißbad gebildet hat. Eine hohe Nahtqualität ist dadurch erreichbar. Anfangsbindefehler und Kaltstellen können damit sicher vermieden werden. Die Anwendungen des WIG-Schweißens liegen deshalb meistens bei hohen Anforderungen an die Schweißnaht, beim Dünnblech- und Wurzelschweißen. Nachteilig ist beim Kaltdrahtschweißen die begrenzte Abschmelzleistung. Die Vorschubgeschwindigkeit des Kaltdrahtes kann nur in einem begrenzten Bereich störungsfrei eingestellt werden (etwa von 0,2 bis 1,0 m/min). Ist die Kaltdrahtgeschwindigkeit zu klein, so schmilzt der Draht nicht gleichmäßig ab. Ist die Geschwindigkeit zu hoch, kann der Lichtbogen den Draht nicht vollständig aufschmelzen.

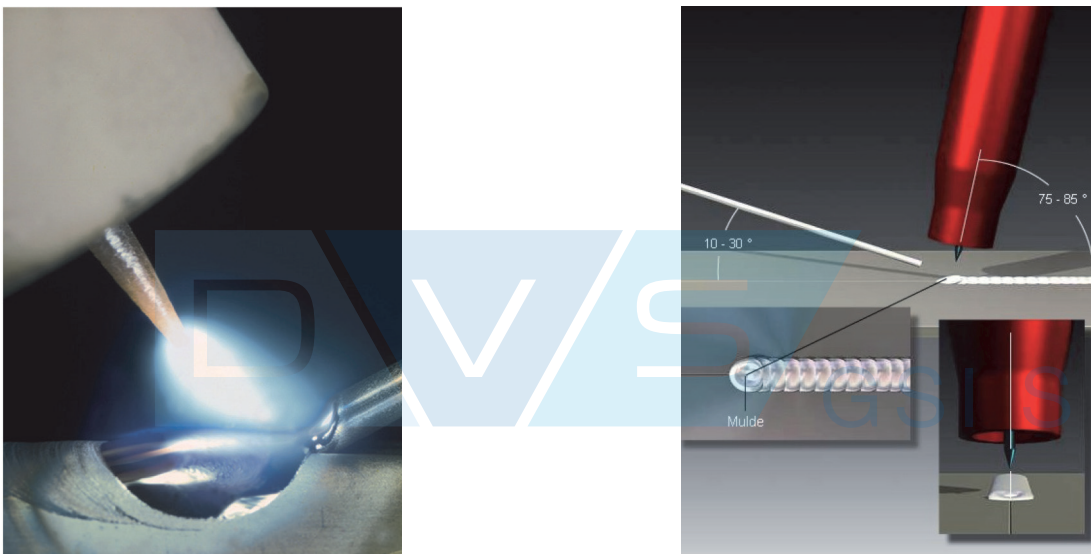


Abbildung 25: WIG-Schweißen mit Kaltdraht

15.3 WIG-Schweißen am drehenden Bauteil

Bei sich drehendem Rohr und feststehendem Brenner kann oft eine konventionelle vollmechanische WIG-Schweißanlage mit gesteuertem Drehtisch eingesetzt werden. Da die Wurzelschweißung, wie auch die folgenden Raupen vom Nahtanfang bis Nahtende fehlerfrei sein sollen, ist eine Ablaufsteuerung unbedingt erforderlich.

Kleine Rohrdurchmesser und Rohrwerkstoffe mit guter Wärmeleitung erhöhen die Vorwärmtemperatur an der Schweißstelle kontinuierlich. Dies erfordert laufend unterschiedliche Schweißdaten. Eine Programmsteuerung, die jeweils die erforderlichen Schweißdaten aufruft, ist zu empfehlen.

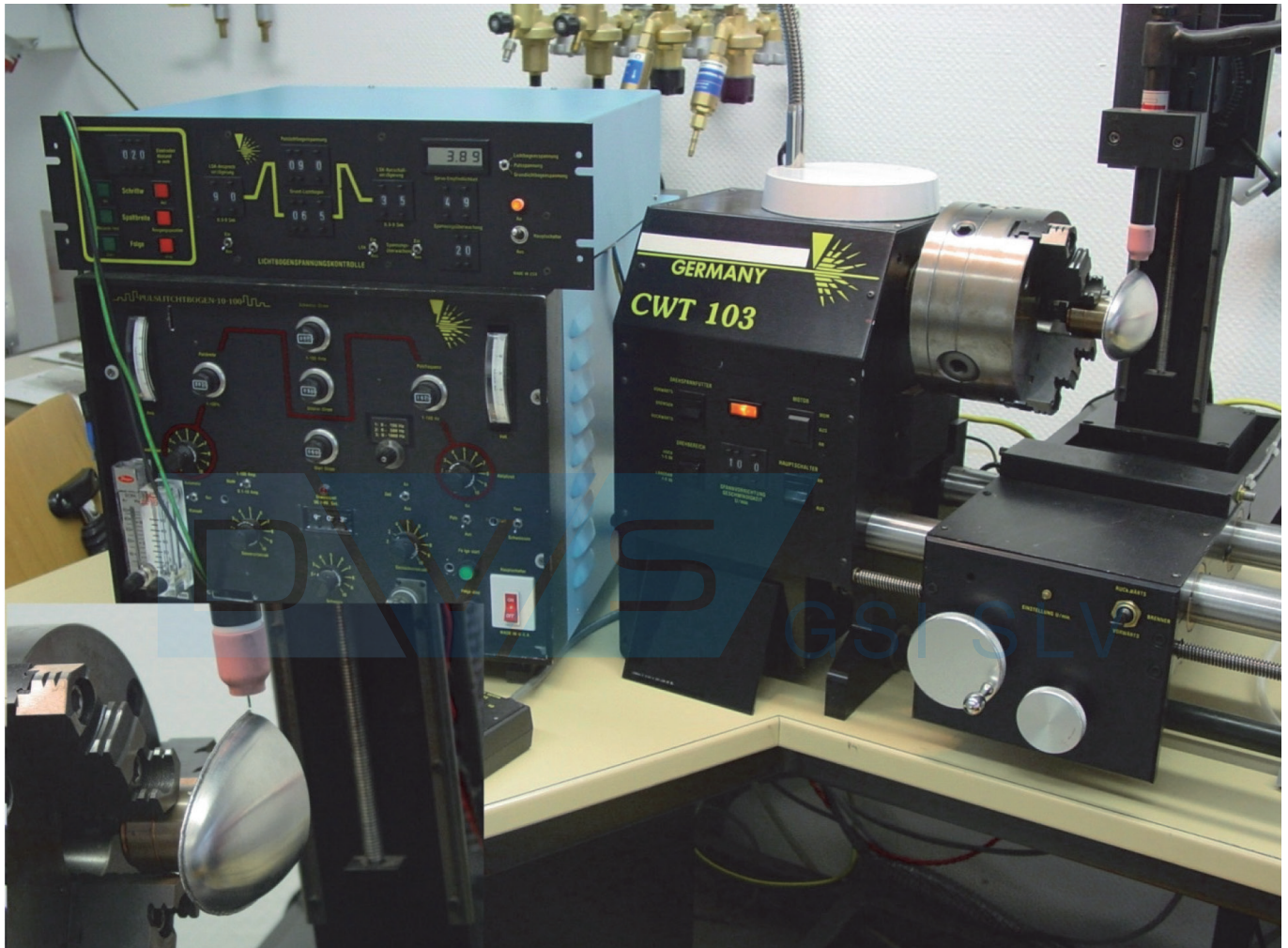


Abbildung 26: WIG-Schweißen am drehenden Bauteil

15.4 WIG-Orbitalschweißen

Wie beim Schweißen mit drehendem Rohr, werden bei feststehendem Rohr und umlaufendem Brenner beim Orbitalschweißen Rohrdurchmesser von < 10 mm bis > 1000 mm und Rohrwanddicken von wenigen zehntel Millimetern bis zu 50 mm und mehr miteinander verbunden.

Auch die schweißbaren Werkstoffe sind vielfältig. Unlegierte, niedrig legierte, warmfeste, hochfeste und korrosionsbeständige hoch legierte Stähle werden mit dem WIG-Verfahren verbunden. Auch Verbindungen von Nickelbasiswerkstoffen, Cu- und Al-Legierungen sind möglich. Dies erfordert in der Regel aufwendige Schweißmaschinen, um die meistens hohen Qualitätsanforderungen zu erreichen.

Dünnwandige Rohre und Rohre mit sehr kleinen Abmessungen werden oft ohne Zusatzwerkstoff geschweißt (auch Wurzelschweißen an dickeren Rohren). Bei größeren Rohren wird das WIG-Schweißen mit Kalt- oder Heißdraht eingesetzt.



Abbildung 27: Stationäre Vorrichtung zur Vorbereitung und zum Orbitalschweißen von Rohren (ohne Zusatzdraht)
Foto: Protem



Abbildung 28: Orbitalschweißen ohne Zusatzdraht
Foto: Protem

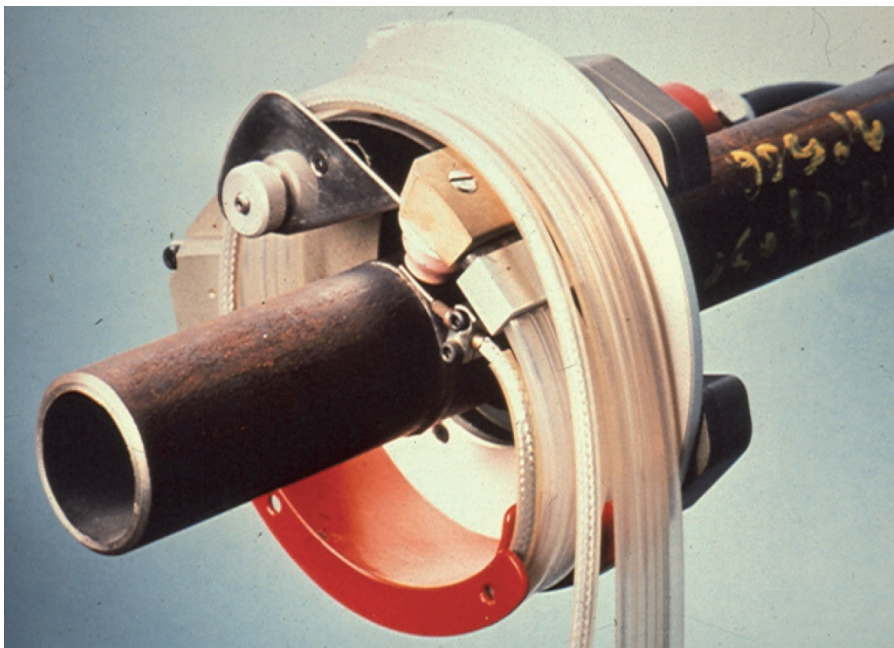


Abbildung 31: Offene Schweißzange mit Kaltdrahtzufuhr

Beim WIG-Orbitalschweißen ändert sich laufend die Schweißnahtposition (z.B.: von waagrecht nach fallend, überkopf und steigend). Diese Änderungen der Nahtposition erfordern bis zu 40 unterschiedliche Schweißdateneinstellungen bei einem Umlauf. Anlagen mit diesen Möglichkeiten sind entsprechend teuer und erfordern große Erfahrung beim Programmieren. Die Schweißköpfe können einfache Zangen aber auch aufwendige Konstruktionen sein, die alle Funktionen des Schweißvorgangs ferngesteuert auf kleinstem Raum ermöglichen.



Abbildung 30: Geschlossene Orbitalzangen verschiedener Durchmesser (ohne Schweißzusatz)



Abbildung 31: Orbitalschweißkopf für größere Rohrdurchmesser Foto: Fronius

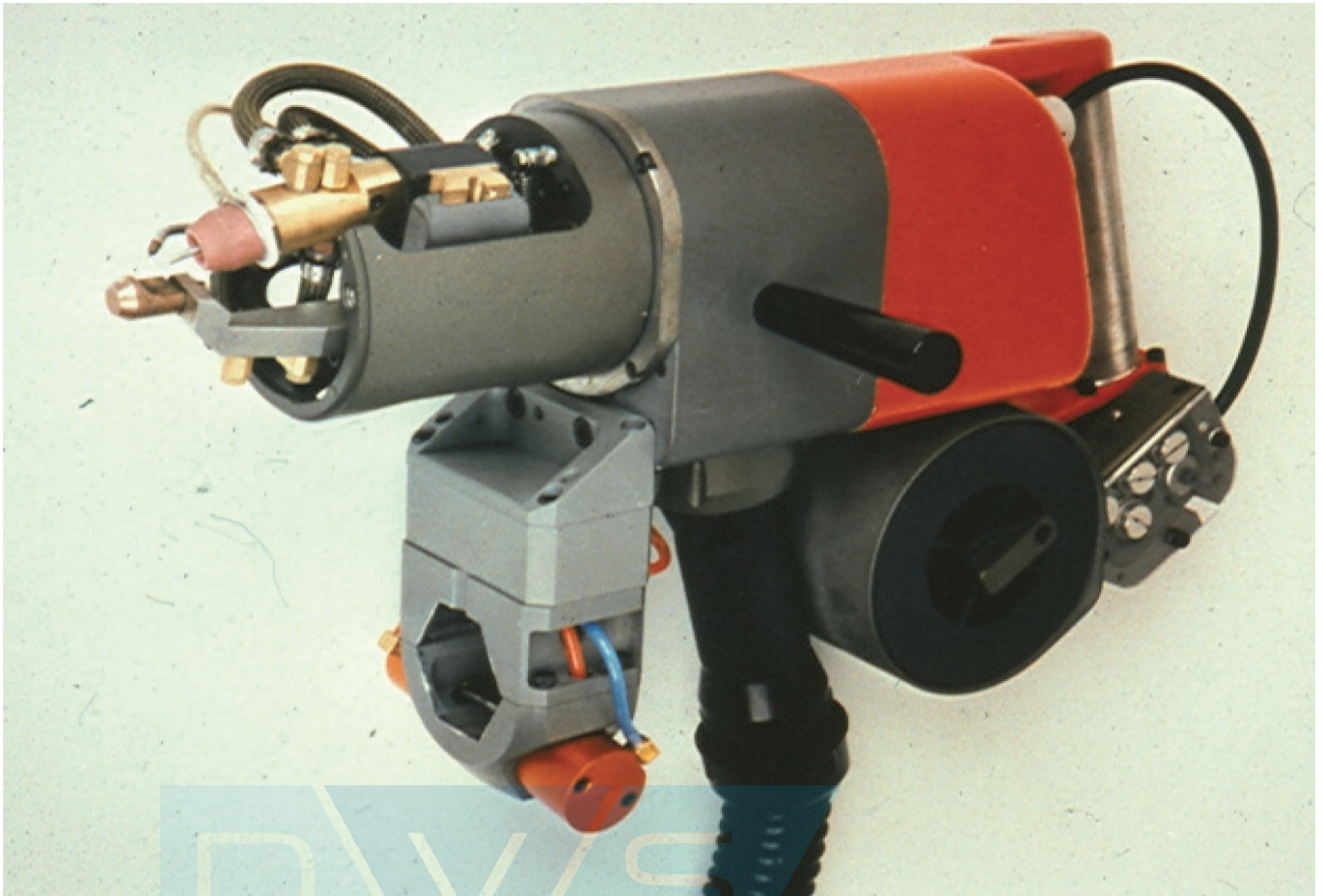
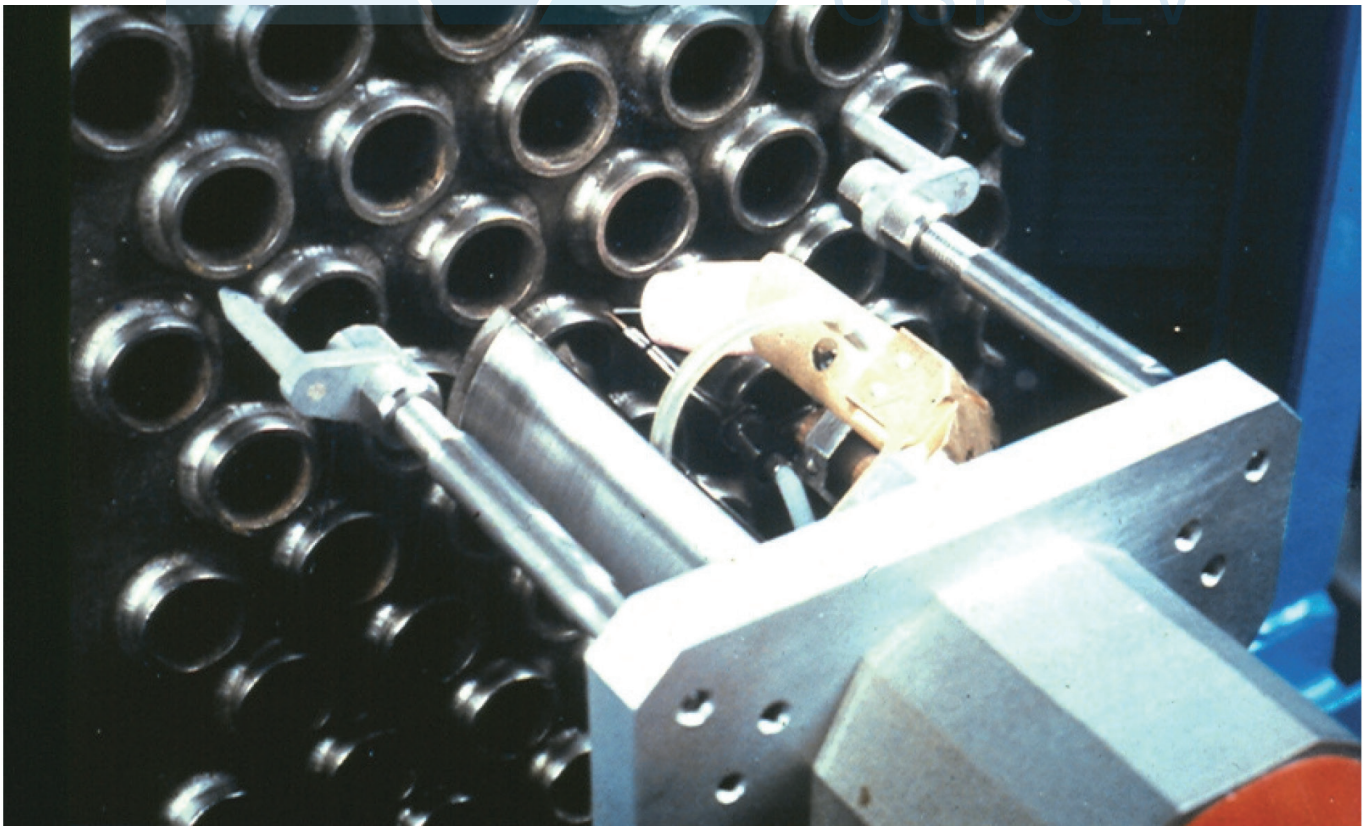


Abbildung 32: WIG-Rohreinschweißzange mit Zusatzdraht – unten im Einsatz



15.5 WIG-Orbital-Engspaltschweißen

In der industriell eingesetzten Fügetechnik gewinnt das WIG-Schweißen von dickwandigen Werkstücken mit dem Orbitalverfahren (der Brenner wird um ein feststehendes Werkstück bewegt) oder bei der Vorfertigung am drehenden Werkstück mit feststehendem Brenner zunehmend an Bedeutung. Da bei wachsenden Werkstückabmessungen auch die Wanddicken zunehmen, ist eine bestimmte Werkstückgröße als Grundvoraussetzung für das Engspaltschweißen anzusehen. Der bei den Engspaltschweißen anfallende hohe Vorbereitungsaufwand kann nur beim Vorliegen einer entsprechenden Werkstückdicke gerechtfertigt werden. Wie die Praxis zeigt, lohnt sich der Einsatz des Engspaltschweißens erst ab Werkstückdicken von mehr als 25 mm. Im Vergleich zum konventionellen WIG-Prozess lassen sich mit dem Engspaltschweißen bei Wanddicken von 60 mm und mehr Verkürzungen der Schweißzeit um den Faktor 5 bis 10 erreichen, denn es muss nicht nur weniger Metall abgeschmolzen werden, um den engeren Spalt zu füllen, sondern auch die Abschmelzleistung selbst lässt sich durch Einsatz des Heißdrahtschweißens beträchtlich steigern. Um das WIG-Engspaltschweißen überhaupt einzusetzen, ist die Einhaltung bestimmter Toleranzen bei der mechanischen Bearbeitung zur Vorbereitung der Schweißnähte und bei der Positionierung der Werkstücke zwingend erforderlich.

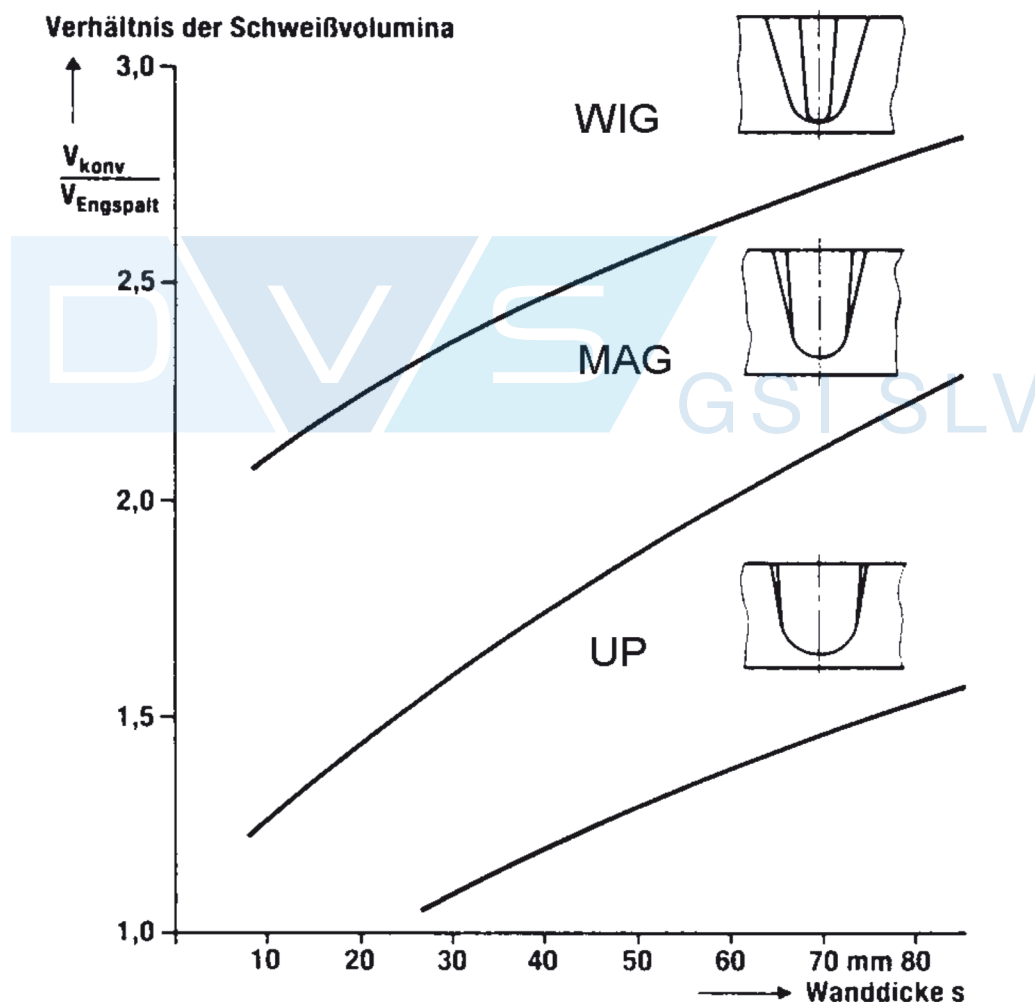


Abbildung 33: Vergleich der Ersparnis an Nahtvolumen durch die WIG/MAG/UP-Engspaltschweißung

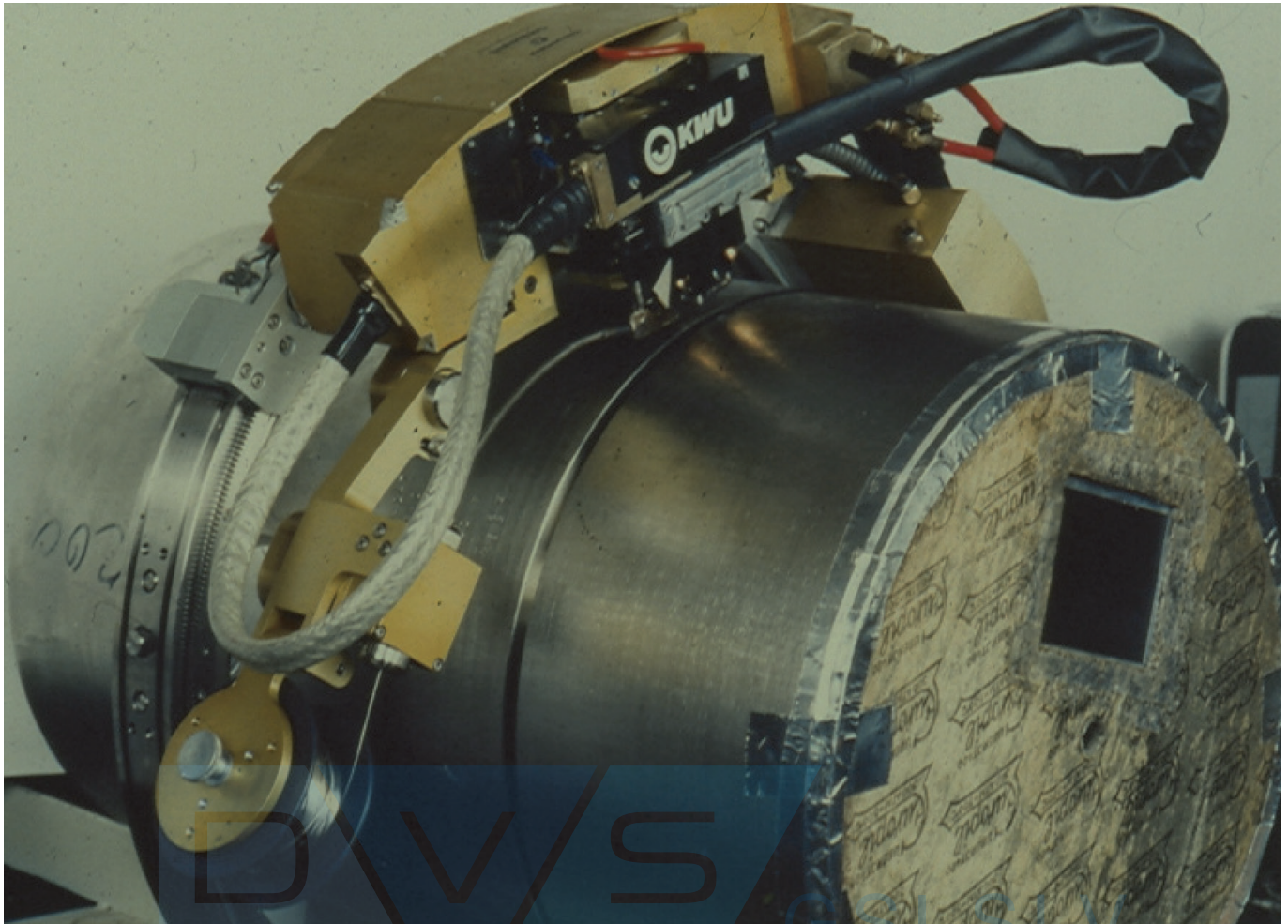


Abbildung 34: Schweißkopf WIG-Orbital-Engspaltschweißen

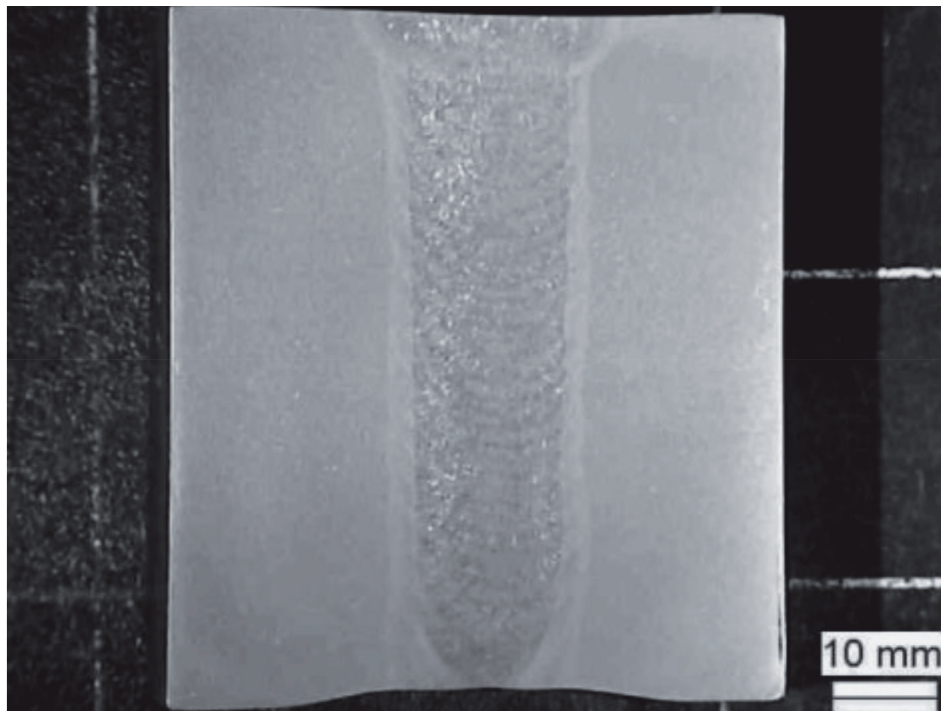


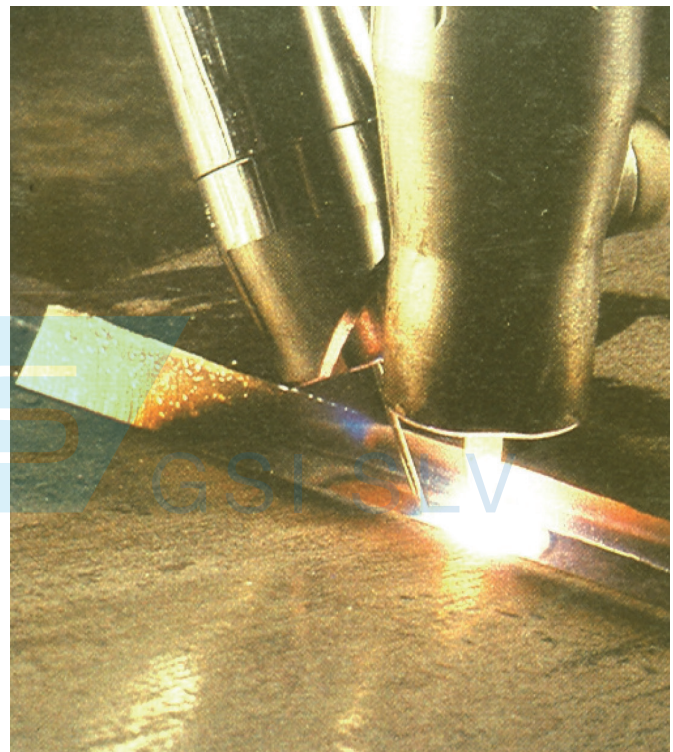
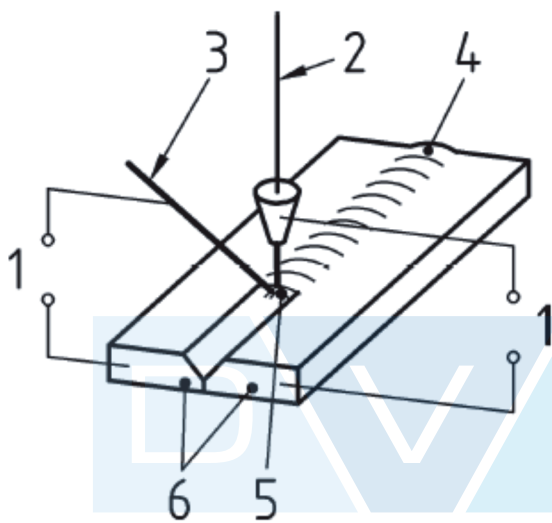
Abbildung 35: Makroschliff an 10CrMo9-10 (1.7380)

15.6 WIG-Heißdrahtschweißen

Der Draht wird durch eine zusätzliche Stromquelle bis zum Schmelzpunkt erhitzt und kann deshalb – ohne vom Lichtbogen nennenswert Wärme abzuziehen – vom Schweißbad aufgenommen werden. Die Erhitzung des Schweißzusatzwerkstoffes erfolgt durch Widerstandserwärmung, ohne dass ein weiterer Lichtbogen entsteht.

Vorteil:

- Hohe Abschmelzleistung
- Hohe Schweißgeschwindigkeit
- Geringe Gefahr von Binderfehlern
- Niedrige Aufmischung des Grundwerkstoffes
- Höhere Abschmelzmenge bei gleichem Schweißstrom (30 bis 50%)
- Einfacheres Schweißen in Zwangslagen
- Kleine Wärmeeinflusszone



Legende:

- 1 = Stromquelle
- 2 = Wolframelektrode
- 3 = Drahtelektrode, stromführend
- 4 = Schweißnaht
- 5 = Lichtbogen
- 6 = Werkstück

Abbildung 36: WIG-Heißdrahtschweißen

15.7 WIG-Mehrkathodenschweißen

Diese Variante (ein Brenner mit mehreren Elektroden) wird z.B. beim Herstellen von dünnwandigen Rohren eingesetzt. Aus Blechen werden Rohre geformt und diese längsnahtgeschweißt.

Für eine wirtschaftliche Fertigung sind sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten erforderlich. Dies kann durch die Anordnung mehrerer WIG-Schweißbrenner in einer Reihe mit geringem Abstand zueinander, bzw. mit Sonderbrennern, bei denen mehrere Elektroden isoliert zueinander angeordnet sind, erreicht werden.

Schweißgeschwindigkeiten von 10 bis 20 m/min werden erreicht, ein Vielfaches der mit Einzelbrennern erzielbaren Werte.

Diese Verfahrensvariante erfordert Sondermaschinen und ist nur wenig verbreitet.

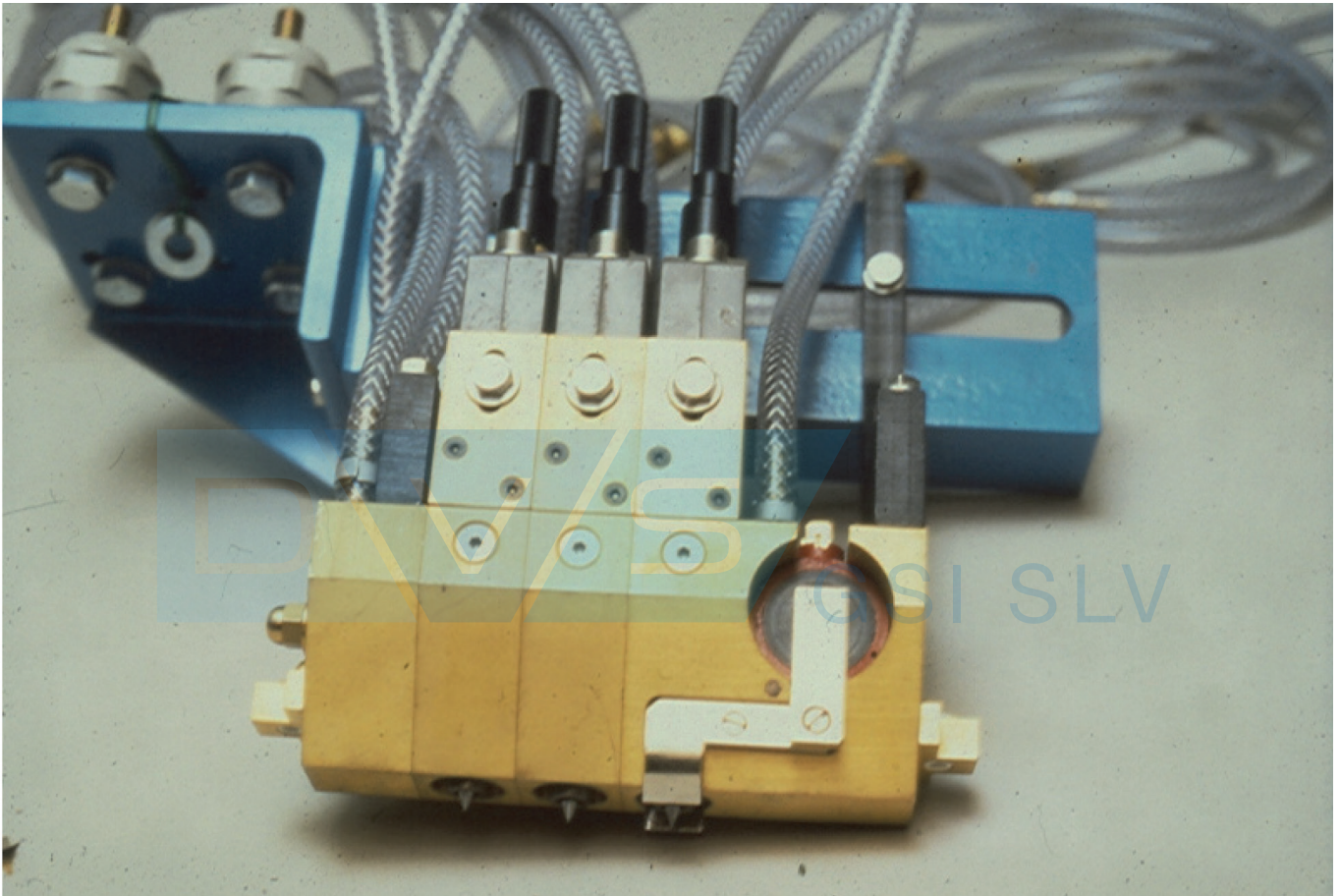


Abbildung 37: WIG-Mehrkathodenschweißen

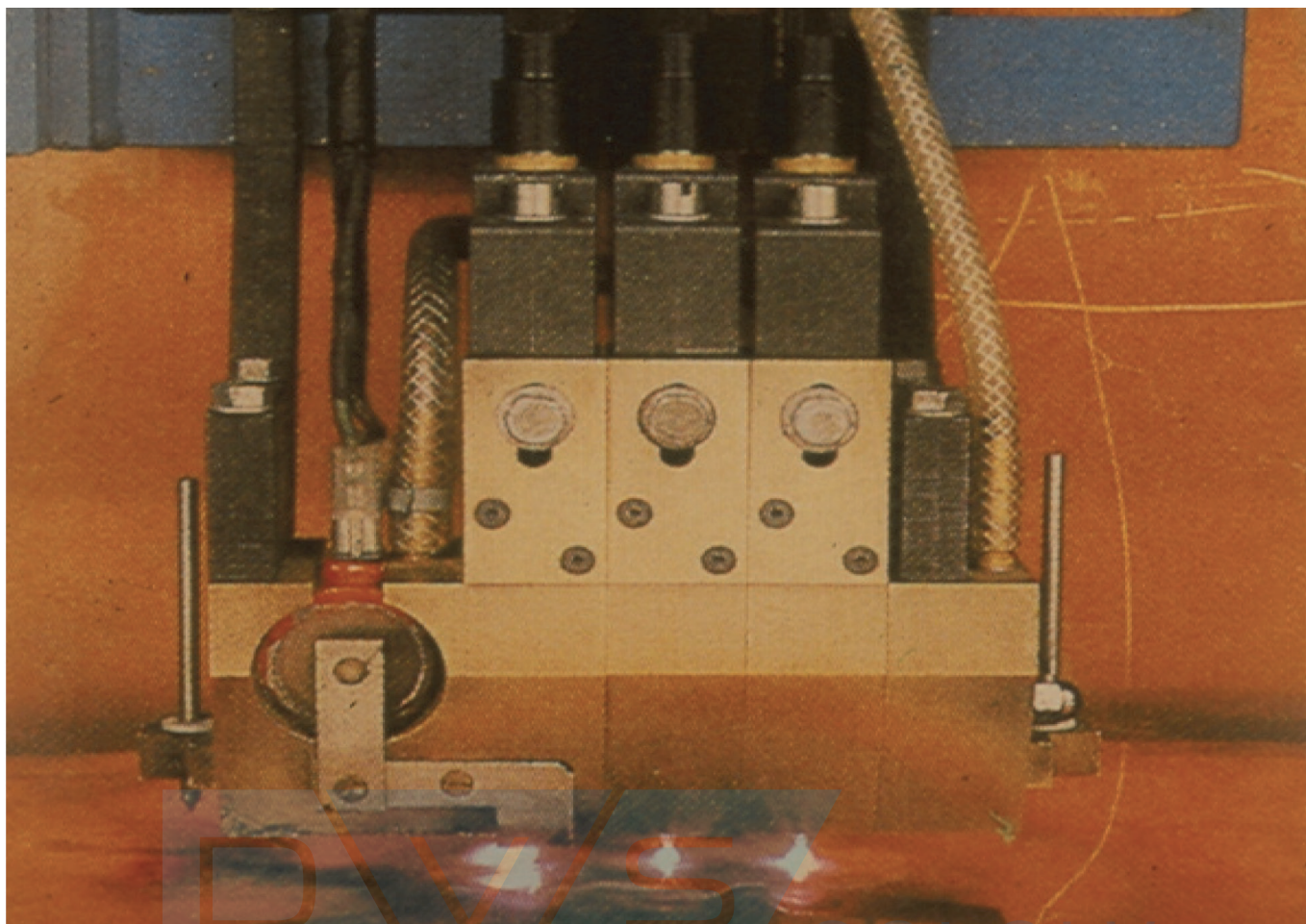


Abbildung 38: WIG-Mehrkathodenschweißen

15.8 WIG-Schweißen mit einer Doppelgasdüse

Dieses Verfahren wird nur wenig in der Praxis eingesetzt. Durch unterschiedliche Gaszusammensetzungen im äußeren und inneren Gasmantel sollen bestimmte Gasgemische erreicht werden, um wirtschaftliche und qualitative Verbesserungen zu erzielen.

Stabile Gaszusammensetzungen werden aber bei wechselnden Randbedingungen oft nicht erreicht.

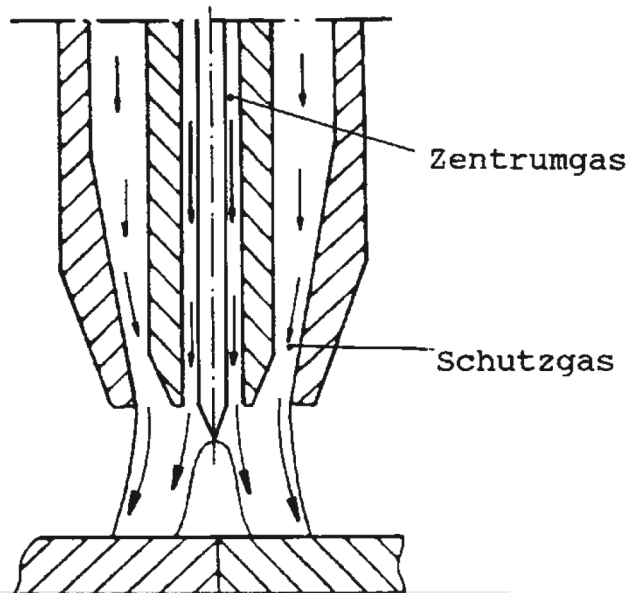


Abbildung 39: WIG-Schweißen mit einer Doppelgasdüse

15.9 WIG-Punktschweißen

Das WIG-Punktschweißen soll zwei übereinanderliegende dünne Bleche durch einen Schweißpunkt (mit oder ohne Zusatzwerkstoff) miteinander verbinden. Eine Verbindung, vergleichbar mit den Widerstandspunktschweißen soll erreicht werden. Ist dabei kein ausreichend großes Loch im Oberblech vorhanden, so können geringste Störungen, z.B.:

- Spalt zwischen Ober- und Unterblech
- Verschmutzungen
- Beschichtungen

den Schweißprozess so stark beeinflussen, dass es zu einer schlechten, bis hin zu keiner Verbindung der beiden Bleche kommt. Mit Loch im Oberblech (ca. 5 mm) und Zusatzwerkstoff sind bei kurzer Schweißzeit (um eine Sekunde) gute Verbindungen möglich. Die Vorteile, einseitige Zugänglichkeit und Spritzerfreiheit, werden durch hohen Aufwand und geringe Wirtschaftlichkeit geschmälert.

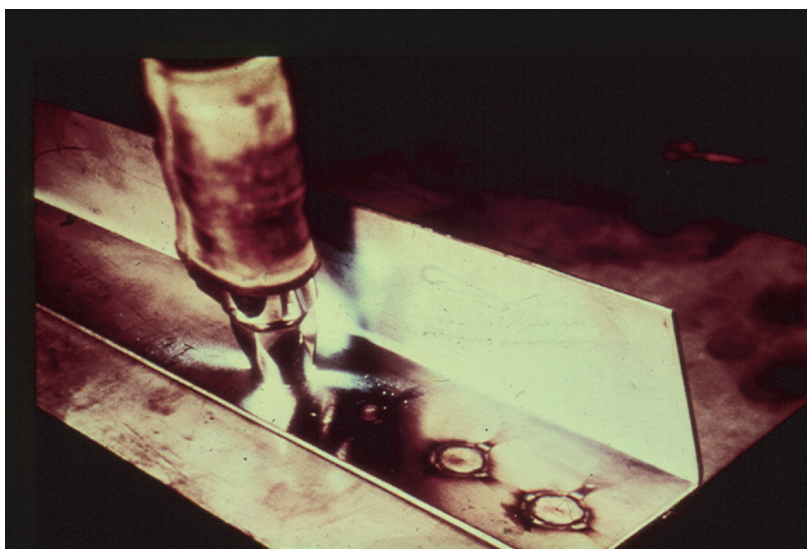
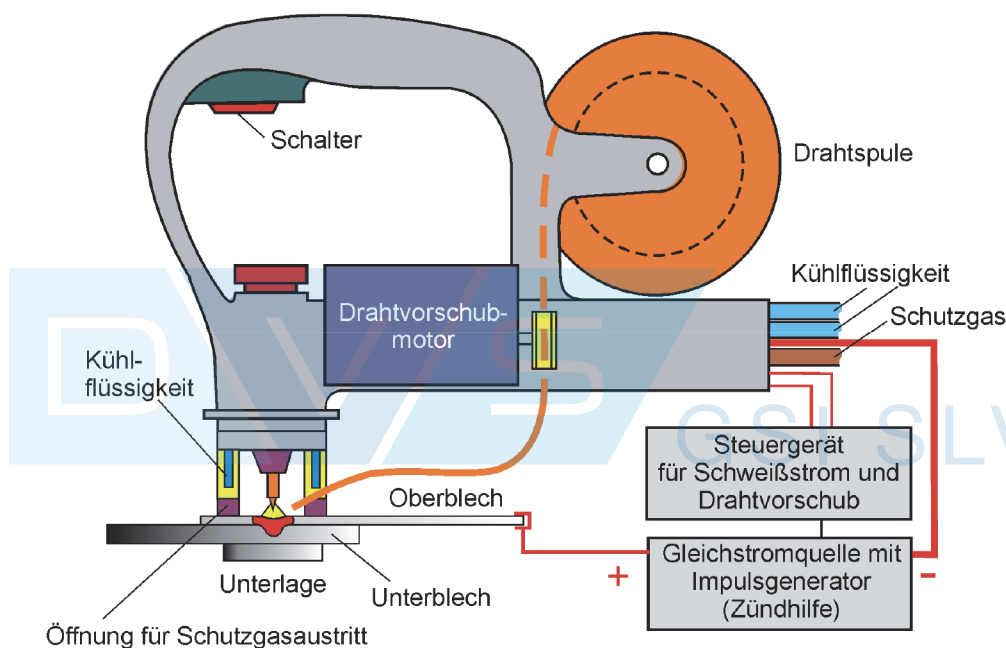


Abbildung 40: WIG-Punktschweißen

15.10 WIG-Schweißen mit zwei Brennern gleichzeitig

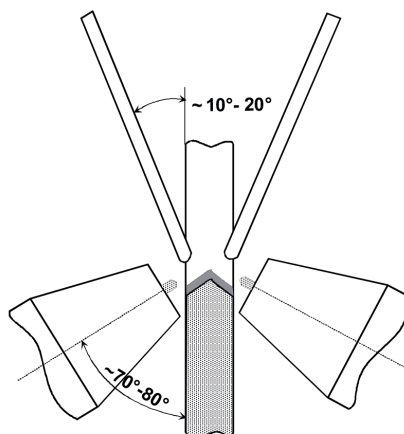


Abbildung 41: WIG-Schweißen mit zwei Brennern gleichzeitig

Das beidseitig gleichzeitige WIG-Schweißen wird von 2 Schweißern in einer Raupe möglichst in der Position PF durchgeführt. Auch andere Schweißpositionen sind möglich. Die Anwendung in Pos. PA ist schwierig. Der Schweißstab (Zusatzwerkstoff) muss nicht von beiden Seiten zugeführt werden. Besonders beim Schweißen von dicken Aluminiumwerkstoffen darf der Spalt nicht zu klein sein, sonst besteht die Gefahr, dass die Stegflächen nicht zu Lichtbogenansatzstellen werden (kein Reinigungseffekt) und dadurch Oxideinschlüsse entstehen.

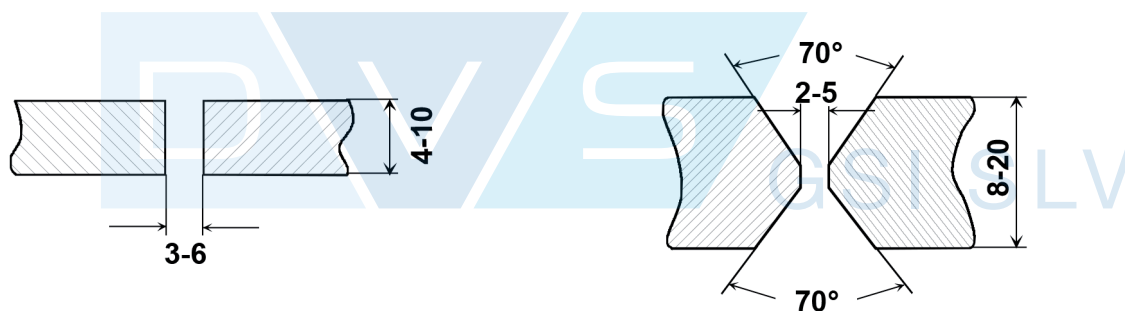


Abbildung 42: Nahtvorbereitung für das beidseitig gleichzeitige WIG-Schweißen von Stumpfnähten

Die wichtigsten Vorteile beim Schweißen mit 2 WIG-Lichtbögen gleichzeitig sind:

- einfache I-Nahtvorbereitung an Werkstücken bis zu 10 mm Dicke
- Spalte (Stegabstände) bis zur Werkstückdicke können beherrscht werden.
- Poren, Bindefehler oder Oxideinschlüsse sind bei geeigneter Nahtvorbereitung und geübten Schweißern fast ausgeschlossen.
- Auch bei gut wärmeleitfähigen Werkstoffen ist meistens keine Vorwärmung nötig.
- kein Winkelverzug (symmetrische Raupe) und schmale Nähte
- günstig für Reparaturschweißungen in Zonen mit größeren Spalten nach der Fehlerentfernung

Beim Schweißen mit **Wechselstrom** ist wichtig, dass die Stromquellen so geschaltet sind, dass in beiden Lichtbögen Phasenlage und Frequenz gleich sind. Bei Stromquellen ohne feste Frequenzen sind die Forderungen schwierig zu erfüllen. Sind die Stromrichtungen beider Lichtbögen verschieden, ist die Leerlaufspannung über einen zulässigen Wert und der Lichtbogen wirkt zumindest teilweise von Wolframelektrode zu Wolframelektrode, sodass der Reinigungseffekt und die Lichtbogenwirkung erheblich gestört werden.

15.11 WIG-Stichlochschiweißen

Seitens der Industrie besteht ein erhöhter Bedarf an effizienteren Fügeverfahren zum stoffschlüssigen Verbinden unter Beibehaltung der Werkstoffeigenschaften speziell in der Fügezone. Beim WIG-Stichlochschiweißen bestehen Vorteile und Einsparungsmöglichkeiten hinsichtlich der Schweißnahtvorbereitung ab einer Blechdicke von $d = 3$ bis 12 mm und der Anzahl der zu schweißenden Lagen im Vergleich zu MSG-Schweißprozessen, konventioneller WIG-Schweißtechnik. Es wird mit über 300 A geschweißt.

Anwendernutzen:

- Herkömmliche WIG-Stromquelle
- Keine aufwendige Nahtvorbereitung, nur Planfräsen oder -drehen
- Wenig bis kein Zusatzwerkstoff
- WIG-Qualität

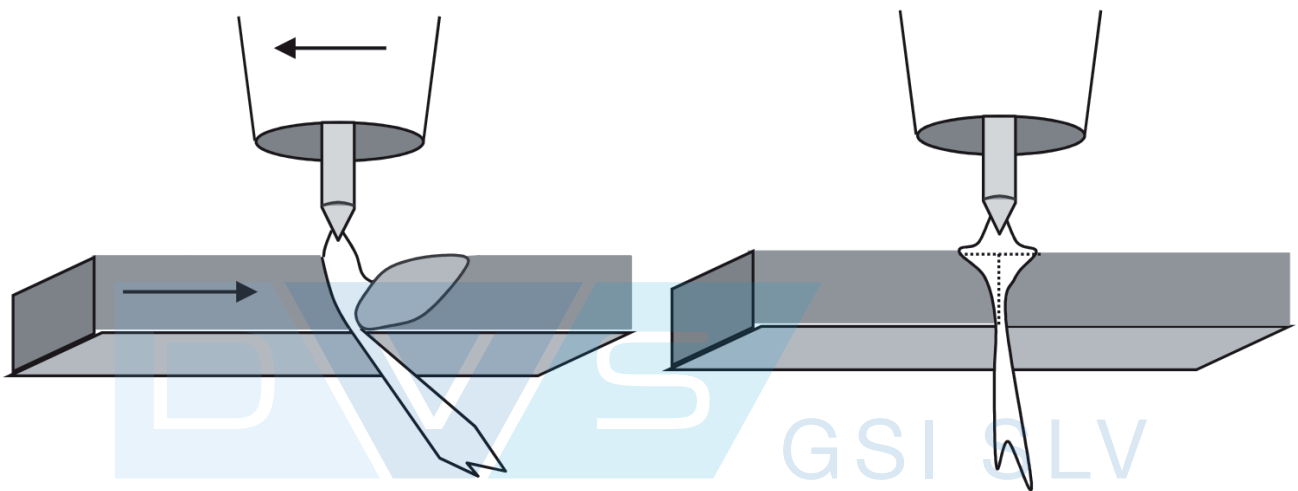


Abbildung 43: Prinzip WIG-Stichloch

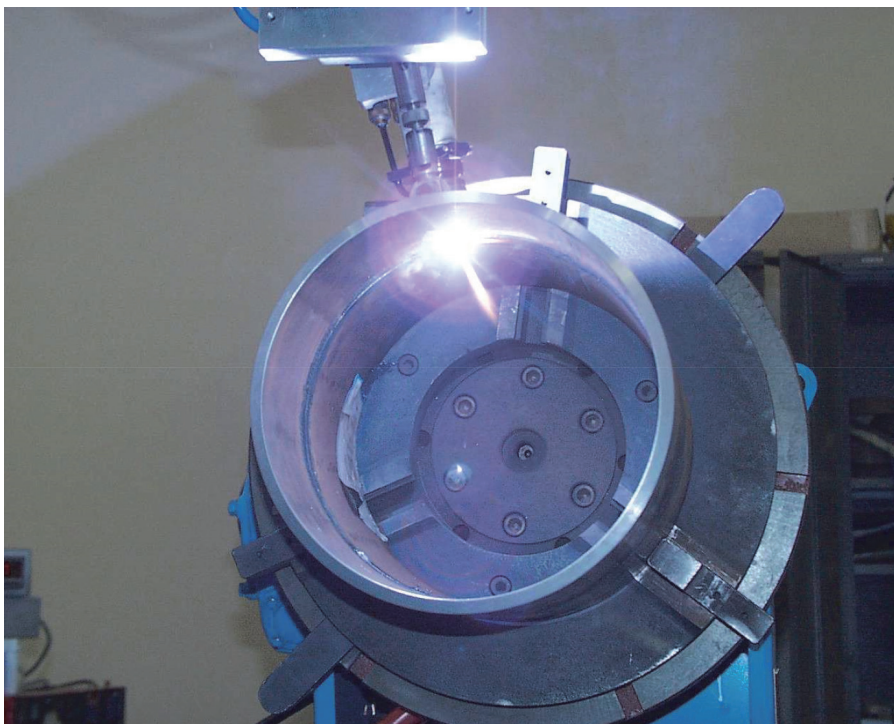
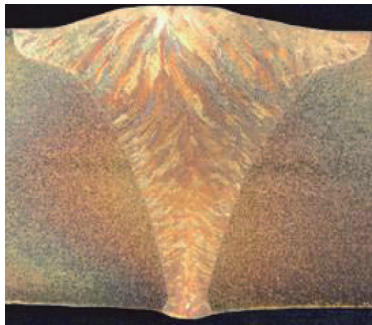


Abbildung 44: WIG-Stichloch mit Zusatzdraht

12 mm CrNi Blech

Parameter	WIG-Konventionell	WIG-Stichloch
Makroschliff		
Nahtvorbereitung	V-Naht 60°	Stumpfnah
Lagenzahl	7	1
Drahtmenge	1000 g/m	50 g/m
Strom I	320 A	640 A
Schweißgeschwindigkeit	200 mm/min	300 mm/min
Schweißzeit	35 min pro m	3 min 20 s pro m

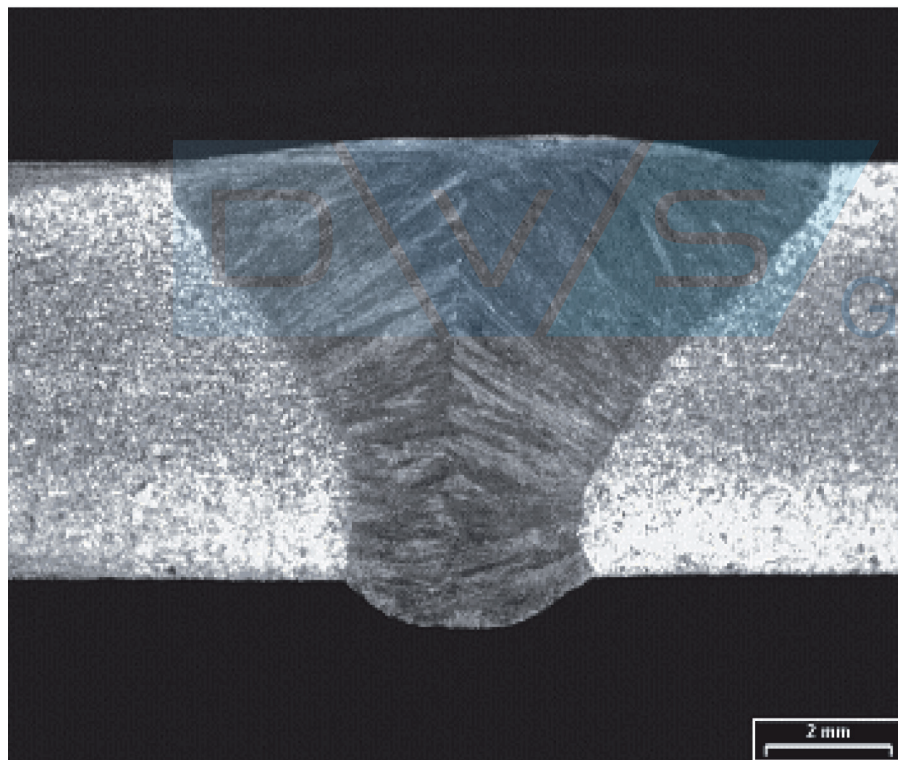


Abbildung 45: Makroschliff eines WIG-Stichloch-geschweißten 6-mm-CrNi-Stahls (1.4301) Stromstärke 430 A , Schweißgeschwindigkeit 85 cm/min

16 Testfragen

1. Weshalb wird beim WIG-Schweißen von Leichtmetallen Wechselstrom verwendet?

- ☐ Um eine symmetrische Netzbelastung zu erreichen
- ☐ Zur Vermeidung des Gleichrichtereffekts
- ☐ Zerstörung der hochschmelzenden Oxidschicht während der positiven Stromhalbwelle
- ☐ Geringere thermische Belastung der Wolframelektrode als bei plusgepolter Elektrode
- ☐ Geringere thermische Belastung der Wolframelektrode als bei minusgepolter Elektrode

2. Aus welchem Grund wird beim WIG-Schweißen der Lichtbogen berührungslos gezündet?

- ☐ Zur Vermeidung von Wolframeinschlüssen im Grundwerkstoff
- ☐ Wegen der niedrigen Leerlaufspannung
- ☐ Um das Verunreinigen der Wolframelektrode zu verhindern
- ☐ Wegen der niedrigen Ionisationsspannung von Argon
- ☐ Bei steil fallenden statischen Kennlinien ist eine Berührungszündung nicht möglich

3. Welcher Vorteil ergibt sich durch den Einsatz von Helium als Schutzgas beim WIG-Schweißen?

- ☐ Bessere Lichtbogenzündung
- ☐ Geringere Schutzgasmenge erforderlich
- ☐ Größere Wärmemenge im Heliumlichtbogen ermöglicht größere Schweißgeschwindigkeit
- ☐ Verringerung der Porenbildung bei einigen Werkstoffen
- ☐ Geringerer Gaspreis

4. Aus welchem Grund wird beim WIG-Schweißen von Stahl die Wolframelektrode am Minuspol angeschlossen?

- ☐ Geringere thermische Belastung der Elektrode
- ☐ Zur Erreichung einer höheren Temperatur der Wolframelektrode
- ☐ Tieferer Einbrand im Grundwerkstoff
- ☐ Zur Ionisation des Lichtbogens
- ☐ Um eine Verunreinigung der Wolframelektrode zu vermeiden

5. An einer schlecht zugänglichen Stelle muss beim WIG-Schweißen der Lichtbogen kurz gehalten werden. Welche Auswirkung hat das auf die Größe der Lichtbogenspannung?

- ☐ Spannung fällt
- ☐ Spannung steigt
- ☐ Spannung bleibt konstant
- ☐ Spannung bricht zusammen (Kurzschluss)

6. Welche Vorteile bietet der Impulslichtbogen beim WIG-Schweißen?

- ☐ Es können Aktivgase eingesetzt werden
- ☐ Bessere Kontrolle des Schweißbades
- ☐ Einfachere Parametereinstellung
- ☐ Bessere Eignung in Zwangslagenpositionen
- ☐ Einsparungen an Maschinen- und Schutzgaskosten

7. Warum werden Argon-CO₂-Gemische zum WIG-Schweißen nicht verwendet?

- ☐ Die Gaskosten für Argon-CO₂-Gemische sind im Vergleich zu Inertgasen viel teurer
- ☐ Die Einstellung der richtigen Schutzgasmenge wird dadurch erschwert
- ☐ Um die Oxidationsvorgänge mit der Wolframelektrode zu vermeiden
- ☐ Diese Gasgemische können nur für die Nichteisenmetalle eingesetzt werden
- ☐ Diese Gasgemische verlangen eine spezielle Ausbildung des Schweißers

8. Welche Gase oder Gasgemische eignen sich für den Wurzelschutz beim WIG-Schweißen?

- ☐ Argon
- ☐ Ar + 8% O₂
- ☐ 90% Ar + 10% H₂
- ☐ 90% N₂ + 10% H₂
- ☐ 82% Ar + 18% CO₂ (M21)

9. Welche Aussagen zum WIG-Schweißen sind richtig?

- ☐ Es ist ein Schutzgas-Schweißverfahren mit abschmelzender Drahtelektrode.
- ☐ Es ist ein Schutzgas-Schweißverfahren mit nicht abschmelzender Drahtelektrode.
- ☐ Es ist ein Schutzgas-Schweißverfahren mit nicht abschmelzender Wolfram-Elektrode.
- ☐ Es ist ein Lichtbogenschweißverfahren.
- ☐ Es ist ein Schmelzschweißverfahren.

10. Welche Werkstoffe lassen sich mit dem WIG-Schweißen verarbeiten?

- ☐ Holz
- ☐ hochlegierte Stähle
- ☐ Keramik
- ☐ un- und niedriglegierte Stähle
- ☐ NE-Metalle

11. Welche Aussagen zum WIG-Schweißen sind falsch?

- ☐ sehr hohe Abschmelzleistung erzielbar
- ☐ gute Mechanisierbarkeit
- ☐ alle schmelzschweißgeeigneten Werkstoffe sind schweißbar
- ☐ nur in PA-Pöposition einsetzbar
- ☐ wird bevorzugt für dickwandige Baustähle eingesetzt

12. Welche Varianten des WIG-Schweißens sind für Aluminium theoretisch möglich?

- ☐ Schweißen mit Impulsstrom
- ☐ Schweißen mit Wechselstrom und inerten Schutzgasen
- ☐ Schweißen mit Gleichstrom, Minuspol und 100% Helium als Schutzgas
- ☐ Schweißen mit Drehstrom
- ☐ Schweißen mit Gleichstrom, Pluspol und inerten Schutzgasen

13. Varianten des WIG-Schweißens sind

- ☐ Orbital-Schweißen mit rotierendem Bauteil
- ☐ Orbital-Schweißen mit rotierendem Brenner
- ☐ Wechselstrom-Schweißen
- ☐ Impulsschweißen
- ☐ Doppeldraht-Schweißen

14. Warum werden die Wolfram-Elektroden bei WIG-Schweißen dotiert?

- ☐ zur besseren Unterscheidung
- ☐ höhere Strombelastbarkeit im Vergleich zu reinen Wolfram-Elektroden
- ☐ geringere Strombelastbarkeit im Vergleich zu reinen Wolfram-Elektroden
- ☐ besseres Zündverhalten
- ☐ höhere Standzeit



Inhalt

1	Kennzeichnung	1
2	Einsatzgebiete, Verbreitung des Verfahrens.....	3
3	Aufbau einer MSG-Schweißanlage.....	6
3.1	Leistungsteil	6
3.2	Steuer- und Regeleinheit	7
3.3	Schlauchpaket und Schweißstromleitungen	8
3.4	Drahtfördereinrichtung	8
3.5	MSG-Schweißbrenner	10
3.6	Bedienungs- und Einstellelemente	12
4	Lichtbogenlängenregelung beim MSG-Schweißen	13
5	Schweißzusatzwerkstoffe und Schutzgase.....	14
5.1	Drahtelektroden/Massivdrähte	14
5.2	Schutzgase	16
5.2.1	Der Lichtbogen beim Schweißen von Stählen und NE-Metallen	17
5.2.2	Einteilung und Besonderheiten verschiedener Schutzgase zum MAG-Schweißen	18
6	Einstellgrößen beim Schweißen mit stufengeschalteten Schweißgleichrichtern	22
7	Einflussgrößen auf die Nahtgeometrie beim MSG-Schweißen	23
7.1	Lichtbogenspannung (Lichtbogenlänge).....	23
7.2	Drahtvorschubgeschwindigkeit	23
7.3	Stromkontaktrahabstand	23
7.4	Schweißgeschwindigkeit.....	24
7.5	Drahtelektrodenstellung	25
7.6	Stirnflächenabstand (I-Nähte)	25
7.7	Brenneranstellwinkel.....	25
8	Drahtelektrodenpolung, Kräfte am Lichtbogen und Werkstoffübergangsarten (Lichtbogenarten).....	28
8.1	Polung der Drahtelektrode	28
8.2	Einfluss der Drahtelektrodenndurchmesser auf die Abschmelzleistung und Raupenprofile... ..	28
8.3	Kräfte am Lichtbogen.....	29
8.4	Werkstoffübergang (Lichtbogenarten)	30
8.4.1	Kurzlichtbogen	31
8.4.2	Übergangslichtbogen	32
8.4.3	Langlichtbogen	32
8.4.4	Sprühlichtbogen	33
8.4.5	Impulslichtbogen	34
9	Vor- und Nachteile des MSG-Schweißens	36
9.1	Vorteile des MIG/MAG-Schweißens	36
9.2	Nachteile des MIG/MAG-Schweißens	36
10	Merkblatt DVS 0973 – Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens.....	36
10.1	Geregelter / modifizierter Kurzlichtbogen.....	37
10.1.1	Spritzerarmer Kurzlichtbogen	37
10.1.2	Energiereduzierter Kurzlichtbogen.....	38
10.1.3	Leistungsgesteigerter Kurzlichtbogen	38
10.2	Modifizierter Sprühlichtbogen	38
10.2.1	Kurzer Sprühlichtbogen	38

10.3	Modifizierter Impulslichtbogen	40
10.4	Wechselstromprozesse.....	40
10.5	Kombinierte Prozessvarianten	40
10.6	Zyklische Drahtbewegung	41
10.7	Herstellerbezeichnungen	41
11	Mögliche Fehler beim MIG/MAG-Schweißen	43
11.1	Bindefehler am Nahtanfang, Nahtüberlappung und Nahtansatz, Endkrater am Raupenende .. 43	
11.2	Bindefehler in der Schweißnaht	44
11.3	Poren	45
11.4	Kerben an den Raupenrändern	47
11.5	Risse	47
12	Nahtvorbereitung (Überblick)	48
13	Schweißbadsicherungen	52
14	Verfahrensvarianten des MSG-Schweißens	53
14.1	MIG/MAG-Punktschweißen	53
14.2	MSG-Löten.....	53
14.3	MIG/MAG-Hochleistungsverfahren.....	55
14.3.1	Hochleistungsverfahren mit einer Drahtelektrode.....	55
14.3.2	Hochleistungsverfahren mit zwei Drahtelektroden.....	56
14.4	Plasma-Metall-Schutzgasschweißen.....	58
14.5	Laser-MSG-Schweißen.....	59
15	Elektrogasschweißen	60
16	Literatur.....	61
17	Testfragen.....	62

1 Kennzeichnung

Das Metall-Schutzgasschweißen (MSG-Schweißen) ist ein Lichtbogenschweißverfahren mit einer endlosen, abschmelzenden Drahtelektrode unter einer Schutzgasabdeckung. Die unterschiedlichen MSG-Prozesse sind mit entsprechenden Ordnungsnummern nach EN ISO 4063 gekennzeichnet. In Tabelle 1 und in Tabelle 2 sind die einzelnen Verfahrensvarianten bei konventionellen und Sonderverfahren aufgelistet.

Tabelle 1: Bezeichnungen und Verfahrensvarianten für das MIG/MAG-Schweißen

Schweißverfahren	Kurzzeichen	Kennzahl nach ISO 4063	Bemerkungen
Metall-Schutzgasschweißen	MSG	13	Oberbegriff
Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode	MIG	131	Inerte Schutzgase (Ar und Ar-He-Gemische)
Metall-Inertgasschweißen mit schweißpulvergefüllter Drahtelektrode	MIG	132	Inerte Schutzgase (Ar und Ar-He-Gemische)
Metall-Inertgasschweißen mit metallpulvergefüllter Drahtelektrode	MIG	133	Inerte Schutzgase (Ar und Ar-He-Gemische)
Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode	MAG	135	Argonreiche Mischgase oder 100% CO ₂
Metall-Aktivgasschweißen mit schweißpulvergefüllter Drahtelektrode	MAG	136	Argonreiche Mischgase oder 100% CO ₂
Metall-Aktivgasschweißen mit metallpulvergefüllter Drahtelektrode	MAG	138	Argonreiche Mischgase oder 100% CO ₂
CO ₂ - Schweißen	MAGC	/	Schutzgas 100% CO ₂
Mischgasschweißen	MAGM	/	Argonreiche Mischgase

Tabelle 2: Sonderschweißverfahren mit abschmelzender Drahtelektrode (Hochleistungsschweißverfahren: siehe Abschnitt 11)

Schweißverfahren	Kurzzeichen	Kennzahl nach ISO 4063	Bemerkungen
Elektrogasschweißen	MSGG	73	Schweißen in senkrechter Position
Metall - Lichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode ohne Schutzgas	MF	114	mit selbstschützenden Fülldrahtelektroden
Plasma-Metall-Schutzgasschweißen	MSGP	151	Plasma- und MSG-Lichtbogen in einem Brenner (Plasmalichtbogen konzentrisch angeordnet)

Der Prozess kann detailliert durch die Art des Werkstoffüberganges nach Tabelle 3 und die Anzahl der Drahtelektroden bezeichnet werden, siehe auch *Abschnitt 8, Punkt 8.3 und 8.4*.

Tabelle 3: Arten des Werkstoffübergangs

Art	Werkstoffübergang nach DIN EN ISO 4063
D	Werkstoffübergang im Kurzschluss
G	großtropfiger Werkstoffübergang
S	feintropfiger Werkstoffübergang
P	impulsgesteuerter Werkstoffübergang

Nachfolgend sind einige Beispiele einer vollständigen Bezeichnung für die Schweißprozesse aufgeführt.

- Metall-Aktivgasschweißen mit Massivdrahtelektrode ISO 4063 – 135
- Metall-Inertgasschweißen mit 2 Massivdrahtelektroden ISO 4063 – 131-2
- Metall-Inertgasschweißen mit Massivdrahtelektrode mit Werkstoffübergang im Kurzschluss ISO 4063 – 131-D

Das MSG-Schweißen kann teilmechanisiert mit von Hand geführtem Brenner, vollmechanisiert mit mechanisch geführten Brenner und automatisiert mit zusätzlicher mechanischer Werkstückhandhabung eingesetzt werden, *Kapitel 1.01, Abbildung 24*.

Das MIG/MAG-Schweißen wird mit Gleichstrom ausgeführt. Die Drahtelektrode ist hierbei $\oplus$ gepol und das Werkstück $\ominus$ gepol. Einige Fülldrähte, *siehe auch Kapitel 1.08.2*, werden auch mit umgekehrter Polung geschweißt. Für besondere Schweißaufgaben im unteren Leistungsbereich, z.B. MIG-Schutzgasschweißen sehr dünner AL-Bleche, können zur Reduzierung der Wärmeeinbringung auch angepasste Wechselströme zur Anwendung kommen.

2 Einsatzgebiete, Verbreitung des Verfahrens

Das MSG-Schweißen wird überall in der metallverarbeitenden Industrie, im Stahlbau, Schiffbau, Behälterbau und Fahrzeugbau in einem großen Wanddickenbereich der Bauteile eingesetzt. Neben den Stahlwerkstoffen un- und niedriglegiert, werden CrNi-Stähle, und NE-Werkstoffe wie Aluminium und Kupfer verbunden.

Abbildung 1 zeigt Anwendungsbeispiele aus der Praxis im Stahl- und Behälterbau. Abbildung 2 zeigt Anwendungsbeispiele aus dem Schiffbau. Abbildung 3 zeigt Beispiele aus dem Fahrzeugbau.



Abbildung 1: Anwendungsbeispiele des MSG-Schweißen im Stahl- und Behälterbau (Quelle Abicor Binzel)



Abbildung 2: Anwendungsbeispiele MSG-Schweißen aus dem Schiffbau (Quelle Abicor Binzel)

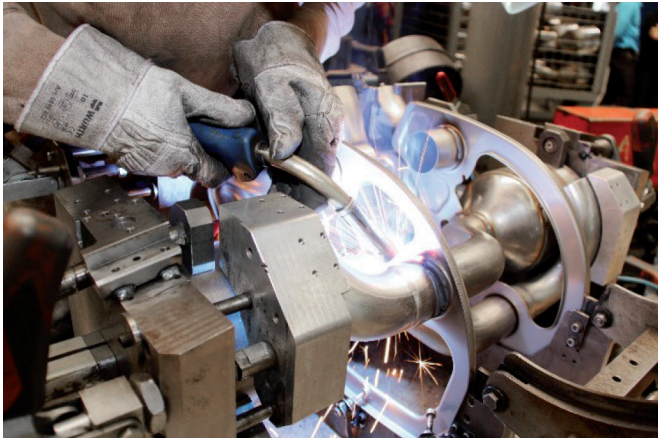


Abbildung 3: Anwendungsbeispiele MSG-Schweißen aus dem Fahrzeugbau (Quelle Abicor Binzel)

Das MSG-Löten kommt überwiegend für das Verbinden von Stählen mit dünnen Zinkauflagen zur Anwendung, *siehe auch Abschnitt 14.2 und Kapitel 1.16.*

Einige Anwendungsbeispiele der MIG/MAG-Prozesse in den unterschiedlichen Branchen sind nachfolgend dargestellt, wobei u.a. die Wirtschaftlichkeit und Leichtbau im Fokus stehen.

Im Schienenfahrzeug-, Schiffs- und Kraftfahrzeugbau kommt verstärkt der Werkstoff Aluminium zum Einsatz. Geschweißt wird im MIG-Prozess mit dem Impulslichtbogen. Karosserien im Fahrzeugbau aus verzinkten Blechen werden auch in Kombination mit anderen Schweißverfahren im MIG-Prozess gelötet, *siehe Abbildung 4 und Abbildung 5.*

Im mobilen Kran- und Baumaschinenbau werden dagegen zunehmend höherfeste Stähle verwendet. Der MAG-Prozess mit den verschiedenen Lichtbogenarten, die im Abschnitt „Prozessregelvarianten“ näher beschrieben werden, ist je nach Schweißposition und Bauteil- und Schweißfugengeometrie optimal anwendbar. Im Kessel-, Apparate- und Rohrleitungsbau werden die MAG-Prozesse, soweit möglich und anwendbar, die Prozesse 111 (Lichtbogenhandschweißen) ergänzen bzw. ersetzen. Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, Verringerung des Nahtvolumens bei „dickwandigen“ Bauteilen, ist eine Kombination mit dem Prozess 121 (Unterpulverschweißen) im Einsatz. Der MAG-Prozess wird hierbei zum Schweißen der ersten Schweißlagen in den engen Schweißfugen eingesetzt, die mit dem Prozess 12 nicht schweißbar sind.



Abbildung 4: Anwendungsbeispiel MSG-Lötverbindungen im PKW-Karosseriebau (Quelle EWM)

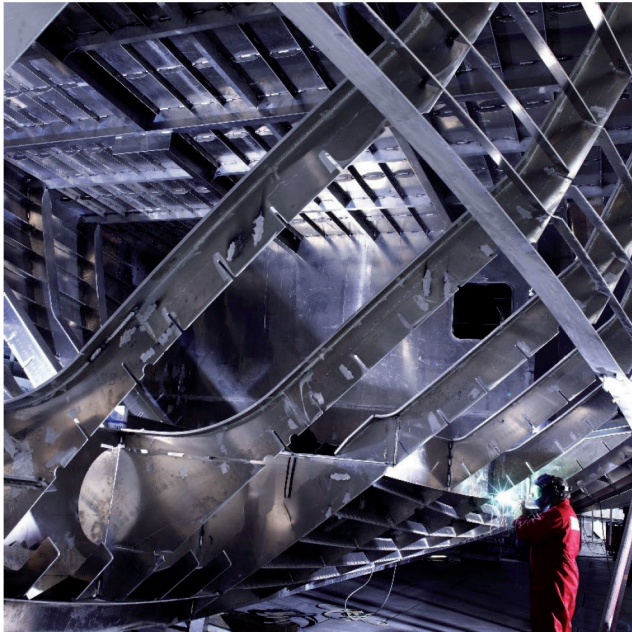


Abbildung 5: Anwendungsbeispiel MIG-Aluminium-Schweißen im Schiffbau (Quelle EWM)



3 Aufbau einer MSG-Schweißanlage

In Abbildung 6 sind die Baugruppen einer MSG-Schweißanlage zu sehen. Diese sind im Einzelnen:

- Leistungsteil (Schweißgleichrichter oder elektronische Umrichter)
- Drahtfördereinheit (Drahtspulenaufnahme, Drahtfördermotor, Drahtförderrollen, Drahteinlauf und -auslaufdüsen)
- Schlauchpaket
- Schweißbrenner
- Kühleinrichtung für größere Lichtbogenleistungen
- Schutzgaseinrichtung
- Bedienungs- und Einstellelemente.

Die Struktur einer elektronischen MSG-Schweißanlage zeigt Abbildung 2.

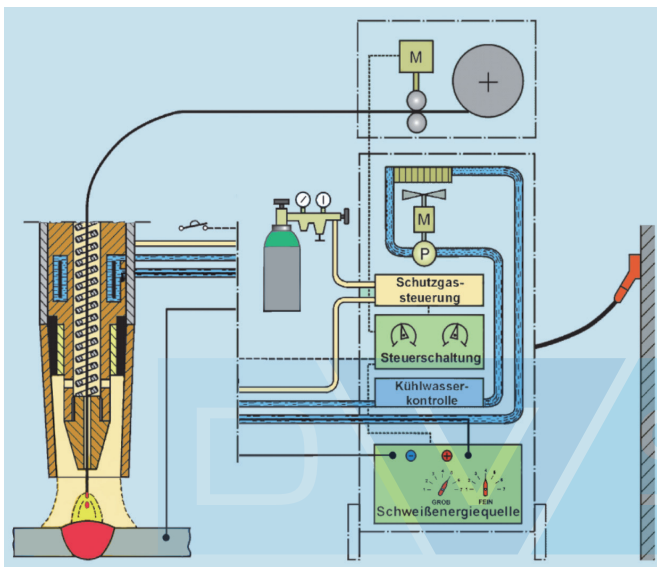


Abbildung 6: Aufbau einer MSG Schweißanlage

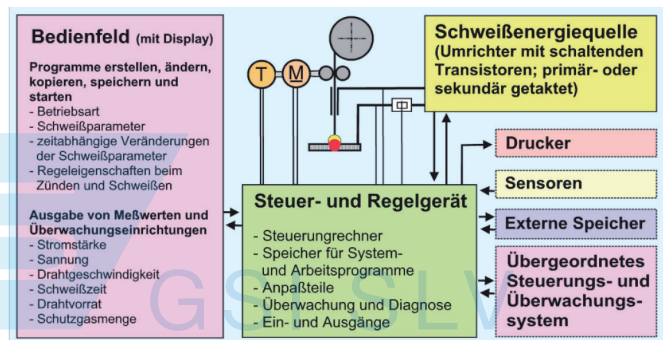


Abbildung 7: Struktur einer elektronischen MSG-Schweißanlage

Die Abbildung 7 zeigt die Struktur einer elektronischen Schweißanlage mit

- Schweißenergiequelle
- Bedienfeld
- Steuer-und Regeleinheit
- Übergeordnetes Steuerungs- und Überwachungssystem
- Drucker
- Sensoren
- Externe Speicher

3.1 Leistungsteil

Die Bauarten der Leistungsteile, die die Leistung aus dem Netz für die verschiedenen Prozessvarianten umrichten, enthält Kapitel 1.04.

Beim MSG-Schweißen mit konventionellen Schweißgleichrichtern (Kurzlichtbogen, Sprühlichtbogen) werden prinzipiell Schweißstromquellen mit Konstantspannungscharakteristik eingesetzt. Dabei hat die statische Kennlinie der Stromquelle im Bereich der Schweißwerte einen nahezu horizontalen Verlauf (Neigung 1 bis 5 V / 100 A). Die Einstellung der statischen Kennlinie und damit der Arbeitsspannung, erfolgt bei diesen Stromquellen durch Grob- und Feinstufenschalter (Windungsanzapfungen des Transformators), Abbildung 8.

Stromquellen mit stufenlos einstellbarer statischer Kennlinie ermöglichen eine stufenlose Einstellung der Arbeitsspannung, Abbildung 9.

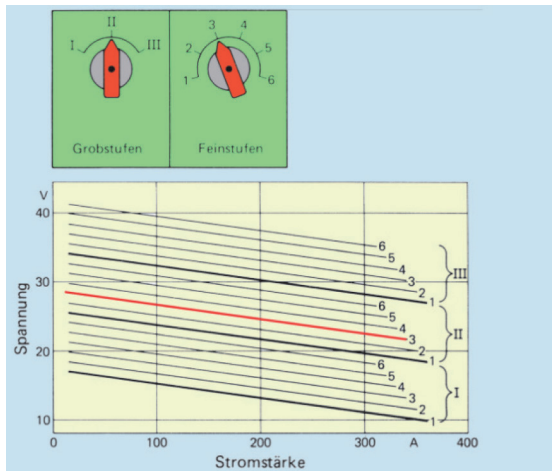


Abbildung 8: Einstellung der statischen Kennlinie bei Verwendung von Stromquellen mit Stufenschaltung.

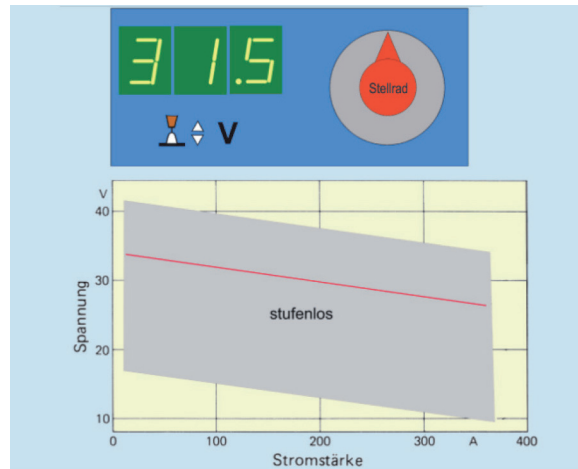


Abbildung 9: Einstellung der statischen Kennlinie bei Verwendung von elektronischen Stromquellen. Die Neigung der statischen Kennlinie ist variabel

3.2 Steuer- und Regeleinheit

Die Steuer- und Regeleinheit ist üblicherweise in die Stromquelle integriert. Beim teilmechanisierten (manuellen) Schweißen werden die Hauptfunktionen Schutzgaszufuhr, Drahtförderung und Schweißstromzufuhr durch eine Zweitakt- oder Viertakt-Schaltung (am Brenner) gesteuert. Die Definition dazu ist:

- **Zweitakt**-Schaltung - der Brennertaster ständig gedrückt.
- **Viertakt**-Schaltung – der Brennertaster wird nur zum Zünden und Beenden des Schweißvorganges betätigt. Der Gasschutz vor der Lichtbogenzündung und nach dem Lichtbogenabriss kann damit verlängert werden.

Beim vollmechanischen und automatischen Schweißen werden die Schweißabläufe durch eine externe Steuerung, z.B. von einem Roboter oder Fernregler getätigt.

Zusätzliche Steuerfunktionen, wie reduzierter Zündvorschub der Drahtelektrode bis kurz nach der Lichtbogenzündung und die Rückbrennzeit, können teilweise durch Voreinstellungen den zur Anwendung kommenden Lichtbogen- und Abschmelzleistungen angepasst werden.

Durch eine wählbare Rückbrennzeit wird nach dem Lichtbogenabriss ein "Festbrennen" des Drahtendes im Endkrater vermieden, so wie die Resttropfengröße am Draht minimiert. Bei Stromquellen mit Leistungselektronik kann am Raupenabschluss häufig ein Finalimpuls geschaltet werden, um ein möglichst schlanke Drahtelektrodenende zu erzeugen. „Spitze“ Drahtelektroden erleichtern die Lichtbogenneuzündung.

Bei vollmechanisierten Schweißanlagen sowie beim MSG-Schweißen mit Impulslichtbogen werden Stromquellen mit Leistungselektronik (überwiegend sekundär- oder primärgetaktete Transistorstromquellen) eingesetzt. Der Raupenanfang und das Raupenende können bei geeigneter Programmausstattung vielfältig optimiert werden. Beispiele für das Raupenende zeigt Abbildung 10.

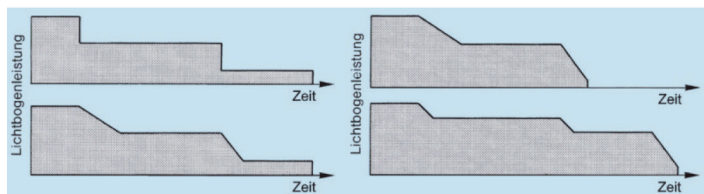


Abbildung 10: Variable Schweißparameter zur Verbesserung der Nahtqualität am Raupenende

3.3 Schlauchpaket und Schweißstromleitungen

In dem Schlauchpaket werden die Drahtelektrode, der Schweißstrom, das Schutzgas und bei wassergekühlten Brenner das Wasser zum Brenner geleitet. Die Drahtführung von un- und niedriglegierten Drahtelektroden erfolgt in einer Stahlschleife. Dagegen werden Drahtelektroden aus CrNi-Stahl, Aluminium und anderen Metallen in verschleißfesten Kunststoffschläuchen geführt. Die lichte Weite der Stahlschleife und des Kunststoffschlauches ist ca. 0,5-1 mm größer als der Drahtelektroden Durchmesser.

Prozesssteuerung vom Brenner aus ist je nach Hersteller mit oder ohne Signalleitungen im Schlauchpaket möglich. Bei gleichen Schweißaufgaben mit unterschiedlichen Schlauchpaketlängen, muss zur Erreichung desselben Schweißergebnisses eine Spannungskorrektur durchgeführt werden. Sollen gleiche Parameter zum Einsatz kommen, so kann bei unterschiedlichen Schlauchpaketlängen eine Spannungsangleichung direkt vor der Schweißaufnahme durch ein spezielles Programm, mit Kontaktieren der Stromkontaktdüse und Werkstück, in der Stromquelle auf einfache Weise erfolgen, eine manuelle Anpassung ist nicht mehr erforderlich.

3.4 Drahtfördereinrichtung

Beim MSG-Schweißen wird die Drahtelektrode von der Spule abgezogen und von einer Drahtvorschubeinheit durch ein bis zu 5 Meter langes Schlauchpaket bis zum Stromkontaktrohr im Brenner geschoben. In Abbildung 11 sind neben einfachen auch für größere Förderleistungen und druckempfindlichen Drahtelektroden mehrfach ausgestattete Drahtförderantriebe schematisch dargestellt. In der Regel werden Förderrollen aus gehärtetem Stahl verwendet, in die trapezförmige, bei weichen Drähten auch stumpfwinkliger oder halbkreisförmige Nutvarianten (dem Drahtdurchmesser angepasst) eingearbeitet sind, Abbildung 12

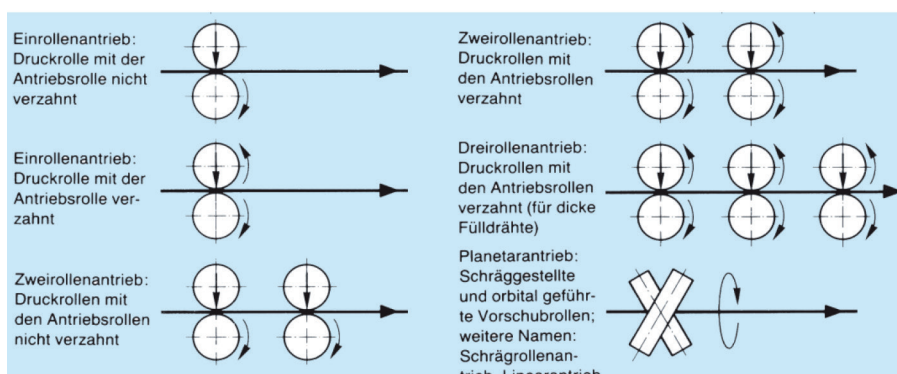


Abbildung 11: Varianten der Drahtförder- und Druckrollensysteme

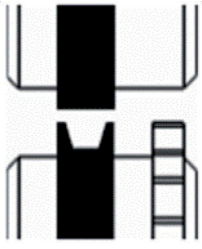
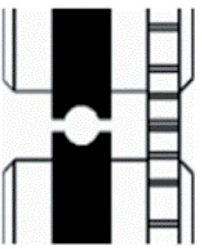
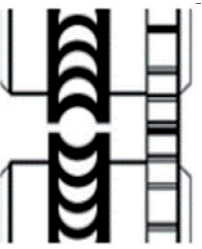
Trapeznut	Halbrundnut glatt	Halbrundnut gerillt
		
Un-, niedrig, hochlegierte Massivdrähte Fe-, CrNi	Aluminium-, Bronzedrähte CuSi, CuAl	Massiv-, Fülldrähte, große Drahtdurchmesser CrNi

Abbildung 12: Nutformen an Förderrollen

Die Schlauchpaketlänge sollte an dem Einsatz und der Zugänglichkeit der Schweißaufgabe angepasst werden. Schlauchpakete bis etwa 5 m Länge können bei Stahldrähten ab 1,2 mm Drahtelektrorendurchmesser noch verwendet werden. Bei geringeren Drahtelektrorendurchmesser oder Drähten (z.B. Al-Werkstoffen) ist bei längeren Förderwegen ein Zusatzantrieb im Brenner oder zwischen Brenner und Stromquelle zu empfehlen, Abbildung 13.

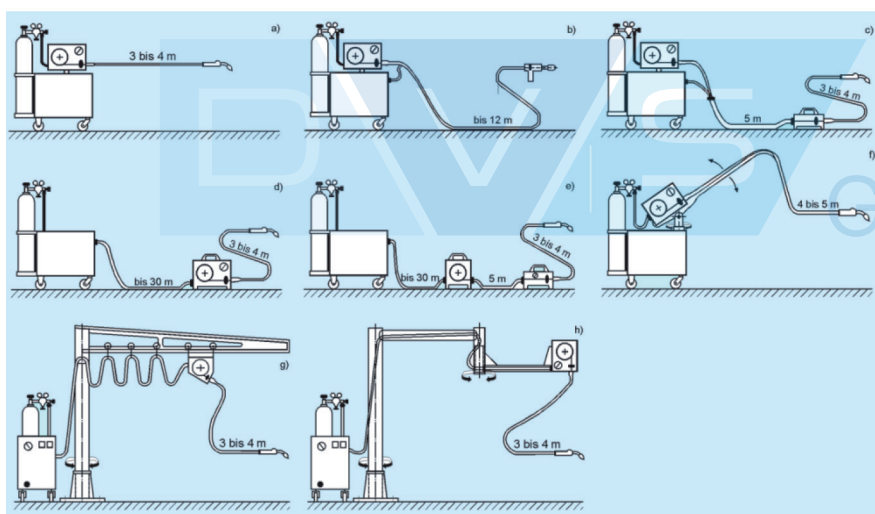


Abbildung 13: Drahtfördereinrichtungen und Varianten zur Verbesserung der Drahtfördergleichmäßigkeit und Vergrößerung des Arbeitsraumes.

Das Stromkabel im Schlauchpaket ist bei hohen Strömen wassergekühlt. Das Kupferkabel ist von einem Schlauch umgeben, das mit dem zurücklaufenden Kühlwasser vom Brenner gekühlt wird. Dadurch kann der Kabelquerschnitt und somit auch das Gewicht des Schlauchpakets geringer gehalten werden. Kleinere Kabelquerschnitte vergrößern allerdings den Spannungsabfall und die Verlustleistung im Schlauchpaket.

Eine Möglichkeit, den Draht direkt aus einem großen Gebinde (Fass) nahezu reibungslos über weite Strecken mit empfohlenen Förderlängen von 25 Meter mit nur einem Antrieb bis zum Prozess zu bringen, bietet das rollengeführte Fördersystem. Es besteht aus einzelnen Kunststoffsegmenten, die sich um 360° drehen lassen und innen über 4 Rollen pro Segment verfügen, Abbildung 14. Alle Drahtdurchmesser und Drahtarten lassen sich somit „rollend“ fördern.

Die höheren Kosten für dieses Drahtfördersystem stehen Vorteile wie

- hohe Lebensdauer
- wartungsfreies und wenig störanfälliges Gesamtsystem
- für alle Schweißprozesse mit Drahtzufuhr geeignet
- Drahtförderung bei „engen Radien“

gegenüber.

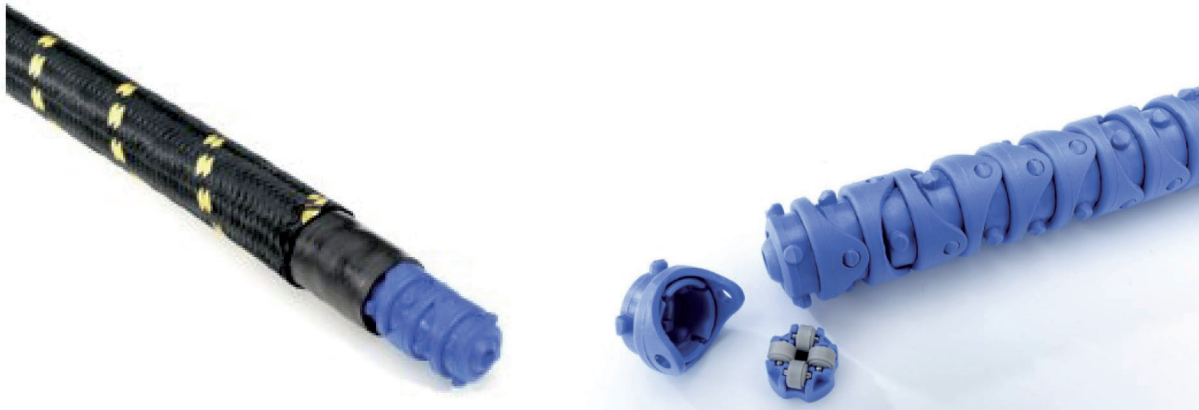


Abbildung 14: Rollengeführtes Fördersystem, 4-Rollensegmente (Quelle Abicor Binzel)

3.5 MSG-Schweißbrenner

Ein MSG-Schweißbrenner besteht im Wesentlichen aus einem Brennerkörper, Stromkontaktrohr, einer Schutzgasdüse und beim teilmechanisierten Schweißen einem Handgriff mit integriertem Schalter für die Prozesssteuerung. Je nach Einschaltdauer und maximaler Stromstärke kommen wasser- bzw. gasgekühlte Brenner zum Einsatz, Abbildung 15.

Schweißaufgaben mit unterschiedlichen Schweißpositionen, Schweißprozessen erfolgen mit angepassten Schweißparameter. Die Anwahl der erforderlichen Programme/Parameter oder Korrekturen von Schweißstrom, Drahtgeschwindigkeit und Schweißspannung, können Funktionsbrenner direkt übernehmen, Abbildung 16. Der Weg zum Bedienfeld der Stromquelle entfällt hierdurch.

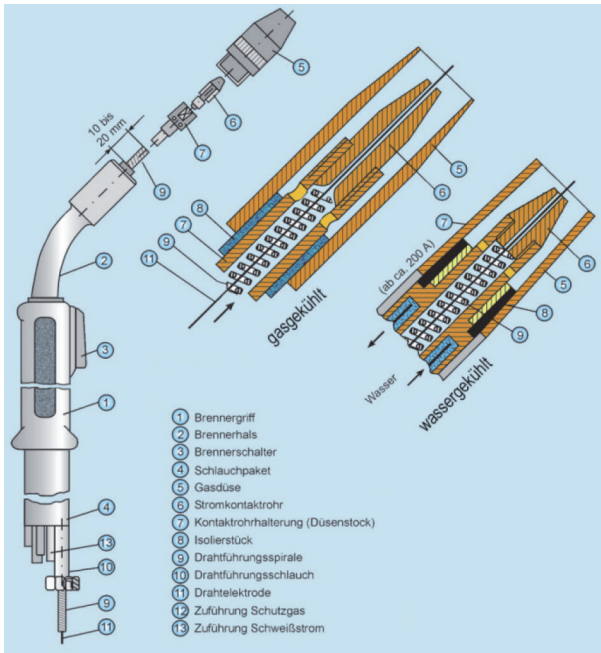
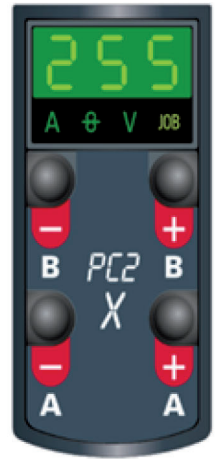


Abbildung 15: Schemen von MSG-Schweißbrennern in gas- und wassergekühlter Ausführung für das teilmechanisierte Schweißen.



Abbildung 16: Funktionsbrenner, Tastatur (Quelle EWM)



Das Stromkontaktrohr überträgt den Schweißstrom auf die geführte Drahtelektrode. Die Bohrung im Stromkontaktrohr sind bei Stahl etwa 0,2 mm und bei Aluminium etwa 0,4 mm größer als der Drahtdurchmesser. Als Werkstoff kommen E-Cu-, CuCr-, CuCrZr-Werkstoffen, oder CuCoBe-Legierungen zum Einsatz. E-Cu hat gute elektrische Eigenschaften, verschleißt aber bei mechanischer Beanspruchung schneller. Härtere und warmfestere Kontaktrohrwerkstoffe (es werden auch solche aus Sonderwerkstoffen wie WCu oder WAg angeboten) haben einen geringeren mechanischen Abrieb, verschleißt aber durch elektroerosive Vorgänge.

Zwangskontaktierende Stromkontaktrohre verbessern im Allgemeinen die Stromeinleitung in die Drahtelektrode, Abbildung 17. Die zu erwartenden Verbesserungen sind häufig nicht befriedigend und daher haben sie sich in der Praxis nicht bewährt.

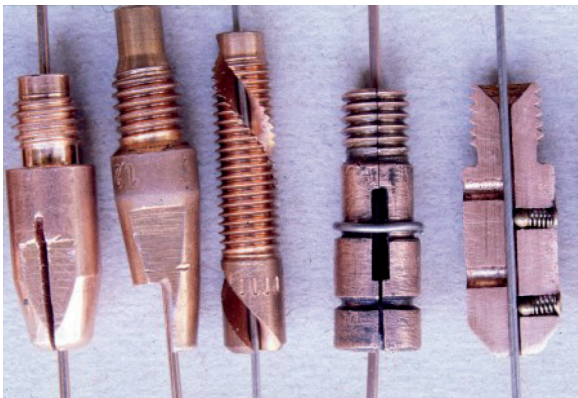


Abbildung 17: Beispiele von zwangskontaktierenden Stromkontaktrohren.

3.6 Bedienungs- und Einstellelemente

Für das Einstellen des Lichtbogens und des Werkstoffübergangs an konventionellen Schweißanlagen sind nur zwei bzw. drei Einstellgrößen notwendig. Die Einstellgrößen sind Strom und Spannung. Die Spannung wird je nach Stromquellentyp über Stufenschalter oder stufenlos eingestellt, Abbildung 6 und Abbildung 7.

Die bei hochwertigeren Schweißanlagen vorhandene dritte Einstellgröße ist die Drossel, (Induktivität im Schweißstromkreis), die den Werkstoffübergang mit Kurzschlüssen und die Lichtbogenerstzündung beeinflusst.

Das einfache übersichtliche Bedienfeld einer elektronischen Schweißanlage bietet Einstellmöglichkeiten für gespeicherte Programme, Anzeigen der wichtigsten Schweißparameter, sowie Einstell- und

Korrekturelemente an Lichtbogen- und Abschmelzleistung, Lichtbogenlänge und Beeinflussung dynamischer Parameterveränderungen, Abbildung 18.

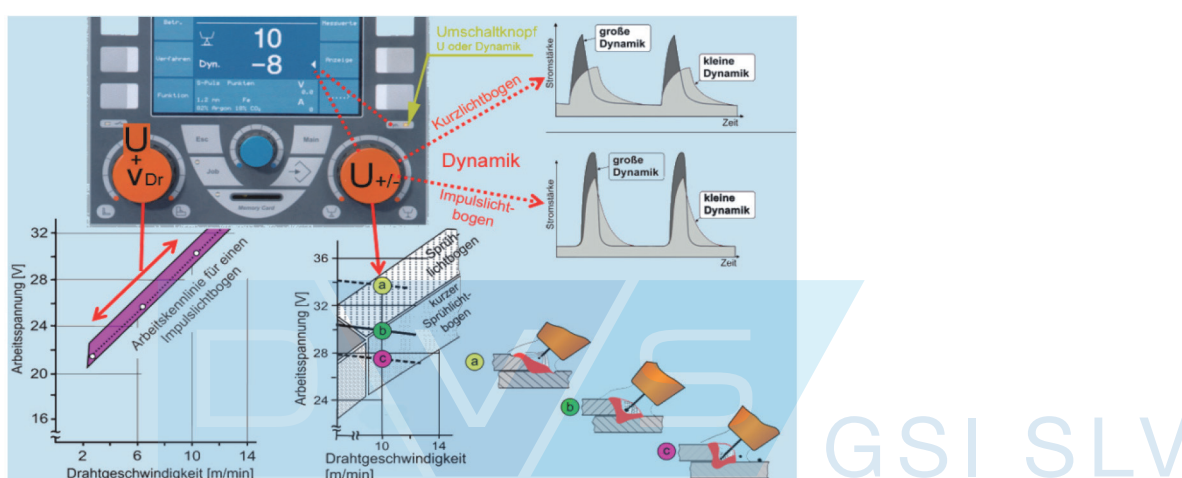


Abbildung 18: Bedienfeld einer elektronischen Schweißanlage mit einem Stellrad für die Lichtbogen- und Abschmelzleistung ($U + v_{Dr}$ im Bild, Synergiekennlinie) und einem Stellrad für die Korrektur der Lichtbogenlänge und dynamischen Eigenschaften (z. B. Stromänderungsgeschwindigkeiten, Impulsstrom, ...)

Bei elektronisch gesteuerten Schweißanlagen sind unterschiedliche Konzepte üblich. Fast immer zeigt ein kleiner Bildschirm die Einstelldaten an. Mit entsprechenden Bedienungselementen können auf diesem Display öfter unterschiedliche Menüebenen aufgerufen werden.

Alle Hersteller von elektronischen Schweißanlagen bieten im Gerät abgespeicherte Einstelldaten und Regelstrukturen an. Für Sonderbedingungen können Programme nachgeladen werden. Dies kann das Wählen der richtigen Einstelldaten erleichtern.

4 Lichtbogenlängenregelung beim MSG-Schweißen

Um einen gleichmäßigen Werkstoffübergang und gleichmäßige Raupenqualität zu erzielen, muss die mittlere Lichtbogenlänge möglichst konstant gehalten werden. Bei Stromquellen mit kleiner Neigung der statischen Kennlinie geschieht dies durch einen inneren Selbstausgleich. Die Stromquellen mit Konstantspannungskennlinien haben den Vorteil, dass Änderungen der Lichtbogenlänge und somit des Lichtbogenwiderstandes nur eine geringe Spannungsänderung aber größere Stromänderungen hervorrufen, Abbildung 19 Diese selbstständige Korrektur der Lichtbogenlänge durch Stromänderungen nennt man "Innere Regelung" oder " ΔI -Regelung", siehe auch Kapitel 1.04.

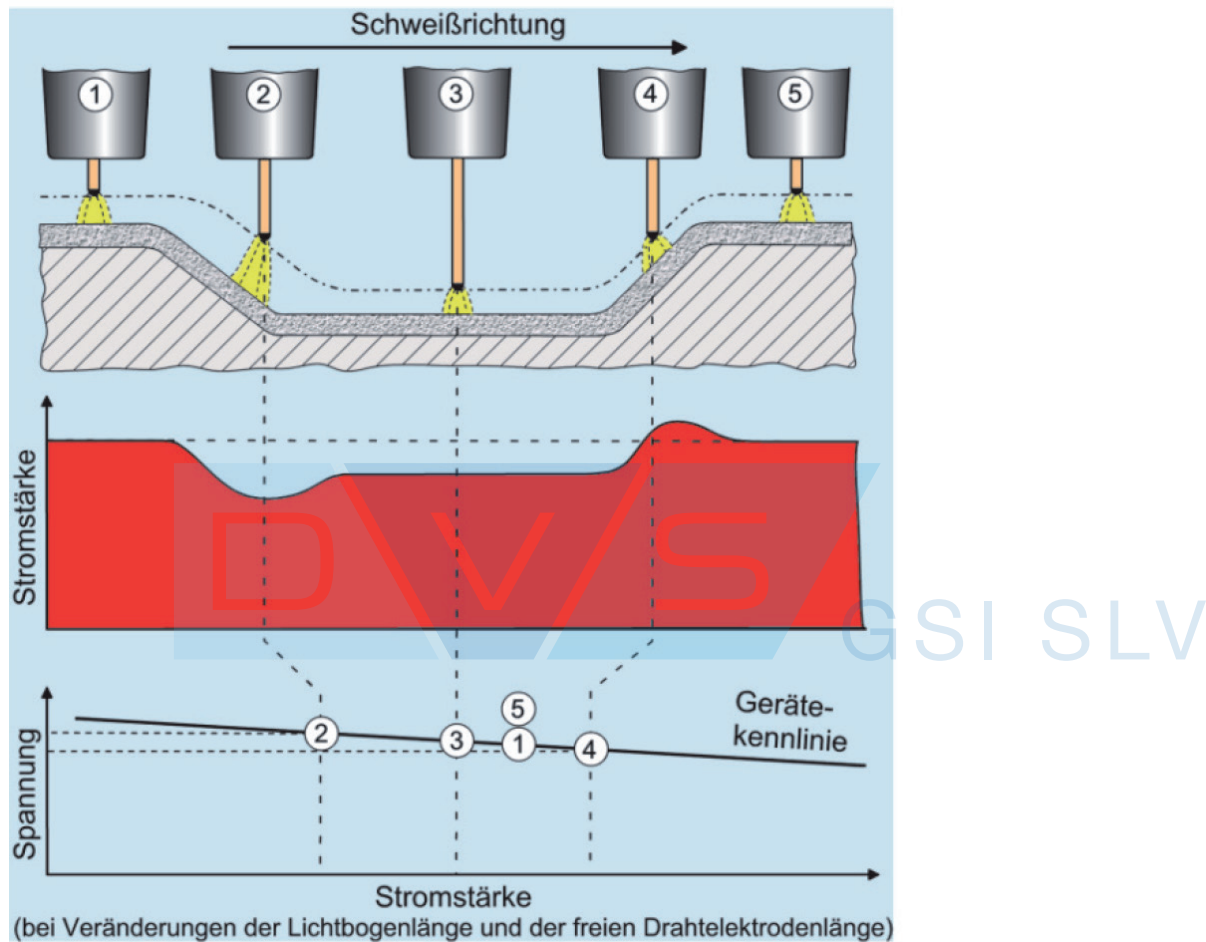


Abbildung 19: Korrektur der Lichtbogenlänge beim Überschweißen einer trapezförmigen Vertiefung durch Widerstands- und Stromstärkeänderungen (innere Regelung, ΔI -Regelung, innerer Selbstausgleich durch Konstantspannungskennlinie).

5 Schweißzusatzwerkstoffe und Schutzgase

5.1 Drahtelektroden/Massivdrähte

Drahtelektroden für das MSG-Schweißen sind auf Spulenkörper aufgewickelt. Je nach Einsatz haben diese Spulenkörper ein Gewicht von 1 kg bis einige 100 kg. Neben Großspulen werden auch gespulte Drähte in Fässern hergestellt, aus denen dann der Draht durch eine Vorrichtung abgezogen wird.

Die gebräuchliche Drahtelektroden Durchmesser sind: (0,6); 0,8; (0,9); 1,0; 1,2; (1,4); 1,6 [mm].

Der Drahtdurchmesser 0,9 mm wird häufig in der Automobilfertigung eingesetzt. Die Fülldrähte mit einem Drahtdurchmesser von 1,6 bis 3,2 mm werden üblicherweise zum Auftragsschweißen eingesetzt, dagegen die Massivdrähte seltener, da größere Kräfte im Lichtbogenbereich auftreten und die Lichtbogenzündung schwieriger ist.

Um den Schweißstrom im Kontaktrohr auf den Draht zu übertragen, werden an die Drahtoberfläche hohe Anforderungen gestellt. Drähte für unlegierte, warmfeste und hochfeste Stähle sind deshalb meistens mit einer dünnen Kupferschicht überzogen.

Nichtrostende und hitzebeständige Stähle dürfen nicht verkupfert werden. Eine schlechtere, elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit dieser Werkstoffe erschweren daher die Stromübertragung. Drahtförderstörungen bis zum Festbrennen der Drahtelektrode im Kontaktrohr sind bei manchen Drahtelektrodenqualitäten nicht zu vermeiden.

Die Drahtelektroden für die wichtigsten Werkstoffe sind genormt und sind in Tabelle 4, Massivdrahtelektroden, aufgeführt. Fülldrahtelektroden werden in Kapitel 1.08.2 behandelt.

Tabelle 4: Massivdrahtelektroden für das MIG/MAG-Schweißen

Norm Nummer	Titel
DIN EN ISO 14341	Schweißzusätze – Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung
DIN EN ISO 1071	Schweißzusätze – Umhüllte Stabelektroden, Drähte, Stäbe und Fülldrahtelektroden zum Schmelzschweißen von Gusseisen – Einteilung
DIN EN ISO 21952	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von warmfesten Stählen – Einteilung
DIN EN ISO 14343	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Bandelektroden, Drähte und Stäbe zum Schmelzschweißen von nicht rostenden und hitzebeständigen Stählen – Einteilung
DIN EN ISO 16834	Schweißzusätze – Drahtelektroden, Drähte, Stäbe und Schweißgut zum Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung
DIN EN ISO 18273	Schweißzusätze – Massivdrähte und -stäbe zum Schmelzschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen – Einteilung
DIN EN ISO 18274	Schweißzusätze – Massivdrähte, -bänder und -stäbe zum Schmelzschweißen von Nickel- und Nickellegierungen – Einteilung
DIN EN ISO 24373	Schweißzusätze – Massivdrähte und -stäbe zum Schmelzschweißen von Kupfer und Kupferlegierungen – Einteilung

Die Norm EN ISO 14341, Schweißzusätze-Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen-Einteilung, liefert eine Einteilung zur Bezeichnung von Drahtelektroden nach ihrer Chemischen Zusammensetzung, nach der Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung des reinen Schweißgutes.

Abschnitte und Tabellen, gekennzeichnet durch ein nachgestelltes „A“ können nur für Drahtelektrodenan-

gewendet werden, die nach der **Streckgrenze** und der durchschnittlichen Kerbschlagarbeit von 47 J des reinen Schweißgutes eingeteilt werden. Abschnitte und Tabellen, gekennzeichnet durch ein nachgestelltes „B“ können nur für Drahtelektroden angewendet werden, die nach der **Zugfestigkeit** und der durchschnittlichen Kerbschlagarbeit von 27 J des reinen Schweißgutes eingeteilt werden.

Abschnitte und Tabellen, die kein nachgestelltes „A“ oder „B“ enthalten, sind für alle nach dieser Norm eingeteilten Drahtelektroden anwendbar

Für das Schweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen werden Drahtelektroden nach EN ISO 14341, Tabelle 5 eingesetzt.

Tabelle 5: Drahtelektroden und Schweißgut zum MSG-Schweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen nach EN ISO 14341 (Auszüge)

ISO 14341-A – G 46 5 M21 3Si1

Metall-Schutzgasschweißen

Kennziffer für Festigkeit und Bruchdehnung des reinen Schweißgutes

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

Kennzeichen für die Kerbschlagarbeit des reinen Schweißgutes

Kennzeichen	Temperatur für die Mindestkerbschlagarbeit von 47 J °C
Z A oder Y	keine Anforderungen +20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60

Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung für Drahtelektroden (Auszug)

Kurzzeichen	C	Si	Mn	Ni	Mo	Al	Ti und Zr
0	Jede andere vereinbarte Zusammensetzung						
2Si	0,06 – 0,14	0,5 – 0,8	0,9 – 1,3	0,15	0,15	0,02	0,15
3Si1	0,06 – 0,14	0,7 – 1,0	1,3 – 1,6	0,15	0,15	0,02	0,15
4Si1	0,06 – 0,14	0,8 – 1,2	1,6 – 1,9	0,15	0,15	0,02	0,15
3Si2	0,06 – 0,14	1,0 – 1,3	1,3 – 1,6	0,15	0,15	0,02	0,15
2Ti	0,04 – 0,14	0,4 – 0,8	0,9 – 1,4	0,15	0,15	0,05 – 0,2	0,05 – 0,25
3Ni1	0,06 – 0,14	0,5 – 0,9	1,0 – 1,6	0,8 – 1,5	0,15	0,02	0,15
2Ni2	0,06 – 0,14	0,4 – 0,8	0,8 – 1,4	2,1 – 2,7	0,15	0,02	0,15
2Mo	0,08 – 0,12	0,3 – 0,7	0,9 – 1,3	0,15	0,4 – 0,6	0,02	0,15
4Mo	0,06 – 0,14	0,5 – 0,8	1,7 – 2,1	0,15	0,4 – 0,6	0,02	0,15
2Al	0,08 – 0,14	0,3 – 0,5	0,9 – 1,3	0,15	0,15	0,35 – 0,75	0,15

Kennzeichen für Schutzgase nach DIN EN ISO 14175

Die Bezeichnung der Drahtelektrode muss dem Prinzip des nachfolgenden Beispiels folgen. Ein mit dem Metall-Schutzgasschweißen hergestelltes Schweißgut besitzt eine Mindeststreckgrenze von 460 MPa (46) und eine durchschnittliche Mindestkerbschlagarbeit von 47 J bei -50°C (5). Eingesetzt wurde ein Mischgas (M21) und eine Drahtelektrode 3Si1. Die Bezeichnung ist wie folgt:

ISO 14341-A-G 46 5 M21 3Si1

- ISO 14341-A Nummer dieser Norm, Einteilung nach Streckgrenze und Kerbschlagarbeit von 47
- G Drahtelektrode und/oder Schweißgut
- 46 Festigkeit und Bruchdehnung
- 5 Kerbschlagarbeit
- M21 Schutzgas
- 3Si1 chemische Zusammensetzung der Drahtelektrode

In Tabelle 6 sind einige Drahtelektrodentypen und deren Anwendung gemäß DIN EN ISO 14341 aufgeführt.

Tabelle 6: Anwendungsbereiche der Drahtelektroden nach EN ISO 14341

Typ 2Si	zum Schweißen von Baustählen unter schwach oxidierenden argonreichen Mischgasen der Gruppen M12 bis M14 nach DIN EN ISO 14175.
Typ 3Si1-	zum Schweißen von Baustählen unter argonreichen Mischgasen der Gruppen M12 bis M27 nach DIN EN ISO 14175. Beim Schweißen mit Mischgasen aus der Hauptgruppe M3 oder CO ₂ vermindert sich die Streckgrenze und Schweißgutzähigkeit (Tabelle 5-2).
Typen 4Si1 und 3Si2	zum Schweißen von Baustählen unter Mischgasen der Gruppen M2, M3 oder C1 nach DIN EN ISO 14175.
Typ 2Ti	Dieser Drahtelektrodentyp weist einen gegenüber anderen Sorten deutlich höheren Anteil an Titan auf. Das Element führt im Stahl zu Feinkörnigkeit. Der Anwendungsbereich der Drahtelektrode ist deshalb beim Schweißen von Feinkornbaustählen zu suchen.
Typen 3Ni1	Der erhöhte Nickelgehalt der Drahtelektroden bewirkt eine Erhöhung der Zähigkeit, besonders bei niedrigen Temperaturen. Der Einsatz dieser Typen ist zu empfehlen, wenn tieftemperaturzähe Stähle zu schweißen sind oder hohe Zähigkeitswerte im Schweißgut verlangt werden.
Typen 2Mo und 4Mo	Durch das Zu Legieren von Molybdän wird die Warmstreckgrenze erhöht. Diese Drahtelektroden sind zu verwenden, wenn Stähle wie 16Mo3 zu schweißen sind.

Einen vergleichbaren Aufbau haben die Normen EN ISO 21952 für warmfeste Stähle und EN ISO 14343 für nicht rostende und hitzebeständige Stähle. In den Abbildungen 14 und 15 sind Beispiele aufgeführt.

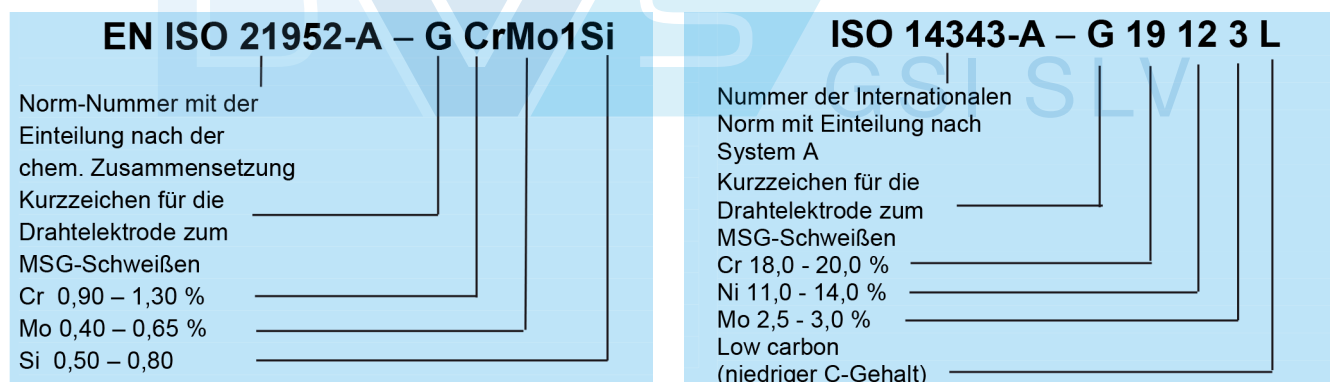


Abbildung 20: Links Beispiel für eine Drahtelektrode, die für den Werkstoff 13CrMo4-5 eingesetzt wird, Rechts - Beispiel für eine Drahtelektrode, die für den Werkstoff X2CrNi19-11 eingesetzt wird

5.2 Schutzgase

Schutzgase sind notwendig, um die heiße Drahtelektrode, den Werkstoffübergang im Lichtbogen, das Schweißbad, die abkühlende Raupe und gegebenenfalls die Rückseite der Naht vor Oxidation und unerwünschter Gasaufnahme aus der Luft zur Vermeidung von Poren und/oder Versprödungen zu schützen. Je nach Werkstoff, Prozessvarianten, Werkstoffübergangsarten, zulässiger Schlackenmenge auf der Raupe und Anforderungen an das Raupenprofil, werden Schutzgase unterschiedlicher Zusammensetzung eingesetzt. Schutzgase sind unterschiedlich gute Wärmeleiter bei den Temperaturen, die im Lichtbogen auftreten, Abbildung 21. Der Wärmeinhalt von mehratomigen Gasen ist durch die Energieaufnahme bei der thermischen Dissoziation größer als der von einatomigen Gasen, Abbildung 22.

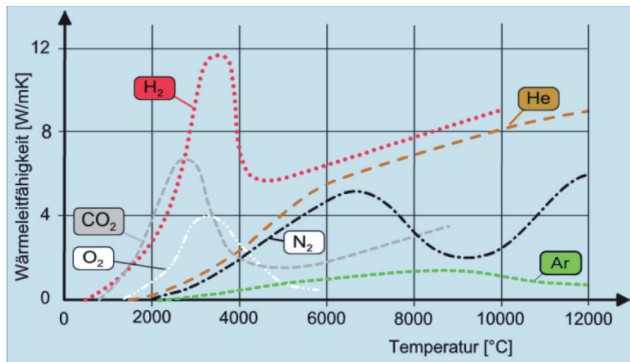


Abbildung 21: Wärmeleitfähigkeit von Gasen bei unterschiedlichen Temperaturen

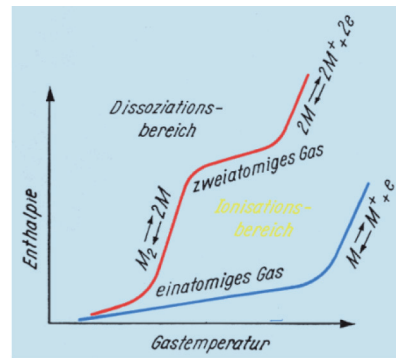


Abbildung 22: Wärmeinhalt von ein- und zweiatomigen Gasen in Abhängigkeit von der Temperatur

5.2.1 Der Lichtbogen beim Schweißen von Stählen und NE-Metallen

5.2.1.1 Der Lichtbogen unter Argon bzw. argonreichen Mischgasen

Das Drahtelektrodenende bietet sofort nach der Lichtbogenzündung nur eine begrenzte Fläche für den Lichtbogenansatz. Die Temperatur an dieser Stelle liegt etwas über dem Verdampfungspunkt von Stahl. Bei dieser Temperatur reicht die thermische Leitfähigkeit des Argons nicht aus, um die Lichtbogenhülle stark zu kühlen und dadurch den Lichtbogen mit großem Metaldampfanteil einzuschnüren. Der Lichtbogen kann deshalb an der Mantelfläche des Drahtes hochsteigen. Dieses Hochsteigen beeinflusst entscheidend den Werkstoffübergang bei Argon und argonreichen Mischgasen, Abbildung 23. Das Drahtende wird durch den Lichtbogenansatz über einen größeren Bereich auch von außen nach innen erwärmt. Die Pinchkraft, die Kräfte durch die Metaldampfbildung und die Oberflächenspannung können dadurch wirksam werden. Diese Kräfte schnüren das flüssige Drahtende ein und beschleunigen den Schmelzefaden, so dass bei ausreichender Stromstärke und Lichtbogenlänge kleine Tropfen in das Schweißbad übergehen. Der sehr heiße Tropfenstrahl bewirkt den fingerförmigen Einbrand in der Raupenmitte. Fälschlicherweise wird dieser Effekt häufig als „Argon-Finger“ bezeichnet. Nach der Zündphase des Lichtbogens ist entlang der Lichtbogenachse die Stromdichte und Pinchkraft unterschiedlich. Die dadurch entstehenden Druckunterschiede erzeugen im Lichtbogen eine Strömung in Richtung Schweißbad. Kälteres Argon strömt nach (Kaltgasströmung) und fördert dadurch die Begrenzung des Lichtbogenquerschnitts.

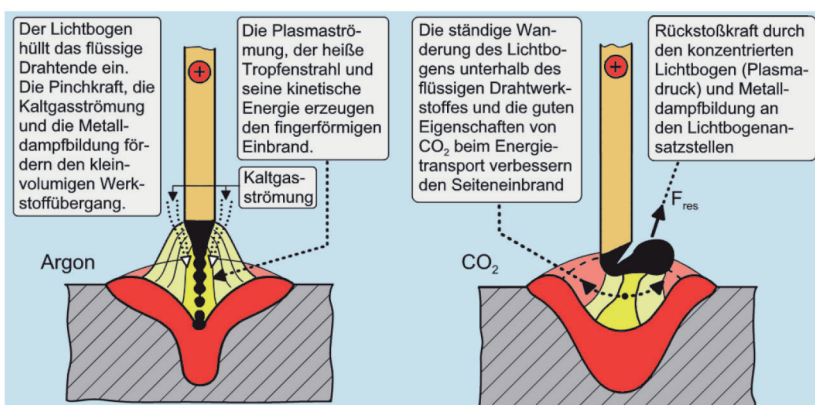


Abbildung 23: Lichtbogenansatzstellen bei Argon und Mischgasen mit geringen CO_2 -Anteilen (Sprühlichtbogen) im Vergleich zu 100% CO_2 (Langlichtbogen)

5.2.1.2 Der Lichtbogen unter reinem CO₂

Im Vergleich zum Argon-Lichtbogen wird bei 100% CO₂ und argonreichen Mischgasen mit mehr als 25 % CO₂ im Lichtbogenbereich an der Lichtbogenhülle eine größere Kühlung wirksam. CO₂ dissoziiert bei höheren Temperaturen (beginnend bei ca. 1600 °C). Besonders durch die Wärmeaufnahme beim Dissoziieren werden die Wärmeleitfähigkeit und der Wärmeinhalt dieses Gases gesteigert. Die Kühlwirkung durch CO₂ an der Lichtbogenhülle ist im Vergleich zu Argon stärker und schnürt daher den Lichtbogen und die Lichtbogenansatzstellen mehr ein. Dadurch erwärmt sich das Drahtende nur in einem kurzen Bereich, Abbildung 23 rechts. Damit ist das Ende der Drahtelektrode immer heißer, als eine Stelle (z.B. 3 mm) knapp oberhalb vom Drahtelektrodenende.

Die Pinchkraft kann dort durch die niedrigere Temperatur des Drahtes nicht wirksam werden, um eine Einschnürung zu bewirken und kleine Tropfen abzulösen. Außerdem erzeugen der komprimierte Lichtbogen und die Metaldampfbildung an den Lichtbogenansatzstellen Rückstoßkräfte, die den Werkstoffübergang hemmen und meistens asymmetrisch auslenken. Das U-förmige Einbrandprofil beim Schweißen mit CO₂ wird durch seine gute Wärmeleitfähigkeit, die Wiedervereinigung von CO und O (mit Energieabgabe) nahe der Schweißbadoberfläche, die höhere Arbeitsspannung im Vergleich zu Argon und durch das ständige Wandern der Lichtbogenansatzstellen erzeugt Abbildung 23. Erst wenn die aufgestaute Drahtmasse groß genug ist, erfolgt der Werkstoffübergang je nach effektiver Lichtbogenlänge mit oder ohne Kurzschluss. Abbildung 24 zeigt einen kurzschlussfreien Werkstoffübergang bei ausreichender Lichtbogenlänge. Bei Werkstoffübergängen mit Kurzschlüssen müssen zur Spritzerreduzierung bei der Lichtbogenwiederzündung die teils hohen Kurzschlussströme mit elektrischen oder elektronischen Maßnahmen gedämpft werden.



Abbildung 24: Großvolumiger Werkstoffübergang beim Schweißen mit CO₂ (Langlichtbogen)

5.2.2 Einteilung und Besonderheiten verschiedener Schutzgase zum MAG-Schweißen

Die Schutzgase sind in DIN EN ISO 14175 genormt. Tabelle 7 enthält eine Einteilungsübersicht aus dieser Norm. Mit der Verwendung von Haupt- und Untergruppen können alle Gassorten mit wenigen Zeichen benannt werden. Die Norm enthält keine Angaben über das chemische Verhalten der Gase und deren Lösungsmöglichkeiten in Schweißgütern. Auch Anwendungsempfehlungen für Schweißaufgaben fehlen.

Tabelle 7: Einteilung der Prozessgase zum Verbindungsschweißen und für verwandte Prozesse, Auszug aus EN ISO 14175.

Symbol		Komponenten in Volumenprozent (nominell)						Chem. Verhalten der Gruppen
Hauptgruppe	Untergruppe	oxidierend		inert		reduzierend	reaktions-träge	
		CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂	N ₂	
I	1			100				inert
	2				100			
	3			Rest	> 0,5 bis 95			
M1	1	> 0,5 bis 5		Rest ^a		> 0,5 bis 5		schwach ↑ oxi-dierend ↓ stark
	2	> 0,5 bis 5		Rest ^a				
	3		> 0,5 bis 3	Rest ^a				
	4	> 0,5 bis 5	> 0,5 bis 3	Rest ^a				
M2	0	> 5 bis 15		Rest ^a				
	1	> 15 bis 25		Rest ^a				
	2		> 3 bis 10	Rest ^a				
	3	0,5 bis 5	> 3 bis 10	Rest ^a				
	4	> 5 bis 15	0,5 bis 3	Rest ^a				
	5	> 5 bis 15	> 3 bis 10	Rest ^a				
	6	> 15 bis 25	0,5 bis 3	Rest ^a				
	7	> 15 bis 25	> 3 bis 10	Rest ^a				
M3	1	> 25 bis 50		Rest ^a				
	2		> 10 bis 15	Rest ^a				
	3	> 25 bis 50	> 2 bis 10	Rest ^a				reduzierend
	4	> 5 bis 25	> 10 bis 15	Rest ^a				
	5	> 25 bis 50	> 10 bis 15	Rest ^a				
C	1	100						
	2	Rest	> 0,5 bis 30					
R	1			Rest ^a		> 0,5 bis 15		reaktions-träge
	2			Rest ^a		> 15 bis 50		
N	1						100	reaktions-träge
	2			Rest ^a			> 0,5 bis 5	
	3			Rest ^a			> 5 bis 50	reduzierend
	4			Rest ^a		> 0,5 bis 10	> 0,5 bis 5	
	5					0,5 bis 50	Rest	
O			100					
Z	Mischgase mit Komponenten, die nicht in der Tabelle aufgeführt sind oder Mischgase mit einer Zusammensetzung außerhalb der angegebenen Bereiche. ^b							Diese Spalte ist nicht Bestandteil der Norm

^a Für diese Einteilung darf Argon teilweise oder vollständig durch Helium ersetzt werden.

^b Zwei Mischgase mit der selben Z-Einteilung dürfen nicht gegen einander ausgetauscht werden.

Beim MAG-Schweißen von Stählen kommen neben CO_2 sehr häufig argonreiche Mischgase (z. B. $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2$) zur Anwendung. Die große Affinität des Sauerstoffes zu den meisten Elementen in den zu schweißenden Werkstoffen bewirkt je nach Sauerstoffmenge bei den gegebenen Temperaturen eine rasche Bildung von Oxiden, die weitgehend auf der Schweißraupe ausgeschieden werden. Mit zunehmenden Oxidationsgrad, von M1 über M2 nach M3 oder C1, als Haupt- oder Untergruppe des Schutzgases, nehmen die Abbrandverluste und damit die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes ab. Mit steigendem Oxidationsgrad nehmen in der Regel Streckgrenze, Dehnung und Zähigkeit ab. In den Katalogen für die Zusatzwerkstoffe sind deshalb die Schweißguteigenschaften nach EN ISO 14341 grob nach dem Oxidationsgrad (C und M) eingeteilt. Bei geringen Oxidationsgraden (M) werden die mechanisch-technischen Eigenschaften der Schweißnaht besser, mit steigendem Oxidationsgrad steigt auch die Menge der sich bildenden Spritzer.

Die Einflüsse der Schutzgaszusammensetzung beim MAG-Schweißen auf das Raupenprofil und die Beschaffenheit der Raupenoberfläche zeigt Abbildung 25, eine Zusammenfassung der Eigenschaften von Schutzgasen sind in der Tabelle 8 gegenübergestellt.

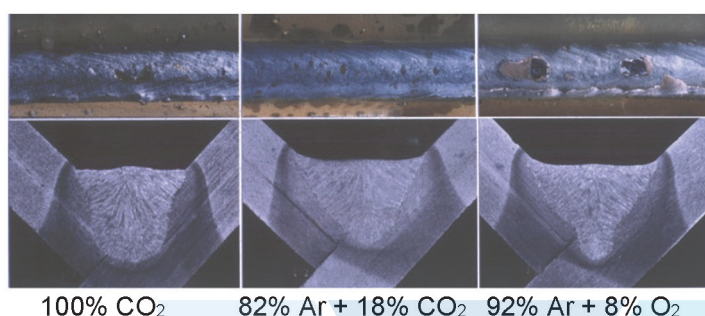


Abbildung 25: Einflüsse der Schutzgaszusammensetzung auf das Einbrandprofil und Ablagerungen von Oxiden (Schlacke) auf der Raupe

Tabelle 8: Zusammenfassung der Eigenschaften von Schutzgasen für unlegierte Stähle und Feinkornbaustähle (mittlerer Bereich der Abschmelzleistung).

Kriterien Schutzgas	Spritzer- menge	mech.-techn. Eigen- schaften	Einbrandprofil	Silikatablagerungen (Schlacke)
M1	↓ zunehmend	↓ abnehmend	↓ zunehmend	↓ zunehmend
M2				
M3				
C1				

Beim Schweißen von CrNi-Stählen wird zur Vermeidung von Kohlenstoffzubrand der CO_2 -Anteil in Mischgasen meistens auf 2-3% begrenzt. Argon- O_2 -Gemische (1-3%) ergeben größere Oxidmengen auf der Raupe. In Sondergasen wird beim Schweißen von CrNi-Stählen und Nickelbasiswerkstoffen ein Teil des Argons durch Helium ersetzt (weniger Oxide auf der Raupe und höhere Schweißgeschwindigkeiten möglich).

Beim MIG-Schweißen von Aluminium und seinen Legierungen kommen aus metallurgischen Gründen nur Schutzgase der Gruppe I1, I2 und I3 zum Einsatz, siehe auch Kapitel 2.20, Tabelle 30. Die Vorteile von heliumhaltigen Schutzgasen gegenüber Argon sind

- Verbesserung der Nahtgeometrie (breiter, tiefer), Abbildung 26
- höhere Schweißgeschwindigkeit
- geringe Porenbildung, Abbildung 27
- Reduzierung des Vorwärmaufwandes bzw. Zwischenwärmern bei dickwandigen Al-Bauteilen, siehe auch Kapitel 2.20.

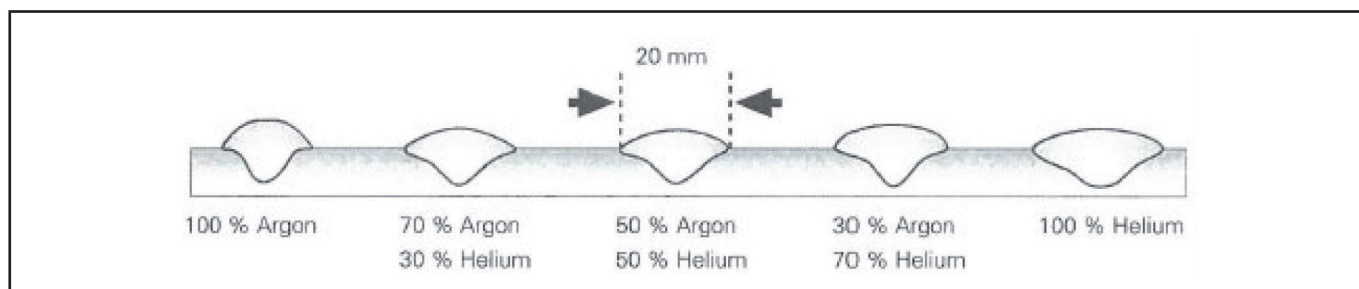


Abbildung 26: Einbrandformen bei verschiedenen Schutzgasen beim MIG-Schweißen, Grundwerkstoff AlMg4,5Mn, Schweißstrom 240 A, Blechdicke 20 mm (Quelle Messer Group)

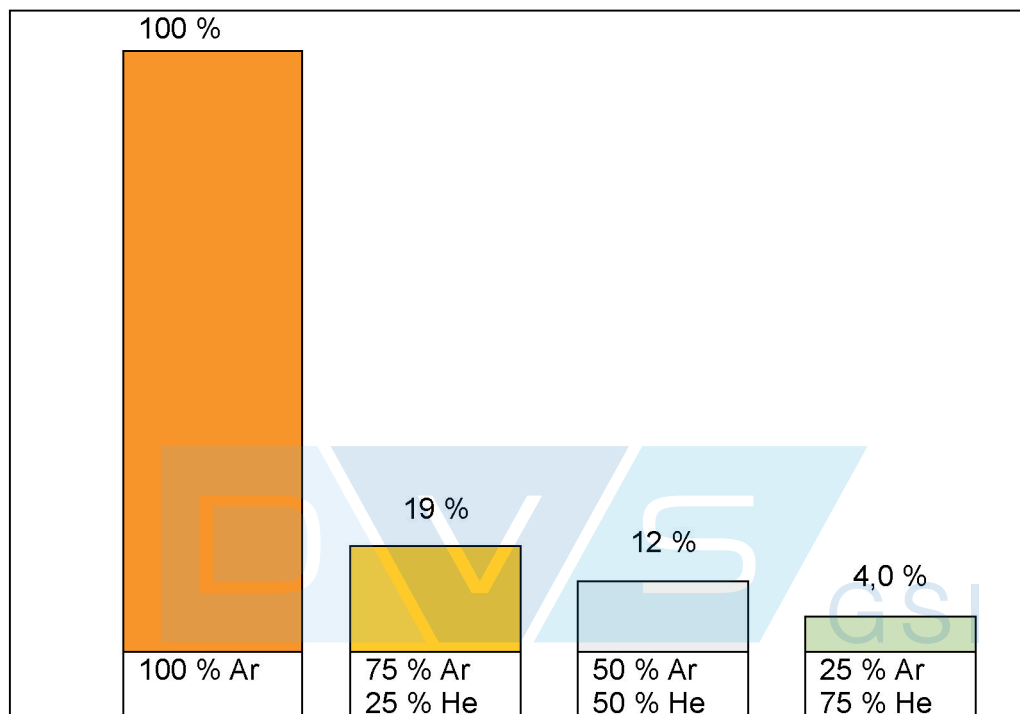


Abbildung 27: Porenreduktion beim MIG-Schweißen (Quelle PanGas)

Besonderheiten heliumhaltiger Schutzgase zum MIG-Schweißen sind

- erhöhte Spannung
- höhere Gasmenge aufgrund geringerer Dichte
- Durchflussmesser für Argon können weiter verwendet werden. Korrekturfaktoren zur tatsächlichen Durchflussmengenermittlung, *siehe auch Kapitel 1.06.*
- höherer Preis

In der Praxis haben sich die heliumhaltigen Schutzgase der Gruppe I3 bestens bewährt, wobei bei zunehmender Wandstärke auch der Heliumanteil zunimmt.

6 Einstellgrößen beim Schweißen mit stufengeschalteten Schweißgleichrichtern

Einfache Stromquellen besitzen 2 Knöpfe zum Einstellen des Lichtbogens, die Spannungseinstellung und den Drahtvorschub. Dazu kommt bei aufwendigeren Geräten noch eine verstellbare Induktivität (Drossel) um bei Werkstoffübergängen mit Kurzschlüssen Stromstärkespitzen zu glätten.

Die Zusammenhänge beim Einstellen und Verstellen der Arbeitspunkte im Lichtbogenkennlinienfeld werden mit Darstellung des Raupenprofils aufgezeigt.

Die Bewegung des Arbeitspunktes auf der eingestellten statischen Kennlinie durch Änderungen der Drahtgeschwindigkeit bewirkt Veränderungen der Stromstärke zeigt Abbildung 28.

Die Bewegung des Arbeitspunktes, bei gleichbleibender Drahtgeschwindigkeit, bei Anwendung verschiedener statischer Kennlinien zeigt Abbildung 29.

Die Bewegung des Arbeitspunktes auf der Lichtbogenkennlinie durch gleichzeitiges Verstellen der statischen Kennlinie und der Drahtgeschwindigkeit zeigt Abbildung 30

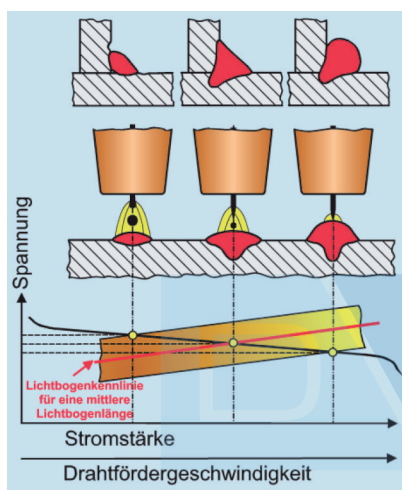


Abbildung 28: Bewegung des Arbeitspunktes auf der statischen Kennlinie durch Änderungen der Drahtgeschwindigkeit

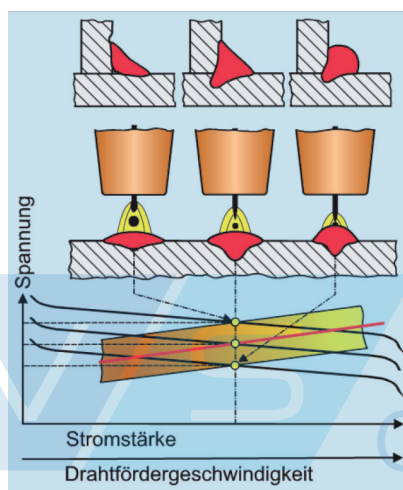


Abbildung 29: Bewegung des Arbeitspunktes, wenn bei gleichbleibender Drahtgeschwindigkeit verschiedene statische Kennlinien zur Anwendung kommen

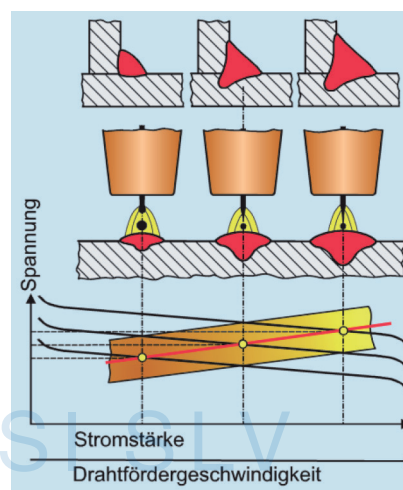


Abbildung 30: Bewegung des Arbeitspunktes auf der Lichtbogenkennlinie durch gleichzeitiges Verstellen der statischen Kennlinie und der Drahtgeschwindigkeit

Zusammenfassend dargestellt, wie sich bei Verschiebungen des Arbeitspunktes die effektive Lichtbogenlänge und das Raupenprofil verändern zeigt Abbildung 31.

Veränderungen der Schutzgaszusammensetzung können bei gleichbleibender Drahtgeschwindigkeit und Spannung die Lichtbogenlänge beeinflussen. Beispiele von Arbeitskennlinien von verschiedenen Schutzgasen zeigt Abbildung 32.

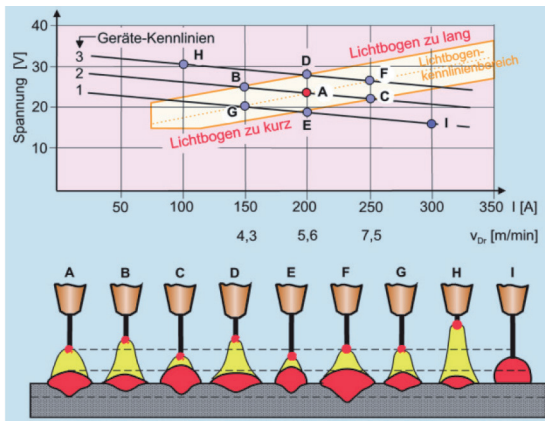


Abbildung 31: Verändern des Arbeitspunktes im Lichtbogenkennlinienbereich durch das Verstellen von Drahtfördergeschwindigkeit und/oder statischer Kennlinie der Schweißstromquelle. Die Auswirkungen auf die effektive Lichtbogenlänge, Stromstärke und das Raupenprofil sind im unteren Bildteil schematisiert dargestellt

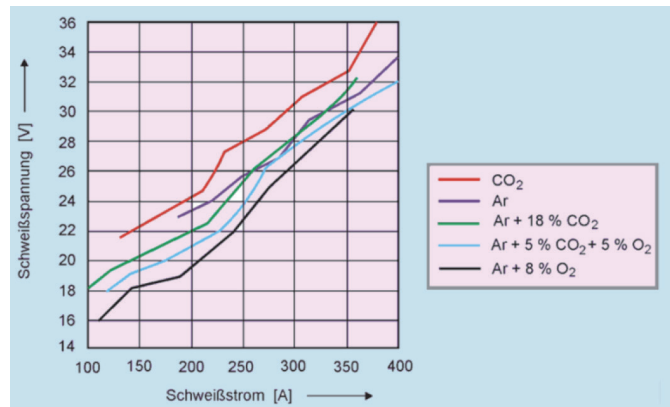


Abbildung 32: Arbeitsspannung und Schweißstrom bei verschiedenen Schutzgasen (Werte aus Versuchsreihen). Drahtelektrode: 3Si1, Durchmesser 1,2 mm.

7 Einflussgrößen auf die Nahtgeometrie beim MSG-Schweißen

In Folgendem sind verschiedene Einflussgrößen auf die Nahtgeometrie beim MSG-Schweißen beschrieben.

7.1 Lichtbogenspannung (Lichtbogenlänge)

Die Lichtbogenspannung bestimmt die Lichtbogenlänge, die Raupenbreite, Metaldampfmenge, die magnetische Ablenkbarkeit des Lichtbogens und den Lichtbogendruck auf das Schweißbad. Ist die Lichtbogenspannung groß, wird die Raupe flach und breit und es können Randkerben entstehen. Eine zu geringe Spannung ergibt schmale, stark überhöhte Raupen.

7.2 Drahtvorschubgeschwindigkeit

Die Drahtgeschwindigkeit ist direkt proportional zur Abschmelzleistung und steht in einem fast linearen Verhältnis zur Schweißstromstärke. Eine zunehmende Drahtgeschwindigkeit erhöht neben der Abschmelzleistung die Stromstärke und die Einbrandtiefe.

7.3 Stromkontaktrahabstand

Der Stromkontaktrahabstand ist definiert als Abstand zwischen Stromkontaktröhrende und der Werkstückoberfläche. In der Praxis werden im unteren Strombereich geringere (etwa 10-15 mm) und im oberen Strombereich größere (15-20 mm) Werte eingestellt, um das Stromkontaktröhre und die Gasdüse thermisch zu entlasten. Der Einfluss des Stromkontaktrahabstandes auf die Stromstärke und damit auch auf die Einbrandtiefe zeigt Abbildung 33.

Bei Kehlnähten in spitzen Winkeln kann das Stromkontaktröhre aus der Gasdüse vorstehen

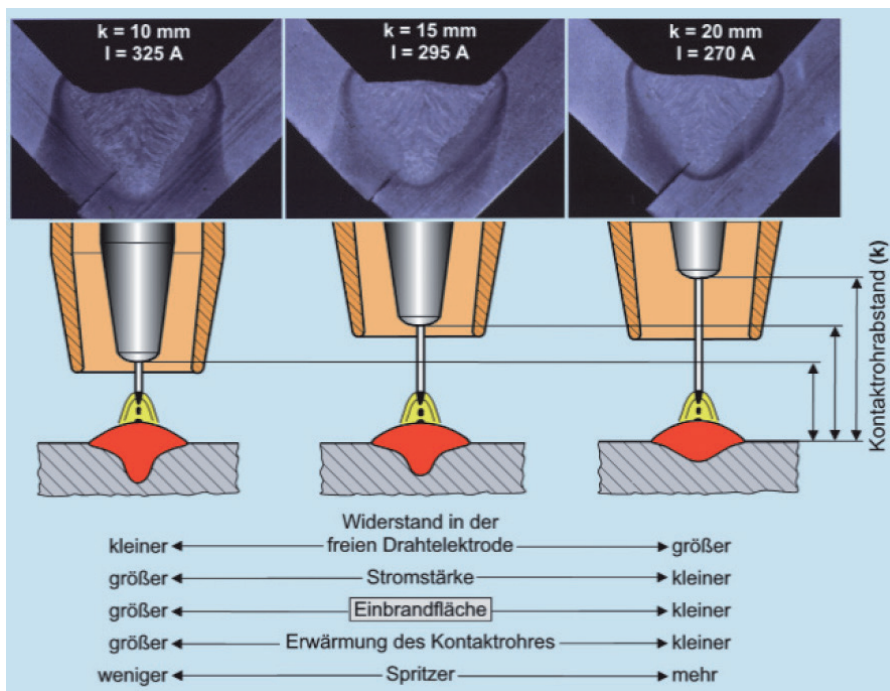


Abbildung 33: Einflüsse der freien Drahtelektrodenlänge

7.4 Schweißgeschwindigkeit

Bei konstanten Schweißdaten verringert eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit den Raupenquerschnitt, siehe Abbildung 34. Soll bei erhöhter Schweißgeschwindigkeit gleiche Nahtgeometrie erreicht werden, so müssen die Schweißspannung und die Drahtgeschwindigkeit erhöht werden.

Beim Handschweißen sind Schweißgeschwindigkeiten von 40-60 cm/min sinnvoll, beim mechanisierten Schweißen kann die Schweißgeschwindigkeit bis zur Verfahrensgrenze gesteigert werden. Schweißgeschwindigkeiten von 1-1,5 m/min sind bei vielen Schweißaufgaben in der Serienfertigung üblich. Wird die Schweißgeschwindigkeit auf Werte unter 40 cm/min verringert, so kann ein vorlaufendes Schweißbad den Einbrand stark vermindern, sodass Bindefehler auftreten können, siehe Abbildung 35. Mehrlagenschweißen ist dann anzuwenden.

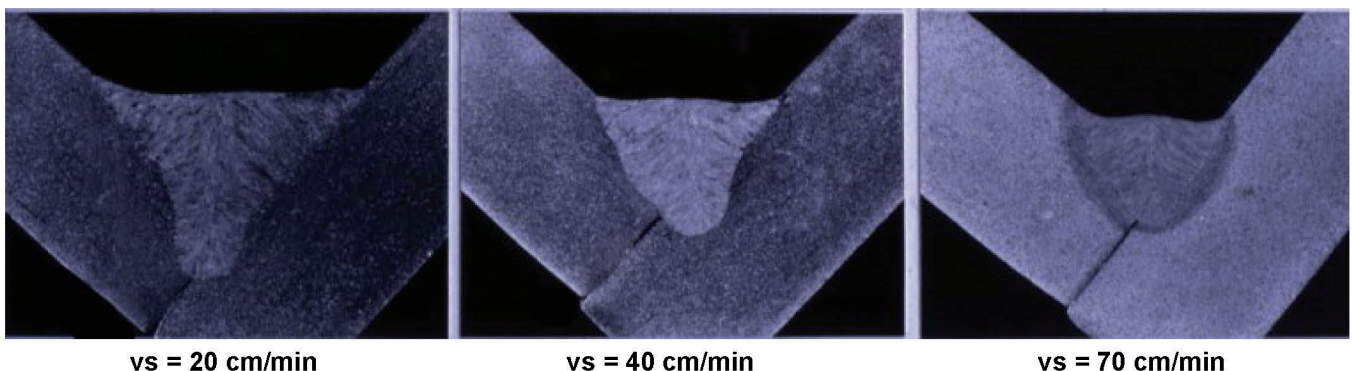


Abbildung 34: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf das Raupenprofil beim Schweißen von Kehlnähten. Gleichbleibende Parameter: $v_{Dr} = 10 \text{ m/min}$; $I_s = 300 \text{ A}$; $U_s = 29 \text{ V}$; Schutzgas: M21-ArC-18.

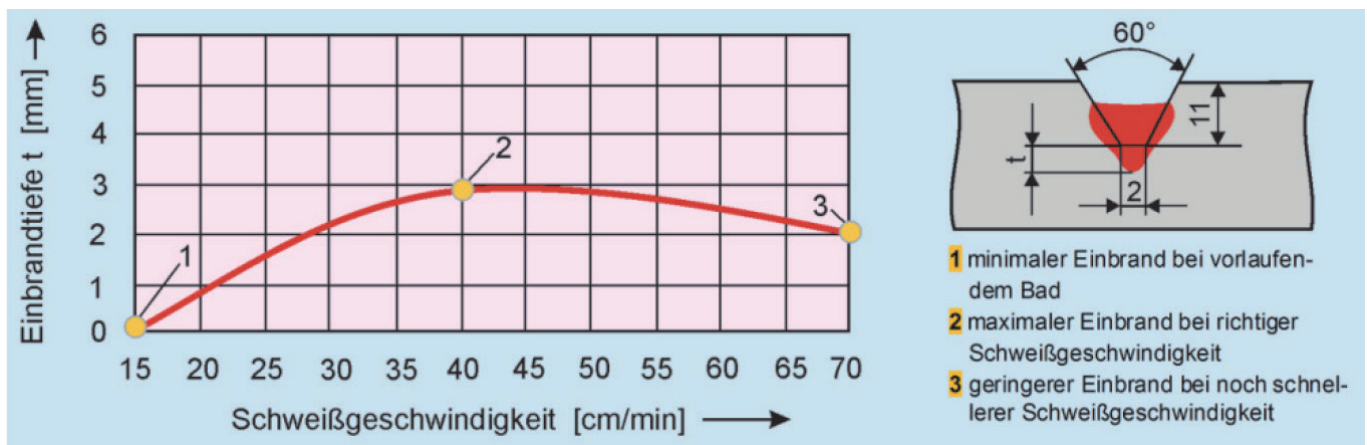


Abbildung 35: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Einbrandtiefe

7.5 Drahtelektrodenstellung

Die Führung der Drahtelektrode hat entscheidenden Einfluss auf das Raupenprofil und auf die Flankenbenetzung. Eine Orientierung zum Wurzelfußpunkt vermeidet Bindefehler.

7.6 Stirnflächenabstand (I-Nähte)

Stirnflächenabstände, Fugenspalte, verbessern die Einschmelztiefe und verringern die Raupenhöhe, siehe Abbildung 36. Die gleiche Tendenz ergibt sich auch bei anderen Stoß- und Fugenformen mit Spalten

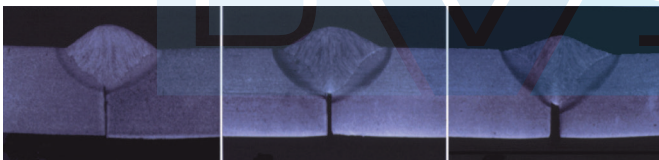


Abbildung 36: Einfluss des Stirnflächenabstandes beim MAG-Schweißen von I-Nähten

7.7 Brenneranstellwinkel

Die Brenneranstellung, stechend, neutral, oder schleppend, beeinflusst die Einbrandform und die äußere Nahtgeometrie.

Eine stechende Brenneranstellung breitet die Raupe, der Einbrand und die Raupenhöhe werden aber geringer. Bei schleppender Brennerstellung wird die Naht schmal und überhöht sowie der Einbrand tiefer, Abbildung 37.

Die Brenneranstellung beim Schweißen von Fallnähten sollte etwa 90° bis leicht schleppend zur Blechoberfläche sein.

Al-Werkstoffe sollten immer stechend geschweißt werden. Beim schleppenden Schweißen entsteht meistens ein dunkler Belag (Kondensat der Dämpfe aus dem Lichtbogenraum auf und neben der Raupe).

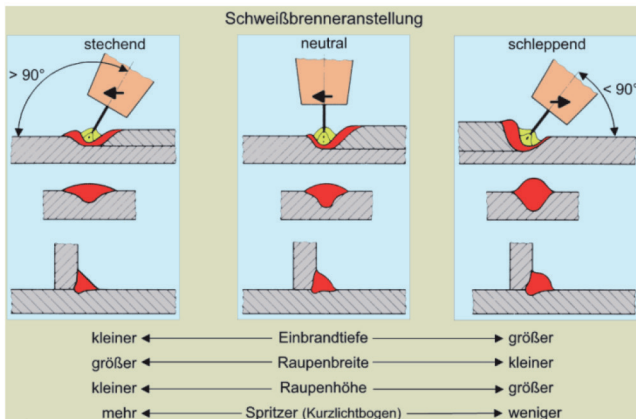


Abbildung 37: Übersicht über die Einflüsse der Brenneranstellung auf das Raupenprofil

Die Schweißnahtpositionen sind mit Kurzzeichen oder Winkelangaben (Nahtdreh- und Nahtneigungswinkel) in DIN EN ISO 6947 eingeteilt.

Beim Schweißen in den waagrechten oder horizontalen Nahtpositionen lassen sich die höchsten Abschmelzleistungen erreichen. Das Schweißen von Fallnähten mit ausreichendem Einbrandprofil, ist nur mit optimierten Parametern und begrenzter Nahtdicke erreichbar. Einen besonderen Einfluss hat die Schweißgeschwindigkeit, Abbildung 38.

Der Lichtbogen wird in der Fallnahtposition kurz (bis an die Spritzergrenze) eingestellt, Kurz- und Übergangslichtbogen sind dafür geeignet. Fallnahtschweißen an Al-Werkstoffen ist wegen der relativ kleinen Viskosität der flüssigen Werkstoffe erheblich schwieriger im Vergleich zu Stahl.

Am sich drehenden Rohr oder mit Positioniereinrichtungen sind alle Nahtneigungswinkel einstellbar. Auswirkungen auf die Nahtgeometrie, Abbildung 39.

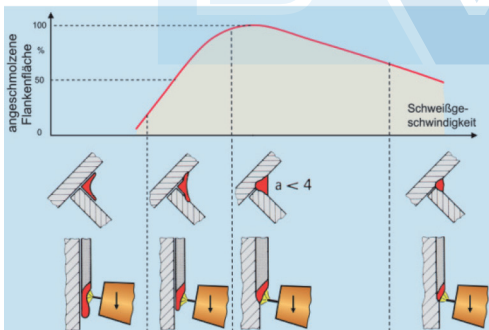


Abbildung 38: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Flankenauflöschung bei Fallnähten

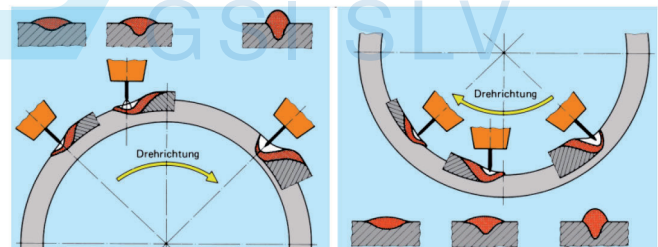


Abbildung 39: Neigungswinkel mit Einfluss auf die Nahtgeometrie

Die steigende Nahtposition für dickere Nähte ist mit pendelnder Brennerbewegung und eingeschränkter Lichtbogenleistung gut formbar, die Schweißgeschwindigkeit und die Abschmelzleistung sind dabei kleiner. Die „Pendelmuster“ sind bei Kehl- und Stumpfnähten unterschiedlich, Kehlnähte siehe Abbildung 40, Stumpfnähte siehe Abbildung 41.

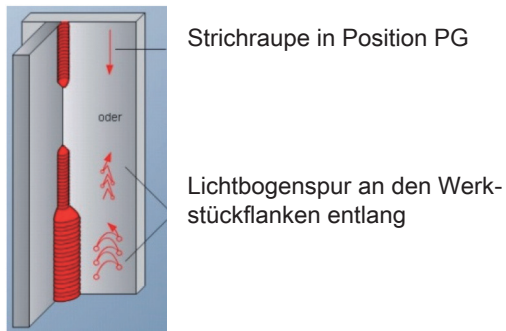


Abbildung 40: Drahtelektrodenführung und Lagenaufbau beim Schweißen von senkrechten Kehlnähten

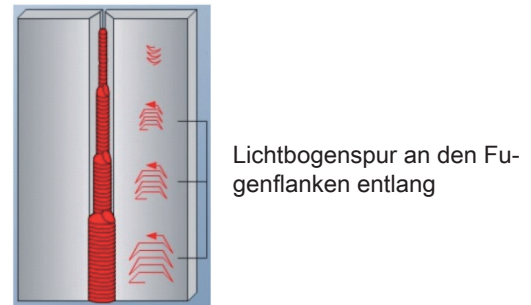


Abbildung 41: Drahtelektrodenführung und Lagenaufbau beim Schweißen von senkrechten Stumpfnähten

Mit Intervallschaltungen bei stufenförmiger Einstellung der Stromquelle oder mit periodisch wechselnder Lichtbogenleistung bei elektronischen Schweißanlagen sind Steignähte *ohne* Pendelbewegung zügig und bindefehlerfrei schweißbar, siehe Abbildung 42.

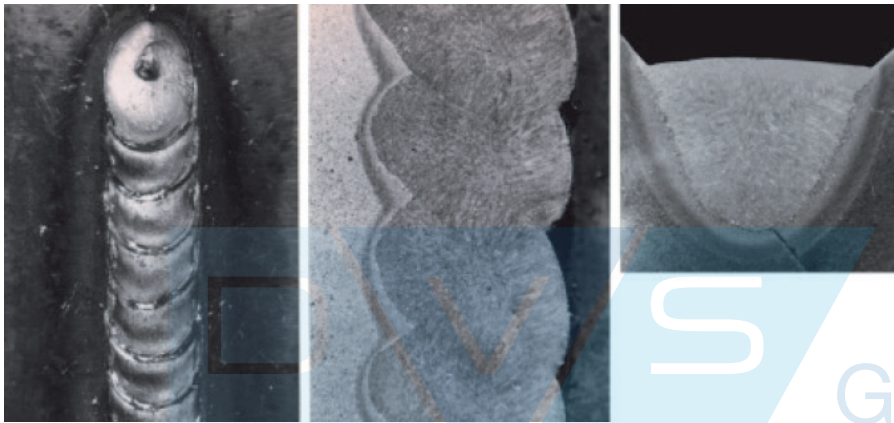


Abbildung 42: Steignaht in Intervallen geschweißt, $a = 4,5 \text{ mm}$

8 Drahtelektrodenpolung, Kräfte am Lichtbogen und Werkstoffübergangsarten (Lichtbogenarten)

Die Polung der Drahtelektrode und der Werkstoffübergang von der Drahtelektrode zum Werkstück haben wesentlichen Einfluss auf die Nahtgeometrie, das Raupenprofil und dem Lichtbogen.

8.1 Polung der Drahtelektrode

Beim MSG-Schweißen wird in der Regel mit plusgepolter Drahtelektrode, bei einigen Fülldrähten aber auch mit minusgepolter Drahtelektrode geschweißt. Die wichtigsten Einflüsse der Drahtelektrodenpolung enthält Abbildung 43. Die Reinigungswirkung beim MIG/MAG-Schweißen mit dem Impulslichtbogen von Stahl und Aluminium zeigt die Abbildung 44.

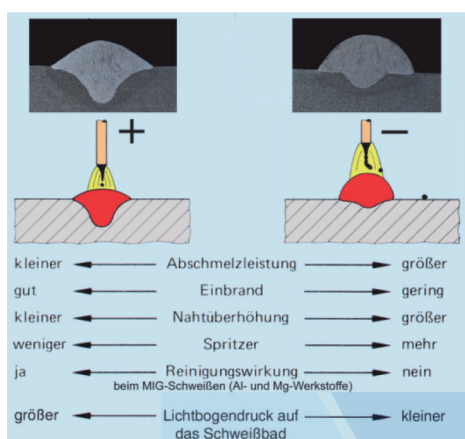
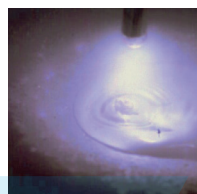


Abbildung 43: Übersicht über die Einflüsse der Drahtelektrodenpolung



MIG-Auftragschweißung auf Stahl mit vorausgehendem Reinigungshof (Impulslichtbogen, Pluspolung)



MIG-Auftragschweißung auf einem Al-Werkstoff mit vorausgehendem Reinigungshof (Impulslichtbogen, Pluspolung)

Abbildung 44: Kathodischer Reinigungseffekt durch Pluspolung der Drahtelektrode

8.2 Einfluss der Drahtelektrodenndurchmesser auf die Abschmelzleistung und Raupenprofile

Je nach Schweißaufgabe wird der Drahtelektrodenndurchmesser, 0,8 mm, 0,9 mm 1,0 mm, 1,2 mm, 1,6 mm, gewählt. Die Strombelastbarkeit und die Abschmelzleistung nimmt mit dem Drahtelektrodenndurchmesser zu, Abbildung 45. Wichtige Einflüsse, die bei der Wahl der Drahtelektrodenndurchmesser zu berücksichtigen sind, enthält Abbildung 46. Abbildung 47 gibt einen Überblick, wie sich bei verschiedenen Drahtdurchmessern beispielsweise bei gleicher Abschmelzleistung oder Stromstärke die Raupenprofile verändern.

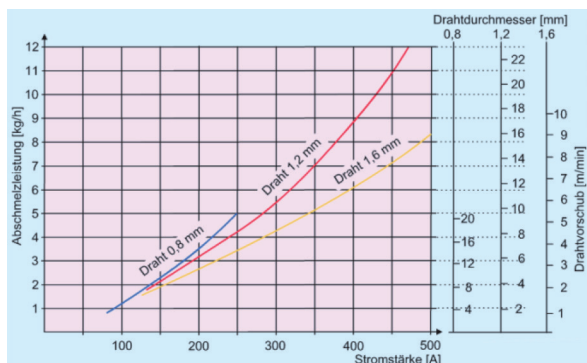


Abbildung 45: Abschmelzleistung in Abhängigkeit vom Schweißstrom für verschiedene Drahtdurchmesser



Abbildung 46: Einflüsse der Drahtelektrodenndurchmesser beim MSG-Schweißen

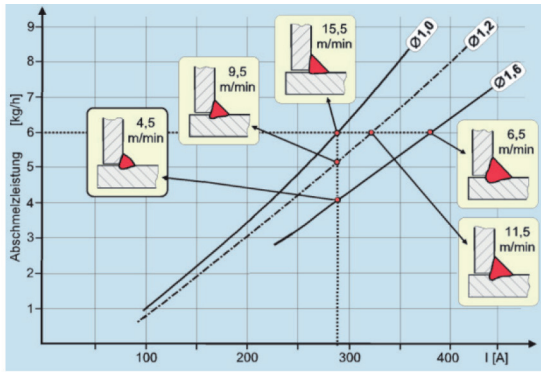


Abbildung 47: Einfluss der Drahtelektrodenendurchmesser mit Beispielen für die Veränderung des Raupenprofils bei gleichbleibender Abschmelzleistung oder Stromstärke

8.3 Kräfte am Lichtbogen

Am Drahtelektrodenende, dem Lichtbogenansatz am Draht und Schweißbad, und im Lichtbogen wirken unterschiedliche Kräfte, die den Werkstoffübergang von der Drahtelektrode zum Schweißbad und das Raupenprofil beeinflussen können. In Abbildung 48 sind die wichtigsten Kräfte schematisch dargestellt und weitere Kräfte genannt. Zusätzlich spielt die Temperatur und die Temperaturverteilung am Drahtende eine wichtige Rolle bei der Tropfenablösung.

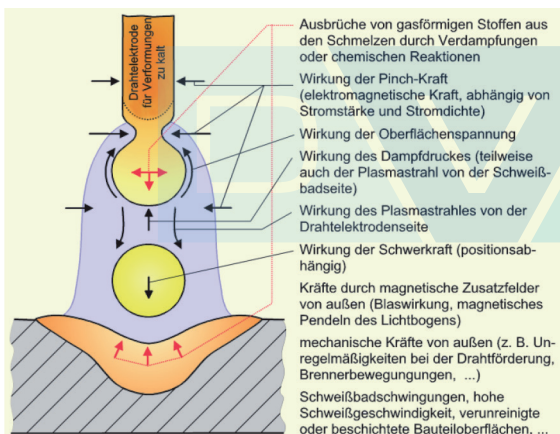


Abbildung 48: Kräfte und Einflüsse im Lichtbogenbereich beim MSG-Schweißen

Die Pinchkraft ist eine elektromagnetische Kraft, die an jedem stromführenden Leiter wirkt, im Quadrat zur Querschnittsfläche abnimmt und im und Quadrat zur Schweißstromstärke wächst. Diese Kraft nicht sehr groß und kann nur wirksam werden, wenn das Drahtende teigig oder flüssig ist. Bei geringer Stromstärke (geringe Erwärmung der Drahtelektrode) reicht die Pinchkraft nicht aus, um bei der Tropfenbildung ausreichend mit zu wirken. Es gehen große Tropfen in das Schweißbad über. Bei kleiner Stromstärke sind die Schwerkraft und Oberflächenspannung die wichtigsten Einflüsse beim Werkstoffübergang. Bei hoher Stromstärke wird die sog. kritische Stromstärke überschritten. Die Pinchkraft kann dann das flüssige Drahtende einschnüren und kleine Tropfen ablösen. Voraussetzung ist allerdings, dass Schutzgase mit geringer Wärmeleitfähigkeit (Ar , $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 < 20\%$) zur Anwendung kommen, um größere Rückstoßkräfte zu vermeiden.

Eine oft markante Kraft ist der Dampfdruck, der durch das Überhitzen der Schweißbadoberfläche und besonders dem flüssigen Drahtelektrodenende entsteht. Bei ungünstiger Form der Lichtbogenansatzstelle kann der Dampfdruck der Tropfenablösung entgegenwirken, Abbildung 49. Bei größeren Lichtbogenleistungen und kurzer Lichtbogenlänge kann der Lichtbogen in der Mulde im Schweißbad arbeiten, es wird eine große Einbrandtiefe erreicht und der Spritzerauswurf und die Metaldampfbildung wird minimiert, Abbildung 50.

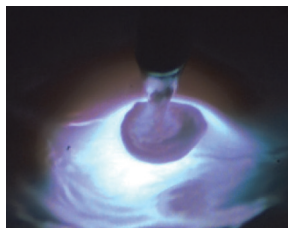


Abbildung 49: Pinch-Kraft und Rückstoßkraft formen im Widerstreit zeitweise fladenförmige Werkstoffübergänge (Impulslichtbogen, 82% Ar + 18% CO₂)

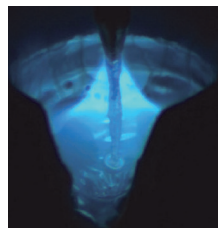


Abbildung 50: Die Summe der Kräfte im Lichtbogenbereich ermöglicht das Eindringen des Lichtbogens in das Schweißbad (V-Naht, 30°) bei größerer Lichtbogenleistung und angepasster Arbeitsspannung

8.4 Werkstoffübergang (Lichtbogenarten)

Eine Übersicht über die Arbeitsbereiche und einige Merkmale der Lichtbogenarten beim MAG-Schweißen zeigt Abbildung 51. Ohne Beachtung einiger Randbedingungen an einer Schweißanlage sind keine genauen Angaben über Stromstärken möglich. Als Orientierungshilfe dienen die Drahtelektroden geschwindigkeit mit 10 m/min, der Drahtelektroden durchmesser von 1,2 mm und die Stromstärke mit ca. 280 bis 300 A.

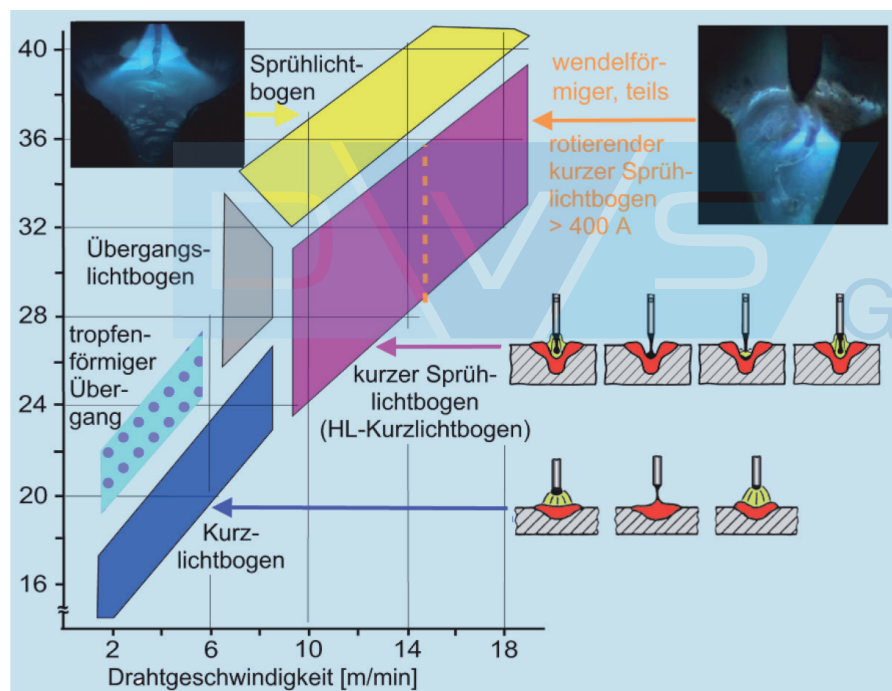


Abbildung 51: Übersicht über die Arbeitsbereiche der Lichtbogenarten beim MAG-Schweißen Schutzgas: 89% Ar, 5% CO₂, 6% O₂, Drahtelektrode: EN ISO 14341 G3 Si1, Durchmesser 1,2 mm

Die wichtigsten Lichtbogenarten und ihre Kurzbezeichnung sind in den Regelwerken zusammengefasst und in der Tabelle 9 aufgeführt.

Tabelle 9: Unterscheidung des MSG-Schweißens nach Art des Lichtbogens (in Anlehnung an DIN 1910-100 und Bezeichnungen nach DIN EN ISO 4063)

Benennung	Werkstoffübergang beim MSG- Schweißen und seine zeitliche Folge	Kurzzeichen nach DIN 1910-100	Kurzzeichen nach DIN EN ISO 4063
Impulslichtbogen (-schweißen)		p	P Pulsed transfer
Sprühlichtbogen (-schweißen)	praktisch kurzschlussfrei, gleichmäßig, feintropfig	s	S Spray transfer
Langlichtbogen (-schweißen)	unregelmäßig im Kurzschluss, grobtropfig	l	G Globular transfer
Übergangslichtbogen (-schweißen)	nur im Kurzschluss, teils kurzschlussfrei, fein- bis grobtropfig	ü	
Kurzlichtbogen (-schweißen)	nur im Kurzschluss	k	D Short-circuit transfer (dip transfer)

8.4.1 Kurzlichtbogen

Mit dem Begriff Kurzlichtbogen wird der Lichtbogenprozess bezeichnet, bei dem der Werkstoffübergang immer im Kurzschluss erfolgt, d.h. der Lichtbogen erlischt nach dem Eintauchen der flüssigen Drahtelektrode in das Schweißbad. Der ansteigende Kurzschlussstrom bewirkt die Lichtbogenwiederzündung, Abbildung 52.

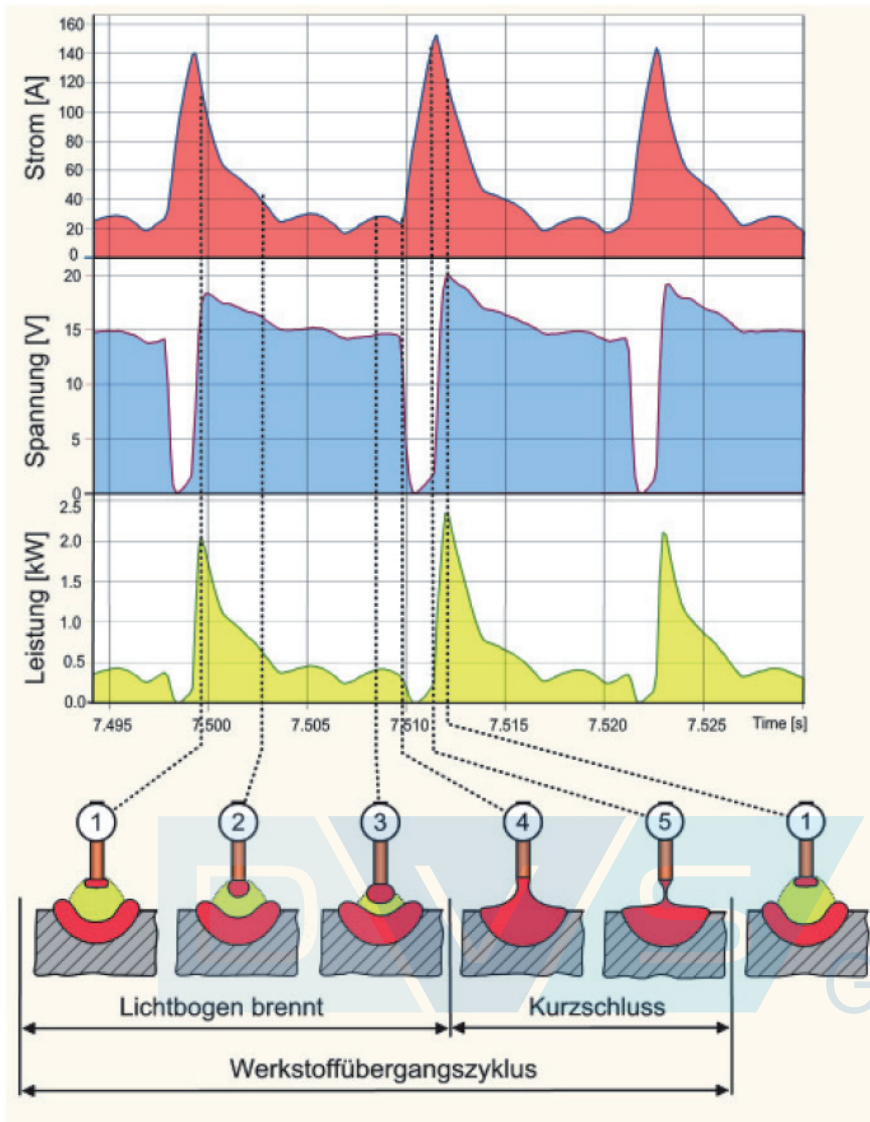


Abbildung 52: Werkstoffübergang im Kurzlichtbogen und typischer Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf (Stromquelle ohne Leistungselektronik)

8.4.2 Übergangslichtbogen

Diese Lichtbogenart tritt beim Schweißen mit argonreichen Mischgasen im Grenzbereich zwischen Kurz- und Sprühlichtbogen auf. Bei angehobener Arbeitsspannung im Übergangslichtbogenbereich geht ein Teil des angeschmolzenen Drahtwerkstoffes bereits ohne Kurzschlüsse, aber bedingt durch die geringere Stromstärke (geringere Pinchkraft als beim Sprühlichtbogen) grobtropfig über.

Ist der Lichtbogen relativ kurz, treten häufig Kurzschlüsse beim Werkstoffübergang auf. Diese Kurzschlüsse in Verbindung mit verhältnismäßig hohen Kurzschlussstromstärken, können stärkere Spritzer verursachen, die am Bauteil festschweißen. Der Übergangslichtbogen sollte gemieden werden, ist aber besonders bei Fallnahtpositionen nicht immer vermeidbar. Der Impulslichtbogen kann diesen Stromstärkebereich sehr spritzerarm überdecken.

8.4.3 Langlichtbogen

Beim Schweißen unter 100 % CO₂ oder argonreichen Mischgasen mit mehr als 25 % CO₂ erfolgt der großvolumige Werkstoffübergang ohne Lichtbogenunterbrechungen und größerem Spritzerauswurf (langer Langlichtbogen), Abbildung 53. Neben den Lichtbogenwanderungen tragen die gute Wärmeleitfähigkeit von CO₂ und der größere Spannungsabfall im CO₂-Lichtbogen zum großflächigen, meistens U-förmigen Einbrandprofil bei, Abbildung 53.

Bei abnehmender Arbeitsspannung geht der Werkstoffübergang von Kurzschlüssen begleitet, in das Schweißbad über. Die durch verhältnismäßig hohe Kurzschlussströme entstehenden Spritzermengen sind auch bei gut abgestimmten Schweißparametern meistens wesentlich stärker als bei argonreichen Mischgasen.

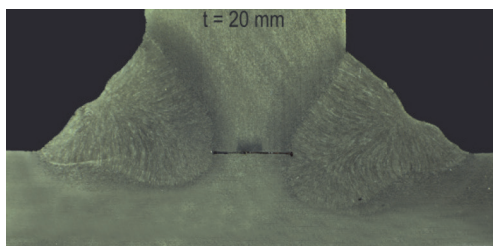


Abbildung 53: Typisches Raupenprofil beim Schweißen mit dem Langlichtbogen (CO₂-Lichtbogen, Pos. PA)

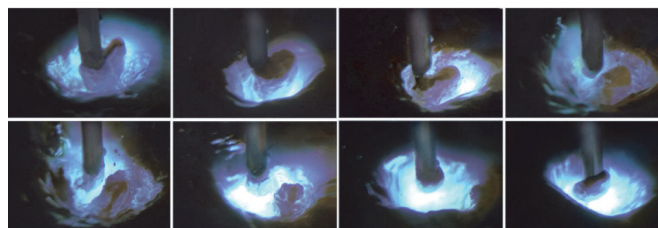


Abbildung 54: Typischer Werkstoffübergang beim „langen Langlichtbogen“ mit größerer Arbeitsspannung ohne Lichtbogenunterbrechungen und Spritzer.

8.4.4 Sprühlichtbogen

Die Stromstärke für den Beginn des Sprühlichtbogens ist abhängig vom Drahtdurchmesser und der Schutzgaszusammensetzung, Abbildung 55. Da beim Schweißen mit dem Sprühlichtbogen mit freiem Tropfenflug im Lichtbogen keine größere Widerstandsänderungen auftreten, ist der Schweißstromverlauf sehr gleichmäßig.

Bei steigenden CO₂-Gehalten, >20% im Schutzgas, ist der Tropfenübergang ins Schweißbad weniger feintropfig.

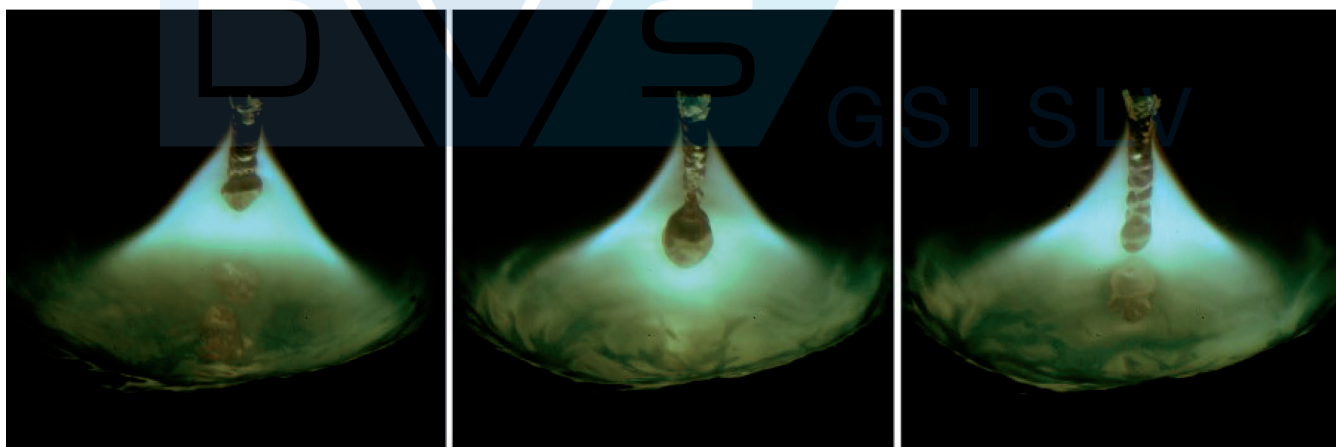


Abbildung 55: Werkstoffübergang ohne Lichtbogenunterbrechung durch relativ große Lichtbogenlänge beim Sprühlichtbogenschweißen von Stahl. Schutzgas: M20-ArC-8; Drahtelektrode: 3Si1, Ø 1,2 mm.

In der Praxis bei der Anwendung des Sprühlichtbogens haben sich nachfolgende Vorteile im Vergleich zum kurzen und langen Sprühlichtbogen ergeben:

- Gute Lichtbogensteifigkeit und -richtungsstabilität
- Zunahme der Einbrandtiefe
- weniger Energieverluste durch Strahlung und Konvektion
- weniger Metaldampfbildung,
- Reduzierung der Abbrandverluste und Schlackenmenge
- weniger Einbrandkerben
- weniger Spritzer und Poren beim Auftreten von Blaswirkung

8.4.5 Impulslichtbogen

Der Impulslichtbogen verwendet an Stelle eines Gleichstromes einen impulsförmigen Strom. Den Prozessablauf für eine Periode zeigt Abbildung 56. Im Idealfall wird mit jedem Impuls ein Tropfen am Drahtende geformt und abgelöst. Der Werkstoffübergang ins Schweißbad erfolgt etwas verzögert kurzschluss- und spritzerfrei. Die Abbildung 57 zeigt den Arbeitsbereich des Impulslichtbogens.

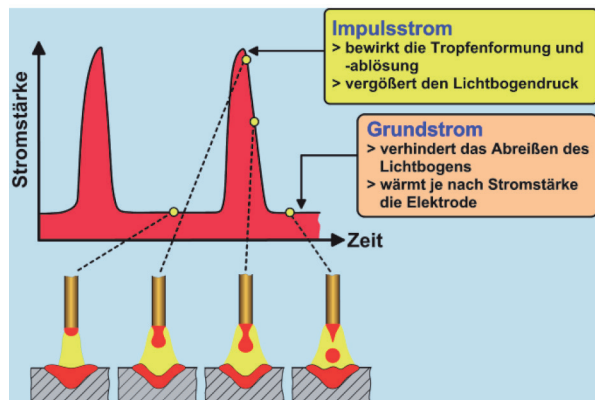


Abbildung 56: Stromverlauf und Werkstoffübergang beim Schweißen mit dem Impulslichtbogen

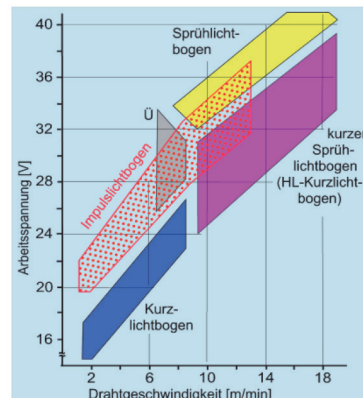


Abbildung 57: Arbeitsbereich des Impulslichtbogens Drahtelektrode: 3Si1, Ø 1,2 mm, Schutzgas: 82% Ar + 18% CO₂.

Für das Impulsschweißen von Baustählen werden Mischgase mit über 21% CO₂-Anteile nicht empfohlen. Ein Anwendungsbeispiel für das Schweißen mit dem Impulslichtbogen am Überlappstoß, Werkstoff Stahl und Aluminium, zeigt Abbildung 58.

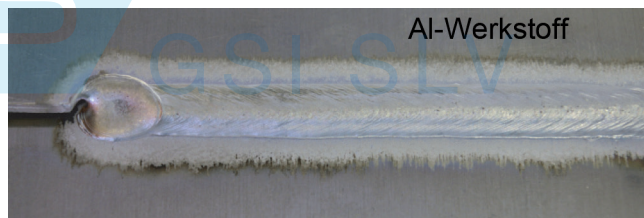


Abbildung 58: Kehlnaht am Überlappstoß mit Impulslichtbogen geschweißt

Eine Ergänzung zur *Tabelle 10*, Unterscheidung des MSG-Schweißens nach Art des Lichtbogens (in Anlehnung an DIN 1910-100 und Bezeichnungen nach DIN EN ISO 4063), ist eine Zusammenfassung der wichtigsten Lichtbogenarten beim konventionellen MIG/MAG-Schweißen mit Anwendungs- und Bewertungshinweisen in *Tabelle 10* enthalten.

Tabelle 10: Zusammenfassung der wichtigsten Lichtbogenarten beim MIG/MAG-Schweißen mit Anwendungs- und Bewertungshinweisen

Lichtbogenart	Anwendung	Werkstoffübergang	Spritzerbildung	Bemerkungen
MIG/MAG-Kurzlichtbogen	Dünnblechbereich, Zwangslagen, Wurzelschweißung	Im Kurzschluss	gering, mit geeigneter Stromquelle	geringe Wärmeinbringung, geringe Abschmelzleistung
MIG/MAG-Übergangslichtbogen (Mischlichtbogen)	mittlere Blechdicken, Zwangslagen	Werkstoffübergang z.T. im Kurzschluss	hoch und am Werkstück haftende Spritzer	mittlere Leistung
MIG/MAG-Sprühlichtbogen	mittlere und dicke Bleche in Position PA, PB	feintropfiger Werkstoffübergang ohne Kurzschlüsse	gering	hohe Abschmelzleistung
MAG-Langlichtbogen (unter CO ₂ oder hohen CO ₂ -Anteilen im Schutzgas)	mittlere und dicke Bleche in Position PA, PB	Werkstoffübergang z.T. im Kurzschluss	hoch und am Werkstück haftende Spritzer	hohe Abschmelzleistung
MIG/MAG-Impulslichtbogen	großer Arbeitsbereich	kurzschlussfrei	sehr gering	höhere Wärmeinbringung als im Kurzlichtbogen



9 Vor- und Nachteile des MSG-Schweißens

9.1 Vorteile des MIG/MAG-Schweißens

Mit dem MIG/MAG-Schweißen können fast alle schweißgeeigneten Werkstoffe verbunden werden, die als Zusatzwerkstoff zu einem Draht mit entsprechenden Durchmesser ziehbar sind. Unlegierte und legierte Stähle, sowie CrNi-Stähle werden mit dem MAG-Schweißen (aktive, CO₂- und/oder sauerstoffhaltige Schutzgase) verschweißt. Andere Werkstoffe wie Aluminium, Magnesium, Nickelbasiswerkstoffe, Kupfer, Titan usw. erfordern das MIG-Schweißen mit inerten Schutzgasen. Die erreichbare Abschmelzleistung und Schweißgeschwindigkeit sind hoch, bei guter Nahtqualität.

Das Verfahren kann leicht mechanisiert werden (Robotereinsatz). Bauteile ab 0,8 mm Dicke können im Stumpf- oder T-Stoß verschweißt werden. Nahtwurzeln können frei mit entsprechender Nahtvorbereitung oder mit Hilfseinrichtungen (Badsicherungen) geschweißt werden. Das Verfahren lässt sich in Zwangslagenpositionen einsetzen.

9.2 Nachteile des MIG/MAG-Schweißens

Nahtanfangs- und Nahtansatzbindefehler sind nicht immer vermeidbar, da gleichzeitig mit Beginn der Wärmeeinbringung durch den Lichtbogen auch Zusatzdraht abgeschmolzen wird. Bei zu geringer Schweißgeschwindigkeit sind Bindefehler durch vorlaufendes Schweißbad möglich. Beim Schweißen im Freien oder zugigen Hallen muss durch geeignete Vorrichtungen die Schutzgasatmosphäre aufrechterhalten werden.

10 Merkblatt DVS 0973 – Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens

Die MSG-Prozessregelungsvarianten gehören prinzipiell zu dem Metall-Schutzgasschweißen (13) – Metall-Inertgas-Schweißen (MIG, 131) / Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG, 135). Die geregelten Prozesse sind entsprechend den Empfehlungen des jeweiligen wissenstragenden Herstellers einzusetzen und in ihren Eigenschaften zu bewerten. Vergleiche zwischen verschiedenen MSG Prozessvarianten erfordern ein tieferes prozesstechnisches Verständnis. Das mögliche Prozessfenster des MSG-Schweißens wird durch die Prozessregelvarianten erweitert, Abbildung 59.

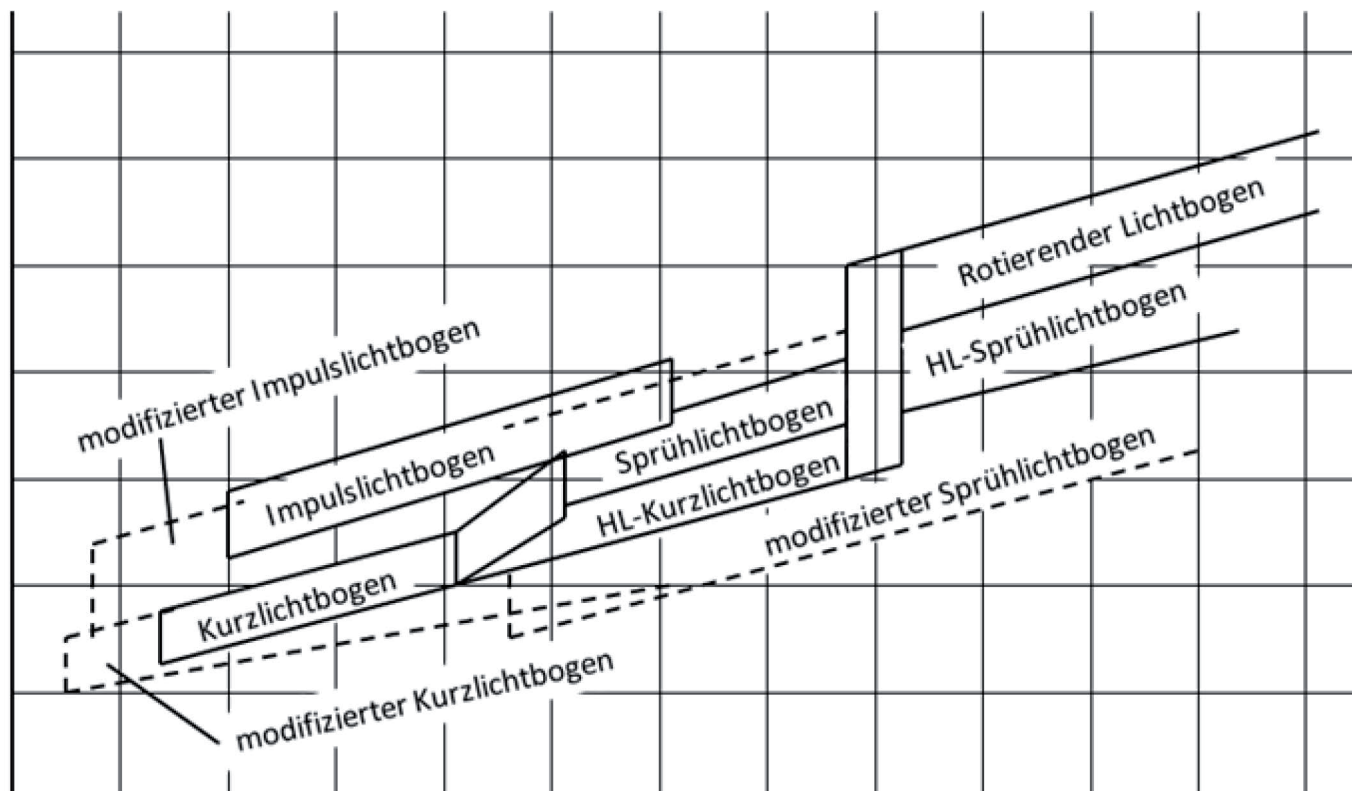


Abbildung 59: Mögliche Prozessfenster des MSG-Schweißens, Schweißstrom, Drahtvorschubgeschwindigkeit erweitert durch die Prozessregelvarianten.

10.1 Geregelter / modifizierter Kurzlichtbogen

Bei geregelten Kurzlichtbogenprozessen werden sowohl Kurzschluss als auch Lichtbogenbrennphase von der Geräteelektronik detektiert und separat (entsprechend ihrer Programmierung) geregelt. Dies kann sogar in mehreren zeitlichen Sektoren (Intervallen) unterteilt geschehen (sektorgesteuerte Regelung).

Folgende Ausprägungen sind festzustellen:

- Spritzerarmer Kurzlichtbogen
- Energiereduzierter Kurzlichtbogen
- Leistungsgesteigerte Kurzlichtbogen

10.1.1 Spritzerarmer Kurzlichtbogen

Bei diesen Ausprägungen geregelter Kurzlichtbogenprozesse wird steuerungs- und regelungstechnisch dafür gesorgt, dass der Strom im Moment des Wiederezündens des Lichtbogens (Auflösen der Kurzschlussphase) unterhalb eines bestimmten kritischen Wertes ist.

Angewandte Methoden:

- Detektion des Beginns des Aufreißens der Kurzschlussbrücke (ereignisorientiert)
- Vorhersage des wahrscheinlichen Endes des Kurzschlusses (prognoseorientiert)
- Beschleunigung der Stromabsenkung im Kurzschluss durch leistungselektronische Mittel
- Steuerung des Endes des Kurzschlusses durch mechanisches Zurückziehen der Drahtelektrode

10.1.2 Energiereduzierter Kurzlichtbogen

Diese Ausprägung geregelter Kurzlichtbogenprozesse ist auf geringeren Energieeintrag speziell parametrisiert.

Es gibt 2 Aspekte für energiearme Kurzlichtbogenprozesse:

- Energiereduziert (energieeffizient) im Sinne eines geringen Energieverbrauchs beim Schweißen zur Ressourcenschonung
- Energiereduziert im Sinne eines geringen Wärmeeintrages in das Werkstück

Die Energiereduktion bezieht sich im Allgemeinen zum unregelmäßigen Kurzlichtbogenprozess gleicher Drahtvorschubgeschwindigkeit.

Hierfür ausgeprägte Methoden sind:

- Maßnahmen zur zeitlichen Verkürzung der Lichtbogenphase
- Maßnahmen zur Reduktion des erforderlichen Stromes während der Lichtbogenphase
- einhergehend ist damit im Allgemein eine Erhöhung der Kurzschluss-Frequenz bzw. der

Kurzschluss-Dauer

- oft erfolgt eine Verschiebung des Wärmeeintrages mehr in die Kurzschlussphase, dabei Nutzung der energetisch effizienteren Widerstandserwärmung, weniger Energieabstrahlung durch Lichtbogenplasma

10.1.3 Leistungsgesteigerter Kurzlichtbogen

Die Abschmelzleistung des Kurzlichtbogenprozesses lässt sich mit prozessregelungstechnischen Mitteln steigern, in dem der Übergang in den Mischlichtbogen zu höheren Drahtgeschwindigkeiten hin verschoben wird. Im Vergleich zum Mischlichtbogen bringt der Kurzlichtbogen dabei weniger Energie in das Werkstück. Als Grundlage dient auch hier der konventionelle Kurzlichtbogen, wobei durch spezielle Stromformung in Kurzschluss- und Lichtbogenbrennphase das gewünschte Verhalten erzielt wird.

10.2 Modifizierter Sprühlichtbogen

Diese Entwicklungsrichtung zielt auf Modifikationen des Sprühlichtbogens zu einem konzentrierteren Verhalten und einem energetisch möglichst frühen Einsetzen (um den Mischlichtbogenbereich zu verkürzen).

Dies wird durch spezielle Regelung der statischen und dynamische Gerätekennlinie erreicht, bei der zum einen die „innere“ Lichtbogenlängenregelung verstärkt wird und zum anderen der Werkstoffübergang angeregt wird. Der konzentrierte Lichtbogen und der verkürzte Werkstoffübergang sorgen für eine höhere Energiedichte und einen höheren Lichtbogendruckpunkt tief in das Schmelzbad hinein. Vorteilhaft ist dies bei angepasster Fugengeometrie (z.B. enge Fugen und geringer Nahtöffnungswinkel), wo durch verringerte Materialeinbringung wirtschaftliche Vorteile erschlossen werden. Der modifizierte Sprühlichtbogen muss tendenziell kürzer gehalten werden, so dass sich auch eine geringere Lichtbogenspannung einstellt. Der kurze Sprühlichtbogen ist damit auch energieeffizienter, weniger Streckenenergie wird eingebracht.

10.2.1 Kurzer Sprühlichtbogen

Durch eine Reduzierung der Lichtbogenlängen des Sprühlichtbogens mit freiem Tropfenflug steigt der Lichtbogendruck auf das Schweißbad an und bildet dadurch in der Schmelze einen kegelstumpfförmigen Arbeitsraum für den Lichtbogen. Diese Vertiefung bleibt auch bei kurzzeitigen Lichtbogenunterbrechungen erhalten.

Das Arbeiten des Lichtbogens in der Schweißbadmulde fördert die Einbrandtiefe und den Wirkungsgrad der elektrischen Entladung. Die nicht vollständig vermeidbaren kleineren Spritzer nach Lichtbogenunterbrechungen und anschließenden Wiederzündungen werden fast gänzlich in der Schweißbadvertiefung aufgefangen, Abbildung 60.

Für eine höhere Produktivität wird dieser Tiefeneinbrandeffekt durch kleinere Nahtöffnungs- und Flankenwinkel, mit einer Reduzierung des Schweißnahtvolumens, Anzahl erforderlicher Schweißraupen/Schweißlagen, genutzt, Abbildung 61.

Durch eine Reduzierung der Lichtbogenlängen des Sprühlichtbogens mit freiem Tropfenflug steigt der Lichtbogendruck auf das Schweißbad an und bildet dadurch in der Schmelze einen kegelstumpfförmigen Arbeitsraum für den Lichtbogen. Diese Vertiefung bleibt auch bei kurzzeitigen Lichtbogenunterbrechungen erhalten.

Das Arbeiten des Lichtbogens in der Schweißbadmulde fördert die Einbrandtiefe und den Wirkungsgrad der elektrischen Entladung. Die nicht vollständig vermeidbaren kleineren Spritzer nach Lichtbogenunterbrechungen und anschließenden Wiederzündungen werden fast gänzlich in der Schweißbadvertiefung aufgefangen, Abbildung 60.

Für eine höhere Produktivität wird dieser Tiefeneinbrandeffekt durch kleinere Nahtöffnungs- und Flankenwinkel, mit einer Reduzierung des Schweißnahtvolumens, Anzahl erforderlicher Schweißraupen/Schweißlagen, genutzt, Abbildung 61.

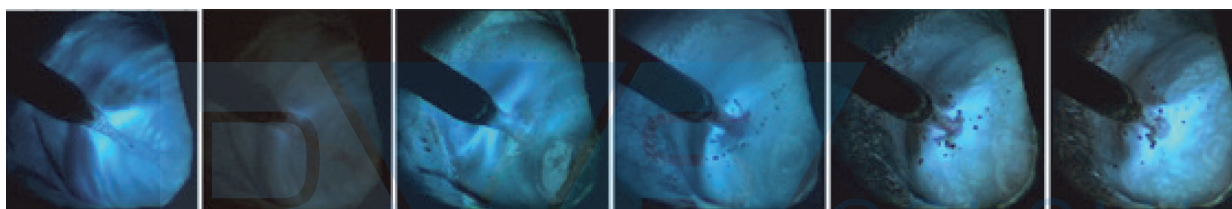


Abbildung 60: Lichtbogenunterbrechung und Wiederzündung des Lichtbogens beim Schweißen mit dem kurzen Sprühlichtbogen. Die Spritzer werden fast vollständig in der Schweißbadmulde aufgefangen.

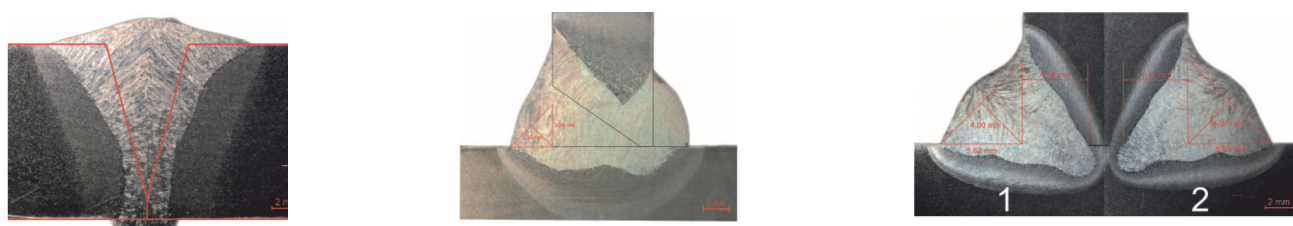


Abbildung 61: Beispiele für die Nutzung des Tiefeneinbrandeffektes beim Schweißen mit kurzen Sprühlichtbögen. (Alle Nähte mit einer Raupe geschweißt).

Beim Schweißen mit Stromstärken über ca. 400 A erfolgt der Werkstoffübergang rotierend, bogenförmig- oder hakenförmig, Abbildung 62. Der rotierende Lichtbogen erweitert den Seiteneinbrand im Bereich der mittleren Raupenhöhe. Die Einbrandtiefe in der Raupenmitte wird etwas reduziert.

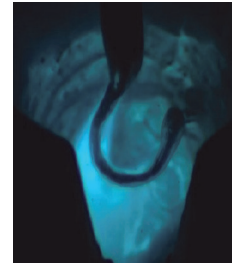
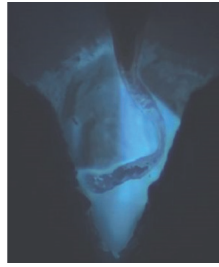
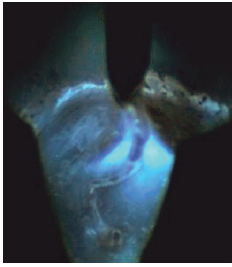


Abbildung 62: Teils wendelförmiger, rotierender oder hakenförmiger Werkstoffübergang beim Schweißen mit dem kurzen Sprühlichtbogen über 400 A.

10.3 Modifizierter Impulslichtbogen

Basis des modifizierten Impulslichtbogens ist der geregelte Impulslichtbogen. Gegenüber dem konventionellen Impulslichtbogen (im Sinne einer Thyristorsteuerung, vergl. Vorangegangener Abschnitt) zeichnen sich geregelte Impulslichtbogenprozesse durch die größere Anzahl an Parametern aus, welche im Allgemeinen eine Steuerung durch Synergiekennlinien erfordern.

Auf Grund der vielfältigen Parameter des Impulslichtbogens in möglicher Kombination mit anderen Effekten, Regelungsstrategien und Lichtbogentypen bestehen vielfältige Möglichkeiten der Modifikation des Impulslichtbogens mit dem Ziel der Optimierung bestimmter Prozesseigenschaften. Zur Ausprägung besonderer Eigenschaften sind folgende Modifikationen bekannt:

- Abweichungen von der Konvention des „ein Tropfen pro Puls“-Prinzips
- wahlweise Nutzung einer Strom- oder Spannungsregelung in der Impulsphase
- Verkürzung der Lichtbogenlänge zum pulsangeregten Werkstoffübergang in einer geregelten Kurzschlussphase zur vorteilhaften Kombination der Eigenschaften des Impulslichtbogens mit denen des Kurzlichtbogens
- Nutzung einer temporär an den Impuls anschließenden kurzen Sprühlichtbogenphase zur vorteilhaften Kombination der Eigenschaften des Impulslichtbogens mit denen des Sprühlichtbogens

10.4 Wechselstromprozesse

Die Polarität der abschmelzenden Elektrode während der Lichtbogenphase beeinflusst stark den Prozess. Ein gesteuerter Wechsel der Polarität mittels zusätzlicher Leistungselektronik während bestimmter Phasen des Schweißprozesses ist damit ein weiterer Freiheitsgrad der Prozessführung. Die Anwendung von Wechselstrom (AC = alternative current) in Verbindung mit dem Impulslichtbogen ist hier am bekanntesten, gleichwohl nicht technisch darauf beschränkt. Vorteile entstehen hauptsächlich durch gute Spaltüberbrückungseigenschaften und in Anwendungen geringer Energieeinbringung und Aufmischung.

10.5 Kombinierte Prozessvarianten

Modifikationen der Steuerung und Regelung von Prozessen auf der Zeitebene jedes einzelnen Werkstoffübergangs mit bestimmten Eigenschaften gilt auch für die Wärmeführung, den Energieeintrag, das Einbrandprofil, die Nahtoberfläche (z.B. Schuppung). Kombinierte Prozessvarianten erreichen spezielle neue Eigenschaften. Die Kombination erfolgt hauptsächlich zeitlich zyklisch und zwar sowohl in unterschiedlicher energetischer Höhe, als auch untereinander vom Typ sich ständig abwechselnd. Die Ausprägungsrichtungen sind speziell aufgabenorientiert.

Zielwirkungen kombinierter Prozessvarianten:

- Erstarrungsverhalten, Oberflächenstruktur
- Erstarrungsverhalten im Positionsschweißen, (Badstütze)
- Einbrandverhalten, Aufmischung
- Verringerung des Gesamt-Energieeintrags

Unterscheidungsmerkmale kombinierter Prozessvarianten sind:

- Art und Existenz eines Führungsparameters
- Auswahl und Eigenschaften der einzelnen Prozessvarianten, welche kombiniert werden
- Zyklusfrequenz der Kombination(en)
- Einzelintervall-Zeiten der Prozessvarianten (Balance) in ihrer Kombination

10.6 Zyklische Drahtbewegung

Eine zyklische Veränderung der Drahtvorschubgeschwindigkeit kann bereits Merkmal von kombinierten Prozessvarianten sein. Durch die gewonnenen zusätzlichen Freiheitsgrade bei der Prozesssteuerung und Prozessregelung sind mit diesen Prozessvarianten vielfältige Verbesserungen am Schweißprozess möglich.

10.7 Herstellerbezeichnungen

Viele Stromquellenhersteller haben ihren Prozessregelvarianten eigene Namen gegeben. Das Merkblatt DVS 0973, Beiblatt 1 gibt eine Übersicht zu den auf dem Markt anzutreffenden Namen, den Herstellern und den genutzten Prozessregelvarianten, Tabelle 11.

Tabelle 11: Übersicht Prozessnamen, Hersteller und Prozessregelvarianten

Dezember 2015

DVS – DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEISSEN UND VERWANDTE VERFAHREN E. V.		Tabellarische Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens						DVS Merkblatt DVS 0973 Beiblatt 1			
1 Tabellarische Übersicht der Prozessregelvarianten für das MSG-Schweißen											
Bezeichnung	Hersteller	5.3 Geregelter Kurzlichtbogen	5.3.1 Spritzerarmer KLB	5.3.2. Energiereduzierter KLB	5.3.3. Leistungsgesteigerter KLB	5.5 Modifizierter SLB	5.6 Impulslichtbogen	5.7 Modifizierter ILB	5.8 Wechselstromprozess	5.9 Kombinierte Prozessvariante	5.10 Zyklische Drahtbewegung
CMT (Cold Metal Transfer)	Fronius	x	x	x	x						x
CMT Advanced	Fronius	x	x	x	x				x	x	x
CMT Pulse	Fronius							x		x	x
ColdArc	EWM	x	x	x							
ColdMIG	Merkle	x	x	x							
ColdWeld	Cloos	x		x					x		
ControlWeld	Cloos	x	x								
DeepArc	Merkle					x					
FOCUS.ARC	Rehm	x		x		x					
FOCUS.PULS	Rehm							x			
ForceArc	EWM					x					
HighUP	Merkle	x					x			x	
newArc	Kjellberg	x	x		x	x					
RapidWeld	Cloos					x					
RootArc	EWM	x	x	x							
LSC (Low Spatter Control) & LSC Advanced	Fronius	x	x	x							
PCS (Puls Controlled Spray Arc)	Fronius					x					
PMC (Pulse Multi Control)	Fronius							x			
POWER.ARC	Rehm	x		x							
ProSWITCH	Merkle									x	
SpeedArc	Lorch	x				x					
SpeedCold	Lorch	x	x	x							
SpeedPulse	Lorch						x	x			
SpeedRoot	Lorch	x	x								
SSA (SpeedShortArc)	SAF Oerlikon	x			x						
SpeedUp	Lorch	x					x	x		x	x
WiseRoot	Kemppi	x	x								
WiseThin	Kemppi	x		x							

Diese Veröffentlichung wurde von einer Gruppe erfahrener Fachleute in ehrenamtlicher Gemeinschaftsarbeit erstellt und wird als eine wichtige Erkenntnisquelle zur Beachtung empfohlen. Der Anwender muss jeweils prüfen, wie weit der Inhalt auf seinen speziellen Fall anwendbar und ob die ihm vorliegende Fassung noch gültig ist. Eine Haftung des DVS und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

DVS, Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe Schweißen mit abschmelzender Elektrode MIG/MAG

11 Mögliche Fehler beim MIG/MAG-Schweißen

Fehler beim MIG/MAG-Schweißen können Risse, Poren, Schlackeneinschlüsse, Bindefehler, Einbrandkerben, Spritzer und eine ungünstige Nahtgeometrie sein.

11.1 Bindefehler am Nahtanfang, Nahtüberlappung und Nahtansatz, Endkrater am Raupenende

Alle Lichtbogenschweißverfahren mit abschmelzender Elektrode schmelzen gleichzeitig mit Beginn der Wärmeeinbringung durch den Lichtbogen auch Zusatzwerkstoff ab. Am Nahtanfang, bei Nahtansatzstellen und Nahtüberlappungen bleibt oft ein ungenügend verschweißter Bereich.

Elektronische MIG/MAG-Anlagen haben Start- und Endprogramme, die z. B. einen spritzerfreien Schweißbeginn und ein Nahtende mit praktisch keinem Endkrater ermöglichen. Eine 100 %-ige Fehlervermeidung ist aber auch mit Startprogrammen (Heißstart) nicht immer möglich. An- und Ablaufbleche können bei Schweißverbindungen mit großen Qualitätsanforderungen zu fehlerfreien Nahtenden beitragen. Die Hilfstteile helfen bei größeren Schweißströmen bei ausreichender Dimension zur Reduzierung der Blaswirkung, Spritzer- und Porenbildung an den Raupenenden, Abbildung 63.

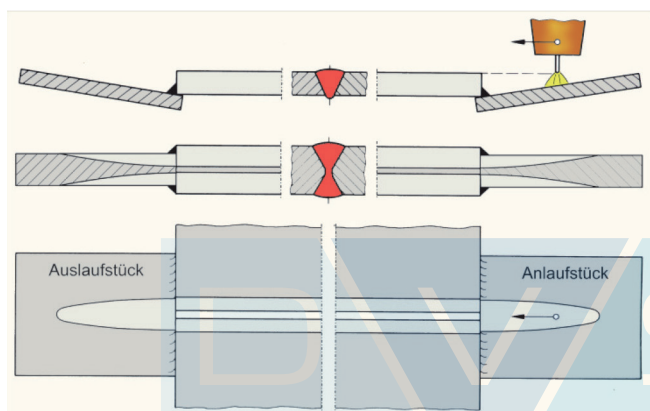


Abbildung 63: Beispiele von An- und Ablaufbleche beim Schweißen von dickeren Stumpfnähten.

Verbleibende Heftstellen und Ansatzstellen bei Raupenfortsetzungen müssen für das Erreichen von fehlerfreien Übergängen ausgeschliffen werden, Abbildung 64.

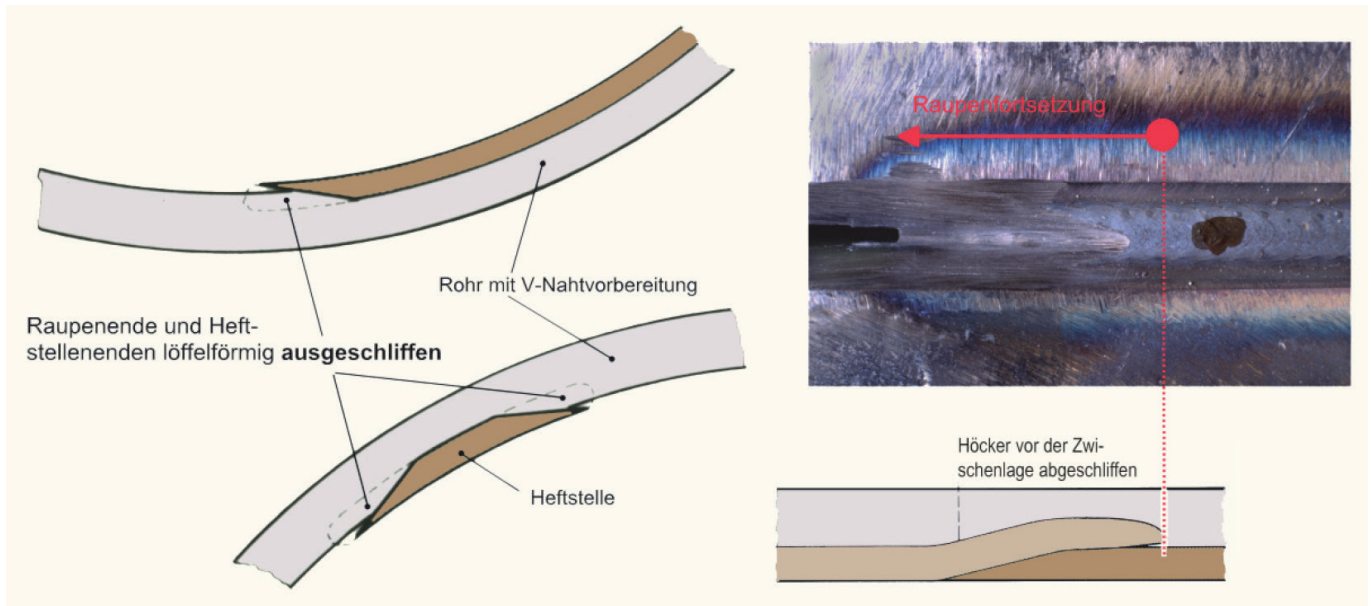


Abbildung 64: Vorbereitung von Nahtansatzstellen durch Schleifen zur Vermeidung von Ansatzbindefehlern

Bei großen Schweißbädern, durch hohen Strom und geringer Schweißgeschwindigkeit, kann am Ende ein sog. Endkrater auftreten. Dieser zeigt nicht nur eine unschöne Nahtoberraupe, sondern kann Anreicherungen von niedrigschmelzenden Verunreinigungen aufweisen, die ungünstige mechanische Gütewerte (oft auch Risse) ergeben. Wenn der Fehler am Anfang oder Ende der Naht nicht ausreichend vermieden werden kann, so sind diese in Bereiche mit niedriger Belastung zu legen. Bei Rundnähten, die keine Fehler aufweisen dürfen, ist oft ein Ausschleifen unumgänglich.

11.2 Bindefehler in der Schweißnaht

Bindefehler in der Schweißnaht können durch nicht aufgeschmolzene Nahtflanken oder nicht aufgeschmolzene Schweißraupen entstehen. Es ist in der Regel nicht möglich, nur durch das heiße Schweißgut den Grundwerkstoff aufzuschmelzen. Die häufige Fehlerursache für Bindefehler ist ein vorlaufendes Schweißbad. Ein zu großes Schweißbad durch eine zu geringe Schweißgeschwindigkeit ist hier meistens die Ursache.

Andere Gründe für Bindefehler sind durch ungünstige Nahtgeometrie - zu kleiner Öffnungswinkel, fehlende Zugänglichkeit durch den Schweißbrenner oder einer ungünstigen Anordnung und Lage der vorher geschweißten Raupen – gegeben, Abbildung 65.

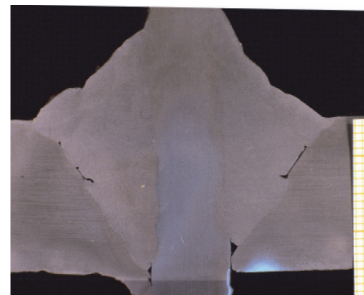
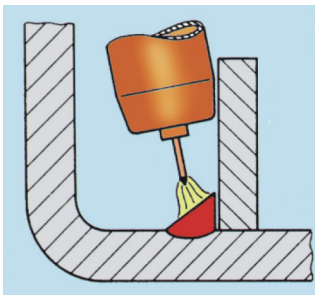


Abbildung 65: Bindefehler durch eingeschränkte Zugänglichkeit und Sicht

Die Ursachen beim Schweißen auf vorlaufender Schmelze können sein:

- Abschmelzleistung, Schweißbadvolumen zu groß
- Schweißgeschwindigkeit zu langsam
- Brennerneigung zu stark stechend
- Schweißraupen zu breit, zu dick
- Pendeln des Brenners nicht der Fugenform angepasst
- Nahtneigung in Schweißrichtung zu groß

11.3 Poren

Poren sind mit Gas(en) gefüllte kugel- oder schlauchförmige Hohlräume im erstarrten Schweißgut. Die Poren bilden sich im Schweißbad am Übergang von flüssig zu fest, wenn vor der Erstarrungsfront die gelösten Gase nicht rechtzeitig entweichen, Abbildung 66.

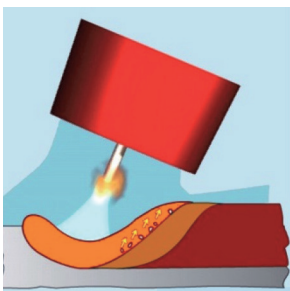


Abbildung 66: Porenvermeidung durch das Entweichen der gelösten Gase vor dem Erstarren des Schweißgutes

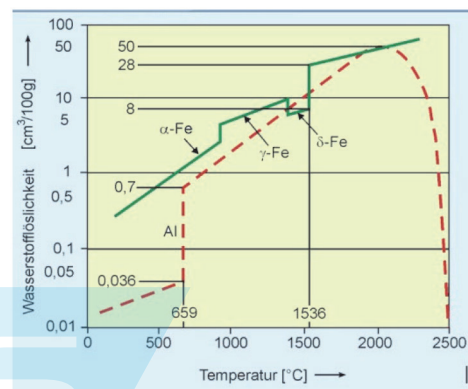


Abbildung 67: Wasserstofflöslichkeit in Aluminium und Eisen in Abhängigkeit von der Temperatur

Als porenverursachende Gase kommen beim Schweißen von un- und niedriglegierten Stählen vor allem Stickstoff, Wasserstoff und Kohlenmonoxid wegen ihres Lösungsvermögens im flüssigen Schweißgut in Frage. Beim Schweißen von Al-Werkstoffen werden Poren meistens durch zu hohe Wasserstoffgehalte verursacht. Der Grund ist die geringe Löslichkeit von Wasserstoff im erstarrten Aluminium und Eisen, Abbildung 67.

Poren lassen sich bei den meisten Werkstoffen vermeiden. Bei Aluminiumwerkstoffen ist aber eine absolut porenfreie Naht kaum möglich. Wenn durch die Nahtform und Schweißposition ein Ausgasen behindert wird, bleiben die Gaseinschlüsse im Schweißgut.

Wichtige Ursachen bei der Entstehung von Poren sind:

- Fehler am Brenner
- ungünstige Brennerführung
- Zugluft
- magnetische Blaswirkung
- zu langer Lichtbogen
- Seigerungen
- ungeeignetes Schutzgas oder ungeeignete Drahtelektrode
- Beschichtungen, Verschmutzungen, ungenügende Oxidentfernung bei Aluminium
- Schnittkanten beim Laserschneiden mit Stickstoff
- Hohlräume
- geringe Löslichkeit von Gasen (z.B. Wasserstoff bei Al)

Die Abbildungen 68 bis 72 zeigen Ursachen für die Porenbildung beim MIG/MAG-Schweißen.

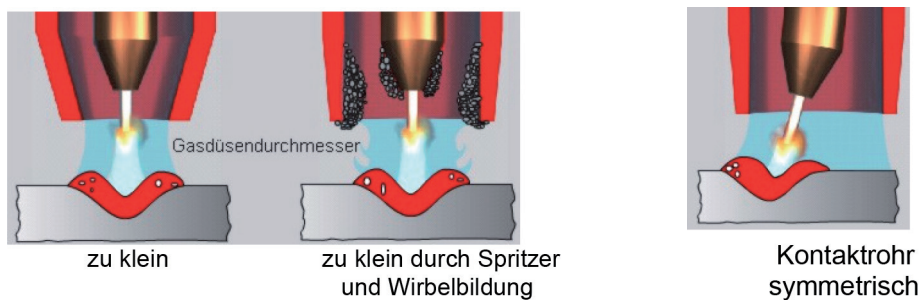


Abbildung 68: Poren durch Fehler am Brenner



Abbildung 69: Porenbildung durch falsche Brennerhaltung

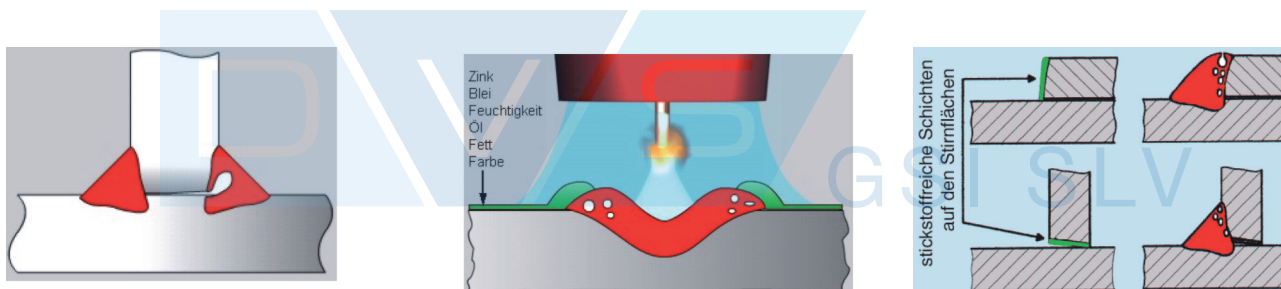


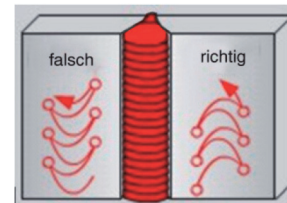
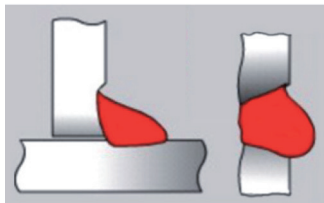
Abbildung 70: Porenbildung durch das Eindringen von Gasen und Dämpfen aus Hohlräumen (Porenbildung durch mechanische Ursachen)

Abbildung 71: Poren durch Beschichtungen

Abbildung 72: Poren durch Laser- und Plasmaschneiden mit N_2 -haltigen Schneidgasen

11.4 Kerben an den Raupenrändern

Randkerben oder zu stark überhöhte Nähte sind häufige Fehler an der sichtbaren Naht, Abbildung 73. Durch Änderung der Schweißdaten, Arbeitstechniken Nahtdreh- und Nahtneigungswinkel sind diese zu beheben.



- | | | |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Spannung zu groß (Lichtbogen zu lang) • Schweißgeschwindigkeit zu groß • Brenner nicht gependelt • Brenner nicht stechend geführt • Brenner verkantet (einseitige Kerben) • stark oxidierende Schutzgase (Schlackeablagerungen in den Kerben) • Blaswirkung bei größeren Lichtbogenleistungen (Nahenden) | <ul style="list-style-type: none"> • Lichtbogenleistung zu groß • Spannung zu groß (Lichtbogen zu lang) • Drahtfördergeschwindigkeit zu klein • Schweißgeschwindigkeit zu klein, • Raupe zu dick, ungünstige Schweißposition | <ul style="list-style-type: none"> • Lichtbogenleistung zu groß • Spannung zu groß • Pendelbreite zu klein • Verweildauer am Nahrand zu kurz • Brennerführung ohne Bogen nach oben und Verweildauer an den Umkehrpunkten • Schweißgeschwindigkeit zu groß |
|--|---|---|

Abbildung 73: Ursachen für Randkerben

11.5 Risse

Beim MSG-Schweißen können Risse durch ungünstige Erstarrungsbedingungen und Werkstoffeigenschaften auftreten, Abbildung 74. Zu schwache Heftnähte, sehr starke Verformungsbehinderung der Bauteile, ungünstige Raupenprofile (schmale Raupen mit großer Raupenhöhe), zu hohe oder zu niedrige Bauteiltemperatur und heißrissanfällige Grundwerkstoffe fördern das Auftreten von Rissen. Rissarten und ihre Ursachen werden bei den Werkstoffen beschrieben.

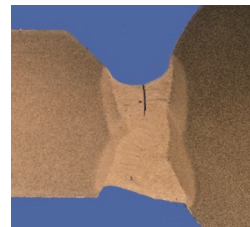
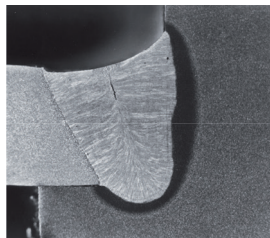
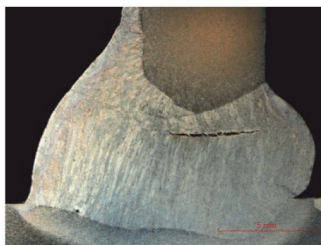


Abbildung 74: Risse beim MAG-Schweißen an Baustählen

12 Nahtvorbereitung (Überblick)

Die Wahl einer optimalen Nahtvorbereitung, Schweißposition, Nahtneigungswinkel und Nahtdrehwinkel erfolgt nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten und den Qualitätsanforderungen.

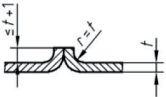
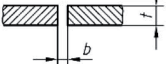
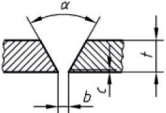
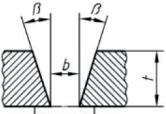
Die Stumpfnah mit beispielsweise mit einer Wurzelschweißung ohne Schweißbadstütze erfordert einen sehr gut ausgebildeten Schweißer, ist sehr teuer aber bei dynamisch hoch belasteten Bauteilen oft nicht zu umgehen. In der Großserie werden Stumpfnähte ohne Schweißbadstütze kaum angewandt. Durch ein gezieltes Legen der Schweißnähte in Bereiche mit geringerer Beanspruchung können in vielen Fällen Kehl- und Überlappnähte anstelle von Stumpfnähten eingesetzt werden. Diese können in der Regel ohne Badsicherung und mit hoher Abschmelzleistung geschweißt werden.

Die Nahtvorbereitung für verschiedene Werkstoffgruppen ist genormt in:

DIN EN ISO 9692-1:	Schweißen und verwandte Prozesse – Empfehlungen zur Schweißnahtvorbereitung – Teil 1: Lichtbogenhandschweißen, Schutzgasschweißen, Gasschweißen, WIG-Schweißen und Strahlschweißen von Stählen
DIN EN ISO 9692-3:	Schweißen und verwandte Prozesse – Empfehlungen für Fugenformen – Metall-Inertgasschweißen und Wolfram-Inertgasschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen
DIN 8552-3:	Schweißnahtvorbereitung – Fugenformen an Kupfer und Cu-Legierungen, Gasschmelzschweißen und Schutzgasschweißen
DIN EN 12627:	Industriearmaturen – Anschweißenden für Armaturen aus Stahl

In den Tabellen 12 bis 16 sind einige Beispiele exemplarisch dargestellt.

Tabelle 12: Schweißnahtvorbereitung für Stumpfnähte, einseitig geschweißt (Auszug aus DIN EN ISO 9692-1)

Kennzahl Nr.	Werkstückdicke t mm	Art der Schweißnahtvorbereitung	Symbol (nach ISO 2553)	Schnitt	Winkel α, β	Maße			Empfohlener Schweißprozess c (nach ISO 4063)	Darstellung	Bemerkungen
						Spalt b b mm	Steghöhe c mm	Flankenhöhe h mm			
1.1	≤ 2	Kanten bündeln			-	-	-	-	3 111 141 512		Meist ohne Zusatzwerkstoff
1.2.1	≤ 4	I-Fuge			-	$\approx t$	-	-	3 111 141		-
1.2.2	$3 < t \leq 8$					$6 \leq b \leq 8$			13		Mit Schweißbadsicherung
	≤ 15					$\approx t$			141 c		
						$\leq 1^d$			52		
						0					
1.3	$3 < t \leq 10$	V-Fuge			$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	≤ 4	≤ 2	-	3 111 13 141		Gegebenenfalls mit Schweißbadsicherung
1.4	> 16	Steiflanken V-Fuge			$5^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$	$5 \leq b \leq 15$	-	-	111 13		Mit Schweißbadsicherung

^a Für Schweißen in Position PC nach ISO 6947 (Querposition) auch größer und/oder unsymmetrisch.

^b Die angegebenen Maße gelten für den gehefteten Zustand.

^c Der Hinweis auf den Schweißprozess bedeutet nicht, dass er für den gesamten Bereich der Werkstückdicken anwendbar ist.

^d Mit Schweißzusatz.

Tabelle 13: Schweißnahtvorbereitungen für Stumpfnähte, beidseitig geschweißt (Auszug aus DIN EN ISO 9692-1)

Kenn- zahl Nr.	Werk- stück- dicke t mm	Art der Schweiß- nahtvorberei- tung	Symbol (nach ISO 2553)	Schnitt	Maße				Empfohlener Schweiß- prozess ^c (nach ISO 4063)	Darstellung	Bemer- kungen
					Winkel ^a α/β	Spalt ^b b mm	Steghöhe c mm	Flanken- höhe h mm			
2.1	≤ 8	I-Fuge			-	$\approx \frac{t}{2}$	-	-	111 141		-
						$\leq \frac{t}{2}$			13		
	≤ 15					0			52		
2.2	$3 \leq t \leq 40$	V-Fuge			$\alpha \approx 60^\circ$	≤ 3	≤ 2	-	111 141		Gegenlage ist angege- ben
					$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$				13		
2.3	> 10	Y-Fuge			$\alpha \approx 60^\circ$	$1 \leq b \leq 3$	$2 \leq c \leq 4$	-	111 141		In Sonder- fällen auch für kleinere Werkstück- dicken und Prozess 3 möglich; Gegenlage ist angege- ben
					$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$				13		
2.4	> 10	Doppel- Y-Fuge			$\alpha \approx 60^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$2 \leq c \leq 6$	$h_1 = h_2 = \frac{t-c}{2}$	111 141		-
					$40^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$				13		

^a Für Schweißen in Position PC nach ISO 6947 (Querposition) auch größer und/oder unsymmetrisch.

^b Die angegebenen Maße gelten für den gehefteten Zustand.

^c Der Hinweis auf den Schweißprozess bedeutet nicht, dass er für den gesamten Bereich der Werkstückdicken anwendbar ist.

Tabelle 14: Schweißnahtvorbereitungen für Kehlnähte, einseitig geschweißt (Auszug aus DIN EN ISO 9692-1)

Kenn- zahl Nr.	Werkstück- dicke t mm	Art der Schweiß- nahtvorbereitung	Symbol (nach ISO 2553)	Schnitt	Maße		Empfohlener Schweiß- prozess ^a (nach ISO 4063)	Darstellung
					Winkel α, β	Spalt b mm		
3.1.1	$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Stirnfläche rechtwinklig	b		$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$	≤ 2	3 111 13 141	
3.1.2	$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Stirnfläche rechtwinklig			-	≤ 2	3 111 13 141	
3.1.3	$t_1 > 2$ $t_2 > 2$	Stirnfläche rechtwinklig			$60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	≤ 2	3 111 13 141	

a Der Hinweis auf den Schweißprozess bedeutet nicht, dass er für den gesamten Bereich der Werkstückdicken anwendbar ist.

b Symbol ist nur für $\alpha = 90^\circ$ anwendbar.

Tabelle 15: Nahtvorbereitung für das MIG-Schweißen an Aluminium (Dünndraht)

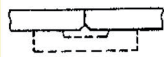
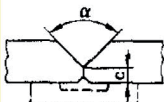
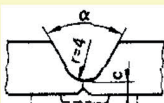
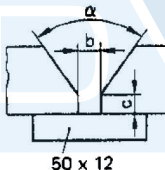
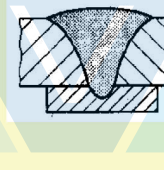
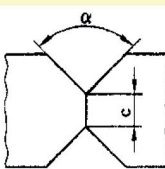
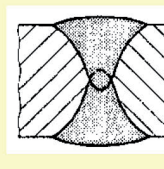
Werkstück- dicke t mm	Nahtart	Nahtaufbau (schematisch)	Abstand b mm	Steghöhe c mm	Öffnungs- winkel α	Bemerkungen
1 ... 4			0 ... 0,25 t	---	---	Badsicherung erleichtert das Schweißen
5 ... 10			< 1,0	---	---	von beiden Seiten geschweißt
5 ... 12			< 1,0	2,5	90°	Badsicherungen erleichtern das Herstellen fehlerfreier Wurzellagen
5 ... 20			< 1,0	2,5	60°	Wurzellagen in Zwangspositionen können ohne Badsicherung leichter mit dem Prozess WIG oder WPL geschweißt werden

Tabelle 16: Nahtvorbereitung für das MIG-Schweißen an Aluminium (Dickdraht)

Werkstück- dicke t mm	Nahtart	Nahtaufbau (schematisch)	Abstand b mm	Steghöhe c mm	Öffnungs- winkel α	Bemerkungen
> 18			5 ... 7	5	70°	Beilage mindestens 12 mm dick Drahtelektrorendurchmesser: 2,4 oder 3,2 mm
> 30				18 bei ca. 700 A	90°	Steghöhe abhängig von der Stromstärke Drahtelektrorendurchmesser: 2,4 oder 3,2 mm

13 Schweißbadsicherungen

Eine Schweißbadsicherung ist bei Stumpfnähten, seltener bei Kehlnähten, notwendig, wenn ein Gegen-schweißen von der anderen Seite vermieden werden soll oder nicht möglich ist. Es ist zu prüfen, welche Schweißbadsicherungen geeignet sind oder ob eine andere Naht geschweißt werden kann.

Beispiele von Schweißbadsicherungen für das MIG/MAG-Schweißen, Abbildung 75.

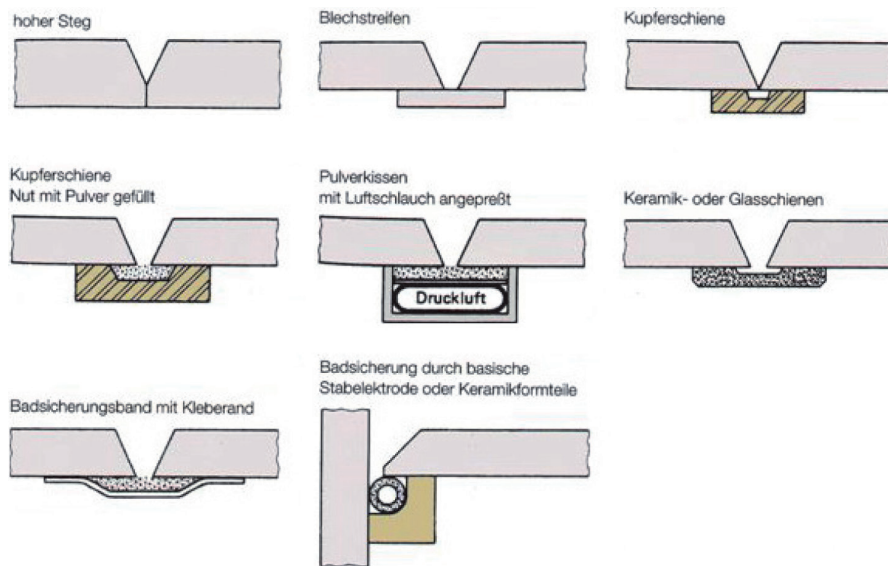


Abbildung 75: Schweißbadsicherungen für das MIG/MAG-Schweißen

Häufig angewandt werden bei kleineren, geraden Bauteilen Spannvorrichtungen mit Kupferschienen. Diese haben in der Regel eine Nut, die je nach Anforderungen und Werkstoff auch mit Schutzgas oder Formiergas gespült werden kann. Bei häufiger Benutzung sind diese Kupferschienen auch wassergekühlt. Kupferschienen ohne Nut können Fehler in der Nahtwurzel erzeugen.

Andere Schweißbadsicherungen sind aus Keramik, Glas oder verwenden ein pulverbeschichtetes Klebeband (alle nur einmal benutzbar). Auf ein Pulverkissen wird bei größeren Bauteilen geschweißt (siehe auch Unterpulverschweißen).

Bei Schweißbadsicherungen, die angeschweißt werden, ist zu beachten, dass Kerben und Spalten bleiben, die bei dynamischer und korrosiver Beanspruchung problematisch sein können.

Schweißbadsicherungen, die bei Drehteilen oder Pressteilen am Bauteil angebracht werden, können zugleich eine Fixierung bilden.

Sehr gut ist eine Schweißbadsicherung durch das Bauteil. Z.B. kann eine Y-Naht geschweißt werden, die auf der Gegenseite ausgekreuzt und gegengeschweißt wird.

Eine gute Methode ist die häufig beim UP-Schweißen angewandte, aber auch für das MIG/MAG-Schweißen geeignete Zweiseiten-Technik. Das Bauteil wird zuerst auf einer Seite geschweißt, dass mehr als die halbe Blechdicke aufgeschmolzen wird. Danach wird das Bauteil gewendet und auf der Gegenseite so geschweißt, dass sich die Nahtwurzeln überlappen.

In vielen Fällen, z. B. bei hohen Anforderungen und schwierigen Nahtverläufen ist es sinnvoll die Nahtwurzel mit dem WIG-Verfahren zu schweißen.

14 Verfahrensvarianten des MSG-Schweißens

14.1 MIG/MAG-Punktschweißen

Beim MIG/MAG-Punktschweißen wird der Brenner nicht oder z.B. bei Al-Werkstoffen nur ganz wenig über dem Werkstück positioniert. Dabei wird der Brenner mit einer Spezialgasdüse auf das Bauteil aufgesetzt. In der Düse sind Öffnungen für den Schutzgasaustritt und zum Beobachten der Schweißstelle, Abbildung 76 links. Geschweißt werden meist aufeinanderliegende Bleche (wie beim Widerstandspunktschweißen). Im oberen Blech ist meistens eine Bohrung, wodurch die Sicherheit der Verbindung deutlich gesteigert wird, besonders wenn zwischen Ober- und Unterblech ein Spalt vorhanden ist. Nur bei ganz dünnen Blechen und guter Passung kann das Loch im Oberblech entfallen. Anwendungen, wie sie in der Kfz-Reparatur üblich sind, Abbildung 76 rechts.

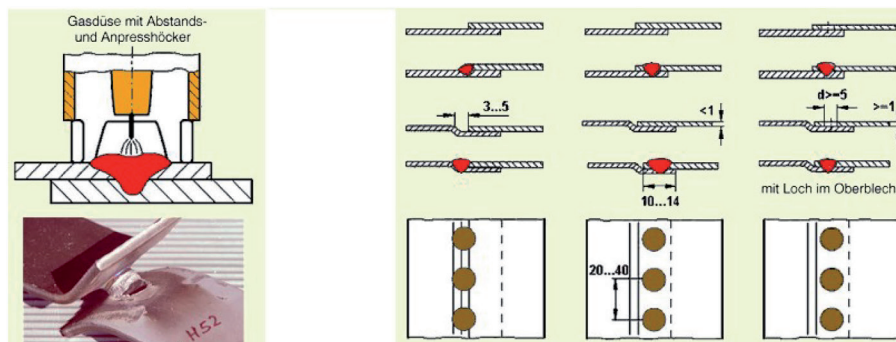


Abbildung 76: MAG-Punktschweißen mit Anwendungsbeispielen im Feinblechbereich

14.2 MSG-Löten

Die spezifischen Vorteile des MSG-Lötens verzinkter Bleche wurden mittlerweile auf weitere Anwendungen für alumierte, unbeschichtete, niedriglegierte und hochlegierte Bleche erweitert. Speziell SG-CuSi3, SG-CuSn bzw. SG-CuAl8 werden häufig verwendet. Durch die niedrige Schmelztemperatur des Zusatzwerkstoffes von ca. 900-1100 °C erfolgt kein Aufschmelzen der Bleche. In der Praxis sind jedoch geringe Anschmelzungen der Werkstoff nicht immer vermeidbar. Wie bei anderen Lötprozessen werden im Idealfall die Werkstücke nur mit einer dünnen Diffusionsschicht benetzt, eine gute Spaltüberbrückung zeichnet dieses Verfahren zusätzlich aus.

Als Prozessgas werden Ar und zunehmend Mehr-Komponenten-Mischgase mit O₂, CO₂ sowie H₂ Anteile eingesetzt. Mit dem MSG-Löten im Pulsprozess sind beachtliche Lötgeschwindigkeiten bis 5 m/min möglich. Die Festigkeitswerte dieser Lötverbindungen sind zudem relativ hoch.

Die häufigsten Nahtarten sind in der Abbildung 77 dargestellt. Das Raupenprofil wird durch die Auswahl der Lichtbogenart beeinflussbar, Abbildung 78.



Abbildung 77: Häufige Nahtarten beim MSG-Löten

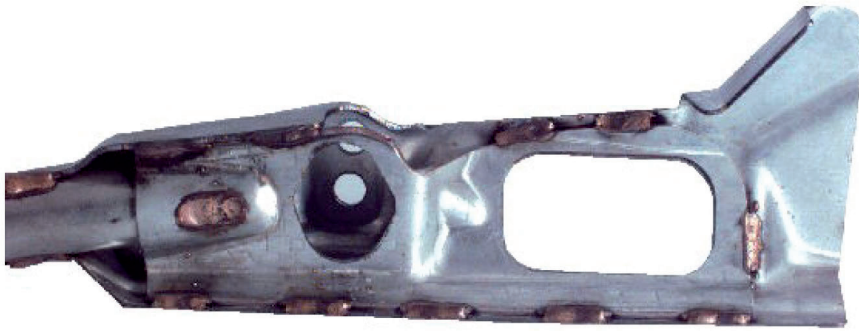
Kurzlichtbogen



Impulslichtbogen



Abbildung 78: Einfluss der Lichtbogenart auf das Profil der Lotraupe / 2 /



MIG-gelötete B-Säulenverstärkung

Vorteile des MSG-Lötens an verzinkten Stählen können sein:

- weniger Wärmeeinbringung als beim Schweißen
- fast keine Spritzer und Poren
- gute Spaltüberbrückbarkeit
- hohe Lötgeschwindigkeit
- kein Flussmittel nötig
- keine Einbrandkerben am Raupenrand

Nachteilig beim MSG-Löten an Stählen sind:

- höhere Preise der Lotwerkstoffe im Vergleich zu Drahtelektroden aus Stahl
- an dünnen Werkstücken werden sehr flache Raupen meistens nur mit dem Impulslichtbogen erreicht
- in Werkstücksbereichen mit starken Verformungen (erhöhten Eigenspannungen) kann es zum Eindringen des flüssigen Lotes in den Grundwerkstoff entlang von Korngrenzen kommen.

Häufig verwendete Lotwerkstoffe: CuSi3, CuSi2Mn, CuAl8, CuAl8Ni2, CuMn13Al. Die höher legierten Lotwerkstoffe haben höhere Festigkeitseigenschaften.

Argon kann für alle Lotwerkstoffe als Schutzgas verwendet werden. Schwach oxidierende Schutzgase, wie Ar + 2% CO₂, Ar + 1% O₂, verbessern die Prozessstabilität deutlich.

14.3 MIG/MAG-Hochleistungsverfahren

Das MIG/MAG-Schweißen kann im Vergleich zu anderen Schweißverfahren schon in der konventionellen Form als Hochleistungsverfahren angesehen werden.

Eine Leistungserhöhung bedeutet entweder eine größere Abschmelzleistung, eine höhere Schweißgeschwindigkeit oder beides. Daneben kann die Wirtschaftlichkeit auch teilweise durch die Verminderung der Naht-Querschnittsflächen angehoben werden. Bei der Ausschöpfung der vielfältigen Möglichkeiten der MSG-Prozesse oder deren Kombinationen mit anderen Verfahren, müssen oft mehr Bedingungen erfüllt werden, um eine ausreichende Schweißnahtqualität zu gewährleisten. Die hohen Anforderungen an die Prozessstabilität können nur mit sehr guten Kontakteigenschaften der Drahtelektroden und gut gestalteten Brennern erfüllt werden.

Dem manuellen MSG-Schweißen sind durch die thermische Belastung des Schweißers (auch bei guter Ausstattung mit Schutzbekleidung) und die hohen Anforderungen bei der Brennerführungsgenauigkeit Grenzen gesetzt. Beim teilmechanisierten MAG-Schweißen von Stählen liegen die maximale Abschmelzleistung bei ca. 9 kg/h (18 m/min bei 1,2 mm Drahtdurchmesser) und die maximale Schweißgeschwindigkeit bei etwa 60 cm/min.

Überblick über die Leistungsbereiche von konventionellen und Hochleistungsschweißverfahren mit ein und zwei Drahtelektroden, Abbildung 79.

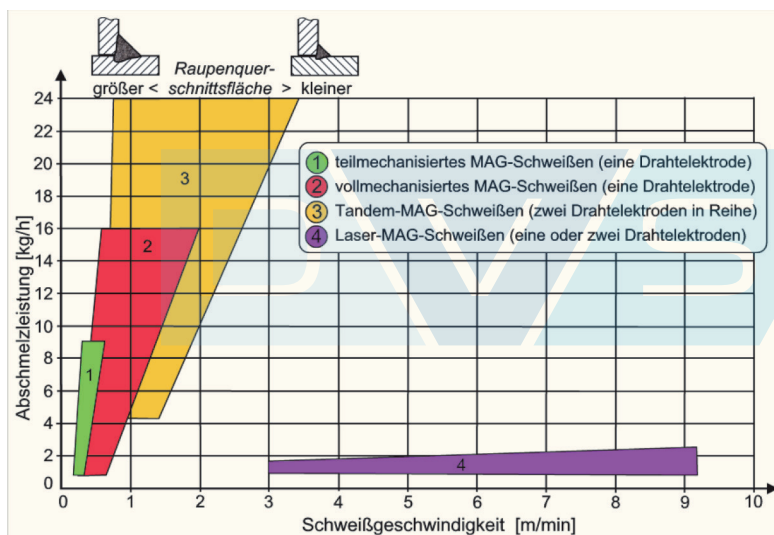


Abbildung 79: Leistungsbereiche des konventionellen MAG-Schweißens, des MAG-Hochleistungsschweißens mit einer und zwei Drahtelektroden sowie des Laser-MAG-Schweißens bei optimierten Randbedingungen

14.3.1 Hochleistungsverfahren mit einer Drahtelektrode

Die unterschiedlichen Arten des Werkstoffübergangs in Abhängigkeit von Drahtgeschwindigkeit und Spannung mit dem Raupenprofil, Abbildung 80.

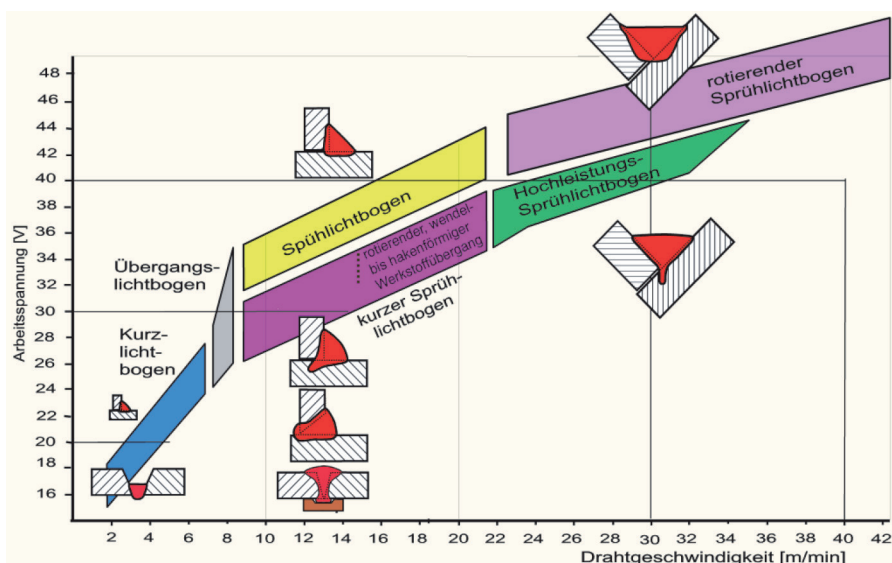
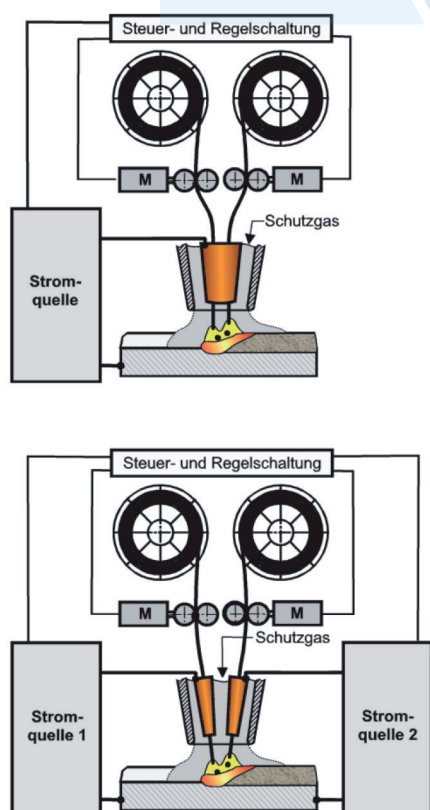


Abbildung 80: Arbeitsbereiche beim MAG-Schweißen mit einer Drahtelektrode und die typischen Raupenprofile, die dadurch erreicht werden.

14.3.2 Hochleistungsverfahren mit zwei Drahtelektroden

Es werden zurzeit zwei Verfahren mit zwei Drahtelektroden beim MIG/MAG-Schweißen eingesetzt. Das MIG/MAG-Doppeldraht- und das MIG/MAG-Tandemschweißen, **Abbildung 81**, Die Schweißstromzuführung ist bei beiden Verfahren unterschiedlich. Während bei Doppeldrahtschweißen beide Drahtelektroden von einer Stromquelle mit dem Schweißstrom versorgt werden, wird beim Tandemschweißen für jede Drahtelektrode eine eigene Stromquelle eingesetzt. Die einzusetzenden Brenner für MSG-Tandemschweißen, **Abbildung 82**.



- **MIG/MAG-Doppeldrahtschweißen:** argonreich es Mischgas, Impuls- oder Sprühlichtbogen
- geringe bis sehr hohe Leistungen möglich
- sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten erreichbar
- Verfahren mit zwei Drahtelektroden, einer Stromquelle, einem Brenner, einem Kontaktrohr
-

MIG/MAG-Tandemschweißen: argonreiches Mischgas, Kurz-, Impuls- oder Sprühlichtbogen anwendbar

- geringe bis sehr hohe Leistungen möglich
- sehr hohe Schweißgeschwindigkeiten erreichbar
- Verfahren mit zwei Drahtelektroden, zwei Stromquellen, einem Brenner, zwei potentialgetrennten Kontaktrohren
- bessere Prozessstabilität und einfachere Prozessoptimierung als beim MIG/MAG-Doppeldrahtschweißen möglich

Abbildung 81: MSG-Prozesse mit zwei Drahtelektroden

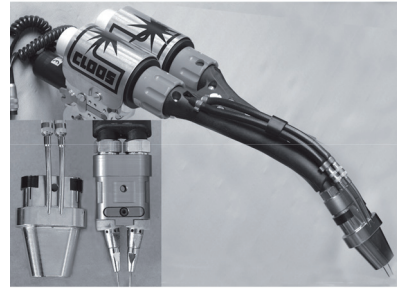
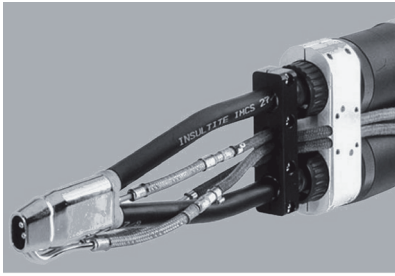


Abbildung 82: Brenner für das MSG-Tandemschweißen (Quelle Cloos)

14.3.2.1 MIG/MAG-Doppeldrahtschweißen

Durch das gemeinsame Kontaktrohr ist die Spannung an beiden Drahtelektroden annähernd gleich. Der Schweißstrom bildet sich nach dem Ohm'schen Gesetz (Parallelschaltung von Widerständen) aus. In der Regel wird die Stromstärke an beiden Drähten auch annähernd gleich sein. Leider gibt es auch Störungseinflüsse durch unterschiedliche Kontaktqualität zwischen den Drahtelektroden und dem Kontaktrohr durch Oberflächenmängeln der Drahtelektroden.

Es gibt aber auch die Möglichkeit, unterschiedliche Drahtgeschwindigkeiten, z. B. höhere Drahtgeschwindigkeit am ersten Draht (kurzer Lichtbogen) und einen etwas längeren Lichtbogen am zweiten Draht einzustellen. Damit kann ein tiefer Einbrand bei einer guten Nahtoberfläche erzielt werden.

Die magnetische Blaswirkung, die bei gleich gepolten Drahtelektroden zwei nebeneinander brennende Lichtbögen aufeinander zu bewegt, wird hier positiv genutzt. Durch den in Abhängigkeit von Schweißstrom und Schutzgas optimierten Drahtabstand bewirkt die magnetische Ablenkung, dass die übergehenden Tropfen in der Mitte zwischen den beiden Drähten das Schweißbad erreichen.

14.3.2.2 MIG/MAG-Tandemschweißen

Diese Verfahrensvariante wird z. Z. bevorzugt, da es gegenüber der Doppeldrahttechnik eine größere Stabilität bei Störungen bietet und beim Tandemschweißen die beiden Lichtbögen mit unterschiedlichen Einstellwerten besser an die Schweißaufgabe angepasst werden können. Die erreichbaren Abschmelzleistungen und Schweißgeschwindigkeiten sind dagegen weitgehend gleich.

Die magnetische Blaswirkung, die auch beim Tandemschweißen wirkt, kann aber durch den Einsatz von zwei Impulslichtbögen, die um 180° phasenverschoben sind, weitgehend aufgehoben werden. Die Abschmelzleistung bei Stahl mit phasenverschobenem Impulslichtbogen ist auf etwa 18 kg/h begrenzt. Ohne diese Phasenverschiebung werden im Sprüh- oder Impulslichtbogen Abschmelzleistungen von über 25 kg/h erzielt. Im Dünnblechbereich sind Schweißgeschwindigkeiten von mehr als 3 m/min möglich.

Weitere Anwendungen sind das MIG/MAG-Tandem-Auftragschweißen und das Tandemschweißen mit Fülldrahtelektroden.

Beide Verfahren werden wegen der hohen Schweißgeschwindigkeit nur vollmechanisch angeboten. Als Schutzgase werden bei Stahl meistens handelsübliche argonreiche Zweistoffgemische eingesetzt.

Schweißnahtquerschnitte beim Mehrdrahtschweißen einer Kehlnaht und Tandemschweißen eines Überlappstoßes mit größeren Schweißgeschwindigkeiten, Abbildung 83, Abbildung 84.

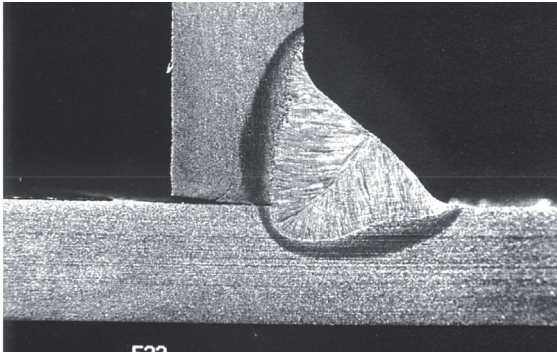


Abbildung 83: MAG-Mehrdrahtschweißen einer Kehlnaht (a-Maß = 4 mm) an Stahl. Blechdicke 5 mm, Abschmelzleistung 14,8 kg/h, Schweißgeschwindigkeit 1,9 m/min

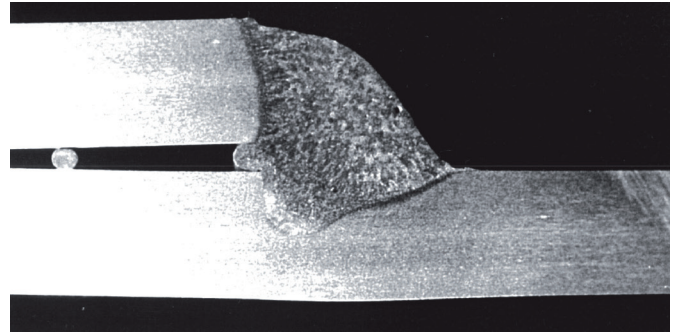


Abbildung 84: MIG-Tandemschweißen einer Überlappnaht an AlMg2,7Mn, Blechdicke 4 mm, Abschmelzleistung 6,6 kg/h, Schweißgeschwindigkeit 3,0 m/min

14.4 Plasma-Metall-Schutzgasschweißen

Das Plasma-MSG-Schweißen mit konzentrisch angeordneten Plasmalichtbogen, Abbildung 85 links. Dieses Verfahren ist eine Kombination von Plasmabrenner und MSG-Brenner. Am Nahtanfang kann der ringförmige Plasmalichtbogen den Grundwerkstoff aufschmelzen, bevor die Drahtelektrode abgeschmolzen wird. Die Gefahr von Poren und Bindefehlern wird z. B. bei Al-Werkstoffen (über dem Feinblechbereich) dadurch verringert. Der Brennerkopf hat einen relativ großen Durchmesser. Der Plasma- und MSG-Lichtbogen können auch in Reihe angeordnet werden, Abbildung 85 rechts und Abbildung 86. Beide Varianten haben bislang keine große Verbreitung gefunden, können jedoch bei speziellen Anwendungen sinnvoll eingesetzt werden.

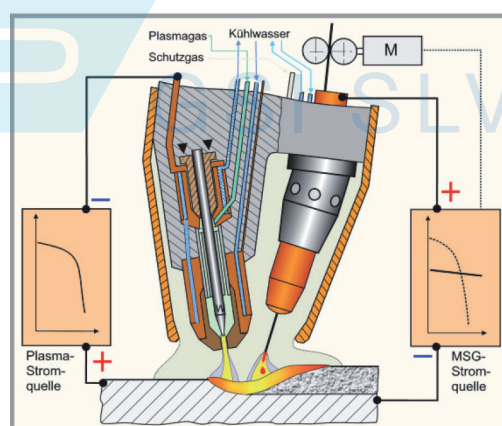
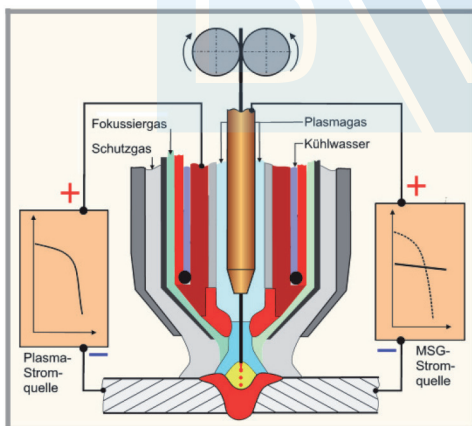


Abbildung 85: Schema des Plasma-MSG-Schweißens mit konzentrisch angeordnetem Plasmalichtbogen und mit in Reihe angeordneten Lichtbogen.

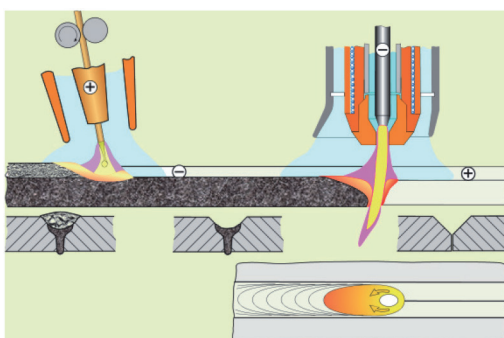


Abbildung 86: Schema des Plasma-MSG-Schweißens mit in Reihe angeordneten Brennern und zwei Schweißbädern

14.5 Laser-MSG-Schweißen

Beim Schweißen mit höheren Leistungen mit dem Laser an dickeren Bauteilen (Stähle und Al-Werkstoffe) sind die Raupen oft nicht ausreichend gefüllt. Durch die Kombination mit Lichtbogenprozessen können Bauteilabweichungen und Lageveränderungen der Werkstücke auch bei hohen Schweißgeschwindigkeiten besser ausgeglichen werden.

Eine Übersicht über die z. Z. angewendeten Prozesskombinationen mit dem Laser-MSG-Schweißen, siehe Abbildung 87.

Diese Variante hat bislang noch keine große Verbreitung gefunden, kann aber bei speziellen Anwendungen sinnvoll eingesetzt werden.

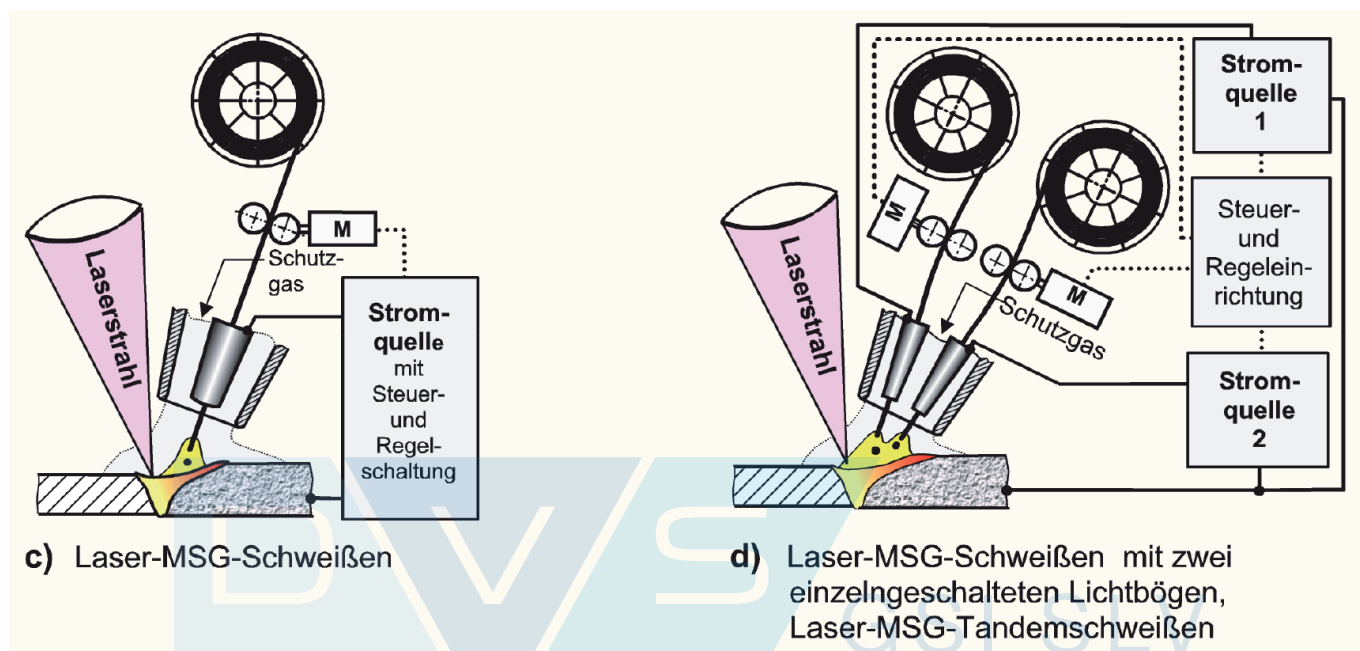


Abbildung 87: Schemen der Laser-MSG-Schweißen

15 Elektrogasschweißen

Dieser Prozess ist eine spezielle Variante des MSG-Schweißens und hat als Kennzahl gemäß DIN EN 4063 die Nummer 73.

Mit diesem Verfahren werden hohe dicke, senkrecht stehende Bauteile, mit hoher Abschmelzleistung als I-Naht mit Spalt verbunden. Es entsteht ein großes Schweißbad, das durch seitlich angebrachte wasser-gekühlte Kupferbacken gehalten wird. Die Vorrichtung mit Brenner und Kupferbacken wird bei steigendem Schweißbad kontinuierlich nach oben gezogen, Abbildung 88.

Die mechanischen Gütewerte dieser Verbindungen können durch das große Schweißbad geringer sein als bei Nähten in Viellagentechnik. Durch Zusatzwerkstoffe mit Feinkornbildnern sind Verbesserungen möglich. Bislang ist der Marktanteil dieser Variante jedoch gering.

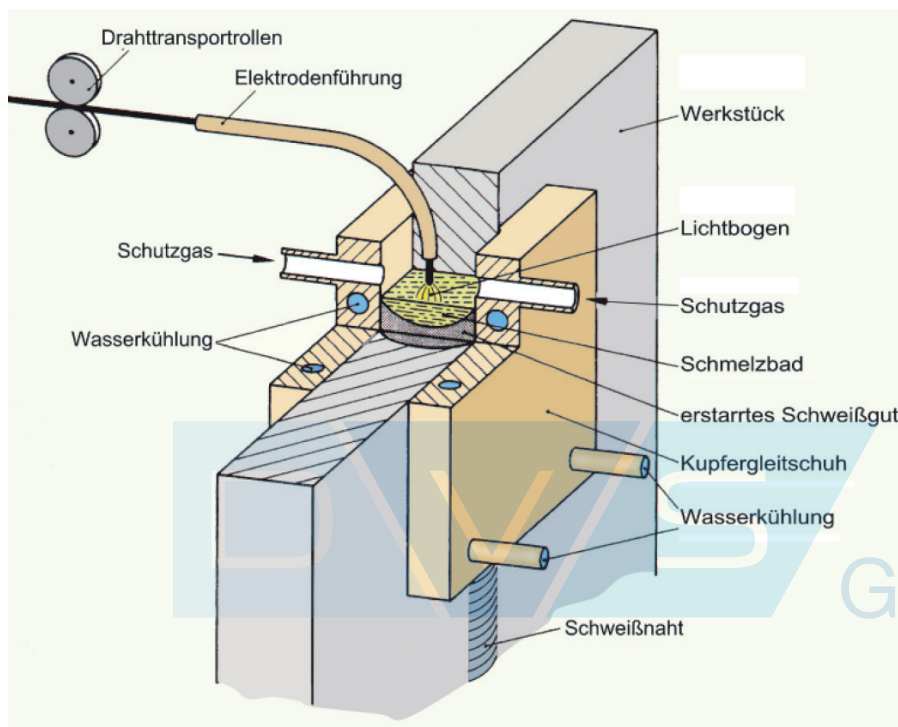


Abbildung 88: Schema des Elektrogasschweißens

16 Literatur

- /1/ DIN Taschenbuch 191, Schweißtechnik 4. Beuth-Verlag
- /2/ Baum L. und Fichter, V.: Der Schutzgasschweißer, Teil 2 – MIG/MAG-Schweißen. Die Schweißtechnische Praxis, Band 12 (1999), DVS-Verlag, Düsseldorf.
- /3/ Dilthey, U.: Energiebilanz der Bogensäule. DVS-Berichte 30 (1974), S.139-156.
- /4/ Knoch, R.: Schweißkennwerte für das MAG-Schweißen. DVS-Berichte, Band 91, DVS-Verlag.
- /5/ Merkblatt DVS 0913: MIG-Schweißen von Aluminium
- /6/ Merkblatt DVS 0912, Metallschutzgasschweißen von Stahl, Teil 1 – Vermeiden von Bindefehlern, Teil 2 – Vermeiden von Poren.
- /7/ Merkblatt DVS 0909-1: Grundlagen des MSG-Hochleistungsschweißens mit Massivdrahtelektroden, Definitionen und Begriffe.
- /8/ Merkblatt DVS 0926: Anforderungen an Energiequellen zum Metallschutzgasschweißen.
- /9/ Merkblatt DVS 0932: MAG-Einstellpraxis – Verfahrens- und bauteilabhängige Einflüsse auf die Nahtgeometrie.



17 Testfragen

1. Wodurch unterscheiden sich das MIG- und das MAG-Schweißverfahren?

- ☐ durch die Neigung der statischen Kennlinie der Stromquelle
- ☐ durch die verwendete Stromart
- ☐ durch die verwendete Polung der Elektrode
- ☐ durch das chemische Verhalten des verwendeten Schutzgases
- ☐ durch kurzschlussfreie und kurzschlussbehaftete Werkstoffübergänge

2. Welche Schutzgase werden beim MSG-Schweißen von verschiedenen Werkstoffgruppen verwendet?

- ☐ CO₂ oder Ar/CO₂-Gemische zum Schweißen von unlegierten Stählen
- ☐ Ar und Ar-He-Gemische beim Schweißen von Al-Werkstoffen
- ☐ Ar/O₂/CO₂-Gemische zum Schweißen von Ni-Basiswerkstoffen
- ☐ Ar-O₂-H₂-Gemische zum Schweißen von NE-Metallen
- ☐ Ar/CO₂-Gemische mit reduzierten CO₂-Gehalt (2 bis 3%) beim Schweißen hoch legierten Stählen

3. Welches Schutzgas erzeugt beim MAG-Schweißen mit größerer Lichtbogenleistung die größte Schlackenmenge?

- ☐ 82% Ar + 18% CO₂
- ☐ 100% CO₂
- ☐ 97% Ar + 3% O₂
- ☐ 70% Ar + 30% He + 8% O₂
- ☐ 92% Ar + 5% CO₂ + 3% O₂

4. Welche Schutzgase sind beim MAG-Schweißen von Baustählen für den Impuls- und Sprühlichtbogen geeignet?

- ☐ Ar + 4% O₂
- ☐ Ar + 18% CO₂
- ☐ Ar + 30% He + 6% CO₂ + 0,5% O₂
- ☐ Ar + 30% CO₂
- ☐ 100% Ar

5. Die Drahtelektrodenwerkstoffe nach Nom für unlegierte Stähle und Feinkornstähle bis 500 N/mm² Streckgrenze (G2Si1, G3Si1, G4Si1) unterscheiden sich hauptsächlich durch die Legierungsgehalte von:

- ☐ P,S
- ☐ C
- ☐ Si, Mn
- ☐ Al, Cu
- ☐ Mo

6. Was bewirkt beim MSG-Schweißen das Vergrößern des Kontaktrahabstandes vom Werkstück?

- ☐ weniger Spritzer
- ☐ kleinere Stromstärke
- ☐ kleinere Einbrand
- ☐ weniger Poren
- ☐ schlechtere Stromübertragung in die Drahtelektrode
- ☐ wegen der stärkeren Erwärmung der Drahtelektrode nimmt die Streckenenergie zu

7. Wie wird beim MSG-Schweißen ein durch einen Störungseinfluss zu lang gewordener Lichtbogen durch die innere Regelung korrigiert?

- ☐ Vergrößerung der Drahtfördergeschwindigkeit
- ☐ schnelle Verminderung der Arbeitsspannung
- ☐ schnelle Verminderung der Stromstärke
- ☐ durch das Ändern der Modulationsart

8. Wie kann beim MAG-Schweißen die Lichtbogenlänge dauerhaft vermindert werden?

- ☐ vermindern des Kontaktrahabstandes
- ☐ vergrößern der Drahtvorschubgeschwindigkeit
- ☐ vermindern der Arbeitsspannung
- ☐ verkleinern der Schweißgeschwindigkeit
- ☐ vergrößern des Ar-Anteils im Schutzgas M21

9. Welcher Vorteil ergibt sich durch das MAG-Impulslichtbogenschweißen?

- ☐ im Feinblechbereich ist die Wärmeeinbringung im Vergleich mit dem Kurzlichtbogen kleiner
- ☐ Verwendung von preiswertem CO₂ als Schutzgas möglich
- ☐ geringe Spritzerbildung durch mit Leistungs-Impulsen gesteuerten Tropfenübergang ohne Brückenbildung
- ☐ der Impulslichtbogen kann im Kurzlichtbogen-, Übergangs- und Sprühlichtbogenbereich zur Anwendung kommen
- ☐ im Vergleich zum Kurzlichtbogen können mit dem Impulslichtbogen flachere Raupen erzeugt werden
- ☐ durch regelmäßige Kurzschlüsse zwischen den Strom-Impulsen ist die Wärmeeinbringung geringer

10. Welche Raupenmerkmale und Parameter ändern sich wesentlich, wenn beim MAG-Schweißen nur die Drahtvorschubgeschwindigkeit erhöht wird?

- ☐ Schlackenmenge
- ☐ Schweißspannung
- ☐ Schweißstromstärke
- ☐ Abschmelzleistung
- ☐ Lichtbogenwiderstand
- ☐ Raupenprofil

11. In welchen Bereichen sind beim MSG-Schweißen durch Änderungen der Schutzgaszusammensetzung Prozess-Beeinflussungen möglich?

- ☐ Siedetemperatur der Drahtelektrode
- ☐ Poren im Schweißgut
- ☐ Werkstoffübergangsformen und Spritzerbildung
- ☐ Schlackebildung
- ☐ Kühlung der Lichtbogenhülle
- ☐ magnetische Fernwirkungen

12. Bei welchen Lichtbogenarten erfolgen die Werkstoffübergänge überwiegend mit Kurz- schlüssen?

- ☐ Langlichtbogen (CO₂-Lichtbogen bei größerer Lichtbogenleistung)
- ☐ Kurzlichtbogen
- ☐ Sprühlichtbogen
- ☐ Impulslichtbogen
- ☐ Übergangslichtbogen

13. Mit welcher Stromart und Polung der Drahtelektrode wird üblicherweise beim MIG-Schweißen von Al-Werkstoffen mit größerer Lichtbogenleistung gearbeitet?

- ☐ Gleichstrom, Minuspolung der Drahtelektrode
- ☐ Wechselstrom
- ☐ Mischstrom, Minuspolung der Drahtelektrode
- ☐ Gleichstrom, Minuspolung der Drahtelektrode
- ☐ Gleichstrom, Pluspolung der Drahtelektrode
- ☐ pulsierender Gleichstrom, Pluspolung der Drahtelektrode

14. Worin bestehen wesentliche Vorteile des MSG-Schweißens gegenüber dem Lichtbogenhandschweißen?

- ☐ geringere Kosten der Schweißanlagen
- ☐ höhere Abschmelzleistungen und Einschaltdauer möglich
- ☐ gute Eignung für das Schweißen im Feinblechbereich
- ☐ größere Schweißgeschwindigkeiten möglich
- ☐ gute Eignung für das vollmechanisierte Schweißen
- ☐ das Schweißen von Al-Werkstoffen ist nur mit Schutzgas-Schweißprozessen möglich

15. Was kann beim MAG-Schweißen von dickeren Stumpfnähten an dickeren Baustählen zur Vermeidung an Bindefehlern beitragen?

- ☐ die freie Drahtelektrodenlänge vergrößern
- ☐ möglichst große Nahtneigungswinkel verwenden
- ☐ große Pendelraupen in Verbindung mit kleinen Schweißgeschwindigkeiten vermeiden
- ☐ Mischgase mit höherem CO_2 -Anteilen oder 100% CO_2 verwenden
- ☐ mit stark stechender Brenneranstellung (z.B. 125°) schweißen

16. Welche Ursachen kann die Entstehung von Spritzern beim MAG-Schweißen von Stählen haben?

- ☐ schleppendes Schweißen (Brenneranstellung 120°)
- ☐ zu kleine Schweißgeschwindigkeit
- ☐ mangelhafte Eigenschaften der Drahtoberfläche
- ☐ bei Werkstoffübergängen mit Lichtbogenunterbrechungen mangelhafte Anpassung der dynamischen Stromquelleneigenschaften und der Arbeitsspannung
- ☐ Blaswirkung
- ☐ Blähungen im flüssigen Zusatzwerkstoff

17. Welche Stoffe im Lichtbogen- und Schweißbadbereich können beim MAG-Schweißen von Baustählen Poren verursachen?

- ☐ N
- ☐ H
- ☐ SiO
- ☐ CO_2
- ☐ CO



18. Worauf ist beim Fallnahtschweißen von Kehlnähten an Baustählen zur Vermeidung von Bindefehlern zu achten?

- ☐ der Lichtbogen soll nicht pendelnd geführt werden
- ☐ die Schutzgasmenge erhöhen, damit das Schweißbad rascher abkühlt
- ☐ die freie Drahtlänge soll über 25 mm betragen
- ☐ Schutzgase mit höherem CO_2 -Anteil oder 100% CO_2 verwenden
- ☐ die Schweißgeschwindigkeit soll so hoch sein, dass das Schweißbad dem Lichtbogen nur minimal voraus eilt
- ☐ dünne Drahtelektroden verwenden

19. Warum wird beim MIG-Schweißen von AL-Werkstoffen der Brenner überwiegend „stechend“ geführt?

- ☐ der Schweißer kann den Prozess besser beobachten
- ☐ der kathodische Reinigungseffekt an den Lichtbogenansatzstellen ist wirksamer
- ☐ die Einbrandtiefe in der Raupenmitte ist tiefer und gleichmäßiger
- ☐ die Raupenoberfläche ist meistens frei von Metaldampfniederschlägen
- ☐ das Ausgasen des Schweißbades wird gefördert (weniger Poren)

20. Welche Antworten treffen für MSG-Tandemschweißen mit einem Schweißbad zu?

- ☐ es kann mit vierfacher Abschmelzleistung im Vergleich zum Eindrahtschweißen geschweißt werden
- ☐ im Vergleich zum Eindrahtschweißen kann erheblich schneller geschweißt werden (Verdoppelung)
- ☐ die Einbrandtiefe in der Raupenmitte kann verdoppelt werden
- ☐ hohe He-Anteile im Schutzgas sind notwendig
- ☐ das MSG-Tandemschweißen ist sehr gut für das vollmechanisierte und automatisierte Schweißen geeignet



Inhalt

1	Gasgeschützte Fülldrahtelektroden	1
1.1	Definition der Fülldrahtelektroden	1
1.2	Querschnittsformen und Herstellung der Fülldrahtelektroden	2
1.3	Füllungsarten und Eigenschaften der Fülldrähte	4
1.4	Schutzgase für Fülldrahtelektroden	10
1.5	Anwendungsbeispiele	10
1.5.1	Aufschweißen von Rohrrahlschalen an Behälteraußenhaut zur Wasserkühlung ..	10
1.5.2	Gabelstaplerzinken als Schweißkonstruktion	11
1.5.3	Ausleger für Mobilkranfahrzeuge	12
1.5.4	MAG-Orbitalschweißen mit Fülldrähten	12
1.5.5	Fülldrahteinsatz im Schiffbau	13
1.5.6	Fülldrahteinsatz im Offshore-Bereich	14
2	Literatur	16
3	Testfragen	17



1 Gasgeschützte Fülldrahtelektroden

1.1 Definition der Fülldrahtelektroden

Fülldrahtelektroden können als umgedrehte Stabelektroden bezeichnet werden, sofern sie Schlacke bilden. Insofern trifft diese Definition teilweise zu, da die in diesem Kapitel relevanten Fülldrähte keine Gasbildner in der Füllung enthalten und deshalb unter dem im MAG-Verfahren üblichen Gasschutz verarbeitet werden müssen. Während die äußere Ummantelung bei der Stabelektrode alle notwendigen Rohstoffkomponenten enthält, befinden sich diese bei einem Fülldraht in der Füllung, die von einem kreisförmigen Mantel umgeben wird, s. Abbildung 1.

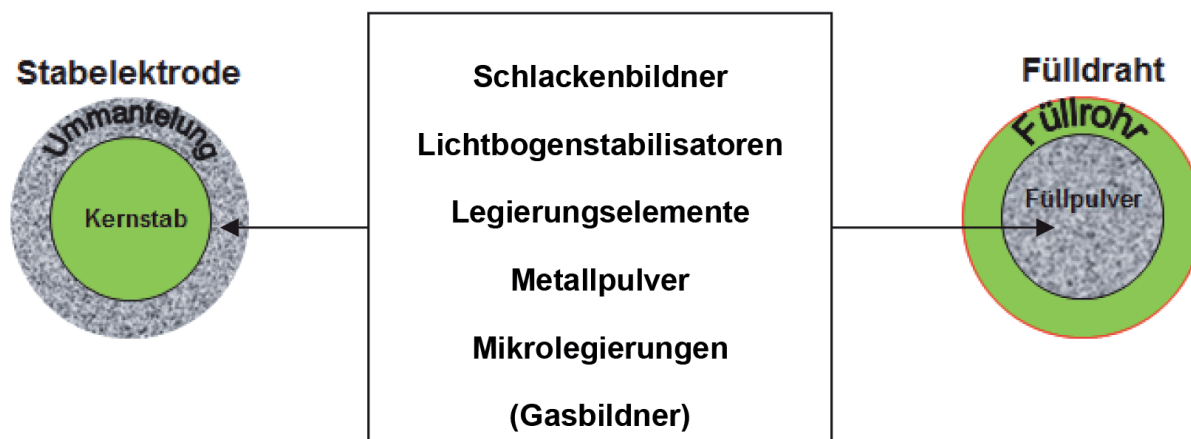


Abbildung 1: Vergleich Stabelektrode-Fülldraht

Das Füllpulver besteht in der Regel aus mehreren Rohstoffen und enthält u.a. Lichtbogenstabilisatoren zur Erzielung einer hohen Prozessstabilität, Legierungselemente zur Nutzung der Metallurgie sowie z.T. Mikrolegierungselemente zur Verbesserung der Güteeigenschaften des Schweißgutes durch den Keimbildungseffekt. Letztere verleihen dem Schweißgut ein feinkörniges Gefüge. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Gasbildner und verstärkte Desoxidationsmittel nur bei s.g. schutzgaslosen Fülldrähten vorkommen, die hier nicht behandelt werden. Zur Orientierung sind in Abbildung 2 einige Rohstoffe gezeigt. In der Regel liegen die Füllungen als trockenes Gemenge oder Agglomerate vor. Jeder Fülldrahttyp besitzt in Abhängigkeit vom Legierungstyp und Durchmesser eine Rezeptur, die die Zusammensetzung der Rohstoffe und die Herstellungsbedingungen beschreibt. Die Füllstoffe haben in Verbindung mit dem Schutzgas Einfluss auf Lichtbogenstabilität, Spritzerbildung, Raupenprofil, Raupenoberfläche, Schlackenentfernbarkeit, Nahtaufbau in Zwangslagen und mechanisch-technologische Schweißguteigenschaften. Gasgeschützte Fülldrähte erfordern eine Schutzgasabdeckung in der gleichen Güte wie Massivdrahtelektroden.

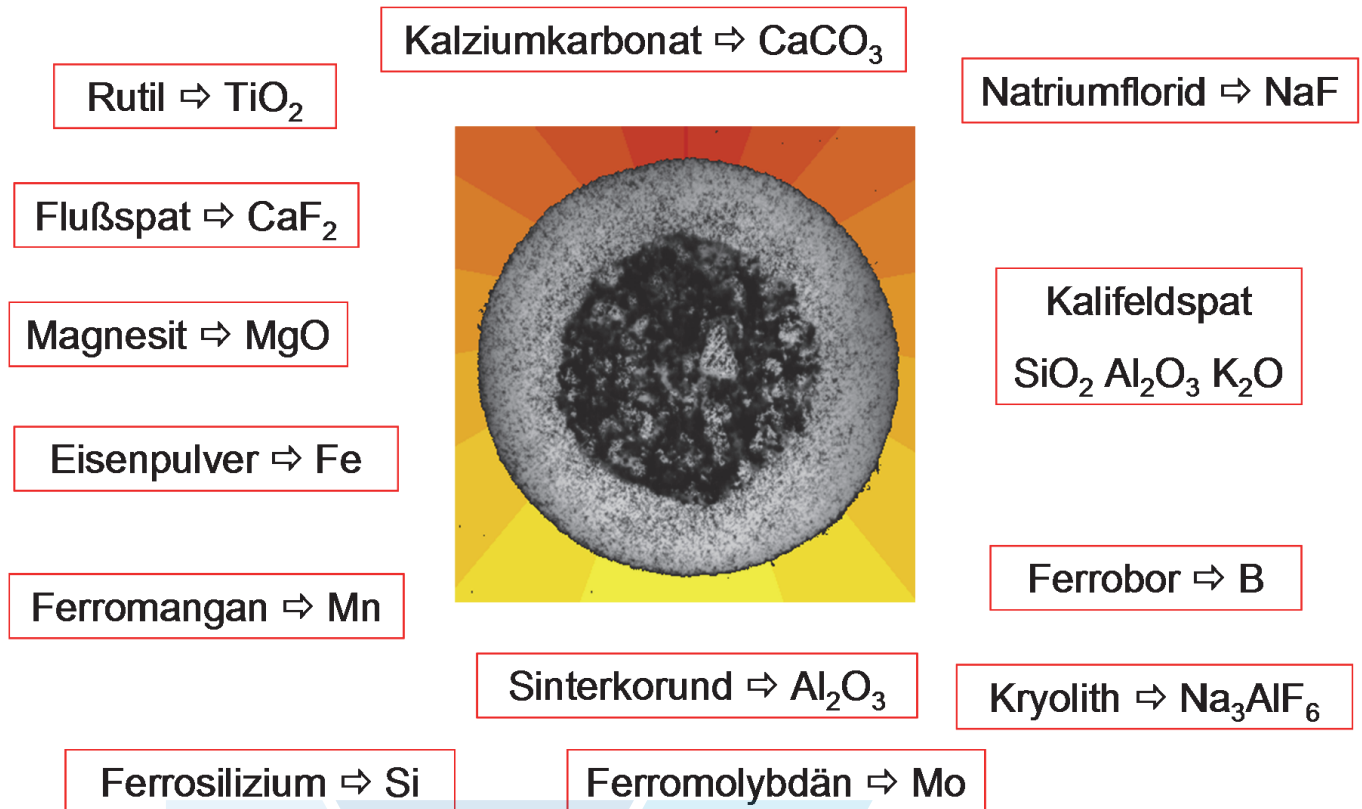


Abbildung 2: Einige Rohstoffe zur Herstellung des Füllpulvers

1.2 Querschnittsformen und Herstellung der Fülldrahtelektroden

Nach dem Aufbau der Drahtquerschnitte existieren nahtlose und formgeschlossene Fülldrahtelektroden, die sich ebenfalls in der Herstellung unterscheiden (Abbildung 3).

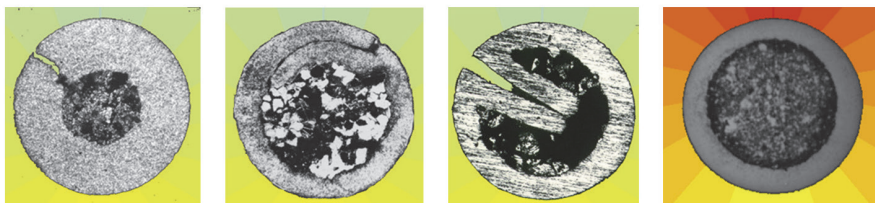


Abbildung 3: Gängige Querschnittsformen bei Fülldrahtelektroden /2; 3/

Als Vormaterial dient bei den formgeschlossenen Typen ein schmales Band mit etwas über 10 mm Breite und weniger als 1 mm Dicke, welches zuerst mithilfe von Biegerollen in U-Form gebracht wird. Danach erfolgt kontinuierliche Füllung des meist trocken gemischten Pulvers. Anschließend wird der Querschnitt geschlossen und in der Regel durch Walzen reduziert und verdichtet. Im zweiten Schritt wird das bereits erzeugte Halbzeug an die Endabmessung gezogen und/oder gewalzt, s. Abbildung 4.

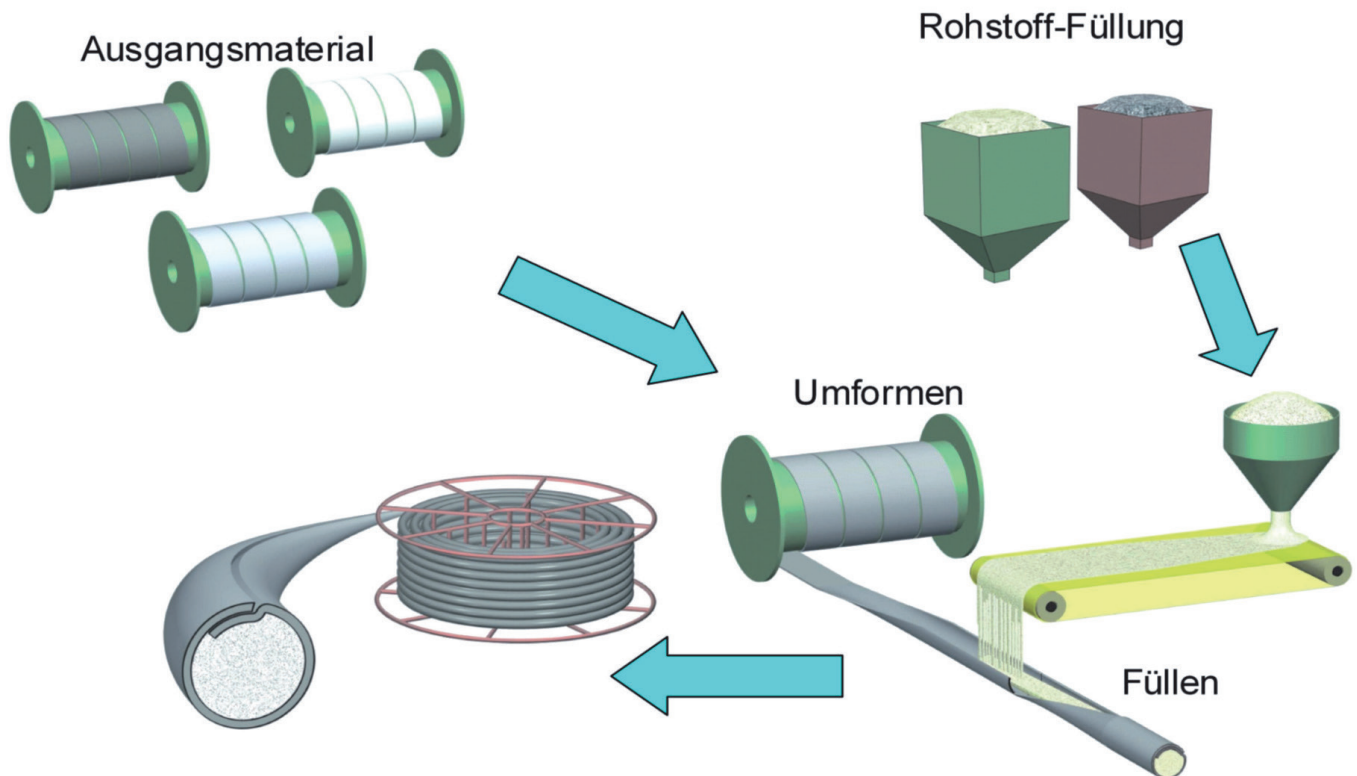


Abbildung 4: Herstellungsprozess formgeschlossener Fülldrähte

Die klassische Fertigung der nahtlosen Fülldrähte benutzt ein ca. 50 mm breites und rund 2 mm dickes Band, aus dem unter Einsatz des Hochfrequenzschweißens endlose Rohre erzeugt werden. Nach der Rekristallisationsglühung wird das Rohr auf Fülldurchmesser gezogen. Das Füllpulver, in diesem Fall agglomeriert, wird durch die Schwingbewegung mithilfe eines Rüttlers in das Rohr eingebracht und vorverdichtet. Danach erfolgt das Vorziehen des Halbzeuges auf den Glühdurchmesser, s. Abbildung 5.

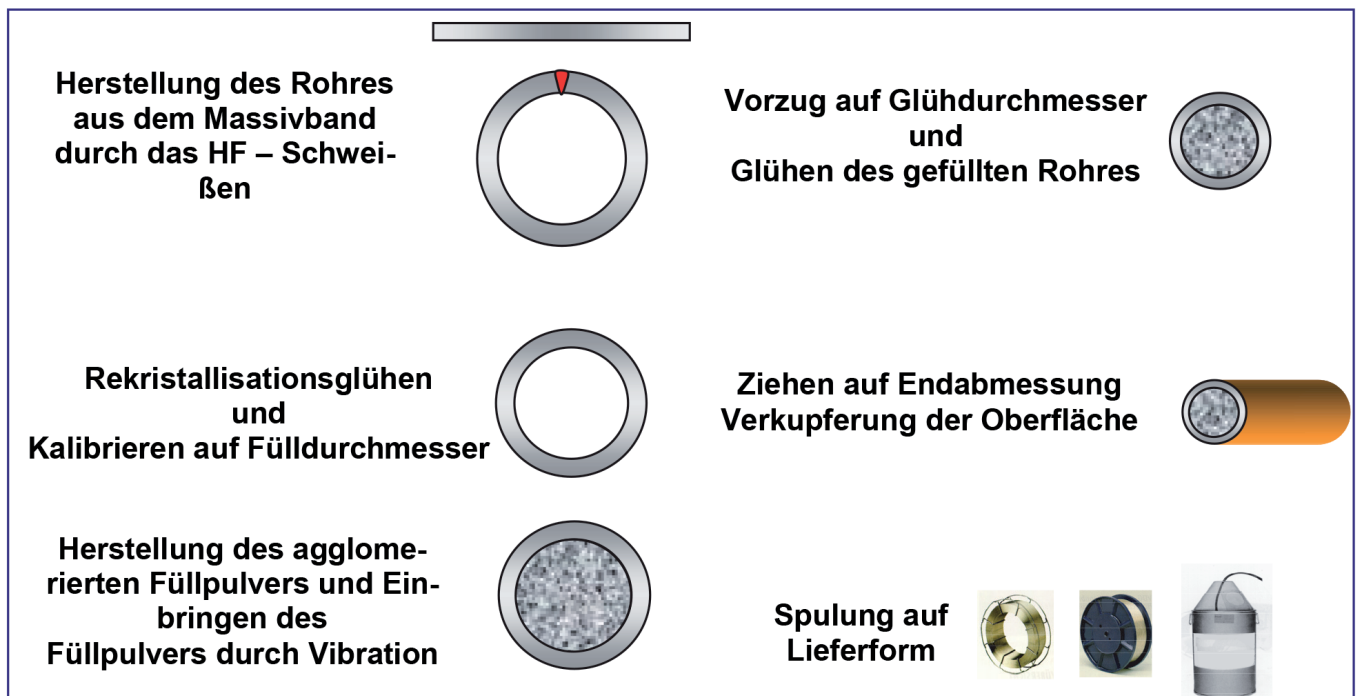


Abbildung 5: Herstellungsprozess nahtloser Fülldrähte /3/

Während bei dieser Wärmebehandlung der verfestigte Mantel weichgeglüht wird, reduziert sich der aus dem Füllpulver stammende Wasserstoff weit unter 5 ml / 100 g. Anschließend wird der Draht in mehreren

Stufen auf die Endabmessung gezogen, dabei mehrmals nass gereinigt und zum Schluss verkupfert und poliert. Die nach dieser Methode hergestellte Fülldrahtelektrode ist gegen Feuchtigkeitsaufnahme absolut geschützt und unbegrenzt lagerfähig. Ein Nachtrocknen ist nicht notwendig. Da die Hülle keinerlei Steifigkeitssprung aufweist, sind die Drähte drallfrei und gewährleisten eine störungsunempfindliche Förderung. Die verkupferte Drahtoberfläche verbessert den Stromübergang und verringert den Düsenverschleiß.

Eine weiterentwickelte Verfahrensvariante arbeitet mit Direktfüllung vor der Rohrschweißstation, wonach das gefüllte Rohr nach der Verdichtung kontinuierlich geglüht wird. Der Draht wird schließlich durch Umspulen in Lieferform gebracht.

1.3 Füllungsarten und Eigenschaften der Fülldrähte

Gegenwärtig stehen Fülldrahtelektroden mit und ohne Schlacke zur Verfügung (Abbildung 6). Die schlackebildenden Typen enthalten Rutil- oder basische Bestandteile und sind wegen der Gefahr der Schlackeneinschlüsse wie die Stabelektroden mit leicht schleppender Brennerstellung zu verarbeiten (Abbildung 7) Titanoxid bildet dabei die Hauptkomponente und ergibt auf der Nahtoberfläche eine dunkelgraue Schlacke. Die basischen Fülldrähte erzeugen wegen der Fluoridbestandteile recht dünnflüssige Schlacke in ockergelb bis leicht grün.

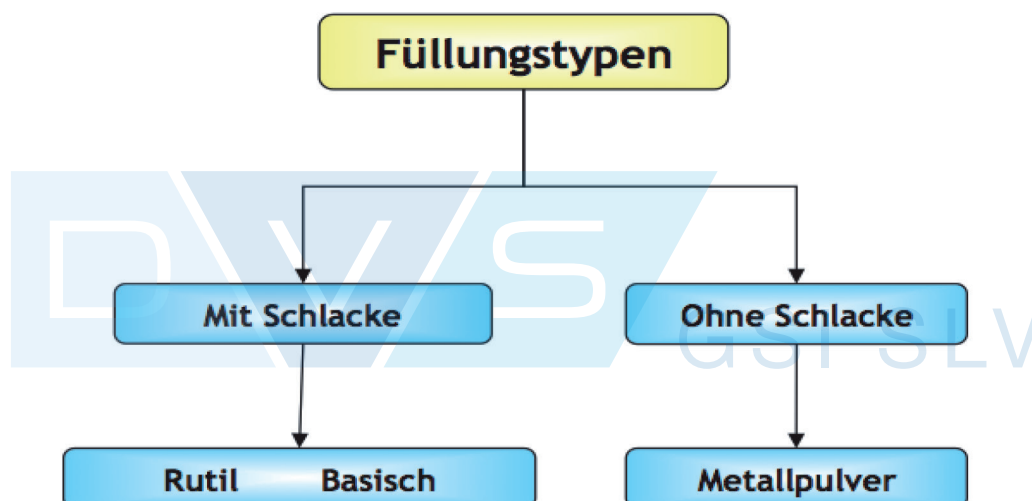
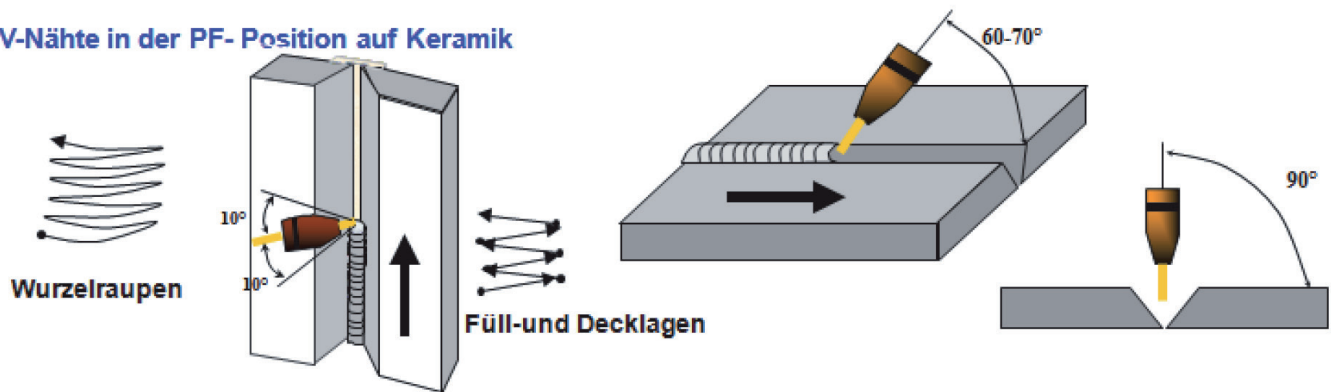


Abbildung 6: Füllungstypen von Fülldrahtelektroden /3/

Die Schlackebildner, insbesondere basische Bestandteile beeinflussen die mechanischen Gütewerte positiv. Sie setzen Bindefehler- und Porengefahr auf ein Minimum herab. Somit stellen die schlackebildenden Fülldrahtelektroden in der schweißtechnischen Beurteilung hinsichtlich der praktischen Anwendungsfälle eine Alternative zur Stabelektrode dar. Ein wesentlicher Vorteil der Rutiltypen mit schnellerstarrender Schlacke besteht darin, dass sie aufgrund der hervorragenden Modellierfähigkeit beim Zwangslagenschweißen vor allem in der steigenden Position sehr wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Die schlackelosen Metallpulver-Fülldrahtelektroden sind als Gegentypen zu den Massivdrahtelektroden zu bewerten. Trotz fehlender Schlacke zeigen diese Typen die fülldrahtspezifischen Vorteile im Hinblick auf die Nahtqualität. Eine Ausnahme bildet Porenanfälligkeit bei zu großem Kontaktrohrabstand.

V-Nähte in der PF- Position auf Keramik



Kehlnähte in der PF- Position

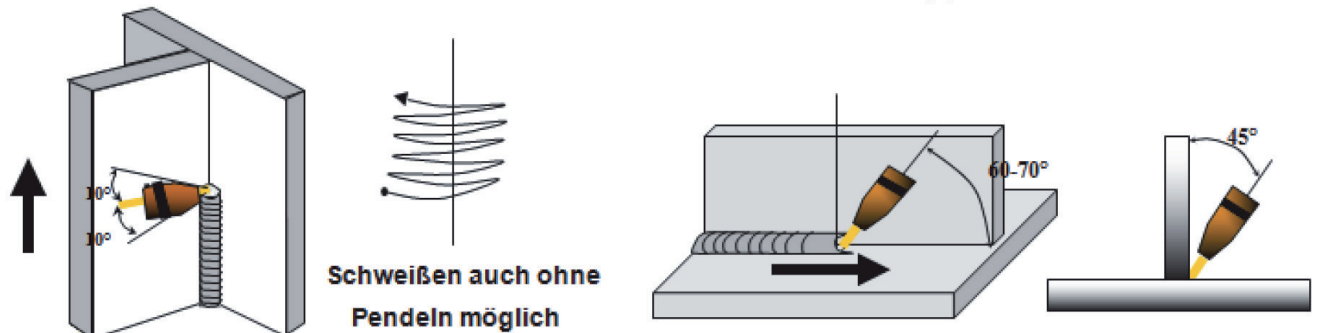
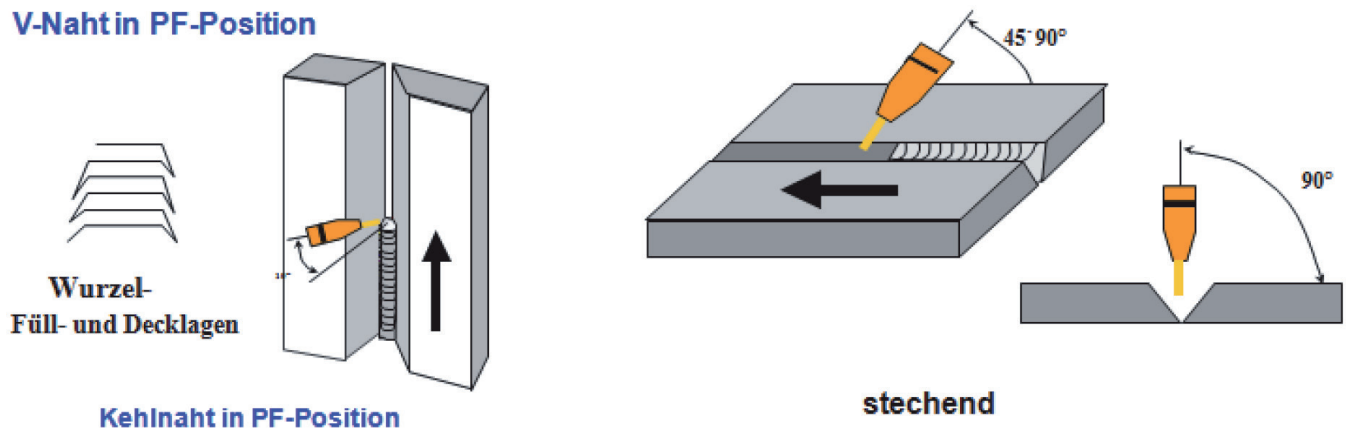


Abbildung 7: Arbeitstechniken beim Schweißen mit Rutil-Fülldrähten

Unter dem Aspekt absolut sicherer Wiederzündfähigkeit und des nahezu spritzerfreien Prozessverhaltens war die Entwicklung dieser Drähte ursprünglich für den Robotereinsatz vorgesehen. Ein weiterer Vorteil gegenüber den schlackebildenden Fülldrahtelektroden ergibt sich in diesem Zusammenhang bei den Mehrlagenschweißungen, da hier die Zwischennahthereinigung entfällt.

V-Naht in PF-Position



Kehlnaht in PF-Position

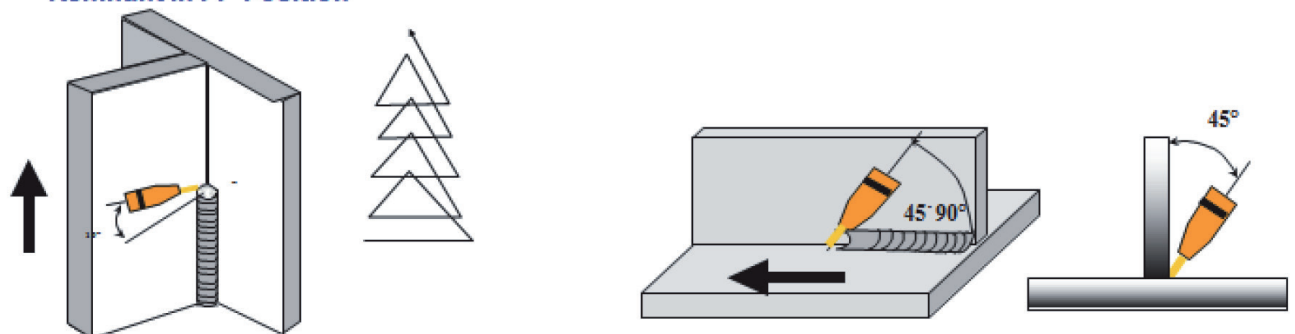


Abbildung 8: Arbeitstechniken beim Schweißen mit Metallpulver-Fülldrähten

Die Fülldrähte für die wichtigsten Werkstoffgruppen sind genormt. In **Tabelle 1** sind diese angeführt.

Tabelle 1: Normen der Fülldrahtelektroden für das MIG/MAG-Schweißen

EN-/prEN-Nummer	Titel	Zusammenhang mit		
		DIN	*)	ISO
EN ISO 17632	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Lichtbogenschweißen mit und ohne Schutzgas von unlegierten Stählen und Feinkornstählen – Einteilung	DIN EN ISO 17632 Ersatz für EN 758		
EN ISO 17634	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Schutzgasschweißen von warmfesten Stählen – Einteilung	DIN EN ISO 17634	IDT	
EN ISO 17633	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden und Füllstäbe zum Metall-Lichtbogenschweißen mit oder ohne Gasschutz von nicht rostenden und hitzebeständigen Stählen – Einteilung	DIN EN ISO 17633	IDT	
EN ISO 18276	Schweißzusätze – Fülldrahtelektroden zum Metall-Schutzgasschweißen von hochfesten Stählen – Einteilung	DIN EN ISO 18276	IDT	DIN EN ISO 18276
EN 14700	Schweißzusätze zum Hartauftragen (incl. Fülldrähte)			

Fülldrahtelektroden für das MSG-Schweißen sind meistens auf Spulenkörper aufgewickelt. Je nach Einsatz kann dieser Spulenkörper sehr klein (1 kg) oder sehr groß (einige 100 kg) sein. Für Großverbraucher gibt es neben Großspulen auch Fässer, aus denen der Draht durch eine Vorrichtung abgezogen wird. Gebräuchliche Drahtelektroden Durchmesser sind: 1,0; 1,2; (1,4); 1,6 [mm]. Für Sonderaufgaben stehen auch die Abmessungen von 2,0 bis 3,2 mm für das Schutzgasschweißen zur Verfügung.

Die Metallpulver-Fülldrahtelektroden, für deren Einsatz hauptsächlich Mischgase verwendet werden, zeigen drei Lichtbogenbereiche, nämlich Kurz-, Misch- und Sprühlichtbogen (Abbildung 9). Die erstaunlich geringe Spritzerbildung im Kurzlichtbogenbereich eröffnet dem Draht auch bei manuellem Einsatz universelle Anwendungsmöglichkeiten. Dies gilt insbesondere für die gute Spaltüberbrückbarkeit (Wurzelschweißen) und für das Schweißen in Zwangslagen. Die Brennerstellung ist ähnlich der beim Schweißen mit Massivdrahtelektroden, d.h., sie ist leicht stechend oder neutral (Abbildung 8). Der mit Spritzern behaftete Mischlichtbogen um 200 A sollte nicht zum Einsatz kommen. Bei Verwendung von Pulsstromquellen schweißen die Metallpulvertypen auch in diesem Bereich nahezu spritzerfrei.

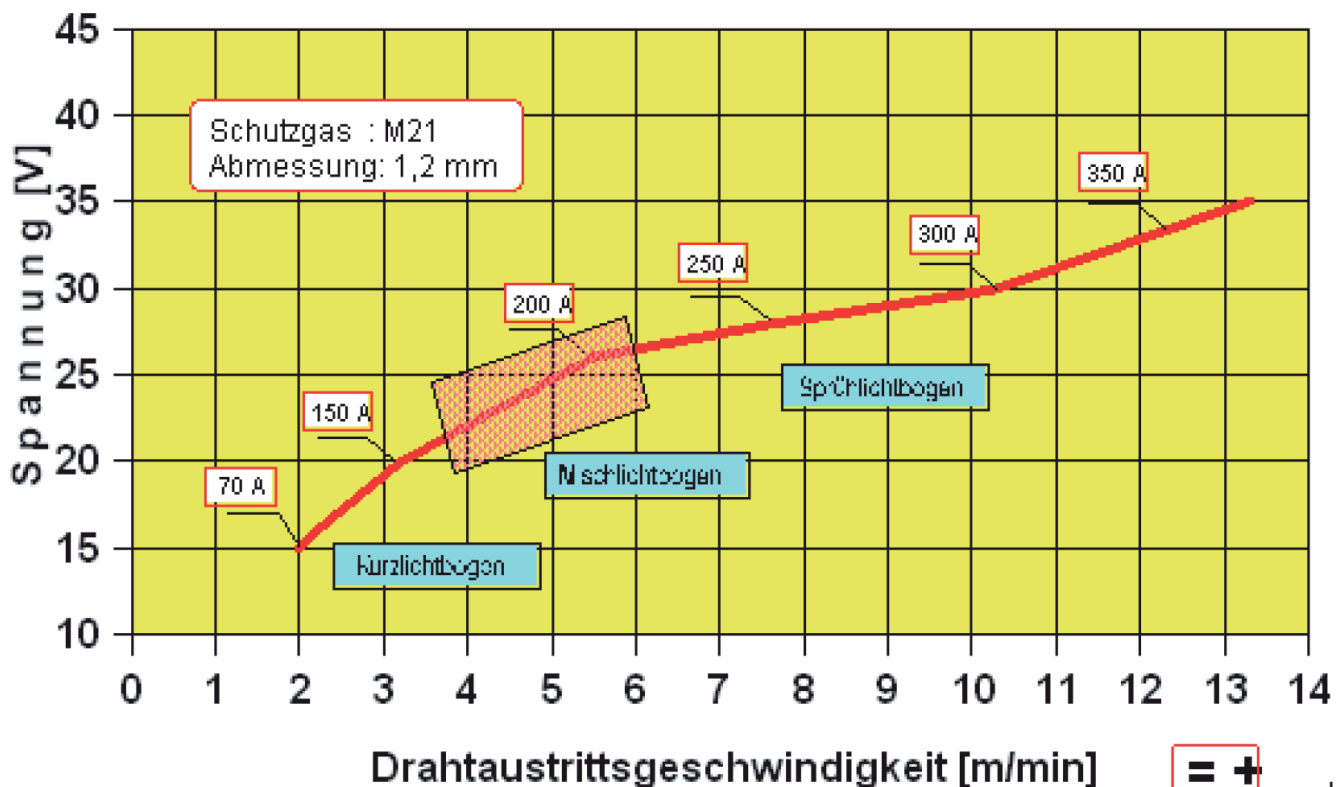


Abbildung 9: Lichtbogenbereiche der Metallpulver-Fülldrähte

Als eine weitere Entwicklung ist der basische Fülldraht mit Zwangslageneignung zu nennen. Derartige Drähte weisen weniger Schlacke auf und werden mit höheren Füllfaktoren gefertigt. Der Füllfaktor gibt die Gewichtsanteile des Mantels und der Füllung an. Die Hauptanforderung für die Entwicklung dieser basischen Generation stammt aus dem Schiffbau. Hier werden die Rutiltypen mit schnell erstarrender Schlacke überwiegend für Einseitenschweißungen, meist auf Keramik in senkrechter Position eingesetzt. Die Werften müssen jedoch immer mehr recht dicke Querschnitte, sowohl für den Schiffbau als auch für Komponenten der Offshoretechnik verarbeiten, wofür der Rutiltyp aus der Sicht der Rissicherheit unter extrem schwierigen Bedingungen nicht ausreicht. Die schweißtechnischen Eigenschaften der o.g. basischen Fülldrahtelektroden mit Zwangslageneignung lauten wie folgt:

- Fein- bis mitteltropfiger Werkstoffübergang
- Schlacke mit mittlerer Stützwirkung, leicht lösend
- Minimierung der Brückenbildung
- Möglichkeit des Überschweißens von Walz- und Primerschichten

Derartige Fülldrähte werden wegen der besseren Schweißigenschaften überwiegend am –Pol verarbeitet, was je nach Anwendungsfall und Maschinenverfügbarkeit ein Nachteil sein kann.

Allgemein ist die Stromquelle mit Konstantspannungscharakteristik heute noch als die Standardstromquelle für alle gasgeschützten Fülldrahtelektroden anzusehen. Die Verwendung von Impulstechnik bietet in Bezug auf die Spritzerfreiheit zusätzliche Vorteile. Mit Rücksicht auf die Optimierung der Schweißigenschaften ist jedoch darauf zu achten, dass die Impulsfrequenz zwischen 50 Hz und 100 Hz betragen sollte.

Fülldrahtelektroden sind teurer als Massivdrahtelektroden. Sie kommen deshalb nur dort zum Einsatz, wo gute Schweißigenschaften und/oder hohe Nahtgüte Vorteile ergeben.

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Eigenschaften der unterschiedlichen Füllungen beschrieben.

Tabelle 2: Eigenschaften und Anwendungshinweise zu Fülldrahtelektroden zum MAG-Schweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen

Rutiltyp	basischer Typ	Metallpulvertyp
• stabiler Lichtbogen und wenig Spritzer • guter Seiteneinbrand • weniger Einbrand in der Nahtmitte im Vergleich zu Massivdraht • glatte Nahtoberfläche und gute Schlackenentfernbarkeit • Drähte mit schnell erstarrender Schlacke, günstig für das Schweißen in Zwangspositionen an dickeren Werkstücken • mechanisch-technologische Eigenschaften des Schweißgutes, besonders bei tieferen Temperaturen, stark vom Legierungstyp und dem Reinheitsgrad der Rohstoffe abhängig	• Werkstoffübergang großtropfiger und Raupe weniger glatt als bei Rutilfüllung • beim Schweißen mit CO₂ mehr Spritzer als bei Ar-CO₂-Gemischen • Stromquellen mit guten dynamischen Eigenschaften erforderlich • in Zwangsposition ist der Impulslichtbogen günstig • gute mechanisch-technologische Schweißguteigenschaften • verminderte Rissanfälligkeit bei bedingt schweißgeeigneten Stählen (z.B. Stähle mit erhöhtem C-Gehalt, warmfeste Stähle, kaltzähe Stähle, Feinkornstähle mit höheren Streckgrenzen, dicke Stahl Gussteile) • Brennerpolung nach Herstellerangaben (häufig Minuspolung)	• im Kurzlichtbogenbereich weniger Spritzer als beim Massivdraht • für Wurzelschweißungen gut geeignet • der Sprühlichtbogenbereich beginnt früher als beim Massivdraht • bessere Wiederzündfähigkeit und weniger Rauch als bei schlackebildenden Fülldrähten, deshalb Robotereignung • mehr Widerstandserwärmung im freien Drahtende als bei Massivdrähten • Höhere Abschmelzleistung als bei Massivdrähten unter gleichen Schweißparametern und sonstigen Bedingungen

Aus den o. g. Eigenschaften und Anwendungshinweisen ergeben sich für Fülldrahtelektroden folgende Einsatzgründe:

- Sichere Flankenerfassung, unempfindlich gegen Bindefehler
- Gute Benetzung, kerbfreie Übergänge, glatte Oberfläche
- Hohe Rissicherheit
- Spritzerarmer Tropfenübergang
- Hohe Prozessstabilität
- Röntgensichere Nähte
- Einsatzmöglichkeit von Mikrolegierungselementen
- Gute Zwangslageneignung
- Wirtschaftliche Fertigung

Resultierend aus diesen Eigenschaften sind für die Entscheidung des Fülldrahteinsatzes nicht der Drahtpreis, sondern die Herstellkosten ausschlaggebend, die bei richtiger Anwendung erheblich günstiger ausfallen können. Deshalb soll die Einsatzberechtigung der Fülldrahttechnik von Fall zu Fall geprüft werden. Dazu werden in Unterrichtseinheit. 1.5 einige Applikationsbeispiele gezeigt.

In Tabelle 3 ist eine Kurzfassung der EN ISO 17632 für Fülldrahtelektroden von unlegierten Stählen und Feinkornbaustählen aufgelistet.

Einen vergleichbaren Aufbau haben die Normen für Fülldrahtelektroden EN ISO 17634 (warmfeste Stähle), EN ISO 17633 (nicht rostende und hitzebeständige Stähle) und EN ISO 18276 (hochfeste Stähle)./3/

Tabelle 3: Kurzfassung der EN ISO 17632 für Fülldrahtelektroden von unlegierten Stählen und Feinkornstählen mit und ohne Schutzgas

ISO 17632-A - T 46 3 1Ni B M 4 H5

Kennzeichen für Streckgrenze, Festigkeit und Dehnung

Kennziffer	Mindeststreckgrenze MPa	Zugfestigkeit MPa	Mindestdehnung %
35	355	440 - 570	22
38	380	470 - 600	20
42	420	500 - 640	20
46	460	530 - 680	20
50	500	560 - 720	18

Kennzeichen für Kerbschlageigenschaften

Kennzeichen	Mindest-Kerbschlagarbeit 47J °C
Z	keine Anforderung
A oder Y	+20
0	0
2	-20
3	-30
4	-40
5	-50
6	-60

Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung des reinen Schweißgutes

Kurzzeichen für den Legierungstyp	Chemische Zusammensetzung ^{a,b)} %		
	Mn	Mo	Ni
ohne Kurzzeichen	2	0,2	0,5
Mo	1,4	0,3 - 0,6	0,5
MnMo	>1,4 - 2,0	0,3 - 0,6	0,5
1Ni	1,4	0,2	0,6 - 1,2
2Ni	1,4	0,2	1,8 - 2,6
3Ni	1,4	0,2	2,6 - 3,8
Mn1Ni	1,4 - 2,0	0,2	0,6 - 1,2
1NiMo	1,4	0,3 - 0,6	0,6 - 1,2
Z	Jede andere vereinbarte Zusammen- setzung		

a Einzelwerte in der Tabelle sind Höchstwerte.

b Die Ergebnisse sind auf dieselbe Stelle zu runden wie die festgelegten Werte unter Anwendung von ISO 31-0: 1992, Anhang B, Regel A.

Kennzeichnung für den diffusiblen Wasserstoffgehalt

Kennzeichen	Wasserstoffgehalt in ml/100 g Schweißgut
H5	5
H10	10
H15	15

Kennziffer für empfohlene Schweißposition

Kennziffer	Schweißposition
1	PA, PB, PC, PD, PE, PF & PG
2	PA, PB, PC, PD, PE & PF
3	PA & PB
4	PA
5	PA, PB & PG

Kennzeichen für Schutzgas

Die Kennzeichen M und C beziehen sich auf das in ISO 14175:1997 beschriebene Schutzgas.
Das Kennzeichen C ist anzuwenden, wenn die Einteilung mit dem Schutzgas ISO 14175-C1, Kohlendioxid, durchgeführt wurde, M steht für Mischgase.
Selbstschützende Fülldrahtelektroden werden mit dem Kennzeichen N bezeichnet.

Bezeichnung der Füllung

Kennzeichen	Eigenschaften	Einlagen-(S) Mehrlagen-(M) Schweißung	Schutzgas
R	Rutil, langsam erstarrende Schlacke	S & M	erforderlich
P	Rutil, schnell erstarrende Schlacke	S & M	erforderlich
B	Basisch	S & M	erforderlich
M	Metallpulver	S & M	erforderlich
V	Rutil oder basisch./fluoridisch	S	nicht erforderlich
W	Basisch/fluoridisch, langsam erstarrende Schlacke	S & M	nicht erforderlich
Y	Basisch/fluoridisch, schnell erstarrende Schlacke	S & M	nicht erforderlich
Z	andere Typen		

1.4 Schutzgase für Fülldrahtelektroden

Rutiltypen, insbesondere mit schnell erstarrender Schlacke, lassen sich unter CO_2 und Mischgasen aus $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ mit Erfolg verarbeiten. Erfolgt der Einsatz unter Baustellen-Bedingungen, dann ist mit Rücksicht auf die Porensicherheit das reine CO_2 zu wählen. Ansonsten kann der Ar-Anteil bis 90% gesteigert werden. Je nach Herstellerangaben können auch 3-Komponentengemische $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ zur Anwendung kommen. Jedoch muss hier berücksichtigt werden, dass die Schlacke durch O_2 -haltige Gase dünnflüssiger wird und die Schweißigenschaften besonders in Zwangslagen negativ beeinflusst.

Ähnliches gilt auch für **basische** Fülldrähte, wobei hier der Spritzeranteil mit wachsendem CO_2 naturgemäß zunimmt.

Metallpulver-Fülldrähte werden vorwiegend unter Mischgasen der Gruppe M21 verschweißt. Die Gasgemische der Gruppen M20, M23 und M24 sind ebenfalls geeignet, wobei hier mit Überhitzungserscheinungen gerechnet werden muss. Theoretisch kann der Metallpulverdraht auch unter CO_2 verarbeitet werden.

1.5 Anwendungsbeispiele

Die ausgewählten Applikationen sollen als Überblick für das Anwendungsspektrum dienen. Es umfasst die Massenbaustähle, die warmfesten und Stahlgussorten bis hin zum hochfesten, vergüteten Feinkornbaustahl mit $R_{p0,2} \geq 1100 \text{ Mpa}$. Auch für hochlegierte Stahlsorten sowie für Schwarzweiß-Verbindungen stehen heute geeignete Fülldrahttypen zur Verfügung (Abbildung 10). Es gibt auch selbstschützende Fülldrähte (Openarc-Typen), die in ihrer Füllung Gasbildner enthalten und ohne zusätzliches Schutzgas verschweißt werden können. Diese bleiben in diesem Abschnitt außer Betracht.

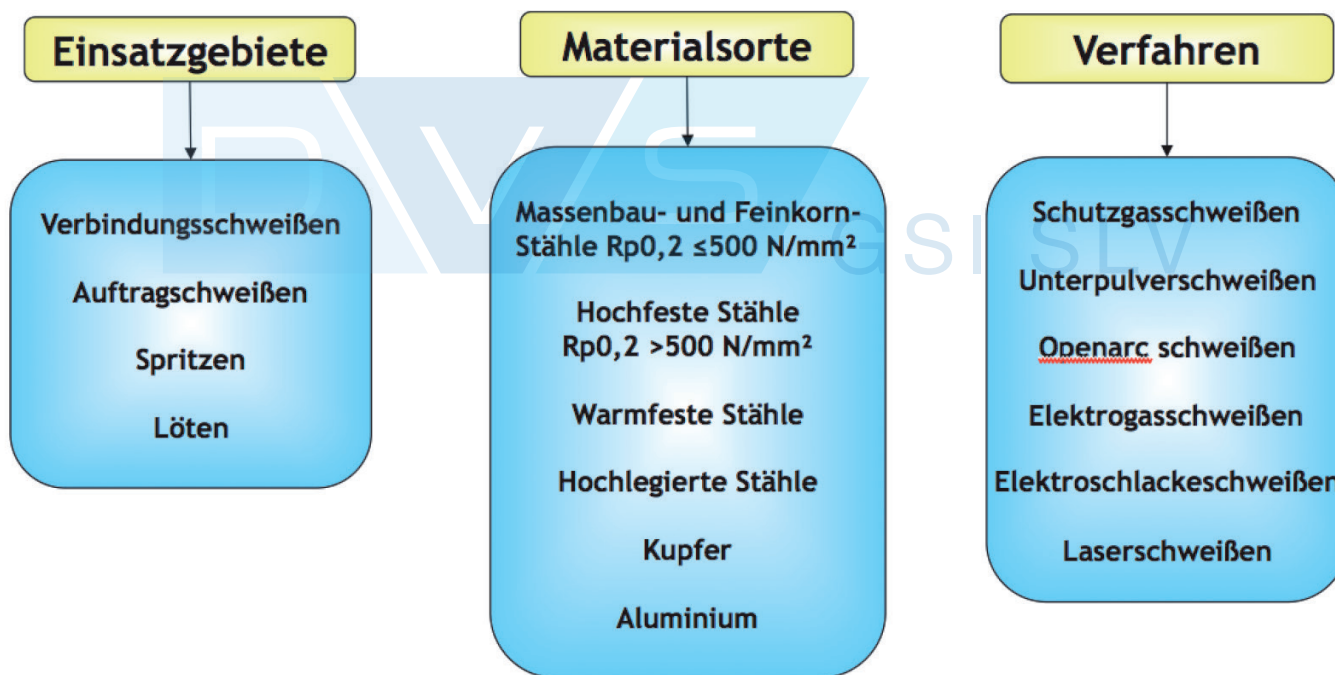
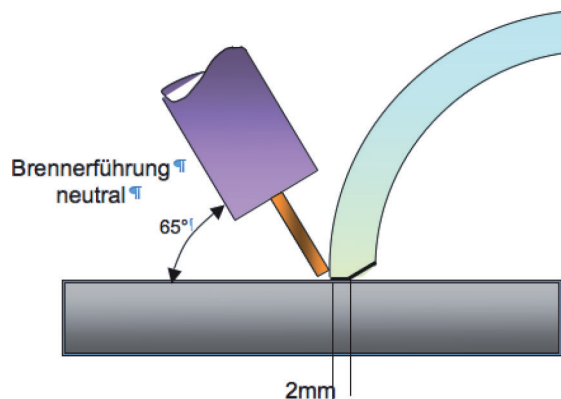


Abbildung 10: Anwendungsbereiche und Verfahren der Fülldrahtelektroden

1.5.1 Aufschweißen von Rohrrahlschalen an Behälteraußenhaut zur Wasserkühlung

Beim Aufschweißen von Rohrrahlschalen an Behälter- oder Bodenaußenwänden wird eine hundertprozentige Dichtigkeit gefordert. Abbildung 11 enthält ein Beispiel mit der hier sehr häufig angewandten Nahtvorbereitung. Sie verfolgt den Zweck, dass innenseitig keine Spaltkorrosion entsteht und setzt eine entsprechende Wurzel Ausbildung voraus. Im vorliegenden Fall kam ein Rutiltyp mit einem Durchmesser von 2,0 mm vollmechanisiert zum Einsatz.



Rutilfülldraht mit 2,0mmØ
an G+Pol unter CO₂ mit:
500A, 33V und 105 cm/min

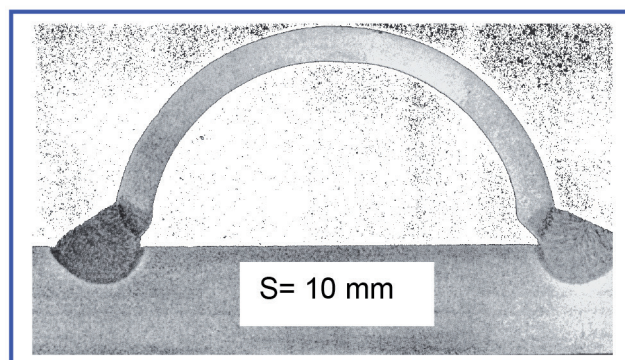


Abbildung 11: Schweißen von Rohrhalschalen auf Behälteraußenwände

Wie aus dem Schliff rechts im Bild hervorgeht, erzielt man, Dank dem breit brennenden Lichtbogen, eine sehr sichere Einbrandform. Obwohl hier unterschiedliche Wanddicken geschweißt werden, gewährleistet der Fülldrahtlichtbogen aufgrund seiner Benetzungsfähigkeit bereits in der ersten Lage spritzerarme und röntgensichere Nähte ohne Bindefehler.

1.5.2 Gabelstaplerzinken als Schweißkonstruktion

In der Regel werden die Gabelstaplerzinken aus verschiedenen Werkstoffen bei Austenitisierungstemperaturen L-förmig gebogen. Aufgrund der Warmformgebung gehen dabei die Festigkeitseigenschaften soweit verloren, dass die Zinken der Hochleistungsgabelstapler die Anforderung bezüglich der Nutzlast nicht mehr voll erfüllen. Daher werden diese Bauteile aus hochfesten Baustählen wie z. B. StE 690 mit Hilfe von MAG-Robotern unter Einsatz hochfester Metallpulver-Fülldrahtelektroden geschweißt. Man erzielt durch diese Technik eine hohe Flexibilität, da sich die Lieferzeiten bei geringer Stückzahl und breitem Angebotsspektrum um etwa 80% verkürzen. Die Naht bzw. Bauteilvorbereitung zeigt Abbildung 11. Die Schweißung der DHV-Fuge erfolgt in der PA-Position in zwei Schritten. Bei der Erstellung der Wurzel mit einem Stegabstand von ca. 4 mm werden Keramikstäbe kreisrunden Querschnitts als Badsicherungselemente verwendet. Nach der Schweißung der ersten Seite wird das Bauteil gewendet und die Gegenseite geschweißt. Die Vorwärmtemperatur beträgt rund 150°C. Um die maximale Arbeitstemperatur von 260°C nicht zu überschreiten, wird auf mehreren Stationen gearbeitet. Obwohl hier entgegen den Grundsätzen der Schweißtechnik in hoch belasteten Zonen geschweißt wird, sind die Nähte trotz Steiflanken und recht großer Blechdicken absolut fehlerfrei.

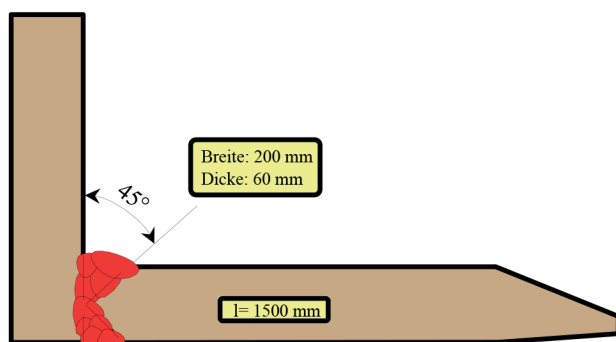


Abbildung 12: Gabelstapler-Zinken aus StE 690 incl. Nahtvorbereitung (Fotoquelle: Firma Kaup, Aschaffenburg)

1.5.3 Ausleger für Mobilkranfahrzeuge

Im Kranfahrzeugbau steht die Eigengewichtsreduzierung zur Erhöhung der Nutzlast im Vordergrund. Aus dieser Tatsache heraus erklärt sich der Einsatz hochfester, vergüteter Feinkornbaustähle. Die in Abbildung 12 abgebildeten Ausleger eines Schwerlastkranfahrzeuges der Stahl XABO 90 mit einer Streckgrenze von $R_{p0,2} = 890 \text{ N/mm}^2$ werden mit basischen Fülldrähten geschweißt. Die Drähte sind mit Mn-Cr-Ni-Mo legiert. Derartige Fülldrähte verfügen über eine basische Schlackencharakteristik und bieten ausreichende Sicherheit gegen wasserstoffinduzierte Rissbildung. Die Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur liegt im Bereich von 120°C bis 150°C .

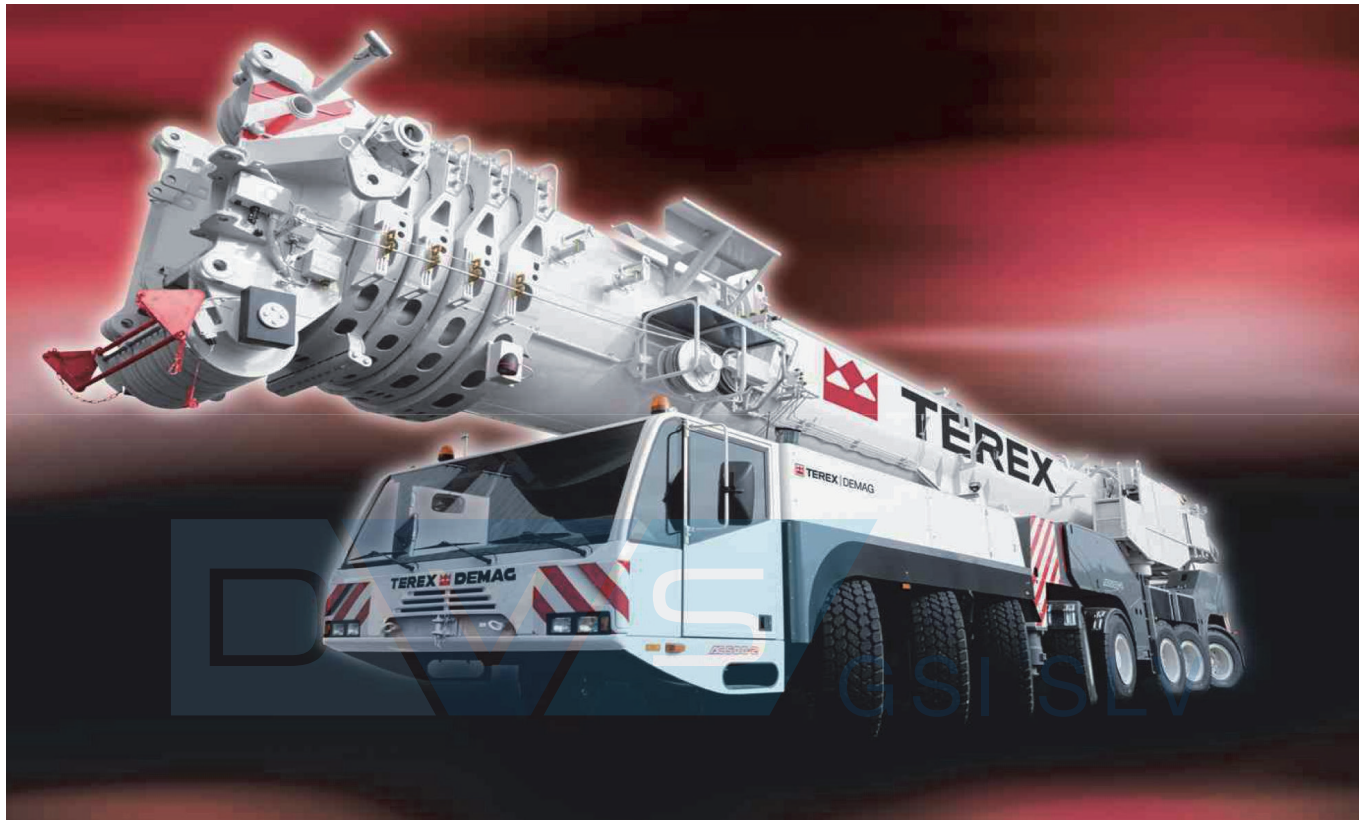


Abbildung 13: Mobiles Schwerlast-Kranfahrzeug (Quelle: Terex-DEMAG, Zweibrücken)

1.5.4 MAG-Orbitalschweißen mit Fülldrähten

Die Aufgabe des Orbital-Schweißens besteht darin, eine Stumpfnaht zwischen zwei rotationssymmetrischen Bauteilen (z.B. Rohre) herzustellen, die nicht gedreht werden können. Typische Anwendungsgebiete sind Pipelines für Erdöl und -gas, Rohrleitungen für Fernwärme und Wasser, Rohrkonstruktionen im Anlagen- und Behälterbau. Für diese Aufgabe haben sich Rutildrähte mit schnell erstarrender Schlacke bewährt, da hier aufgrund der Stützwirkung der Schlacke das Herunterfließen des Schmelzbades in Zwangslagen unterbunden wird. In Abbildung 14 ist ein dafür geeignetes Gerät zu sehen, welches auf einer unmittelbar an der Naht befestigten Führungsschiene bewegt wird. Füll- und Decklagen werden in der Regel beginnend bei PE (06.00 Uhr-Position) bis 12.00 Uhr steigend ausgeführt. In den meisten Fällen wird mit Pendelung gearbeitet. Je nach Stromquellenart kann die Wurzel von PA (12.00 Uhr) zu PE fallend geschweißt werden, wobei hier Metallpulverdrähte vorteilhaft sind. Bei dieser Arbeitsweise beträgt der Luftspalt 3 bis 4 mm.



Abbildung 14: MAG-Orbitalgerät (Quelle: BUGO)

1.5.5 Fülldrahteinsatz im Schiffbau

Aufgrund der universellen Einsatzmöglichkeit in allen Positionen mit hohen Abschmelzleistungen ohne Parameteränderung fanden die Rutilfülldrähte Zugang in den Schiffbau. Ab der 80er Jahre wurde die Stabelektrode durch die Fülldrahttechnik nahezu vollständig ersetzt. Neben den Kehlnähten an Innenböden, Bodenwrangen, Längsträgern und Außenhaut zeigt der Fülldraht die große Effektivität in Stumpfverbindungen. Die Blechsegmente werden mit einem Stegabstand von 4 bis 6 mm geheftet. Da es sich hierbei um gekrümmte Konstruktionsteile handelt, die in diesem Montagezustand über wenig Beulsteifigkeit verfügen, muss auf ein Wenden des Bauteils während der Fertigung verzichtet werden. Um dennoch wirtschaftlich schweißen zu können, wird das „Einseitenschweißen“ auf Keramikunterlage angewandt. Für diesen Zweck werden, wie aus Abbildung 15 und 16 ersichtlich, auf der Außenhaut-Unterseite profilierte Keramikschiene befestigt.

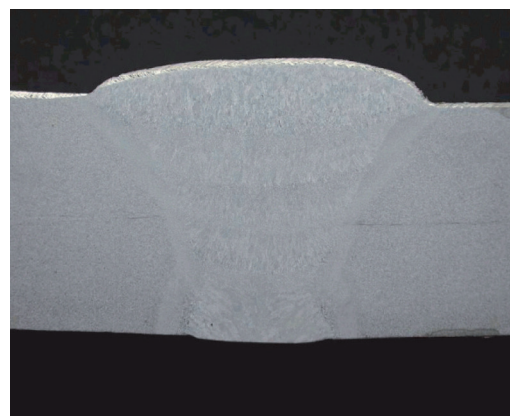
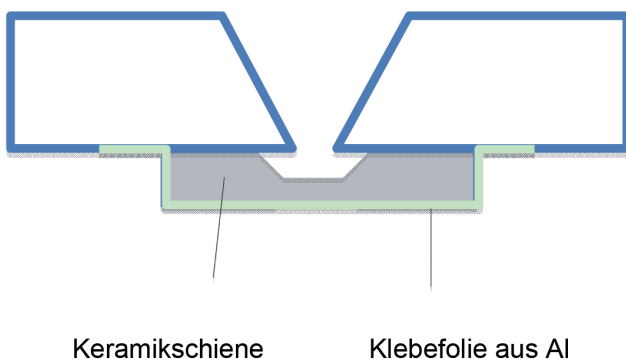


Abbildung 15: MAG-Einseitenschweißen mit Fülldrähten auf Keramik als Badsicherung

Die für nur einmaligen Gebrauch vorgesehenen Keramikunterlagen können unmittelbar nach dem Schweißen der Wurzellage entfernt werden. Ein übliches MAG-Vertikalschweißgerät verfügt über ein sehr geringes Gesamtgewicht von etwa 15 kg. Das luftgekühlte Brennersystem erlaubt in Verbindung mit Durch-

messer 1,2 mm-Fülldrahtelektroden Stromstärken bis 260 A. Sämtliche Schweißparameter werden am Bedienungstableau für jede Lage vorab eingegeben. Die hinterlegte Keramikschiene garantiert dabei eine hervorragende Wurzel Ausbildung, sodass auf jegliche Nacharbeit verzichtet werden kann.



Abbildung 16: Mechanisiertes MAG-Fülldrahtschweißen der Sektionsstöße im Schiffbau (Quelle: Aker Werft, Warnemünde)

1.5.6 Fülldrahteinsatz im Offshore-Bereich

Die voranschreitende Verknappung von Erdöl und Erdgas an Onshore-Quellen zwingen dazu, die Suche nach natürlichen Rohstoffen auf die Weltmeere auszudehnen. Vor diesem Hintergrund werden die Offshore-Aktivitäten immer lukrativer, weshalb gegenwärtig zahlreiche Bohrinseln gebaut werden. Im vorliegenden Applikationsbeispiel handelt es sich um Halbtaucher-Bohrinseln, die mobil eingesetzt werden können. Diese sind als Ponton ausgeführt und damit schwimmfähig und besitzen eigene Antriebseinheiten, die einerseits den Transport zu neuen Positionen ermöglichen und andererseits die Fixierung der Plattform über dem Bohrloch gewährleisten (Abbildung 17).



Abbildung 17: Halbtaucher-Bohrinsel (Drilling Rig TDS 2000 P) (Quelle: GPS/MCC, Abu Dhabi)

In **Abbildung 18** erkennt man einen aus drei Blöcken bestehenden Ponton mit 105 m Länge.



Abbildung 18: Vorfertigung der Pontons einer Bohrinself (Quelle: Nöll-IMAC/MCC, Abu Dhabi)

Da ähnlich wie im Schiffbau die Bauteile sich nicht drehen lassen und bei der Fertigung der Pontons im Freien gearbeitet wird, kommt für sämtliche Nahtarten in allen Positionen der Rutilfülldraht unter CO_2 zum Einsatz. Für die Vorfertigung in geschlossenen Hallen werden Mischgase aus der Gruppe M21 bevorzugt.



2 Literatur

/1/ DIN Taschenbuch 191: Schweißtechnik 4, Beuth-Verlag

/2/ Merkblatt DVS 0941-1 Fülldrahtelektroden für das Verbindungs- und Auftragschweißen

/3/ EN ISO 17632: Fülldrahtelektroden – Fülldrähte für unlegierte Stählen und Feinkornbaustähle

EN ISO 17634: Fülldrahtelektroden für warmfeste Stähle

EN ISO 17633: Fülldrahtelektroden für nicht rostende und hitzebeständige Stähle

EN ISO 18276: Fülldrahtelektroden für hochfeste Stähle



3 Testfragen

1. Was ist eine Fülldrahtelektrode?

- ☐ eine gewickelte Form der Massivdrahtelektrode
- ☐ eine endlose, umgedrehte Stabelektrode
- ☐ eine gebogene Bandelektrode
- ☐ ein mit Gas gefüllter Schweißzusatz
- ☐ ein Rohr, welches beim Schweißen zum Füllen der Fuge Pulver fördert

2. Welche Fülldrahtarten gibt es gemäß ihrem Aufbau?

- ☐ wasservergütete Fülldrähte
- ☐ normalisierte Fülldrähte
- ☐ nahtlose Fülldrähte
- ☐ formgeschlossene Fülldrähte
- ☐ basische Fülldrähte

3. Welche Fülldrahtarten gibt es gemäß ihrer Füllung?

- ☐ Fülldrähte mit basischer Füllung
- ☐ Rutil-Fülldrähte
- ☐ gasgefüllte Fülldrähte
- ☐ Fülldrähte ohne Schlacke
- ☐ Metallpulver-Fülldrähte

4. Für welche Schweißverfahren gibt es Fülldrähte?

- ☐ für das UP-Schweißen
- ☐ für das Reibschweißen
- ☐ für das Abbrennstumpfschweißen
- ☐ für das ES-Schweißen
- ☐ für das EG-Schweißen

5. Welche Gründe sind für den Fülldrahteinsatz im MAG-Prozess ausschlaggebend?

- ☐ wenig empfindlich gegen Bindefehler
- ☐ geringe Abschmelzleistung, daher bessere Schweißbadkontrolle
- ☐ gute Porensicherheit
- ☐ gute Modellierfähigkeit
- ☐ Schweißen im Wasser kein Problem

6. Was versteht man unter der Mikrolegierungstechnik im Fülldrahtschweißen?

- ☐ Impfung der Naht mit Mn zur Erzielung feiner Gefügestruktur
- ☐ Impfung der Naht mit Si zur Erzielung feiner Gefügestruktur
- ☐ Impfung der Naht mit B zur Erzielung feiner Gefügestruktur
- ☐ Impfung der Naht mit Ti zur Erzielung feiner Gefügestruktur
- ☐ Impfung der Naht mit N zur Erzielung feiner Gefügestruktur

7. Welche Einsatzgebiete für Fülldrähte sind in Europa bekannt?

- ☐ Fülldrähte zum Schweißen von warmfesten Stählen
- ☐ Fülldrähte zum Laserschweißen
- ☐ Fülldrähte zum Schweißen von hochfesten Stählen
- ☐ Fülldrähte zum Füllschweißen von Gusswerkstoffen
- ☐ Fülldrähte zum Schweißen von genormten Profilen

8. In welchen Industriebereichen werden Fülldrähte hauptsächlich verwendet?

- ☐ Fahrzeugbau
- ☐ Offshoretechnik
- ☐ Heizungsanlagen
- ☐ Schiffbau
- ☐ Chemische Industrie



Inhalt

1	Einleitung, Geschichtliches	1
2	Verfahren	2
2.1	Anwendungsbereiche	3
2.2	Vor- und Nachteile	3
3	Schweißgerätetechnik	4
3.1	Schweißstromquellen.....	4
3.1.1	Kennlinie Lichtbogenhandschweißen	5
3.1.2	Technologische Parameter	5
3.2	Schweißzubehör	8
4	Normen und Einsatzbereiche der umhüllten Stabelektroden.....	9
5	Die umhüllten Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen	10
5.1	Herstellung.....	10
5.2	Kernstäbe für Elektroden	11
5.3	Zusammensetzung der Umhüllung, Umhüllungsstoffe	11
5.4	Typische Zusammensetzung der wichtigsten Umhüllungstypen	11
5.5	Aufgaben der Stabelektrodenumhüllung.....	12
5.6	Einteilung der umhüllten Stabelektroden	13
5.7	Maße und Grenzabmaße von umhüllten Stabelektroden (DIN EN ISO 544 – Auszug)	13
5.8	Kennzeichnung nach DIN EN ISO 544	14
5.8.1	Kennzeichnung auf dem Produkt.....	14
5.8.2	Kennzeichnung auf jeder kleinsten Verpackungseinheit	14
6	Empfehlungen zur Lagerung und Rücktrocknung von Stabelektroden	15
6.1	Lagerung (Auszug aus Merkblatt DVS 0957)	15
6.2	Feuchtigkeitsaufnahme von Stabelektroden	15
6.3	Rücktrocknung	17
6.4	Negative Auswirkungen einer erhöhten Feuchtigkeitsaufnahme bei Stabelektroden.....	17
7	Spezifische Gefahren beim Lichtbogenhandschweißen.....	18
7.1	Elektrische Gefährdung	18
7.1.1	Gefahrenbereich Schweißgerät und Netzanschluss.....	18
7.1.2	Gefahrenbereich Schweißleitungen, Werkstückanschluss	18
7.2	Gefahrenbereich Lichtbogen.....	18
7.3	Gefahrenbereich Schmelzbad und Schlacke	18
7.4	Schweißrauche und Stäube.....	19
7.5	Persönliche Schutzausrüstung	19
8	Kennzeichnung von Stabelektroden nach internationalen Normen	20
8.1	Die Einteilung erfolgt nach acht Merkmalen am Beispiel DIN EN ISO 2560-A.....	20
8.2	Bezeichnungsbeispiel	21
9	Auswahlkriterien von Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen	22
10	Stabelektroden für unlegierte und Feinkornstähle, DIN EN ISO 2560-A.....	23
10.1	Anwendungsbereich DIN EN ISO 2560-A	23
10.2	Sauer umhüllte Stabelektroden: A	23
10.3	Zellulose umhüllte Stabelektroden: C	24
10.4	Basisch umhüllte Stabelektroden: B	25
10.5	Rutilumhüllte Stabelektroden: R, RR, RC, RA, RB	27

10.6	Mehrausbringungselektroden, „Hochleistungselektroden“	28
10.7	Anwendungsbeispiele für Stabelektroden der DIN EN ISO 2560-A	29
11	Stabelektroden für wetter-, hochfeste und kaltzähe Stähle, DIN EN ISO 18275-A.....	31
12	Stabelektroden für warmfeste und hochwarmfeste Stähle, DIN EN ISO 3580-A	34
13	Stabelektroden für nicht rostende und hitzebeständige Stähle, DIN EN ISO 3581-A.....	36
13.1	Stabelektroden für Schwarz-Weiß-Verbindungen, DIN EN ISO 3581-A	38
14	Schweißzusätze zum Hartauftragen, DIN EN 14700	40
15	Stabelektroden zum Reparaturschweißen von Gusseisen, DIN EN ISO 1071	44
15.1	Kennzeichnung der Stabelektroden nach DIN EN ISO 1071	44
15.2	Graugusswarmschweißen mit artgleichem Schweißzusatz	45
15.3	Graugusskalterschweißen mit einem artfremden Schweißzusatz	47
16	Sonderelektroden.....	49
16.1	Schneid-/Ausnutelektroden	49
16.2	Schneidelektroden – Hohlstabelektroden	49
16.3	Kohleelektroden (meist verkupfert Arc-Air-Verfahren)	49
16.4	Vorwärmelektroden	49
17	Schweißdurchführung	50
17.1	Nahtvorbereitung	50
17.1.1	Stumpfnähte	50
17.1.2	Kehlnähte	50
17.2	Elektrodenführung und Nahtaufbau	51
17.3	Blaswirkung.....	54
17.4	Ausbringen von Stabelektroden.....	55
17.5	Wahl einer günstigen Schweißposition	56
18	Wirtschaftlichkeit	57
19	Fallnahtschweißen	58
19.1	Umhüllte Stabelektroden für den Rohrleitungs- und Pipelinebau	58
19.2	Schweißstromquellen.....	59
19.3	Arbeitstechniken beim Fallnahtschweißen mit zelluloseumhüllten Stabelektroden	60
19.3.1	Nahtvorbereitung	60
19.3.2	Arbeitstechniken, Elektrodenhaltung	61
19.3.3	Lagenaufbau	62
19.4	Zusammenfassung	63
20	Schweißnahtunregelmäßigkeiten und ihre möglichen Ursachen	64
20.1	Schlackeneinschlüsse.....	64
20.2	Gaseinschlüsse (Poren).....	64
20.3	Endkrater	64
20.4	Risse im Schweißnahtübergang	64
20.5	Wurzelfehler.....	64
20.6	Einbrandkerben.....	65
20.7	Wasserstoffinduzierte Risse	65
21	Literatur.....	67
22	Testfragen	68

1 Einleitung, Geschichtliches

Das Lichtbogenhandschweißen, kurz auch E-Hand(-Schweißen) genannt, ist einer der ältesten Schmelzschweißprozesse.

Bereits 1885 wurde ein Lichtbogen zwischen einer Kohleelektrode und dem Werkstück erzeugt, um das Metall aufzuschmelzen. Die Zuführung des Zusatzwerkstoffes erfolgte, wie heute noch beim Autogen- oder WIG-Schweißen, stromlos.

Mit dem Patent des Russen Slawjanow von 1890, der den Zusatzwerkstoff als Lichtbogenträger einsetzte, wurden der Zusatzdraht und die Elektrode vereinigt. Allerdings waren diese Elektroden noch nicht umhüllt, daher sehr schwierig zu verschweißen (z.B. fehlende Ionisation) und die umgebenden Luft hatte erheblich negativen Einfluss auf das Schweißbad (Poren, Oxidation etc.).

Das Reichspatent „Elektrode und Verfahren zum elektrischen Löten“, angemeldet 1908 durch den schwedischen Ingenieur Oscar Kjellberg, stellte den Grundstein für die umhüllten Stabelektroden dar. Die Herstellung der Umhüllung erfolgte zu diesem Zeitpunkt durch mehrfaches Tauchen des Kernstabes in eine aus den Umhüllungsstoffen bestehende Paste. Um 1935 herum wurde dieses sehr aufwendige Verfahren durch das heute noch gebräuchliche Pressverfahren ersetzt. Damit wurde es auch möglich, Stabelektroden mit einer dicken Umhüllung herzustellen, und diese in homogener Zusammensetzung und genauer Kalibrierung aufzutragen. Bereits 1938 wurden ca. 50% der Stabelektroden im Pressverfahren hergestellt.

Im Wesentlichen unterscheidet sich die heutige Herstellungsart kaum von der damaligen, allerdings wurde u.a. mit der Weiterentwicklung der Umhüllungsstoffe und einer Optimierung des Produktionsablaufes (z.B. Extruderpressen) eine bedeutende Leistungssteigerung und Qualitätsverbesserung erreicht. Maßgeblich wurde das Lichtbogenhandschweißen auch durch stetige Verbesserungen in der Gerätetechnik beeinflusst.



Abbildung 1: Lichtbogenhandschweißen

2 Verfahren

Lichtbogenhandschweißen (Prozessnummer 111) gehört zu den Schmelzschweißprozessen und wird als: „Von Hand ausgeführtes Metall-Lichtbogenschweißen mit umhüllter Stabelektrode“ beschrieben.

Dieser Schweißprozess ist vielseitig, in allen Schweißpositionen, ohne aufwendige Schutzmaßnahmen, besonders im Freien und als einziges Verfahren auch unter Wasser anwendbar. Mit dem Lichtbogenhandschweißen können alle schweißbaren Eisenwerkstoffe, Nickel- und Nickellegierungen mit umhüllten Stabelektroden geschweißt werden. Schweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen werden in den neuen Normen für das Lichtbogenhandschweißen nicht mehr berücksichtigt und finden auch in der Praxis kaum noch Anwendung.

Beim Lichtbogenhandschweißen brennt der Schweißlichtbogen zwischen einer umhüllten abschmelzenden Stabelektrode und dem Werkstück. Der Schweißlichtbogen und das grundwerkstoffseitige Schmelzbad werden vor dem Zutritt der Luft durch das sich aus der Umhüllung bildende Schutzgas und einer Schlacke geschützt.

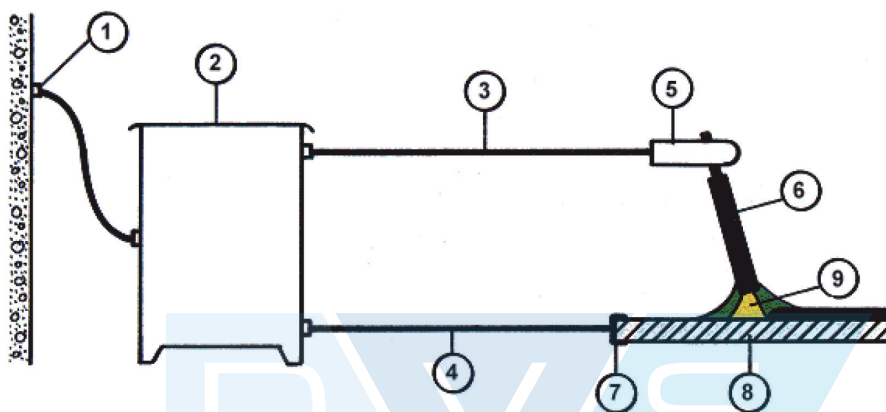


Abbildung 2: Verfahrensprinzip

- 1 Netzanschluss
- 2 Schweißstromquelle
- 3 Schweißstromleiter (Elektrode)
- 4 Schweißstromleiter (Werkstück)
- 5 Stabelektrodenhalter
- 6 Stabelektrode
- 7 Werkstückklemme
- 8 Werkstück
- 9 Lichtbogen
- 10 Stabelektrodenkernstab
- 11 Stabelektrodenumhüllung
- 12 Tropfenübergang
- 13 Schützende Gase aus der Stabelektrodenumhüllung
- 14 Flüssige Schlacke
- 15 Feste Schlacke
- 16 Flüssiges Schweißgut
- 17 Festes Schweißgut

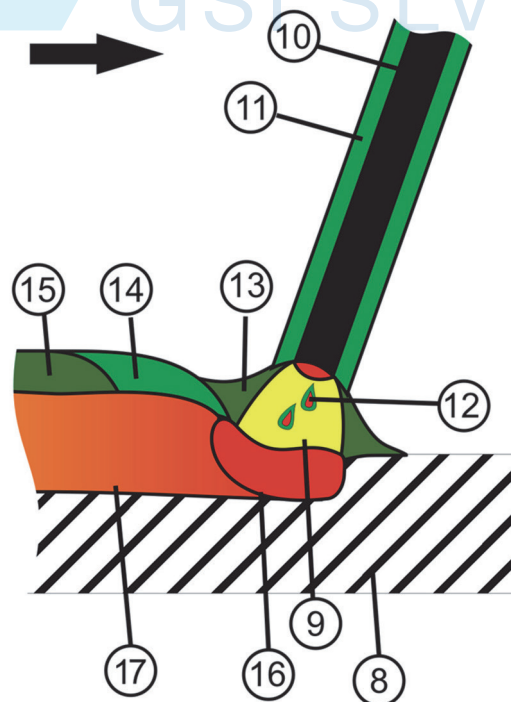


Abbildung 3: Detail Lichtbogen

2.1 Anwendungsbereiche

Das Lichtbogenhandschweißen erlaubt es, sowohl dünne Bleche $\geq 1,5$ mm in einer Einlagentechnik als auch dickere Bleche (meist bis 20 mm) in einer Mehrlagentechnik zu schweißen.

Gemessen am Gesamtzusatzwerkstoffverbrauch und der Tatsache, dass in den vergangenen Jahren das E-Hand-Schweißen kontinuierlich zugunsten des MIG/MAG-Schweißens abgenommen hat, beträgt der Anteil des Lichtbogenhandschweißens heute noch etwa 7,5%. Davon werden anteilig verwendet:

- 30 %** Handwerk, in Klein- und Mittelbetrieben
- 30 %** Schiffbau
- 20 %** Chemieanlagenbau, Fahrzeugbau und für Auftragschweißungen
- 10 %** Rohrleitungsbau
- 5 %** Stahlbau, meist auf Baustellen
- 5 %** Kessel- und Druckbehälterbau



Abbildung 4: Lichtbogenhand-Fallnahtschweißen im Freien

2.2 Vor- und Nachteile

Vorteile des Lichtbogenhandschweißens sind:

- Ein verhältnismäßig niedriger Anschaffungspreis der Gerätetechnik
- Eine hohe Fertigungssicherheit, ohne aufwendige Vorkehrungen (z.B. im Freien)
- Ausgezeichnete Gütewerte bei geringerer Fehlerwahrscheinlichkeit (Bindefehler, Poren)
- Vielseitige Anwendungsmöglichkeiten (großes Elektrodensortiment)
- Schweißen unter besonderen Bedingungen (z.B. Unterwasser-Schweißen und Schneiden)

Nachteile sind:

- Die verhältnismäßig niedrige Abschmelzleistung: 0,5 bis 5,5 kg/h, Mittelwert ca. 1,5 kg/h
- Dünnbleche $\leq 1,5$ mm sind nicht sicher und fehlerfrei schweißbar.
- Nahtqualität größtenteils von der Handfertigkeit des Schweißers abhängig

3 Schweißgerätetechnik

Wie aus dem Verfahrensprinzip ersichtlich ist, gehören

- **Schweißstromquellen**
- **Umhüllten Stabelektroden**
- **Zubehör** (Werkzeuge z.B. wie Schlackenhammer, Drahtbürste und die Arbeitsschutzbekleidung) zur Grundausrüstung beim Lichtbogenhandschweißen.

3.1 Schweißstromquellen

Schweißstromquellen wandeln die hohe Netzspannung in die niedrigere Schweißspannung, die geringe Netzstromstärke in die hohe benötigte Schweißstromstärke um. Die einfachsten Stromquellen hierfür sind **Schweißtransformatoren**, welche ausschließlich Wechselstrom liefern. Jedoch sind nicht alle Elektrodentypen zum Verschweißen mit Wechselstrom geeignet. Die Einstellung der Schweißstromstärke kann über einen Streukern mittels Kurbel (stufenlos) oder bei älteren Geräten durch Windungsanzapfungen erfolgen. Dieser Stufenschalter lässt jedoch keine feine Einstellung zu, daher sind diese Schweißtransformatoren für heutige Anforderungen nicht mehr geeignet.

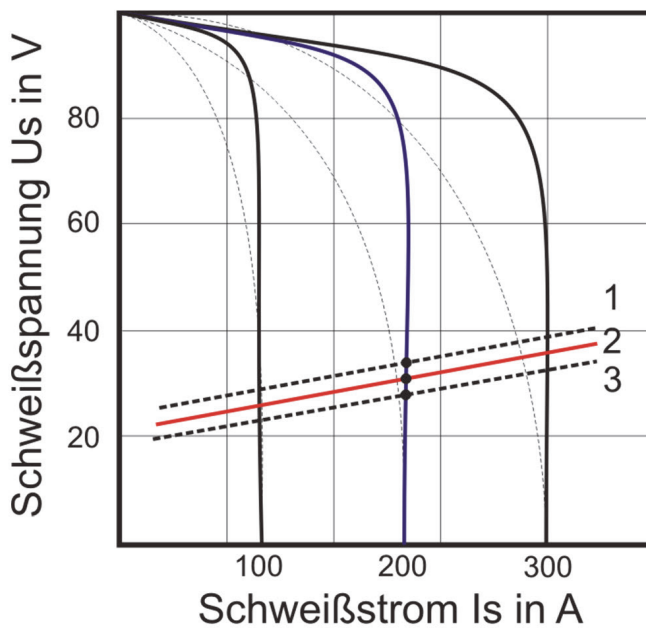
Schweißgleichrichter, Transformatoren mit einem nachgeschalteten Dioden- oder Thyristoren-Gleichrichter liefern Gleichstrom, aber die geringe Leerlaufspannung macht es manchmal unmöglich, bestimmte Elektrodenarten, z.B. Zellulose umhüllte Stabelektroden zu zünden.

Für den Rohrleitungsbau, wo bevorzugt Zellulose Elektroden verschweißt werden, haben sich **Schweißumformer** in Form eines **Schweißaggregates** durchgesetzt. Er besteht aus einem Antriebsmotor und dem Generator, der den Schweißstrom erzeugt. Die Vorteile des Schweißumformers sind sehr gute Schweißseigenschaften und bei der Ausführung als Schweißaggregat ist kein Netzanschluss erforderlich. Der Nachteil ist sein geringerer Wirkungsgrad gegenüber anderen Stromquellen.

Die geringe Masse, eine tragbare Ausführung und ein guter Wirkungsgrad führen aber immer mehr zu einem stärkeren Übergang zum **Schweißinverter** und dies in Verbindung mit technischen Vorteilen wie:

- Einstellbare statische Belastungskennlinien, steil fallend, mit Konstantstrom-Charakteristik
- Stromart: Gleichstrom (und/oder Wechselstrom bei Multiprozess-Anlagen: WIG / E)
- Polumschaltung +/-
- Netzspannungskompensation
- „Hot-Start“ Funktion: Schweißstromerhöhung im Zündvorgang
- „Anti-Stick“-Funktion: kurz vor dem Tropfenübergang im Kurzschluss wird der maximale Schweißstrom erreicht, daher wird ein Festkleben fast verhindert; für den Fall, dass die Stabelektrode festklebt, schaltet die Steuerung den Schweißstrom ab, dadurch kommt es nicht zum Glühen und der Schädigung der Stabelektrode sowie zu einer Überlastung des Schweißgerätes.
- „ArcForce“-Funktion: bei zu niedriger Schweißspannung (< 8 V) erhöht sich automatisch die Schweißstromstärke, der Lichtbogen „brennt sich frei“ und bleibt auch nahezu konstant. Sehr zu empfehlen bei großtropfigen Elektroden, welche mit sehr kurzem Lichtbogen verschweißt werden müssen (z.B. basische Elektroden). Erforderlich für alle zelluloseumhüllten Fallnahtelektroden.
- Puls-Funktion. (Ermöglicht Strichraupentechnik auch für Steignahtschweißungen bei hochfesten und CrNi-Werkstoffen mit geringer Streckenenergie.)
- Messgeräte, Programmbox u.a. Zusatzbaugruppen. Schweißinverter neuerer Generation bieten die Möglichkeit, häufig genutzte Schweißparameter auf Schnellwahltasten zu speichern. Kabellose und kabelgebundene Fernregler machen eine Feineinstellung der Stromstärke während des Schweißens möglich.

3.1.1 Kennlinie Lichtbogenhandschweißen



1
Lichtbogen
lang

2
Lichtbogen
richtig

3
Lichtbogen
kurz

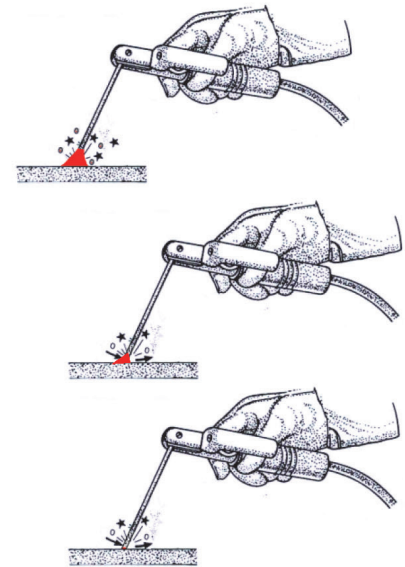


Abbildung 5: Statische Belastungskennlinien

3.1.2 Technologische Parameter

3.1.2.1 Elektrodenzündung und Schweißstrom

Der Lichtbogen wird bei allen Stabelektroden durch Kontakt mit dem Werkstück gezündet. Durch den Kurzschluss mit einer sehr hohen Stromdichte in dem sehr kleinen Kontaktbereich kommt es u.a. sehr schnell zu einer Ionisation und Bildung des Lichtbogens. Zündhilfen an den Elektroden spitzen und die Hot-Start Funktion erleichtern den Vorgang. Um ein Festkleben zu verhindern hat sich in der Praxis bewährt die Elektrode wie ein Streichholz auf dem Werkstück zu zünden.

In jedem Fall muss darauf geachtet werden das Zündstellen wieder überschweißt werden und nicht außerhalb des Schweißbereiches liegen.

Beim Lichtbogenhandschweißen werden rutil- und sauer-umhüllte Stabelektroden überwiegend mit negativ gepolter Elektrode verschweißt.

Die Ionisierung bei diesen Typen ist, bedingt durch die Zusammensetzung der Umhüllung, gut. Dadurch brennt der Lichtbogen ruhiger und konzentrierter auf dem Werkstück. Der Vorteil ist die reduzierte Temperatur an der Elektrode, die Strombelastung nimmt ab, sie neigt weniger zum Überlasten. Ein Verschweißen mit Wechselstrom ist meist auch möglich.

Basische und hochlegierte Stabelektroden werden überwiegend am Pluspol verschweißt.

Physikalische Eigenschaften der basischen Umhüllungsbestandteile im Lichtbogen bewirken bei positiv gepolter Elektrode einen stabileren Lichtbogen, einen tieferen Einbrand und einen geringen Legierungsabbrand.

Manche neue Geräte verfügen auch über eine Pulsfunktion bei der die Strombelastung an der Elektrode deutlich geringer wird. Gerade hochlegierte Elektroden überlasten dann nicht mehr so stark im letzten Drittel. Durch den erhöhten Pulsstrom kann mit ca. 10% niedrigerer Stromstärke geschweißt werden. Die Streckenenergie wird, bei gleichem Einbrand, etwa 20% - 30% verringert.

Typische Schweißdaten sind:

Schweißstrom (I_s): 40 bis ca. 360 A

Stromstärke je mm Kernstabdurchmesser 20 bis 60 A (abhängig von der Schweißposition und dem Elektrodentyp)

Gleichstrom (+/-Pol) oder Wechselstrom

Faustregel als Mittelwert:

$$I_s \text{ in [A]} \approx 40 \times \text{Kernstabdurchmesser in [mm]}$$

Tabelle 1: Stromstärken in Abhängigkeit des Kernstabdurchmessers

Kernstabdurchmesser d_E in mm	2	2,5	3,2	4	5	6
Stromstärke I_s in Ampere	30–80	50–100	90–150	120–200	180–270	220–360
Faustregel für die Stromstärke in Ampere	20 bis 40 x d_E		30 bis 50 x d_E			30 bis 60 x d_E

3.1.2.2 Lichtbogenlänge

Beim Lichtbogenhandschweißen wird nur die Stromstärke eingestellt. Die Spannung ergibt sich wie in ersichtlich bei brennendem Lichtbogen. Mittelwert: $20V + 0,05 \times I_s$ (Schweißstromstärke) Grundsätzlich sollte der Lichtbogen aber immer sehr kurz gehalten werden.

Faustregel für alle Elektroden:

$$\text{Lichtbogenlänge} = \max. 1,0 \times \text{Kernstabdurchmesser}$$

Ausnahme: Basische Elektroden und hochlegierte Elektroden:

$$\text{Lichtbogenlänge} = \max. 0,5 \times \text{Kernstabdurchmesser}$$

3.1.2.3 Schweißstrom nach der Dicke und dem Typ der Elektrodenumhüllung

Dabei ist eine Verminderung oder Erhöhung des Schweißstromes nach folgenden technologischen Bedingungen erforderlich (zu beachten dabei sind die Vorgabewerte (Stromstärkenbereich) des Elektrodenherstellers):

- dünn umhüllte Stabelektrode = weniger Strom
- mitteldick umhüllte Stabelektrode = normaler Strom
- dick und sehr dick umhüllte Stabelektrode = erhöhter Strom

3.1.2.4 Schweißstrom nach der Blechdicke/Rohrwanddicke t in [mm]

- geringe Dicke $t \sim 1,5 \dots 3 < 8$ mm $\Rightarrow$ weniger Strom
- mittlere Dicke $t \sim 8 \dots 10$ mm $\Rightarrow$ normaler Strom
- größere Dicke $t \geq 10$ mm $\Rightarrow$ erhöhter Strom

3.1.2.5 Schweißstrom nach der Schweißposition, Nahtausführung und dem Nahtaufbau

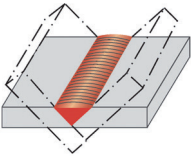
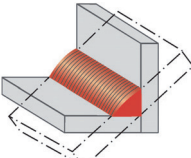
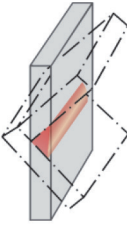
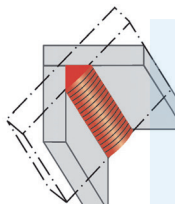
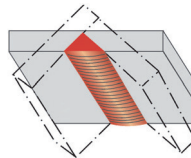
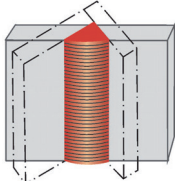
	PA (Wannenposition)	Kehlnaht	⇒ erhöhter Strom für Wurzel, Fülllagen und Decklagen.
		Stumpfnah	⇒ weniger bis normaler Strom für Wurzel, erhöhter Strom für Fülllagen und Decklagen.
	PB (Horizontalposition)	Kehlnaht	⇒ erhöhter Strom für Wurzel, normaler Strom für Füll- und Decklagen
	PC (Querposition)	Kehlnaht	⇒ erhöhter Strom für Wurzel, normaler Strom für Füll- und Decklagen
		Stumpfnah	⇒ weniger bis normaler Strom für Wurzel, erhöhter Strom für Fülllagen und Decklagen.
	PD (Halb-Überkopfposition)	Kehlnaht	⇒ erhöhter Strom für Wurzel, normaler Strom für Füll- und Decklagen
	PE (Überkopfposition)	Kehlnaht	⇒ erhöhter Strom für Wurzel, normaler Strom für Füll- und Decklagen
		Stumpfnah	⇒ weniger Strom für Wurzel, normaler Strom für Füll- und Decklagen
	PF (steigend)	Stumpf- und Kehlnaht	⇒ normaler Strom für Wurzel, Fülllagen und Decklagen.
	PG (fallend)	Stumpf- und Kehlnaht	⇒ normaler bis erhöhter Strom für Wurzel, Füll- und Decklagen.

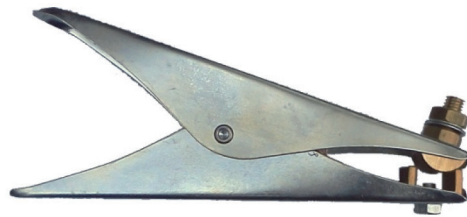
Abbildung 6: Schweißstrom nach der Schweißposition, Nahtausführung und dem Nahtaufbau

3.2 Schweißzubehör

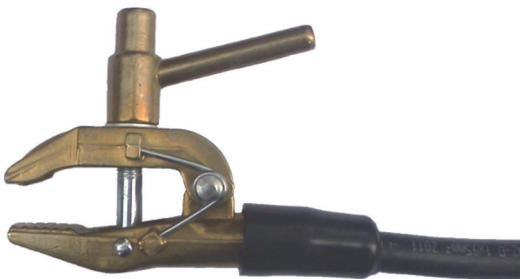
- Hierzu gehören: die Schweißleitungen, ein vollisolierter Elektrodenhalter, die Werkstückklemme¹, ein Schweißstisch mit Absaugung und Schutzwände



vollisolierter Elektrodenhalter



Werkstückklemme



Schraub-Werkstückklemme



Spannbock

Abbildung 7: Schweißzubehör

- vollisolierter Elektrodenhalter
- Werkstückklemmen

außerdem Werkzeuge wie:

- ein Schlackenhammer, eine Drahtbürste, eine Feile oder Schleifgeräte, eine Schweißnahtlehre, Temperaturmessmittel und ein Blecheimer zum Sammeln der Elektrodenstummel.

¹ Einen Magneten als Masseanschluss zu verwenden ist zwar praktisch, aber sehr bedenklich. Späne, Schleifstaub und Schlackereeste haften schon nach kurzem Gebrauch an. Hier kann es, durch den dadurch entstehenden schlechten Kontakt, zu einem „Überspringen“ mit kurzem Lichtbogen kommen. Die Folgen daraus sind Zündstellen oder ein Festbrennen des Masseanschlusses.

4 Normen und Einsatzbereiche der umhüllten Stabelektroden

Mit umhüllten Stabelektroden können sehr viele Werkstoffe verschweißt werden. Mit zunehmender Qualität der Werkstoffe steigen die Anforderungen an den Schweißer, nicht nur hinsichtlich seiner Handfertigkeit, auch sein fachkundiges Wissen wird hier besonders gefordert, um Fehler bei der Ausführung zu vermeiden.

Nachfolgend aufgeführt sind derzeit gültige Normen für Stabelektroden entsprechend der Einsatzbereiche:

DIN EN ISO 2560-A	• unlegierte Stähle und Feinkornstähle bis zu einer Mindeststreckgrenze von 500 MPa
DIN EN ISO 18275-A	• hochfeste Stähle über 500 MPa Streckgrenze
DIN EN ISO 3580-A	• warmfeste Stähle
DIN EN ISO 3581-A	• nicht rostende und hitzebeständige Stähle
DIN EN ISO 14172	• Nickel und Nickellegierungen
DIN EN 14700	• Schweißzusätze zum Hartauftragen
DIN EN ISO 1071	• Umhüllte Stabelektroden zum Schmelzschweißen von Gusseisen

5 Die umhüllten Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen

5.1 Herstellung

Umhüllte Stabelektroden bestehen aus dem **Kernstab** und einer mit Bindemittel (meist Wasserglas) gebundenen vorwiegend **mineralischen Umhüllung**.

Während bei un- und niedrig legierten Stabelektroden im Allgemeinen unlegierte, weiche Kernstäbe eingesetzt werden – die Zulegierung zur Festigkeits- und Zähigkeitssteigerung erfolgt über die Umhüllung – unterscheidet man bei hoch legierten Stabelektroden in kernstab- und hüllenlegierte Typen.

Die umhüllten Stabelektroden werden heute als **Pressmantelelektroden** (siehe auch Abbildung 8) hergestellt. Die entsprechend der jeweiligen Norm zusammengestellte Mischung (verschiedene mineralische und metallische Rohstoffe und Bindemittel) wird mit ca. 350 bis 500t Druck auf den Kernstab gepresst. Die noch feuchten Elektroden werden gebürstet (Einspann- und Zündende), gekennzeichnet (nach DIN/EN/ISO und/oder mit Firmenbezeichnung), und je nach Umhüllungstyp, nach dem „Abbinden“, bei ca. 180 (Zellulose) bis 480°C (basisch H5) in Öfen „getrocknet“ (gebrannt). Anschließend werden sie – je nach Güte und Typ – in Kartonschachteln mit PE-Folie, absolut dichte Metaldosen oder auch in Vakuumverpackungen verpackt.

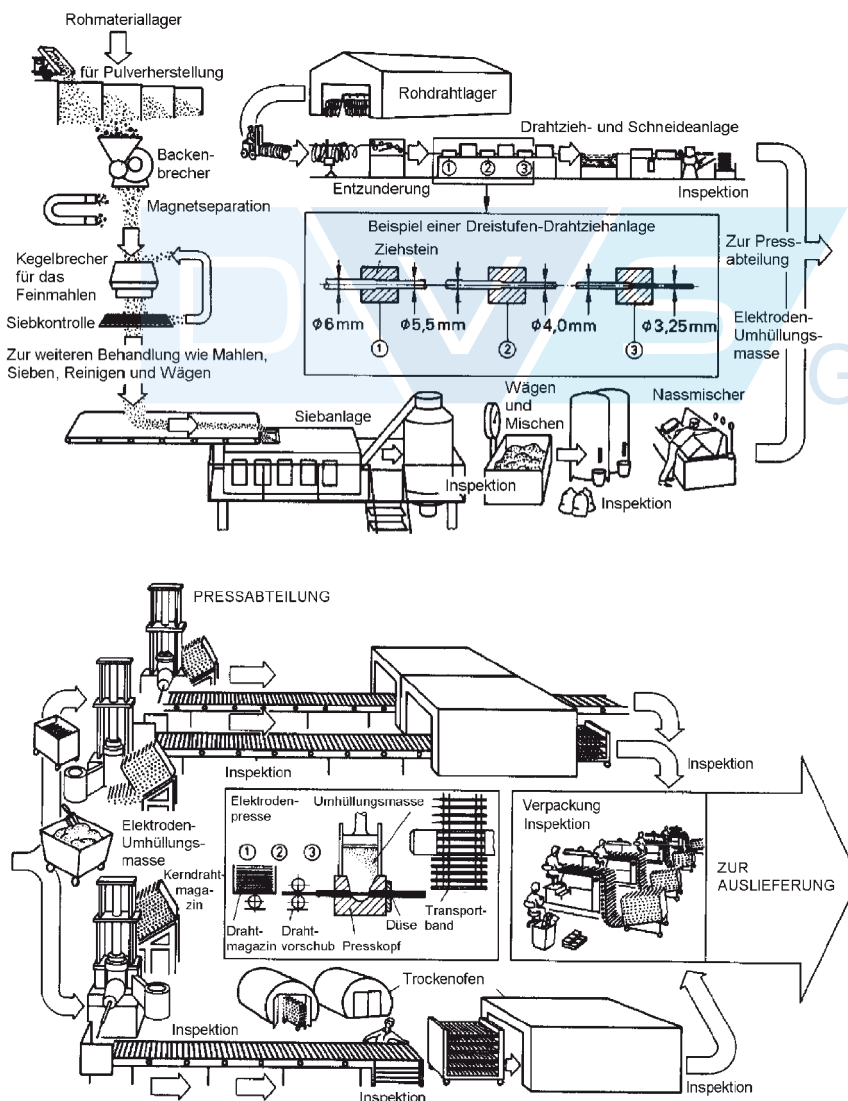


Abbildung 8: Stabelektrodenherstellung

5.2 Kernstäbe für Elektroden

Kernstäbe für unlegierte Stabelektroden enthalten relativ gleiche Zusammensetzungen, je nach Streckgrenze und Zugfestigkeit kann der Kohlenstoff- oder Mangangehalt etwas variieren:

C	0,06 bis max. 0,12%	Mn	0,3 bis max. 2,0%
P, S	≤ 0,030%	Si	0,06%

Hochlegierte Kernstäbe enthalten die für den Grundwerkstoff erforderliche Legierungszusammensetzung.

5.3 Zusammensetzung der Umhüllung, Umhüllungsstoffe

Die für Elektrodenumhüllungen verwendeten Stoffe sind sehr zahlreich. In der Hauptsache handelt es sich um Erze und Mineralien in Form von Oxyden, Hydroxyden, Karbonaten, Karbonylen, Silikaten, Chloriden, Fluoriden und anderen Verbindungen von Metallen und Nichtmetallen sowie um Ferrolegierungen, organische Stoffe und Verbindungen.

Sowohl die Schweiß Eigenschaften einer umhüllten Stabelektrode als auch die mechanischen Eigenschaften des Schweißgutes werden durch die Umhüllung entsprechend beeinflusst. Diese homogene Mischung enthält im Allgemeinen die folgenden Hauptbestandteile:

- **Schlackenbildende Stoffe** (Quarz, Flussspat)
- **Desoxidierende Stoffe** (Ferromangan, Ferrosilizium, Aluminium)
- **Schutzgasbildende Stoffe** (Zellulose, Kalkspat),
- **Lichtbogenstabilisierende Stoffe** (Kali-Feldspat, Rutil),
- **Bindemittel** (Kali- und Natron-Wasserglas) und, falls nötig,
- **Legierungsbestandteile** (Ferro-Chrom, Nb, Si, Nickelpulver usw.).

Zusätzlich kann Metallpulver hinzugefügt werden, um die Ausbringung zu erhöhen.

5.4 Typische Zusammensetzung der wichtigsten Umhüllungstypen

Tabelle 2: Typische Zusammensetzung der Hauptumhüllungstypen (Angaben in %)

Zellulosetyp „C“	Saurer Typ „A“	Rutiltyp „R“	Basischer Typ „B“
Zellulose 40	Magnetit Fe_3O_4 50	Rutil TiO_2 45	Flussspat CaF_2 45
Rutil TiO_2 20	Quarz SiO_2 20	Magnetit Fe_3O_4 10	Kalkspat CaCO_3 40
Quarz SiO_2 25	Kalkspat CaCO_3 10	Quarz SiO_2 20	Quarz SiO_2 10
FeMn 15	FeMn 20	Kalkspat CaCO_3 10	FeMn 5
Wasserglas	Wasserglas	FeMn 15	Wasserglas
		Wasserglas	
Tropfenübergang: mitteltropfig	Tropfenübergang: fein- tropfig - sprühregenartig	Tropfenübergang: mittel- bis feintropfig	Tropfenübergang: mittel- bis großtropfig
Zähigkeitswerte: gut	Zähigkeitswerte: normal	Zähigkeitswerte: gut	Zähigkeitswerte: sehr gut

5.5 Aufgaben der Stabelektrodenumhüllung

Die Aufgaben der Stabelektrodenumhüllung sind:

- Verbesserung der Zündeigenschaften, Ionisierung der Lichtbogenstrecke und Stabilisieren des Schweißlichtbogens
- Bildung eines Schutzgases zur Abschirmung des schädigenden Einflusses der Luft (N und O)
- Schlackenbildung zum Schutz der sich bildenden Schweißnaht (Oberseite und Wurzel), zur Verzögerung der Abkühlung sowie zur Formung der Naht
- Metallurgische Beeinflussung des Schweißgutes, d.h. Oxidation und Desoxidation sowie Abbinden schädlicher Begleitelemente (S, P) oder eine Auflegierung
- Erhöhung der Abschmelzleistung (Ausbringung) durch sog. „Hochleistungselektroden“ mit Zusätzen z.B. Metallpulver

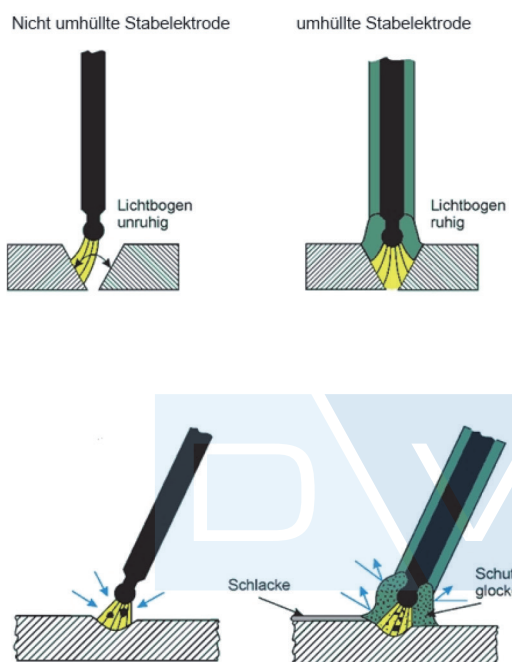


Abbildung 9: Aufgabe der Stabelektrodenumhüllung

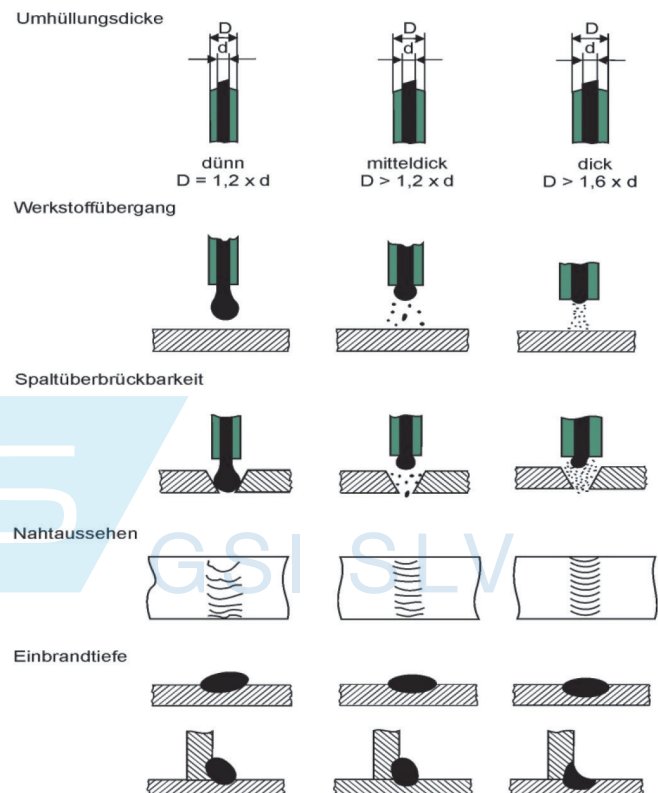


Abbildung 10: Einfluss der Umhüllungsstärke

Die Umhüllungsstärke und die Zusammensetzung der Umhüllung der Stabelektroden haben einen wesentlichen Einfluss auf:

- die Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften des Schweißgutes (mechanische Gütewerte)
- die Heißriss- und/oder Kaltrissbildung (Wasserstoffgehalt im Schweißgut)
- das Zünd- und Schweißverhalten der Stabelektrode und den Werkstoffübergang
- die Spaltüberbrückbarkeit, die Einbrandtiefe und das Nahtaussehen

5.6 Einteilung der umhüllten Stabelektroden

Die Einteilung der umhüllten Stabelektroden kann nach folgenden Gesichtspunkten erfolgen:

nach dem **Verwendungszweck**

Auftragschweißen,
Verbindungsschweißen,
Schneiden,
Unterwasser-Schneiden und -Schweißen

nach der **chemischen Zusammensetzung** des Schweißgutes

unlegierte und niedrig legierte,
hoch legierte Stabelektroden für hochfeste, warm-
feste,
hitzebeständige, korrosionsbeständige Stähle oder
NE-Metalle sowie Gusseisen

nach den
Eigenschaftentechnologischen

nach den mechanisch-technologischen Güte-
werten des Schweißgutes,
nach der Stromart, Polung,
Abschmelzleistung, Ausbringung, Schweißpo-
sitionen, Nahtform und Wasserstoffgehalt des
Schweißgutes.

nach der **Herstellungsart**

Pressmantel, Doppelpressmantel, (Tauchelektro-
den)

nach dem **Umhül-
lungstyp**

Sauer
Basisch
Rutil
Zellulose

umhüllt

A
B
R
C

5.7 Maße und Grenzabmaße von umhüllten Stabelektroden (DIN EN ISO 544 – Auszug)

Tabelle 3: Maße und Grenzabmaße

Umhüllte Stabelektroden ^{ab} Maße in Millimeter			
Durchmesser Kern- stab	Durchmessergrenzab- maß	Länge	Längengrenzabmaß
1,6	± 0,06	200 bis 350	± 6
2,0			
2,5			
3,2	± 0,10	275 ≤ l < 450 ^c	± 6
4,0			
5,0			
6,0			
8,0			

^a Andere Maße dürfen vereinbart werden. Für Zwischenmaße gelten die Grenzabmaße nach dieser Tabelle.

^b Maße für den Kernstab

^c Für besondere Fälle (z.B. Schwerkraftlichtbogenschweißen) Länge l < 1000 mm.

5.8 Kennzeichnung nach DIN EN ISO 544

5.8.1 Kennzeichnung auf dem Produkt

Umhüllte Stabelektroden müssen auf der Umhüllung nahe dem Einspannende oder auf dem Einspannende mit zumindest einer zurückverfolgbaren Handelsbezeichnung des Lieferanten oder der Stabelektroden einteilung dauerhaft gekennzeichnet sein.



Abbildung 11: Kennzeichnung auf dem Produkt

5.8.2 Kennzeichnung auf jeder kleinsten Verpackungseinheit

- Die Verpackung muss folgende Angaben enthalten: Name des Herstellers und Lieferanten
- Handelsbezeichnung
- Bezeichnung nach der entsprechenden internationalen Norm
- Abmessungen (Durchmesser und Länge)
- Chargen-/Schmelzen- oder Fertigungsnummer
- Stromart, empfohlene Strombereiche, Polarität
- Nenn-Nettogewicht oder Stückzahl
- Rücktrocknungsvorschriften oder Hinweis auf entsprechende Informationsquellen (z.B. bei basischen Elektroden)
- Gesundheitsschutz- und Sicherheitswarnhinweise sowie
- Zulassungen¹⁾ (falls zutreffend)
- Hier:

American Bureau of Shipping (**ABS**),
Bureau Veritas (**BV**),
Det Norske Veritas (**DNV**)
Germanischer Lloyd (**GL**),
und
Lloyd's Register (**LR**)

¹⁾ Gemäß den Landesbauordnungen bedürfen Bauprodukte für den Metallbau gemäß der Bauregelliste **B** Teil 1 eines Übereinstimmungsnachweises in Form eines **Übereinstimmungszertifikats** (CE-Kennzeichnung, „Conformité Européenne“) einer Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle.

Das Verzeichnis der „PÜZ“-Stellen nach den Landesbauordnungen wird vom DIBt herausgegeben.

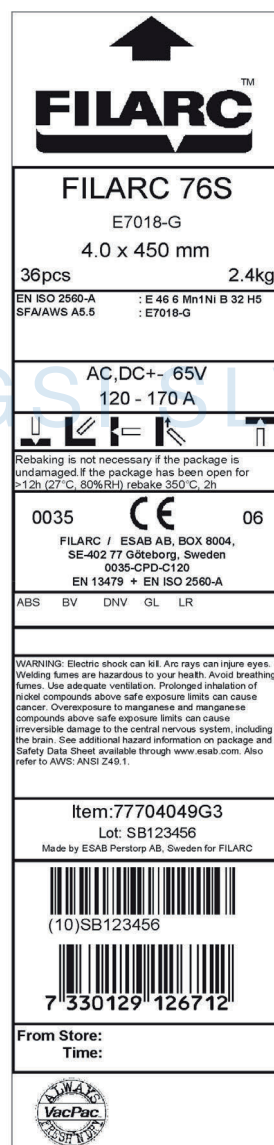


Abbildung 12: Beispiel einer Kennzeichnung auf der kleinsten Verpackungseinheit (Quelle: ESAB GmbH)

6 Empfehlungen zur Lagerung und Rücktrocknung von Stabelektroden

6.1 Lagerung (Auszug aus Merkblatt DVS 0957)

Grundsätzlich sollen umhüllte Stabelektroden bis zu ihrer Verwendung in der Originalverpackung gelagert werden. Die Entnahme der Elektrodenpakete aus dem Lager sollte möglichst in der Reihenfolge der Lagereingänge erfolgen.

Um die Stabelektroden vor feuchtigkeitsbedingten Schäden zu schützen, müssen sie in trockenen Räumen gelagert werden. Die Mindestvoraussetzungen, die an ein geeignetes Elektrodenlager gestellt werden, sind:

- Der Lagerraum muss witterungsgeschützt, belüftbar und ggf. beheizbar sein
- Decke, Boden und Wände müssen trocken sein
- Es dürfen sich keine offenen Wasserflächen im Raum befinden
- Der Raum ist mit Regalen oder Paletten ausgestattet.

Eine Lagerung der Elektrodenpakete direkt auf dem Boden und Kontakt mit Wänden soll vermieden werden, ebenso extreme Lagertemperaturen unter 0°C und über 30°C. Die Elektrodenpakete sollten auf Holzpaletten oder in Regalen mit einem Abstand zur Wand von ca. 30 cm gelagert werden. Unter den vorgenannten Bedingungen können konventionell verpackte Stabelektroden über einen längeren Zeitraum gelagert werden, wobei die maximale Lagerzeit von zwei Jahren nicht überschritten werden soll. Für Sonderverpackungen gelten keine speziellen Einschränkungen. **Verpackungen beim Umladen oder beim Ein- und Auslagern etc. niemals werfen.** Die Stapelhöhe der Umkartons und Schachteln sollte auf 6 bis max. 8 Einheiten begrenzt sein, bei Hochleistungselektroden max. 4 Einheiten.

6.2 Feuchtigkeitsaufnahme von Stabelektroden

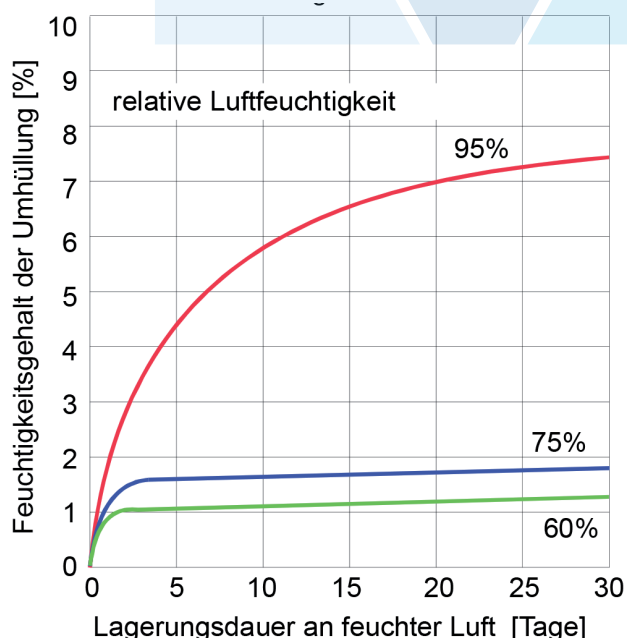
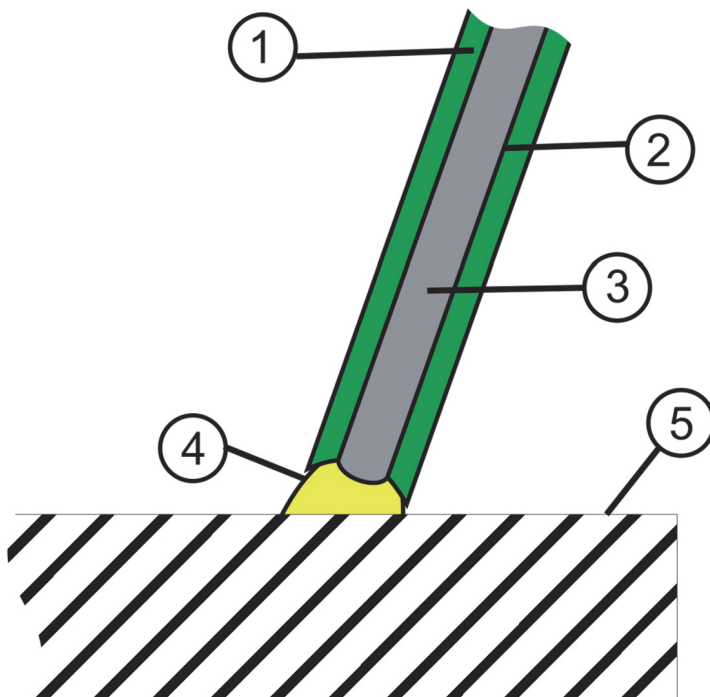


Abbildung 13: Feuchtigkeitsaufnahme basischer Elektroden bei Raumtemperatur und unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit

Hohe Luftfeuchtigkeit führt zu großer Feuchtigkeitsaufnahme.

Die Umhüllung von Stabelektroden ist – je nach dem Umhüllungstyp – mehr oder weniger hygroskopisch und enthält Wasser. In Abbildung 14 sind die Quellen für Wasserstoff, der beim Schweißen ins Schweißgut gelangen kann, dargestellt. Auch während der Lagerung (je nach Verpackung) und während der Ver-

arbeitszeit kann die Umhüllung Wasser aus der Luft aufnehmen.



- ① Umhüllung:
Oberflächen und Kapillarwasser, absorbiertes Wasser, Kristallwasser und kolloidal adsorbiertes Wasser, Konstitutionswasser.
- ② Kernstaboberfläche: Zieh fett
- ③ Kernstab
atomarer, molekularer, ionisierter und gebundener Wasserstoff
- ④ Lichtbogenoberfläche:
Umgebungs luft, Luftfeuchtigkeit
- ⑤ Grundwerkstoff:
Oberflächenverschmutzung wie Rost, Öl, Fett, Farbe
Atomarer, molekularer, ionisierter und gebundener Wasserstoff

Abbildung 14: Quellen für Wasserstoff im Schweißgut

Stabelektroden sollten grundsätzlich nur im trockenen Zustand verschweißt werden.

Zellulose umhüllte Stabelektroden bilden hier eine Ausnahme. Sie benötigen unbedingt eine **kontrollierte Restfeuchte**.

Es wird heute daher, in beiden Fällen, eine besondere Verpackungstechnik (Kunststoffe, Blechbüchsen, Vakuum usw.) angewendet.

6.3 Rücktrocknung

Für das Rücktrocknen der Stabelektroden gelten folgende Anhaltswerte:

- Niedriglegierte, basische Stabelektroden
250 – 350°C/ ca. 2,0 Std.
- Mittellegierte basische Stabelektroden für Feinkornbaustähle und warmfeste Stähle
300 - 350°C/ ca. 2 - 3 Std. Std.
- Hochlegierte Stabelektroden, **basisch und rutilumhüllt**
300 ± 25°C/ ca. 2,5 Std.
- Gusselektroden
120 – 200°C/ ca. 1 Std.

Ausgenommen hiervon sind Sonderverpackungen, z.B. vakuumverpackte Elektroden, welche nach Entnahme aus der Verpackung 10 bis 12 Stunden gebrauchsfertig sind. Danach müssen auch diese wieder entsprechend rückgetrocknet werden.

Die Anzahl der Trocknungsvorgänge, pro Elektrode beträgt etwa 3 Mal, oder die **Trocknungszeit** ist auf maximal 10 Stunden begrenzt.

Maßgeblich sind aber in allen Fällen die Herstellerangaben.

- Zur Vermeidung einer erneuten Feuchtigkeitsaufnahme müssen diese Elektroden, soweit vom Hersteller nicht anders vorgegeben, nach dem Trocknen bis zum Verschweißen wie folgt zwischengelagert werden: 100 bis 150°C bis ca. 8 Std. im mobilen Köcher
- 120 bis 200°C bis ca. 4 Wochen im ortsfesten Trockenschrank

6.4 Negative Auswirkungen einer erhöhten Feuchtigkeitsaufnahme bei Stabelektroden

Tabelle 4: Negative Auswirkungen einer erhöhten Feuchtigkeitsaufnahme bei umhüllten Stabelektroden.

Veränderungen an der Elektrode	Veränderungen der Schweißeigenschaften	Beeinträchtigung der Schweißnahtgüte
• Ausblühungen auf der Umhüllung • Aufblähen der Umhüllung • Anrosten des Kernstabes (bei unlegierten Elektroden)	• ungleichmäßiges Abschmelzen der Umhüllung • instabiler Lichtbogen • erhöhte Spritzerbildung • Verschlechterung der Schlackenlöslichkeit	• Bildung von Einbrandkerben • Änderung der Nahtausbildung • Veränderung der Schweißgutzusammensetzung • Porenbildung • Minderung der Bruchdehnung durch Wasserstoffversprödung • Kaltrissbildung

7 Spezifische Gefahren beim Lichtbogenhandschweißen

7.1 Elektrische Gefährdung

Der elektrische Strom ist Energieträger (Wärmequelle) für alle Verfahren der Lichtbogenschweißtechnik. Er bedeutet Gefahr für den Schweißer, da im Schweißstromkreis nicht alle spannungsführenden Teile gegen direktes Berühren geschützt sind. Ein elektrischer Stromfluss durch den menschlichen Körper kann in Abhängigkeit von Stromart, Stromstärke, Einwirkdauer und Stromweg zu lebensbedrohlichen Schädigungen führen.

Daher ist insbesondere beim Lichtbogenhandschweißen darauf zu achten, dass die Schweißzange immer isoliert abgelegt wird und sich keine Elektrode mehr darin befindet.

7.1.1 Gefahrenbereich Schweißgerät und Netzanschluss

Schweißgeräte, die in Bereichen erhöhter elektrischer Gefährdung eingesetzt werden sollen, benötigen die Kennzeichnung S. Ältere Geräte mit der Kennzeichnung K oder 42 V sind auch zulässig.

Beim Einsatz im Freien muss das Gerät zudem mindestens den Schutzgrad IP23 aufweisen.

7.1.2 Gefahrenbereich Schweißleitungen, Werkstückanschluss

Der Schweißstromkreis soll eine überschaubare Einheit bilden zwischen Schweißstromquelle, Schweißstromleitungen und Werkstück. Schweißleitungen müssen isoliert sein und sind vor Beschädigungen zu schützen. Die Werkstückleitung muss fest, mit großflächigem Kontakt und unmittelbar bei der Schweißstelle an das zu schweißende Bauteil angeschlossen werden. Andernfalls entstehen vagabundierende Ströme, die zum Zerstören des Schutzleiters, zu Schmorstellen im Bereich von Zahnrädern, Wellenlagern, Aufhängungen usw. führen, oder Auswirkungen auf die eingestellten Schweißparameter haben.

7.2 Gefahrenbereich Lichtbogen

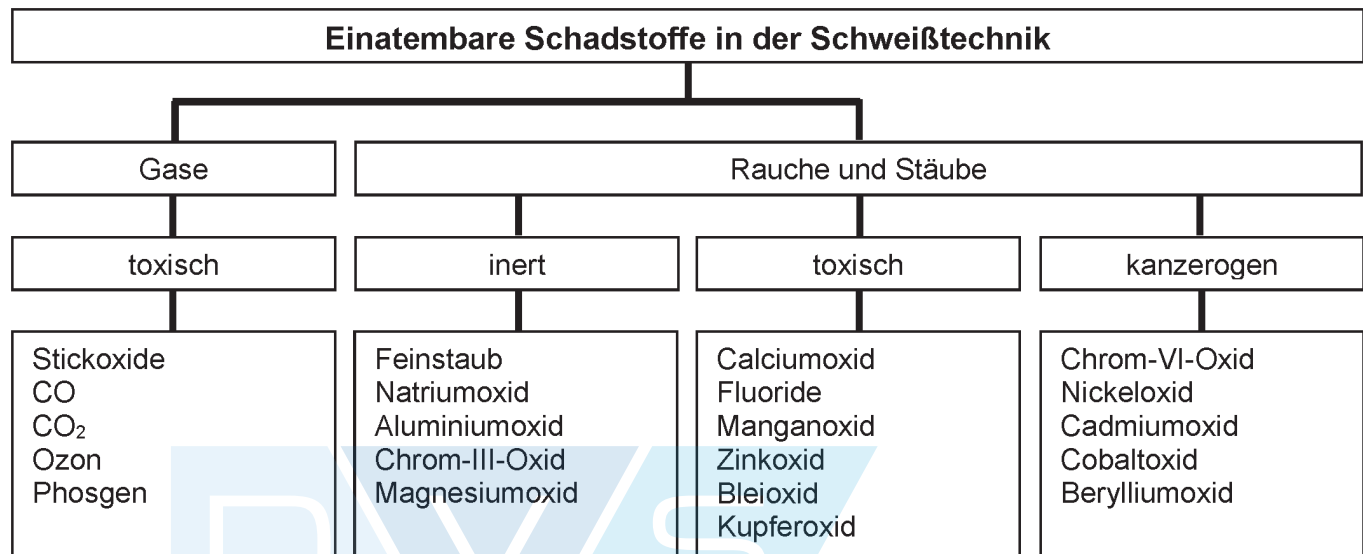
Vom Lichtbogen gehen UV-Strahlen aus, vor denen sich der Schweißer durch Schutzkleidung und Augenschutz abschirmen muss. Innerhalb von 30 Sekunden wird ein für die ungeschützte Haut kritischer Wert überschritten. Entsprechende Schutzfilter (9 bis 15) schützen die Augen. Nicht zu übersehen ist dabei die Streustrahlung von reflektierenden Flächen (z.B. Scheiben, polierten Metallflächen, etc.). Der Schweißbereich ist immer so abzuschirmen, dass eine Gefährdung von Dritten auszuschließen ist.

7.3 Gefahrenbereich Schmelzbad und Schlacke

Eine den Arbeitsbedingungen angepasste, geschlossene und feuerhemmende Arbeitskleidung schützt gegen die beim Schweißen auftretenden Metall- und Schlackespritzer. Schlacke darf nur unter Verwendung eines Schutzschirmes, eines Schutzschildes oder einer Schutzbrille abgeklopft werden, andernfalls drohen Augenverletzungen durch Schlackesplitter.

7.4 Schweißrauche und Stäube

Beim Schweißen bilden sich gas- und partikelförmige Schadstoffe mit einer Partikelgröße meist unter 1 µm. Schweißrauche sind daher alveolengängig. Sie müssen in Werkstätten im Entstehungsbereich abgesaugt werden. Nicht entfernte Farben, Beschichtungen im Schweißbereich können beim Verdampfen im Lichtbogen weitere giftige Gase abgeben, z.B. Zinkoxid. Erkrankungen durch eine Vergiftung sind die Folge. Gerade beim Lichtbogenhandschweißen wird hier oft nicht mit nötiger Sorgfalt vorbereitet. Besonders hervorzuheben sind die krebserregenden Schweißrauche von basischen CrNi-Elektroden. Die Anteile an Chrom-VI-Verbindungen und Nickeloxiden sind sehr hoch. Rutile CrNi-Elektroden weisen hier zwar eine wesentlich geringere Belastung auf, jedoch ist hier in beiden Fällen eine sehr gute Absaugung dringend gefordert (siehe auch BGI 616).



7.5 Persönliche Schutzausrüstung

Zur persönlichen Schutzausrüstung gehören:

- Schweißer-Schutzhelm oder Maske mit entsprechender Augenschutzstufe
- Geschlossener, trockener Schutzanzug,
- Trockene Lederhandschuhe,
- Schutzbrille
- Gehörschutz (es empfiehlt sich diesen auch während des Schweißens zu tragen, da Metallspritzer u.a. in Zwangspositionen den Gehörgang verletzen können). Pflicht ab 85 dB(A), was beim Ausschleifen der Schweißnähte schon überschritten wird.
- In engen Räumen, beim Schweißen von Gas- und Fernwärmeleitungen ist ein zugelassener schwer entflammbarer Schweißer-Schutzanzug zu tragen; hier empfiehlt sich lederne Schutzkleidung.
- Hohe geschlossene Sicherheitsschuhe mit Gamaschen verhindern schwere Verbrennungen im Fußbereich durch Metall- und Schlacketropfen

Auf keinen Fall synthetische Arbeitsanzüge, Montagehandschuhe mit Stoffeinlagen etc. verwenden.

8 Kennzeichnung von Stabelektroden nach internationalen Normen

Um die Übersichtlichkeit bei den Bezeichnungen der Zusatzwerkstoffe zu vereinfachen, wurde ein einheitliches, werkstoffbezogenes Bezeichnungssystem eingeführt.

Die Normen enthalten entweder eine Einteilung zur Bezeichnung mithilfe der Festigkeit, Bruchdehnung, und Kerbschlagarbeit des reinen Schweißgutes oder der chemischen Zusammensetzung, z.B. bei hochlegierten Zusatzwerkstoffen.

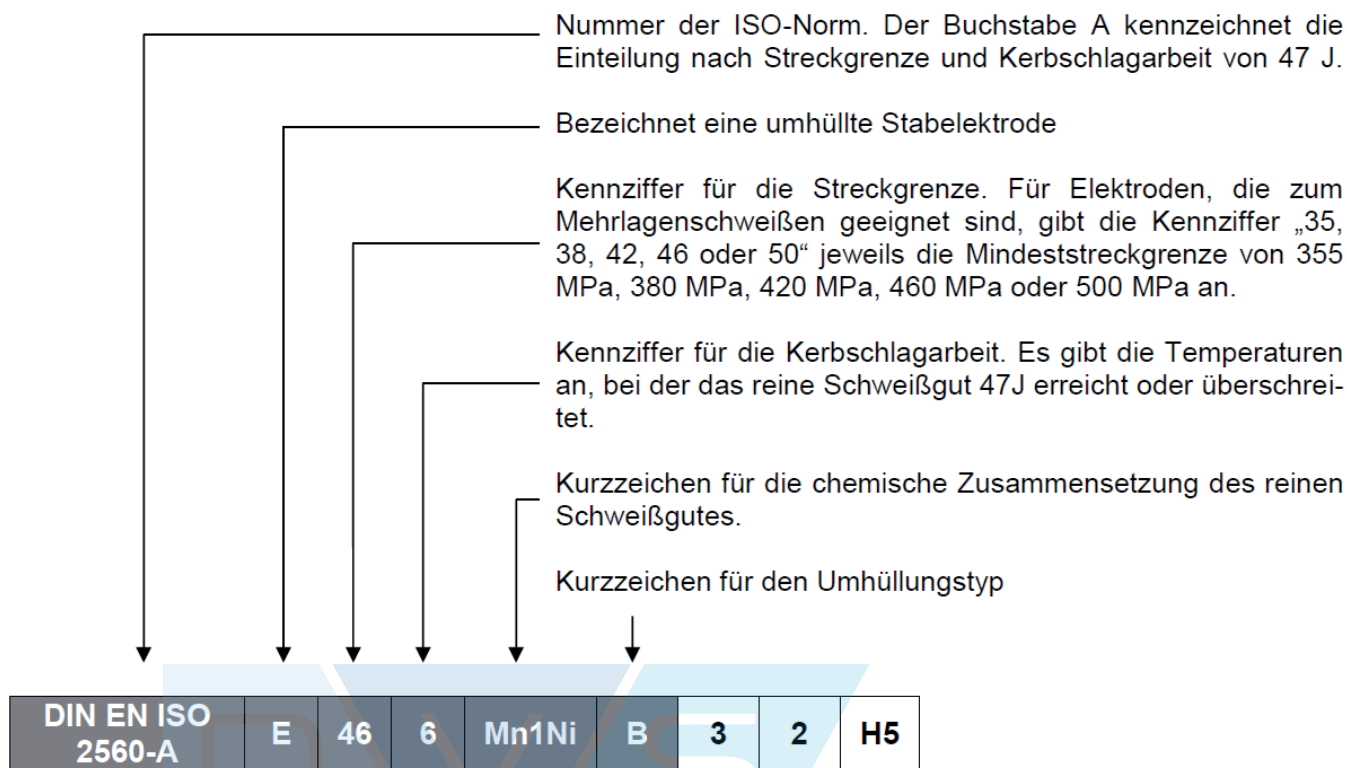
Das Verhältnis von Streckgrenze zur Zugfestigkeit des Schweißgutes ist im Allgemeinen höher als das für den Grundwerkstoff. Anwender sollten daher beachten, dass ein Schweißgut, welches die Mindeststreckgrenze des Grundwerkstoffes erreicht, nicht unbedingt dessen Mindestzugfestigkeit erreicht. Wenn bei der Anwendung eine bestimmte Mindestzugfestigkeit gefordert wird, muss daher bei der Auswahl des Schweißzusatzes die Zugfestigkeit entsprechend berücksichtigt werden.

8.1 Die Einteilung erfolgt nach acht Merkmalen am Beispiel DIN EN ISO 2560-A

- 1) Kurzzeichen für das **Produkt/den Schweißprozess**;
- 2) Kennziffer für die **Festigkeitseigenschaften** und die **Bruchdehnung** des Schweißgutes;
- 3) Kennzeichen für die **Kerbschlagarbeit** des Schweißgutes;
- 4) Kurzzeichen für die **chemische Zusammensetzung** des Schweißgutes;
- 5) Kurzzeichen für den **Umhüllungstyp**;
- 6) Kennziffer für das **Ausbringen** und die **Stromart**;
- 7) Kennziffer für die **Schweißposition**;
- 8) Kennzeichen für den **Wasserstoffgehalt** des **Schweißgutes**.

8.2 Bezeichnungsbeispiel

Verbindliche Bezeichnungsmerkmale der Einteilung



Nicht verbindliche Bezeichnungsmerkmale

Kennziffer für die Ausbringung und Stromart

Kennziffer für die Schweißposition

Kennzeichen für den diffizilen Wasserstoffgehalt in ml/100 g. H5, H10, H15 gibt jeweils den Höchstgehalt an diffusiblen Wasserstoffgehalt von 5 ml/100 g, 10 ml/100 g, 15 ml/100 g deponierten Schweißgutes an.

9 Auswahlkriterien von Stabelektroden für das Lichtbogenhandschweißen

Die Auswahl von Stabelektroden erfolgt nach werkstoff- und schweißtechnischen Gesichtspunkten. Dabei wird zuerst ein Vergleich der mechanischen Gütewerte des Schweißzusatzes mit den Gütewerten des Grundwerkstoffes vorgenommen, wobei die Mindestanforderungen des Grundwerkstoffes auch im reinen Schweißgut erreicht werden müssen.

Die Auswahl erfolgt daher nach folgenden Kriterien:

1. dem zu **verschweißenden Grundwerkstoff**

- Unlegierte Stähle und Feinkornstähle
- Höherfeste Stähle
- Warmfeste Stähle
- Nicht rostende und hitzebeständige Stähle
- Nickel und Nickellegierungen
- Gusseisenwerkstoffe

weiter unterteilt nach:

- der chemischen Zusammensetzung
- den metallurgischen und physikalischen Eigenschaften

2. der **Beanspruchung des Bauteils**, geordnet nach:

- Konstruktiver Gestaltung des Bauteils
- Ruhende oder schwingende Beanspruchung
- Beanspruchungszustand (Größe der Belastung)

3. der **Schweißaufgabe**, geordnet nach:

- Schweißbedingungen,
- Schweißposition,
- Schweißstromquelle,
- Umhüllungstyp

4. der **Wirtschaftlichkeit**, geordnet nach:

- Abschmelzleistung,
- Ausbringen,
- Streckenenergie

Die Auswahl der umhüllten Stabelektroden erfolgt meist nach den Katalogen für Schweißzusätze der Herstellerfirmen (auch „Schweißweiser“ genannt).

Es sollte beachtet werden, dass die für die Einteilung der Stabelektroden benutzten mechanischen Eigenschaften des reinen Schweißgutes von denen abweichen können, die an Fertigungsschweißungen erreicht werden. Dies ist bedingt durch Unterschiede bei der Durchführung des Schweißens, wie z B. Stabelektroden Durchmesser, Pendelzug, Schweißposition und Werkstoffzusammensetzung. Daher ist in besonderen Fällen eine Arbeitsprobe zu empfehlen.

10 Stabelektroden für unlegierte und Feinkornstähle, DIN EN ISO 2560-A

10.1 Anwendungsbereich DIN EN ISO 2560-A

Diese internationale Norm legt Anforderungen zur Einteilung umhüllter Stabelektroden des Schweißgutes im Schweißzustand nach einer Wärmenachbehandlung für das Lichtbogenhandschweißen von unlegierten Stählen und von Feinkornstählen mit einer Mindeststreckgrenze bis zu 500 MPa oder mit einer Mindestzugfestigkeit bis zu 570 MPa fest.

Nach DIN EN ISO 2560-A gibt es eine große Auswahl an Stabelektroden mit sehr unterschiedlich zusammengesetzten Umhüllungen. Dabei wird nach Grund- und Mischtypen unterschieden. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Umhüllungstypen:

Tabelle 5: Umhüllungstypen nach DIN EN ISO 2560-A

Typ	Umhüllung
A	Sauer
C	Zellulose
R	Rutil
RA	Rutil-sauer
RB	Rutil-basisch
RC	Rutil-zellulose
RR	Dick rutil
B	Basisch

Bei höher- und hochlegierten Elektroden kommt diese Vielzahl nicht vor.

So gibt es Stabelektroden für hochfeste Stähle nach DIN EN ISO 18275 nur mit basischer Umhüllung, Elektroden für warmfeste Stähle nach DIN EN ISO 3580 und Elektroden für rostfreie / hitzebeständige Stähle nach DIN EN ISO 3581 nur mit rutiler oder basischer Umhüllung.

10.2 Sauer umhüllte Stabelektroden: A

Zusammensetzung

Die Umhüllung dieses Typs wird durch große Anteile von Schwermetalloxyden (Fe_3O_2 ; Fe_2O_3 , SiO_2) gekennzeichnet und – infolge des hohen Sauerstoffpotentials – durch desoxidierende Stoffe (Ferromangan).

Eigenschaften

Die entstehende Verbrennungswärme macht diese Elektroden zum „heißgehenden“ Stabelektrodentyp. Sie sind wesentlich empfindlicher für das Entstehen von Erstarrungsrissen als Stabelektroden anderer Umhüllungstypen. Die mechanischen Gütewerte des Schweißgutes sind niedrig.

Sauerumhüllte Stabelektroden sind nur begrenzt für das Schweißen in Zwangsposition geeignet.

Bedingt durch den hohen Sauerstoffgehalt der Umhüllungsbestandteile (Magnetit Fe_3O_4), kommt es beim Schweißen zu einem hohen Abbrand an Legierungselementen (vor allem Mangan).

Anwendungen:

Rein sauer umhüllte Stabelektroden werden heute nicht mehr eingesetzt.

Positiv zu erwähnen wäre die glatte Nahtzeichnung und die gute Schlackenentfernbarkeit.

10.3 Zellulose umhüllte Stabelektroden: C

Zusammensetzung

Stabelektroden dieses Typs enthalten einen hohen Anteil brennbarer, organischer Substanzen in der Umhüllung, insbesondere Zellulose. Eine definierte Restfeuchtigkeit ist für den intensiven Lichtbogen notwendig.

Eigenschaften

Durch den großen Anteil an organischen Substanzen, damit geringem Schlackeanteil und dem starken Lichtbogen, eignen sich diese Elektroden besonders zum Fallnahtschweißen. Es wird eine große Schweißgeschwindigkeit bei hoher Abschmelzleistung erreicht. Die Rauchentwicklung ist groß, stört aber im Freien kaum. Es werden röntgensichere Rohr-Rundnähte bei guten bis sehr guten Gütewerten des Schweißgutes erzielt. Die Schweißnähte haben ein grobschuppiges Nahtaussehen.

Anwendungen:

Erdverlegter Rohrleitungsbau und Pipelinebau sind die hauptsächlichen Anwendungsbereiche von Zellulose-Elektroden. Bei Rohrleitungen $\geq$ DN 100 wird ein Zeitersparnis von bis zu 60% gegenüber Steignähten erreicht. Bereits bei der Wurzelschweißung können größere Elektrodendurchmesser ($\varnothing$ 3,2 bis 8 mm Wanddicke / $\varnothing$ 4,0 ab 8 mm Wanddicke) und höhere Stromstärken verwendet werden. Dadurch wird eine höhere Schweißgeschwindigkeit und somit auch eine höhere Wirtschaftlichkeit erreicht.

Verschweißbar sind Zellulose-Elektroden mit Gleichstrom: Wurzel am -Pol
Hotpass, Füll- und Decklagen werden am +Pol verschweißt.

Eine Typenauswahl:

DIN EN ISO 2560-A	E 42 2 C 25
	E 46 3 C 25
	E 50 3 1Ni C 25

Anmerkungen:

Fallnähte müssen in Mehrlagentechnik „in einer Wärme“ verschweißt werden. Der Hotpass muss maximal 10 Minuten nach Beendigung der Wurzelschweißung geschweißt werden, um Risse in der Schweißnaht zu vermeiden. Die Zwischenlagentemperatur sollte 80°C, bei höherfesten Rohren 150°C nicht unterschreiten. Weitere spezielle Arbeitstechniken und Schweißgeräte mit besonderen Eigenschaften sind in Abschnitt 19 Fallnahtschweißen beschrieben

10.4 Basisch umhüllte Stabelektroden: B

Zusammensetzung

Charakteristisch für die dicke Umhüllung dieser Stabelektroden ist der große Anteil von etwa 80 % Calciumcarbonat ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) und Flussspat (Calciumfluorid $\text{CaF}_2 \rightarrow$ Basenbildner). Daher wurden basische Typen meist als „kalkbasierte Elektrode“ (Kb-Elektroden) bezeichnet. Heute spricht man ausschließlich von **basischen** Elektroden. Ein Teil der toxisch bedenklichen Carbonate wurde durch andere Fluoride ersetzt. Daher wird Kryolith nicht mehr verwendet. Auch wurde der Umhüllung mehr Eisenpulver zugesetzt um den Lichtbogen heißer zu machen, was einen tieferen, sicheren Einbrand bewirkt. Diese Elektroden haben einen ruhigeren Lichtbogen, ein gleichmäßigeres Nahtbild und lassen sich auch bei niedrigeren Stromstärken noch sicher beherrschen. Die Schlackenablösung ist gegenüber der „Kb“-Elektrode etwas leichter.

Im Lichtbogen ist wenig Sauerstoff vorhanden. Der Abbrand von Legierungselementen ist daher gering.

Eigenschaften

Basisch umhüllte Stabelektroden haben zwei herausragende Eigenschaften:

- Hohe Kerbschlagarbeit des Schweißgutes, besonders bei tiefen Temperaturen;
- Hohe Rissicherheit, besser als bei anderen Typen (dabei senkt der hohe metallurgische Reinheitsgrad des Schweißgutes die Heißrissgefahr und ein geringerer Wasserstoffgehalt die Kaltrissempfindlichkeit).

Dies setzt trockene Stabelektroden voraus. Der Wasserstoffgehalt sollte die Obergrenze von 15 ml/100 g Schweißgut nicht überschreiten. Basische Elektroden sind hygroskopisch, Trockenvorschriften sind unbedingt zu beachten.

Basisch umhüllte Stabelektroden sind für das Schweißen in allen Positionen, ausgenommen Fallposition, geeignet.

Anwendungen:

Das sehr dehnfähige, kaltzähe Schweißgut eignet sich:

- Bei niedriger Streckgrenze für schrumpf-behinderte Bauteile
- Bei höherfesten Stählen als weiches Schweißgut für starre Konstruktionen
- Für große Nahtquerschnitte
- Bei großen Bauteildicken (>20 mm)
- Zum Verschweißen von durch P, S und N_2 verunreinigten Stählen (FU), diese Stahlbegleitelemente werden abgebunden und in die Schlacke überführt
- Bei C-Gehalten über 0,22% (u.a. auch Stahlguss und Schienenschweißungen)

Trocknung:

Rücktrocknen etwa 2 Stunden bei 250 bis 350°C, danach im Trockenofen bei 150°C, anschließend im Köcher bis zum Schweißen bei 100 bis 150°C warm halten. Maßgeblich ist aber in jedem Fall die Herstellerangabe.

Nachteile

- Schlechte Schlackenentfernbarkeit, raue Nahtoberfläche
- Schwierigere Handhabung, z.B. schlechte Zünd- und Wiederzündeeigenschaften
- Feuchtigkeitsaufnahme (hygroskopisch)

Eine Typenauswahl:

DIN EN ISO 2560-A

E 38 2 B 22 H 10

E 46 8 3Ni B 73 H5

E 42 5 B 32 H5

E 50 4 2Ni B 42 H5

E 46 4 B 42 H 10



10.5 Rutilumhüllte Stabelektroden: R, RR, RC, RA, RB

Zusammensetzung

Hauptbestandteil der Umhüllungen ist Rutil (TiO_2); es wirkt im Lichtbogen weniger oxidierend, die Lichtbogenatmosphäre ist neutral, der Legierungsabbrand ist gering.

Die mechanischen Gütewerte des Schweißgutes von Rutil-Elektroden sind besonders bei Stählen mit höherem Mn-Gehalt (S355) zu beachten.

Bei der Auswahl dieser Stabelektroden sollten deshalb die Kennblätter der Schweißzusätze (von der Prüfstelle des Elektrodenherstellers) genutzt werden.

Eigenschaften

Rutil-Typen sind die in der Praxis am häufigsten verwendeten Elektroden, da Forderungen für sehr viele Anwendungsbereiche erfüllt werden können.

Vorteile Rutilumhüllter Stabelektroden

- Leichte Handhabung
- Gute Zünd- und Wiederzündeeigenschaften
- Feinschuppiges Nahtbild
- Leichte Schlackenentfernbarkeit
- Gleich- und Wechselstrom verschweißbar

Nachteile

- Nicht einsetzbar bei Stählen mit $C > 0,2\%$
- Höhere Wasserstoffgehalte (ca. 20 ml/100 g Schweißgut)
- Rissgefahr bei Bauteildicken über 25 mm
- Niedrige Kerbschlagzähigkeit bei Minustemperaturen (im Vergleich zu basischen Elektroden)

Rutilumhüllte Stabelektroden werden vorwiegend mit Gleichstrom am -Pol oder mit Wechselstrom verschweißt.

Rutilumhüllte Stabelektroden: R

Stabelektroden dieses Typs haben einen grobtropfigeren Werkstoffübergang als die dick rutilumhüllten. Sie besitzen eine gute Spaltüberbrückbarkeit und sind für das Schweißen von dünnen Blechen geeignet. Negativ ist jedoch die starke Endkraterbildung. Geeignet für alle Schweißpositionen, ausgenommen Fallposition. Beispiel: DIN EN ISO 2560-A E 42 0 R 12

Dick Rutil umhüllte Stabelektroden: RR

Bei Stabelektroden dieses Typs ist das Verhältnis von Umhüllungs- zu Kernstabdurchmesser $\geq 1,6$. Charakteristisch sind der hohe Rutilgehalt der Umhüllung, das gute Zünden, ein feintropfiger Werkstoffübergang und die feinschuppigen, gleichmäßigen Nähte.

Beispiel: DIN EN ISO 2560-A E 42 0 RR 12

Rutilzellulose-umhüllte Stabelektroden: RC

Die Zusammensetzung der Umhüllung dieser Stabelektroden ist ähnlich der der rutilumhüllten Stabelektroden, sie enthält jedoch größere Zellulose-Anteile. Das Schweißgut ist zähflüssig mit einem geringeren Schlackeanteil, daher können Stabelektroden dieses Typs auch für das Schweißen in Fallposition verwendet werden. Allround-Elektrode für den schlosserischen Bereich.

Für Wurzelschweißungen bei Stumpf- und Kehlnähten im Metall- und Rohrleitungsbau nicht zugelassen. Verwendung: z.B. Kellergeschweißte Stahltanks.

Beispiel: DIN EN ISO 2560-A E 38 0 RC 11

Rutilsauer-umhüllte Stabelektroden: RA

Das Schweißverhalten von Stabelektroden dieses Mischtyps ist mit sauerumhüllten Stabelektroden vergleichbar. In der Umhüllung dieser Stabelektroden sind jedoch wesentliche Anteile an Eisenoxid durch Rutil ersetzt. Daher können diese meist dick umhüllten Stabelektroden für das Schweißen in allen Positionen, ausgenommen Fallposition, eingesetzt werden.

Diese Stabelektroden haben eine hohe Abschmelzleistung, Strombelastbarkeit und eine leicht entfernbare poröse Schlacke. Rutilsauer-umhüllte Elektroden finden heute kaum noch Verwendung.

Besonders geeignet sind sie für Dichtnähte in spitzen Winkeln. Sie bilden konkave glatte Nähte, der Wurzelpunkt bei Kehlnähten wird sicher erfasst. Durch den niedrigen Si-Gehalt sind sie sehr gut für anschließendes Verzinken, Emaillieren und Gummieren geeignet.

Der Abbrand von Legierungselementen ist, wie bei rein sauren Elektroden, relativ hoch.

Rutilbasisch-umhüllte Stabelektroden: RB

Charakteristisch für die Umhüllung dieses Typs sind die hohen Anteile an Rutil, zusammen mit angehobenen basischen Anteilen, ein mitteltropfiger Werkstoffübergang und eine dünne fließfähige Schlacke. Diese meist dick umhüllten Stabelektroden besitzen, neben guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften des Schweißgutes, gute Schweißeigenschaften in allen Schweißpositionen, außer Fallposition.

Sehr häufige Anwendung finden sie als Steignahtelektrode im Rohrleitungs- und Stahlbau, bei Zwangslagenschweißungen und Wurzelschweißungen.

Beispiel: DIN EN ISO 2560-A E 38 2 RB 12

10.6 Mehrausbringungselektroden, „Hochleistungselektroden“

Zusammensetzung

Diese Stabelektroden enthalten in der Umhüllung zusätzlich Metallpulver bis gut zum doppelten dessen, was als Schweißgut durch den Kernstab eingebracht wird.

Eigenschaften (siehe auch Abschnitt 17.4)

Das Verschweißen erfolgt für

RR- und RA-Typen mit Gleichstrom am –Pol oder Wechselstrom

RB-Typen bevorzugt Gleichstrom +Pol, möglich auch Gleichstrom –Pol oder Wechselstrom

B-Typen Gleichstrom am +Pol.

Die einzustellende Stromstärke ist, im Vergleich zu Elektroden mit niedrigerer Ausbringung (105%) deutlich höher. Die Brenndauer verkürzt sich. Die Ausziehlänge erhöht sich nur unwesentlich.

Hochleistungselektroden mit einer Ausbringung von bis zu 160% können in den Positionen PA und PB verschweißt werden.

Bei einer Ausbringung von 160% bis ca. 220% sind diese Elektroden, wegen des sehr flüssigen Schweißgutes, nur noch in der Position PA verschweißbar.

Erreichbares a-Maß: Kernstabdurchmesser + 0,5 mm

Anwendung

Eine bevorzugte Anwendung sind längere durchlaufende Kehlnähte (z.B. Baggerbau, Schiffbau).

Eine Typenauswahl:

DIN EN ISO 2560-A

E 42 2 RA 73

E 42 0 RR 73

E 42 2 RB 53

E 42 4 B 73 H 5

10.7 Anwendungsbeispiele für Stabelektroden der DIN EN ISO 2560-A

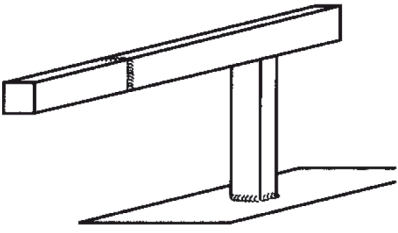
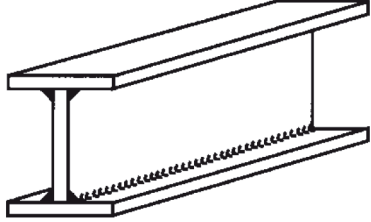
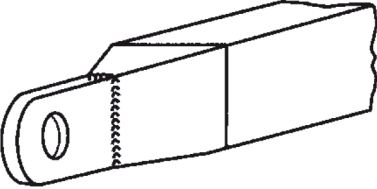
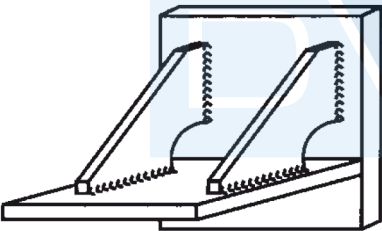
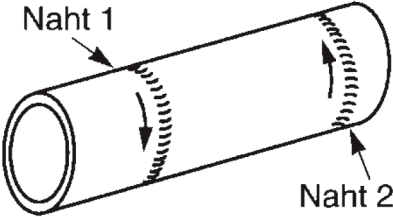
	Stumpf- und Kehlnähte an dünnwandigen Profilen Werkstoff: S235JR DIN EN ISO 2560-A E 42 0 RR 12 (besser geeignet für Kehlnähte) DIN EN ISO 2560-A E 42 0 R 12 oder DIN EN ISO 2560-A E 38 2 RB 12 (besser geeignet für Stumpfnähte, Spaltüberbrückbarkeit)
	Kehlnähte an langen Doppel-T-Trägern Werkstoff: S235J0 Schweißposition: PB DIN EN ISO 2560-A E 42 0 RR 73 DIN EN ISO 2560-A E 42 2 RB 53
	Doppel-V-Naht an Zugstangen mit großer Werkstückdicke Werkstoff: S355J3 Schweißposition: PA DIN EN ISO 2560-A E 38 2 B 12 H10 DIN EN ISO 2560-A E 42 4 B 32 H10
	Kehlnähte an Konsolen (t = 10 mm) Werkstoff: S235JR Schweißposition: PB, PF DIN EN ISO 2560-A E 38 2 RB 12
	Stumpfnähte an Rohren (L235J2) Naht 1 Schweißposition PJ DIN EN ISO 2560-A E 42 2 C 25 Naht 2 Schweißposition PH DIN EN ISO 2560-A E 38 2 RB 12

Abbildung 15: Zuordnung geeigneter Stabelektroden

Tabelle 6: Stabelektroden für unlegierte und Feinkorn-Stähle, DIN EN ISO 2560-A

E 46 6 Mn1Ni B 4 2 H5				
E: Kennbuchstabe Lichtbogenhandschweißen				
Kennziffer	Mindeststreckgrenze ¹⁾ [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Mindestbruchdehnung [%]	

11 Stabelektroden für wetter-, hochfeste und kaltzähe Stähle, DIN EN ISO 18275-A

Zum Lichtbogenhandschweißen von hochfesten Feinkornbaustählen (<500 MPa) im Stahlbau werden fast ausschließlich basisch (B) umhüllte Stabelektroden angewendet. Zur Einheitlichkeit der Bezeichnung wurden Teile aus der DIN EN ISO 2560-A übernommen.

Zusammensetzung

Die Zusammensetzung der Umhüllung unterscheidet sich durch einen höheren Anteil an Legierungselementen, z.B. Mn, Ni, Cr und Mo, von den basischen Elektroden der DIN EN ISO 2560-A.

Eigenschaften

Basisch umhüllte hochfeste Stabelektroden haben folgende herausragende Eigenschaften:

- Hohe Kerbschlagarbeit des Schweißgutes, sprödebruchsicher bei tiefen Temperaturen (bis -80°C)
- Hohe Rissicherheit
- Hervorragende Festigkeitseigenschaften auch für höhere Temperaturen (bis ca. 440°C), allerdings sinkt hier die Dehngrenze deutlich ab.

Anwendungen

- Statisch und dynamisch hoch belastete Schweißkonstruktionen, z.B. im Stahlbau, Anlagen und Fahrzeugbau
- Stumpfnahverbindungen beim Betonstahlschweißen
- Bei höherfesten Stählen als weiches Schweißgut für starre Konstruktionen
- Große Nahtquerschnitte und Bauteildicken
- Zum Verschweißen von durch P, S und N₂ verunreinigten Stählen (FU), diese Stahlbegleitelemente werden abgebunden und in die Schlacke überführt
- Bei C-Gehalten über 0,22% (u.a. auch Stahlguss und Schienenschweißungen)

Besonderheiten

Angaben über die Festigkeitseigenschaften des Schweißgutes beziehen sich auf den Schweißzustand. Ist ein T in der Bezeichnung zugefügt, beziehen sich die Werte auf den spannungsarmgeglühten Zustand.

Bezeichnungsbeispiel:

DIN EN ISO 18275-A – E 55 3 MnMo B T 4 2 H10 (650°C, Haltedauer bis 15 Stunden).

Ein Z für Legierungselemente zeigt an, dass die chemische Zusammensetzung außerhalb der festgelegten Grenzen liegt. Achtung: Gleiche Elektroden mit Z-Werten sind miteinander nicht vergleichbar.

Bezeichnungsbeispiel:

DIN EN ISO 18275-A – E 55 5 Z2Ni B 45 (basische Fallnahtelektrode)

Arbeitsregeln

Basische Elektroden für das Verschweißen von Feinkornbaustählen müssen rückgetrocknet werden, und zwar mit höheren Temperaturen als B-Elektroden nach DIN EN ISO 2560-A:

2 Stunden bei 300 bis 350°C, jedoch max. 10 Stunden. Maßgeblich sind die Herstellerangaben.

Elektroden sind meist mit Zündhilfen versehen (zusätzliche Schutzgaswolke beim erstmaligen Zünden, Vermeidung von Ansatzporen).

Der Wasserstoffgehalt des Schweißgutes soll 15 ml/100 g Schweißgut nicht überschreiten.

- Mit gezielter Wärmeeinbringung arbeiten
- Streckenenergie beachten
- Strichraupen statt Pendelraupen
- Keine zu dicken Lagen, besonders in Position „PF“
- Arbeitstemperatur nicht über 200°C

- Für die Streckenenergie gilt bei Wanddicken < 15 mm: Wanddicke = Streckenenergie kJ/cm.
- Jeden Ansatz anschleifen (Poren nach Abreißen des Lichtbogens durch fehlenden Gasschutz)



Erläuterung zu den Kennzeichen der DIN EN ISO 18275-A

Tabelle 7: Stabelektroden für wetterfeste, hochfeste und kaltzähe Stähle, DIN EN ISO 18275-A

E 62 7 Mn1Ni B 3 4 H5			
Kennzeichen		Wasserstoffgehalt ml/100 g Schweißgut max.	
H 5		5	
H 10		10	
H 15		15	

Schweißpositionen in Übereinstimmung mit ISO 6947	
Kennziffer	alle Positionen
1	alle Positionen
2	alle Positionen, außer Fallposition
3	Stumpfnäht in Wannenposition, Kehlnäht in Wannen- und Horizontalposition
4	Stumpfnäht in Wannenposition, Kehlnäht in Wannenposition
5	Fallposition und Positionen wie Kennziffer 3.

Kennziffer	Nennausbringung%	Stromart
1	≤ 105	Wechsel- und Gleichstrom
2	≤ 105	Gleichstrom
3	> 105 ≤ 125	Wechsel- und Gleichstrom
4	> 105 ≤ 125	Gleichstrom
5	> 125 ≤ 160	Wechsel- und Gleichstrom
6	> 125 ≤ 160	Gleichstrom
7	> 160	Wechsel- und Gleichstrom
8	> 160	Gleichstrom

Kurzzeichen		Umhüllungstyp
B		basisch-umhüllt
Die meisten Stabelektroden dieser Art sind basisch umhüllt und haben das Kurzzeichen B. Für Zellulose umhüllte und andere Umhüllungstypen siehe DIN EN ISO 2560		
Das Kennzeichen T gibt an, dass die Festigkeits-, Dehn- und Kerbschlagseigenschaften in der Einteilung des aufgetragenen Schweißgutes für den Zustand nach einer Wärmenachbehandlung bei Temperaturen zwischen 560 °C und 600 °C für 1 h erhalten werden. Das Prüfstück muss zum Abkühlen auf 300 °C im Ofen gelagert werden.		

Kennbuchstabe/ Kennziffer	Mindeststreck- grenze ¹⁾ [MPa]	Zugfestigkeit [MPa]	Mindestbruch- dehnung [%]	Mindest-Kerbschlagarbeit 47 J bei °C	
				Z	A
55	550	610 bis 780	18	Keine Anforderung	+ 20
62	620	690 bis 890	18	0	0
69	690	760 bis 960	17	- 20	- 20
79	790	880 bis 1 080	16	- 30	- 30
89	890	980 bis 1 180	15	- 40	- 40
				- 50	- 50
				- 60	- 60
				- 70	- 70
				- 80	- 80

Legierungskurz- zeichen	Chemische Zusammensetzung % (Massenanteil)			
	Mn	Ni	Cr	Mo
MnMo	1,4 bis 2,0	-	-	0,3 bis 0,6
Mn1Ni	1,4 bis 2,0	0,6 bis 1,2	-	-
1NiMo	1,4	0,6 bis 1,2	-	0,3 bis 0,6
1,5NiMo	1,4	1,2 bis 1,8	-	0,3 bis 0,6
2NiMo	1,4	1,8 bis 2,6	-	0,3 bis 0,6
Mn1NiMo	1,4 bis 2,0	0,6 bis 1,2	-	0,3 bis 0,6
Mn2NiMo	1,4 bis 2,0	1,8 bis 2,6	-	0,3 bis 0,6
Mn2NiCrMo	1,4 bis 2,0	1,8 bis 2,6	0,3 bis 0,6	0,3 bis 0,6
Mn2Ni1CrMo	1,4 bis 2,0	1,8 bis 2,6	0,6 bis 1,0	0,3 bis 0,6

Z	jede andere vereinbarte Zusammensetzung
Es ist möglich, dass zwei Stabelektroden mit der gleichen Einteilung in Z nicht austauschbar sind	

12 Stabelektroden für warmfeste und hochwarmfeste Stähle, DIN EN ISO 3580-A

Diese Norm enthält eine Einteilung zur Bezeichnung von umhüllten Stabelektroden mit der chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißgutes.

Zusammensetzung

Stabelektroden für warmfeste Stähle sind als rutil- und basisch-umhüllte Typen erhältlich, hochwarmfeste Elektroden werden nur mit basischer Umhüllung angeboten.

Um die Warmfestigkeit zu erhöhen, werden bei max. Betriebstemperaturen bis 550°C geringe Mengen an Cr, Mo, und V zulegiert (CrMo1). Über 550°C bis etwa 600°C ist zusätzlich eine Zunderbeständigkeit erforderlich, was ein höheres Legieren mit Cr, Mo und V nötig macht (CrMo2). Spezielle Elektroden werden noch zusätzlich mit W, Nb, Ni legiert um bei Betriebstemperaturen bis 650°C zu bestehen.

Stabelektroden dieses Typs sind in der Regel kernstablegiert.

Eigenschaften

Rutile CrMo-Elektroden sind ohne Vorbehandlung wie rutil Stabelektroden gut verschweißbar.

Basische CrMo-Elektroden müssen bei 300 bis 350°C zwei Stunden rückgetrocknet werden.

Hohe Zeitstandfestigkeit und Zähigkeitsverhalten auch im Langzeitbereich bis 650°C.

Anwendungen

z.B. Dampfturbinen, Kessel- und Rohrleitungsbau

Grundwerkstoffe:	16Mo3	Zusatzwerkstoffe:	E Mo R 1 2
	13CrMo4-5		E CrMo1 R 1 2 (E
	10CrMo9-10		CrMo1 B 2 2 H5)
			E CrMo2 B 2 2 H5

Besonderheiten

Häufig werden bei dickeren Werkstoffen im Stumpfstoß (U-Nahtvorbereitung, sogenannte Tulpennaht) die Wurzel-WIG-, die Füll- und Decklagen aus wirtschaftlichen Gründen mit der Stabelektrode geschweißt.

Risse in Schweißverbindungen können durch Wasserstoff verursacht oder maßgeblich beeinflusst werden. Die Gefahr von wasserstoffinduzierten Rissen erhöht sich mit zunehmendem Legierungsgehalt und der Höhe der Spannungen.

Die Kaltrissneigung ist umso geringer, je niedriger der Wasserstoffgehalt des Schweißgutes ist.

Wasserstoff im Schweißgut entsteht z.B. durch nicht ordnungsgemäß rückgetrocknete basische Stabelektroden.

Je nach Grundwerkstoff sind Vorwärm- und Zwischenlagentemperaturen von ca. 250°C bis 350°C sowie eine Wärmenachbehandlung nötig: Glühen 660 bis 750°C, Haltedauer $\frac{1}{2}$ bis 2 Stunden (Ofen) nötig.

Erläuterung zu den Kennzeichen der DIN EN ISO 3580-A

Tabelle 8: Auszug DIN EN ISO 3580

Kurzzzeichen für die chemische Zusammensetzung bei der Einteilung nach		Chemische Zusammensetzung, % Masseanteil								
Nennzusammensetzung (ISO 3580-A)	Legierungstyp (ISO 3580-B)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Andere Elemente
Mo	(1M3)	0,10	0,80	0,40 bis 1,50	0,030	0,025	0,2	0,40 bis 0,70	0,03	—
(Mo)	1M3	0,12	0,80	1,00	0,030	0,030	—	0,40 bis 0,65	—	—
MoV	—	0,03 bis 0,12	0,80	0,40 bis 1,50	0,030	0,025	0,30 bis 0,60	0,80 bis 1,20	0,25 bis 0,60	—
CrMo0,5	(CM)	0,05 bis 0,12	0,80	0,40 bis 1,50	0,030	0,025	0,40 bis 0,65	0,40 bis 0,65	—	—
(CrMo0,5)	CM	0,05 bis 0,12	0,80	0,90	0,030	0,030	0,40 bis 0,65	0,40 bis 0,65	—	—
—	C1M	0,07 bis 0,15	0,30 bis 0,60	0,40 bis 0,70	0,030	0,030	0,40 bis 0,60	1,00 bis 1,25	0,05	—
CrMo1	(1CM)	0,05 bis 0,12	0,80	0,40 bis 1,50	0,030	0,025	0,90 bis 1,40	0,45 bis 0,70	—	—
(CrMo1)	1CM	0,05 bis 0,12	0,80	0,90	0,030	0,030	1,00 bis 1,50	0,40 bis 0,65	—	—
CrMo1L	(1CML)	0,05	0,80	0,40 bis 1,50	0,030	0,025	0,90 bis 1,40	0,45 bis 0,70	—	—
(CrMo1L)	1CML	0,05	1,00	0,90	0,030	0,030	1,00 bis 1,50	0,40 bis 0,65	—	—
CrMoV1	—	0,05 bis 0,15	0,80	0,70 bis 1,50	0,030	0,025	0,90 bis 1,30	0,90 bis 1,30	0,10 bis 0,35	—
CrMo2	(2C1M)	0,05 bis 0,12	0,80	0,40 bis 1,30	0,030	0,025	2,0 bis 2,6	0,90 bis 1,30	—	—
(CrMo2)	2C1M	0,05 bis 0,12	1,00	0,90	0,030	0,030	2,00 bis 2,50	0,90 bis 1,20	—	—
CrMo2L	(2C1ML)	0,05	0,80	0,40 bis 1,30	0,030	0,025	2,0 bis 2,6	0,90 bis 1,30	—	—
(CrMo2L)	2C1ML	0,05	1,00	0,90	0,030	0,030	2,00 bis 2,50	0,90 bis 1,20	—	—
—	2CML	0,05	1,00	0,90	0,030	0,030	1,75 bis 2,25	0,40 bis 0,65	—	—
—	2C1MV	0,05 bis 0,15	0,60	0,40 bis 1,50	0,030	0,030	2,00 bis 2,60	0,90 bis 1,20	0,20 bis 0,40	Nb 0,010 bis 0,050
—	3C1MV	0,05 bis 0,15	0,60	0,40 bis 1,50	0,030	0,030	2,60 bis 3,40	0,90 bis 1,20	0,20 bis 0,40	Nb 0,010 bis 0,050
CrMo5	(5CM)	0,03 bis 0,12	0,80	0,40 bis 1,50	0,025	0,025	4,0 bis 6,0	0,40 bis 0,70	—	—

DIN EN ISO 3580-A E CrMo1 B 4 4 H5

E: Kennbuchstabe Lichtbogenhandschweißen

Kurzzzeichen	Umhüllungstyp
R	rutil-umhüllt
B	basisch-umhüllt

Kennziffer	Ausbringen %	Stromart
1	≤ 105	Wechsel- und Gleichstrom
2	≤ 105	Gleichstrom
3	> 105 ≤ 125	Wechsel- und Gleichstrom
4	> 105 ≤ 125	Gleichstrom
5	> 125 ≤ 160	Wechsel- und Gleichstrom
6	> 125 ≤ 160	Gleichstrom
7	> 160	Wechsel- und Gleichstrom
8	> 160	Gleichstrom

Kennzeichen	Wasserstoffgehalt ml/100 g Schweißgut max.
H 5	5
H10	10
H15	15

Kennziffer	Schweißpositionen in Übereinstimmung mit ISO 6947
1	alle Positionen
2	alle Positionen, außer Fallposition
3	Stumpfnah in Wannenposition, Kehlnah in Wannen- und Horizontalposition
4	Stumpfnah in Wannenposition, Kehlnah in Wannenposition
5	Falposition und Positionen wie Kennziffer 3.

13 Stabelektroden für nicht rostende und hitzebeständige Stähle, DIN EN ISO 3581-A

Diese Norm enthält eine Einteilung zur Bezeichnung von umhüllten Stabelektroden mithilfe der chemischen Zusammensetzung des reinen Schweißgutes.

Zusammensetzung

Stabelektroden können rutil- oder basisch-umhüllt sein; in beiden Fällen werden die Stabelektroden an DC +Pol verschweißt (rutil-umhüllt teilweise auch mit Wechselstrom möglich). Beide Typen sind kernstablegiert.

Legierungselemente sind in der Reihenfolge Cr, Ni, Mo zahlenmäßig in ganzen Prozenten hintereinander ohne Kurzzeichen aufgeführt.

Eigenschaften

Die Besonderheit dieser Stabelektroden ist die hohe Korrosionsbeständigkeit, die Kaltzähigkeit bis etwa -200°C sowie die Zunderbeständigkeit bis etwa 900°C.

Anwendungen

Verschweißen korrosionsbeständiger Stähle für Anwendungen, z.B. im Anlagenbau, Rohrleitungsbau, Dampfkraftwerksbau, chemische Industrie, Nahrungsmittelindustrie etc.

Arbeitsregeln

Hochlegierte Stabelektroden müssen nach Herstellerangaben rückgetrocknet werden (ca. 2 Std. bei 250 bis 350°C). Bei Nichtbeachtung dieser Maßnahme ist mit Poren, insbesondere am Nahtanfang zu rechnen. Kernstablegierte Chrom-Nickel-Elektroden sind mit niedriger Streckenenergie zu verschweißen.

Die Zwischenlagentemperatur sollte 150°C nicht überschreiten. Kleine Elektrodendurchmesser und niedrige Stromstärken wählen. Große Schweißbäder vermeiden, um Schweißzugspannungen möglichst gering zu halten, jedoch Wurzelschweißungen mit ausreichend großem Querschnitt ausführen, da es sonst zu Spannungsrissen in Längsrichtung kommen kann.

Alle Ansatzstellen müssen sorgfältig überschliffen werden.

Zündstellen, z.B. durch schlecht angebrachte Masseklemmen, sind unbedingt zu vermeiden, da dadurch sehr feine Risse auftreten, die dann die Ursache für Spaltkorrosion sein können.

Hochlegiertes Schweißgut lässt sich durch Zulegieren von Mangan und/oder Molybdän wesentlich unempfindlicher gegen Heißrisse machen. Dagegen kann Niob, insbesondere mit Stickstoff, sowie Verunreinigungen durch Phosphor, Schwefel und Bor die Heißrisbildung stark begünstigen. Vollaustenitische Stähle, ohne Mn und/oder Mo-Legierungsanteile sind hier besonders gefährdet. Der richtigen Auswahl des Zusatzwerkstoffes kommt hier eine sehr große Bedeutung zu.

Besonderes Augenmerk ist daher auch auf die Nahtvorbereitung sowie die Sauberkeit der Nahtflanken und der Nahtumgebung zu richten. Öl, Fett, Farbe oder Beschichtungen etc. müssen restlos entfernt werden.

Bezüglich der Korrosionsbeständigkeit sollte der Zusatzwerkstoff möglichst artgleich oder leicht überlegiert sein. Zu große Legierungsunterschiede wirken sich sehr negativ aus, da sich ein verstärkter Angriff auf das niedriger legierte Medium einstellen kann.

Um die Korrosionsbeständigkeit, die durch die „Passivschicht“ gewährleistet wird, zu erhalten, ist es nach dem Schweißen unbedingt erforderlich, alle Verunreinigungen (z.B. Oxidschichten, Zunder, Anlauffarben, Schlackenreste und Schweißspritzer) mechanisch durch Bürsten, Schleifen, Strahlen oder chemisch durch Beizen zu entfernen.

Sicherheitshinweise

Beim Verschweißen von basisch-umhüllten CrNi-Stabelektroden treten im Schweißrauch Chrom-VI-Verbindungen auf. Hier muss mit Punktabsaugung an der Schweißstelle – oder mit Filteratemschutzmasken (P3) geschweißt werden. Hochlegierte rutil-umhüllte Stabelektroden enthalten deutlich niedrigere Chrom-VI-Anteile.

Zuordnung geeigneter Stabelektroden zu bestimmten hochlegierten Werkstoffen:

Zur Auswahl des am besten geeigneten Zusatzwerkstoffes / Legierungstyps wird für den speziellen Anwendungsfall dringend empfohlen, das Schaeffler-Diagramm zur Hilfe zu nehmen.

Beispiele:

Ferritische Chromstähle

- Grundwerkstoff: X6Cr13 Werkstoff Nr. 1.4000
- x geeignete Stabelektrode: DIN EN ISO 3581-A – E 13 B 42
- x geeignete Stabelektrode: DIN EN ISO 3581-A – E 18 8 Mn B 1 2

Gefahren und Gegenmaßnahmen

Neigung zu Grobkornbildung und Aufhärtung durch Martensitbildung. Um Risse in der Wärmeeinflusszone (WEZ) zu vermeiden und Schweißzugspannungen zu minimieren, ist eine Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur von 200 bis max. 300°C zu wählen. Mit geringer Wärmeerbringung schweißen, kleine Durchmesser bei niedriger Stromstärke bevorzugen. Strichraupen wählen, Pendelraupen vermeiden. Glühen nach dem Schweißen (700 bis max. 800°C) verbessert die Zähigkeit in der WEZ, reduziert Schweißzugspannungen und stellt die Beständigkeit gegen Interkristalline Korrosion wieder her.

Martensitische Chromstähle

- Grundwerkstoff: X20Cr13 Werkstoff Nr. 1.4021
- x geeignete Stabelektrode: DIN EN ISO 3581-A – E 13 B 22
- x geeignete Stabelektrode: DIN EN ISO 3581-A – E 19 9 Nb B 2 2

Gefahren und Gegenmaßnahmen

Die Gefahr einer Kaltrissbildung ist hier noch größer als bei ferritischen Chromstählen. Martensitische Chromstähle haben aufgrund des hohen C-Gehaltes eine sehr schlechte Schweißbarkeit. Bis zu einem Kohlenstoffgehalt von 0,2% kann mit austenitischen Zusatzwerkstoffen geschweißt werden, über 0,2% Kohlenstoffgehalt müssen Zusatzwerkstoffe aus DIN EN 14172 verwendet werden. Für Schweißkonstruktion sind diese Chromstähle über C>0,2% eigentlich nicht geeignet.

- Grundwerkstoff: X30Cr13 Werkstoff Nr. 1.4028
- x geeignete Stabelektrode: DIN EN ISO 14172 – E Ni 6082 (NiCr20Mn3Nb)

Austenitische Stähle

- Grundwerkstoff: X5CrNi18-10 Werkstoff Nr. 1.4301
- x geeignete Stabelektroden: DIN EN ISO 3581-A – E 19 9 R 1 2
DIN EN ISO 3581-A – E 19 9 Nb R 1 2
- Grundwerkstoff: X6CrNiMoTi17-12-2 Werkstoff Nr. 1.4571
- x geeignete Stabelektrode: DIN EN ISO 3581-A – E 19 12 3 Nb R 1 2
- Grundwerkstoff: X2CrNi18-9 Werkstoff Nr. 1.4307
- x geeignete Stabelektrode: DIN EN ISO 3581-A – E 19 9 L R 1 2

Gefahren und Gegenmaßnahmen

Gefahr von Heißrissen. Gegenmaßnahmen siehe Arbeitsregeln.

13.1 Stabelektroden für Schwarz-Weiß-Verbindungen, DIN EN ISO 3581-A

Bei der Verbindung von hochlegierten mit un- oder niedriglegierten Grundwerkstoffen entsteht eine Schweißnaht, die anteilig aus den beiden aufgeschmolzenen Werkstoffen und dem Schweißzusatz besteht. Je nach dem Grad der Vermischung und den Anforderungen an die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Verbindung ist hier ein mehr oder weniger überlegierter Schweißzusatz notwendig, um störende martensitische Gefügeanteile zu vermeiden. Auch hier leistet das Schaeffler-Diagramm wieder wertvolle Hilfe. Werden bei Schwarz-Weiß-Verbindungen unlegierte Zusatzwerkstoffe nach DIN EN ISO 2560-A verwendet, gibt es **Aufhärtungen in der Schweißnaht**, ebenso wenn „nur“ hochlegierte 18-10-Zusatzwerkstoffe nach DIN EN ISO 3581-A verwendet werden.

Für das Verschweißen von unlegiertem (S235) mit hochlegiertem Stahl (X6CrNiTi18-10) können mehrere „überlegierte“ Zusatzwerkstoffe verwendet werden.

Bewährte Legierungstypen für das Schweißen von artverschiedenen Stählen sind:

DIN EN ISO 3581-A – E 18 8 Mn6 R 1 2	(Werkstoff Nr. 1.4370, entspricht DIN EN 14700–E FE10, auch für Manganhartstahl geeignet)
DIN EN ISO 3581-A – E 23 12 L R 12	(Werkstoff Nr. 1.4332)
DIN EN ISO 3581-A – E 23 12 2 LR 1 2	(Werkstoff Nr. 1.4459)

Beispiele: Anschweißen von Tragstützen (S235) an Behälterwände aus austenitischem Chrom-Nickelstahl 18-10.

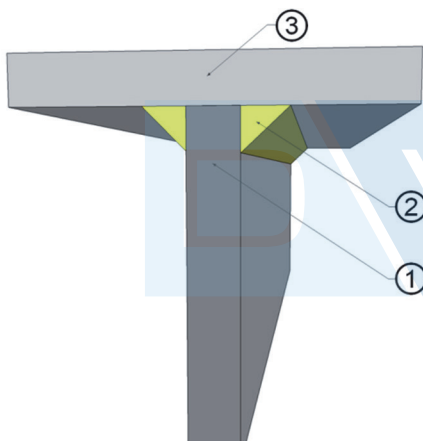


Abbildung 16: Einfache Ausführung

- ① Unlegiert S 235
- ② DIN EN ISO 3581-A – E 18 8 Mn6 R 1 2
- ③ Hochlegiert X6CrNiTi18-10
- ④ DIN EN ISO 3581-A– E 19 9 Nb R 1 2

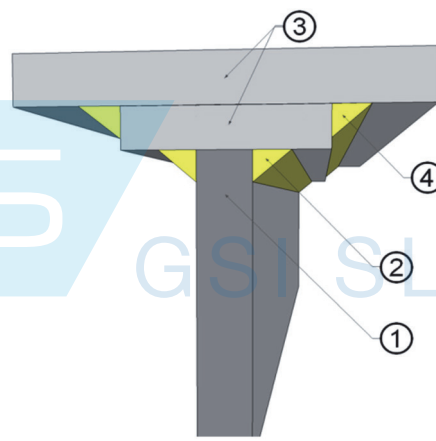


Abbildung 17: Höherwertige Ausführung

Für das Schweißen von Kehlnähten an Schwarz-Weiß-Verbindungen ist eine „hüllenlegierte“ Stabelektrode (unlegierter Kerndraht) von Vorteil. Kennzeichnung MP = Metallpulver: (Verträgt höhere Strombelastung als kernstabilelegierte Stabelektroden.)

Beispiel:

DIN EN ISO 3581-A E 23 12 MP R 1 2
DIN EN ISO 3581-A E 18 8 Mn6 MP R 7 3

└─ Schweißposition
└─ Mehrausbringung >160 %

Erläuterung zu den Kennzeichen der DIN EN ISO 3581-A

Tabelle 9: Auszug DIN EN ISO 3581

Kurzzeichen für Einteilung nach		Chemische Zusammensetzung ^a % (Massenanteil)										
Nennzusammensetzung ^{b,c,d} (ISO 3581-A)	Legierungstyp ^{d,e} (ISO 3581-B)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Nb + Ta	N
19 9 Nb	(347)	0,08	1,2	2,0	0,030	0,025	18,0 bis 21,0	9,0 bis 11,0	0,75	0,75	8 × C bis 1,1	—
19 12 2	(316)	0,08	1,2	2,0	0,030	0,025	17,0 bis 20,0	10,0 bis 13,0	2,0 bis 3,0	0,75	—	—
(19 12 2)	316	0,08	1,00	0,5 bis 2,5	0,04	0,03	17,0 bis 20,0	11,0 bis 14,0	2,0 bis 3,0	0,75	—	—
(19 12 2)	316H	0,04 bis 0,08	1,00	0,5 bis 2,5	0,04	0,03	17,0 bis 20,0	11,0 bis 14,0	2,0 bis 3,0	0,75	—	—
(19 12 3 L)	316L	0,04	1,00	0,5 bis 2,5	0,04	0,03	17,0 bis 20,0	11,0 bis 14,0	2,0 bis 3,0	0,75	—	—
19 12 3 L	(316L)	0,04	1,2	2,0	0,030	0,025	17,0 bis 20,0	10,0 bis 13,0	2,5 bis 3,0	0,75	—	—
18 8 Mn ^e	—	0,20	1,2	4,5 bis 7,5	0,035	0,025	17,0 bis 20,0	7,0 bis 10,0	0,75	0,75	—	—
18 9 Mn Mo ^e	(307)	0,04 bis 0,14	1,2	3,0 bis 5,0	0,035	0,025	18,0 bis 21,5	9,0 bis 11,0	0,5 bis 1,5	0,75	—	—
(19 12 3 Nb)	318	0,08	1,00	0,5 bis 2,5	0,04	0,03	17,0 bis 20,0	11,0 bis 14,0	2,0 bis 3,0	0,75	6 × C bis 1,00	—
19 13 4 N L	—	0,04	1,2	1,0 bis 5,0	0,030	0,025	17,0 bis 20,0	12,0 bis 15,0	3,0 bis 4,5	0,75	—	0,20
22 9 3 N L	(2209)	0,04	1,2	2,5	0,030	0,025	21,0 bis 24,0	7,5 bis 10,5	2,5 bis 4,0	0,75	—	0,08 bis 0,20
(22 9 3 N L)	2209	0,04	1,00	0,5 bis 2,0	0,04	0,03	21,5 bis 23,5	7,5 bis 10,5	2,5 bis 3,5	0,75	—	0,08 bis 0,20
23 7 N L	—	0,04	1,0	0,4 bis 1,5	0,030	0,020	22,5 bis 25,5	6,5 bis 10,0	0,8	0,5	—	0,10 bis 0,20
23 12 2 L	(309L Mo)	0,04	1,2	2,5	0,030	0,025	22,0 bis 25,0	11,0 bis 14,0	2,0 bis 3,0	0,75	—	—

^a Einzelwerte sind Höchstwerte.

^b Stabelektroden, für die keine chemische Zusammensetzung aufgeführt ist, müssen ähnlich und mit dem vorangestellten Buchstaben Z gekennzeichnet werden. Die Bereiche für die chemische Zusammensetzung sind nicht festgelegt. Es besteht die Möglichkeit, dass zwei Elektroden mit der gleichen Z-Einteilung nicht gegeneinander austauschbar sind.

^c Die Summe von P und S darf einen Massenanteil von 0,050 % nicht überschreiten, ausgenommen sind 25 7 2 N L; 18 16 5 N L; 20 16 3 N N L; 18 9 Mn; 18 9 Mn Mo und 29 9.

^d Eine Bezeichnung in Klammern [z. B. (308 L)] gibt an, dass die Stabelektrode fast, aber nicht vollständig, mit dem anderen Bezeichnungssystem übereinstimmt. Die richtige Bezeichnung für einen gegebenen Zusammensetzungsbereich ist die Bezeichnung ohne Klammern. Liegt ein Produkt vor, das eine eingeschränkte chemische Zusammensetzung hat, die beiden Bezeichnungssystemen entspricht, darf es mit beiden Bezeichnungen versehen werden.

^e Die Stabelektrode muss nach ihren spezifischen Elementen analysiert werden, für die Werte angegeben sind. Wenn das Vorhandensein anderer Elemente im Verlauf der Analyse angezeigt wird, muss die Menge dieser Elemente ermittelt werden, um sicherzustellen, dass ihre Gesamtsumme (ausgenommen Eisen) einen Massenanteil von 0,50 % nicht überschreitet.

^a Einzelwerte sind Höchstwerte.
^b Stabelektroden, für die keine chemische Zusammensetzung aufgeführt ist, müssen ähnlich und mit dem vorangestellten Buchstaben Z gekennzeichnet werden. Die Bereiche für die chemische Zusammensetzung sind nicht festgelegt. Es besteht die Möglichkeit, dass zwei Elektroden mit der gleichen Z-Einteilung nicht gegeneinander austauschbar sind.
^c Die Summe von P und S darf einen Massenanteil von 0,050 % nicht überschreiten, ausgenommen sind 25 7 2 N L; 18 16 5 N L; 20 16 3 Mn N L; 18 8 Mn; 18 9 Mn Mo und 29 9.
^d Eine Bezeichnung in Klammern [z. B. (308L) oder (19 9 L)] gibt an, dass die Stabelektrode fest, aber nicht vollständig, mit dem anderen Bezeichnungssystem übereinstimmt. Die richtige Bezeichnung für einen gegebenen Zusammensetzungsbereich ist die Bezeichnung ohne Klammern. Liegt ein Produkt vor, das eine eingeschränkte chemische Zusammensetzung hat, die beiden Bezeichnungssystemen entspricht, darf es mit beiden Bezeichnungen versehen werden.
^e Die Stabelektrode muss nach jenen spezifischen Elementen analysiert werden, für die die Werte angegeben sind. Wenn das Vorhandensein anderer Elemente im Verlauf der Analyse angezeigt wird, muss die Menge dieser Elemente ermittelt werden, um sicherzustellen, dass ihre Gesamtsumme (ausgenommen Eisen) einen Massenanteil von 0,50 % nicht überschreitet.

DIN EN ISO 3581-A E 23 12 2 LR 3 2

E: Kennbuchstabe Lichtbogenhandschweißen

Kurzzeichen	Umhüllungstyp
R	rutil-umhüllt
B	basisch-umhüllt

L: Low Carbon

Kennziffer	Ausbringen %	Stromart
1	≤ 105	Wechsel- und Gleichstrom
2	≤ 105	Gleichstrom
3	> 105 ≤ 125	Wechsel- und Gleichstrom
4	> 105 ≤ 125	Gleichstrom
5	> 125 ≤ 160	Wechsel- und Gleichstrom
6	> 125 ≤ 160	Gleichstrom
7	> 160	Wechsel- und Gleichstrom
8	> 160	Gleichstrom

Kennziffer	Schweißpositionen in Übereinstimmung mit ISO 6947
1	alle Positionen
2	alle Positionen, außer Fallposition
3	Stumpfnah in Wannenposition, Kehlnah in Wannen- und Horizontalposition
4	Stumpfnah in Wannenposition, Kehlnah in Wannenposition
5	Fallposition und Positionen wie Kennziffer 3.

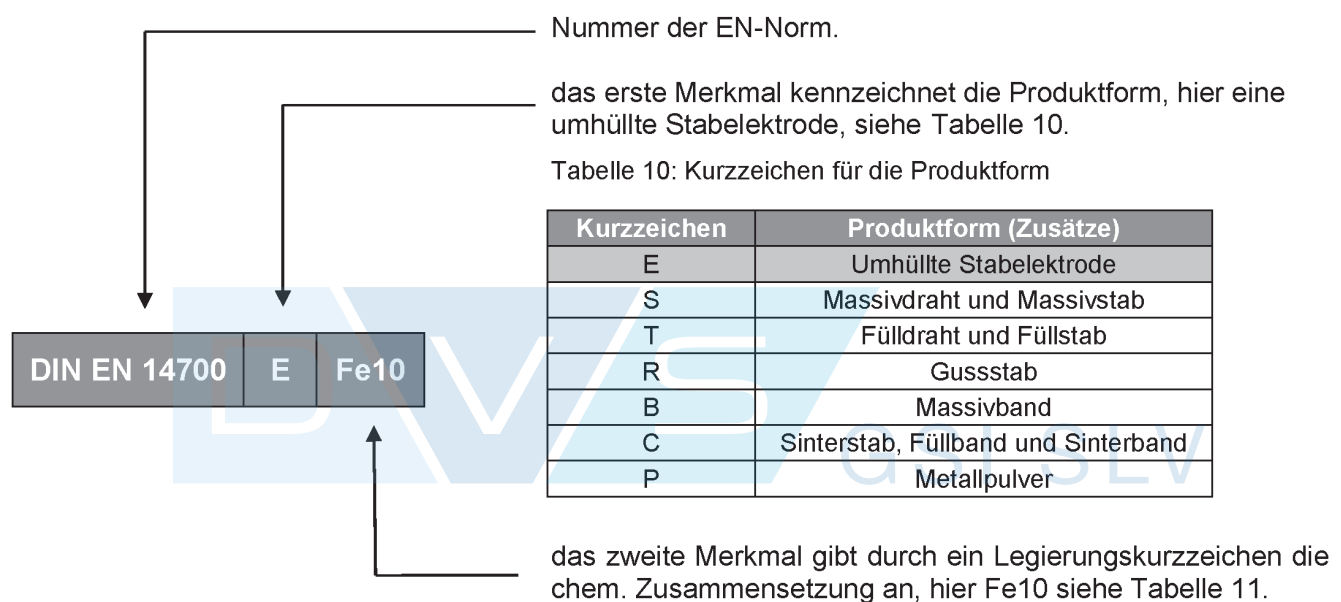
14 Schweißzusätze zum Hartauftragen, DIN EN 14700

1. Die Einteilung und Auswahl von Stabelektroden für das Auftragschweißen erfolgt nach DIN EN 14700:Legierungskurzzeichen nach DIN EN 14700
2. die Härte des reinen Schweißgutes und
3. den Schweißguteigenschaften nach Tabelle 12

Es werden nur Eigenschaften des Schweißgutes genannt, die neben der Härteangabe besonders typisch sind.

Bezeichnungsbeispiel von Stabelektroden für verschleißbeständige Auftragungen nach DIN EN 14700:

Bezeichnungsmerkmale der Einteilung



Vollaustenitische Mn-Cr-legierte Stabelektrode für hochverschleißfeste Auftragungen, die extremen Druck- und Schlagbeanspruchungen unterliegen (z.B. Fox BMC von Böhler).

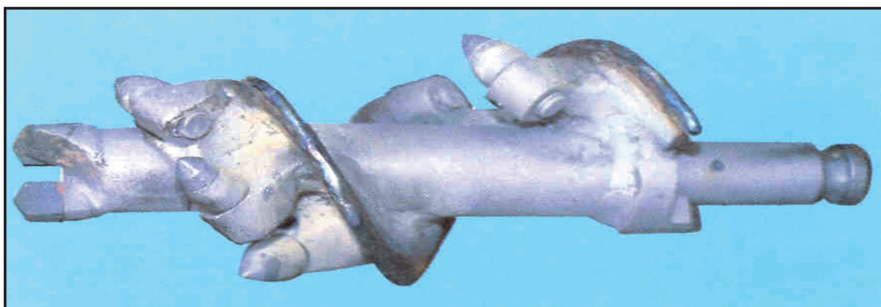


Abbildung 18: (Werksfoto Messer – Lincoln)

Tabelle 11: Auszug DIN EN 14700 – Legierungskurzzeichen und chemische Zusammensetzung

Legierungs-kurz-zeichen ^a	Eignung	Chemische Zusammensetzung in % (m/m)									
		C	Cr	Ni	Mn	Mo	W	V	Nb	Andere	Rest
Fe1	p	≤ 0,4	≤ 3,5	–	0,5 bis 3	≤ 1	≤ 1	≤ 1	–	–	Fe
Fe2	ps	0,4 bis 1,2	≤ 7	≤ 1	0,5 bis 3	≤ 1	≤ 1	≤ 1	–	–	Fe
Fe3	s t	0,2 bis 0,5	1 bis 8	≤ 5	≤ 3	≤ 4,5	≤ 10	≤ 1,5	–	Co, Si	Fe
Fe4	s t (p)	0,2 bis 1,5	2 bis 6	≤ 4	≤ 3	≤ 10	≤ 19	≤ 4	–	Co, Ti	Fe
Fe5	c p s t w	≤ 0,5	≤ 0,1	17 bis 22	≤ 1	3 bis 5	–	–	–	Co, Al	Fe
Fe6	g p s	≤ 2,5	≤ 10	–	≤ 3	≤ 3	–	–	≤ 10	Ti	Fe
Fe7	c p t	≤ 0,2	4 bis 30	≤ 6	≤ 3	≤ 2	–	≤ 1	≤ 1	Si	Fe
Fe8	g p t	0,2 bis 2	5 bis 18	–	0,3 bis 3	≤ 4,5	≤ 2	≤ 2	≤ 10	Si, Ti	Fe
Fe9	k (n) p	0,3 bis 1,2	≤ 19	≤ 3	11 bis 18	≤ 2	–	≤ 1	–	Ti	Fe
Fe10	c k (n) p z	≤ 0,25	17 bis 22	7 bis 11	3 bis 8	≤ 1,5	–	–	≤ 1,5	Si	Fe
Fe11	c n z	≤ 0,3	18 bis 31	8 bis 20	≤ 3	≤ 4	–	–	≤ 1,5	Cu	Fe
Fe12	c (n) z	≤ 0,08	17 bis 26	9 bis 26	0,5 bis 3	≤ 4	–	–	≤ 1,5	–	Fe
Fe13	g	≤ 1,5	≤ 6,5	≤ 4	0,5 bis 3	≤ 4	–	–	–	B, Ti	Fe
Fe14	g (c)	1,5 bis 4,5	25 bis 40	≤ 4	0,5 bis 3	≤ 4	–	–	–	–	Fe
Fe15	g	4,5 bis 5,5	20 bis 40	≤ 4	0,5 bis 3	≤ 2	–	–	≤ 10	B	Fe
Fe16	g z	4,5 bis 7,5	10 bis 40	–	≤ 3	≤ 9	≤ 8	≤ 10	≤ 10	B, Co	Fe
Fe20	c g t z	Hartstoffe ^b	–	–	–	–	–	–	–	–	Fe
Ni1	c p t	≤ 1	15 bis 30	Rest	0,3 bis 1	≤ 6	≤ 2	≤ 1	–	Si, Fe, B	Ni
Ni2	c k p t z	≤ 0,1	15 bis 30	Rest	≤ 1,5	≤ 28	≤ 8	≤ 1	≤ 4	Co, Si, Ti	Ni
Ni3	c p t	≤ 1	1 bis 15	Rest	0,3 bis 1	≤ 6	≤ 2	≤ 1	–	Si, Fe, B	Ni
Ni4	c k p t z	≤ 0,1	1 bis 15	Rest	≤ 1,5	≤ 28	≤ 8	≤ 1	≤ 4	Co, Si, Ti	Ni
Ni20	c g t z	Hartstoffe ^b	–	–	–	–	–	–	–	–	Ni
Co1	c k t z	≤ 0,6	20 bis 35	≤ 10	0,1 bis 2	≤ 10	≤ 15	–	≤ 1	Fe	Co
Co2	t z (c s)	0,6 bis 3	20 bis 35	≤ 4	0,1 bis 2	–	4 bis 10	–	–	Fe	Co
Co3	t z (c s)	1 bis 3	20 bis 35	≤ 4	≤ 2	≤ 1	6 bis 14	–	–	Fe	Co
Cu1	c (n)	–	–	≤ 6	≤ 15	–	–	–	–	Al, Fe, Sn	Cu
Al1	c n	–	–	10 bis 35	≤ 0,5	–	–	–	–	Cu, Si	Al
Cr	g n	1 bis 5	Rest	–	≤ 1	–	–	15 bis 30	–	Fe, B, Si, Zr	Cr

c: nicht rostend
g: schmirgelbeständig
k: kaltverfestigt
() evtl. nicht zutreffend für alle Legierungen dieser Einteilung

n: nicht magnetisierbar
p: schlagbeständig
s: schneidhaltig

t: hitzebeständig
z: zunderbeständig
w: warmaushärtend

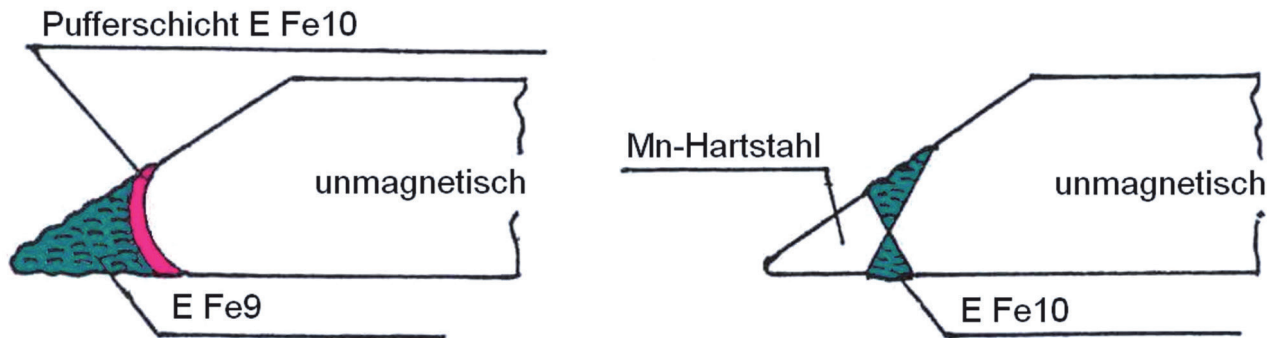
^a Nicht in der Tabelle aufgeführte Legierungen sind ähnlich zu kennzeichnen, wobei der Buchstabe „Z“ voranzustellen ist.
^b Wolframschmelzkarbide oder Wolframsinterkarbide gebrochen oder sphärisch.

Tabelle 12: Auszug DIN EN 14700 – Eignung der Legierungen für unterschiedliche Beanspruchungen

Legierungs- kurzzeichen	Anforderung						Legierung/Gefüge	Härtebereich		
	Mechanisch		thermisch		korrosiv	riss- beständig		bearbeitbar	[HB]	[HRC]
	Reibung	Schlag	hohe Temperatur	thermisch Thermoschock						
Fe1	3 und 4	2 und 3	4	4	4	1	1	ferritisch/martensitisch	150 bis 450	-
Fe2	3 und 4	2	4	4	4	2	3	martensitisch	-	30 bis 58
Fe3	3	2	2	2	3	2	2	martensitisch + Karbide	-	40 bis 55
Fe4	2	2 und 3	1 und 2	1 und 2	3	2 und 3	3 und 4	martensitisch + Karbide	-	55 bis 65
Fe5	2	1	1	1	2	1	1	martensitisch	-	30 bis 40
Fe6	1	1	2 und 3	2 und 3	4	2 und 3	3 und 4	martensitisch + Karbide	-	48 bis 55 ^a
Fe7	2	2	1 und 2	1 und 2	1 und 2	1	1 und 2	ferritisch/martensitisch	250 bis 450	-
Fe8	1 und 2	1 und 2	4	4	3	2 und 3	3 und 4	martensitisch + Karbide	-	50 bis 65
Fe9	4	1	4	4	2 und 3	1 und 2	3	austenitisch	200 bis 250	40 bis 50 ^b
Fe10	4	1	1 und 2	1	2	1	2	austenitisch	180 bis 200	38 bis 42 ^b
Fe11	4	3	1	4	1	1	1	austenitisch	-	-
Fe12	4	3	1	4	1	1	1	austenitisch	150 bis 250	-
Fe13	1	4	2	4	4	4	4	martensitisch / austeni- tisch + FeB	-	55 bis 65
Fe14	1	3 und 4	3	4	2	4	4	martensitisch / austeni- tisch + Karbide	-	40 bis 60
Fe15	1	4	2	4	3	4	4	martensitisch / austeni- tisch + Karbide	-	55 bis 65
Fe16	1	4	1	4	3	4	4	martensitisch / austeni- tisch + Karbide	-	60 bis 70
Fe20	1	3	3	4	3	4	4	Hartstoffe in einer Fe- Matrix	1500 HV bis 2800 HV (Hartstoffe)	50 bis 60 (Matrix)

Anwendungsbeispiele

Baggerzahn aus Mn-Hartstahl X120Mn12

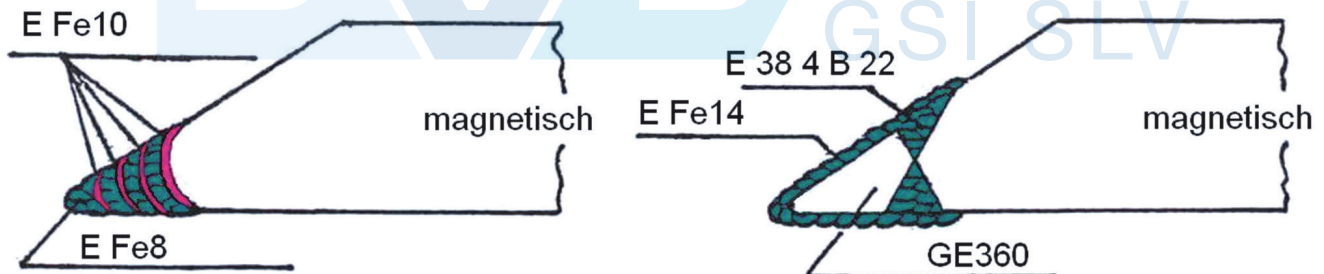


Mn-Hartstähle möglichst „kalt“ schweißen (Wasserbad)

- geringe Stromstärke
- kleine Elektrodendurchmesser
- kurzer Lichtbogen
- nur Strichraupen usw.

Baggerzahn aus niedrig legiertem Stahlguss GE360 (1.0597) $\triangle$ S355J2C (+N)

Vorwärmen auf 200 bis 300°C



Man unterscheidet zwischen Reib- und Schlagverschleiß. Die Rissgefahr steigt mit zunehmender Auftragsdicke und -fläche. Oft reicht gitter- oder punktförmiges Auftragen aus (Baumaschinen).

Reines Schweißgut tritt erst in der 3. Lage auf.

Bei weniger Lagen, Werte (z.B. Härte) der Elektroden 1 oder 2 Stufen höher wählen.

15 Stabelektroden zum Reparaturschweißen von Gusseisen, DIN EN ISO 1071

Gusseisenwerkstoffe sind bedingt schweißgeeignet und lassen sich mit den entsprechenden Verfahrenstechniken gut beherrschen. Dies gilt sowohl für Gusseisen mit Lamellen- oder Kugelgraphit als auch für Temperguss.

Einflussgrößen auf die Schweißeignung der Gusseisensorten sind:

- hoher C-Gehalt
- Sprödigkeit und geringe Bruchdehnung
- Hohe Eigenspannungen, dadurch die Gefahr der Rissbildung
- Niedriger Schmelzpunkt
- Düninflüssige Schmelze
- Hohe Gehalte an P und S.

Die DIN EN 1011-8 gibt hier wertvolle Empfehlungen zum Schweißen von Gusseisen.

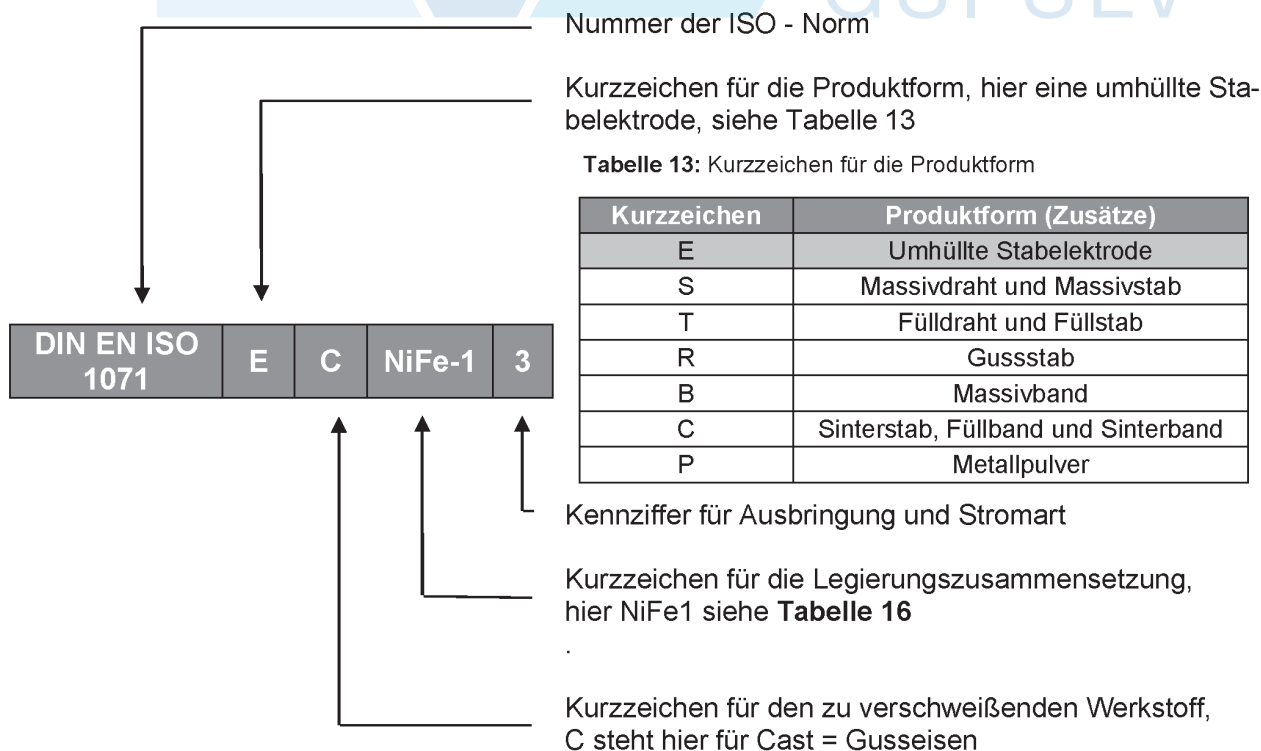
15.1 Kennzeichnung der Stabelektroden nach DIN EN ISO 1071

Stabelektroden werden nach ihrer chemischen Zusammensetzung nach Tabelle 15 **artgleich** und nach Tabelle 16 **artfremd** eingeteilt.

Die Einteilung besteht aus vier Merkmalen:

- Das erste Merkmal besteht aus dem Kurzzeichen für das Produkt;
- das zweite Merkmal beschreibt den zu verschweißenden Werkstoff (C für Gusseisen);
- das dritte Merkmal enthält das Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung der Stabelektrode;
- das vierte Merkmal besteht aus der Kennziffer für das Ausbringen und die Stromart.

Bezeichnungsmerkmale der Einteilung



15.2 Graugusswarmschweißen mit artgleichem Schweißzusatz

Das ganze Schweißteil wird langsam auf ca. 600°C angewärmt, geschweißt und wieder langsam im Ofen oder in heißem Sand bzw. in Asche abgekühlt.

Chemische Zusammensetzung der Stabelektroden und des reinen Schweißgutes nach DIN EN ISO 1071; Beispiele lt. Tabelle 14 und Tabelle 15:

E C FeC-3 Schweißgut: Lamellengraphit; basisch-graphitische Umhüllung; Schweißen von Gusseisen mit Lamellengraphit

E C FeC-GF (ferritisches Grundgefüge) und **E C FeC-GP2** (perlitisches Grundgefüge)

Schweißgut: Kugelgraphit; basisch-graphitische Umhüllung;

Schweißen von Gusseisen mit Kugelgraphit und neutral geglühtem (schwarzem) Temperguss

Tabelle 14: Schweißzusätze für Schweißgut, artgleich zum Grundwerkstoff

Kurzzeichen	Gefüge	Produktform ^a
FeC-1 ^b	Lamellengraphit	E, R
FeC-2 ^c	Lamellengraphit	E, T
FeC-3	Lamellengraphit	E, T
FeC-4	Lamellengraphit	R
FeC-GF	Grundgefüge ferritisch, Kugelgraphit	E, T
FeC-GP1	Grundgefüge perlitisch, Kugelgraphit	R
FeC-GP2	Grundgefüge perlitisch, Kugelgraphit	E, T
^a Kurzzeichen siehe Tabelle 13 ^b Bei umhüllten Stabelektroden besteht der Kernstab aus Gusseisen. ^c Bei umhüllten Stabelektroden besteht der Kernstab aus unlegiertem Stahl		

Tabelle 15: Auszug DIN EN ISO 1071: Chemische Zusammensetzung artgleich

Kurz- zei- chen	Pro- dukt- form	Chemische Zusammensetzung % ^{a, b, c}									
		C	Si	Mn	P	S	Fe	Ni ^d	Cu ^e	Ande- re	Sum- me sonst. Ele- mente
FeC-1	E, R	3,0 bis 3,6	2,0 bis 3,5	0,8	0,5	0,1	Rest	–	–	Al: 3,0	1,0
FeC-2	E, T	3,0 bis 3,6	2,0 bis 3,5	0,8	0,5	0,1	Rest	–	–	Al: 3,0	1,0
FeC-3	E, T	2,5 bis 5,0	2,5 bis 9,5	1,0	0,20	0,04	Rest	–	–	–	1,0
FeC-4	R	3,2 bis 3,5	2,7 bis 3,0	0,60 bis 0,75	0,50 bis 0,75	0,10	Rest	–	–	–	1,0
FeC-5	R	3,2 bis 3,5	2,0 bis 2,5	0,50 bis 0,70	0,20 bis 0,40	0,10	Rest	1,2 bis 1,6	–	Mo: 0,25 bis 0,45	1,0
FeC- GF	E, T	3,0 bis 4,0	2,0 bis 3,7	0,6	0,05	0,015	Rest	1,5	–	Mg: 0,02 bis 0,10 Ce: 0,20	1,0
FeC- GP1	R	3,2 bis 4,0	3,2 bis 3,8	0,10 bis 0,40	0,05	0,015	Rest	0,50	–	Mg: 0,04 bis 0,10 Ce: 0,20	1,0
FeC- GP2	E, T	2,5 bis 3,5	1,5 bis 3,0	1,0	0,05	0,015	Rest	2,5	1,0	Mg: 0,02 bis 0,10 Ce: 0,20	1,0
Z	E, R, T	Jede andere vereinbarte Zusammensetzung									

^a Einzelwerte sind Höchstwerte

^b Die Ergebnisse sind auf dieselbe Stelle zu runden wie die festgelegten Werte unter Anwendung Anhang B, Regel A von ISO 31-0:1992.

^c Für das Schweißgut und die Stäbe nach dieser Tabelle sind die in der Tabelle angegebenen Elemente zu bestimmen. Wenn es sich zeigt, dass weitere Elemente enthalten sind, dann ist ihr Gehalt zu ermitteln; dadurch wird sichergestellt, dass ihr Gesamtwert nicht den Grenzwert für die „Summe sonstiger Elemente“ in der letzten Spalte der Tabelle überschreitet.

^d Der Wert für Nickel kann das Begleitelement Kobalt einschließen.

^e Der Wert für Kupfer kann das Begleitelement Silber einschließen.

15.3 Graugusskaltschweißen mit einem artfremden Schweißzusatz

Der Vorteil eine Gusskaltschweißung liegt darin, dass im Reparaturfall in allen Positionen (außer PG) ohne aufwendige Vorwärmung geschweißt werden kann. Oft muss dazu das Bauteil nicht ausgebaut oder weiter demontiert werden. Die Wärmebelastung für den Schweißer, im Gegensatz zur Warmschweißung, ist geringer. Ein Nachteil ist der Farbunterschied des Schweißgutes.

Werkstückvorbereitung

- Risse mit geeignetem Prüfverfahren (z.B. Farbeindringprüfung) genau lokalisieren.
- Riss-Enden anbohren, um Kerbwirkung und damit ein Weiterreißen zu verhindern. Je nach Wanddicke sind Bohrerdurchmesser zwischen 5 und 10 mm zu wählen.
- Ausarbeiten des Risses, thermisch vor mechanisch, z.B. mit Ausnut-Elektroden. Fugen mit Druckluft oder Schleifen (bei öl- oder fettverunreinigten Bauteilen) ist nicht geeignet, da sonst beim Schweißen mit Gasbildung und einem porösem Schweißgut zu rechnen ist.
- Guss Haut und alle Rückstände (z.B. vom Ausnuten, Öl, Fett etc.) im Nahtbereich restlos entfernen.

Ausführung Kaltschweißung

Eingesetzt werden vorwiegend Nickel-, Nickel-Eisen- oder Nickel-Kupfer-Zusatzwerkstoffe nach DIN EN ISO 1071.

- Rücktrockenvorschriften der Elektrodenhersteller beachten
- Kleine Elektrodendurchmesser (2,5 mm oder 3,2 mm) wählen; mit dem kleineren beginnen.
- Lichtbogen möglichst kurz und Stromstärke möglichst gering halten.
- Im **Pilgerschrittverfahren** kurze Nahtabschnitte schweißen (Faustregel: Schweißlänge = Kernstabdurchmesser x 10; ca. 20 bis 30mm Länge; Breite max. doppelter Elektrodendurchmesser).
- Jede Schweißraupe sofort im „rotwarmen“ Zustand mit der Hammerfinne abhämmern.
- Poren sofort ausschleifen.
- Das Schweißteil darf nur **handwarm** werden, max. 60°C, um Wärmespannungen zu vermeiden. In Einzelfällen (große Werkstücke) kann es erforderlich sein, das Werkstück auf ca. 150°C vorzuwärmen und diese Temperatur bis zur Beendigung der Schweißarbeiten zu halten.

Hierzu können beispielsweise folgende Stabelektroden nach Tabelle 16 angewendet werden:

DIN EN ISO 1071 –

E C ST Unlegiertes Schweißgut zum Ausbessern kleiner Löcher und Risse. Wegen der Kohlenstoffaufnahme aus dem Gusseisen wird das Schweißgut weitgehend martensitisch und lässt sich nur durch Schleifen bearbeiten.

E C Ni-CI-A 1 Basisch-graphitische Nickel-Eisen-Elektrode mit hohem Nickelgehalt. Wegen des hohen Phosphorgehaltes im Gusseisen ist das Schweißgut empfindlicher gegen Heißrisse. Enthält mehr Aluminium als der Schweißzusatz E C Ni-CI, wodurch die Schweiß Eigenschaften verbessert werden. Das zulegierte Aluminium löst sich im Schweißgut und kann die Zähigkeit vermindern.

E C NiFe-2 3 Basisch-graphitische Stabelektrode. Mehrlagenschweißungen an Gusseisen mit Kugelgraphit und schwarzem Temperguss. Mischverbindungen zwischen Gusseisen und Stahl.

E C NiCu 1 Basische Nickel-Kupfer-Elektrode. Gut geeignet für Fülllagen bei Mehrlagenschweißungen an großen Nahtquerschnitten (Lamellen- und Kugelgraphit sowie schwarzem Temperguss). Gute Bindung an gealtertem Gusseisen. Vorteil: Farbähnlichkeit.

Tabelle 16: Auszug DIN EN ISO 1071: Chemische Zusammensetzung artfremder Stäbe und Drahtelektroden sowie artfremden Schweißgutes von umhüllten Sta-
belektroden und Fülldrahtelektroden.

Kurzeichen	Produktform	Chemische Zusammensetzung % a, b, c, d										Andere	Summe sonstiger Elemente
		C	Si	Mn	P	S	Fe	Ni ^e	Cu ^f				
Fe-1	E, S, T	2,0	1,5	0,5 bis 1,5	0,04	0,04	Rest	-	-	-	-	1,0	
St	E, S, T	0,15	1,0	0,80	0,04	0,04	Rest	-	0,35	-	-	0,35	
Fe-2	E, T	0,2	1,5	0,3 bis 1,5	0,04	0,04	Rest	-	-	-	Nb + V: 5,0 bis 10,0	1,0	
Ni-CI	E	2,0	4,0	2,5	-	0,03	8,0	min. 85	2,5	Al: 1,0	1,0	1,0	
	S	1,0	0,75	2,5	-	0,03	4,0	min. 90	4,0	-	-	1,0	
Ni-CI-A	E	2,0	4,0	2,5	-	0,03	8,0	min. 85	2,5	Al: 1,0 bis 3,0	1,0	1,0	
NiFe-1	E, S, T	2,0	4,0	2,5	0,03	0,03	Rest	45 bis 75	4,0	Al: 1,0	1,0	1,0	
NiFe-2	E, S, T	2,0	4,0	1,0 bis 5,0	0,03	0,03	Rest	45 bis 60	2,5	Al: Karbidbildner: 3,0	1,0	1,0	
NiFe-CI	E	2,0	4,0	2,5	-	0,04	Rest	40 bis 60	2,5	Al: 1,0	1,0	1,0	
NiFeT3-CI	T	2,0	1,0	3,0 bis 5,0	-	0,03	Rest	45 bis 60	2,5	Al: 1,0	1,0	1,0	
NiFe-CI-A	E	2,0	4,0	2,5	-	0,03	Rest	45 bis 60	2,5	Al: 1,0 bis 3,0	1,0	1,0	
NiFeMn-CI	E	2,0	1,0	10 bis 14	-	0,03	Rest	35 bis 45	2,5	Al: 1,0	1,0	1,0	
	S	0,50	1,0	10 bis 14	-	0,03	Rest	35 bis 45	2,5	Al: 1,0	1,0	1,0	
NiCu	E, S	1,7	1,0	2,5	-	0,04	5,0	50 bis 75	Rest	-	-	1,0	
NiCu-A	E, S	0,35 bis 0,55	0,75	2,3	-	0,025	3,0 bis 6,0	50 bis 60	35 bis 45	-	-	1,0	
NiCu-B	E, S	0,35 bis 0,55	0,75	2,3	-	0,025	3,0 bis 6,0	60 bis 70	25 bis 35	-	-	1,0	
Z	E, S, T	jede andere vereinbarte Zusammensetzung											
a Einzelwerte sind Höchstwerte, wenn nicht anders angegeben.													
b Die Ergebnisse sind auf dieselbe Stelle zu runden wie die festgelegten Werte unter Anwendung Anhang B, Regel A von ISO 31-0:1992.													
c Für das Schweißgut und die Stäbe nach dieser Tabelle sind die in der Tabelle angegebenen Elemente zu bestimmen. Wenn es sich zeigt, dass weitere Elemente enthalten sind, dann ist ihr Gehalt zu ermitteln; dadurch wird sichergestellt, dass ihr Gesamtwert nicht den Grenzwert für die „Summe sonstiger Elemente“ in der letzten Spalte der Tabelle überschreitet.													
d Einige Kupfer-Zinn-Schweißzusätze sind in der Tabelle nicht enthalten; sie können erfolgreich zum Fügenlöten von Gusseisen verwendet werden. Das Schweißgut unterscheidet sich farblich von den Gusseisen.													
e Der Wert für Nickel kann das Begleitelement Kobalt einschließen.													
f Der Wert für Kupfer kann das Begleitelement Silber einschließen.													

^a Einzelwerte sind Höchstwerte, wenn nicht anders angegeben.

^b Die Ergebnisse sind auf dieselbe Stelle zu runden wie die festgelegten Werte unter Anwendung Anhang B, Regel A von ISO 31-0:1992.

^c Für das Schweißgut und die Stäbe nach dieser Tabelle sind die in der Tabelle angegebenen Elemente zu bestimmen. Wenn es sich zeigt, dass weitere Elemente enthalten sind, dann ist ihr Gehalt zu ermitteln; dadurch wird sichergestellt, dass ihr Gesamtwert nicht den Grenzwert für die „Summe sonstiger Elemente“ in der letzten Spalte der Tabelle überschreitet.

^d Einige Kupfer-Zinn-Schweißzusätze sind in der Tabelle nicht enthalten; sie können erfolgreich zum Fugenlöten von Gusseisen verwendet werden. Das Schweißgut unterscheidet sich farblich von den Gusseisen.

^e Der Wert für Nickel kann das Begleitelement Kobalt einschließen.

^f Der Wert für Kupfer kann das Begleitelement Silber einschließen.

16 Sonderelektroden

16.1 Schneid-/Ausnutelektroden

Stabelektrode mit Spezialumhüllung zum Ausnuten, Fugen, Lochstechen und Schneiden (Schrottschnitt) ohne Sauerstoff.

Durch den Lichtbogen wird das Metall geschmolzen und durch die starke Gasentwicklung der Sonderumhüllung ausgeblasen.

Anwendung

- Einfache Nahtvorbereitungen,
- Ausfugen von Wurzelnähten,
- Entfernung überschüssigen Schweißgutes,
- Ausfugen von Rissen zur Reparaturschweißung (siehe Abschnitt 15.3.).

Elektrode senkrecht halten, bis der Lichtbogen zündet. Danach auf einen Winkel von 15 bis 20° neigen. Mit sägender Bewegung vorwärts schieben, sodass das geschmolzene Metall nach vorn aufgeblasen wird. Für tiefe Fugen wiederholen.

Die Ausnutgeschwindigkeit liegt bei 100 bis 150 cm/min.

Bei hochlegierten Stählen muss eine Entfernung der aufgekohlten Randzone im Schnittbereich erfolgen.

In geschlossenen Räumen ist wegen der starken Rauchentwicklung abzusaugen.

16.2 Schneidelektroden – Hohlstabelektroden

Spezialelektrodenhalter mit Strom und O₂-Zuführung (5 bar) notwendig.

Auch für grobes Trennen von Teilen, die mehrschichtig aufeinander liegen.

Unterwasserschneiden ist mit wasserabweisender Schutzschicht auf der Elektrodenumhüllung möglich.

Schweißgerät: DC +Pol an der Elektrode, pro mm Elektrodendurchmesser ca. 50 A.

Starker Funkenflug und starke Rauchentwicklung.

16.3 Kohleelektroden (meist verkupfert Arc-Air-Verfahren)

Spezialelektrodenhalter mit Strom und Pressluftzuführung (min. 5 bar) notwendig.

Anwendung

- Geeignet für un-, niedrig- und hochlegierte Stähle
- Ausfugen für das Gegenlagenschweißen
- Ausfugen von Schweißnahtfehlern
- Trennen von verschweißten Bauteilen
- DC +Pol an der Elektrode
- Pro mm Elektrodendurchmesser ca. 50 A.
- Starke Rauchentwicklung
- Laut

16.4 Vorwärmelektroden

Für Anwärmarbeiten im „schlosserischen Bereich“; ergibt kein metallisches Schweißgut; starke Rauchentwicklung.

17 Schweißdurchführung

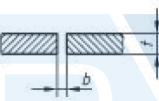
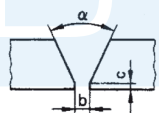
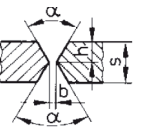
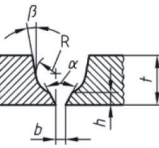
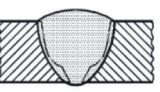
17.1 Nahtvorbereitung

17.1.1 Stumpfnähte

In Tabelle 17 sind die wichtigsten Fugenformen bei Stumpfnähten aufgeführt. Die DIN EN ISO 9692-1 gibt weitere Empfehlungen für die Nahtvorbereitung. Das Anfäsen der Fugekanten erfolgt in der Regel durch autogenes Brennschneiden (Stahl) oder Plasmaschneiden (CrNi-Stähle); andere mechanische und thermische Verfahren wie Drehen, Fräsen, Fugenhobeln etc. sind auch anzutreffen.

Das Entfernen der beim Brennschneiden entstehenden Oxidschichten empfiehlt sich auch beim Lichtbogenhandschweißen. Beschichtungen, Farben etc. sollten im Nahtbereich ebenfalls entfernt werden. Bei kleineren Rohrdurchmessern im Rohrleitungsbau erfolgt die Nahtvorbereitung meist durch Schleifen mit Winkelschleifern. Eine saubere Nahtvorbereitung erleichtert die Schweißarbeiten und wirkt sich positiv auf die Schweißgeschwindigkeit aus. Bei dickwandigen Rohren, u.a. im Hydraulik- und Kraftwerksbau wird oft auch eine U-Nahtvorbereitung angewendet. Diese Vorbereitung ist bedingt durch das geringere Nahtvolumen wirtschaftlicher.

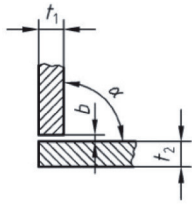
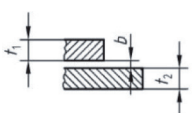
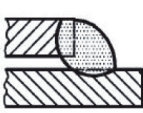
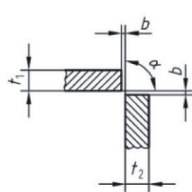
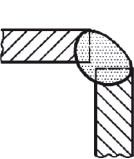
Tabelle 17: Schweißnahtvorbereitung, Lichtbogenhandschweißen Stahl

Werkstück- dicke s / t mm	Nahtart	Nahtaufbau	Abstand b mm	Steghöhe c mm	Öffnungs- winkel α, β	Bemerkung
bis 3			$\approx t$			
> 3			≤ 4	≤ 2	60°	
> 10			$1 \leq b \leq 3$	≤ 2	60°	
> 12			$1 \leq b \leq 3$	$h \approx 4$	$60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ $8^\circ \leq \beta \leq 12^\circ$	$6 \leq R \leq 9$

17.1.2 Kehlnähte

Die häufigsten Nähte bei Stahlkonstruktionen sind Kehlnähte. Im Allgemeinen werden sie als gleichschenklige Nahtformen angewandt. Kehlnähte erfordern meist keine besondere Nahtvorbereitung, jedoch ist darauf zu achten, den Abstand b der beiden Bauteile möglichst gering zu halten. Im ungünstigen Fall kann Schlacke durch den Spalt vor das Schweißbad laufen und somit zu Schweißnahtfehlern führen.

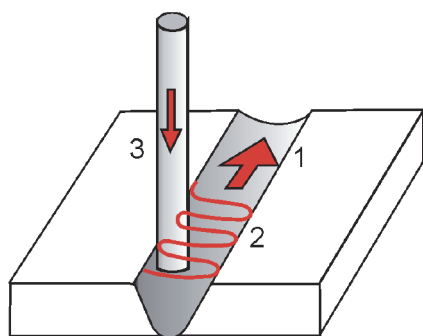
Tabelle 18: Kehlnahtvorbereitung

Vorbereitung	Nahtart	Nahtaufbau	Spalt b mm	Winkel α	Bemerkung
Stirnfläche rechtwinklig			≤ 2	$70^\circ \leq \alpha \leq 100^\circ$	anzustreben $b = 0$
Stirnfläche rechtwinklig			≤ 2	60°	anzustreben $b = 0$
Stirnfläche rechtwinklig			≤ 2	$60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$	

17.2 Elektrodenführung und Nahtaufbau

Elektrodenführung und Nahtaufbau richten sich nach

- Grundwerkstoff und Nahtdicke,
- Nahtart und Schweißlage,
- Schweißposition,
- Blaswirkung,
- Wärmewirkung des Schweißlichtbogens,
- Umhüllungstyp und der Umhüllungsdicke der Stabelektroden.

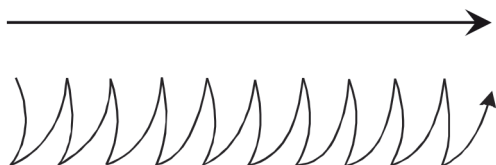


- 1 fortschreitende Bewegung
- 2 evtl. Pendelbewegung
- 3 nachführende Bewegung

Abbildung 19: Elektrodenführung

Die Elektrode wird hierbei ca. 10° in Schweißrichtung geneigt. Optimal wäre, ein zum Bauteil senkrechte Führung. Die Blaswirkung (siehe Abschnitt 17.3) kann ein Verändern des Neigungswinkels erfordern.

Strich- und Pendelraupen



Wird die Elektrode zügig, ohne größere Pendelbewegungen geführt, so spricht man von **Strichraupen**.

Wird die Elektrode pendelnd geführt, so spricht man von **Pendelraupen**.

Abbildung 20: Strich- und Pendelraupe

Die im Folgenden empfohlene Arbeitsweise ist ein erster Anhalt. Sie gilt für umhüllte Elektroden.

Kehlnähte in Wannenlage (PA)

Wurzel

1.Fülllage

(2.Fülllage bei Strichraupen)

Decklage

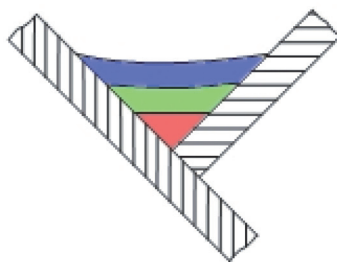


Abbildung 21: Pendelraupen

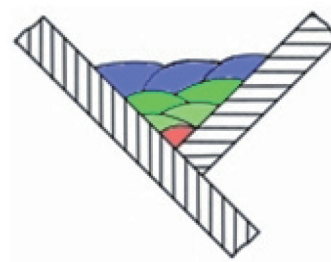


Abbildung 22: Strichraupen

Kehlnaht horizontal (PB)

Wurzel

Fülllage

Decklage

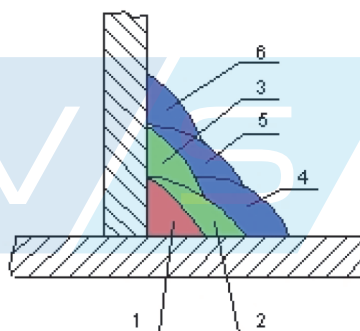
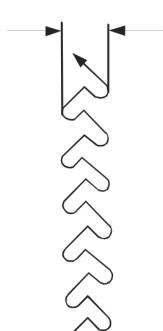


Abbildung 23: Beispiele für den Lagenaufbau

Kehlnähte in Steigposition (PF)

max. 2 x Elektroden-Ø

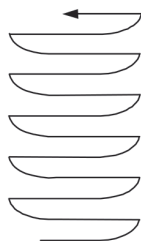


offene

Dreieckführung
Wurzel Kehlnaht



geschlossene



Pendelraupe
Decklage

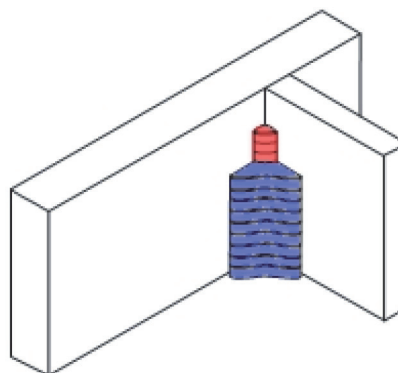


Abbildung 25: Elektrodenführung Kehlnaht PF

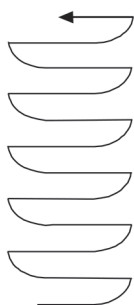
Abbildung 24: Lagenaufbau

Stumpfnähte in Steigposition (PF)

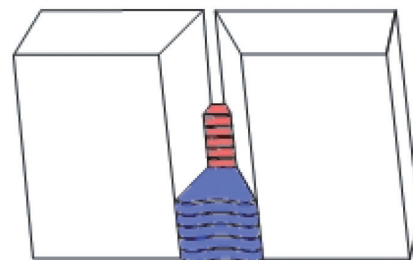


Elektrodenführung für die
Stumpfnahtwurzel und
Fülllage(n)

Abbildung 26: Elektrodenführung Stumpfnah PF



Pendelraupe
Decklage



Wurzel
Decklage

Abbildung 27: Lagenaufbau Stumpf-
naht

Kehlnähte in Überkopposition (PE)

Wurzel

1.Fülllage

2.Fülllage

Decklage

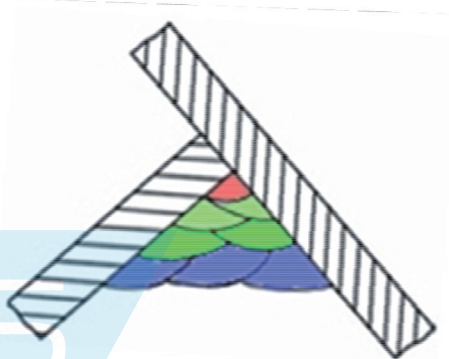


Abbildung 28: Strichraupen PE

V-Nähte Querposition (PC)

Wurzel

1.Fülllage

2.Fülllage

3.Fülllage

Decklage

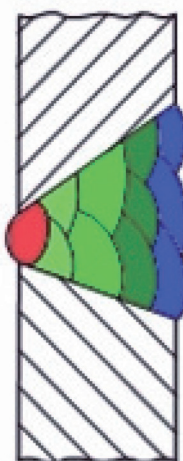


Abbildung 29: Strichraupen PC

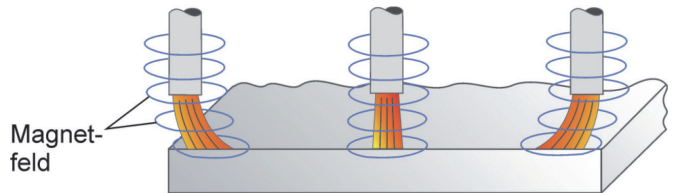
17.3 Blaswirkung

Der Lichtbogen ist, wie jeder Stromleiter, von einem Magnetfeld umgeben. Wird das gleichmäßige Ausbreiten des Magnetfeldes behindert, so ergibt sich eine Ablenkung des Lichtbogens: **die Blaswirkung**.

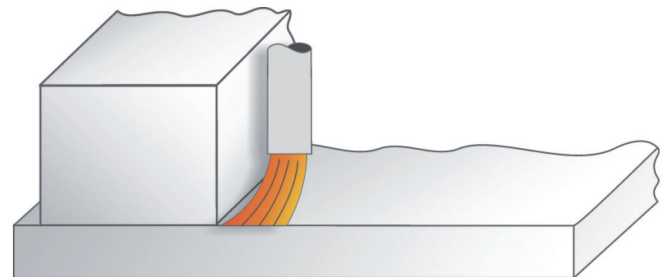
Häufige Gründe für Blaswirkung sind:

- Schweißen am Werkstückrand
- Schweißen neben großen Werkstückmassen
- Schweißen in der Nähe eines Werkstückanschlusses

a) Schweißen am Werkstückrand



b) Schweißen neben großen Werkstückmassen



c) Schweißen in der Nähe des Werkstückanschlusses

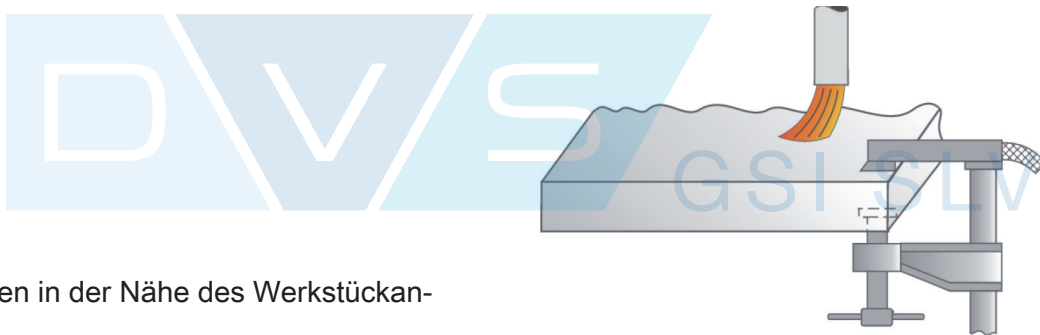


Abbildung 30 a,b,c: Ursachen für Blaswirkung

Maßnahmen gegen die Blaswirkung sind:

- Lichtbogenlänge kurz halten
- Neigungswinkel der Stabelektrode verändern
- Werkstückanschluss beidseitig anbringen oder Werkstückanschluss verschieben
- Zahlreiche Heftstellen schweißen
- Richtige Schweißfolge wählen
- Wenn möglich, Wechselstrom anstelle von Gleichstrom anwenden

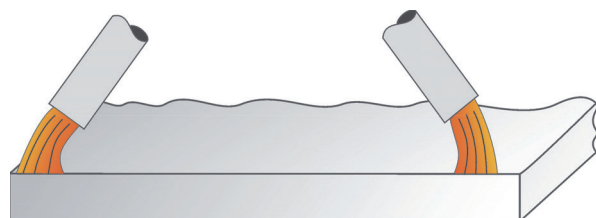


Abbildung 31: geänderter Neigungswinkel

17.4 Ausbringen von Stabelektroden

$$\text{Ausbringung in \%} = \frac{\text{Gewicht des Schweißgutes}}{\text{Gewicht des abgeschmolzenen Kernstabes}} \cdot 100$$

Durch zusätzliches Metallpulver in der Umhüllung kann die Ausbringung über 100% gesteigert werden.

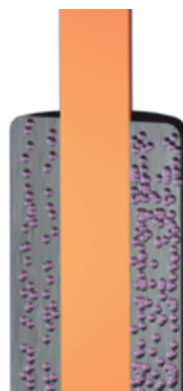
Beispiel:

Ausbringung $\leq 105\%$
 $\varnothing 4 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$
 Gewicht des Kernstabs
 40 g
 Umhüllung ohne Metallpulver



Gewicht des Schweißgutes gleich Gewicht des abgeschmolzenen Kernstabes.

Ausbringung 160%
 $\varnothing 4 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$
 Gewicht des Kernstabs
 40 g
 Umhüllung enthält Metallpulver (ca. 25 g)



Gewicht des Schweißgutes ist um 60% größer als das Gewicht des abgeschmolzenen Kernstabes (Kernstab + Metallpulver).

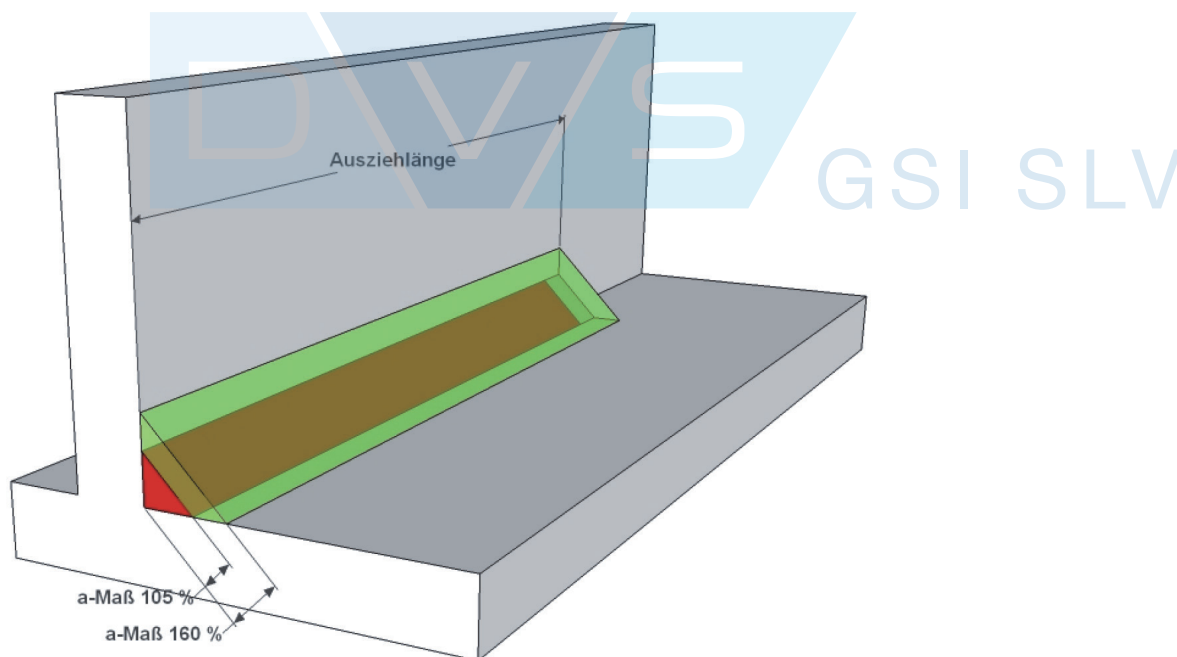


Abbildung 32: Änderung a-Maß bei Hochleistungselektroden bei kaum veränderter Ausziehungslänge

Hochleistungselektroden können in Horizontalposition, teilweise nur in Wannenlage verschweißt werden. Stromstärke und Abbrenngeschwindigkeit sind, gegenüber Elektroden mit normaler Ausbringung, höher.

Eisen- oder Metallpulver in Elektrodenumhüllungen erhöht das metallische Ausbringen und die Abschmelzleistung.

17.5 Wahl einer günstigen Schweißposition

Alle Schmelzschweißverfahren erzielen in der **Wannenposition** (PA) die höchsten Abschmelzleistungen in Verbindung mit einer guten Nahtausbildung und einem tiefen Einbrand.

Tabelle 19 zeigt nach Malisius den Einfluss der Schweißposition auf die Fertigungszeit. Abbildung 33 zeigt den Vergleich ungefährender Ausführungszeiten beim Stabelektrodenschweißen, bezogen auf die Wannenposition (PA) bei gleichem Einschweißquerschnitt (nach Aichele). **Abbildung 34** zeigt Bereiche der Abschmelzleistungen von verschiedenen Schmelzschweißverfahren.

PA (w)	PB (h)	PC (q)	PF (s)	PD (hü), PE (ü)
100%	130%	180%	220%	220 bis 250%

Abbildung 33: Vergleich von Ausführungszeiten beim E-Handschweißen, bezogen auf die Wannenposition PA

Tabelle 19: Einfluss der Schweißposition auf die Fertigungszeit

Schweißposition		Anzahl der Raupen	Stabelektroden-durchmesser mm	reine Schweißzeit min/m	Fertigungszeit min/m	Vergleich %
Kehlnähte, a-Maß 6 mm						
horizontal	h (PB)	2	5	8,5	15,7	100
Wannenlage	w (PA)	1	5	8,1	14,2	90
senkrecht steigend	s (PF)	2	4	12,4	24,2	154
senkrecht fallend	f (PG)	3	4	12,6	24,7	158
überkopf	ü (PE)	5	4	13,0	34,0	217
Stumpfnähte, 8 mm V-Fugenvorbereitung ohne Gegenschweißen der Wurzel						
waagerecht	w (PA)	2	4	13,7	25,0	100
quer an senkrechter Wand	q (PC)	5	3,25/4	16,2	31,2	125
senkrecht steigend	s (PF)	2	3,25/4	16,3	31,3	126
senkrecht fallend	f (PG)	4	3,25/4	16,5	31,7	127
überkopf	ü (PE)	5	3,25/4	20,0	54,0	216

18 Wirtschaftlichkeit

Das Schweißen mit umhüllten Stabelektroden wird heute hauptsächlich dort angewendet, wo „Hochleistungsschweißverfahren“ nicht oder nicht wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Dies ist besonders beim Schweißen auf einer Baustelle im Freien der Fall. Oft sind einfache Gerätetechnik oder die guten mechanischen Gütewerte des Schweißgutes ein Vorteil.

Abbildung 34 zeigt einen Vergleich der Abschmelzleistungen. Bei vergleichbaren Bedingungen zwischen dem MAG-Schweißen und dem Schweißen mit umhüllten Stabelektroden fällt ein reiner Vergleich der Abschmelzleistungen zum Vorteil für die MAG-Schweißung aus.

Dennoch gibt es viele Bereiche in der Schweißtechnik, die den umhüllten Stabelektroden gehören, z.B. Reparaturen, Montageschweißungen, Schweißen im Freien, Fallnahtschweißung im Rohrleitungsbau und auch viele Aufgaben im Behälter- und Anlagenbau, wie die Beispiele zeigen.

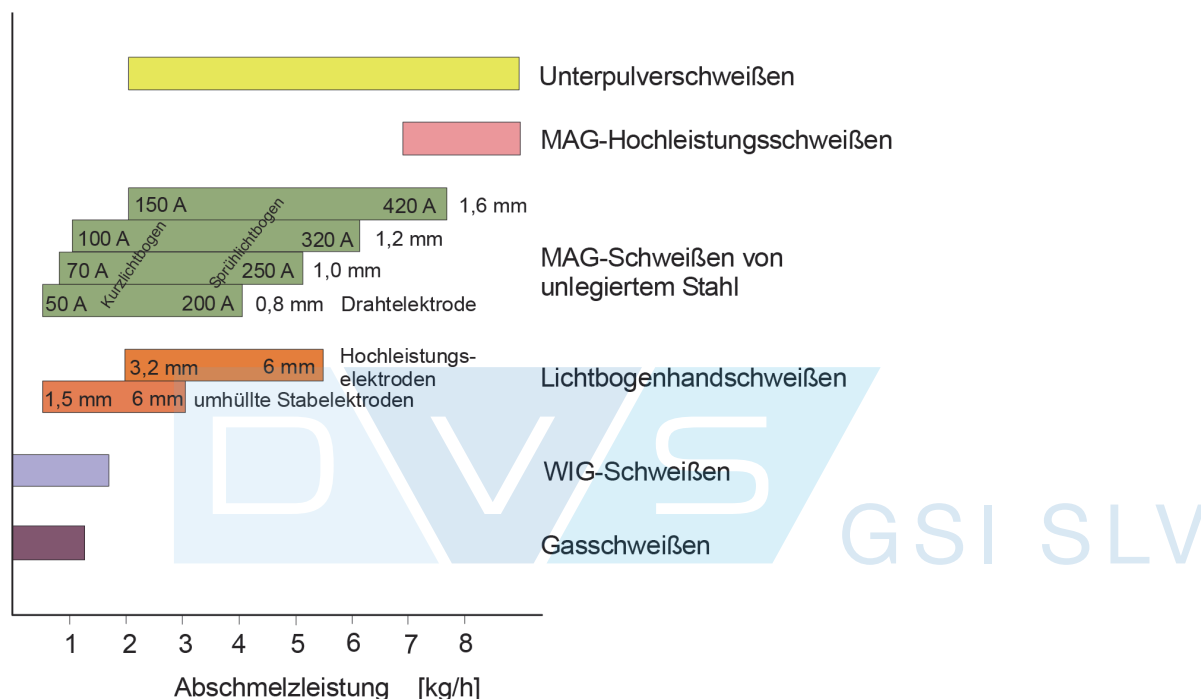


Abbildung 34: Bereiche der Abschmelzleistungen verschiedener Schmelzschweißverfahren

19 Fallnahtschweißen

Das Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden in der **Fallnahttechnik** ist im erdverlegten Rohrleitungsbau zu der wirtschaftlichsten **Handschweißmethode** geworden.

Haupteinflussfaktoren sind:

- Rohrgrundwerkstoff und die Rohrabmessungen
- Die verwendeten umhüllten Stabelektroden, die Schweißstromquellen und die Vorrichtungen
- Personelle Voraussetzungen: ausgebildete und geübte **Schweißer** und eine erfahrene **Schweißaufsichtsperson**
- Schweißtechnologische Kenntnisse und Erfahrungen mit der Arbeitsvorbereitung, dem Schweißprozess, der Nahtnachbearbeitung und der Prüftechnik
- Geländeverhältnisse und Witterungsbedingungen



Abbildung 35: Baustelle – Verlegung einer Erdgastrasse in Deutschland

19.1 Umhüllte Stabelektroden für den Rohrleitungs- und Pipelinebau

Im erdverlegten Rohrleitungsbau werden in Deutschland ca. 85% **zelluloseumhüllte** Fallnahtelektroden angewendet.

Aber auch **basischumhüllte** Fallnahtelektroden kommen heute, meist für höherfeste Rohrstähle, zum Einsatz.

In diesem Abschnitt wird die **Fallnahtschweißung** mit **zelluloseumhüllten** Stabelektroden behandelt.

Die zelluloseumhüllten Stabelektroden (Eigenschaften siehe auch Abschnitt 10.3) erzeugen durch die organischen Bestandteile in der Umhüllung – in Verbindung mit einer definierten Restfeuchtigkeit (sie

dürfen nicht rückgetrocknet werden) – einen scharfen, stechenden Lichtbogen und wenig Schlacke, was das Schweißen in fallender Position ermöglicht. Die Schutzgasatmosphäre besteht aus Kohlendioxyd und Wasserstoff. Der vorhandene Wasserstoff begünstigt zwar die Fallnahtschweißung, führt aber zu erhöhten Wasserstoffgehalten im Schweißgut.

Zur schnelleren Wasserstoffabgabe (Effusion) nach dem Schweißen ist es notwendig, die Rohre auf 40 bis 150°C (je nach Wanddicke, 5 bis 25mm) vor dem Schweißen anzuwärmen, dies vermindert auch die Gefahr einer Unternahtsbildung.

Die zelluloseumhüllten Stabelektroden sind dünn- bis mitteldick umhüllt.

Hauptsächlich werden folgende Elektrodentypen angewendet:

DIN EN ISO 2560-A – E 42 2 C 25 (z.B. Thyssen Cel 70)

Für alle Rohrnähte /-lagen in fallender Position. Besonders geeignet für **Wurzellagen** (auch steigend).

DIN EN ISO 2560-A – E 46 3 C 25 (z.B. Thyssen Cel 80)

Für alle Rohrnähte in fallender Position. Für **Wurzellagen, Hotpass, Füll- und Decklagen**.

DIN EN ISO 2560-A – E 50 3 1Ni C 25 (z.B. Thyssen Cel 90)

Für alle Rohrnähte in fallender Position. Besonders geeignet für **Hotpass, Füll- und Decklagen**.

19.2 Schweißstromquellen

Auch die Auswahl einer geeigneten „fallnahtsicheren“ **Schweißstromquelle** ist von großer Bedeutung.

Zelluloseumhüllte Stabelektroden stellen einige besondere Forderungen an die Schweißstromquellen.

Diese sind:

- eine **steil-fallende Belastungskennlinie** mit einer **möglichst hohen Leerlaufspannung** (< 80V bis 90 V),
- **reiner Gleichstrom**, mit geringem Oberwellenanteil,
- eine **einstellbare Stromerhöhung** in Kurzschlussnähe, ArcForce (siehe Abbildung 36),
- eine **Ferneinstellung**, damit eine Schweißstromeinstellung in Abhängigkeit von der Schweißposition möglich wird und
- eine **Polumschaltung**:
- -Pol für die Wurzelschweißung
- +Pol für Hotpass, Füll- und Decklagen.

Diese Bedingungen werden oft sehr gut von **fahrbaren Schweißaggregaten** (Diesel-/Benzinmotor plus Gleichstromgenerator) erfüllt. Es sind auch „fallnahtsichere“ Schweißinverter im Stromquellenprogramm vorhanden.

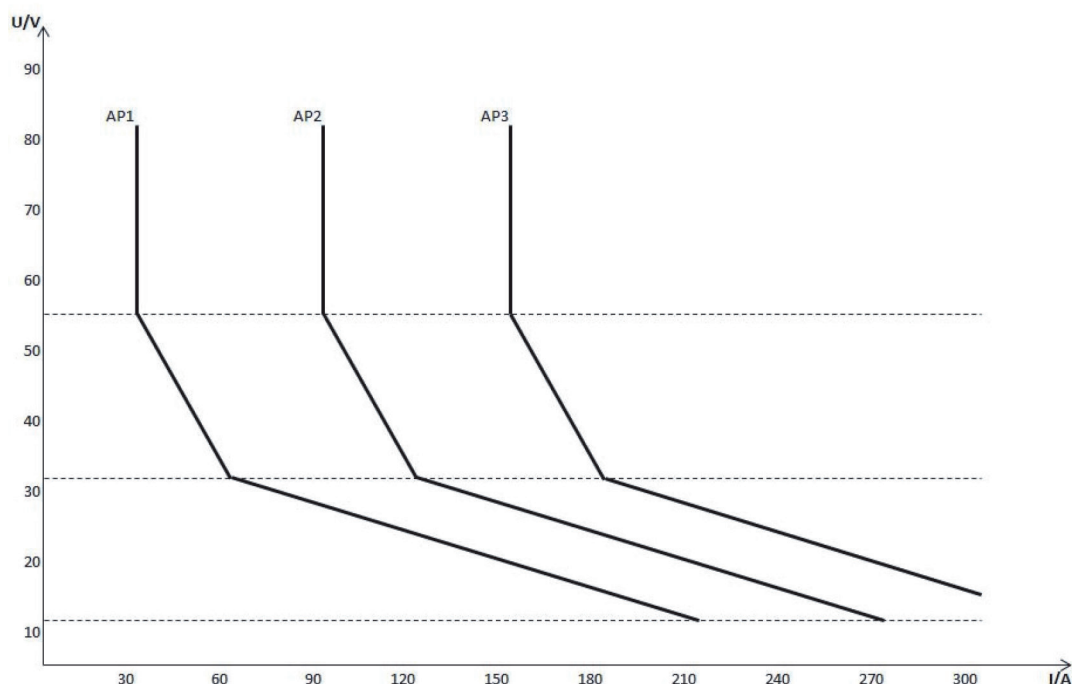


Abbildung 36: Belastungskennlinie einer Schweißstromquelle mit Kurzschlussstromerhöhung zum Fallnahtschweißen (Quelle: EWM Hightec Welding GmbH)

19.3 Arbeitstechniken beim Fallnahtschweißen mit zelluloseumhüllten Stabelektroden

Das Fallnahtschweißen mit zelluloseumhüllten Stabelektroden erfordert einige Besonderheiten in der Arbeitstechnik. Nachfolgend wird auf folgende Forderungen eingegangen:

1. Nahtvorbereitung
2. Arbeitstechniken, Elektrodenhaltung, Schweißen der Wurzellage (Rootpass)
3. Schweißen der Fülllagen und der Decklage

19.3.1 Nahtvorbereitung

Für Rohre mit Wanddicken bis ca. 20 mm wird eine V-Naht-Vorbereitung mit Steg und einem Öffnungswinkel von 60° gemäß Abbildung 37 werksseitig angebracht. (Bei Rohren bis 80 mm Nenndurchmesser genügt auch oft ein Flankenwinkel kleiner als 60°). Rohrstücke oder Segmente müssen entsprechend von Hand vorgerichtet werden. Eine saubere Nahtvorbereitung ist für eine schnelle, wirtschaftliche Schweißung unerlässlich. Die Toleranzen für die Nahtvorbereitung müssen unbedingt eingehalten werden und die so vorbereitete Schweißnaht darf nicht während des Transports oder auf der Baustelle wieder beschädigt werden.

Das Schweißen erfolgt bei Verwendung von Innen- oder Außenzentriervorrichtungen ohne Heften. Die Zentriereinrichtungen können entfernt werden, wenn bei Außenzentrierung mindestens 60% der Wurzellage, bei Innenzentrierung die Wurzellage und der Hotpass fertiggestellt wurden. Einzelheiten zur Bauart und zur Verwendung der Zentriervorrichtungen sind in die Schweißanweisung aufzunehmen.

Können keine Zentriereinrichtungen verwendet werden, müssen Heftstellen mit dem für die Wurzellage vorgesehenen Schweißverfahren durchgeführt werden. Mindestens drei Heftstellen müssen gleichmäßig um den Rohrumfang verteilt sein. Der Höchstabstand darf nicht mehr als 400 mm bzw. 25 x T betragen. Die Heftschweißnähte sollen für Rohre ≤ DN 400 mindestens 25 mm, für Rohre > DN 400 mindestens

50 mm lang sein. Gerissene Heftstellen dürfen nicht überschweißt werden, sondern sind auszuschleifen und neu zu schweißen.

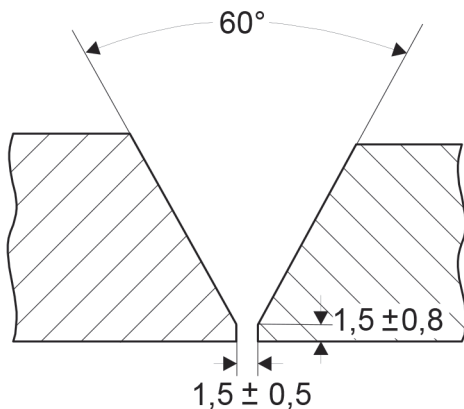


Abbildung 37: V-Nahtvorbereitung zum Fallnaht-Rohrschweißen



Abbildung 38: Innenzentrier-Vorrichtung für die Fallnahtschweißung von erdverlegten Großrohren

19.3.2 Arbeitstechniken, Elektrodenhaltung

Die Fallnahtschweißung beginnt in der 12-Uhr-Position – fallend nach beiden Seiten. Die zelluloseumhüllten Stabelektroden werden fast senkrecht (etwa 10° geneigt), wie in Abbildung 39 dargestellt, verschweißt. Durch diese Elektrodenhaltung bildet sich eine runde Schweißöse und der Lichtbogen brennt bei der Wurzelschweißung mehr an der Rohrinneenseite.

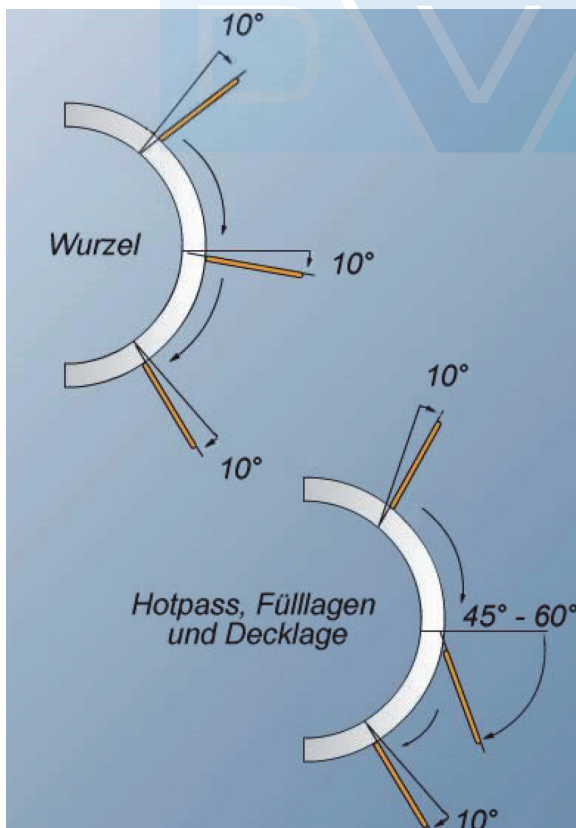


Abbildung 39: Neigungswinkel in Abhängigkeit von der Schweißposition



Abbildung 40: Fallnahtschweißen mit zelluloseumhüllten Stabelektroden

19.3.3 Lagenaufbau

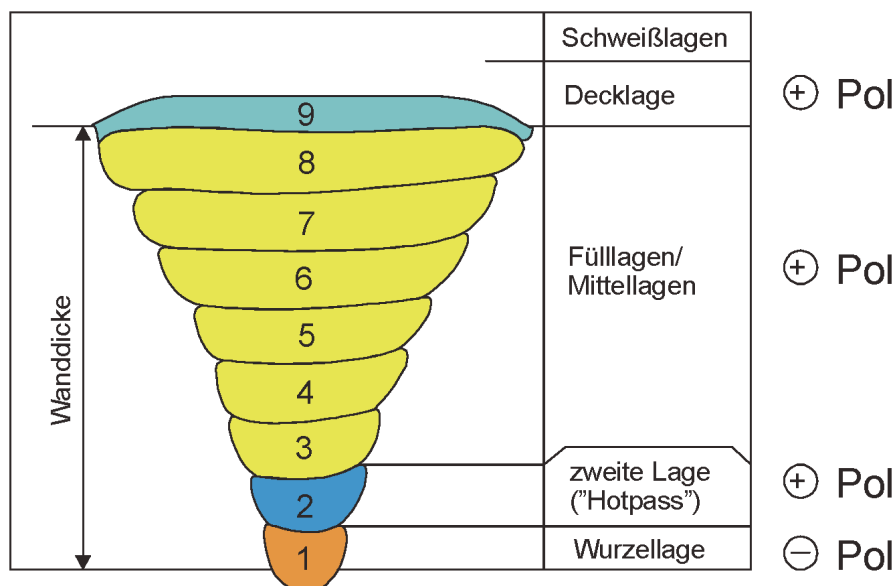


Abbildung 41: Lagenaufbau

- 1 Wurzellage
- 2 Hotpass (2. Lage oder Heißlage)
- 3 – 8 Fülllagen/Mittellagen
- 9 Decklage

$$\text{Mindestlagenzahl} \geq \frac{t}{3}$$

Tabelle 20: Technologische Parameter zum Fallnahtschweißen, entsprechend Lagenaufbau nach Abbildung 41

Wand- di- cken [mm]	Wurzellage			Hotpass			Fülllagen			Decklage		
	El.- Ø [mm]	I _s [A]	Strom- art, Polung	El.- Ø [mm]	I _s [A]	Stromart, Polung	El.- Ø [mm]	I _s [A]	Stromart, Polung	El.- Ø [mm]	I _s [A]	Stromart, Polung
3 – 4	2,5	50– 80	= / -	3,25	120– 140	= / +	3,25	100– 120	= / +	3,25	80– 100	= / +
4 – 6	3,25	80– 110	= / -	4,0	180– 190	= / +	5,0	160– 180	= / +	5,0	140– 160	= / +
6 – 10	4,0	120– 140	= / -	4,0	170– 190	= / +	5,0	180– 200	= / +	5,0	160– 180	= / +
10 – 15	4,0	140– 160	= / -	4,0	170– 190	= / +	5,0	180– 220	= / +	5,0	170– 200	= / +
15	4,0	140– 160	= / -	5,0	190– 210	= / +	5,5	220– 250	= / +	5,0	170– 200	= / +

19.3.3.1 Schweißen der Wurzellage (Rootpass)

Die Elektrode wird am –Pol ohne zu pendeln nur so schnell gezogen, dass sich oberhalb der Schweißöse das Schweißgut zu einer geschlossenen Schweißraupe ausbilden kann. Der Lichtbogen „bläst“ durch den Spalt und schmilzt dabei die Wurzelkante mit auf. Beide Kanten müssen von der Wurzellage erfasst sein.

Nach der Wurzelschweißung müssen die seitlichen Schlacken ausgeschliffen und die Überhöhung in der Nahtmitte flachgeschliffen werden.

Bei Rohrdurchmessern > 400 mm ist es üblich, dass zwei Schweißer gleichzeitig gegenüber arbeiten, um Verzug zu vermeiden und dadurch die Fugenbreite konstant halten.

19.3.3.2 Schweißen der Fülllagen und der Decklage

Die erste Fülllage, der Hotpass, wird mit der max. Stromstärke, die vom Hersteller für diesen Elektroden-durchmesser angegeben ist, am +Pol verschweißt.

Durch eine spezielle Elektrodenführung – 6-Uhr- und 12-Uhr-Position ca. 80 bis 90°, 3-Uhr- und 9-Uhr-Position ca. 45° und den hohen Strom wird die Wurzel wieder teilweise aufgeschmolzen, gut „durchge-glüht“ sowie Schlackenreste ausgespült.

Der Hotpass muss unmittelbar nach dem Schweißen der Wurzel eingebracht werden, d.h. in einer Wär-me geschweißt werden. Bei höherfesten Rohrstählen sollten zwischen dem Schweißen der Wurzel und Hotpass maximal 10 Minuten liegen. Auch darf, bis der Hotpass fertiggestellt ist, das Rohr auf keinen Fall bewegt werden, andernfalls besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit von Unternahrissen.

Für die weiteren Fülllagen wird die Stromstärke wieder etwas verringert, mit leicht pendelnden oder step-penden Bewegungen über die ganze Nahtbreite flach geschweißt. Die Pendelbreite darf den Wert 3-mal Elektrodenkernstabdurchmesser nicht überschreiten.

Es können Ausgleichsraupen in den reinen Fallpositionen (2 bis 4 Uhr und 10 bis 8 Uhr) notwendig sein, um die Nahtdicke gleichmäßig zu halten (höhere Schweißgeschwindigkeit und geringerer Materialein-trag).

Die Decklage wird ebenfalls am +Pol geschweißt, aber die Stromstärke um 20 bis 30 A reduziert (siehe auch Tabelle 20). Die Nahtflanken werden bis zu 1,5 mm überschweißt. Die Nahtüberhöhung beträgt, bei richtiger Ausführung, etwa 1 bis 2 mm. Poren treten hier auf, wenn das Schweißgut überhitzt oder die Pendelbreite zu groß wird.

Nach Beendigung der Schweißarbeiten sollte die Naht noch ca. 30 Minuten bei 150°C abgedeckt wer-den, um die Effusion des Wasserstoffes zu beschleunigen.

19.4 Zusammenfassung

Fallnahtschweißen im Rohrleitungsbau:

Es sind spezielle Zellulose-Fallnahtelektroden, „fallnahtsichere“ Schweißstromquellen und Schweißvor-richtungen erforderlich.

Das Fallnahtschweißen erfordert eine gesonderte Schweißerprüfung, für den DVGW-Bereich mit spezi-ellen Anforderungen, diese sind z.B. im DVGW-Arbeitsblatt GW 350 geregelt.

Die Vorbereitung der Schweißnähte ist etwas aufwendiger und erfordert eine höhere Sorgfalt.

Schweißnähte müssen „in einer Wärme“ fertiggeschweißt werden, um die Effusion des Wasserstoffes zu erhöhen. Die Zwischenlagentemperatur sollte 80°C, bei höherfesten Rohren 150°C nicht unterschreiten.

Bei richtiger Arbeitstechnik werden **röntgensichere Nähte** bei **guten bis sehr guten Gütewerten** des Schweißgutes, einer **großen Schweißgeschwindigkeit** und einer **hohen Abschmelzleistung** erreicht. Die Streckenenergie ist wesentlich geringer als bei der Steignahtschweißung.

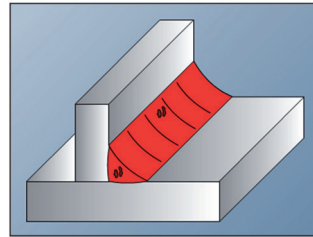
Die Schweißnähte haben ein etwas grobschuppiges Nahtaussehen.

20 Schweißnahtunregelmäßigkeiten und ihre möglichen Ursachen

20.1 Schlackeneinschlüsse

Mögliche Ursachen:

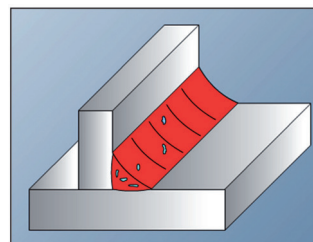
- zu geringe Schweißstromstärke
- zu große Schweißgeschwindigkeit
- Überschweißen von Schlackenresten bei mehrlagigen Schweißnähten



20.2 Gaseinschlüsse (Poren)

Mögliche Ursachen:

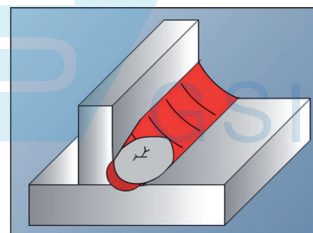
- unsaubere Werkstückoberfläche (Rost, Fett, Beschichtungsstoffe)
- zu langer Lichtbogen
- nicht oder nicht ausreichend getrocknete basisch-umhüllte Stabelektroden



20.3 Endkrater

Mögliche Ursachen:

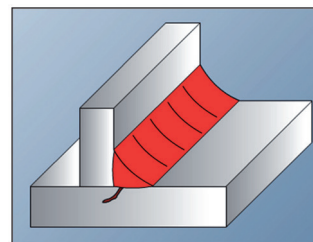
- zu schnelles Entfernen der Stabelektrode am Nahtende
- besonders bei großen Schweißstromstärken Gefahr von Schrumpfrissen



20.4 Risse im Schweißnahtübergang

Mögliche Ursachen:

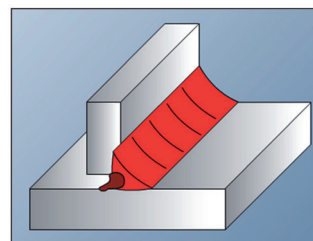
- schlecht geeigneter Werkstoff
- zu schnelles Abkühlen nach dem Schweißen (Abschrecken, nicht ausreichender Schutz gegen Witterung)



20.5 Wurzelfehler

Mögliche Ursachen:

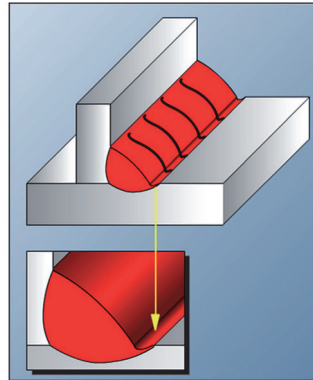
- Eindringen von Schlacke in den Wurzelbereich bei zu großem Stirnflächenabstand
- zu niedrige Stromstärke, vorlaufende Schlacke



20.6 Einbrandkerben

Mögliche Ursachen:

- zu hohe Schweißstromstärke
- zu langer Lichtbogen
- zu flache Stabelektrodenhaltung
- zu schnelles Weiterziehen an Nahtändern



20.7 Wasserstoffinduzierte Risse

Die Gefahr von wasserstoffinduzierten Rissen entsteht aus einer Wasserstoffversprödung, d.h. die Änderung der Duktilität von Metallen durch die

- Aufnahme (Schmelze) und Einlagern von **Wasserstoff** in das Metallgitter
- in Kombination mit (Zug-) **Spannungen und kritischen Gefügeausbildungen** (Fehlstellen).

Der wasserstoffinduzierte Kaltriss ist einer der gefährlichsten Schweißfehler. Er ist unmittelbar nach dem Schweißen nicht zu erkennen und tritt oft erst nach 3 bis 20 Stunden auf.

Wasserstoffquellen beim Lichtbogenhandschweißen können sein (siehe auch Abschnitt 6.2):

- Werkstück
- Umgebungsluft
- Stabelektrode

Schlecht vorbereitete Werkstücke – gerade beim Lichtbogenhandschweißen wird hier oft nicht die notwendige Sorgfalt aufgewendet – mit Resten von Grundierungen, Anstrichen, Beschichtungen etc. im Schweißnahtbereich können Feuchtigkeitsquellen sein. Auch eine mangelhafte, falsche Trocknung oder Vorwärmung des Schweißnahtbereichs kann zu einem erhöhten Wasserstoffeintrag führen.

Acetylen (C_2H_2) als Brenngas für das Trocknen oder Vorwärmen ist hier wesentlich besser geeignet als z.B. Propan (C_3H_8).

Nicht zu vernachlässigen ist auch der Eintrag von Wasserstoff durch die Umgebungsluft. Durch die hohe Lichtbogenenergie kann die Feuchtigkeit der Umgebungsluft im Lichtbogen zu einem Teil zu atomarem Wasserstoff getrennt und ins Schweißbad aufgenommen werden.

Daher ist hier, insbesondere bei basischen Elektroden, mit kurzem Lichtbogen zu schweißen, um die Lichtbogenoberfläche und somit auch die Absorptionsoberfläche für den Wasserstoff zu verringern.

Beispiel:

Bei basischen Elektroden mit einem Wasserstoffgehalt von max. 5 ml/100 g Schweißgut (H5) liegt der diffusible Wasserstoffgehalt im Schweißgut, bei einer Lichtbogenlänge von 0,5 x Kernstabdurchmesser, etwa bei 4,5 ml/100 g. Eine Verlängerung des Lichtbogens auf 1,5 x Kernstabdurchmesser erhöht den Wasserstoffgehalt bereits auf 6 ml/100 g Schweißgut.

Bei zunehmender Luftfeuchtigkeit, in Abhängigkeit mit der Lufttemperatur, kann sich die Aufnahme von Wasserstoff bei einem langen Lichtbogen noch weiter erhöhen.

Meist ist aber die Stabelektrode die Hauptfeuchtigkeitsquelle.

Die Auswahl eines falschen Umhüllungstyps, wenn ein niedriger Wasserstoffeintrag gefordert ist, kann hier bereits im Vorfeld der Grund für spätere Schäden sein.

Während der Wasserstoffeintrag einer basischen Stabelektrode mit einem Wasserstoffgehalt von 5 bis 15 ml/100 g Schweißgut noch unproblematisch ist, erhöht sich dieser bereits kritisch auf 20 bis 40 ml mit einer vergleichbaren RB-Elektrode und mit einer C-Elektrode bei ca. 40 bis 60 ml/100 g Schweißgut auf ein äußerst kritisches Maß.

Eine unsachgemäße oder gar keine Rücktrocknung von basischen Elektroden ist aber oft die Hauptursache für wasserstoffinduzierte Risse. Immer noch sind Schweißer der Ansicht, die Feuchtigkeit würde im Lichtbogen „verdampfen“ wie Wassertropfen auf einer heißen Herdplatte. Entsprechend sorglos werden dann nicht oder nicht ausreichend getrocknete Stabelektroden verschweißt, oder bis zum Verschweißen unsachgemäß gelagert.

Dieser so eingebrachte Wasserstoff lagert sich in den Spitzen von Kerben und Spalten ein und führt zu einer Erhöhung des Spannungszustandes. Der wiederum lässt den Riss weiter wachsen, wodurch noch mehr Wasserstoff nachdiffundieren kann.

Das Zusammenwirken von Wasserstoff, wenig verformungsfähigem Gefüge in der WEZ und einem mehrachsigen Spannungszustand, z.B. an Kerben, kann dann bei höherfesten Stählen zu einem verzögerten Bruch führen.

Gegenmaßnahmen

Einer Rissbildung kann entgegengewirkt werden durch:

- Eine einwandfreie Nahtvorbereitung
- Vorwärmen
- Verwendung von wasserstoffarmen, richtig getrockneten und gelagerten Zusatzwerkstoffen,
- Einhalten der Arbeitsregeln und Arbeitsweisen bei z.B. Mehrlagenschweißung bei „Cel“ (siehe auch Abschnitt 19.3)
- Glühen des Werkstückes, unmittelbar aus der Schweißwärme, für eine bis mehrere Stunden bei ca. 250°C (Soaking)

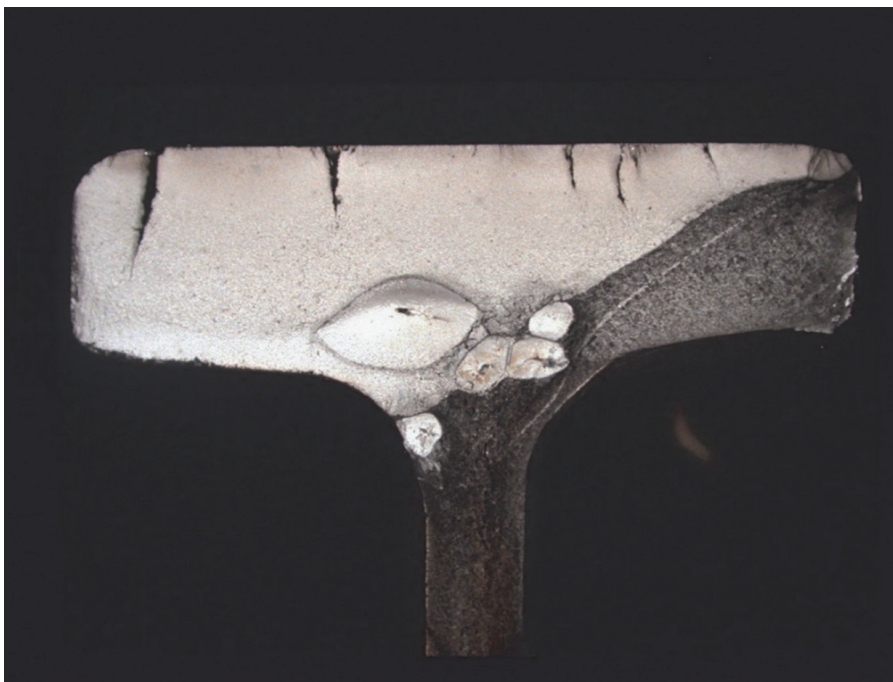


Abbildung 42: Fischaugen

21 Literatur

1. Killing, R.: Handbuch der Schweißverfahren, Teil 1. s.l. : DVS-Verlag Düsseldorf
2. Merkblatt DVS 0957: Umgang mit umhüllten Stabelektroden – Transport, Lagerung und Rücktrocknung umhüllter Stabelektroden
3. VDE 0470-1, Schutzarten durch Gehäuse (IP Code). 2000
4. American Petroleum Institute. API Standard 1104
5. DVGW GW 301
6. DVGW GW 350
7. VdTÜV-Merkblatt 1052
8. Aichele, G.: Kalkulation und Wirtschaftlichkeit
9. BGI 616: Beurteilung der Gefährdung durch Schweißrauche

Begriffserklärung

Kapillarwasser wird in den Kapillaren der Umhüllung (Porendurchmesser bis maximal 0,2 µm) durch die Kräfte der Oberflächenspannung (Adhäsion und Kohäsion) festgehalten.

Zu seinem größten Teil wird es leicht durch Erhitzen bei 100 bis 110°C entfernt. Es ist nicht möglich, Kapillar- und Kolloidwasser scharf voneinander abzugrenzen.

Kolloidales Wasser:

Kolloidal: Stoff in feinsten Verteilung in einem anderen Stoff gelöst.

Hier Wasser in feinsten Verteilung in der Umhüllung gelöst. Das einzelne Kolloid ist typischerweise zwischen einem und 500 Nanometer groß.

Adsorbiertes Wasser:

Adsorption: Aufsaugen, Aufnehmen oder Anlagern gelöster Stoffe (hier Wasser) an der Oberfläche eines festen Körpers.

Kristallwasser oder auch Hydratwasser ist die Bezeichnung für Wasser, das im kristallinen Festkörper gebunden vorkommt (hier kristalline Struktur einzelner Umhüllungsbestandteile). Kristallwasser ist meist nur locker gebunden (H₂O-Moleküle) und entweicht beim Erhitzen. (Anzahl Trocknungsvorgänge bzw max. Trocknungszeit -> bis die kristalline Struktur anfängt zu zerfallen d.h. Umhüllung bricht unter Umständen auseinander oder bröselt ab.)

Konstitutionswasser (Hydroxylgruppen) entweicht erst beim Erhitzen auf einige hundert Grad Celsius. Kommt wie das Kristallwasser in Mineralien mit einem Gehalt an Wasser vor.

22 Testfragen

1. Wie sind basische Elektroden zu verschweißen?

- ☐ mit Wechselstrom
- ☐ vorwiegend fallend
- ☐ mit langem Lichtbogen
- ☐ nach Rücktrocknung (z.B. 2 Std. bei 300 bis 350°C)

2. Welches Merkmal kennzeichnet bei der Stabelektrode E 38 2 RB 12 die Mindeststreckgrenze?

- ☐ E
- ☐ 38
- ☐ 2
- ☐ RB

3. Was bedeutet der Kennbuchstabe C bei einer Stabelektrode E 42 2 C 25?

- ☐ C-Gehalt
- ☐ Zellulose umhüllt
- ☐ Rutil-Zellulose umhüllt
- ☐ Cast (Gusseisen)

4. Welcher Stabelektrodentyp zum Verschweißen von einem niedrig legiertem Stahlguss GE360 (1.0597) eignet sich am besten?

- ☐ DIN EN ISO 3581 – E 23 12 2 LR 12
- ☐ DIN EN ISO 2560 – E 38 4 B 22
- ☐ DIN EN ISO 2560 – E 38 2 RB 12
- ☐ DIN EN ISO 1071 – E C NiFe-1 3

5. Welche Arbeitsweise ist zum Kaltschweißen von einem Graugussbauteil zu empfehlen?

- ☐ Bauteil auf 600°C langsam vorwärmen, nach der Schweißung langsam abkühlen.
- ☐ Bauteil im Wasserbad schweißen
- ☐ Bauteil im Pilgerschrittverfahren schweißen
- ☐ Bauteil ist „in einer Wärme“ zu schweißen.

6. Welche Bedeutung hat der Buchstabe T in der Stabelektrodenbezeichnung DIN EN ISO 18275-A E 55 3 MnMo B T 4 2 H10?

- ☐ besondere chemische Zusammensetzung der Umhüllung
- ☐ mit Titan stabilisierter Zusatzwerkstoff
- ☐ bei dem Zusatzwerkstoff handelt es sich um einen Füllstab
- ☐ die Festigkeitseigenschaften des Schweißgutes werden erst nach Spannungsarmglühen erreicht.

7. Welche Schweißparameter stellen Sie beim Lichtbogenhandschweißen ein?

- ☐ Spannung
- ☐ Stromstärke
- ☐ Widerstand
- ☐ Lichtbogenlänge

8. Wie lang sollte der Lichtbogen beim Verschweißen von Rutilelektroden gehalten werden?

- ☐ 0,5 x Kernstabdurchmesser
- ☐ 1,0 x Kernstabdurchmesser
- ☐ 1,5 x Kernstabdurchmesser
- ☐ die Lichtbogenlänge ist nicht relevant

9. Wie lautet die Faustformel für die Stromstärke bei Stabelektroden?

- ☐ Kernstabdurchmesser x 40 in Ampere
- ☐ Kernstabdurchmesser x 40 in Volt
- ☐ Hohe Spannung, niedrige Stromstärke
- ☐ abhängig von der Umhüllung ca. 100 A

10. Welche Aufgabe hat die Umhüllung der Stabelektrode?

- ☐ den Kernstab zu schützen
- ☐ die Blaswirkung zu mindern
- ☐ Bildung eines Schutzgases
- ☐ den Lichtbogen zu stabilisieren

11. Die Umhüllungsstärke und -zusammensetzung haben Einfluss auf

- ☐ die Tropfengröße und den Einbrand
- ☐ die Spaltüberbrückbarkeit
- ☐ das Nahtaussehen
- ☐ keinen Einfluss

12. Welche Kennzeichnung muss eine Schweißstromquelle aufweisen, wenn sie in Bereichen von erhöhter elektrischer Gefährdung eingesetzt werden soll?

- ☐ CE-Kennzeichnung
- ☐ GS-Zeichen
- ☐ S, K oder 48 V (alt 42V)
- ☐ Ü-Zeichen

13. Nennen Sie eine praktikable Lösung, um den durch die Umhüllung eingebrachten Wasserstoff beim Fallnahtschweißen mit Zellulose-Elektroden wieder auszutreiben.

- ☐ Elektroden trocknen
- ☐ Schweißen „in einer Wärme“
- ☐ Naht abhämmern
- ☐ Schweißnaht nicht auf einmal herstellen.

14. Welche Maßnahmen sind gegen die Blaswirkung möglich?

- ☐ mit langem Lichtbogen Schweißen
- ☐ Neigungswinkel der Stabelektrode verändern
- ☐ Lichtbogen kurz halten
- ☐ Schweißen mit Gleichstrom

15. Welche Schweißposition empfiehlt sich für eine Stabelektrode mit 200% Ausbringung?

- ☐ PA
- ☐ PB
- ☐ PF
- ☐ PD

16. Basische Elektroden werden vor dem Verschweißen?

- ☐ ca. 1 h bei 150°C rückgetrocknet.
- ☐ ca. 2 h bei 100°C rückgetrocknet.
- ☐ nicht weiter behandelt.
- ☐ nach Herstellerangaben (ca. 2 h bei 300°C) rückgetrocknet.

17. Nennen Sie die Ursache für Einbrandkerben.

- ☐ zu niedrige Stromstärke
- ☐ zu kurzer Lichtbogen
- ☐ zu hohe Schweißstromstärke
- ☐ schnelles Entfernen der Elektrode am Nahtende

18. Nennen Sie die Ursache für Schlackeneinschlüsse.

- ☐ feuchte Elektroden
- ☐ zu hohe Stromstärke
- ☐ zu niedrige Stromstärke
- ☐ zu großer Stirnflächenabstand bei Kehlnähten.



Inhalt

1	Allgemeine Einführung in das UP-Schweißen	1
1.1	Definition UP-Schweißen	1
1.2	Prinzip des UP-Schweißens	1
2	Aufbau einer UP-Schweißanlage	4
2.1	Schweißkopf	4
2.1.1	Stromkontakteinheit	5
2.1.2	Elektrodevorschubeinrichtung	5
2.1.3	Drahtaufnahme	5
2.1.4	Pulverzufuhr- und Absaugeinrichtung	5
2.1.5	Steuerung	5
2.2	Vorschubeinrichtung (Relativbewegung Bauteil – Schweißkopf)	7
2.3	Stromquelle	7
2.3.1	Regelung der Lichtbogenlänge	8
3	Schweißnahtvorbereitung	9
4	Schweißzusätze und Hilfsstoffe	10
4.1	Elektroden	10
4.1.1	Drahtelektroden	10
4.1.2	Bandelektroden	13
4.2	Schweißpulver	13
4.2.1	Aufgaben des Schweißpulvers	13
4.2.2	Einteilung von Schweißpulvern	13
4.2.3	Lagerung und Rücktrocknung von Schweißpulvern	18
4.2.4	Kennzeichnung und Bezeichnung der Schweißpulver	18
4.3	Draht/Pulver- Kombination	20
4.3.1	Metallurgisches Verhalten	20
4.3.2	Bezeichnung einer Draht/Pulver-Kombination	20
5	Verfahrensparameter, Schmelzbadsicherung	21
5.1	Abschmelzleistung	21
5.2	Einfluss der Elektrodenstellung auf Einbrandtiefe und Nahtgeometrie	21
5.2.1	Pulverkörnung	21
5.3	Schweißbadsicherung	21
6	Möglichkeiten zur Leistungssteigerung beim UP-Schweißen	23
6.1	Leistungssteigerung beim UP-Eindrahtschweißen	23
6.2	Leistungssteigerung beim UP-Mehrdrahtschweißen	24
6.2.1	Doppeldrahtschweißen mit gemeinsamem Vorschubsystem	25
6.2.2	Mehrdrahtschweißen mit getrennten Vorschubsystemen	26
6.2.3	Mehrdrahtschweißen mit zusätzlichem Kalt-/Heißdraht	28
6.2.4	Mehrdrahtschweißen mit Zusatz von Kaltdraht und/oder Metallpulver	28
7	Verfahrensvarianten	29
7.1	Unterpulverschweißen mit Bandelektrode	29
7.1.1	UP-Verbindungsschweißen	29
7.1.2	UP-Auftragschweißen	29
7.2	UP-Engspaltschweißen	30
7.3	UP-Quernahtschweißen	32
7.4	Formgebendes Schweißen	33
8	Fehler beim UP-Schweißen und Abhilfemaßnahmen	34
9	Anwendungen des UP-Verbindungsschweißens	38

9.1	Schiffbau	38
9.2	Behälterbau.....	39
9.3	Rohrschweißung	40
10	Anwendungen des UP-Auftragschweißens	43
11	Literatur.....	45
12	Testfragen	46



1 Allgemeine Einführung in das UP-Schweißen

1.1 Definition UP-Schweißen

Das Unterpulverschweißen zählt nach DIN 1910 Teil 2 zu den verdeckten Lichtbogenschweißverfahren. Der Lichtbogen brennt hierbei vor der Atmosphäre geschützt unter einer Pulveraufschüttung zwischen der Elektrode und dem Werkstück (in seltenen Sonderfällen auch zwischen zwei Elektroden) in der mit Gasen (CO , CO_2 , CH_4 und H_2) und Dämpfen gefüllten Schweißkaverne; diese entsteht durch teilweises Aufschmelzen des umgebenden Pulvers und Verdampfen von Pulverbestandteilen. Gleichzeitig wird auch die Elektrode (Schweißzusatz) abgeschmolzen und geht tropfenförmig zum aufgeschmolzenen Grundwerkstoff über. Hier bildet der Schweißzusatz mit dem durch den Lichtbogen aufgeschmolzenen Grundwerkstoff ein Schmelzbad, das mit fortschreitendem Schweißen zur Schweißraupe erstarrt. Durch Relativbewegung zwischen Schweißkopf und Werkstück entsteht die Naht. Die Schlacke setzt sich auf der Naht ab und unterstützt die Nahtformung. Das nicht aufgeschmolzene Pulver wird abgesaugt und kann u.U. dem Pulverkreislauf wieder zugeführt werden.

1.2 Prinzip des UP-Schweißens

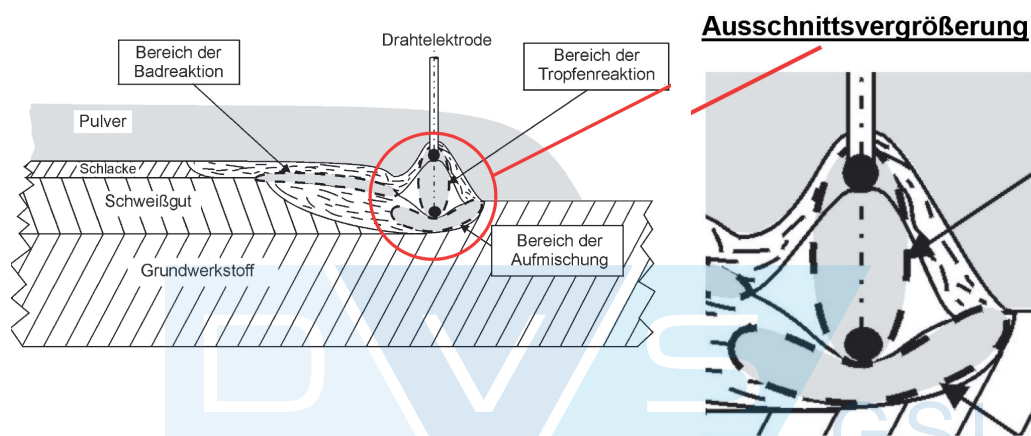


Abbildung 1: Prinzip des UP-Schweißens

Der in Abbildung 1 dargestellte Querschnitt zeigt, dass die Schweißstelle durch das Pulver abgedeckt wird, woraus sich ein vergleichsweise guter thermischer Wirkungsgrad ergibt, der zu einer hohen Abschmelzleistung führt. Während des UP-Schweißprozesses spielen sich metallurgische Vorgänge im Tropfenstadium, in der Badreaktion und im Bereich der Aufmischung mit dem Grundwerkstoff ab. Die Reaktionen im Tropfenstadium und die Badreaktion werden durch das Schweißpulver und den eingesetzten Schweißzusatzwerkstoff bestimmt. Im Bereich der Aufmischung sind Einflüsse des Schweißzusatzes und des Grundmaterials zu finden. Daraus folgt, dass die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes und seine mechanisch-technologischen Eigenschaften entscheidend von der eingesetzten Draht/Pulver-Kombination abhängen, die daher stets auf den Grundwerkstoff und die angestrebten Forderungen der Schweißung abgestimmt werden muss.

In Abbildung 2 sind Abschmelzleistungen konventioneller Schweißverfahren dem UP-Schweißen gegenübergestellt.

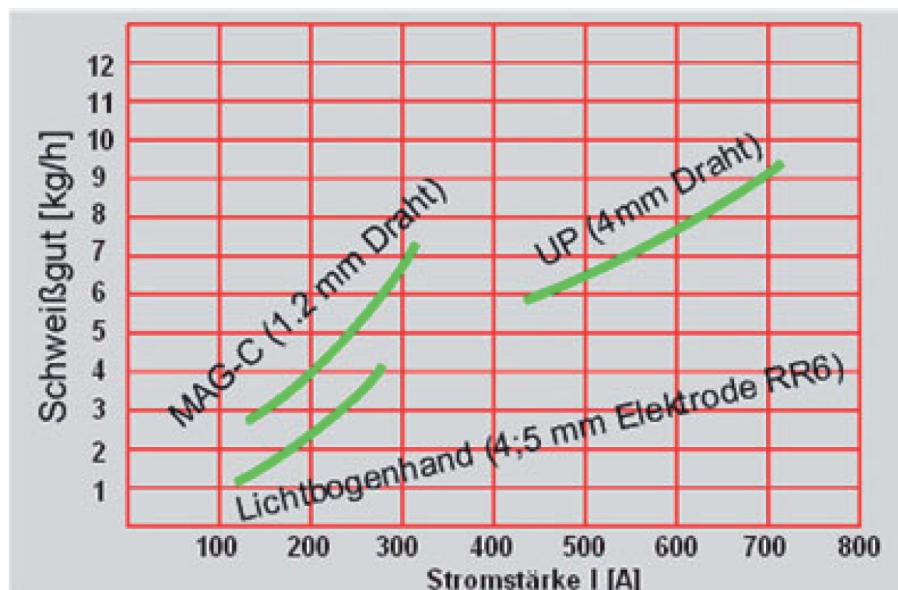


Abbildung 2: Vergleich der Abschmelzleistung verschiedener Schweißverfahren

Übliche Abschmelzleistungen beim UP-Schweißen mit einem Drahtelektrodendurchmesser von 4 mm liegen bei 7 bis 8 kg/h, wenn eine Einschaltdauer von 100% zugrundegelegt wird.

Das UP-Schweißen ist ein vollmechanisiertes Hochleistungsverfahren, das üblicherweise bei Materialdicken ab 6 mm eingesetzt wird.

Anwendungsbeispiele für das UP-Schweißen in typischen Anwendungsgebieten werden in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Anwendungsbeispiele für das UP-Schweißen

Industriezweig	Art der Bauteile	Nahtarten
Schiffbau	Paneelfertigung Sektionsbau	Stumpf- und Kehlnähte Stumpf- und Kehlnähte
Rohrherstellung	Leitungsrohre Konstruktionsrohre Spiralrohre	Längs- und Rundnähte Längs- und Rundnähte Rundnähte
Behälterbau	Chemiereaktoren Kolonnen Druckbehälter	Längs- und Rundnähte Längs- und Rundnähte Längs- und Rundnähte
Kesselbau	Kesseltrommeln Sammler gasdichte Rohrwände	Längs- und Rundnähte Längs- und Rundnähte Längsnähte
Armaturenbau	Schiebergehäuse	Längs- und Rundnähte
Kran- und Brückenbau	Träger Fahrbahnplatten Profile	Stumpf- und Kehlnähte Stumpf- und Kehlnähte Stumpf- und Kehlnähte
allgemeiner Stahlbau	dickwandige Bauteile mit langen Nähten (z.B. Ramppfähle)	Stumpf- und Kehlnähte

Neben dem Verbindungsschweißen (begrenzt auf die Positionen Wannenlage PA, Kehlnaht PB und Quernaht PC), bei dem in der Regel Drahtelektroden eingesetzt werden, ist das Auftragschweißen von Bauteilen zum Schutz vor Korrosion (Plattieren) und/oder Verschleiß (Panzern) ein sehr wichtiges Anwendungsgebiet des UP-Schweißens. Für das Auftragschweißen werden üblicherweise das UP-Doppel-Drahtverfahren oder das UP-Bandschweißen eingesetzt, da mit beiden Verfahren eine meist gewünschte geringe Aufmischung des Grundwerkstoffs erreicht werden kann.

Werkstoffgruppen, die mittels UP-Schweißen verarbeitet werden, sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Werkstoffe die mit UP-Schweißen verarbeitet werden

Werkstoffe	Beispiel	Normung	minimale Blechdicke
unlegierte- und niedrig legierte Werkstoffe	S235JRG2 (+AR), (+N) S355J2G3	DIN EN 10025-1, -2	8 mm
hoch legierte Werkstoffe ⇒ Cr-Ni-Stähle	X 2 CrNiMo 17122	DIN EN 10088-3	6 mm
wWarmfeste Werkstoffe	16 Mo 3 13CrMo4-5	DIN EN 10028-2	8 mm
Einsatzstähle (mit Einschränkungen)	16 MnCr 5	DIN EN 10084	8 mm
Feinkornbaustähle	P 355 N, P 460 N	DIN EN 10025-4 DIN EN 10028-3 DIN EN 10025-4	8 mm



2 Aufbau einer UP-Schweißanlage

Zu einer vollständigen UP-Anlage gehören ein Schweißkopf, eine Schweißstromquelle, Mechanisierungseinrichtungen zum Positionieren und Bewegen des Schweißkopfes und des Werkstückes. In den folgenden Abbildungen ist der schematische Aufbau eines Schweißsystems zum UP-Schweißen und der mögliche Aufbau einer UP-Eindrahtschweißanlage dargestellt.

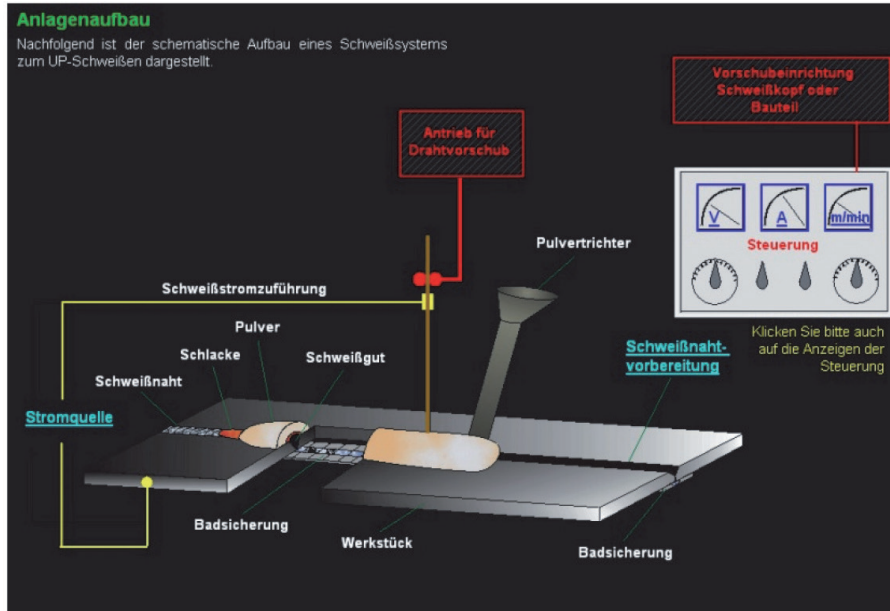


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer UP-Anlage



Abbildung 4: Aufbau einer UP-Anlage

2.1 Schweißkopf

Der Schweißkopf besteht aus folgenden Komponenten:

- Stromkontakteinheit
- Drahtvorschubeinrichtung
- Pulverzufuhr- und Absaugeinrichtung
- Steuer- und Regeleinrichtungen

Die wesentlichen Komponenten werden im Folgenden erläutert:

2.1.1 Stromkontakteinheit

Die Stromkontakteinheit muss auch im Dauerbetrieb eine störungsfreie Stromübertragung und gleichbleibend präzise Drahtführung gewährleisten. Die Stromkontaktdüse besteht wegen der geforderten thermischen und mechanischen Beständigkeit vorzugsweise aus einer Cu-Legierung (CuCrZr).

Verschiedene Ausführungen von Stromkontaktdüsen zeigt die Abbildung 5.

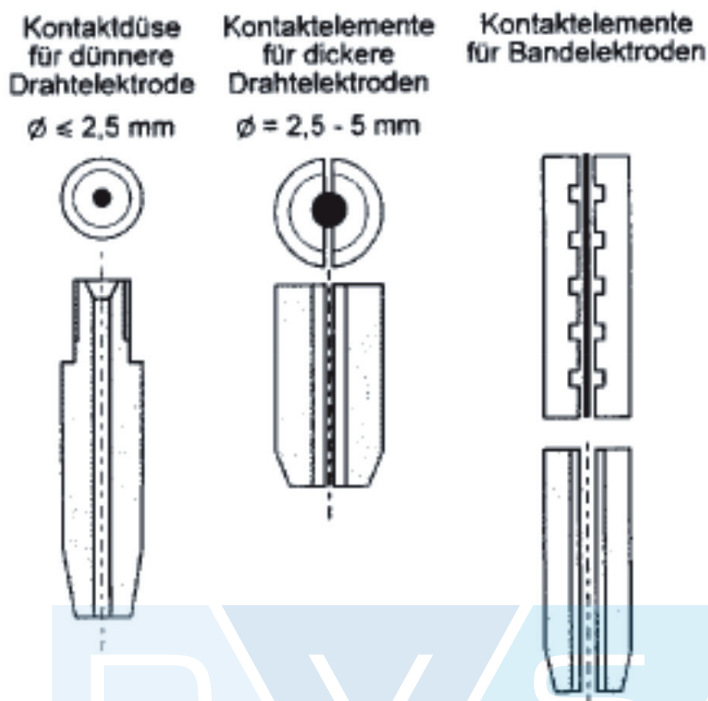


Abbildung 5: Stromkontaktdüsen

2.1.2 Elektrodenvorschubeinrichtung

Ein leistungsfähiger und regelbarer Motor mit Getriebe und funktionssicherer Mechanik der Kraftübertragung für den Drahtvorschub hat die Aufgabe, die Drahtelektrode von der Spule (Haspel) abziehen und durch das Stromkontaktrohr zur Schweißstelle zu schieben. Drahttrichterwerke ermöglichen einen genau ausgerichteten Drahtaustritt aus der Kontaktdüse im unteren Ende des Kontaktrohres.

2.1.3 Drahtaufnahme

Für die Aufnahme der gemäß DIN EN ISO 14171 in unterschiedlichen Spulengrößen und -gewichten erhältlichen Drahtelektroden sind geeignete Vorrichtungen anzubringen.

2.1.4 Pulverzufuhr- und Absaugeinrichtung

Die Schweißpulverzufuhr kann – abhängig von den betrieblichen Gegebenheiten oder Erfordernissen – manuell vor dem Schweißen oder durch eine Pulverfördereinrichtung während des Schweißens aufgebracht werden. Das nicht aufgeschmolzene Pulver wird abgesaugt und kann dem Pulverkreislauf ggf. nach einer Aufbereitung wieder zugeführt werden.

2.1.5 Steuerung

Mit der Steuerung werden die wesentlichen Parameter "Stromstärke", "Spannung" und "Schweißgeschwindigkeit" eingestellt. Diese Parameter können nicht unabhängig voneinander gewählt, sondern müssen aufeinander abgestimmt werden. Die Einflüsse der Schweißparameter sind in den Abbildungen 6 bis 8 schematisch dargestellt.

2.1.5.1 Stromstärke

Die Stromstärke beeinflusst im Wesentlichen die Einbrandtiefe.

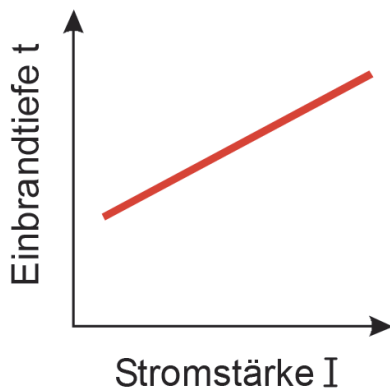


Abbildung 6: Einbrandtiefe als Funktion der Stromstärke

Als Anhaltswert kann davon ausgegangen werden, dass 100A im I-Stoß einen Einbrand von ca. 1mm erzeugen. Übliche Stromstärken bei einem Durchmesser der Drahtelektrode von 4 mm liegen bei $I = 600$ bis ca. 800A.

Aus diesen Werten ergibt sich eine Strombelastung, die üblicherweise bei ca. 100 bis 200A/mm Drahtdurchmesser liegt. Die Stromdichte liegt danach bei 48 bis 64A/mm². Es ist zu beachten, dass die Stromdichte die Einbrandtiefe stärker beeinflusst als die absolute Stromstärke.

2.1.5.2 Spannung

Die Spannung beeinflusst die Nahtbreite



Abbildung 7: Nahtbreite als Funktion der Spannung

Die üblicherweise eingesetzten Spannungen liegen bei ca. 30 bis 40 V.

2.1.5.3 Schweißgeschwindigkeit

Die Schweißgeschwindigkeit beeinflusst sowohl die Nahtbreite als auch die Nahttiefe.

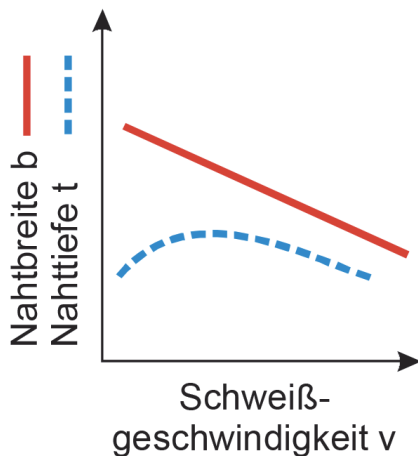


Abbildung 8: Nahtbreite und Nahttiefe als Funktion der Schweißgeschwindigkeit

Übliche Schweißgeschwindigkeiten beim UP-Eindrahtschweißen liegen bei ca. 55cm/min. Werden zu geringe Schweißgeschwindigkeiten gewählt, brennt der Lichtbogen auf dem dann vorlaufenden Schmelzbad, was sowohl eine geringe Einbrandtiefe als auch Bindefehler nach sich zieht, bei zu hohen Schweißgeschwindigkeiten zeigen sich starke unregelmäßige Einschnürungen der Naht.

Aus den Punkten 2.1.5.1 bis 2.1.5.3 ergibt sich ein praxisrelevanter Schweißparametersatz von zum Beispiel

I	=	600 A
U	=	30 V
v	=	55 cm/min
Draht- durchmes- ser	=	4 mm

Aus diesen Werten ergibt sich eine Streckenenergie von ca. 20 kJ/cm.

2.2 Vorschubeinrichtung (Relativbewegung Bauteil – Schweißkopf)

Die Vorschubeinrichtung realisiert die Relativbewegung zwischen Bauteil und Schweißkopf mit der Drahtelektrode. Abhängig von der Bauteilgeometrie und den zu schweißenden Verbindungen werden unterschiedliche Systeme eingesetzt.

- Balkenfahrwerke (Längsnähte) → Bewegung des Schweißkopfes
- Schweißmaste (Längsnähte) → Bewegung des Schweißkopfes oder des Bauteils
- Rollenböcke (Rundnähte) → Bewegung des Bauteils
- Rollgänge (Längsnähte) → Bewegung des Bauteils

2.3 Stromquelle

Üblicherweise wird beim Eindrahtschweißen Gleichstrom mit dem $\oplus$ -Pol an der Drahtelektrode geschweißt. Beim Mehrdrahtschweißen werden vorteilhaft die erste Elektrode mit Gleichstrom und $\oplus$ -Pol, die folgenden Elektroden mit Wechselstrom betrieben (Vermeidung von Blaswirkung).

Die Stromquellen sind standardmäßig Gleichrichter, wobei darauf zu achten ist, dass aufgrund des hohen Mechanisierungsgrades hohe Stromstärken bei einer Einschaltdauer von 100% zur Verfügung gestellt werden müssen.

Bei Drahtelektrodendurchmessern > 3 mm wird eine fallende Stromquellencharakteristik eingesetzt

(äußere Regelung), bei kleinen Drahtelektrorendurchmessern wird mit einer Konstantspannungscharakteristik gearbeitet (innere Regelung).

2.3.1 Regelung der Lichtbogenlänge

Zur Erzielung gleichmäßiger Schweißergebnisse (Nahtbreite, -höhe und Einschweißtiefe) müssen die Lichtbogenlänge und damit Schweißspannung und -strom konstant gehalten werden. Je nach Charakteristik der Kennlinie der Stromquelle wird dies mit der ΔU - bzw. ΔI -Regelung erreicht.

2.3.1.1 ΔU -Regelung

Die ΔU -Regelung („äußere Regelung“) kommt in der Regel bei fallender Kennlinie und bei Verwendung dickerer Elektroden (Durchmesser größer ca. 3 mm) zur Anwendung. Hierbei wird die Drahtvorschubgeschwindigkeit entsprechend der Lichtbogenlänge geregelt. Eine Möglichkeit der Regelung besteht darin, als Ankerspannung des Elektroden-Antriebsmotors die Lichtbogenspannung direkt oder eine ihr proportionale Spannung anzuschließen. Nimmt die Lichtbogenlänge aus irgendeinem Grund zu, steigt die Lichtbogenspannung und somit auch die Speisespannung des Fördermotors; dieser dreht nun schneller, wodurch sich die Lichtbogenlänge verkürzt. Bei ungewollter Verkürzung wird der Elektrodenvorschub verlangsamt, die Lichtbogenlänge steigt nun wieder auf die ursprüngliche Länge.

2.3.1.2 ΔI -Regelung

Die ΔI -Regelung („innere Regelung“, im eigentlichen Sinne keine Regelung, sondern ein Prozess mit Selbstaussgleich) wird bei Stromquellen mit Konstantspannungs-Charakteristik genutzt; die Drahtvorschubgeschwindigkeit ist hierbei konstant. Die Konstanthaltung der Lichtbogenlänge geschieht hier durch die stark unterschiedlich hohe Abschmelzleistung Lichtbogenlängen-Änderungen und den damit verbundenen Arbeitspunktbewegungen. Wird aus irgendeinem Grund der Lichtbogen kürzer, steigt aufgrund der Kennlinie die Stromstärke stark an und damit auch die Abschmelzgeschwindigkeit; bei weiterhin konstantem Drahtvorschub wird die vorgewählte Lichtbogenlänge schnell wieder erreicht. Bei ungewollter Lichtbogenverlängerung nimmt die Stromstärke stark ab, die Elektrode schmilzt langsamer ab und die vorher eingestellte Lichtbogenlänge stellt sich wieder ein (siehe auch Kapitel 1.04 „Der Lichtbogen“).

Eine zuverlässige Regelung ist nur bei dünnen Elektroden (Durchmesser kleiner ca. 3,0 mm) gewährleistet. Sie wird auch beim UP-Bandauftragschweißen eingesetzt.

3 Schweißnahtvorbereitung

Bedingt durch den tiefen Einbrand ist eine spezielle Nahtvorbereitung bzw. der Einsatz von Schweißbadsicherungen notwendig. Die Schweißnahtvorbereitung ist in DIN EN ISO 9692-2 genormt, Tabelle 3 und 4.

Tabelle 3: Fugenformen für Stumpfnähte, einseitig geschweißt (Maße in Millimeter) (Auszug aus DIN EN ISO 9692-2)

Schweißnaht					Fugenform					Schweißposition nach ISO 6947	Bemerkungen
Ref. Nr.	Werkstückdicke t	Benennung	Symbol nach ISO 2553	Darstellung	Schnitt	Öffnungswinkel Flankenwinkel α, β	Stegabstand b Fugenradius R	Steghöhe c	Flankenhöhe h		
1.2	$3 \leq t \leq 12$	I-Naht	II			–	$b \leq 0,5 t$ max. 5	–	–	PA	Mit Schweißbadsicherung Mindestdicke für die Schweißbadsicherung: 5 mm oder $0,5 t$
1.3	$10 \leq t \leq 20$	V-Naht	V			$30^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$	$4 \leq b \leq 8$	$c \leq 2$	–	PA	Mit Schweißbadsicherung Mindestdicke für die Schweißbadsicherung: 5 mm oder $0,5 t$
1.14	$t > 20$	Steilflanken-naht	∇			$4^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$10 \leq b \leq 25$	–	–	PA	Mit Schweißbadsicherung Mindestdicke für die Schweißbadsicherung: 5 mm oder $0,5 t$
1.3.3	$t > 12$	V-Naht mit V-Wurzellage	∇			$60^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ $4^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$	$1 \leq b \leq 4$	$0 \leq c \leq 3$	$4 \leq h \leq 6$	PA	Wurzellage mit beliebigem Schweißprozess geschweißt

Tabelle 4: Fugenformen für Stumpfnähte, beidseitig (Maße in Millimeter) (Auszug aus DIN EN ISO 9692-2)

Schweißnaht					Fugenform					Schweißposition nach ISO 6947	Bemerkungen
Ref. Nr.	Werkstückdicke t	Benennung	Symbol nach ISO 2553	Darstellung	Schnitt	Öffnungswinkel Flankenwinkel α, β	Stegabstand b Fugenradius R	Steghöhe c	Flankenhöhe h		
2.2	$3 \leq t \leq 20$	I-Naht	II			–	$b \leq 2$	–	–	PA	Größe des Stimflächenabstandes ist in engen Grenzen zu halten
2.5.9	$10 \leq t \leq 35$	Y-Naht mit Gegenlage	Y			$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$	$b \leq 4$	$4 \leq c \leq 10$	–	PA	Die Wurzellage kann mit einem anderen Schmelzschweißverfahren geschweißt werden
2.5.2	$10 \leq t \leq 20$	V-Naht	Y			$60^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$	$b \leq 4$	$5 \leq c \leq 15$	–	PA	Die Wurzellage kann mit einem anderen Schmelzschweißverfahren geschweißt werden
2.5.5	$t \geq 16$	DY-Naht	Y			$30^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$	$b \leq 4$	$4 \leq c \leq 10$	$h_1 \approx h_2$	PA	–

4 Schweißzusätze und Hilfsstoffe

Zum UP-Schweißen werden im Allgemeinen artgleiche oder dem Grundwerkstoff weitestgehend angepasste Elektroden und körnige, mineralische Pulver verwendet.

4.1 Elektroden

Entsprechend dem Verwendungszweck werden Draht- (Verbindungsschweißen) oder Banelektroden (Auftragschweißen) eingesetzt; gegebenenfalls werden auch Fülldrahtelektroden und Füllbänder verwendet.

4.1.1 Drahtelektroden

Als Schweißzusatz zum Verbindungsschweißen werden Drahtelektroden (Massiv- und/oder in Sonderfällen Röhrchendrahtelektroden) eingesetzt. Die Massivdrahtelektroden werden aus Walzdraht hergestellt und durch Kaltziehen auf das erforderliche Maß gebracht. Die Oberfläche ist dünn verkupfert, um die Reibungswiderstände zu minimieren und den Stromübergang zu verbessern; in gewissem Maße trägt diese Schicht auch zum Korrosionsschutz bei.

Um Schweißfehler infolge von Kontaktschwierigkeiten in der Stromdüse zu vermeiden, muss die Oberfläche der Drahtelektrode eine glatte, riefenfreie Oberfläche aufweisen, frei von Fett und Rostnarben sein und einwandfrei kalibriert sein.

Üblicherweise betragen die Durchmesser der Drahtelektrode 3 oder 4 mm. Bei hohen Stromstärken werden auch Drahtelektroden mit 5 mm Durchmesser eingesetzt, bei schlechter Zugänglichkeit der Schweißstelle oder bei der Gefahr des Durchfallens der Wurzel werden 3 mm Drahtelektroden verwendet.

Die Auswahl der Elektroden erfolgt unter dem Gesichtspunkt, dass die mechanisch-technologischen Gütewerte des Schweißgutes und des Grundwerkstoffes weitestgehend übereinstimmen; hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass vom Schweißpulver ein mehr oder weniger starker metallurgischer Einfluss auf die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes und damit auch dessen Gütewerte ausgeübt wird.

Für den störungsfreien Schweißablauf muss die Drahtelektrode einwandfrei gespult sein. Lieferbare Ringgrößen sind in DIN EN ISO 544 genannt.

Um Verwechslungen auszuschließen, muss jeder Ring an der Außenseite deutlich mit folgenden Kennzeichnungen versehen sein:

- Handelsbezeichnung
- DIN EN-Bezeichnung (z.B. Drahtelektrode DIN EN ISO 14171-A-S2Mo)
- Fabrikations- und Chargen-Nummer
- Drahtdurchmesser
- Nettogewicht
- Hersteller oder Lieferer.

In Tabelle 5 sind die Schweißzusätze für un- und mikrolegierte Werkstoffe dargestellt.

Tabelle 5: Schweißzusätze für un- und mikrolegierte Werkstoffe (Auszug aus DIN EN ISO 14171)

Kurzzeichen	Chemische Zusammensetzung (% (Massenanteil)) ^{a b c}								
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu
S1	0,05 bis 0,15	0,15	0,35 bis 0,80	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S2	0,07 bis 0,15	0,15	0,80 bis 1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S3	0,07 bis 0,15	0,15	1,30 bis 1,75	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S4	0,07 bis 0,15	0,15	1,75 bis 2,25	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S1Si	0,07 bis 0,15	0,15 bis 0,40	0,35 bis 0,80	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S2Si	0,07 bis 0,15	0,15 bis 0,40	0,80 bis 1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S2Si2	0,07 bis 0,15	0,40 bis 0,80	0,80 bis 1,30	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S3Si	0,07 bis 0,15	0,15 bis 0,40	1,30 bis 1,85	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S4Si	0,07 bis 0,15	0,15 bis 0,40	1,85 bis 2,25	0,025	0,025	0,15	0,15	0,15	0,30
S1Mo	0,05 bis 0,15	0,05 bis 0,25	0,35 bis 0,80	0,025	0,025	0,45 bis 0,85	0,15	0,15	0,30
S2Mo	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	0,80 bis 1,30	0,025	0,025	0,45 bis 0,85	0,15	0,15	0,30
S2MoTiB ^d	0,05 bis 0,15	0,15 bis 0,35	1,00 bis 1,35	0,025	0,025	0,40 bis 0,85	–	–	0,30
S3Mo	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	1,30 bis 1,75	0,025	0,025	0,45 bis 0,85	0,15	0,15	0,30
S4Mo	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	1,75 bis 2,25	0,025	0,025	0,45 bis 0,85	0,15	0,15	0,30
S2Ni1	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	0,80 bis 1,30	0,020	0,020	0,15	0,80 bis 1,20	0,15	0,30
S2Ni1,5	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	0,80 bis 1,30	0,020	0,020	0,15	1,20 bis 1,80	0,15	0,30
S2Ni2	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	0,80 bis 1,30	0,020	0,020	0,15	1,80 bis 2,40	0,15	0,30
S2Ni3	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	0,80 bis 1,30	0,020	0,020	0,15	2,80 bis 3,70	0,15	0,30
S2Ni1Mo	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	0,80 bis 1,30	0,020	0,020	0,45 bis 0,85	0,80 bis 1,20	0,20	0,30
S3Ni1,5	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	1,30 bis 1,70	0,020	0,020	0,15	1,20 bis 1,80	0,20	0,30
S3Ni1Mo	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	1,30 bis 1,80	0,020	0,020	0,45 bis 0,85	0,80 bis 1,20	0,20	0,30
S3Ni1Mo0,2	0,07 bis 0,15	0,10 bis 0,35	1,20 bis 1,60	0,015	0,015	0,15 bis 0,30	0,80 bis 1,20	0,15	0,30
S3Ni1,5Mo	0,07 bis 0,15	0,05 bis 0,25	1,20 bis 1,80	0,020	0,020	0,30 bis 0,50	1,20 bis 1,80	0,20	0,30
S2Ni1Cu	0,08 bis 0,12	0,15 bis 0,35	0,70 bis 1,20	0,020	0,020	0,15	0,65 bis 0,90	0,40	0,40 bis 0,65
S3Ni1Cu	0,05 bis 0,15	0,15 bis 0,40	1,20 bis 1,70	0,025	0,025	0,15	0,60 bis 1,20	0,15	0,30 bis 0,60
SZ ^e	Jede andere vereinbarte Zusammensetzung								

^a Chemische Zusammensetzung des Fertigproduktes, Cu einschließlich Kupfer-Überzug, ≤ 0,30 % Massenanteil, Al ≤ 0,030 % Massenanteil.

^b Einzelwerte sind Höchstwerte.

^c Schweißzusätze, für die keine chemische Zusammensetzung aufgeführt ist, müssen mit ähnlichen Symbolen und mit den vorangehenden Buchstaben SZ gekennzeichnet werden. Die Bereiche der chemischen Zusammensetzung sind nicht festgelegt. Es besteht die Möglichkeit, dass zwei Elektroden mit der gleichen Z-Einteilung nicht austauschbar sind.

^d Ti: 0,10% bis 0,20% Massenanteil, B: 0,005% bis 0,020% Massenanteil

Bei der Verarbeitung von CrNi-Stählen werden standardmäßig 3 mm Drahtelektroden eingesetzt, um die Streckenenergie zu verringern.

Die Schweißzusätze für hoch legierte Werkstoffe sind in DIN EN ISO 14343 zu finden. Tabelle 6 zeigt einen Auszug aus dieser Norm.

Tabelle 6: Kurzzeichen für die chemische Zusammensetzung von Drahtelektroden, Drähten und Stäben für das Schweißen hoch legierter Werkstoffe

Legierungs-Kurzzeichen	Chemische Zusammensetzung in % (m/m) 1) 2) 3) 4)								
	C	Si	Mn	P ⁵⁾	S ⁵⁾	Cr	Ni	Mo	Andere Elemente
Martensitisch/ ferritisch									
13	0,15	1,0	1,0	0,03	0,02	12,0 bis 15,0	—	—	—
13 L	0,05	1,0	1,0	0,03	0,02	12,0 bis 15,0	—	—	—
13 4	0,05	1,0	1,0	0,03	0,02	11,0 bis 14,0	3,0 bis 5,0	0,4 bis 1,0	—
17	0,12	1,0	1,0	0,03	0,02	16,0 bis 19,0	—	—	—
Austenitisch									
19 9 L ⁶⁾	0,03	0,65	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	19,0 bis 21,0	9,0 bis 11,0	—	—
19 9 Nb ⁶⁾	0,08	0,65	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	19,0 bis 21,0	9,0 bis 11,0	—	Nb ⁶⁾
19 12 3 L ⁶⁾	0,03	0,65	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	18,0 bis 20,0	11,0 bis 14,0	2,5 bis 3,0	—
19 12 3 Nb ⁶⁾	0,08	0,65	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	18,0 bis 20,0	11,0 bis 14,0	2,5 bis 3,0	Nb ⁶⁾
Ferritisch- austenitisch hochkorrosions- beständig									
22 9 3 NL ⁸⁾	0,03	1,0	2,5	0,03	0,02	21,0 bis 24,0	7,0 bis 10,0	2,5 bis 4,0	N 0,10 bis 0,20
25 7 2 L	0,03	1,0	2,5	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	6,0 bis 8,0	1,5 bis 2,5	—
25 9 3 Cu NL ⁸⁾	0,03	1,0	2,5	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	8,0 bis 11,0	2,5 bis 4,0	Cu 1,5 bis 2,5; N 0,10 bis 0,20
25 9 4 NL ⁸⁾	0,03	1,0	2,5	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	8,0 bis 10,5	2,5 bis 4,5	N 0,20 bis 0,30; Cu 1,5; W 1,0
Vollaustenitisch hochkorrosions- beständig									
18 15 3 L ⁹⁾	0,03	1,0	1,0 bis 4,0	0,03	0,02	17,0 bis 20,0	13,0 bis 16,0	2,5 bis 4,0	—
18 16 5 NL ⁹⁾	0,03	1,0	1,0 bis 4,0	0,03	0,02	17,0 bis 20,0	16,0 bis 19,0	3,5 bis 5,0	N 0,10 bis 0,20
19 13 4 L ⁹⁾	0,03	1,0	1,0 bis 5,0	0,03	0,02	17,0 bis 20,0	12,0 bis 15,0	3,0 bis 4,5	—
20 25 5 Cu L ⁹⁾	0,03	1,0	1,0 bis 5,0	0,03	0,02	19,0 bis 22,0	24,0 bis 27,0	4,0 bis 6,0	Cu 1,0 bis 2,0
20 16 3 Mn L ⁹⁾	0,03	1,0	5,0 bis 9,0	0,03	0,02	19,0 bis 22,0	15,0 bis 18,0	2,5 bis 4,5	—
25 22 2 NL ⁹⁾	0,03	1,0	3,5 bis 6,5	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	21,0 bis 24,0	1,5 bis 3,0	N 0,10 bis 0,20
27 31 4 Cu L ⁹⁾	0,03	1,0	1,0 bis 3,0	0,03	0,02	26,0 bis 29,0	30,0 bis 33,0	3,0 bis 4,5	Cu 0,7 bis 1,5
Spezielle Typen									
18 8 Mn ⁹⁾	0,20	1,2	5,0 bis 8,0	0,03	0,03	17,0 bis 20,0	7,0 bis 10,0	—	—
20 10 3	0,12	1,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	18,0 bis 21,0	8,0 bis 12,0	1,5 bis 3,5	—
23 12 L ⁶⁾	0,03	0,65	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	22,0 bis 25,0	11,0 bis 14,0	—	—
23 12 Nb	0,08	1,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	22,0 bis 25,0	11,0 bis 14,0	—	Nb ⁷⁾
23 12 2 L	0,03	1,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	21,0 bis 25,0	11,0 bis 15,5	2,0 bis 3,5	—
29 9	0,15	1,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	28,0 bis 32,0	8,0 bis 12,0	—	—
Hitzebeständige Typen									
16 8 2	0,10	1,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	14,5 bis 16,5	7,5 bis 9,5	1,0 bis 2,5	—
19 9 H	0,04 bis 0,08	1,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	18,0 bis 21,0	9,0 bis 11,0	—	—
19 12 3 H	0,04 bis 0,08	1,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	18,0 bis 20,0	11,0 bis 14,0	2,0 bis 3,0	—
22 12 H	0,04 bis 0,15	2,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	21,0 bis 24,0	11,0 bis 14,0	—	—
25 4	0,15	2,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	4,0 bis 6,0	—	—
25 20 ⁹⁾	0,08 bis 0,15	2,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	18,0 bis 22,0	—	—
25 20 Mn	0,08 bis 0,15	2,0	2,5 bis 5,0	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	18,0 bis 22,0	—	—
25 20 H ⁹⁾	0,35 bis 0,45	2,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	24,0 bis 27,0	18,0 bis 22,0	—	—
18 36 H ⁹⁾	0,18 bis 0,25	0,4 bis 2,0	1,0 bis 2,5	0,03	0,02	15,0 bis 19,0	33,0 bis 37,0	—	—

¹⁾ Falls nicht festgelegt Mo < 0,3 %; Cu < 0,3 % und Ni < 0,3 %.

²⁾ Einzelwerte in der Tabelle sind Höchstwerte.

³⁾ In der Tabelle nicht aufgeführte Drahtelektroden sind ähnlich, mit dem vorangestellten Buchstaben Z zu kennzeichnen.

⁴⁾ Die Ergebnisse sind auf dieselbe Stelle zu runden, wie die festgelegten Werte unter Anwendung von ISO 31-0:1992, Anhang B, Regel A.

⁵⁾ Die Summe von P und S soll den Wert 0,050 % nicht überschreiten, mit Ausnahme von 25 7 2 L, 18 16 NL, 20 16 3 Mn L, 18 8 Mn und 2 99.

⁶⁾ Si ist an das Legierungs-Kurzzeichen anzuhängen, wenn Si > 0,65 bis 1,2 %.

⁷⁾ Nb min. 10 × % C, max. 1,0 %; bis zu 20 % des Nb-Gehalts kann durch Ta ersetzt werden.

⁸⁾ Drahtelektroden mit diesen Kurzzeichen werden üblicherweise für spezifische Eigenschaften ausgewählt und sind nicht direkt austauschbar.

⁹⁾ Das reine Schweißgut ist in den meisten Fällen vollaustenitisch und kann daher zu Mikrorissen oder Heißrissen neigen.

Das Entstehen von Rissen wird durch Anheben des Mangan-Gehalts im Schweißgut reduziert. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache wurde der Mangan-Bereich für einige Sorten erweitert.

4.1.2 Bandlektroden

Das Verbindungsschweißen mit Bandlektroden hat sich kaum durchgesetzt.

Beim UP-Auftragschweißen mit Bandlektrode werden Bandlektroden der Abmessung 60 mm breit mal 0,5 mm dick mit dem Trend zu wesentlich breiteren Elektroden (100 mm Breite) eingesetzt. Der Vorteil dieses Elektrodentyps liegt – infolge des geringen Einbrandes bei gleichzeitig hoher Abschmelzleistung – in der geringeren Aufmischung des un-/niedrig legierten Grundwerkstoffes mit dem höher legierten Werkstoff der Bandlektrode. Die Lagendicke liegt bei etwa 3,5 bis 5 mm.

4.2 Schweißpulver

4.2.1 Aufgaben des Schweißpulvers

Schweißpulver sind körnige, schmelzbare, mineralische Stoffe, die beim UP-Schweißen ähnliche Aufgaben haben wie die Umhüllung der Stabelektrode:

Das Schweißpulver dient zur:

- a. Erhöhung der Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke.
dadurch: besseres Zünden
stabilerer Lichtbogen
- b. Bildung der Schlackenschicht
die: sich zu einer stabilen Kaverne aufblähen lässt.
den übergehenden Tropfen schützt.
das geschmolzene Schweißgut schützt
die Raupe formt.
bei geringem Wärmeeinbringen! (Strichraupen)
eine zu schnelle Abkühlung der Naht verhindert.
die Größe der Tropfen beeinflusst.
- c. Bildung eines Schutzgasbereich (agglomerierte Pulver)
aus: Karbonaten (z. B.: CaCO_3)
- e. Desoxidation und zum Auflegieren (agglomerierte Pulver)
durch: Zugaben von Mn, Si, Cr, Ni, Mo, usw.

Schweißpulver sind in der DIN EN ISO 14171 genormt.

4.2.2 Einteilung von Schweißpulvern

4.2.2.1 Einteilung nach der Herstellungsart

Es wird zwischen erschmolzenen und agglomerierten Schweißpulvern unterschieden. Gesinterte Schweißpulver besitzen in der Praxis nur eine untergeordnete Bedeutung:

- F (fused): erschmolzene Pulver
- A (agglomerated): agglomerierte Pulver
- M (mixed): Mischpulver

Herstellung erschmolzener Schweißpulver

Erschmolzene Schweißpulver werden durch Umschmelzen der Rohstoffkomponenten ein glasartiges Produkt. Anschließend erfolgt das Zerkleinern und Sieben auf die gewünschte Korngröße. Das Schüttgewicht und der Verbrauch sind höher als bei den agglomerierten Pulvern. Aufgrund ihrer glasartigen Oberfläche sind diese Pulver wenig feuchtigkeitsempfindlich. Erschmolzene Pulver sind zwar relativ preiswert herzustellen, nachteilig wirken sich die hohen Herstellungstemperaturen aus, die zum Ablauf chemischer Reaktionen führen, die nicht mehr beim Schweißen genutzt werden können. Die Verwendung erschmolzener Pulver ist von untergeordneter Bedeutung.

Herstellung agglomerierter Schweißpulver

Agglomerierte Pulver bestehen aus mithilfe eines Bindemittels (Wasserglas) zusammengefügtten Körnern. Diese Körner sind ein Gemisch von fein gemahlten Einzelkomponenten, die nach dem Granulieren bei einer Temperatur zwischen 600 und 800 °C gegläht werden. Da die Temperaturen zur Herstellung der Pulver unterhalb des Reaktionsvermögens der Rohstoffe liegen, können auch metallische Desoxidations- und Legierungsbestandteile beigemischt werden, die zu den gewünschten metallurgischen Reaktionen (Desoxidation, Zulegieren von z.B. Mn, Si) bei der Tropfen- und Bad-Reaktion führen. Somit können diese für die mechanisch-technologischen Gütewerte der Naht und auch für die Schweißeigenschaften nutzbar gemacht werden. Die Herstellung dieser Pulver ist teuer, der Verbrauch infolge des niedrigen Schüttgewichtes gering. Aufgrund ihres Kornaufbaus und der Herstellungsart sind diese Pulver hygroskopisch und müssen daher vor ihrem Einsatz äußerst kritisch hinsichtlich ihres Feuchtigkeitsgehaltes überprüft werden. Der Einsatz dieser Pulver ist weit verbreitet.



4.2.2.2 Einteilung von Schweißpulvern nach ihrem mineralogischen Aufbau

Der Schweißablauf und die mechanisch-technologischen Gütewerte der Naht werden in starkem Maße vom Pulvertyp bzw. den Eigenschaften der entstehenden Schlacke beeinflusst. Tabelle 7a zeigt die Einteilung von Pulvern nach dem mineralogischen Aufbau, Tabelle 7b nach Eigenschaften der verschiedenen Pulvertypen.

Tabelle 7a: Einteilung nach dem mineralogischen Aufbau von Schweißpulvern

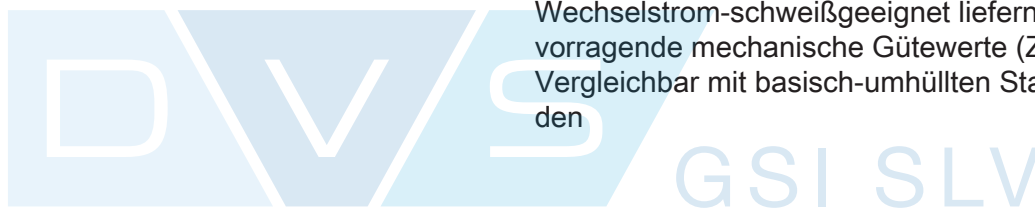
	Mangansilikat -Typ	Calciumsilikat - Typ	Aluminatrutil - Typ	aluminatbasischer Typ	fluoridbasischer Typ
Hauptbestandteile	Manganoxid MnO Quarz SiO ₂	Quarz SiO ₂ Calciumoxid CaO Magnesiumoxid MgO	Bauxit Al ₂ O ₃ Rutil TiO ₂	Bauxit Al ₂ O ₃ (min. 20%) Calciumoxid CaO Magnesiumoxid MgO	Calciumoxid CaO Magnesiumoxid MgO Manganoxid MnO Flussspat CaF ₂
sonstige mögliche Bestandteile	Bauxit Al ₂ O ₃ Flussspat CaF ₂	Bauxit Al ₂ O ₃ Flussspat CaF ₂ Manganoxid MnO	Quarz SiO ₂ Manganoxid MnO Zirkoniumoxid ZrO ₂	Manganoxid MnO Quarz SiO ₂	Quarz SiO ₂ (max. 20%) Bauxit Al ₂ O ₃
Summe der Hauptbestandteile (mind.)	50%	60%	45%	45%	50%

Tabelle 7b: Einteilung nach den Eigenschaften von Schweißpulvern

	Mangansilikat- Typ	Calciumsilikat- Typ	Aluminatrutil- Typ	aluminatbasischer Typ	fluoridbasischer Typ
Eigenschaften					
Strombelastbarkeit	sehr gut	sehr gut	gut	gut	normal
Wechselstromschweißbarkeit	normal	gut	sehr gut	gut	schlecht
Schlackenabgang	normal	gut	sehr gut	gut	normal
Porensicherheit	sehr gut	gut	gut	gut	gut
Nahtaussehen	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut	normal
Mechanische Gütewerte	normal	normal	normal	gut	sehr gut
Schnellschweiß-eigenschaften	gut	gut	sehr gut	gut	normal

Als Hauptergebnis der Tabelle 7b kann folgende Aussage zu den einzelnen Pulvertypen getroffen werden:

Mangansilikat-Typ	Die meisten Pulver dieses Typs bewirken porensichere Nähte, auch an rostigen und verunreinigten Grundwerkstoffen Vergleichbar mit sauerumhüllten Elektroden
Calciumsilikat-Typ	Ist ein „Universal“-Pulver für die Ein- und Mehrlagentechnik Vergleichbar mit sauer-basisch-umhüllten Elektroden
Aluminatrutil-Typ	Bei hohen Schweißgeschwindigkeiten ist ihr Einsatz besonders zu empfehlen. Die Schlacke lässt sich sehr gut entfernen, meist ist sie selbstabhebend- Vergleichbar mit rutilumhüllten Stabelektroden
aluminatbasischer Typ	In dieser Gruppe findet man die typischen an Wechselstrom verschweißbaren Pulver, die den Bereich leicht-basisch bis basisch abdecken Vergleichbar mit rutilbasisch umhüllten Stabelektroden
fluoridbasischer Typ	Hierunter sind die basischen und hochbasischen Pulver zusammengefasst; sie sind nur bedingt Wechselstrom-schweißgeeignet liefern jedoch hervorragende mechanische Gütewerte (Zähigkeit) Vergleichbar mit basisch-umhüllten Stabelektroden



4.2.2.3 Einteilung nach dem Basizitätsgrad

Abhängig von ihrem mineralogischen Aufbau bzw. von ihrer chemischen Zusammensetzung beeinflussen die Schweißpulver die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Schweißgutes entscheidend.

Als charakteristische Größe wird der Basizitätsgrad nach Boniczewski benutzt. Er ist definiert als

$$B = \frac{CaO + MgO + BaO + CaF_2 + Na_2O + K_2O + 0,5 \cdot (MnO + FeO)}{SiO_2 + 0,5 \cdot (Al_2O_3 + TiO_2 + ZrO_2)}$$

Entsprechend dem Basizitätsgrad werden die Pulver unterschieden:

$B < 1$	saure	Pulver
$B = 1$	neutrale	Pulver
$B > 1$	basische	Pulver
$B > 3$	hochbasische	Pulver

Exemplarisch ist in Abbildung 9 der Einfluss der Pulverzusammensetzung auf die Kerbschlagarbeit des Schweißgutes dargestellt.

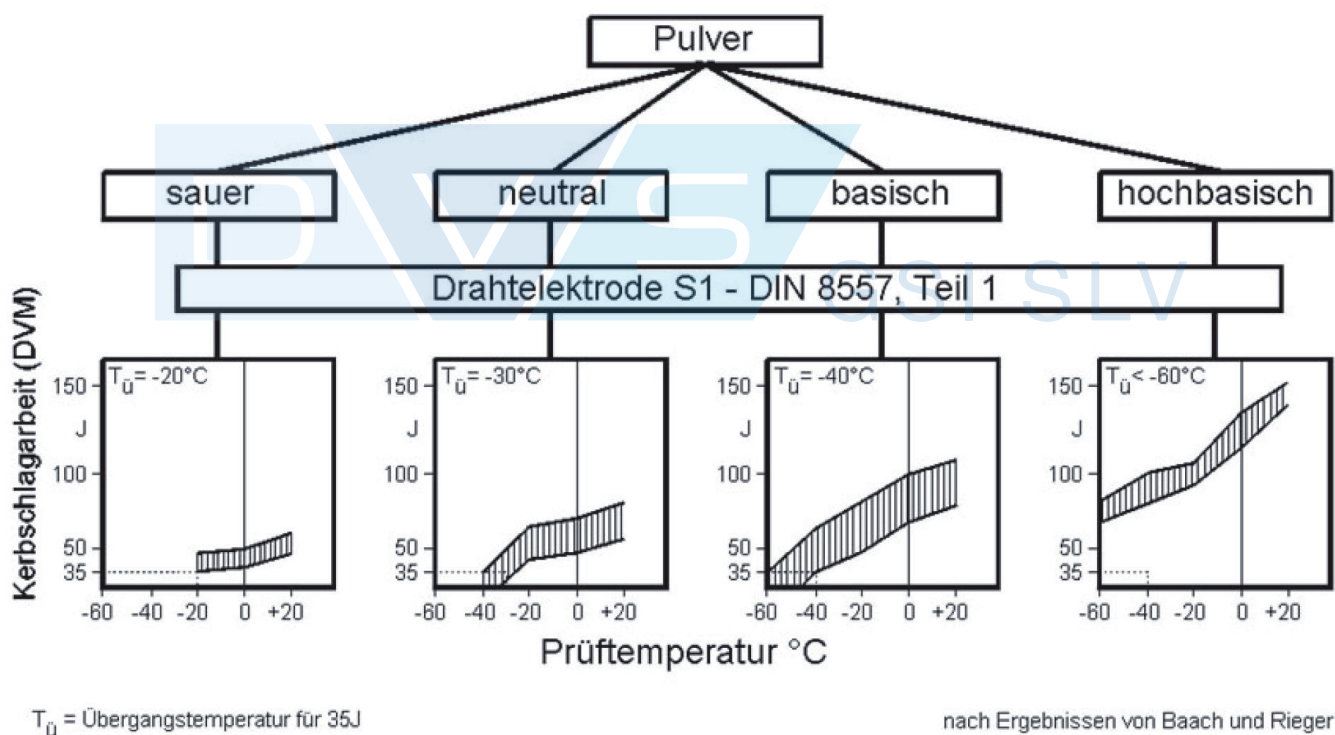


Abbildung 9: Einfluss der Pulverzusammensetzung auf die Kerbschlagarbeit des reinen Schweißgutes

Wiedergegeben sind Ergebnisse, die in Schweißversuchen ermittelt wurden, bei denen Mehrlagenschweißungen mit mindestens 8 Lagen zur Erzeugung "reinen Schweißgutes" (festgelegte Schweißbedingungen siehe Merkblatt DVS 0907 und DIN 700) jeweils mit der Elektrode S1, aber mit Schweißpulvern unterschiedlichen Basizitätsgrades geschweißt wurden. Zur Ermittlung der Kerbschlagarbeit wurden die Proben aus der obersten Lage entnommen; diese Vorgehensweise stellt sicher, dass die erzielten Ergebnisse unabhängig vom verwendeten Grundwerkstoff sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmendem Basizitätsgrad die Zähigkeitseigenschaften des Schweißgutes besser werden. Zurückzuführen ist dies auf den höheren Reinheitsgrad, der sich in einem niedrigeren Sauerstoffgehalt im Schweißgut ausdrückt, der sich bei Verwendung basischer Pulver einstellt.

4.2.3 Lagerung und Rücktrocknung von Schweißpulvern

Aufgrund ihres Kornaufbaus und unterschiedlichen Herstellungsart sind die Schweißpulver mehr oder weniger feuchtigkeitsempfindlich, sie müssen daher trocken (noch besser klimatisiert) gelagert werden. Zur Vermeidung von Poren und wasserstoffinduzierter Rissbildung, die besonders beim Schweißen höherfester Stähle auftritt, sind die Pulver vor Gebrauch nach Herstellerangaben rückzutrocknen. In verschiedenen schweißtechnischen Vorschriften wird auch eine generelle Rücktrocknung vorgeschrieben.

Übliche Rücktrocknungstemperaturen sind:

Erschmolzene Pulver:	250°C, mind. 2 h
Agglomerierte Pulver:	300 bis 400°C, mind. 2 h

Verbindlich sind die Herstellerangaben; nützliche Hinweise gibt auch die Richtlinie DVS 0914 („Verarbeitung und Lagerung von Schweißpulvern“). Beim Rücktrocknen ist in jedem Falle darauf zu achten, dass durch den Trocknungsvorgang das Pulver nicht aufgrund zu hoher Temperatur und/oder zu langer Trocknungszeit geschädigt wird.

4.2.4 Kennzeichnung und Bezeichnung der Schweißpulver

Ähnlich wie bei den Elektroden, sind auch die Pulver zur Vermeidung von Verwechslungen eindeutig zu kennzeichnen, wesentliche Merkmale sind:

- Handelsname
- Bezeichnung nach DIN EN ISO 14174
- Fabrikations- und Chargen-Nummer
- Nettogewicht
- Hersteller oder Lieferer
- Korngröße.

Entsprechend der vielfältigen Einflussmöglichkeit des Schweißpulvers gestaltet sich die Kennzeichnung relativ umfangreich, erlaubt aber eine ziemlich gute Vorhersage über den geeigneten Einsatz. Folgende Aussagen finden sich in der Bezeichnung wider.

Kennzahl für die Anwendungsklasse, Pulverklasse (Tabelle 8)

- Pulverklasse 1: Verbindungs-/Auftagschweißen von un- und niedrig legierten Stählen wie allgemeine Baustähle, hochfeste und warmfeste Stähle
- Pulverklasse 2: Verbindungs-/Auftagschweißen von nicht rostenden und hitzebeständigen Cr- und CrNi-Stählen und/oder Nickel und Nickellegierungen
- Pulverklasse 3: Pulver zum Auftragschweißen, Zubrand von C, Cr oder Mo
- Pulverklasse 4 : Andere Schweißpulver, für die die Klassen 1 bis 3 nicht gelten, z.B. Pulver für Kupferlegierungen

Kennzahl für das metallurgische Verhalten

- Kennzahlen 1 bis 9
- Sie kennzeichnen den Zu- und/oder Abbrand von Legierungselementen.
- Bei Pulverklasse 1 wird der Zu- oder Abbrand der Elemente Si und Mn in dieser Reihenfolge mit Zahlen ausgewiesen.

Tabelle 8: Bedeutung der Kennzahlen für das metallurgische Verhalten

Metallurgisches Verhalten	Kennziffer	Anteil durch Pulver im reinen <u>Schweißgut</u> % (m/m)
Abbrand	1	über 0,7
	2	über 0,5 bis 0,7
	3	über 0,3 bis 0,5
	4	über 0,1 bis 0,3
Zu- und/oder Abbrand	5	0 bis 0,1
Zubrand	6	über 0,1 bis 0,3
	7	über 0,3 bis 0,5
	8	über 0,5 bis 0,7
	9	über 0,7

Kennziffer für die Schweißstromart

- AC für Wechselstrom
- DC für Gleichstrom
- Die Eignung für AC schließt allgemein die für DC ein

Kennziffer für Wasserstoffgehalt: H5, H10 oder H15

Angegeben wird der Wasserstoffgehalt im aufgetragenen Schweißgut; H5 bedeutet maximal 5 ml Wasserstoff / 100 g **reines Schweißgut**. Voraussetzung ist, dass trockenes Schweißpulver verwendet wurde.

Strombelastbarkeit, Korngrößenbereich

Die Strombelastbarkeit des Pulvers hängt von verschiedenen Schweißbedingungen ab. Deshalb sieht die Pulverbezeichnung keine Kennzeichnung vor. Die Informationen des Pulverherstellers sind zu nutzen. Die Körnung gibt die kleinste und die größte Korngröße des Schweißpulvers an (z.B. Korngrößenbereich 2 bis 16 bedeutet Korngrößen von 0,2 bis 1,6 mm)

Beispiel einer Pulverbezeichnung

Schweißpulver ISO 14174 – S F CS 1 6 7 AC H10

- DIN EN ISO geltende Norm
- S Pulver/Unterpulverschweißen
- F erschmolzenes Pulver
- CS Pulvertyp Calcium-Silikat
- 1 Anwendung, Pulverklasse 1
- 67 Metallurgisches Verhalten:
- - 6: Zubrand von Si über 0,1 bis 0,3%
- - 7: Zubrand von Mn über 0,3 bis 0,5%
- AC für Wechselstrom geeignet
- H10 Wasserstoffgehalt von 10 ml / 100 g (reines) Schweißgut

4.3 Draht/Pulver- Kombination

Die Auswahl von Draht und Pulver erfolgt unter Beachtung schweißtechnischer und metallurgischer Gesetzmäßigkeiten. Hierbei sind die Wechselstromneigung, Strombelastbarkeit und Schnellschweiß Eigenschaften aus schweißtechnischer Sicht von Bedeutung. Das metallurgische Verhalten des Schweißpulvers im Zusammenwirken mit der Elektrode wirkt sich hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung der Schweißnähte und den hiervon beeinflussten mechanisch-technologischen Gütewerten der Naht aus und muss daher mit in die Auswahlkriterien einbezogen werden.

4.3.1 Metallurgisches Verhalten

Beim UP-Schweißen von un- und niedrig legiertem Stahl kommt es aufgrund der Metall-Schlacke- sowie der Metall-Gas-Reaktion (Tropfenreaktion in gasgefüllter Schweißkaverne) zum Zu- oder Abbrand von Legierungselementen. Betroffen sind hiervon die Elemente C, Si und Mn. Je nach Gehalt im Metall (Elektrode und werkstückseitiges Schmelzbad) und in der Schlacke kommt es abhängig vom Reaktionsgefälle zu einem Zubrand oder aber auch zu einem Abbrand der Elemente C, Si und Mn. Somit weicht die chemische Zusammensetzung des Schweißgutes mehr oder weniger stark von der entsprechend der Vermischung – Erfahrungswert: ca. 1 / 3 Elektrodenwerkstoff und 2/3 Grundwerkstoff ergeben beim UP-Schweißen mit Drahtelektrode das Schweißgut der Naht – errechneten ab.

Das metallurgische Verhalten wird vom Pulver-Hersteller entsprechend den in Merkblatt DVS 0907 beschriebenen Richtlinien ermittelt. Hierfür werden Mehrlagenschweißungen (mind. 8 Lagen) unter eingegrenzten Schweißbedingungen mit Elektroden, die sich jeweils im Si- und Mn-Gehalt unterscheiden, ausgeführt. Der Vergleich der ermittelten chemischen Zusammensetzung des so erzeugten „reinen Schweißgutes“ mit dem Legierungsgehalt der jeweils verwendeten Elektrode ergibt den Zu- oder Abbrand der getesteten Draht/Pulver-Kombination und erlaubt somit eine Aussage über das metallurgische Verhalten des Pulvers, welches eine individuelle Eigenschaft des Pulvers darstellt und daher bei der Pulverauswahl unbedingt berücksichtigt werden muss.

4.3.2 Bezeichnung einer Draht/Pulver-Kombination

In DIN EN ISO 14171 finden sich auch Kurzzeichen, die Auskunft über die mechanisch-technologischen Gütewerte des Schweißgutes einer Draht/Pulver-Kombination gibt

Beispiel einer Bezeichnung

Draht/Pulver-Kombination ISO 14171-A-S 46 3 AB S2

- ISO 14171-A: Nummer der Internationalen Norm mit Einteilung nach Streckgrenze und Kerbschlagarbeit von 47 J
- S: Draht/Pulver-Kombination für Unterpulverschweißen
- 46: Angabe für die Festigkeitseigenschaften: 460 N/mm²
- 3: Angabe für die Kerbschlagarbeit: 47J
- AB: Schweißpulvertyp aluminatbasisches Pulver
- S2: Drahtelektrode S2 (1% Mn)

5 Verfahrenparameter, Schmelzbadsicherung

5.1 Abschmelzleistung

Die Abschmelzleistung ist maßgeblich von der Stromstärke und bei gegebener Stromstärke von der über den Drahtdurchmesser zu beeinflussenden Stromdichte abhängig. Die Stromdichte in der Elektrode wird zu $30 \div 90 \text{ A/mm}^2$ (Faustformel: Stromhöhe ca. 100- bis 200-mal Durchmesser), gelegentlich kann sie zur Leistungssteigerung auch höher gewählt werden.

5.2 Einfluss der Elektrodenstellung auf Einbrandtiefe und Nahtgeometrie

Über die Elektrodenstellung kann in gewissen Grenzen Einfluss auf die Nahtgeometrie genommen werden: Bei „schleppender“ Anordnung der Elektrode wird die Naht tiefer und schmaler, während bei „stechender“ Ausrichtung eine gewisse Nahtbreite auch bei höheren Schweißgeschwindigkeiten möglich ist, Abbildung 10.

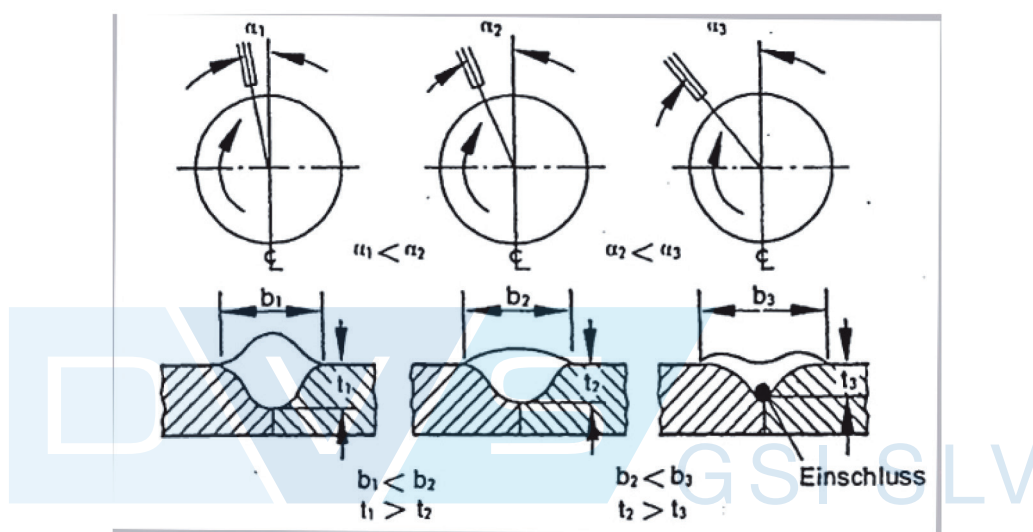


Abbildung 10: Nahtgeometrie bei Außen-Rundnähten in Abhängigkeit von der Elektrodenstellung

5.2.1 Pulverkörnung

UP-Schweißpulver werden in verschiedenen Korngrößen geliefert. Feinkörnige Pulver erlauben schnelleres Schweißen und haben eine höhere Strombelastbarkeit. Sie ergeben eine dichtere Schüttung und daher einen höheren Pulververbrauch. Grobe Schweißpulver führen wegen der lockeren Aufschüttung zu einer besseren Ausgasung und damit höheren Porensicherheit.

5.3 Schweißbadsicherung

Aufgrund der z.T. recht großen Schmelzbäder muss durch geeignete Maßnahmen sichergestellt werden, dass das Schmelzbad nicht durchfällt. Falls die Steghöhe nicht groß genug ist und/oder zu große Steghöhenabstände vorliegen, müssen Badsicherungen verwendet werden (Abbildung 11).

Bei Verwendung von Kupferschienen muss durch intensive Kühlung und/oder konstruktive Gestaltung dafür Sorge getragen werden, dass an der Berührungsstelle Naht – Kupfer die Kupferschiene nicht aufgeschmolzen wird. Die Folge könnte sonst Kupferlötbruch sein.

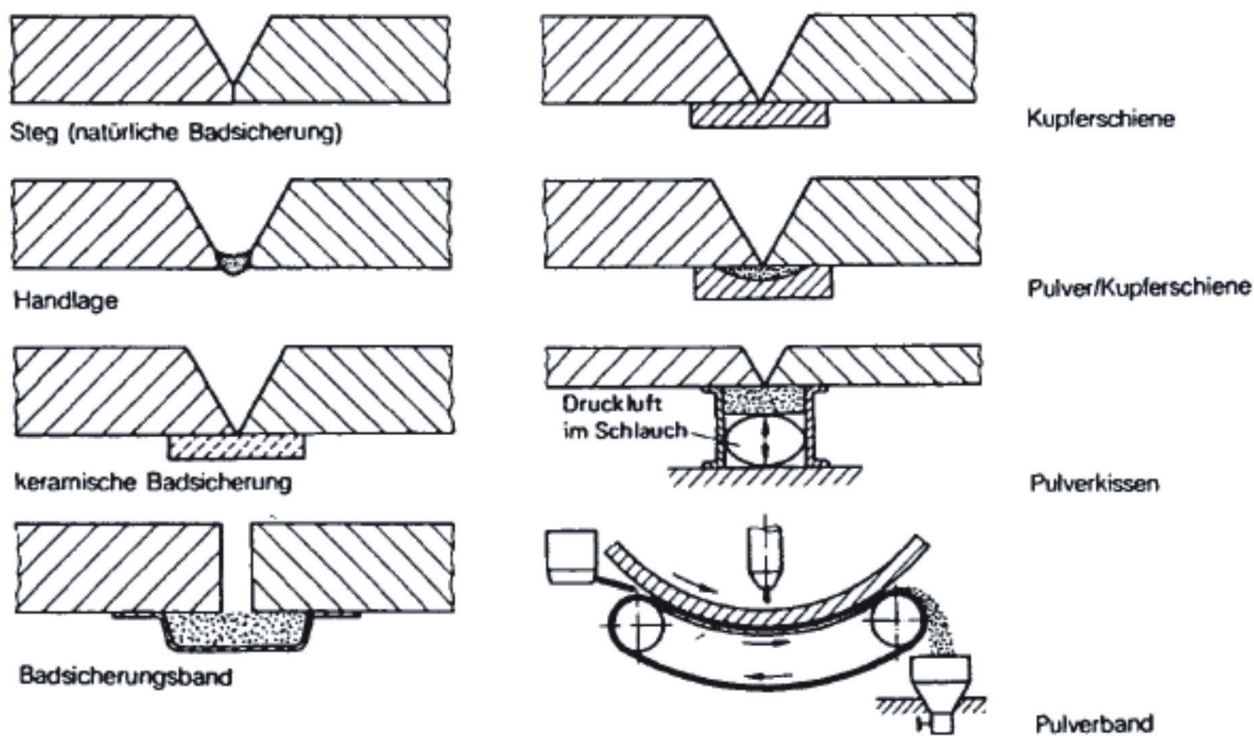


Abbildung 11: Gebräuchliche Badsicherungen beim UP-Schweißen



6 Möglichkeiten zur Leistungssteigerung beim UP-Schweißen

Vielfache Anwendung findet das UP-Eindrahtschweißen, wobei auch dickere Bleche wirtschaftlich durch mehrere Lagen verbunden werden können. Die Abbildung 12 zeigt den Querschliff einer mehrlagigen UP-Schweißung; mit Gegenlage.

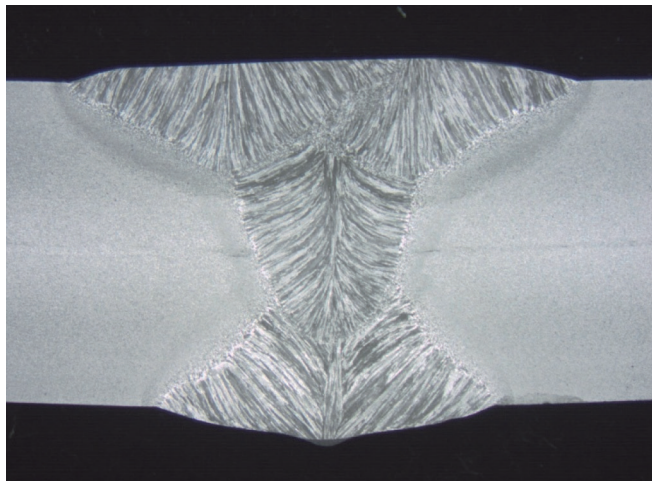


Abbildung 12: Mehrlagige UP-Schweißung an einem 30 mm dicken Blech aus niedrig legiertem Stahl

Erhöhte Qualitätsanforderungen und ständig wachsende Lohn- und Nebenkosten führen zu der Notwendigkeit, die Leistungsfähigkeit des ohnehin schon leistungsstarken UP-Schweißens mit Drahtelektrode weiter zu steigern. Da mit Erhöhung der Stromstärke die Ab- und Aufschmelzleistung zunehmen, ist eine gewisse Steigerung der Produktivität durch die dann mögliche höhere Schweißgeschwindigkeit und/oder das Schweißen dicker Bleche bei geringerer Lagenzahl möglich.

Eingeschränkt wird der nutzbare Stromstärkenbereich durch die Strombelastbarkeit der Schweißpulver. Außerdem kann die bei hoher Stromstärke bzw. Energiekonzentration ggf. entstehende ungünstige Nahtgeometrie zu Heißrissen, Poren oder Randkerben führen.

6.1 Leistungssteigerung beim UP-Eindrahtschweißen

Die Modifizierung der konventionellen UP-Eindraht-Technik bietet die Möglichkeit, höhere Schweißleistungen bei gleicher Qualität der Verbindung zu erzielen (Abbildung 13). So führt ein längeres freies Drahtende (Abbildung 14) oder ein kleinerer Drahtdurchmesser infolge stärkerer Widerstandserwärmung zu höheren Abschmelzleistungen. Diese können – insbesondere im Falle der Auftragschweißung – zu einer merklichen Leistungssteigerung genutzt werden. Durch die Verwendung metallischer Zusätze (artgleiche oder spezifische Zusammensetzung) kann ebenfalls eine höhere Schweißgeschwindigkeit erreicht werden. Zu beachten ist hierbei, dass das Metallpulver, welches konzentrisch um die Elektrode zugeführt wird und dort aufgrund des Magnetfeldes der Elektrode fest anhaftet, beim Durchgang durch die Schlacke dieser Wärme entzieht ebenso wie der gesamten Schweißzone. Da die Stromstärke unverändert bleibt, sind dieser Methode zur Vermeidung von Nahtfehlern Grenzen gesetzt (erzielbare Steigerung der Abschmelzleistung ca. 20 bis 30%). Schließlich bewirkt bei gleicher eingebrachter Energie die negative Polung der Elektrode, je nach Schweißpulver und Stromstärke, einen Anstieg der Abschmelzleistung um ca. 20% gegenüber positiver Polung.

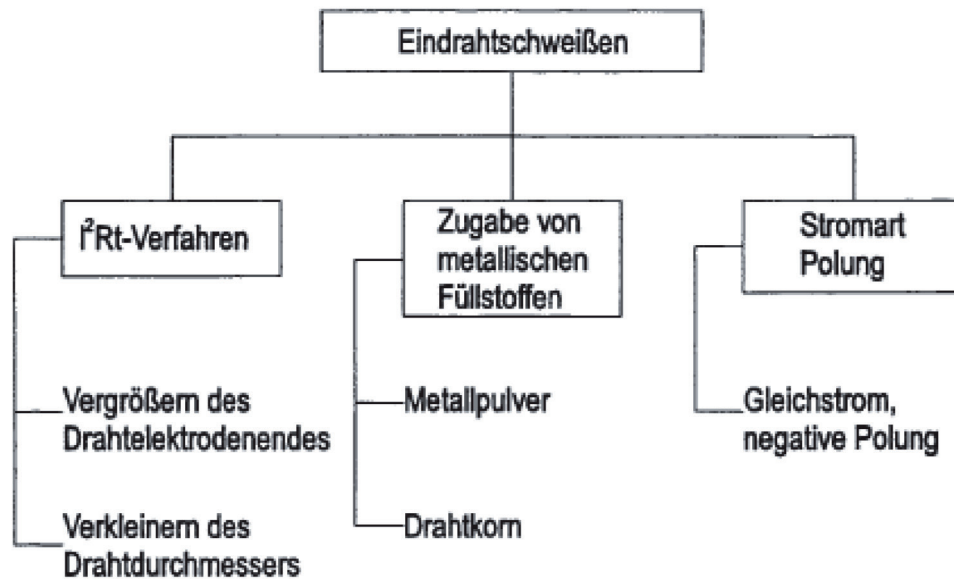


Abbildung 13: Möglichkeiten zur Leistungssteigerung beim UP-Eindrahtschweißen

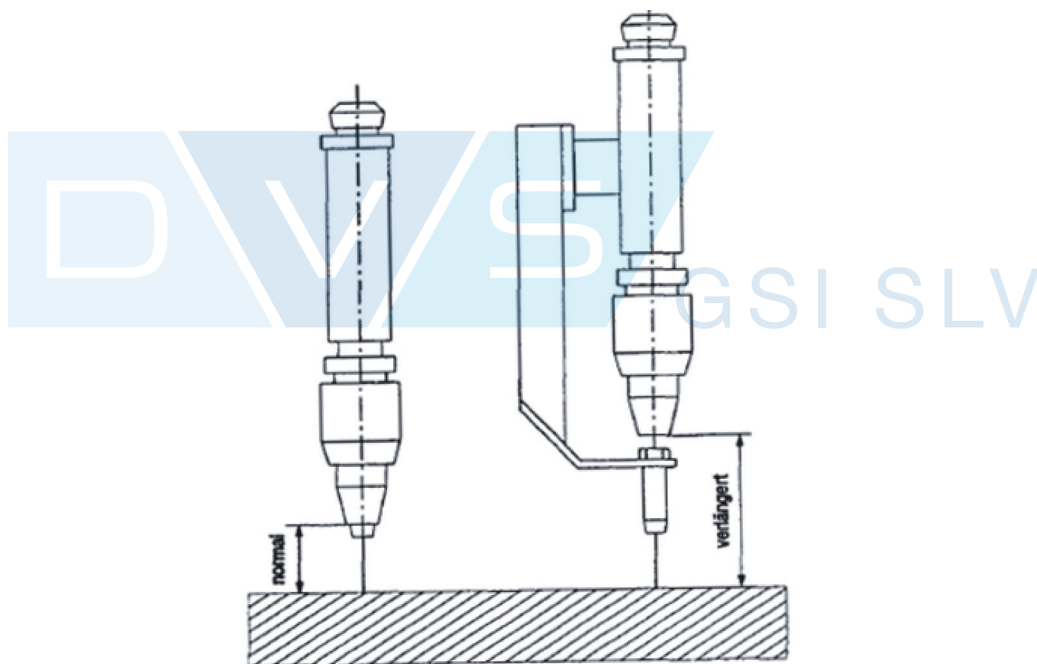


Abbildung 14: Normales und verlängertes freies Drahtelektrodenende beim UP-Schweißen

6.2 Leistungssteigerung beim UP-Mehrdrahtschweißen

Die wirksamste Methode zur Leistungserhöhung besteht im gleichzeitigen Abschmelzen mehrerer Elektroden und Zufuhr von Zusatzdraht und/oder Metallpulver (Abbildung 17). Diese Verfahrensvarianten erlauben die beim Eindrahtschweißen zu verzeichnenden Nachteile, wie ungünstige Einbrandgeometrie und Energiekonzentration, weitgehend auszuschalten und durch Steuerung des Einbrandes und des Wärmebringens, sowohl die Nahtqualität zu verbessern als auch die Fertigungszeiten erheblich zu verkürzen. Die reinen Mehdraht-Systeme sind die heute wirtschaftlichsten und am weitesten entwickelten Verfahren; die übrigen Verfahrensvarianten sind Sonderanwendungen vorbehalten.

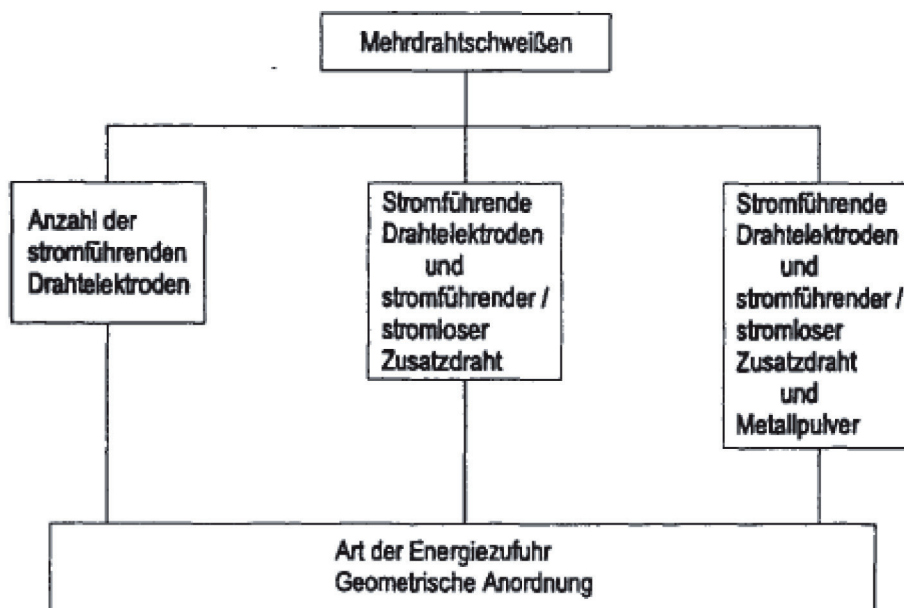


Abbildung 15: Möglichkeiten zur Leistungssteigerung beim UP-Mehdrahtschweißen

6.2.1 Doppeldrahtschweißen mit gemeinsamem Vorschubsystem

Zu Beginn der Entwicklung des UP-Mehdrahtschweißens in den Jahren 1950 bis 1960 wurden zunächst zwei Elektroden in Quer- oder Nachlaufposition verwendet. Die beiden Elektroden werden von einer Drahtvorschubeinheit gefördert und sind mit einer Energiequelle verbunden (Doppeldrahtschweißen Abbildung 16). Der gerätetechnische Aufwand ist hierbei gering, da lediglich nur eine geänderte Kontaktdüse und modifizierte Drahtvorschubrolle benötigt werden. Mit diesem Verfahren ist aufgrund der in gewissen Grenzen steuerbaren Energiekonzentration im Werkstück eine bessere Spaltüberbrückbarkeit gegenüber der Eindraht-Technik zu erzielen. Durch seitliches Versetzen können die Lichtbögen z.B. gezielt auf die beiden Flanken gelenkt werden, wodurch größere Toleranzen in der Nahtvorbereitung zulässig sind und ggf. auf eine Schweißbadsicherung verzichtet werden kann. Die Abschmelzleistung ist aufgrund der kleineren Drahtdurchmesser bei gleicher Energiezufuhr wegen der gestiegenen Stromdichte um bis zu ca. 50% höher. Hierdurch sind kürzere Fertigungszeiten realisierbar.

Doppeldrahtschweißen

Merkmale: zwei Drahtelektroden
eine Stromquelle
eine Regelung

Vorteile: hohe Abschmelzleistung
gute Spaltüberbrückbarkeit
hohe Schweißgeschwindigkeit

Typische Schweißdaten:

Elektrorendurchmesser: 2,5 mm

Stromstärke: ca. 800 A

Spannung: ca. 32 V

Schweißgeschwindigkeit: bis ca. 120 cm/min

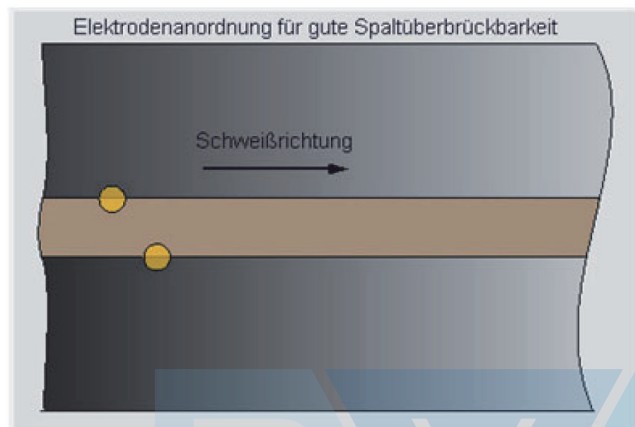


Abbildung 16: Doppeldrahtschweißen mit gemeinsamem Vorschubsystem

Die Tatsache jedoch, dass mit dieser Verfahrenstechnologie – eine Energiequelle und eine gemeinsame Drahtvorschubeinheit – die Einbrandverhältnisse und Abschmelzleistung weitestgehend miteinander gekoppelt sind, führte zur Entwicklung weiterer Mehrdrahtvarianten, bei denen diese Nachteile in größerem Umfang beseitigt sind.

6.2.2 Mehrdrahtschweißen mit getrennten Vorschubsystemen

Bei den heute gebräuchlichen UP-Mehrdrahtschweißverfahren werden zwei (Tandemschweißen), drei oder noch mehr Elektroden, von denen jede mit ihrer eigenen Stromquelle verbunden ist, durch getrennt steuerbare Fördersysteme der Schweißstelle zugeführt; alle Elektroden schmelzen dabei in einer gemeinsamen Schweißkaverne ab. Hierdurch können unterschiedliche Strom- und Spannungswerte an den einzelnen Elektroden eingestellt und gezielt auf die Nahtgeometrie Einfluss genommen werden.

Gleichzeitig mit den genannten Vorteilen erhöht sich jedoch die Anzahl der Parameter, die zur Erzielung guter Ergebnisse optimiert werden müssen, um ein Vielfaches:

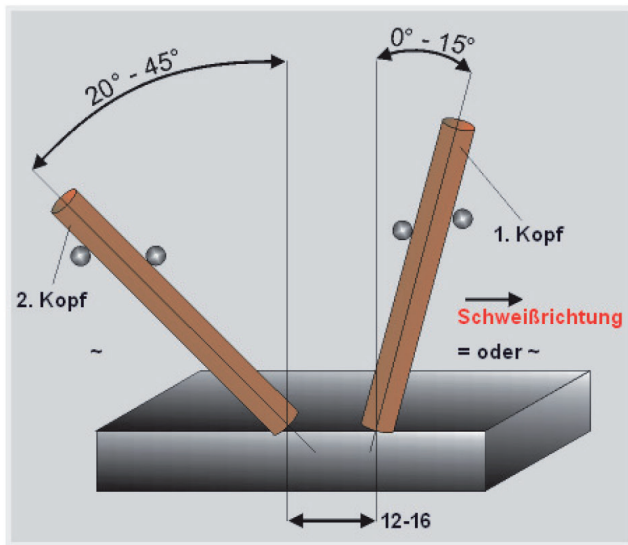
Hinsichtlich der Energiezufuhr sind zu beachten:

- Stromart und Polung der Elektroden
- Elektrische Schaltung (parallel, Reihe)
- Phasenfolge und -verschiebung
- Charakteristik der Energiequelle
- Schweißparameter

Allgemein ist festzustellen, dass die Verwendung reiner Gleichstromsysteme wegen zu starker gegenseitiger Beeinflussung der Lichtbögen zu vermeiden ist. Die Versorgung der ersten Elektrode mit Gleich-

strom und positiver Polung bringt Vorteile bzgl. der Prozessstabilität.

Das Schaltungsprinzip beim UP-Tandemschweißen zeigt die Abbildung 19.



Merkmale:

- zwei Drahtelektroden
- zwei Stromquellen
- zwei Regelungen

Vorteile:

- hohe Abschmelzleistung
- hohe Schweißgeschwindigkeit
- günstige Nahtgeometrie
- gute mechanische Gütewerte



Typische Schweißdaten:

	1. Kopf	2. Kopf
Stromstärke:	650 A	550 A
Spannung:	30 V	32 V
Drahtelektroden Durchmesser:	4 mm	4 mm
Schweißgeschwindigkeit:	95 cm/min	95 cm/min

Einfluss der Polung auf die Blaswirkung

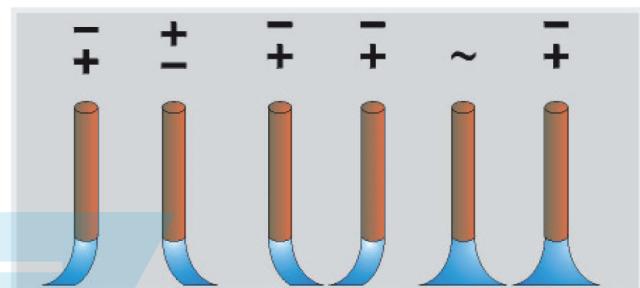


Abbildung 17: Mehrdrahtschweißen (Tandem) mit getrennten Vorschubsystemen

Ein „Traktor“ zum Schweißen einer Tandemschweißnaht (hier Kehlnaht) sowie eine Tandemschweißnaht sind in der Abbildung 18 zu sehen.



Abbildung 18: UP-Kehlnahtschweißen mit dem Tandemverfahren und eine Tandemschweißnaht (Werkbilder: ESAB)

Mit großem Erfolg werden die UP-Mehrdrahtverfahren bei der Großrohrfertigung, im Behälter-/Apparate-/Brückenbau und im Schiffbau eingesetzt.

6.2.3 Mehrdrahtschweißen mit zusätzlichem Kalt-/Heißdraht

Während die Zufuhr von stromlosem Draht („Kalt Draht“) wegen der geringeren erzielbaren Erhöhung der Abschmelzleistung nicht gerechtfertigt ist, kann eine weitere Leistungssteigerung dadurch erzielt werden, dass zusätzlich ein stromdurchflossener Draht („Heißdraht“, kein Lichtbogen!) zugeführt wird (Abbildung 19). Bei nur geringfügig erhöhter Gesamtstromstärke (Zusatzdraht: 150 bis 200A, 12 bis 14V) sind bis zu 20% geringere Fertigungszeiten erreichbar. Ein weiterer Vorteil dieser Technik ist die insgesamt niedrigere Temperatur des Schmelzbades und der geringere Abbrand an Legierungselementen des Zusatzdrahtes.

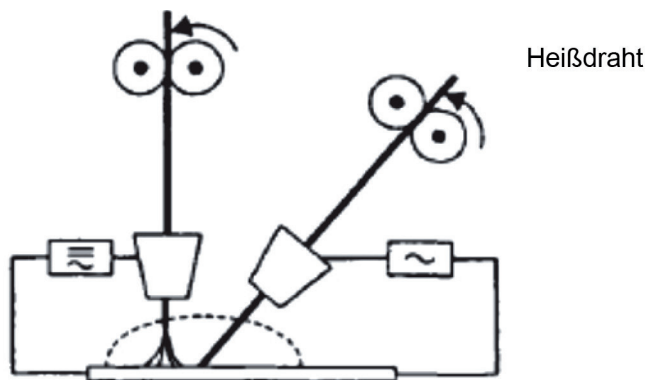


Abbildung 19: UP-Mehrdrahtschweißen mit zusätzlichem Heißdraht

6.2.4 Mehrdrahtschweißen mit Zusatz von Kalt Draht und/oder Metallpulver

Im Gegensatz zur Heißdraht-Technik ist diese Verfahrensweise dadurch gekennzeichnet, dass keine zusätzliche Energie eingebracht wird. Bei gleicher zugeführter elektrischer Energie wird der Wärmeüberschuss des durch den Lichtbogen überhitzten Schlacke- und Schweißbades dazu genutzt, zusätzlich metallische Werkstoffe, z.B. Draht oder Metallpulver, aufzuschmelzen.

Durch die so erfolgende höhere Abschmelzleistung (ca. 20%) bei gleicher Energiezufuhr kann die Schweißgeschwindigkeit in gleicher Größenordnung gesteigert werden.

Begrenzt wird die Menge des Metallpulvers durch das Auftreten von Bindefehlern, Schlackeneinschlüssen und ungünstiger Raupengeometrie infolge eines zu hohen Kühleffektes.

7 Verfahrensvarianten

Im Folgenden werden Verfahrensvarianten erläutert, die ebenfalls mit großem Erfolg angewendet werden.

7.1 Unterpulverschweißen mit Banelektrode

Mit bandförmigen Elektroden können sowohl Verbindungs- als auch Auftragschweißungen erstellt werden.

7.1.1 UP-Verbindungsschweißen

Das Verbindungsschweißen mit in Schweißrichtung längs gestellter Elektrode bringt ähnliche Vorteile wie das Doppeldrahtschweißen. Bei schräg- oder quergestelltem Band sind ein geringerer Einbrand und eine bessere Spaltüberbrückbarkeit gegeben. Die Anwendung ist – wenn überhaupt – lediglich auf Sonderfälle begrenzt.

7.1.2 UP-Auftragschweißen

Das Haupteinsatzgebiet des UP-Schweißens mit Banelektrode ist das Auftragschweißen (Abbildung 20). Es wird sowohl bei der Neufertigung zum Auftragen von gegenüber dem Grundwerkstoff stark abweichenden als auch bei der Instandhaltung/Reparatur zum Auftragen von grundwerkstoffähnlichen Schichten angewendet, die durch Verschleiß abgetragen waren. Vor allem werden korrosionsbeständige oder harte/verschleißfeste Schichten aufgetragen.

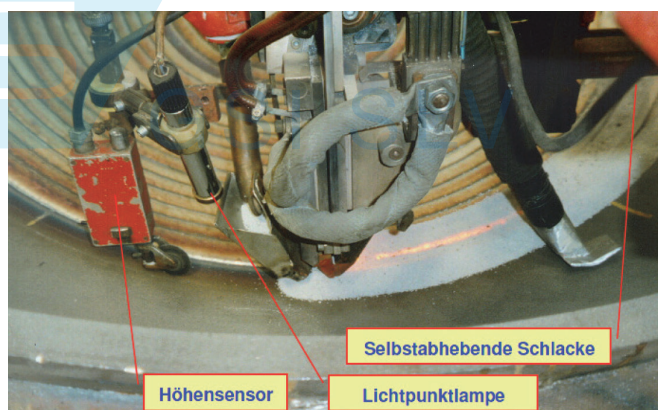
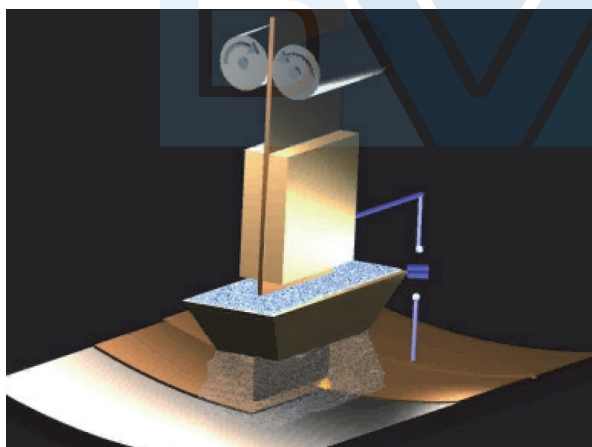


Abbildung 20: UP-Bandplattieren, schematische Darstellung und Bildausschnitt einer Schweißanlage (ESAB)

Merkmale: - bandförmige Elektrode

- eine Stromquelle
- eine Regelung

Vorteile: Auftragsschweißen

- hohe Plattierungsleistung
- geringe Aufmischung
- glatte Oberfläche

Typische Schweißdaten:

Banelektrodenabmessung:	60 • 0,5 mm
Stromstärke:	600 - 650 A
Spannung:	28 - 30 V
Schweißgeschwindigkeit:	9 - 12 cm/min

Beim UP-Auftragschweißen muss berücksichtigt werden, dass durch die Vermischung von Grund- und Auftragwerkstoff sich teilweise unerwünschte Gefügeausbildungen mit ungünstigen Eigenschaften ergeben.

Die beim Auftragschweißen i. Allg. angestrebte geringe Aufmischung (ca. 20%) wird bei Verwendung bandförmiger Elektroden dadurch erreicht, dass der Lichtbogen ständig an der abschmelzenden Bandkante „hin- und herläuft“, wodurch eine tiefe Aufschmelzung vermieden wird.

Geschweißt wird mit Gleichstrom, Elektrode positiv gepolt, wobei Stromquellen mit flach fallender Kennlinie bevorzugt werden.

Die Definition der Aufmischung ist der Abbildung 21 zu entnehmen.

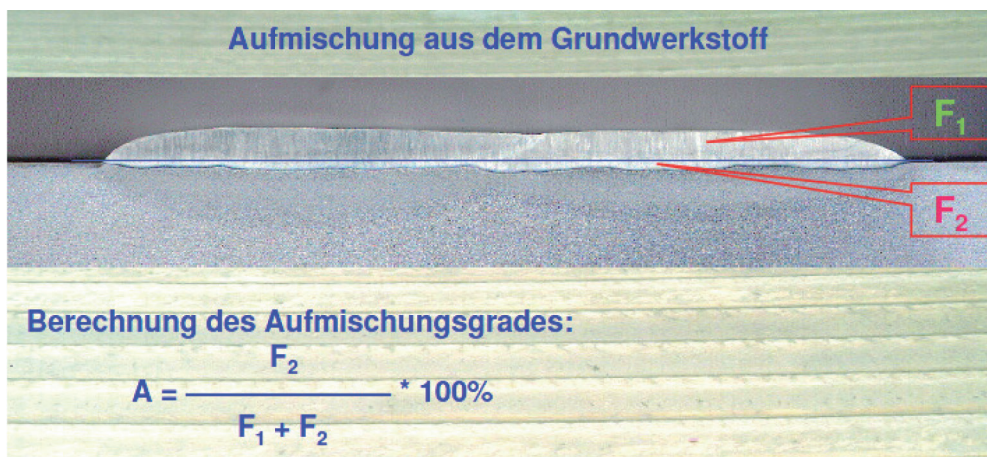
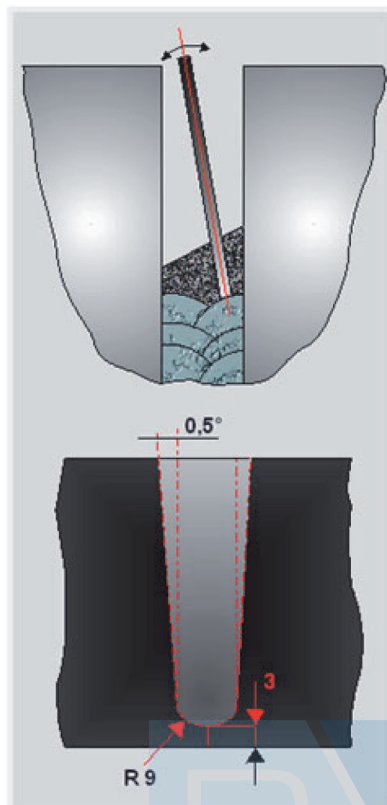


Abbildung 21: Aufmischung, dargestellt an einer Bandplattierung (nach Schofer, ESAB)

7.2 UP-Engspaltschweißen

Der Einsatz dieser Verfahrensvariante erfolgt bei dicken Werkstücken im Reaktor-Kessel- und Druckbehälterbau sowie im Maschinenbau, z.B. Turbinenwellen, Rotoren und Kurbelwellen. Geschweißt werden un-, niedrig und hoch legierte Werkstoffe. Das Ziel ist, durch eine spezielle Fugenform den Nahtquerschnitt klein zu halten und damit Schweißzusatz einzusparen. Verbunden hiermit sind günstigere Spannungsverhältnisse in der Verbindung und eine erheblich kürzere Fertigungszeit.

Das UP-Engspaltschweißen kann – abhängig von den Bauteilbedingungen – als UP-Eindraht-, Tandem- oder Doppeldrahtverfahren ausgeführt werden. Zweckmäßigerweise werden Nahtnachführungssysteme (taktile oder berührungslose, z.B. mit Laserstrahl geführte) eingesetzt, um Fehler, die gerade bei dicken Bauteilen nur sehr schwer beseitigt werden können, zu vermeiden. Ein besonderes Augenmerk ist zu richten auf die Stromkontakteinheit im Engspalt, um Kurzschlüsse, die unweigerlich zu Fehlern führen, auszuschließen. Entsprechende Angaben enthält die Abbildung 22.



Vorteile:

- Reduzierung des Nahtvolumens
- Reduzierung der Schweißzeit
- Verbesserung des Eigenspannungszustandes

Nachteile:

- Hohe Investitionskosten
- sehr hohe Anforderungen an die Prozesssicherheit
- aufwendige Reparaturkosten

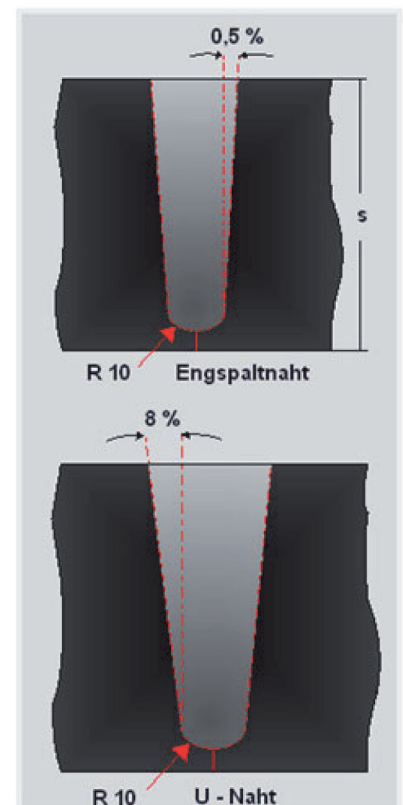


Abbildung 22: UP- Engspaltschweißen

Daten bezüglich eingesparten Schweißnahtvolumens in Zusammenhang mit der Dicke der verschweißten Bleche und den Nahtquerschnitt im Vergleich zu einer V-Naht Vorbereitung zeigt die Tabelle 9.

Tabelle 9:

Schweißnahttiefe s	[mm]	50	75	100	120	250	290	670
Nahtquerschnitt (in Klammern V-Naht)	[mm ²]	8,1 (9,4)	13,2 (17,5)	18,6 (27,4)	22,9 (36,6)	52,7 (123,6)	62,4 (159,9)	169,1 (729,4)
Eingespartes Volumen	[%]	14	24	32	38	57	61	76,8

Die Abbildung 23, links, zeigt den Ausschnitt einer kompletten, funktionsfähigen Engspaltschweißmaschine.

Einen Blick in die Schweißfuge während des Schweißens zeigt die Abbildung 23, rechts.

Der viellagige Aufbau einer Engspaltschweißung ist in dem Querschliff in Abbildung 24 zu sehen.

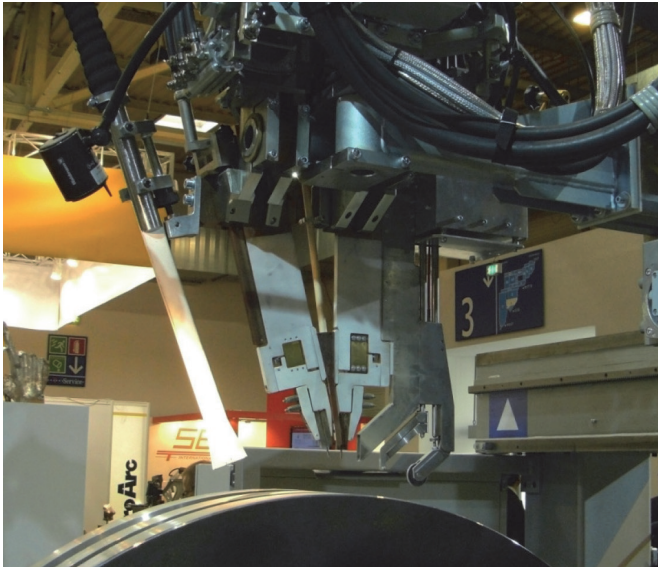
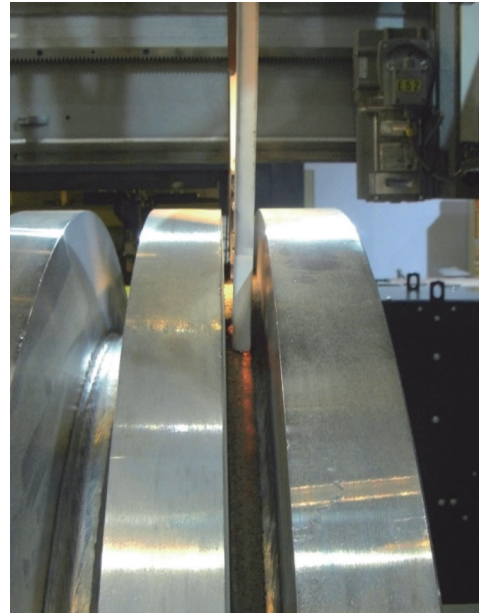


Abbildung 23: UP-Engspalt-Tandemschweißanlage



Blick in den Schweißspalt

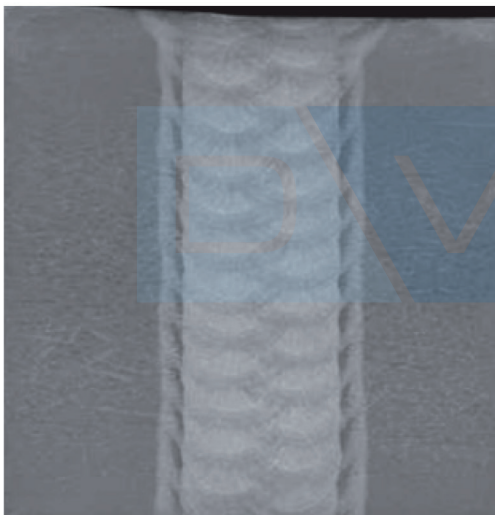


Abbildung 24: Querschliff des oberen Teils der UP- Engspalt- Schweißung (AREVA)

7.3 UP-Quernahtschweißen

Mit geeigneten Vorrichtungen zur Befestigung der Schweißköpfe und Abstützung des Schweißpulvers können auch Quernähte ausgeführt werden (Abbildung 25 und 26). Zum Fügen vorgefertigter Behälterschüsse sind Schweißeinrichtungen erhältlich, die – mit entsprechenden Montageeinrichtungen an den Bauteilen befestigt – eine Umfangsnaht an zwei Behälterschüssen vollmechanisiert ausführen.

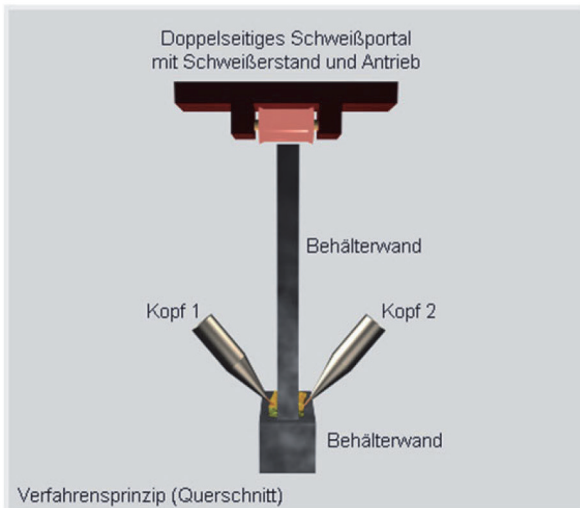


Abbildung 25: Unterpulver-Quernahtschweißen

Merkmale:

- eine Drahtelektrode je Schweißkopf
- eine Stromquelle
- eine Regelung

Vorteile: Baustellenschweißung von Großbauteilen sind möglich

Durchführung: Einseiten- oder auch gleichzeitiges Zweiseitenschweißen möglich



Abbildung 26: Schematischer Aufbau des Quernahtschweißens mit Pulverband

7.4 Formgebendes Schweißen

Als Alternative zur Herstellung mittlerer und schwerer Schmiedestücke wurde das Formgebende Schweißen entwickelt. Man versteht darunter ein Verfahren, bei dem Halbzeuge oder Aufschweißteile hergestellt werden, die vollständig aus Schweißgut bestehen.

Man bedient sich hierbei des Viellagenschweißens, wobei draht- oder bandförmige Zusatzwerkstoffe eingesetzt werden. Diese besondere Technik sowie die metallurgische Beeinflussung des Schweißgutes, welche durch die Abstimmung der Draht- bzw. Band/Pulver-Kombination möglich ist, machen den so erzeugten Werkstoff dem Schmiedewerkstoff überlegen. Zu nennen sind das nahezu isotrope Verhalten bei ausgezeichneten mechanisch-technologischen Gütewerten und der i.Allg. niedrigere C-Gehalt des „Formschweißgutes“ sowie das entbehrliche Umformen und Vergüten.

Trotz der beschriebenen Vorteile fand/finder diese Verfahrensvariante keine großtechnische Anwendung, sondern ist auf Sonderfälle begrenzt.

8 Fehler beim UP-Schweißen und Abhilfemaßnahmen

Das UP-Schweißen ist prinzipiell ein fehlerunanfälliges Schweißen. Dennoch auftretende Fehler können in "innere Fehler" und "äußere Fehler", entsprechend Abbildung 27, unterteilt werden.

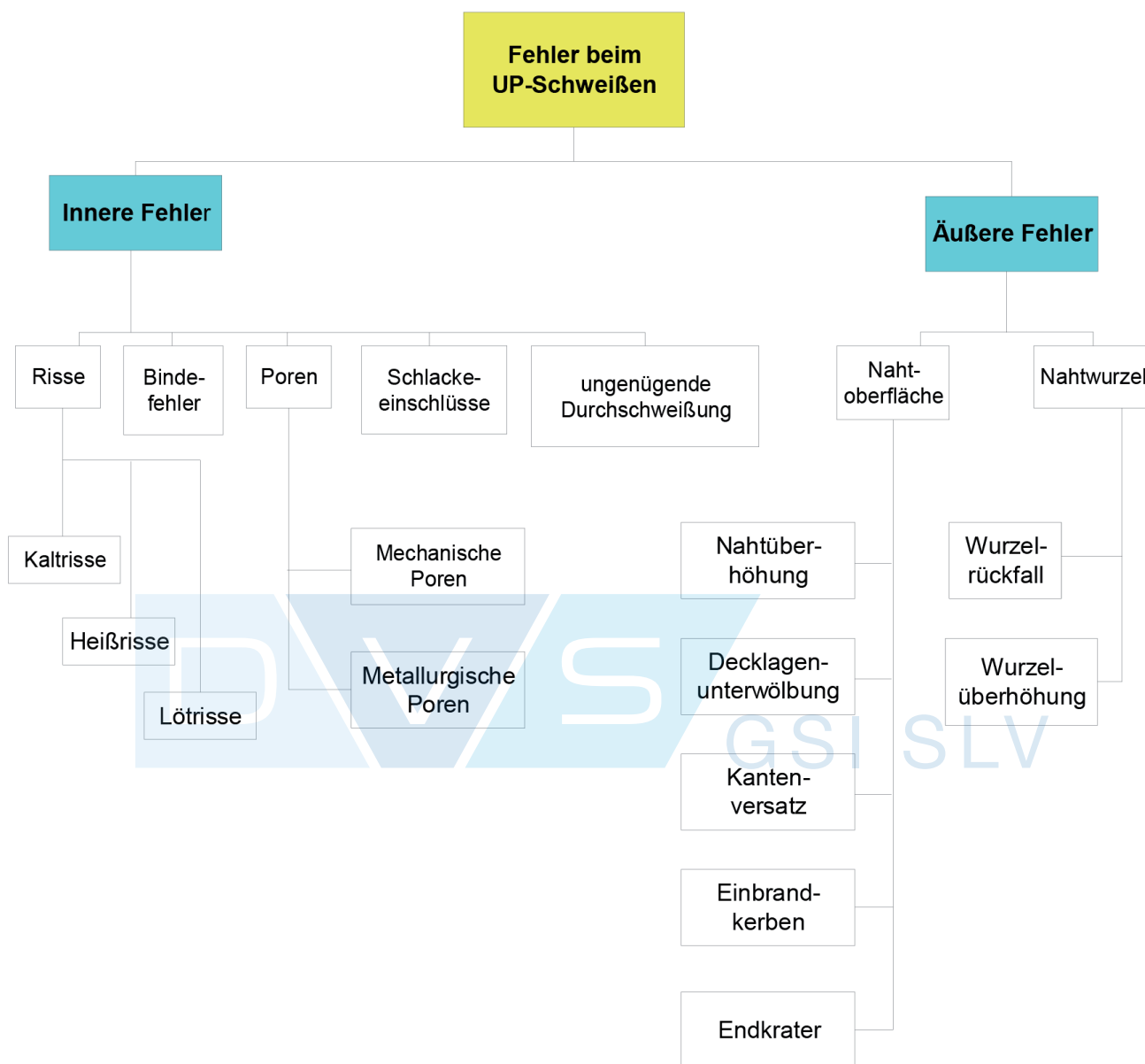


Abbildung 27: Innere und äußere Fehler beim UP-Schweißen

Einige besonders wichtige Fehler und Abhilfemaßnahmen werden nachfolgend erläutert.

1. Kaltrisse durch Wasserstoff

Der in das Schweißgut durch feuchte Pulver, verunreinigte Blechoberflächen etc. eingebrachte Wasserstoff dissoziiert im Lichtbogen in Wasserstoffatome. Diese konzentrieren sich beispielsweise in Spannungsfeldern oder an Fehlstellen (z.B. Versetzungen, Mikrorissen in der WEZ u.Ä.). In diesen Bereichen können Wasserstoff-Risse entstehen, wenn der Wasserstoff nicht aus dem Schweißgut effundieren kann.

Die Diffusionsvorgänge und damit die Rissentstehung können sich über Tage und Wochen hinziehen, wodurch diese Rissbildung u.U. erst mit hoher zeitlicher Verzögerung auftritt.

Abhilfemaßnahmen:

- Schweißpulver ca. 2 h bei 250 bis 300°C zurücktrocknen
- Vorwärmen, dadurch
 - Verringerung von Härtewerten
 - Verringerung der Eigenspannungen
 - Verbesserung der Wasserstoff-Diffusion aus kritischen Zonen

2. Lamellenrisse

Bedingt durch langgestreckte Sulfideinschlüsse in den meist zur Verarbeitung gebräuchlichen gewalzten Halbzeugen, können Spannungen in Dickenrichtung von Blechen nur in beschränktem Maße aufgenommen werden. Zu große Spannungen führen zu Rissen. Durch das große Nahtvolumen sind UP-Schweißnähte besonders gefährdet.

Abhilfemaßnahmen:

- geänderte Konstruktion
- Änderung der Schweißfolge
- verbesserte Grundwerkstoffe (z-Güten)
- Grundwerkstoff puffern

3. Heißrisse

Die Schweißnaht erstarrt in einem Temperaturintervall. Schwefel und Phosphor bilden mit anderen Stahlbegleitern (z.B. Mn, Ni) niedrigschmelzende Verbindungen. Diese niedrigschmelzenden Verbindungen laufen vor der Erstarrungsfront in Richtung Nahtmitte. Die durch die Abkühlung entstehenden Schrumpfspannungen reißen die noch flüssigen Bereiche auseinander.

Abhilfemaßnahmen:

- Stähle mit verringertem Schwefel- und Phosphorgehalt
- Breiten-Tiefenverhältnis der Naht $B/T > 1$, Abbildung 28
- Verringerung der Schweißgeschwindigkeit zur günstigeren Gefügeausbildung in Nahtmitte
- Einsatz von sauren Pulvern, um den Sauerstoffgehalt im Schweißbad zu erhöhen
- Reduzierung des Schweißgut-Volumens
- Reduzierung des Wärmeeinbringens

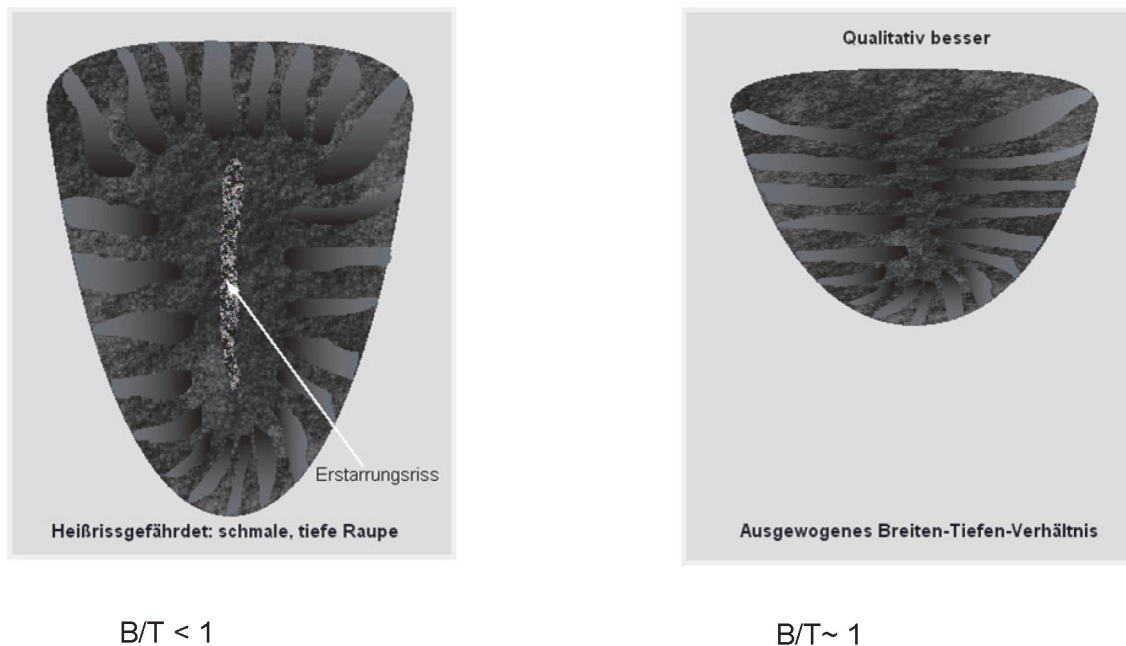


Abbildung 28: Erstarrung bei unterschiedlichen Breiten-Tiefen-Verhältnissen

4. Poren

4.1 mechanische Poren

Mechanische Poren entstehen z.B. durch Hohlräume oder Spalten. Durch die Erwärmung der Luft in den Hohlräumen dehnt sich das Gasvolumen aus und gelangt in das Schweißgut.

Durch starke elektromagnetische Blaswirkung können ebenfalls Poren entstehen.

4.2 metallurgische Poren

Metallurgische Poren gehen immer vom Schweißgut aus. Sie entstehen durch Badreaktionen (z.B. CO) oder durch Abnahme der Löslichkeit eines Elements bei fallender Temperatur (H_2 , N_2). Poren können auch durch die Blaswirkung des Lichtbogens entstehen, wenn das Schweißbad keine ausreichende Entgasung ermöglicht.

Abhilfemaßnahmen:

- Blaswirkung des Lichtbogens durch geänderte Masseanschlüsse in günstige Richtungen lenken
- Pulver trocknen
- Bleche säubern

5. Schlackeneinschlüsse

Aus ungünstigen Draht-Pulverkombinationen, einer ungünstigen Nahtform, ungeeigneten Schweißparametern oder einer ungünstigen Schweißfolge (Abbildung 29) können Schlackeneinschlüsse resultieren. Schlackeneinschlüsse liegen auch dann vor, wenn nur eine unvollständige Aufschmelzung durch den Lichtbogen erfolgte.

Abhilfemaßnahmen:

- Änderung der Schweißreihenfolge
- Auswahl von Pulvern mit gutem Schlackenabgang
- Änderung der Schweißparameter (z.B. Änderung der Spannung)

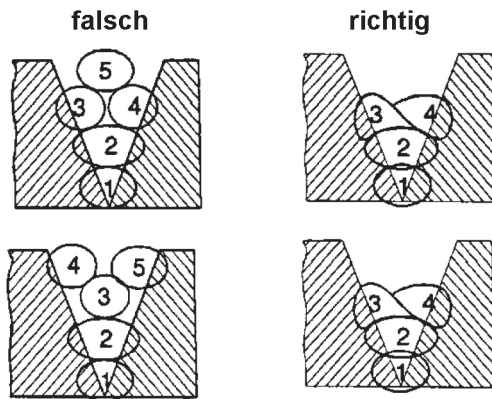


Abbildung 29: Vermeidung von Schlackeneinschlüssen durch geänderte Schweißfolge

Bei Lage-Gegenlage kann die Einbrandtiefe zu gering sein, um den Steg aufzuschmelzen, bzw. eine ausreichende Überlappung der Schweißnähte zu erreichen.

Abhilfemaßnahmen:

- Erhöhung der Stromstärke
- Bessere Ausrichtung der Bauteile
- Fehler an den Nahtoberflächen und im Nahtwurzelbereich

Fehlerart

überwölbte Naht
Nahthöhe zu gering

Nahtoberfläche zu rau

Decklagenunterwölbung
(z.B. bei Rundnähten an Behältern) Endkrater
Einbrandkerben (Stumpfnähte)

Einbrandkerben (Kehlnähte)

Wurzeldurchhang / Wurzelrückfall

Abhilfemaßnahme

Schweißspannung erhöhen
Schweißstrom erhöhen
Schweißspannung reduzieren
feineres Pulver
größerer Drahtdurchmesser
Vorlauf korrigieren

Anlauf- und Auslaufblech
anderes Pulver auswählen
(Leitfähigkeit der Schlacke)
Schweißspannung optimieren
Schweißspannung optimieren
Position des Schweißdrahtes optimieren
Schweißparameter optimieren

9 Anwendungen des UP-Verbindungsschweißens

9.1 Schiffbau

Im Schiffbau findet das UP-Schweißen insbesondere bei langen, geraden Schweißnähten vielfache Anwendung.

In Abbildung 30 sind beispielhaft einige im Schiffbau üblicherweise herzustellenden Schweißnähte dargestellt.

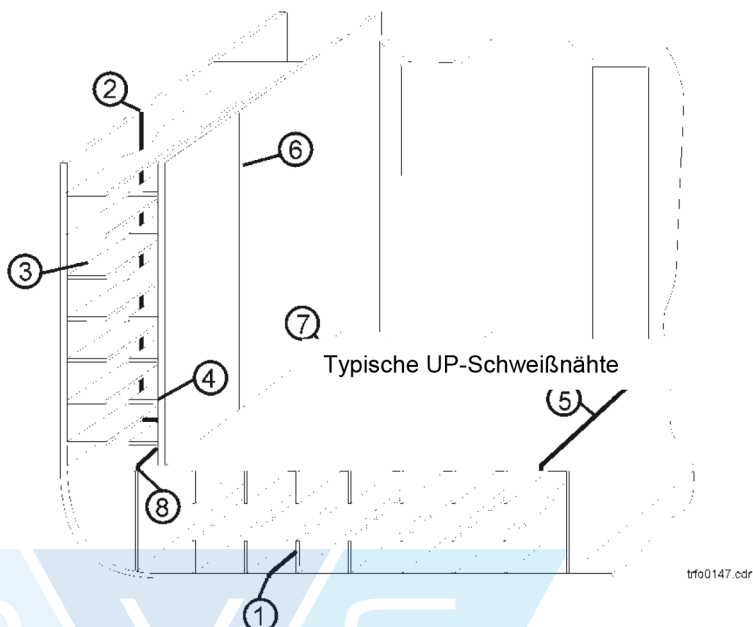


Abbildung 30: UP-Schweißverbindungen im Schiffbau (Quelle: Lincoln Smitweld)

Häufig wird in der Vormontage mit dem Tandemverfahren gearbeitet, vereinzelt wird mit dem Dreidraht- und auch Mehrdrahtverfahren (Abbildung 31) geschweißt, wenn entsprechende Blechdicken und Dimensionen der Bauteile vorliegen.

Abhängig von der Fertigungsstraße wird sowohl beidseitig als auch einseitig (auf Badsicherungen) geschweißt.



Abbildung 31: UP-Mehrdrahtanlage (Bildausschnitt)

9.2 Behälterbau

Im Bereich des Behälterbaus werden Rund- und Längsnähte mit dem UP-Verfahren hergestellt, wenn Materialstärken $> \text{ca. } 6 \text{ mm}$ vorliegen. Abhängig von dem eingesetzten Werkstoff werden die Schweißnahtvorbereitung und die Schweißzusatzwerkstoffe/Schweißpulverkombination ausgewählt.

Von besonderem Interesse in diesem Bereich ist die Verarbeitung von Behältern und Apparaten, die korrosionsbeständig sein müssen. Hier werden CrNi-Stähle nach DIN EN 10088-3 verarbeitet, die hinsichtlich des UP-Schweißens einige Besonderheiten aufweisen:

- Das Wärmeeinbringen muss begrenzt werden. Es wird daher mit einer reduzierten Streckenenergie von ca. 15 kJ/cm gearbeitet. In der Praxis werden dann Drahtelektroden mit einem Durchmesser von 3 mm eingesetzt, die mit reduzierten Schweißparametern verarbeitet werden ($I \sim 450 \text{ A}$). Des Weiteren werden mehrere Lagen geschweißt.
- Bei der Verarbeitung muss eine Zwischenlagentemperatur von ca. 150°C eingehalten werden. Durch die gegenüber den ferritischen Werkstoffen geänderten Wärmeleitungs- und Wärmeausdehnungseigenschaften dieser Stähle kommt es zu starkem Verzug.
- Bei dem Einsatz von Schweißpulvern mit saurer Pulvercharakteristik kommt es zu einem erheblichen Chromabbrand, der durch eine angepasste Pulverauswahl, bzw. Pulver mit Chromstützen kompensiert werden muss.

Abbildung 34 zeigt beispielhaft die Nahtvorbereitung und den Lagenaufbau einer UP-Schweißnaht in einem CrNi-Behälter mit einer Wanddicke von ca. 13 mm .

Die Nahtvorbereitung wurde als Y-Naht ausgeführt. Wichtig ist der gegenüber ferritischen Werkstoffen vergrößerte Luftspalt und der aufwendige Lagenaufbau.

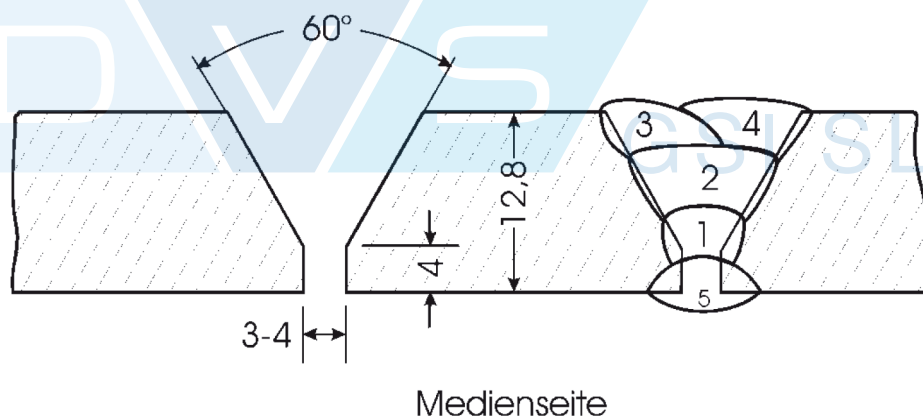


Abbildung 32: Schweißnahtvorbereitung und Lagenaufbau beim UP-Schweißen von CrNi-Stählen

Eine UP-Schweißanlage aus dem Bereich des Behälterbaus zeigt die Abbildung 33.



Abbildung 33: UP-Schweißanlage im Behälterbau (ESAB)

9.3 Rohrschweißung

Bei der Rohrherstellung mittels Unterpulverschweißen können die Nähte als Spiralnähte oder als Längsnähte ausgeführt werden.

Eine interessante Variante ist hier das Spiralrohrschweißen. Spiralrohre haben den Vorzug, dass

- sie "endlos", sogar auf der Baustelle gefertigt werden können.
- die Schweißnaht nicht in der Hauptbeanspruchungsrichtung liegt
- der Fertigungsprozess weitgehend automatisiert werden kann

Zu beachten ist allerdings, dass

- das zwar endlos zu fertigende Rohr für den späteren Transport auf die Länge von ca. 12 bis 18 m getrennt werden muss
- aufgrund des Fertigungsprozesses die Spiralrohre einen, gegenüber den längsnahtgeschweißten Großrohren, höheren Strömungswiderstand haben, der bei den z.T. großen Transportwegen des Mediums nicht zu vernachlässigen ist.

Längsnahtgeschweißte Rohre werden aus Blechen hergestellt, die entweder mit einem 3-Walzen-Biegegerüst oder in einer Pressenstraße in unterschiedlichen Pressvorgängen (Anbiege-, U- und O-Presse) zum Schlitzrohr eingeformt werden. Diese Rohre werden in den Bereichen der Off-Shore-Technik, Pipelinebau etc. eingesetzt.

Aufgrund der großen Stückzahlen und Rohrlängen werden hohe Schweißgeschwindigkeiten angestrebt und mit den heute verfügbaren Schweißpulvern und Anlagen realisiert.

Längsnahtgeschweißte Rohre werden heute üblicherweise mit einer Länge bis zu 12 m hergestellt.

Eine entsprechend typische Kantenvorbereitung (Wanddicke ca. 16 mm, schematisch) für die Lage-Gegenlageschweißung bei der Längsnahtschweißung zeigt Abbildung 34.

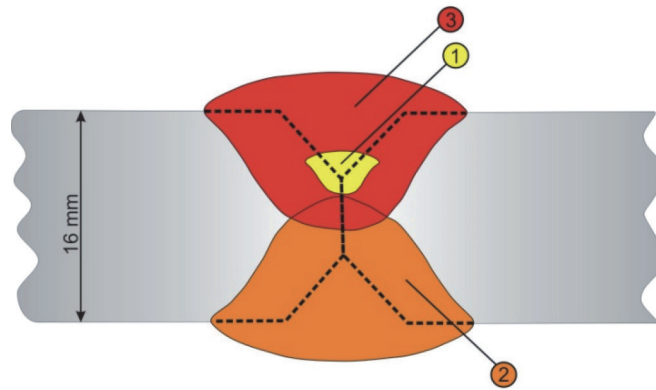


Abbildung 34: Schweißnahtvorbereitung "längsnahtgeschweißte Großrohre" zum Schweißen in Lage-Gegenlage-Technik

Der spezielle Schweißvorgang wird mit den nachfolgenden Schweißverfahren und Schweißdaten durchgeführt:

1. Schweißen der Heftnaht mit z.B. MAGC, eine Drahtelektrode (3 mm) (Stromstärke ca. 1300 A, Schweißgeschwindigkeit ca. 8 m/min)
2. UP-Drei- oder Vierdrahtschweißen der Innennaht (Gesamtstromstärke ca. 3000 bis 3500 A, Spannungen zwischen 34 und 38 V, Schweißgeschwindigkeit bis ca. 2,20 m/min)
3. UP-Drei- oder Vierdrahtschweißen der Außennaht (Gesamtstromstärke ca. 3000 bis 3500 A, Spannungen zwischen 34 und 42 V, Schweißgeschwindigkeit bis ca. 2,20 m/min)

Das Längsnahtschweißen von Rohren ist in der Abbildung 35 gezeigt.



Abbildung 35: Längsnahtschweißen von Rohrschüssen (ESAB)

Häufig werden mit dem UP-Verfahren auch Feinkornbaustähle geschweißt. Hier ist das korrekte Einhalten der Streckenenergie, die Auswahl geeigneter Schweißzusatzwerkstoffe und Schweißpulver zu beachten. Hinsichtlich der Schweißpulver muss der Rücktrocknung besondere Beachtung geschenkt werden.

Die Tabelle 10 gibt einen Überblick der Besonderheiten bei der Verarbeitung von Feinkornbaustählen mit dem UP-Verfahren.

Tabelle 10: Besonderheiten bei der Verarbeitung von Feinkornbaustählen mittels UP-Schweißen

Bezeichnung	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	typische Werkstoffe
S2	0,12	≤ 0,15	1,0	-	-	-	P 255 N
S2 Mo	0,12	0,15	1,0	-	-	0,5	P 355 N
S2 NiMo 1	0,10	0,15	1,0	-	1,0	0,5	P 420 N
S2 NiCrMo 1	0,10	0,15	1,0	0,45	1,0	0,5	S 690 Q
S1 NiCrMo 2,5	0,08	0,15	0,5	0,70	2,5	0,6	S 690 Q

Richtanalysen von Drahtelektroden zum UP-Schweißen von FK-Baustählen nach DVS 0918				
Pulvertyp gemäß DIN EN ISO 14174	Art der Herstellung gemäß DIN EN ISO 14174	Trocknungstemperatur (min 2h Haltedauer)	empfohlene maximale Rücktrocknungszeit	Zwischenlagerungstemperatur °C
MS CS	A	etwa 300°C	10 Stunden	150
MS CS	F	etwa 150°C	30 Tage	150
AR AB	A	etwa 300°C	10 Stunden	150
AR AB	F	etwa 150°C	30 Tage	150
FB	A	etwa 350°C	10 Stunden	150
FB	F	etwa 250°C	20 Stunden	150

Richtwerte für das Rücktrocknen von Schweißpulvern nach DVS 0914				
Diffusibler Wasserstoffgehalt im Schweißgut cm³/100g HD-Wert gemäß DIN EN ISO 3690		bevorzugte Anwendung	bevorzugter Pulvertyp	
	15	Allgemeine Baustähle Kesselbleche		MS CS AR AB
	10	Feinkornbaustähle mit Mindeststreckgrenze < 390 N/mm²		CS AR AB FB
	7	> 390 N/mm² bis < 690 N/mm²		(CS) (AB) FB
	5	≥ 690 N/mm²		FB

Allgemeine Empfehlungen für maximale Wasserstoffgehalte im UP-Schweißgut nach DVS 0914				
--	--	--	--	--

10 Anwendungen des UP-Auftragschweißens

Eine wichtige UP-Verfahrenstechnik ist das UP-Bandplattieren. Technisch wird dabei auf einen unlegierten Werkstoff eine dem Beanspruchungsfall gerechte Auftragschicht aufgebracht. Diese Schicht kann das Bauteil gegen

- Korrosion (Plattieren)
- Verschleiß (Panzern)

schützen.

Begrenzungen hinsichtlich der Bauteile sind dadurch gegeben, dass die Materialdicke des Grundwerkstoffs > 15 mm sein sollte und dass bei der Plattierung von Rohren der Rohraußendurchmesser 300 mm nicht unterschreiten soll.

Mit dem Bandplattieren können Auftragschichtdicken von ca. 3 bis 5 mm/Lage erreicht werden. Die Aufmischung mit dem Grundwerkstoff beträgt ca. 20%. Dadurch ist man in der Lage, die geforderte chemischen Zusammensetzungen der Bauteiloberfläche häufig schon nach 1 oder 2 Lagen zu erreichen. Standardmäßig werden im Bereich des Korrosionsschutzes Bänder mit den Abmessungen 60 x 0,5 mm eingesetzt. Im Bereich des Verschleißschutzes werden bei kleinen Durchmessern der zu plattierenden Bauteile mit Bändern 30 x 0,5 mm gearbeitet. Bei größeren Durchmessern werden Bänder 60 x 0,5 mm eingesetzt.

Da die Auftragschweißungen im Verschleißschutz hohe Härtewerte fordert, werden auch Füllbänder oder Sinterbänder eingesetzt, um die entsprechenden Legierungszusammensetzungen zu erhalten.

Anwendungsbeispiele:

- Schutz gegen Korrosion
 - Plattieren der Rohrböden von Rohrbündelwärmetauschern
 - Plattieren von Stützen etc. im Großbehälterbau
- Schutz gegen Verschleiß
 - Panzern von Stranggussrollen für die Stahlherstellung
 - Panzern von Bauteilen, Rohren etc. im Bereich der Sand-, Kies- und Zementindustrie

In der Tabelle 41 ist eine Auswahl von Massivbandelektroden für Auftragschweißungen dargestellt.

Tabelle 41: Auswahl von Massivbandelektroden für Plattierungen zum Korrosions- und Verschleißschutz

Bandelektrode	chem. Zusammensetzung in %							Anwendung
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Sonstiges	
X 30 Cr Mo W 6	0,3	0,5	1,5	6	0,2	1,5	1,6 W	Verschleißschutz
X 2 Cr 13	0,02	0,2	0,4	12	-	-	-	Verschleißschutz
X 6 Cr 17	0,05	0,4	0,4	17	-	-	-	Verschleißschutz
X 2 Cr Ni 2412	0,02	0,5	1,7	24	12,5	-	-	Korrosionsschutz
X 5 Cr Ni Nb 199	0,015	0,3	1,5	20	10	-	0,8 Nb	Korrosionsschutz
X 12 Cr Ni 2520	0,15	0,2	4,0	25,5	20,4	-	-	Korrosionsschutz
Ni Cr 21 Mo 9 Nb	0,02	0,25	0,1	21,5	Rest	8,5	3,0 Nb	Korrosionsschutz

Eine Anlage für das UP-Schweißen von Rohren mit kleinem Außendurchmesser zeigt die Abbildung 36.

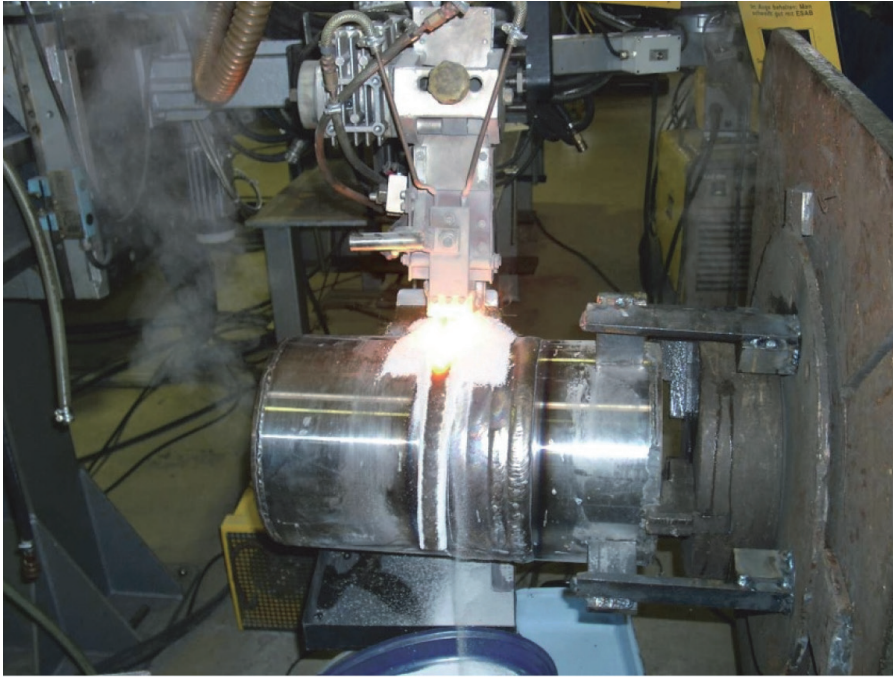


Abbildung 36: Auftragschweißen mit Bandelektrode auf ein Rohr (ESAB)



11 Literatur

1. DIN EN ISO 14171 – Drahtelektroden und Draht-Pulver-Kombinationen zum Unterpulverschweißen von unlegierten Stählen und Feinkornstählen
2. DIN EN ISO 14174 – Pulver zum Unterpulverschweißen
3. Merkblatt DVS 0948 Unterpulverschweißen mit seinen Verfahrensvarianten. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*
4. Merkblatt DVS 0907-3 Ermitteln des Zu- und Abbrandes von UP-Schweißpulvern – Anwendung des Schweißpulverdiagramms. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*
5. Merkblatt DVS 0914 Verarbeitung und Lagerung von Schweißpulvern für das Unterpulverschweißen. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*
6. Merkblatt DVS 0917 Unterpulverschweißen austenitischer Stähle. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*
7. Merkblatt DVS 0918 Unterpulverschweißen von Feinkornbaustählen. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*
8. Merkblatt DVS 0928 Unterpulverschweißen von Austenit-Ferrit-Verbindungen. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*
9. Merkblatt DVS 0936 Unterpulver-Engspaltschweißen. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*
10. Merkblatt DVS 0940 Unterpulver-Auftragschweißen mit Bandedelektrode. *DVS-Regelwerk, Lichtbogenschweißen*



12 Testfragen

1. Beim Einsatz des UP-Heißdraht-Verfahrens wird im Vergleich zum konventionellen UP-Schweißen die

- ☐ Streckenenergie wesentlich erhöht
- ☐ Abschmelzleistung erhöht
- ☐ Schweißgeschwindigkeit verringert
- ☐ Schweißgeschwindigkeit verdoppelt

2. Beim Unterpulverschweißen wird zur Konstanthaltung der Lichtbogenlänge u.a. die ΔU -Regelung eingesetzt. Diese Regelung

- ☐ erfolgt, um die Schweißgeschwindigkeit konstant zu halten
- ☐ erfolgt, um die Schweißnahtgeometrie konstant zu halten
- ☐ erfordert eine Konstantspannungskennlinie
- ☐ erfordert eine Konstantstromkennlinie (steil fallende Kennlinie)
- ☐ hält den Elektrodenvorschub konstant

3. Agglomerierte Schweißpulver weisen folgende Eigenschaften auf:

- ☐ einen hohen Wassergehalt aufgrund des Herstellungsprozesses (niedrige Glühtemperatur)
- ☐ sie sind hygroskopisch; sie müssen daher sorgfältig gelagert und ggf. nach Herstellerangaben rückgetrocknet werden
- ☐ wegen der Herstellungsart laufen erst beim Schweißen unerwünschte metallurgische Reaktionen ab
- ☐ wegen der Herstellungsart laufen erst beim Schweißen erwünschte metallurgische Reaktionen ab

4. Die Verkupferung der Drahtelektroden beim Unterpulverschweißen

- ☐ soll dick sein, um ein gutes Gleiten in der Kontaktdüse zu erreichen
- ☐ schützt die Drahtelektrode vor Korrosion
- ☐ verbessert etwas die Stromeinleitung
- ☐ muss dünn und fest anhaftend sein, um Kupferlötbruch durch abblätternde Kupfer-Partikel zu vermeiden

5. Markieren Sie bitte die richtigen Aussagen zum UP-Schweißen

- ☐ Es handelt sich um einen vollmechanischen Schweißprozess.
- ☐ Es wird üblicherweise erst ab einer Materialdicke von 30 mm sinnvoll eingesetzt.
- ☐ Es wird üblicherweise erst ab einer Materialdicke von 6 mm sinnvoll eingesetzt.
- ☐ Es wird für Plattierungsaufgaben verwendet, da es bei dem Verfahren zu einer starken Aufmischung des Grundwerkstoffes kommt.
- ☐ Es wird für Panzerungsaufgaben verwendet, da es bei dem Verfahren zu einer geringen Aufmischung des Grundwerkstoffes kommt.

6. Markieren Sie bitte die richtigen Aussagen zum UP-Tandemschweißen.

- ☐ Es wird mit zwei Drahtelektroden geschweißt.
- ☐ Es wird nur eine Stromquelle benötigt.
- ☐ Es werden zwei Stromquellen benötigt.
- ☐ Durch die Polung der Elektroden kann die Blaswirkung beeinflusst werden.
- ☐ Es wird mit zwei Bandlektroden geschweißt.

7. Beim UP-Schweißen hat das Schweißpulver welche der folgenden Aufgaben?

- ☐ Das Schweißpulver dient zur Erhöhung der Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke.
- ☐ Die starke Ausbildung der Schlackenschicht wird verhindert.
- ☐ Die Naht soll schneller abkühlen.
- ☐ Es sorgt für eine Erhöhung des Lichtbogenwiderstandes.
- ☐ Es dient zur Bildung des Schutzgasstromes.

8. Welche Aussagen zu UP-Stromquellen sind richtig?

- ☐ Üblicherweise wird unter Gleichstrom mit dem Pluspol an der Drahtelektrode geschweißt.
- ☐ Bei Drahtelektrodendurchmessern größer 3 mm wird eine fallende Stromquellencharakteristik eingesetzt (äußere Regelung).
- ☐ Bei kleinen Drahtelektrodendurchmessern wird mit einer Konstantspannungscharakteristik gearbeitet (innere Regelung).
- ☐ Die Stromquellen sind üblicherweise getaktet.
- ☐ Die Stromquellen sind üblicherweise gepulst.

9. Welche Faustregeln zum UP-Schweißen sind richtig?

- ☐ Für die Auswahl der Stromstärke gilt: $I = 100 - 200 \cdot \text{Drahtdurchmesser}$.
- ☐ Für die Schweißgeschwindigkeit gilt: $v = \text{Stromstärke } I / 10 \cdot \text{Blechdicke } t$.
- ☐ Für die Auswahl des Drahtelektrodendurchmessers gilt $I = 200 - 300 \cdot \text{Drahtdurchmesser}$.
- ☐ Für die Einbrandtiefe gilt beim I-Stoß: t ungefähr 1 mm pro 100 A.
- ☐ Die Stromdichte beeinflusst die Einbrandtiefe wesentlich.

10. Was gilt für die Schweißzusatzwerkstoffe beim UP-Schweißen?

- ☐ Der Kohlenstoffgehalt des Zusatzwerkstoffes S1 beträgt 0,08 bis 0,09%.
- ☐ Bei hohen Stromstärken werden Drahtelektroden mit 5 mm Durchmesser eingesetzt.
- ☐ Die Schweißzusatzwerkstoffe für hoch legierte Stähle sind in DIN EN ISO 14171 zu finden.
- ☐ Bei der Verarbeitung von Cr-Ni-Stählen werden Drahtelektroden mit 3 mm Durchmesser eingesetzt.
- ☐ Bei Gefahr des Durchfallens der Wurzel werden 3-mm-Drahtelektroden eingesetzt.

11. Welche der folgenden Fehler beim UP-Schweißen gehören zu den "inneren" Fehlern?

- ☐ metallurgische Poren
- ☐ Einbrandkerben
- ☐ Schlackeneinschlüsse
- ☐ Wurzeldurchgang/-rückfall
- ☐ Lamellenrisse

12. Welche der folgenden Fehler beim UP-Schweißen gehören zu den "äußeren" Fehlern?

- ☐ Nahtüberhöhung
- ☐ Einbrandkerben
- ☐ Schlackeneinschlüsse
- ☐ Wurzeldurchgang/-rückfall
- ☐ Poren

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Thermisches Schneiden	1
3	Autogenes Brennschneiden	3
3.1	Verfahrensprinzip Brennschneiden	3
3.2	Voraussetzungen zum Brennschneiden	4
3.3	Brennschneideignung von Werkstoffen	6
3.4	Betriebsgase	8
3.5	Brennschneidgeräte	10
3.6	Praxis des Brennschneidens	14
3.7	Brennschneidmaschinen	17
3.8	Sonder- und Hilfseinrichtungen	19
3.9	Sonderverfahren des autogenen Brennschneidens	20
3.10	Arbeitssicherheit	21
4	Plasmaschneiden	22
4.1	Einordnung und Anwendungsbereich	22
4.2	Direktes Plasmaschneiden	22
4.2.1	Verfahrensprinzip	22
4.2.2	Verfahrensvarianten	23
4.2.3	Anwendungsbeispiele	26
4.3	Indirektes Plasmaschneiden	27
4.3.1	Verfahrensvariante „Düse als Anode“	27
4.3.2	Verfahrensvariante „Hilfsanode“	28
4.3.3	Anwendungsbeispiele	29
4.4	Sonstige Plasmaverfahren	29
4.4.1	Markieren, Kerben und Körnen	29
4.4.2	Fugen	30
4.5	Gase zum Plasmaschneiden	31
4.6	Systemaufbau	32
4.6.1	Führungssysteme zum Plasmaschneiden	32
5.6.1	Absaugung	36
5.6.2	Plasmastromquelle	36
5.6.3	Plasmabrenner	36
5.6.4	Abstandsregelung	38
5.1	Schneidgeschwindigkeit in Relation zur Schnittqualität	38
5.2	Arbeitssicherheit	40
5.3	Sonderverfahren – Thermisches Abtragen durch Gasentladung	41
5.3.1	Lichtbogen-Sauerstoffschneiden	41
5.3.2	Lichtbogen-Druckluftfugen	41
6	Laserstrahlschneiden	43
6.1	Vorgänge beim Laserstrahlbrennschneiden	43
6.2	Verfahrensvarianten	43
6.2.1	Laserstrahlbrennschneiden	43
6.2.2	Laserstrahlschmelzschneiden	44
6.2.3	Laserstrahlsublimierschneiden	44
6.3	Schneidgase	44
6.4	Werkstoffe	45

6.5	Schneidgeschwindigkeit.....	46
6.6	Führungssysteme zum Laserstrahlschneiden	47
7	Wasserstrahlschneiden.....	48
7.1	Verfahrensprinzip.....	48
7.2	Literatur.....	51
8	Testfragen.....	52



1 Einleitung

Bevor im Fertigungsprozess der metallverarbeitenden Industrie Halbzeuge und Erzeugnisse wie Bleche, Profile usw. verarbeitet und miteinander verschweißt werden können, müssen sie passgenau zugeschnitten werden. Hierfür werden neben den mechanischen Trennverfahren die thermischen Trennverfahren autogenes Brennschneiden, Plasmaschneiden und Laserstrahlschneiden verwendet. Die drei Verfahren werden heute häufig nebeneinander eingesetzt. Allen thermischen Schneidverfahren sind die punktförmige Energieeinbringung und ein hochenergetischer Schneidgasstrahl gemeinsam. Ziel des thermischen Schneidens ist es, Bauteile so herzustellen, dass sie mit möglichst geringer Nacharbeit weiterverarbeitet werden können.

Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der thermischen Schneidverfahren sind heute bei den unlegierten und niedrig legierten Stählen im mittleren Waddickenbereich das autogene Brennschneiden, das Plasma- und Laserstrahlschneiden wirtschaftlich konkurrierende Verfahren.

2 Thermisches Schneiden

Einteilung der thermischen Schneidverfahren

Die Einteilung der thermischen Schneidverfahren kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen.

Nach den vorherrschenden physikalischen Vorgängen ist eine Gliederung in Brenn-, Schmelz- und Sublimierschneiden möglich.

Der Werkstoff wird

- beim Brennschneiden überwiegend verbrannt und die Verbrennungsprodukte durch einen Sauerstoffstrahl mit hoher kinetischer Energie ausgetrieben,
- beim Schmelzschnneiden vorwiegend geschmolzen und durch einen Gasstrahl hoher Geschwindigkeit ausgeblasen und
- beim Sublimierschneiden hauptsächlich verdampft und durch Expansion und/oder einen Gasstrahl ausgeblasen.

Die Einteilung der Schneidverfahren nach der Art des von außen auf das Werkstück einwirkenden Energieträgers zeigt Abbildung 1.

Thermisches Abtragen

durch Gas

Autogenes
Brennschneiden

Metallpulver-Brenn-
schneiden

Metallpulver-Schmelz-
schneiden

Brennfugen

Brennbohren

Flammstrahlen

durch Gasentladung

Lichtbogen-Sauerstoff-
schneiden

Lichtbogen-
Druckluftfugen

Plasmaschneiden

durch Strahl

Laserstrahlschneiden

Abbildung 1: Einteilung der Schneidverfahren entsprechend DIN 2310 Teil 6

Nach dem Mechanisierungsgrad unterscheidet man in Handschneiden (manuelles Schneiden), teilmechanisches, vollmechanisches und automatisches Schneiden.

Die DIN EN ISO 9013 beschreibt für die thermischen Schneidverfahren insbesondere die Beurteilungsmöglichkeiten der Schnittqualitäten.

3 Autogenes Brennschneiden

Das autogene Brennschneiden ist ein thermisches Trennverfahren, bei dem der größte Teil der für den Prozessablauf notwendigen Energie aus der bei der Verbrennung des Werkstoffes frei werdenden Wärme stammt. Der zu schneidende Werkstoff wird örtlich, auf der Werkstückoberfläche, durch eine Brenngas-Sauerstoff-Flamme auf Entzündungstemperatur erwärmt und dann im Sauerstoffstrahl verbrannt. Die bei der Verbrennung des Werkstoffs entstehende Wärme ermöglicht eine fortlaufende Verbrennung in die Tiefe und in Vorschubrichtung. Das autogene Brennschneiden hat den größten Anwendungsbereich in Bezug auf die Werkstückdicke. Standardbrenner sind in der Regel für den Bereich von 3 bis 300 mm, Sonderbrenner bis 1000 mm und mehr geeignet.



Abbildung 2: Schneidbrenner im Einsatz

3.1 Verfahrensprinzip Brennschneiden

- Erwärmung des zu schneidenden Werkstückes durch die Heizflamme auf Entzündungstemperatur im Bereich der Einwirkzone des Schneidsauerstoffstrahls. Die Entzündungstemperatur liegt je nach Kohlenstoffgehalt des Stahles bei 1150 bis 1200°C.
- Zufuhr von Schneidsauerstoff und damit Einleitung der Verbrennung des Werkstoffes in der Schnittfuge, wobei durch die exotherme Reaktion des Werkstoffes mit dem Sauerstoff erhebliche Mengen Wärme frei werden.
- Ausblasen des verbrannten Materials (der Schlacke) aus der Schnittfuge durch den Schneidsauerstoffstrahl.
- Durch die gleichmäßige Bewegung über das Werkstück entsteht die Schnittfuge.

Das Prinzip des Ablaufes des Schneidvorganges ist schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

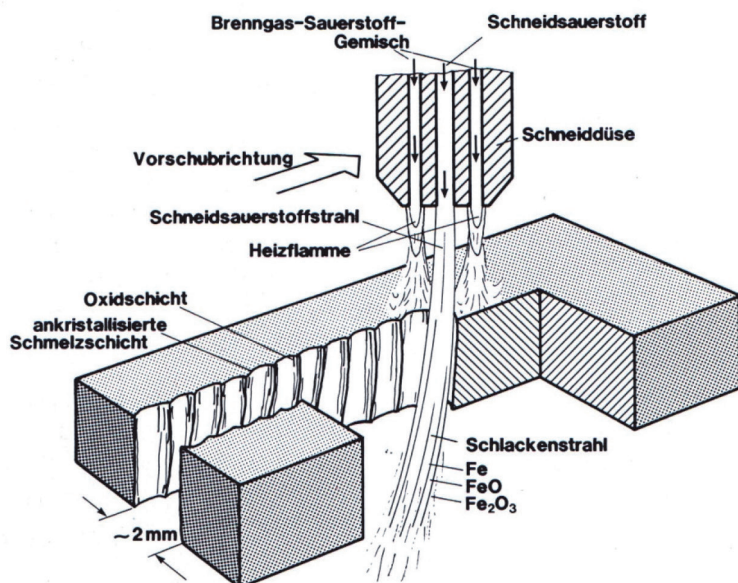


Abbildung 3: Brennschneidvorgang

Hinweise

- Der Zustand der Werkstückoberfläche (z.B. verrostet, verzundert, Farbe usw.) beeinflusst die Schnittqualität und die Vorschubgeschwindigkeit.
- Der Brennschneidvorgang reißt ab, wenn die kontinuierliche Wärmeübertragung im Werkstück unterbrochen wird. Folge: Bleche mit Doppelungen oder mehrere übereinander liegende Bleche sind ohne besondere Maßnahmen nicht in einem Arbeitsgang schneidbar.
- Das Schneiden mit mehreren Brennern gleichzeitig an einer Maschine erhöht die Schneidleistung entsprechend der Brennerzahl. Der besondere Vorteil des autogenen Brennschneidens ist, dass mit relativ geringem Aufwand mehrere Brenner gleichzeitig betrieben werden können. Zum Beispiel ist es möglich, beim Einsatz von Dreibrenner-Aggregaten die aufwendige Doppel-HV-Nahtvorbereitung in einem Arbeitsgang auszuführen.

3.2 Voraussetzungen zum Brennschneiden

Damit der wärmeerzeugende (exotherme) Prozess anlaufen kann, muss der zu schneidende Werkstoff folgende Voraussetzungen erfüllen:

1. Der auf Entzündungstemperatur erwärmte Werkstoff muss in reinem Sauerstoff verbrennen. Diese Forderung wird von allen Metallen erfüllt, die eine ausreichend große chemische Affinität zu Sauerstoff besitzen, am besten vom reinen Eisen.

2. Die bei der Verbrennung entstehende Schlacke muss dünnflüssig sein, damit sie durch den Schneidsauerstoff aus der Fuge geblasen werden kann. Insbesondere Chrom und Silizium bilden zähflüssige Schlacke.

3. Die Entzündungstemperatur muss unterhalb der Schmelztemperatur liegen. Die Entzündungstemperatur von Baustählen liegt bei etwa 1200°C, der Schmelzpunkt bei etwa 1500°C. Solche Werkstoffe können also verbrennen, ehe sie flüssig werden. Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt steigt die Verbrennungstemperatur, gleichzeitig sinkt die Schmelztemperatur. Bei Stählen ab etwa 1,6% Kohlenstoffgehalt ist diese Voraussetzung nicht mehr gegeben, der Werkstoff schmilzt, ehe er verbrennt. Deshalb sind zum Beispiel Werkzeugstähle und Gusseisen nicht brennschneidbar.

4. Die Schmelztemperatur der Oxide muss niedriger sein als jene des Werkstoffes. Einige Metalle und Legierungselemente bilden hochschmelzende Oxide. Typisch hierfür ist Aluminium. Sein Schmelzpunkt liegt bei 660°C, der des Oxids bei etwa 2050°C. Der Sauerstoffstrahl kann das Metall gar nicht erreichen, weil es von einer festen Oxidschicht bedeckt ist. Aluminiumwerkstoffe sind daher nicht zum Brennschneiden geeignet. Ähnlich verhält es sich mit Chrom, das ebenfalls hochschmelzende Oxide bildet. Da Nickel nur eine geringe Affinität zu Sauerstoff hat, leistet es keinen großen Beitrag zur Verbrennungswärme. Dies ist der Grund, warum nichtrostende CrNi-Stähle nicht brennschneidgeeignet sind. Auch andere Legierungselemente des Stahles – wie Silizium, Mangan, Wolfram, Molybdän und Kupfer – erschweren in höheren Gehalten das Brennschneiden.

5. Die entstehenden Oxide müssen dünnflüssig sein. Bildet sich beim Verbrennen eine Schlacke, die sehr zähflüssig ist und deshalb schlecht aus der Fuge ausgetrieben werden kann, dann ist das Brennschneiden naturgemäß erschwert. Diese Eigenschaft wird auch durch Chrom und Silizium beeinflusst.

6. Die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes darf nicht zu groß sein. Wird nämlich mehr Wärme abgeführt, als durch den Verbrennungsprozess entsteht, kommt der Schneidvorgang zum Erliegen, vor allem in der Tiefe des Werkstoffes, wo die Heizflamme nicht hinreicht. Diese Bedingung ist zum Beispiel bei Kupfer gegeben.

Die vorgenannten Bedingungen werden von unlegierten und niedrig legierten Stählen erfüllt.



3.3 Brennschneideignung von Werkstoffen

Zur Beurteilung der Brennschneideignung von Stahl ist zunächst dessen Kohlenstoffgehalt entscheidend.

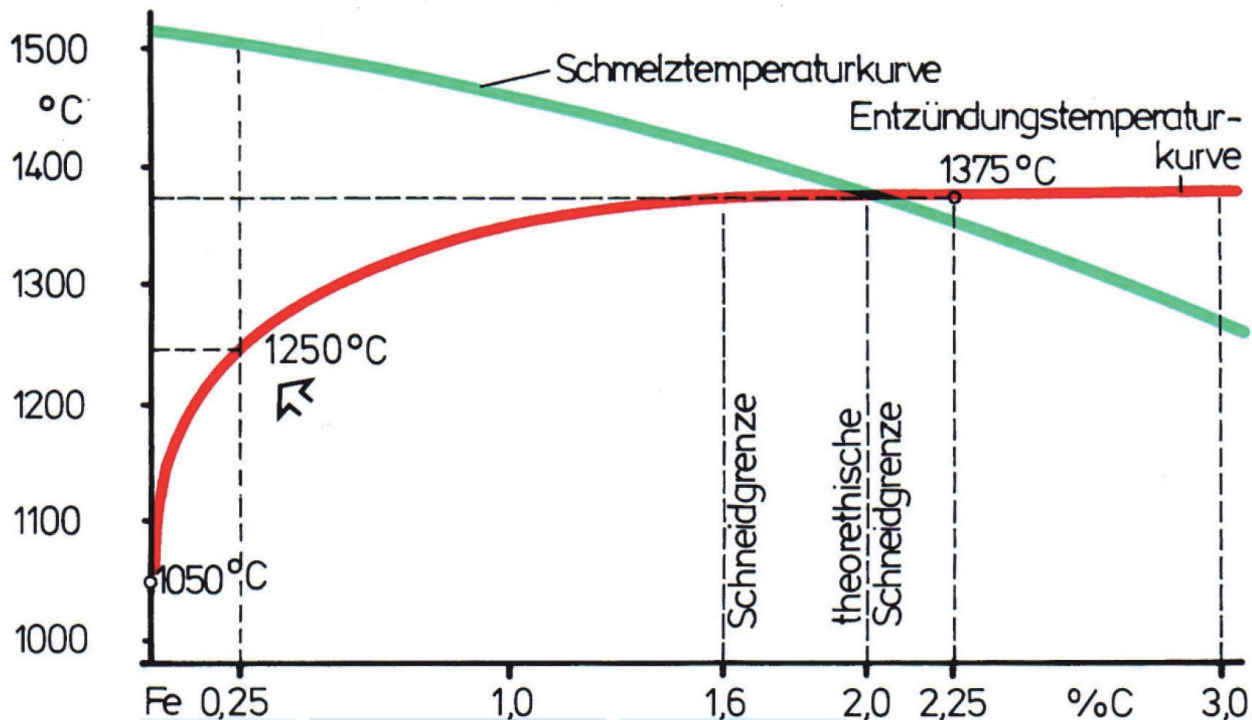


Abbildung 4: Detail aus dem Eisen-Kohlenstoff-Diagramm

Die Brennschneideignung von Stahl beeinflusst neben dem Kohlenstoff die Anzahl und Menge der Legierungsbestandteile. Die Brennschneideignung sinkt mit steigendem Legierungsgehalt. Der Einfluss einzelner Legierungselemente ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Einfluss von Legierungselementen auf die Brennschneideignung von Stahl

Stahl	oberer Grenzgehalt	Bemerkungen
C-legiert	bis 1,6 % C	bei % C > 0,45 kommt es ohne Wärmebehandlung zu Aufhärtung und Rissbildung
Mn-legiert	bis 13 % Mn	bei % C ≤ 1,3
Si-legiert	bis 2,9 % Si	bei % C ≤ 0,2 bis 4 % Si schneidbar
Cr-legiert	bis 1,5 % Cr	bei % C ≤ 0,2
W-legiert	bis 10,0 % W	bei 0,5 % Cr, 0,2 % Ni, 0,8 % C
Ni-legiert	bis 7,0 % Ni	bei 0,3 ≤ % C ≤ 0,5 bis 34 % Ni schneidbar
Mo-legiert	bis 0,8 % Mo	bei höheren W-, Cr- und C-Gehalten nicht schneidgeeignet

Zur groben Beurteilung der Brennschneideignung, zur Bestimmung der notwendigen Vorwärmtemperatur und zur Abschätzung der Aufhärtung dient das Kohlenstoffäquivalent C_{Aq} für Stähle.

$$C_{Aq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{P}{2} + \frac{Cr}{5} + \frac{Cu}{13} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15}$$

Bis zu einem Kohlenstoffäquivalent von etwa 0,4 sind die Stähle ohne besondere Vorbehandlung autogen brennschneidgeeignet. Liegt der Wert darüber, muss der Stahl vorgewärmt werden und ggf. die Schnittkanten abgearbeitet werden.

Ab einem Kohlenstoffäquivalent von 1,0 ist das autogene Brennschneiden nicht mehr einsetzbar.

Tabelle 2: Brennschneideignung verschiedener Stähle

Stahlsorte	Kohlenstoffäquivalent	
S235	0,20	brennschneidgeeignet
B500	0,23	
P265GH	0,29	
16Mo3	0,37	
GC25E	0,35	
S355	0,41	
E360	0,57	
P235G1	0,61	
17MnMoV6-4	0,59	
17MnCrMo3-3	0,63	
22NiMoCr3-7	0,62	
20MnMoNi5-5	0,63	
20MnCrSiMoZr4-3	0,60	
13CrMo4-5	0,51	
10CrMo9-10	0,88	
X2Ni9	0,79	nicht brennschneidgeeignet
X45NiCrMo4	1,06	
X2NiCoMo18-9-5	2,20	
X20Cr13	2,80	
X8CrNiNb19-9	4,30	
X10CrNiTi18-9	4,58	
X10CrNiMoTi18-10	5,20	
X15CrNiSi10-12	5,40	
X3CrNiMoNb25-7	5,51	

Die Höhe der Vorwärmtemperatur hängt auch von der Blechdicke und der geforderten Schnittqualität ab.

Tabelle 3: Richtwerte für Vorwärmtemperaturen zum autogenen Brennschneiden

Kohlenstoffäquivalent [%]	Vorwärmtemperaturen	
	bis ca. 50 mm Blechdicke / bei Trennschnitten [°C]	ab ca. 50 mm Blechdicke / bei Formschnitten [°C]
bis 0,3	-	-
0,3 – 0,4	-	max. 100
0,4 – 0,5	max. 100	100 – 200
0,5 – 0,6	100 – 200	200 – 350
über 0,6	200 – 350	350 – 500

3.4 Betriebsgase

Zur Einleitung und Aufrechterhaltung des Brennschneidvorganges ist eine leistungsstarke Heizflamme erforderlich. Die beim autogenen Brennschneiden zum Einsatz kommenden Brenngase unterscheiden sich im Wesentlichen in der Flammenleistung, der Flammentemperatur der Zünd- und Verbrennungsgeschwindigkeit (und damit der Flammenleistung),.

Beim Brennschneiden werden als Brenngase Kohlenwasserstoffverbindungen verwendet. Deren Verbrennung läuft in zwei Stufen ab. Innerhalb der Primärflamme findet eine unvollkommene Verbrennung durch den zugeführten Heissauerstoff statt. Durch Aufnahme von Sauerstoff aus der Luft wird das Brenngas in der Sekundärflamme vollständig verbrannt. Beim Brennschneiden ist vor allem die Heizwirkung der Primärflamme von Bedeutung.

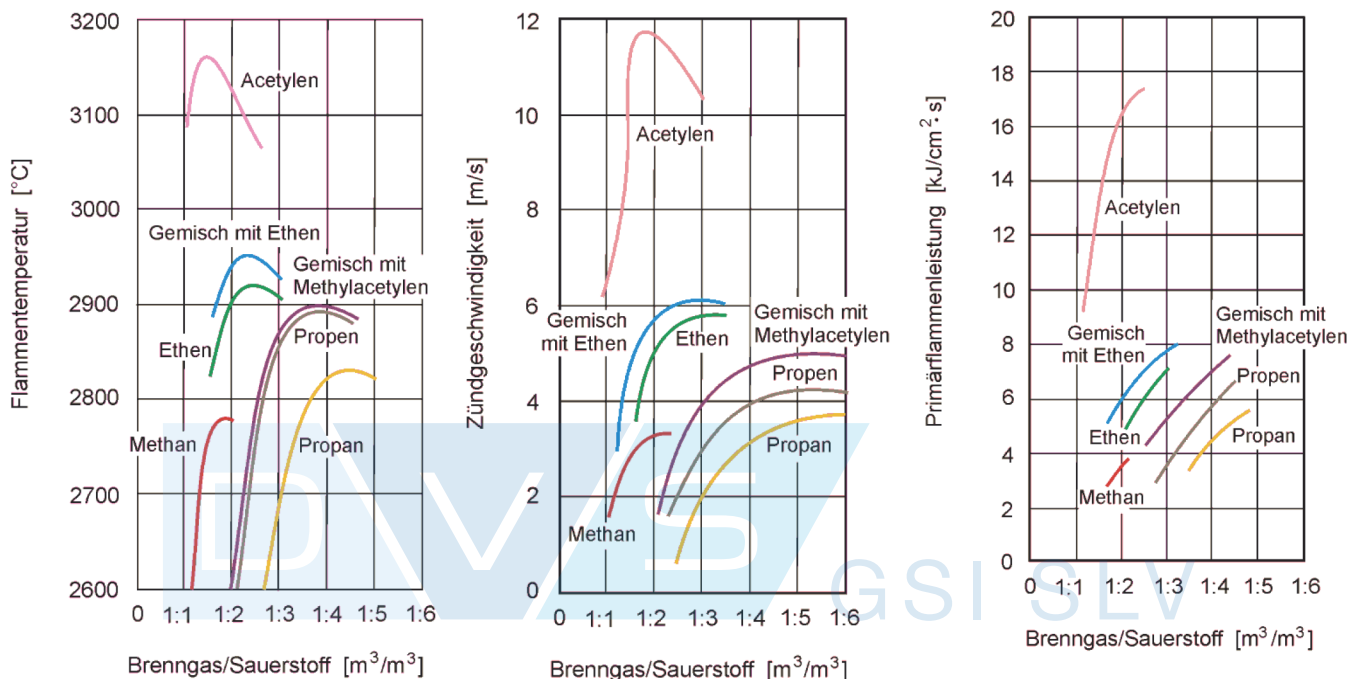


Abbildung 5: Flammentemperatur, Zündgeschwindigkeit und Primärflammenleistung verschiedener Brenngase in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis Brenngas-Sauerstoff

Acetylen

- höchste Flammentemperatur und Flammenleistung
- höhere Schneidleistung (insbesondere bei Schrägschnitten) im Vergleich zu anderen Brenngasen
- Bei einem konstanten Verbrauch von mehr als 700 l/h sind mehrere Flaschen zu einer Flaschenbatterie zusammenzukoppeln; die Gasentnahme ist daher etwas aufwendiger als beispielsweise bei Propan und Ethylen (Brenngas C_2H_4 , tiefkalt verflüssigt).
- Neigt bei höheren Drücken und höheren Temperaturen zum Selbstzerfall.

Propan

- geringere Flammenleistung, dadurch insbesondere bei Schrägschnitten verringerte Schneidgeschwindigkeit
- Das Gas wird in verflüssigtem Zustand gespeichert, dadurch große Mengen speicherbar.
- Der Sauerstoffverbrauch für die Flamme (nicht für den Brennschneidvorgang) ist im Vergleich zu Acetylen ca. viermal so hoch.

Erdgas (überwiegend Methan)

- Problemlose Versorgung, wenn die Versorgung über ein bereits vorhandenes Rohrleitungsnetz erfolgt.

Sauerstoff (Heiz- und Schneidgas)

- Sauerstoff wird zum Verbrennen des Brenngases benötigt.
- Er leitet den Brennschneidvorgang ein, verbrennt den Werkstoff und bildet die Schnittfuge durch Ausblasen der Schlacke.
- Sauerstoff mit der handelsüblichen Reinheit von 99,5% (2.5) ist zum Brennschneiden geeignet.

Zusammenfassung

Eine genaue Aussage, welches Brenngas für die jeweilige Brennschneidarbeit das kostengünstigste ist, ist schwierig, da neben den reinen Kosten für die Gase insbesondere die Werkstückdicke, die Art der zu schneidenden Teile – ob Gerad- oder Schrägschnitt bzw. Konturenschnitt – berücksichtigt werden muss. Genauere Angaben hierüber liefern nur entsprechende Kostenrechnungen.

- Acetylen hat Vorteile bei dünneren Blechen, da der Werkstoff schnell auf Entzündungstemperatur gebracht wird. Die erreichbare Schneidgeschwindigkeit ist hoch.
- Bei dickeren Blechen dauert der Brennschneidvorgang länger als bei dünneren. Die Wärmeeinbringung durch eine Propan-Sauerstoff-Flamme ist daher durchaus ausreichend, um in der zur Verfügung stehenden Zeit den Werkstoff auf Entzündungstemperatur zu bringen (bei geringeren Gasekosten).
- Grundsätzlich ist jedes Brenngas geeignet, den Werkstoff auf Entzündungstemperatur zu bringen.
- Häufig ist der Handschneidbrenner ein integrierter Bestandteil einer Schweiß- und Schneid-ausrüstung, was für das universell verwendbare Acetylen spricht

3.5 Brennschneidgeräte

Schneidbrenner

Zum manuellen Schneiden werden neben kombinierten Schweiß- und Schneidgeräten spezielle Handschneidbrenner verwendet. Dem Handschneidbrenner wird der Sauerstoff meist in einem Schlauch zugeführt und erst im Brenner in Heiz- und Schneidsauerstoff aufgeteilt (sog. Zweischlauchbrenner).

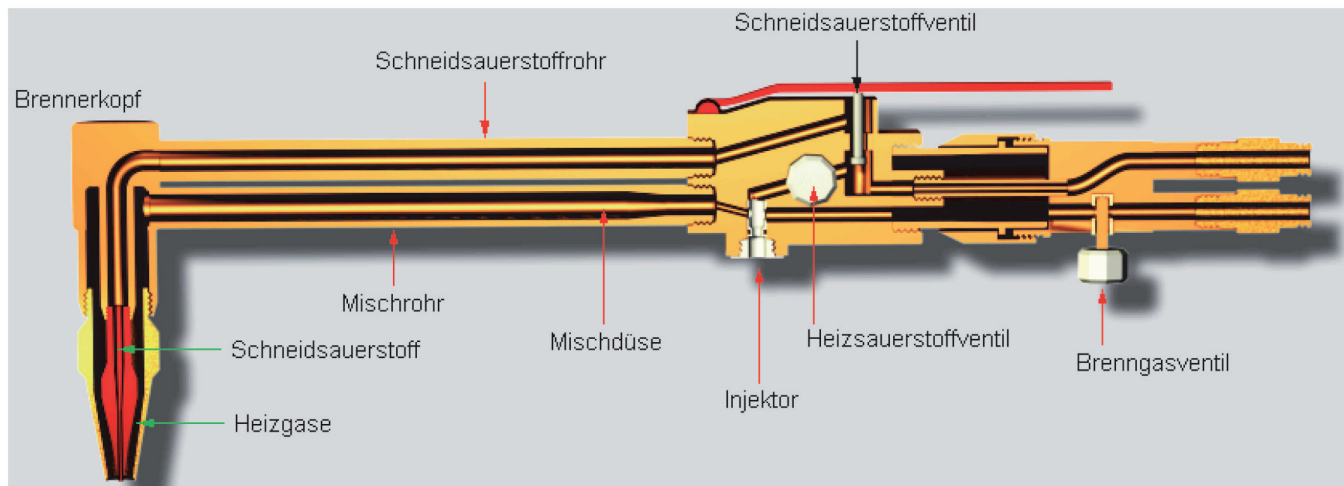


Abbildung 6: Handschneidbrenner

Einem Maschinenschneidbrenner werden Brenngas sowie Heiz- und Schneidsauerstoff in der Regel getrennt über drei Schläuche zugeleitet (sog. Dreischlauchbrenner). Eine Beeinflussung der Heizflamme beim Zuschalten des Schneidsauerstoffs wird hierdurch vermieden.

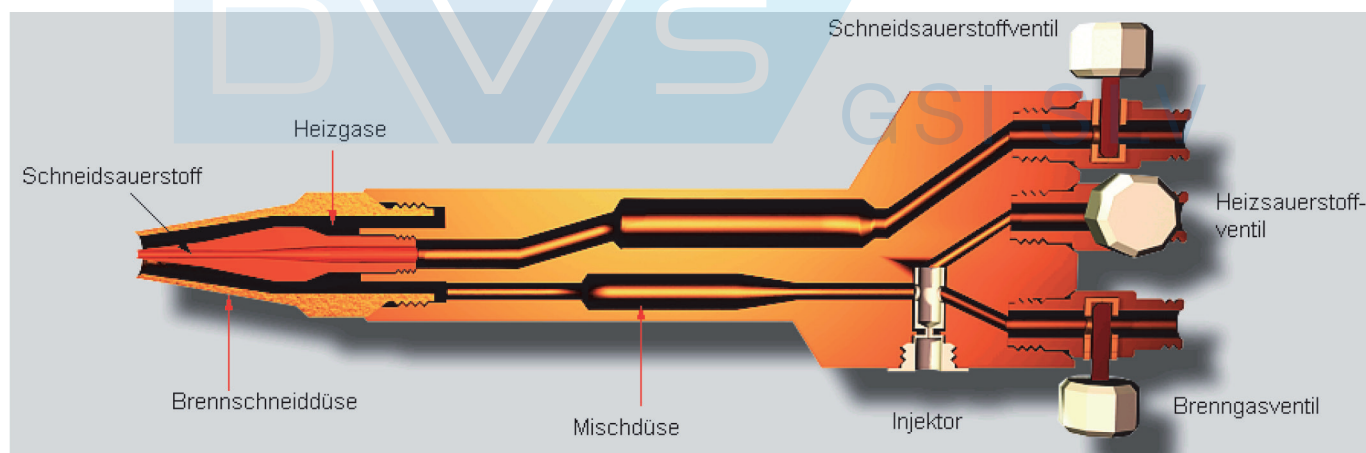


Abbildung 7: Maschinenschneidbrenner

Mischsysteme

Entsprechend dem Mischsystem von Sauerstoff und Brenngas wird zwischen Brennern **mit** Saugwirkung und Brennern **ohne** Saugwirkung unterschieden.

Schneidbrenner mit Saugwirkung (Saug- oder Injektorbrenner)

Kennzeichnungsbeispiel:

i	= Injektorbrenner
A	= Gasart (Acetylen)
S = 2,5 bis 3,5 bar	= Sauerstoffdruck

Saugbrenner sind Brenner, bei denen das Brenngas über einen Injektor im Brenner durch den Heissauerstoff angesaugt wird. Der Sauerstoff strömt mit hoher Geschwindigkeit aus der Druckdüse in die Mischdüse. Im Spalt zwischen Druckdüse und Mischdüse entsteht dadurch ein Unterdruck. Das Brenngas wird angesaugt. Durch das Mischrohr wird das Brenngas-Heissauerstoff-Gemisch der Schneiddüse zugeführt. Der Schneidsauerstoff wird bei allen Brennern separat im Schneidsauerstoffrohr der Schneiddüse zugeführt.

Durch übermäßige Erwärmung des Schneidbrenners – verursacht z.B. beim Lochstechen oder beim Schneiden dicker Werkstücke – kann es zur Rückzündung kommen. Dabei erlischt die Heizflamme, das Brenngas-Sauerstoff-Gemisch zündet im Mischrohr. Der Brenner „pfeift“.

Als Gegenmaßnahme sind sofort beide Ventile am Brenner zu schließen und der Brenner zu kühlen, da er sonst innerhalb weniger Sekunden zerstört wird.

Schneidbrenner ohne Saugwirkung (Druckbrenner)

Kennzeichnungsbeispiel:

II	= Druckbrenner
APMY	= Gasart; dieser Brenner kann, vorausgesetzt die Düse ist auf das entsprechende Brenngas abgestimmt, mit Acetylen, Propan, Methan und Gasgemischen betrieben werden.

Bei dieser Brennerbauart strömen Brenngas und Heissauerstoff getrennt bis in die Schneiddüse, wo die beiden Gase zusammenfließen. Druckbrenner besitzen keinen Injektor. Die Mischstelle befindet sich in der Schneiddüse, deshalb werden sie auch als **gasemischende Düsen** bezeichnet. Solche Brenner kommen bevorzugt dann zum Einsatz, wenn in heißen Bereichen geschnitten werden muss, z.B. beim Schneiden mit einem Mehrbrenneraggregat, beim häufigen Lochstechen und bei dicken Blechen.

Druckbrenner sind gegen **Rückzündungen** weniger empfindlich als Saugbrenner, dafür ist die Gefahr von **Flammenrückschlägen** größer. Wegen der fehlenden Saugwirkung ist es eher möglich, dass Sauerstoff in die Brenngasleitung gelangt und dort ein explosives Gemisch entsteht.

Brennschneiddüsen

Das Werkzeug zum Brennschneiden ist die Schneiddüse. Besondere Schneidkanalformen ermöglichen es, dass der Schneidsauerstoffstrahl mit 1,5-facher Schallgeschwindigkeit aus der Düse ausströmen kann ohne dass er sich nach dem Austritt aus der Düse schnell aufweitet. Die Entwicklung auf dem Sektor Brennschneiddüsen geht in Richtung Hochleistungsdüsen, die eine Steigerung der Schneidgeschwindigkeit bei gleichzeitig verbesserter Qualität des Brennschnittes mit sich bringt.

In der Praxis werden folgende Düsenbauformen verwendet:

Ringdüse (zweiteilig)

Sie hat einen ringförmigen Austritt der Flammengase und somit eine geschlossene Flamme. Dadurch wird die Wärme gleichmäßig um den Schneidstrahl verteilt in das Werkstück eingebracht. Dies bringt Vorteile beim Konturenschnitt. Eine nicht zentrierte, z.B. beschädigte Schneiddüse, verringert jedoch stark die Schneidleistung und erhöht die Rückzündempfindlichkeit des Brenners.

Schlitzdüse (zweiteilig)

Die ebenfalls zweiteiligen Schlitzdüsen zeichnen sich gegenüber der Ringdüse durch höhere Schneidleistung und gutes Säuberungsvermögen aus. Die Gase werden sehr gut gemischt. Durch die konische Passung von Heiz- und Schneiddüse ist eine genaue Anordnung der Heizflamme zum Schneidsauerstoff gewährleistet. Sie wird häufig bei Maschinenschneidbrennern verwendet.

Blockdüse (einteilig)

Blockdüsen bestehen aus einem Stück, sodass eine genaue Anordnung zum Schneidsauerstoffstrahl gewährleistet ist. Der Nachteil ist, dass bei Beschädigung die ganze Düse ersetzt werden muss.

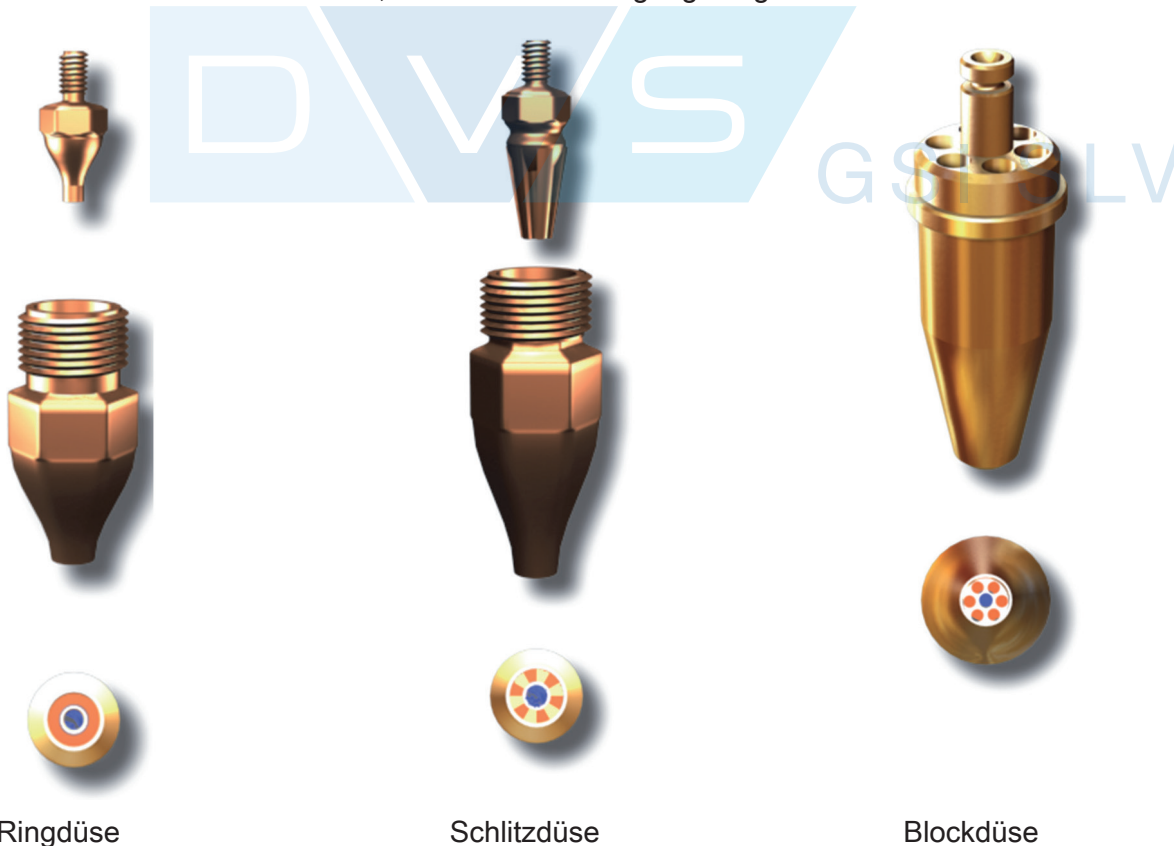


Abbildung 8: Typische Formen von Brennschneiddüsen

Gasemischende Düsen für Druckbrenner

Gasemischende Düsen gibt es in einteiliger (für Acetylen) und mehrteiliger Form (für langsam verbrennende Gase, z.B. Propan). Gasemischende Düsen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Gase getrennt der Düse zugeführt werden. Die Mischung erfolgt in der Düse. Schneiddüsen für unterschiedliche Brenngasarten können daher mit einem Schneidbrenner betrieben werden

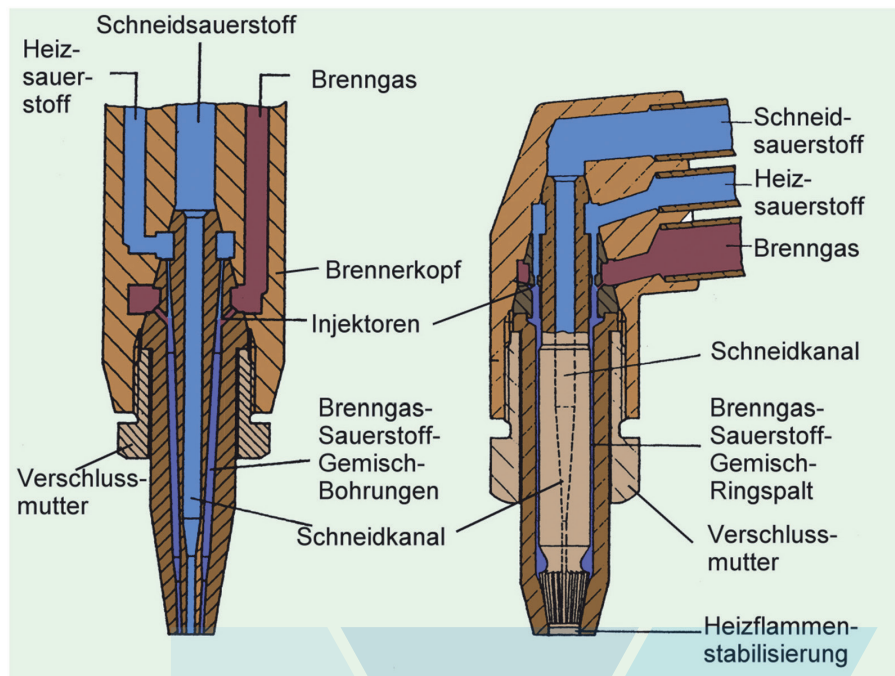


Abbildung 9: Gasemischende Düsen für Acetylen (links) und langsam verbrennende Gase, z.B. Propan und Erdgas (rechts)

Die Stirnflächen der Schneiddüse und der Heizdüse schließen beim Einsatz von Acetylen als Brenngas bündig ab. Beim Einsatz von langsam verbrennenden Gasen, wie Propan und Methan, ist zur Stabilisierung der Flamme die Schneiddüsenstirnfläche in der Regel nach innen zurückgesetzt.

3.6 Praxis des Brennschneidens

Inbetriebnahme des Schneidbrenners

Nach der Auswahl einer zu den jeweiligen Blechdicken gehörenden Schneiddüse sind aus der Schneid-tabelle die Werte für die Gasdrücke zu entnehmen und bei geöffneten Brennerventilen einzustellen. Beim Einstellen der Drücke sind Verluste bis zum Schneidbrenner einzurechnen. Wenn möglich, sollten die Gasdrücke direkt am Brenner gemessen werden.

Heizflammeneinstellung

- Heizesauerstoffventil ganz, Brenngasventil nur wenig öffnen
- Gemisch zünden
- zuerst mit dem Brenngasventil Brenngasüberschuss einstellen
- Brenngasventil drosseln, bis sich der Flammenkegel scharf abgrenzt
- Schneidsauerstoffventil öffnen und prüfen, ob der Schneidsauerstoffstrahl gerade und konzentrisch aus der Schneiddüse austritt, sich nicht aufweitet, ausfranst oder flattert

Durch die Auslegung der Schneiddüsen ist es möglich, die Einstellung der Heizflamme den praktischen Erfordernissen anzupassen. Bei verrosteten, verzünderten oder geprägten Oberflächen oder beim Fä-senschneiden sind stärkere Heizflammen einzustellen.

Schneidbeginn

Es gibt zwei Möglichkeiten, mit dem Brennschnitt zu beginnen: Den Anschnitt an der Werkstückkante und den Anschnitt von der Werkstückoberfläche aus.

Beim Anschnitt an der Werkstückkante wird diese mit der Heizflamme auf Entzündungstemperatur ge-bracht, dann der Schneidsauerstoff zugeschaltet und der Brennvorschub eingeleitet. Der Schneidbren-ner wird mit konstantem Abstand und gleichmäßiger Vorschubgeschwindigkeit über das Werkstück ge-führt.

Zum Schneiden von Innenkonturen muss der Schnitt von der Werkstückoberfläche aus, durch das soge-nannte Lochstechen, begonnen werden.

Hierbei wird zuerst das Werkstück im Einwirkungsbereich des Schneidsauerstoffstrahls auf Entzündungstem-peratur erwärmt. Dann wird das Schneidsauerstoffventil langsam geöffnet und der Brennerkopf leicht an-gehoben. Bei geringer Vorschubgeschwindigkeit wird der Brenner wieder auf den nominellen Abstand eingestellt. Mit geringem Schneidsauerstoffdruck wird für einige Sekunden eine flache Fuge geschnitten. Danach wird der Schneidsauerstoffdruck auf den für die Werkstückdicke vorgegebenen Wert erhöht und der Schneidstrahl durchsticht das Werkstück.

Schneidparameter

Die **Schneidparameter** – Schneidsauerstoff, Heizsauerstoff, Brenngasdruck, Düsenabstand und Schneidgeschwindigkeit – sind in einer für die jeweilige Schneiddüse gültigen Schneidtablette enthalten. Abweichungen von den in der Schneidtablette angegebenen Parametern führen zu Brennschneidfehlern.

Eine pauschale Angabe der Schneidgeschwindigkeit, die zu guten Ergebnissen führt, ist praktisch nicht möglich. Die Schneidgeschwindigkeit ist abhängig von:

- der Art des Schnittes, ob Senkrecht- oder Schrägschnitt, ob Gerad- oder Konturenschnitt; bei Schrägschnitten und bei Kurvenschnitten mit engen Radien ist die Geschwindigkeit herabzusetzen: für Schrägschnitt 30° um ca. 25%, für Schrägschnitt 45° um ca. 45%, für Kurvenschnitt um ca. 10%
- der Anforderung an die Schnittfläche, ob Konstruktions- oder Trennschnitt
- der Werkstoffzusammensetzung
- der Oberflächenbeschaffenheit, ob verrostet, sandgestrahlt oder geprimert
- der Konstruktion des Schneidbrenners und der Wahl der Schneiddüse
- der Art des Brenngases
- der Werkstückdicke

Tabelle 4: Auszug aus einer Brennschneidtablette für Standard-Brennschneiddüsen, Brenngas Acetylen

Werk- stückdi- cke	Schneiddüse	Acetylendruck	Heizsauerstoff- druck	Schneidsauerstoff- druck	Schnittfugenbreite	Schneidgeschwin- digkeit	Acetylenverbrauch	Heizsauerstoffver- brauch	Schneidsauerstoff- verbrauch
mm		bar	bar	bar	mm	mm/min	m³/h	m³/h	m³/h
10	10 bis 25	0,5	2,5	4,0	1,8	620	0,35	0,46	2,3
15	10 bis 25	0,5	2,5	4,3	1,8	520	0,35	0,46	2,5
20	10 bis 25	0,5	2,5	4,5	1,8	450	0,35	0,46	2,6
25	10 bis 25	0,5	2,5	5,0	1,8	410	0,35	0,46	2,8

Die Schneidgeschwindigkeit ist auch vom Düsentyp abhängig. In der Abbildung 10 sind die Schneidgeschwindigkeiten von Standard- und Hochleistungsschneiddüsen dargestellt. Besondere Schneidkanalformen ermöglichen es, dass der Schneidsauerstoffstrahl mit 1,5-facher Schallgeschwindigkeit aus der Düse ausströmen kann, ohne dass er sich nach dem Austritt aus der Düse schnell aufweitet.

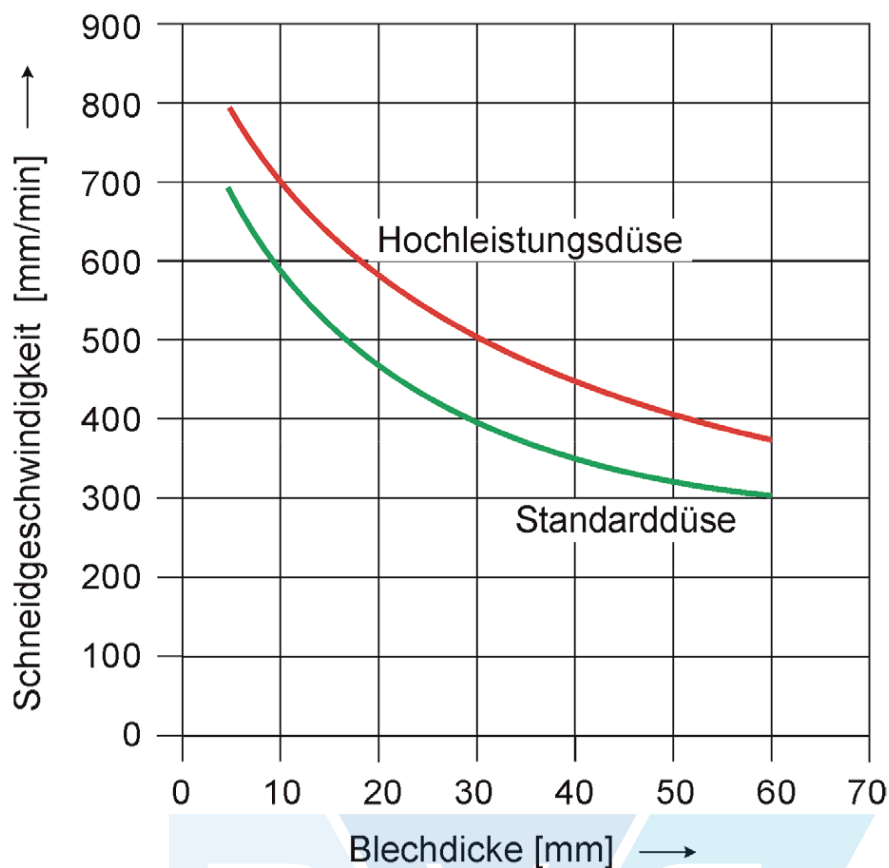


Abbildung 10: Schneidgeschwindigkeiten verschiedener Schneiddüsenformen

Schnittführung und Schnittfolge

Mit der richtigen Schnittführung und Schnittfolge kann der durch die Wärmeeinbringung der Heizflamme entstehende Verzug gemindert werden.

Zu beachten ist:

- Zuerst Innenausschnitte schneiden.
- Schnittführung so wählen, dass der Abfall abwandern kann.
- Das zu schneidende Teil sollte möglichst lange mit der Grundplatte verbunden bleiben.

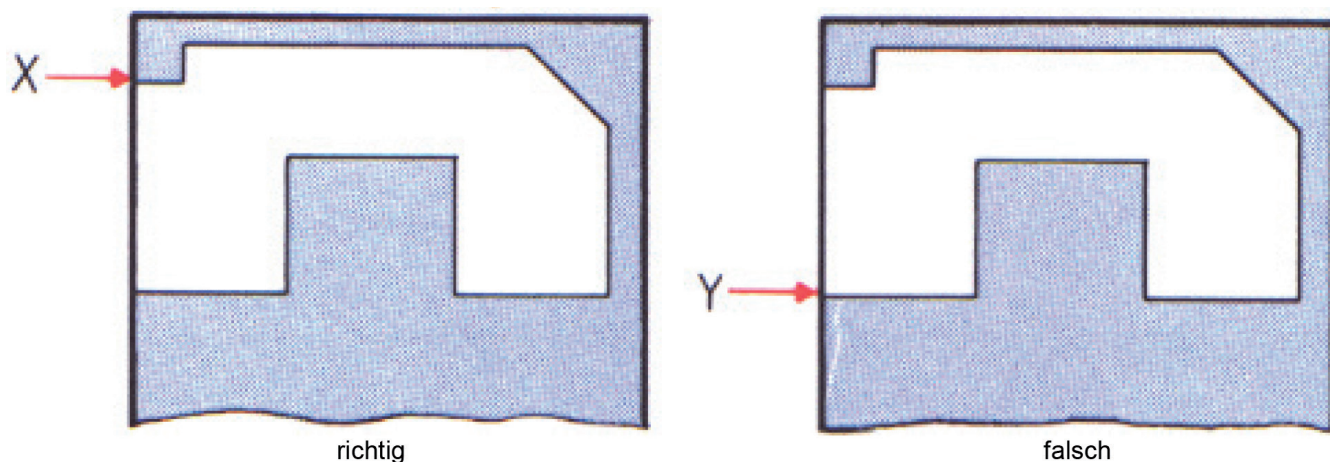


Abbildung 11: Schnittführung

Unregelmäßigkeiten beim Brennschneiden

Durch Brennschneiden hergestellte Bauteile weisen oft Unregelmäßigkeiten an den Schnittflächen auf. Die am häufigsten auftretenden Fehler sind:

- anhaftende Schlacke
- Kantenanschmelzungen
- Kolkungen
- übermäßige Schnittrillen
- Winkelabweichungen an der Schnittfläche

Detaillierte Auskunft über die Ursachen gibt das Merkblatt DVS 2101 – Unregelmäßigkeiten und deren Ursachen beim autogenen Brennschneiden.

Dem Praktiker bieten sich folgende Möglichkeiten bei der Suche nach den Ursachen für fehlerhafte Brennschnitte:

1. Überprüfung der Brennschneideignung des Werkstoffes
2. Zustand der Schneiddüse kontrollieren (meistens eine der Hauptursachen für fehlerhafte Brennschnitte)
3. Prüfen: Schneidparameter – Schneidsauerstoffdruck, Schneidgeschwindigkeit, Düsenabstand, Flammeinstellung
4. Prüfen der Oberflächenqualität des Werkstoffes

3.7 Brennschneidmaschinen

Eine einfache Möglichkeit zum maschinellen Brennschneiden ist der Einsatz von Handbrennschneidmaschinen. Über einen Elektromotor kann die Vorschubgeschwindigkeit stufenlos geregelt werden. Die Führung der Maschine erfolgt manuell nach Anriss auf dem Werkstück oder entlang von Führungsschienen. Durch eine Reihe von Hilfsvorrichtungen können Fugenvorbereitungen, Anschärfsschnitte, Kreisausschnitte und Streifen hergestellt werden. Diese Maschinen können wegen ihres geringen Gewichts zum Bauteil transportiert und somit auch auf Baustellen eingesetzt werden.

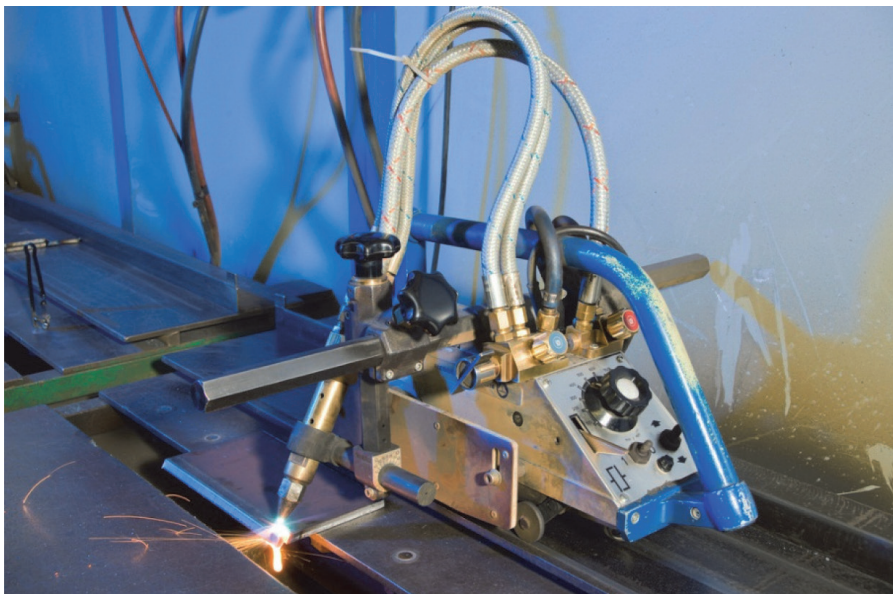


Abbildung 12: Handbrennschneidmaschine

Bei den stationären Maschinen werden meist numerisch gesteuerte Kreuzwagenbrennschneidmaschinen in Ausleger- oder Portalbauweise eingesetzt.

Beim Einsatz von computernumerischen Steuerungen werden die Schneidprogramme meist über Netzwerkverbindungen vom Programmierplatz in der Arbeitsvorbereitung zur Maschinensteuerung übertragen oder zunächst auf Datenträger gespeichert und an der Maschine eingelesen. Auch die Handeingabe von Programmen ist möglich. Die Verwendung vordefinierter Makros zur Herstellung geometrisch einfacher Formteile und eine grafische Bedienerunterstützung können den hierbei notwendigen Zeitaufwand verringern.



Abbildung 13: CNC-gesteuerte Portal-Brennschneidmaschine

Zur Herstellung von Anpassungs- und Durchdringungsschnitten an Rohren werden Rohrbrennschneidmaschinen eingesetzt, die meist mit computernumerischen Steuerungen betrieben werden.

Je nach Ausstattungsgrad der Maschine und Funktionalität der Steuerung sind unterschiedlich komplexe Schnittkonturen ohne und mit Schweißfugenvorbereitung herstellbar.

Industrieroboter in vertikaler Gelenkarmbauweise werden zunehmend zum Schneiden von komplizierten Konturen an räumlichen Bauteilen, wie Rohren und Profilen und zur Herstellung von Schweißfasen genutzt.



Abbildung 14: Rohrbrennschneidmaschine

3.8 Sonder- und Hilfseinrichtungen

Die Eckenverzögerung reduziert die Schneidgeschwindigkeit beim Umfahren einer Ecke so weit, dass der Rillennachlauf Null ist. Dadurch wird ein Unterschneiden der Kanten im unteren Bereich durch den Nachlauf des Schneidsauerstoffstrahls vermieden.

Aufgabe verschiedener Ausführungen von Brennerhöhenverstellungen ist es, den Düsenabstand zur Werkstückoberfläche konstant zu halten. Sehr genau arbeitet die mechanische Abtastung, die beim geraden Mehrfasenschnitt und beim Besäumen eingesetzt wird. Bei der kapazitiven Brennerhöhenverstellung wird die Kapazitätsänderung zwischen einem, meist als Ring ausgeführten, konzentrisch um die Spitze des Schneidbrenners angeordneten Sensor und dem Werkstück erfasst. Abweichungen zum eingestellten Sollwert werden mit einer Genauigkeit von $\pm 1,0$ bis zu $\pm 0,5$ mm eingehalten.

Mithilfe einer Lochstechautomatik können Anschnittöffnungen zum Schneiden von Innenkonturen automatisch in ein Werkstück eingebracht werden. Aber auch der Mehrbrennerbetrieb erfordert einen Schneidbeginn in der Blechtafel, da das genaue Anstellen mehrerer Brenner an der Werkstückkante besonders bei Folgeschnitten Schwierigkeiten bereitet. Zudem erhöht sich die Maßhaltigkeit der Bauteile, da der geschlossene Schrottrahmen einen Wärmeverzug weitgehend verhindert. Lochstechen ist möglich bis zu einer Blechdicke von 130 mm.

Pneumatisch arbeitende Körnerwerkzeuge stellen Markierungen für nachfolgende Arbeitsgänge (z. . Biegelinien, Bohrungsmittelpunkte) her. Auch mit Pulvermarkiereinrichtungen können Linien auf Blechen angezeichnet und Beschriftungen zur Kennzeichnung vorgenommen werden.

Zur Verringerung des Wärmeverzuges beim Schneiden dünner Bleche, können um die Schneiddüse angeordnete Luft- und Wasserbrausen eingesetzt werden.

Zündeinrichtungen gestatten ein zentral gesteuertes Zünden aller Schneidbrenner, die oft mit integrierter Innenzündung ausgestattet sind. Zündüberwachungen verhindern das unkontrollierte Austreten unverbrannten Gases. Mithilfe von Flammenüberwachungen kann ein Flammenabriss erkannt werden.

Zur Vorbereitung von Schweißkanten werden Kreuzwagenbrennschneidmaschinen mit Mehrbrenneraggregaten ausgerüstet. Mit den verfügbaren Varianten an Dreibrenneraggregaten können geradflächige Schweißfugen hergestellt werden – mit schwenkbaren an rechtwinkligen Bauteilen und mit endlos drehenden auch bei Kurvenschnitten.

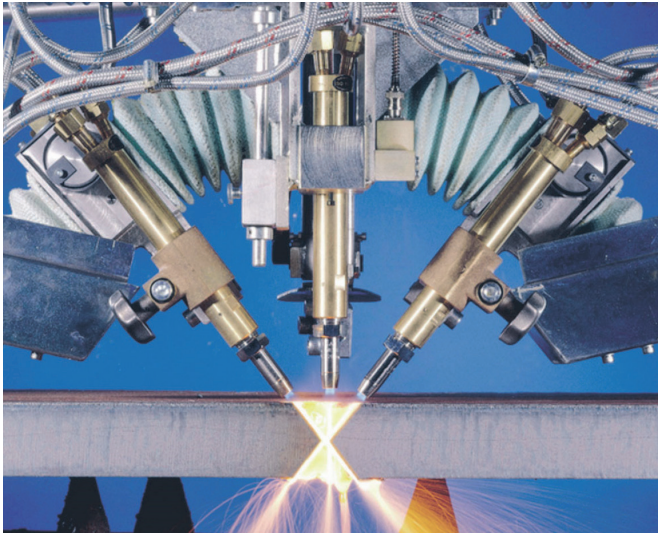


Abbildung 15: Dreibrenneraggregat

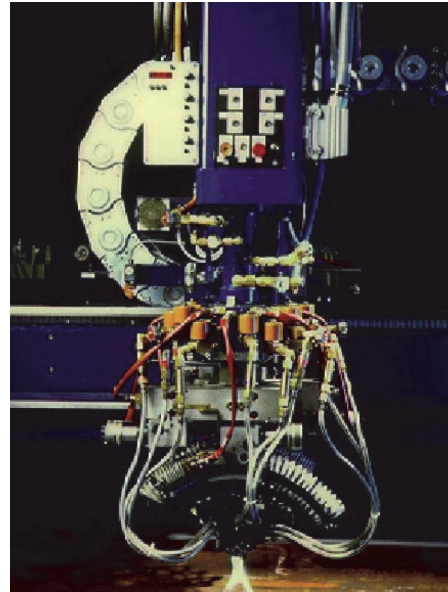


Abbildung 16: Endlos drehbares Dreibrenneraggregat zur Herstellung von V-, Y-, X- und K-Fugen

3.9 Sonderverfahren des autogenen Brennschneidens

Hierzu zählen das Brennfugen (Fugenhobeln), Pulverbrennschneiden und das Lichtbogen-Sauerstoff-Schneiden mit spezieller Hohlelektrode. Brennschneiden ist auch unter Wasser möglich (Wasserverdrängung durch Gasmantel, Zünden elektrisch oder über Wasser).

Brennfugen

Das Brennfugen ist eine Variante des Brennschneidens. Dazu wird ein Schneidbrenner mit einer Spezialdüse unter Winkeln von max. 20 Grad zur Blechoberfläche angesetzt. Wie beim Brennschneiden wird der Werkstoff örtlich auf Entzündungstemperatur erwärmt, im Sauerstoffstrahl oxidiert und in Vorschubrichtung aus der entstehenden Fuge bzw. Mulde heraus getrieben.

Durch Veränderung des Winkels, aber insbesondere der Düsenform, der Vorschubgeschwindigkeit und des Sauerstoffdruckes, können Tiefe und Breite der erzeugten Fuge beeinflusst werden. Beim einmaligen Brennfugen kann man eine Tiefe bis zu 8 mm erreichen; die Vorschubgeschwindigkeit beträgt maximal 1200 mm/min.

Das Brennfugen dient zum:

- Herstellen von Schweißfugen
- Ausarbeiten von Wurzelfehlern bei Schweißnähten, Schlacken- und Porennestern sowie Rissstellen vor dem Nachschweißen

Hinsichtlich der Anwendbarkeit des Brennfugens auf verschiedene Werkstoffe gelten die gleichen Einschränkungen wie für das Brennschneiden.

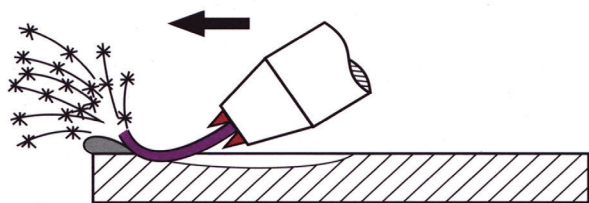


Abbildung 17: Brennfugen (Fugenhobeln)

Metallpulver-Brennschneiden

Für Werkstoffe, wie CrNi-Stähle, Gusseisen und Nichteisenmetalle, die nicht brenngeschnitten werden können, kann das Metallpulver-Brennschneiden eingesetzt werden. Dabei wird dem Schneidspalt mit speziellen Pulverschneidbrennern oder Schneidbrennern mit separater Pulverzuführung feinkörniges Eisenpulver mithilfe trockener Druckluft zugeführt. Durch die Verbrennung des Eisenpulvers im Schneidsauerstoffstrahl wird die Temperatur an der Schneidstelle gesteigert. Durch diese Temperaturerhöhung und die Vermischung mit verbranntem Eisenpulver wird die Viskosität der Schneidschlacke so verringert, dass sie ausgeblasen werden kann.

Die erzielbare Schnittqualität ist deutlich schlechter als beim autogenen Brennschneiden.

Es wird wegen seiner verfahrensbedingten Nachteile in der Praxis nur mehr selten eingesetzt.

Brennbohren

Das Brennbohren mit Sauerstoff-Kernlanzen ist ein thermisches Lochstechen. Ein mit Stahldrähten gefülltes Stahlrohr verbrennt im Sauerstoffstrom unter extremer Wärmeentwicklung, die das Material aufschmilzt. Das geschmolzene Material wird durch den Sauerstoffstrom ausgeblasen. Das Verfahren dient – neben dem Einbringen von Löchern in mineralische Werkstoffe, wie Stein und Beton – auch zur Herstellung von Anschnittlöchern für das autogene Brennschneiden in dicke Stahlplatten, wenn das Lochstechen nicht mehr einsetzbar ist.

3.10 Arbeitssicherheit

- Beim Brennschneiden und Fugenhobeln wird nur ein Teil des zugeführten Schneidsauerstoffs zum Brennschneiden bzw. Fugen verbraucht. Der Rest treibt die Schlacke aus und reichert die Umgebungsluft mit Sauerstoff an.
- Durch den starken Funkenflug erhöht sich die Brandgefahr erheblich.
- Der Schallpegel liegt beim Brennschneiden häufig über 85 dB(A). Das Benutzen von Gehörschutz ist notwendig.
- Beim Brennschneiden entsteht Rauch und Staub in größeren Mengen. Die Dämpfe bestehen überwiegend aus Eisenoxiden und sind lungenbelastend. Eine Absaugung ist notwendig.
- Die von der Heizflamme ausgehende optische Strahlung erfordert das Tragen einer Schutzbrille (Schutzstufe 4 bis 5, je nach Gasdurchsatz)

4 Plasmaschneiden

4.1 Einordnung und Anwendungsbereich

Die Entwicklungen in den letzten Jahren trugen dazu bei, die technischen und wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten des Plasmaschneidens weiter zu erhöhen. Ursprünglich nur zum thermischen Schneiden nicht brennschneidgeeigneter Werkstoffe, wie hoch legiertem Stahl, Aluminium und Kupfer gedacht, entwickelten sich bis heute verschiedene Varianten. Neben metallischen Werkstoffen können nun auch nicht leitende Materialien geschnitten werden. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die verschiedenen Verfahrensvarianten.

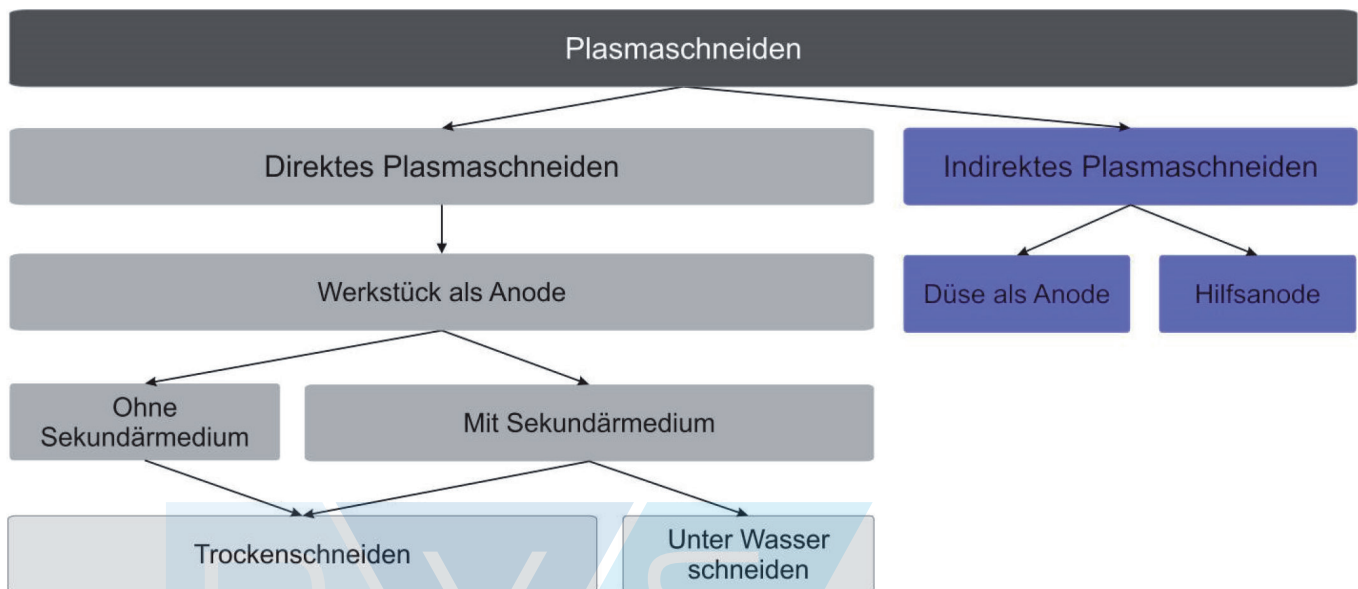


Abbildung 18: Übersicht Plasmaschneiden

Das Plasmaschneiden lässt sich in die zwei Verfahrensvarianten *Direktes Plasmaschneiden* (mit übertragendem Lichtbogen) und *Indirektes Plasmaschneiden* (mit nicht übertragendem Lichtbogen) unterteilen. Das Plasmaschneiden wird bisher vorwiegend in der Verfahrensvariante *Direktes Plasmaschneiden* eingesetzt. Spezielle Verfahrensvarianten, wie das Plasmamarkieren und das Plasmafugen ergänzen die Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie.

Beim Plasmaschneiden wird ein Lichtbogen durch eine wassergekühlte Düse stark eingeschnürt und dessen Energiedichte und Temperatur somit deutlich erhöht im Vergleich zum nicht eingeschnürten, frei brennenden Lichtbogen. Eine überlagerte Gasströmung im Düsenkanal bringt zusätzlich kinetische Energie in den Prozess ein, weshalb dieses Verfahren besonders gut zum Trennen von Werkstücken aus unterschiedlichsten Werkstoffen geeignet ist.

Damit es keine Längenänderungen des Plasmalichtbogens bzw. geringste oder keine Schneidstromänderungen gibt, werden zum Plasmaschneiden Stromquellen mit steil fallenden Kennlinien bzw. Konstant-Stromcharakteristiken genutzt.

4.2 Direktes Plasmaschneiden

4.2.1 Verfahrensprinzip

1. Das Plasmagas, bei manchen Brennersystemen das Pilotgas oder auch Zündgas genannt, wird zugeschaltet und strömt durch den Brenner.
2. Mittels Hochspannung wird ein energiearmer Pilotlichtbogen zwischen der Elektrode (Katode) und der Plasmaschneiddüse gezündet. Die Aufgabe dieses Hilfslichtbogens ist, die Gasstrecke zwischen Katode und Werkstück teilweise zu ionisieren.
3. Diese teilweise Ionisierung der Strecke zwischen Elektrode und Werkstück bewirkt, dass bei Einschaltung der Spannung zwischen Elektrode und Werkstück der sogenannte Hauptlichtbogen gezündet.

- det wird. Dies ist der eigentliche Schneidlichtbogen. Er brennt von der Elektrode (Katode) durch die einschnürende Plasmaschneiddüse hindurch zum Werkstück (Anode).
- Der Plasmaschneidstrahl schmilzt (Schmelzschnidverfahren) mit seiner hohen Temperatur (ca. 10.000 bis 50.000°C) das Werkstück auf.
 - Das schmelzflüssige Material wird durch die hohe kinetische Energie des Plasmagases aus der Schnittfuge getrieben.

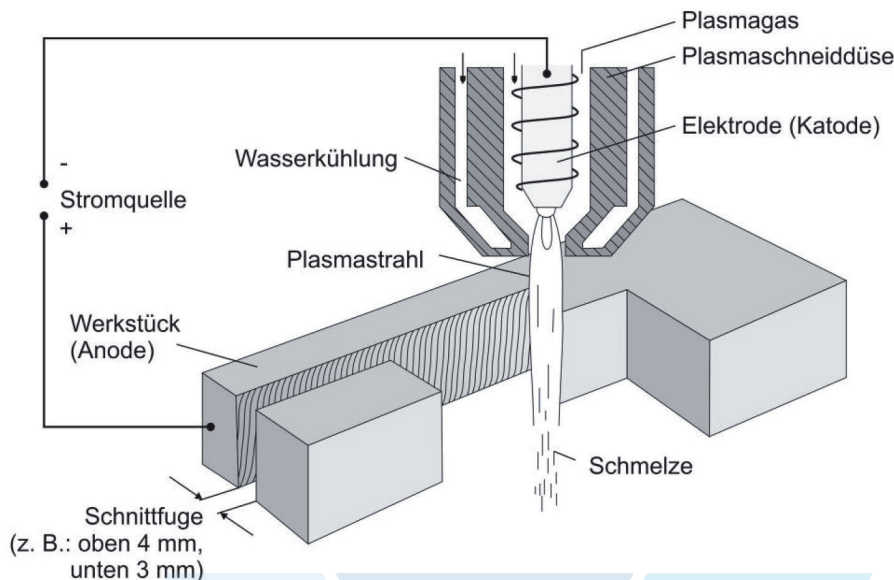


Abbildung 19: Verfahrensprinzip - Schema

Die schneidbaren Werkstückdicken umfassen werkstoffabhängig einen Bereich von ca. 0,5 bis 160 mm.

4.2.2 Verfahrensvarianten

Die einzelnen Verfahrensvarianten unterscheiden sich durch die Schneidgeschwindigkeit, die schneidbare Werkstückdicke und die erreichbare Schnittqualität. Wesentlichen Einfluss haben hier die Stromstärke, die Stromdichte des Plasmalichtbogens und der zu schneidende Werkstoff. Folgende grundlegende Varianten werden unterschieden.

Konventionelles Plasmaschneiden

Beim konventionellen Plasmaschneiden, welche die „Urform“ dieses Verfahrens ist, wird der Plasmalichtbogen lediglich durch den Innendurchmesser der Plasmadüse gebündelt. Es wird kein Sekundärmedium eingesetzt. Durch die Form des Lichtbogens entsteht eine charakteristische V-förmige Schnittfuge. Diese Variante wird oft auch vereinfacht als *Standard-Plasmaschneiden* bezeichnet.

Heute wird das Plasmaschneiden ohne Sekundärmedium für das manuelle und mechanisierte Schneiden, Fugen und Abtragen genutzt. Diese einfache Plasmatechnik wird angewandt, wenn die Qualitätsanforderungen an die Schnittfläche nicht allzu hoch sind.

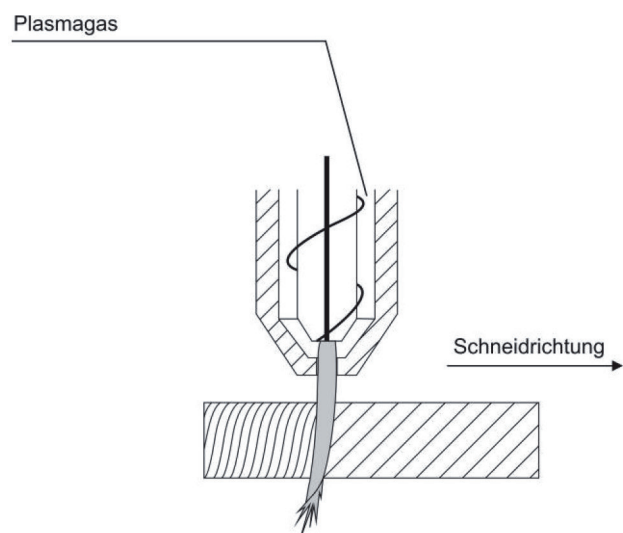


Abbildung 20: Verfahrensprinzip konventionelles Plasmaschneiden (ohne Sekundärmedium)

Plasmaschneiden mit Sekundärmedium

Durch ein Sekundärmedium kann um den Plasmalichtbogen eine definierte Atmosphäre geschaffen und der Lichtbogen eingeschnürt werden. Als Sekundärmedium werden Gas oder Wasser genutzt.

Sekundärgas

Durch Zuführung des Sekundärgases, bildet sich ein Gasmantel um den Plasmalichtbogen aus. Dieser schnürt ihn weiter ein. Infolge dessen erhöhen sich die Temperatur und Energiestromdichte. Die Schnittqualität und Schneidgeschwindigkeit werden verbessert. Durch die elektrisch isolierte Schutzkappe wird die Schneiddüse geschützt, wodurch die Ausbildung von Kurzschlüssen zwischen Düse und Werkstück sowie Düsenbeschädigungen durch Schlackespritzer beim Lochstechen verhindert werden. Zusätzlich wird durch das Sekundärgas die Kühlung der Schneiddüse verbessert.

Als Sekundärgas können auch oxidierende Gase, z.B. Luft eingesetzt werden.

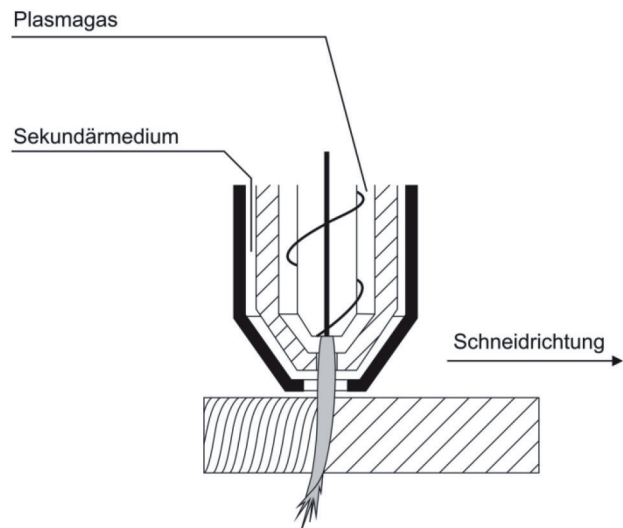


Abbildung 21: Verfahrensprinzip Plasmaschneiden mit Sekundärgas

Sekundärwasser

Das Sekundärwasser tritt in Form eines Sprühnebels zwischen der Plasmadüse und der Schutzgasdüse aus und wird durch den Plasmalichtbogen zersetzt. Diese Verfahrensvariante wird vorzugsweise beim Schneiden von Aluminium und hoch legierten Stählen bis 50 mm Materialdicke eingesetzt, da der reduzierend wirkende Wasserstoff zu metallisch blanken Schnittflächen führt.

Plasmaschneiden mit Wasserinjektion

Die Einschnürung des Plasmalichtbogens wird bei dieser Verfahrensvariante vom kreisringförmig, meist tangential zugeführten Wasser übernommen (Wassermantel). Ein geringer Teil des Wassers verdampft (ca. 10%). Die größere Wassermenge kühlt das Düsensystem und das Werkstück, was zum einen die Lebensdauer (Standzeit) der Plasmadüse verlängert und zum anderen die Verformung des Werkstückes verringert. Außerdem wird die Oxidation an den Schnittflächen reduziert. Schneidbare Werkstückdicken liegen im Bereich von 3 bis 75 mm. Bei dieser Variante befindet sich ein Teil des Brenners vorzugsweise unter der Wasseroberfläche.

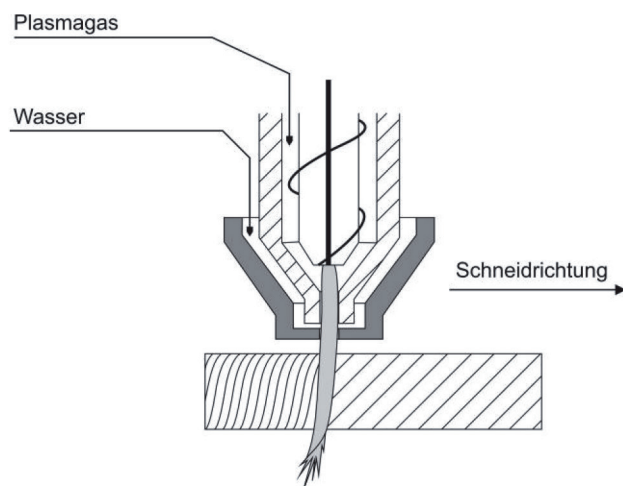


Abbildung 22: Plasmaschneiden mit Wasserinjektion

Ziel dieser Verfahrensvariante ist es u.a., die bei der Umweltbelastung durch Lärm, UV-Strahlung, Stäube und Schneidrauche zu reduzieren. Nachteil ist, dass die erzeugte Rotation des Plasmalichtbogens zu unterschiedlichen Winkelabweichungen der beiden Schnittflanken führt und nur eine Schnittfläche die Qualitätsanforderungen erfüllt. In der Praxis kann z.B. beim Einsatz von Robotern der Brenner so geführt werden, dass die „Gutseite“ immer im gewünschten Bereich liegt.

Plasmaschneiden mit erhöhter Einschnürwirkung

Bei dieser Verfahrensvariante werden die erhöhte Einschnürung und die damit verbundene Konzentration der Stromdichte durch zusätzliche Bündelungsmechanismen erreicht. Dies kann durch spezielle Düsen, die Gasrotationen oder mehrstufige Düsen, die teilweise Gas abführen, umgesetzt werden. Der Vorteil ist hier, dass sich mit dem entsprechend ausgebildeten Plasmalichtbogen im Bereich von 0,5 bis 50 mm [Hersteller- und systemabhängig] nahezu rechtwinklige Schnittkanten mit erhöhter Formteilgenauigkeit herstellen lassen.

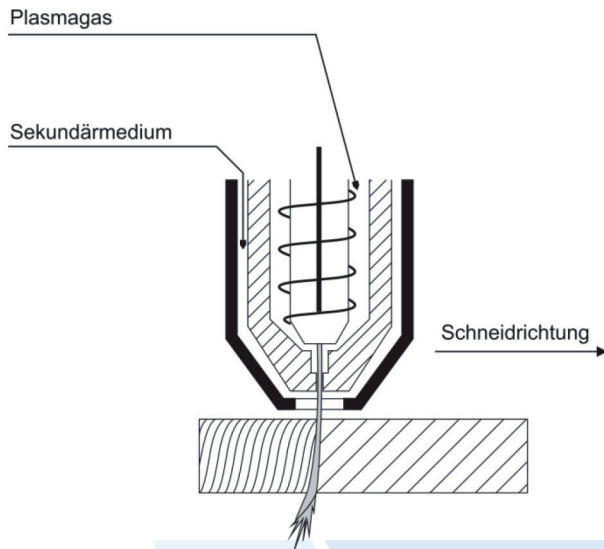


Abbildung 23: Einschnürung durch Sekundärmedium

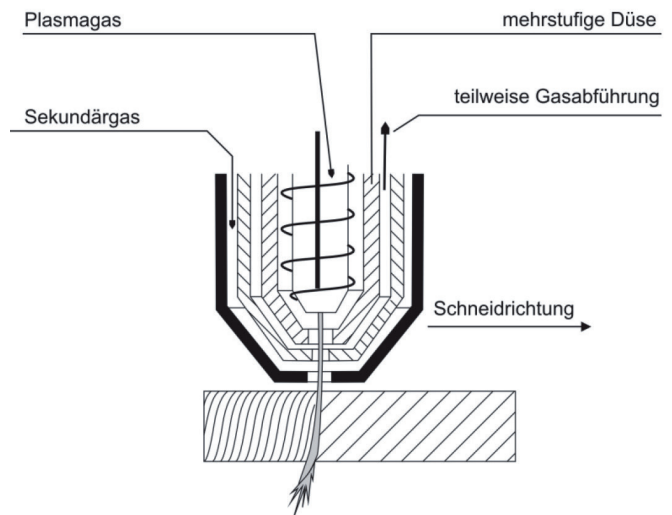


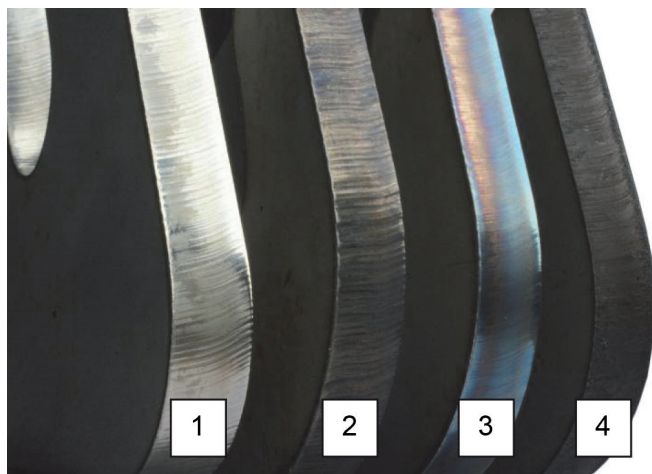
Abbildung 24: Einschnürung durch mehrstufige Düsen

Vorzugsweise wird dabei mit Sekundärgas gearbeitet, das mit hoher Geschwindigkeit um den Plasmastrahl rotieren kann und diesen noch stärker einschnürt und stabilisiert.

Plasmaschneiden unter Wasserabdeckung

Die einzelnen Verfahrensvarianten finden mittlerweile verschiedene Einsatzgebiete. Sie sind teilweise geeignet, um nicht nur trocken, sondern auch auf oder unter Wasser zu schneiden. Bei der Unterwasser-Plasmaschneidtechnologie hat das Sekundärmedium, neben der Einschnürung die Funktion den Plasmastrahl vor dem Wasser abzuschirmen.

Die Entwicklung hatte ihren eigentlichen Ursprung in den besonderen Anforderungen von industriellen Schneidanwendungen. So werden unter anderem Lärm-, Strahlungs- und Staubbelastrungen sowie Materialverzug verringert. Feste Schadstoffe werden im Wasser zurückgehalten. Der Lärmpegel wird, je nach Wasserstand gesenkt. Auch die Intensität der sichtbaren und der UV-Strahlung wird bei dieser Variante vermindert. Da Wasser nur begrenzt in der Lage ist, Gase aufzunehmen, ist eine Absaugung in Brenner-nähe trotzdem notwendig. Physikalisch bedingt dieser Prozess durch die kühlende Wirkung des Wassers einen höheren Energieeinsatz als beim Trocken-Plasmaschneiden für die gleiche Materialstärke. Durch die schnelle Abkühlung ist die Schnittfläche etwas riefiger als beim Trockenschnitt. Vorteile liegen im geringen Wärmeverzug der Bauteile, der Ausbildung einer schmalen Wärmeeinflusszone und nahezu oxidfreier Schnittflächen, da das Werkstück von der Atmosphäre abgeschirmt ist.



1 Unterwasser-Plasmaschneiden, 130 A, Plasma-
gas Ar/H₂, Schneidgeschwindigkeit 1,1 m/min

2 Unterwasser-Plasmaschneiden, 80 A, Plasma-
gas N₂/H₂, Schneidgeschwindigkeit 1,15 m/min

3 Trocken-Plasmaschneiden, 130 A, Plasmagas
Ar/H₂, Schneidgeschwindigkeit 1,15 m/min

4 Trocken-Plasmaschneiden, 100 A, Plasmagas
Air, Schneidgeschwindigkeit 1,1 m/min

Abbildung 25: Vergleich Unterwasser- und Trocken-Plasmaschneiden von legiertem Stahl (1.4301) mit unterschiedlichen Gasen

4.2.3 Anwendungsbeispiele



Abbildung 26: Fasenschnitt am Rohr

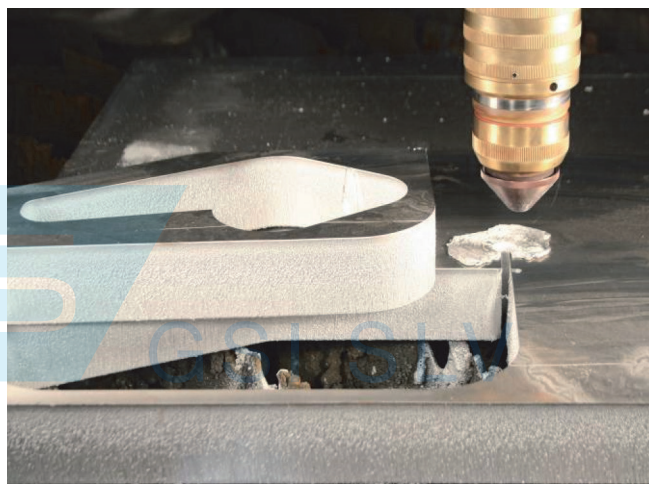


Abbildung 27: Aluminiummuster



Abbildung 28: Plasmaschneiden von Mustern auf Wasser



Abbildung 29: Schneiden von Kupferstegen für Schneidisch



Abbildung 30: Probeschnitt an einer Schiffsschraube (Alu-Bronze-Guss, Materialdicke 24 bis 48 mm)

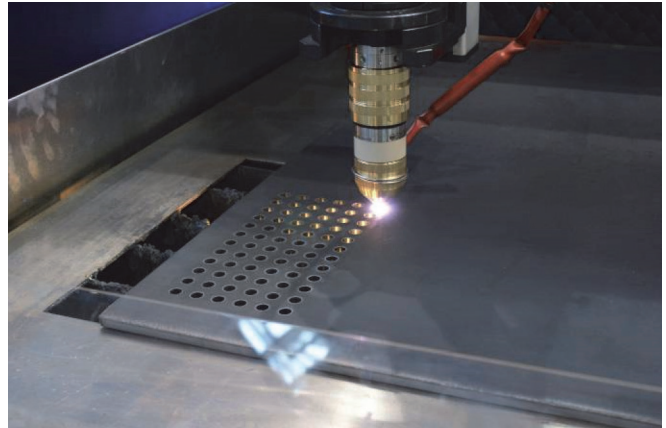


Abbildung 31: Schneiden einer Lochplatte (unlegierter Stahl, Materialdicke 10 mm, Lochdurchmesser 10 mm)

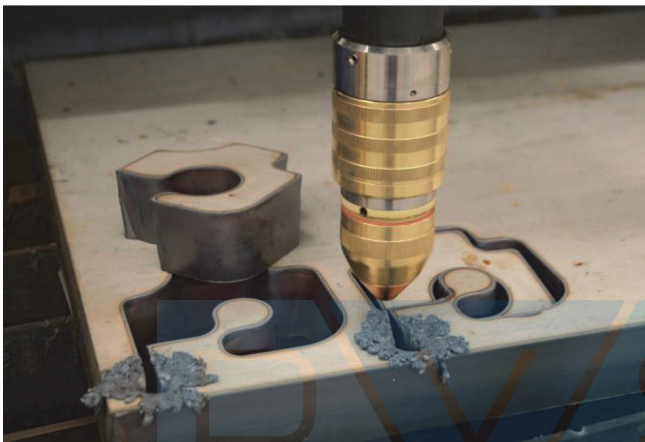


Abbildung 32: Plasmaschneiden von legiertem Stahl (Materialdicke 40 mm)

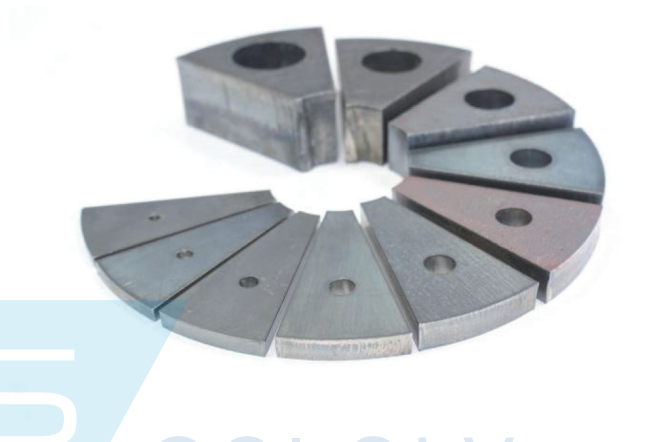


Abbildung 33: Schnittmuster aus unlegiertem Stahl mit Lochdurchmessern im Verhältnis zur Materialdicke von 1:1 (3 mm ... 30 mm)

4.3 Indirektes Plasmaschneiden

4.3.1 Verfahrensvariante „Düse als Anode“

Beim indirekten Plasmaschneiden brennt der Lichtbogen zwischen der Elektrode und der Düse des Plasmaprenners. So können auch elektrisch nicht leitende Materialien, z.B. glasfaserverstärkte Kunststoffe und Textilien geschnitten werden.

Der Energieeintrag ins Werkstück erfolgt hierbei im Wesentlichen über den heißen Gasstrahl. Der Wärmeeintrag, der sonst durch den anodischen Ansatzpunkt des Lichtbogens beim direkten Schneiden von Metallen entsteht, ist hier nicht gegeben. Diese Wärme wird in die Düse eingebracht und muss durch eine wirkungsvolle Kühlung abgeführt werden. Dadurch wird die Düse einer höheren thermischen Belastung als beim direkten Schneiden ausgesetzt. Die umsetzbaren Leistungen sind daher begrenzt. Heute sind Brenner mit Schneidströmen von bis zu 100 A, dies entspricht einer Leistung von 15 kW, erhältlich. Als Plasmagase werden vor allem nicht oxidierende Gase wie z.B. Argon-Wasserstoff-Gemische eingesetzt.

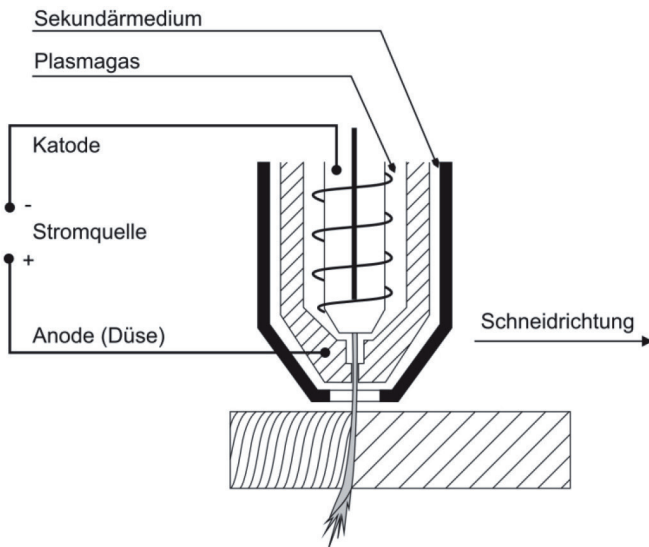


Abbildung 34: Indirektes Plasmaschneiden mit Düse als Anode

4.3.2 Verfahrensvariante „Hilfsanode“

Bei dieser neuartigen Plasmaschneidtechnologie wird als Anode weder das Werkstück noch die Düse, sondern ein Draht, im einfachsten Falle Schweißdraht, verwendet. Dieser wird dem Schneidprozess kontinuierlich zugeführt. Mithilfe dieser abschmelzenden Hilfs- oder Opferanode lässt sich die hohe thermische Leistung des *Direkten Plasmaschneidens* mit den Vorteilen des *Indirekten Plasmaschneidens*, nicht leitender Werkstoffe, kombinieren.

Im Gegensatz zum „klassischen“ *Indirekten Plasmaschneiden* können beim „Hot-Wire Plasmaschneiden“ die Plasmabrenner mit den gleichen hohen elektrischen Leistungen betrieben werden wie beim *Direkten Plasmaschneiden*.

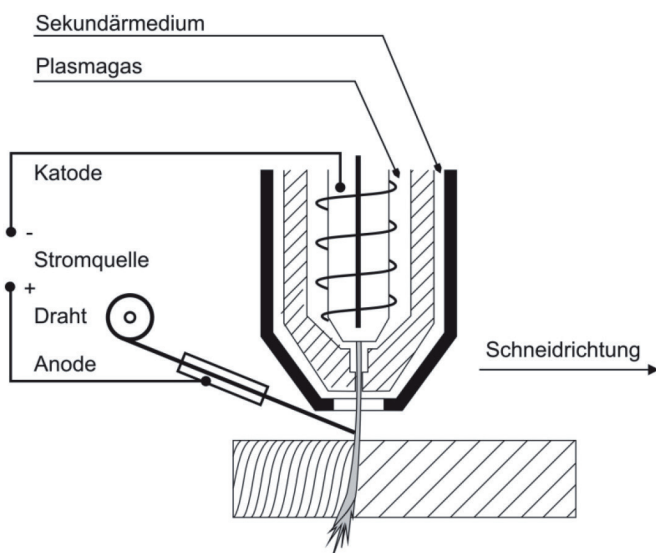


Abbildung 35: Hot-Wire Plasmaschneiden (Schema)

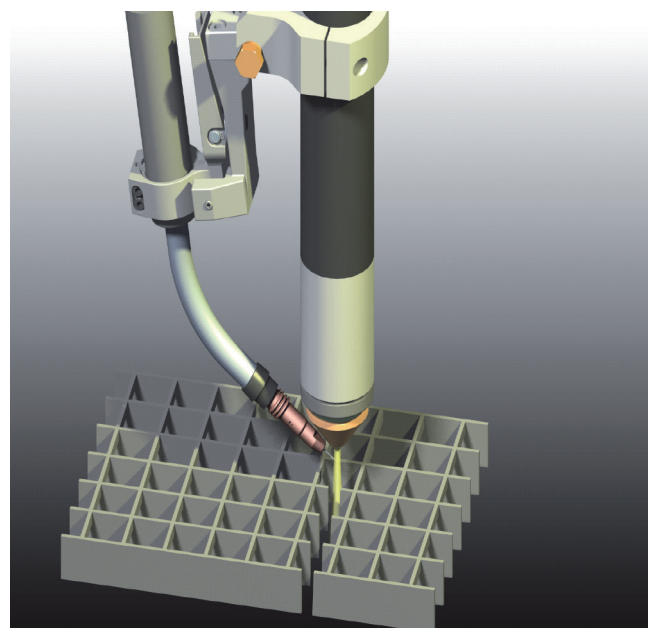


Abbildung 36: Hot-Wire Plasmaschneiden

Die maximale Werkstückdicke wird vor allem von der Leistung der Plasmastromquelle und der somit zur Verfügung stehenden Energie bestimmt.

Die Geschwindigkeit des Drahtes wird so eingestellt, dass der Plasmaprozess gerade noch aufrecht erhalten wird und der Draht vollständig abschmilzt. Für eine kontinuierliche Zuführung des Drahtes wird ein motorisch regelbarer Drahtvorschub verwendet.

Nachteilig bei diesem Verfahren sind Spritzer, die vom abschmelzenden Draht auf der Werkstückoberfläche abgelagert werden.

4.3.3 Anwendungsbeispiele



Abbildung 37: Anwendungsbeispiele – Schneiden von Platten, Stein, Rohrbündeln, Drahtglas, Gitterrosten (von links nach rechts)

4.4 Sonstige Plasmaverfahren

4.4.1 Markieren, Kerben und Körnen

Markieren, Kerben, Körnen und auch das Fugen gehören zur Variante des *Direkten Plasmaschneidens*. Je komplexer Bauteile oder Bauteilgruppen sind, desto höher wird die Bedeutung von Kennzeichnungen als Anrisslinien oder Körnungen. Die Vorteile des Plasmamarkierens werden von der Industrie zunehmend erkannt und genutzt, da durch dieses Verfahren Arbeitsschritte eingespart und Nebenkosten reduziert werden können:

- variable Intensität, d.h. Markieren, Körnen und Kerben mit einem System
- Keine zusätzliche Ausrüstung nötig
- Schneiden und Markieren mit dem gleichem Plasmabrenner ohne Verschleißteilwechsel
- einfache Integration in ein CNC-gesteuertes Führungssystem

Viele Plasmaschneidanlagen verfügen über eine Markierfunktion. Stärke bzw. Tiefe dieser Markierung können vom Anwender bestimmt werden. Die Markierungsart ist abhängig vom Schneidstrom, der Markiergeschwindigkeit und dem Gas. Bei Körnungen für spätere Bohrungen bleibt der Plasmastrahl für einige Sekunden auf einer Stelle über dem Material stehen. Ähnlich funktioniert auch das Kerben. Einziger Unterschied ist, dass hierbei Material abgetragen wird. Kerben sind vor allem dann von Nutzen, wenn sie auch nach einer Oberflächenbehandlung noch als Orientierungs- oder Markierungspunkte zu sehen sein sollen.

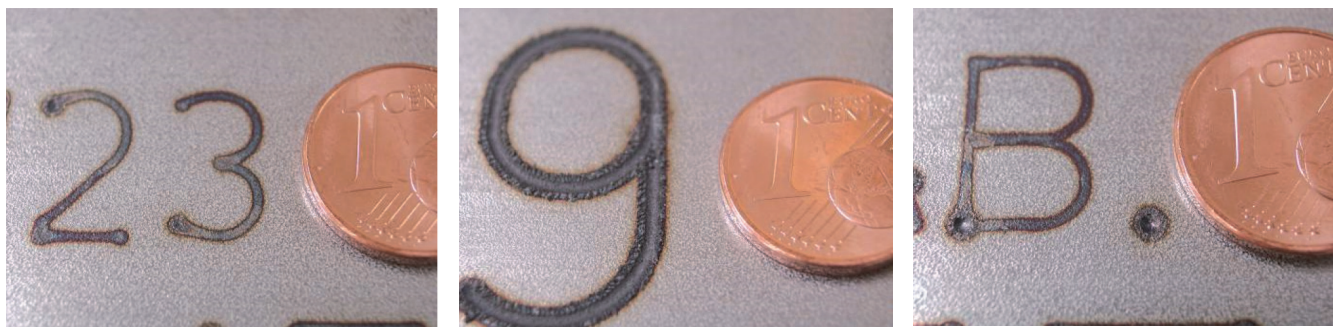


Abbildung 38: Oberflächliche Markierung, Kerben und Körnen mit Plasma

Von einfachen Anlauffarben des Metalls, die nach dem Lackieren nicht mehr zu sehen sind, bis hin zu tieferen Kerben und Körnungen durch Anschmelzen der Materialoberfläche ist mit Plasma fast jede Markieraufgabe realisierbar.



Abbildung 39: Schnittmuster mit variierender Fase und oberflächlicher Markierung

4.4.2 Fugen

Mit Plasma lassen sich Oberflächen nicht nur markieren, sondern auch abtragen. Der Brenner wird leicht geneigt und stechend geführt, sodass die Schmelze vor dem Lichtbogen hergetrieben und weggeblasen wird.

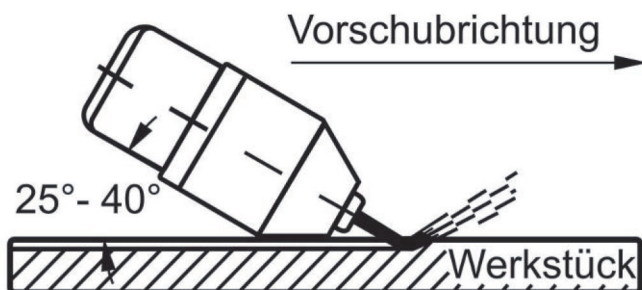


Abbildung 40: Prinzipskizze Plasmafugen



Abbildung 41: Plasmafugen in Anwendung

Das Plasmafugen ist eine saubere Alternative zum Fugen mit Kohlelektrode.

Anwendung:

- Ausfugen von Schweißnähten
- Beseitigung von Materialfehlern wie Lunker, Einschlüsse und Risse

Der Prozess kann vom Bediener gut beobachtet werden. Weiterhin wird wenig Wärme in das Material eingebracht und somit tritt kaum Verzug auf. Im Gegensatz zum Fügen mit Kohlelektrode sind Geräuschpegel und Rauchentwicklung stark reduziert. Die Gefahr einer Aufkohlung der Werkstückkanten besteht hier nicht.

Das Fügen kann sowohl von Hand als auch mechanisiert betrieben werden.

4.5 Gase zum Plasmaschneiden

Grundsätzlich sind zum Plasmaschneiden inerte und aktive Gase sowie deren Gemische nach DIN EN ISO 14157:2008-06 (ehemals DIN EN 439) geeignet. Für Plasmagase gelten die Bezeichnungen, Mischgenauigkeiten und Reinheiten nach dieser Norm. Die Qualität und Wirtschaftlichkeit eines Plasmaschnittes hängen auch in starkem Maße vom verwendeten Plasmagas bzw. -gemisch ab. Bestimmende Kriterien zur Auswahl eines Plasmagases sind dessen Atom- bzw. Molekulargewicht, die Wärmeleitfähigkeit, die chemische Reaktionsfähigkeit sowie die Dissoziations- und Ionisationsenergie.



Tabelle 5: Übersicht Plasmagase

	Wasserstoff (H ₂)	Argon (Ar)	Stickstoff (N ₂)	Sauerstoff (O ₂)	Druckluft (Air)	Gasgemische
Eigenschaften	- hohe Wärmeleitfähigkeit - dissoziiert bei hohen Temperaturen (d.h., dem Lichtbogen wird viel Energie entzogen → Randschichten kühlen ab → Lichtbogen wird eingeschnürt) - gute Wärmeübertragung - geringes Molekulargewicht, daher nicht als Einzelgas geeignet (nicht genügend kinetische Energie zum Austreiben der Schmelze) - dient als Zusatz zum Argon zur Steigerung der Schnittgeschwindigkeit bei guter Schnittqualität	- hohes Atomgewicht, daher hohe Energie zum Austreiben der Schmelze - niedrige Ionisationsenergie ermöglicht gutes Zündverhalten - geringe Wärmeleitfähigkeit, geringer Energiegehalt, daher nicht als Einzelgas geeignet	- reaktionsträge - hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit und Molekulargewicht mittlere Stellung zwischen Ar und H₂ - wird als Reingas oder Gemisch verwendet - erhöht als Zusatz zum Argon die Wärmeleitfähigkeit und Schnittqualität - Porenbildung beim Schweißen durch Stickstoffanreicherung an den Schnittkanten möglich	- hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit und neben N₂ - wirkt oxidierend auf die Schmelze - vermindert Viskosität der Schmelze, dadurch besseres Austreiben - geringere Kantenabrundung, geringe Flankenwinkel - geringe Bartbildung - wird als Reingas oder in N₂/O₂-Gemischen verwendet	- verändert Oberflächenspannung und Viskosität der Schmelze - feintropfiger, sprühregenartiger Materialaustritt - sehr hohe Schneidgeschwindigkeit bei guter Qualität und geringer Bartbildung - Porenbildung beim Schweißen durch Stickstoffanreicherung an den Schnittkanten möglich	- Kombination der Vorteile der Einzelgase möglich Beispiele: - N₂/H₂, - Ar/N₂/H₂ - Air/O₂ - N₂/H₂ - Ar/H₂
Anwendungsbe- reiche	Ar, H ₂ hoch legierte Stähle, Aluminiumlegierungen, Buntmetalle, Titan, Molybdän		N ₂ hoch leg. Stähle, Al, Ti, Cu	O ₂ unlegierte Stähle	Air unlegierte Stähle CrNi-Stahl	sonstige Gasgemische
		Ar, N ₂ hoch legierte Stähle		O ₂ , Air unlegierte Stähle		
	Ar, H ₂ , N ₂ hoch legierte Stähle					

4.6 Systemaufbau

4.6.1 Führungssysteme zum Plasmaschneiden

Wie der Brenner geführt wird, hängt davon ab, wie hoch der Automatisierungsgrad des Schneidsystems ist. Während beim mechanisierten bzw. automatisierten Schneiden Schneidportale, Industrieroboter, Rohrschneidmaschinen und einfache Führungssysteme eingesetzt werden, werden beim manuellen Schneiden Führungen wie Lineale, Schablonen, Zirkel und Aufsetzdüsen genutzt. Diese sind mit denen beim Autogenbrennschneiden vergleichbar.

Bei der Auswahl der Führungsmaschinen im mechanisierten/automatisierten Bereich ist die höhere Schneidgeschwindigkeit beim Plasmaschneiden gegenüber dem Autogenschneiden zu beachten.

Einfache Führungen ermöglichen das Schneiden von Geraden und einfachen Konturen. Darüber hinaus können Hand-Plasmapbrenner in entsprechende Halterungen oder Kreisfahreinrichtungen eingespannt werden, Abbildungen 42 und 43.



Abbildung 41: Einfache Fasenschneideinrichtung für das manuelle Plasmaschneiden



Abbildung 42: Zirkel Einrichtung für das manuelle Kreis-schneiden mit Plasma

Schneidportale (auch als Brennschneidmaschinen oder -anlagen bezeichnet) werden in der Industrie am häufigsten eingesetzt und sind ideal für den CNC-geführten 2D-Schneidbereich. Vorteil dieser Anlagen ist, dass anhand von Zeichnungen schnell die entsprechenden Konturen ausgeschnitten werden können. Neben verschiedenen Abstandsregelungen (Höhensteuerungen), die unabdingbar für qualitativ hochwertige Schnittergebnisse sind, besteht außerdem die Möglichkeit zusätzliche Komponenten an die Schneidportale anzuschließen. Beispielsweise können automatische Brennerkopf-Wechseleinheiten oder Dreh- und Schwenkaggregate in das System eingebunden werden.

Industrieroboter sind universell einsetzbar und besitzen mehrere Achsen. Ihre Bewegungen sind hinsichtlich Bewegungsfolge und Wege bzw. Winkel sind frei programmierbar. Roboter sind daher ideal bei Schneidaufgaben im 3D-Bereich. Egal, ob in der Automobilindustrie, im Anlagen- und Behälterbau oder beim Zuschnitt von Rohren – sie sind präzise beim Schneiden von Senkrecht- oder Fasenschnitten, Abbildung 43.



Abbildung 43: Kombination aus Flachbett-Führungsmaschine und Rohrschneidanlage

Rohrschneidmaschinen sind für den Zuschnitt von Rohren konzipiert. In einer speziellen Aufnahme wird das Rohr gedreht, sodass die optimale Lage des Schneidprozesses immer sichergestellt ist. Neben einer starren Brennerhalterung, die den Abstand zum Drehmittelpunkt konstant hält, ergibt sich auch die Möglichkeit, den Brenner flexibel zu führen und auf die Rohrbewegung abzustimmen. Außerdem sind Fasenschnitte oder Durchbrüche mit Fase für nachfolgende Schweißarbeiten herstellbar, Abbildung 44.



Abbildung 44: Roboter am Führungskran

Der Einsatz von Brennerkopf-Wechselsystemen ermöglicht einen schnellen Verschleißteilwechsel und Brennerkopftausch. Basis des Tausches bildet ein Schnellwechselsystem, mit denen die fertig bestückten Brennerköpfe schnell und automatisiert ausgetauscht werden. Wahlweise können die Wechsellplätze des revolverähnlichen Systems mit Verschleißteilen für gleiche oder unterschiedliche Schneidaufgaben oder z.B. zum Markieren bestückt werden. Schneidprozesse können somit fast vollständig mannlos ablaufen. Lediglich das Bestücken des Führungssystems und der Wechseleinheit muss manuell erfolgen.

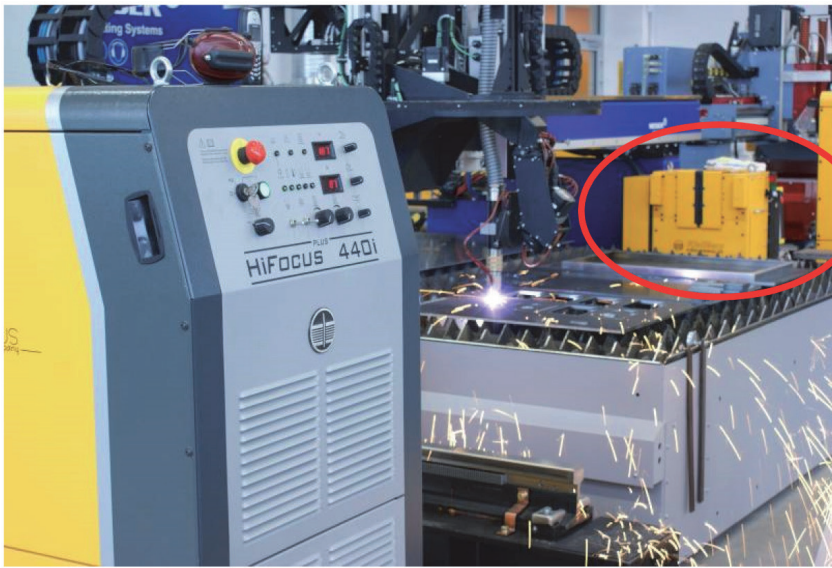


Abbildung 45: Wechselstation am Führungssystem

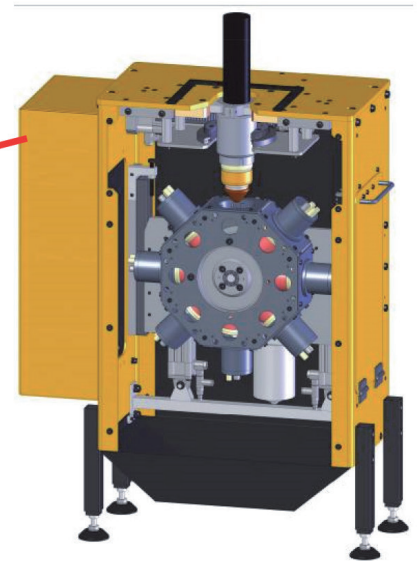


Abbildung 46: Wechselstation im Detail

Zur Vorbereitung von Schweißkanten stehen Dreh- und Schwenkaggregate zum Fasenschneiden zur Verfügung, mit denen üblicherweise V-Fugen hergestellt werden. Durch einen zweiten Arbeitsgang ist es auch möglich, andere Geometrien (Y-, X-, K-Fugen) zu erzeugen. Somit ist eine äußerst präzise Nahtvorbereitung mit Winkeln bis 50° umsetzbar.

Mehrbrenneraggregate, wie sie beim autogenen Brennschneiden verwendet werden, haben beim Plasmaschneiden bisher keine industrielle Verbreitung gefunden.

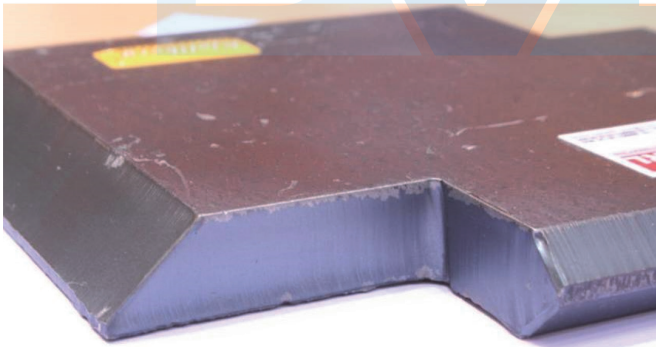


Abbildung 47: 2D-Fasenmuster mit Y- und K-Fase



Abbildung 48: 3D-Fasenmuster mit Y-Fase

5.6.1 Absaugung

Beim Plasmaschneiden entstehen Rauche und Gase, die nach Sicherheitsvorschriften vom Bediener fern gehalten werden müssen. Diese Aufgabe übernehmen Absaugvorrichtungen, die in der unmittelbaren Nähe der Schneidvorrichtung integriert sind. Vorteilhaft ist die Absaugung unter der Werkstückoberfläche.

Bei Schneidportalen fallen Metallreste und grobe Verunreinigungen nach unten in eine Schlackewanne. Die durch den Schneidprozess entstehenden Funken und der Rauch werden durch den Druck des Plasmastrahles ebenfalls nach unten geblasen. Der Druck ist jedoch so groß, dass es zu einem gewissen Teil zu einer Aufwirbelung am Boden kommt. Staub, Rauch und Funken können somit wieder nach oben gelangen. Dem wirkt die Absaugvorrichtung entgegen. Die nach oben steigenden Feinstäube werden mittels Oberflächenabsaugung erfasst und in einer geschlossenen Filteranlage gesammelt.

Um effizient abzusaugen, können die Absaugbereiche des Schneidtisches mechanisch einzeln aktiviert werden. Das heißt, es wird dort abgesaugt, wo geschnitten wird. Damit wird eine geringere Absaugleistung benötigt und die Energiekosten minimal gehalten.

5.6.2 Plasmastromquelle

Als Stromquellen werden meist Gleichrichter, primär oder sekundär getaktete Umrichter eingesetzt. Je nach Verfahren lassen sich mit Schneidströmen bis 1.000 A werkstoffabhängig Materialdicken bis ca. 160 mm trennen. Die Arbeitsspannungen betragen hierbei bis zu 250 V, die Leerlaufspannungen bis 400 V.

Plasmastromquellen geringer Leistung und geringerer Einschaltdauer zum manuellen Schneiden werden heute meist als Inverter ausgeführt. Die damit verbundene Gewichtsreduzierung ist vorteilhaft beim ortsunabhängigen Einsatz.

Eine weitere Hauptaufgabe der Stromquelle ist es, den gesamten Ablauf von Strom- und Gasfluss zu steuern. In den neuen Plasmaanlagen steuern Mikroprozessoren diese programmierbaren Abläufe.

5.6.3 Plasmabrenner

Der Plasmaschneidbrenner bestimmt wesentlich die Leistungsfähigkeit einer Anlage und die erzielbare Schnittqualität. Er hat die Aufgabe, einen möglichst kontinuierlichen und geometrisch konstanten Plasmastrahl zu erzeugen und auf das Werkstück zu übertragen.

Ebenso zahlreich wie die möglichen Verfahrensvarianten sind die Varianten verfügbarer Schneidbrenner. Sie können nach:

- dem Einsatzzweck (manuelles oder maschinelles Schneiden),
- der Kühlart (Gaskühlung, direkte oder indirekte Wasserkühlung),
- dem Plasmagas (inert, nicht oxidierend, oxidierend),
- dem Kathodenwerkstoff (Wolfram, Hafnium, Zirkonium),
- der Kathodenform (Flächenelektrode, Spitzenelektrode) und
- dem Sekundärmedium (mit oder ohne Sekundärmedium)

eingeteilt werden.

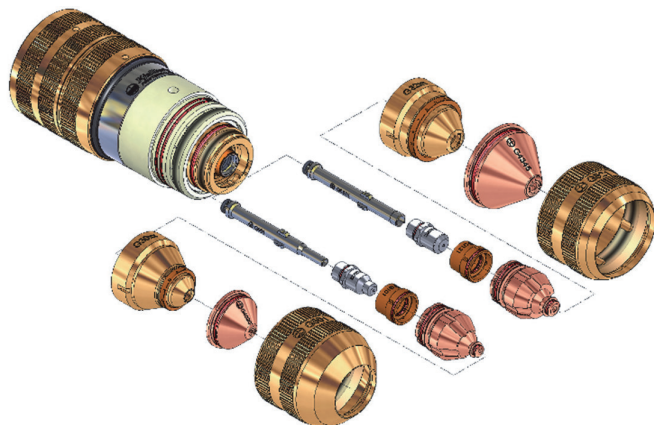


Abbildung 49: Plasmabrennerkopf (Plasmaschneiden mit erhöhter Einschnürwirkung) in Explosionsdarstellung

Ein Schneidbrenner zum konventionellen Plasmaschneiden besteht im Wesentlichen aus dem Brennerkopf mit dem Kühlsystem und der Gaszuführung sowie der Elektrode (Katode) und Düse. Beim Plasmaschneiden mit Sekundärmedium sind zusätzliche Düsen und Kappen für die Strahlerzeugung notwendig. Über ein Schlauchpaket ist der Schneidbrenner mit der Stromquelle verbunden.

Düsen und Elektroden sind Verschleißteile, deren Lebensdauer (Standzeit) vor allem durch Dauer und Höhe der thermischen Belastung, die Anzahl der Zündungen, die Stärke des Schneidstroms, die Schneiddauer, die Wahl des Plasmagases (inert oder oxidierend) und die Wärmeabführung bestimmt werden.

Für das manuelle Schneiden werden meist gasgekühlte Schneidbrenner kleiner Leistung und geringer Einschaltdauer (Abbildung 50 a) verwendet. An Plasmaschneidanlagen mittlerer und großer Leistung, die vorrangig zum maschinellen Schneiden genutzt werden, kommen aufgrund der hohen thermischen Belastung der Brennerverschleißteile, insbesondere der Elektroden und Düsen, Brenner mit indirekter oder direkter Wasserkühlung zum Einsatz (Abbildung 50 b und c).

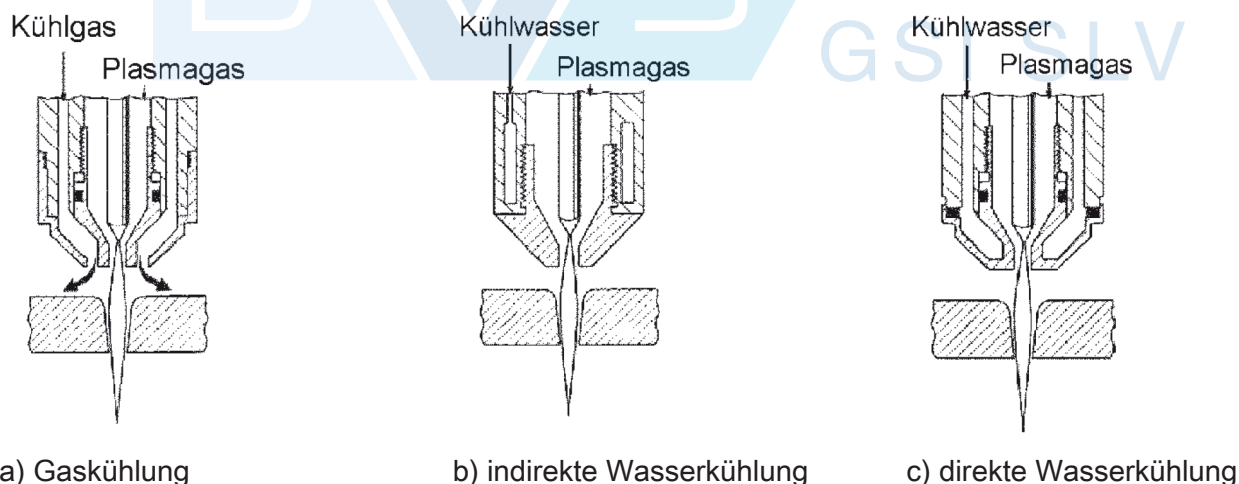


Abbildung 50: Kühlvarianten konventioneller Plasmaschneidbrenner

Je nach verwendetem Plasmagas werden verschiedene Elektrodenwerkstoffe verwendet. Bei Anwendung nicht oxidierender Gase (Argon, Wasserstoff, Stickstoff) kommt Wolfram als Werkstoff zum Einsatz. Zur Erhöhung der Lebensdauer werden Wolframspitzen vielfach in wassergekühlte Kupferhalter eingesetzt.

Bei Verwendung oxidierender Plasmagase oder -gemische werden anstelle von Wolfram Hafnium- oder Zirkonumeinsätze (in einen Kupferkörper) als Elektrode genutzt. Unter dem Einfluss von Sauerstoff und Stickstoff bilden diese Elemente hochschmelzende Oxide und Nitride, die die Elektrode vor einer kontinuierlichen Reaktion mit Sauerstoff und Stickstoff schützen und kontinuierlich verbraucht werden.

5.6.4 Abstandsregelung

Der richtige und konstante Abstand zwischen dem Plasmabrenner und dem Werkstück ist sehr entscheidend für die Qualität der Schnittergebnisse.

Um stets den optimalen Schneidabstand zu gewährleisten, werden neben den vom Brennschneiden her bekannten Prinzipien zusätzlich lichtbogenspannungsabhängige, dynamische Abstandsregelungen eingesetzt. Da die Plasmalichtbogenspannung von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird (u.a. Schneidstrom, Schneidgeschwindigkeit, Gasmenge), müssen diese beim Schneiden weitestgehend konstant gehalten werden, damit sich nur die Abstandsänderung auf die Spannung auswirkt. Wo dies nicht möglich ist, z.B. beim Schneiden von Ecken mit verminderter Schneidgeschwindigkeit oder Überfahren von Schnittfugen, ist die Abstandsregelung zeitweilig „einzufrieren“. An Fugen, Kanten und Ecken verlängert sich der Lichtbogen und die Lichtbogenspannung steigt an. Die automatische Fugenerkennung und Eckenfunktion schaltet die Abstandsregelung ab, wenn die vorhandene Lichtbogenspannung den einstellbaren Grenzwert überschreitet, und wird wieder aktiviert, wenn der Spannungswert auf seinem ursprünglichen Niveau ist.

Auch kapazitive Abstandsregelungen finden beim Plasmaschneiden Anwendung, Abbildung 51.

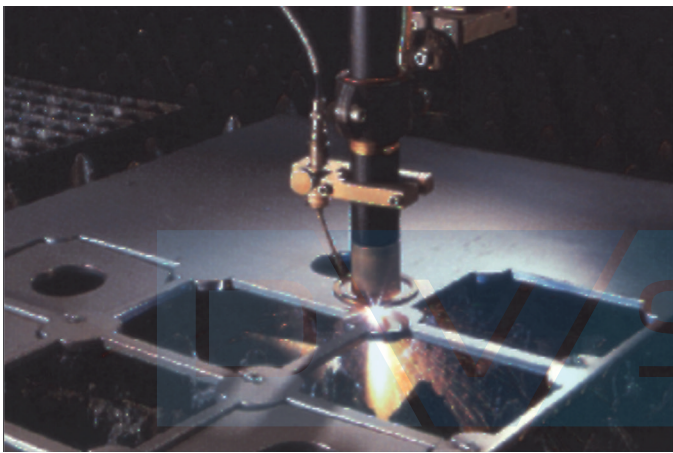


Abbildung 51: Trockenplasmaschneiden mit kapazitivem Abstandssensor

5.1 Schneidgeschwindigkeit in Relation zur Schnittqualität

Die Schneidgeschwindigkeit beim Plasmaschneiden ist von mehreren Faktoren abhängig: dem Werkstoff, der Werkstückdicke, der verfügbaren Lichtbogenleistung, dem verwendeten Schneidgas, der Gasmenge, der Schneiddüsengeometrie und der Plasmaschneidvariante.

Abbildung 52 zeigt Werte bezüglich Schneidgeschwindigkeit und Werkstückdicke im Zusammenhang mit Verfahrensvarianten und Werkstoffen.

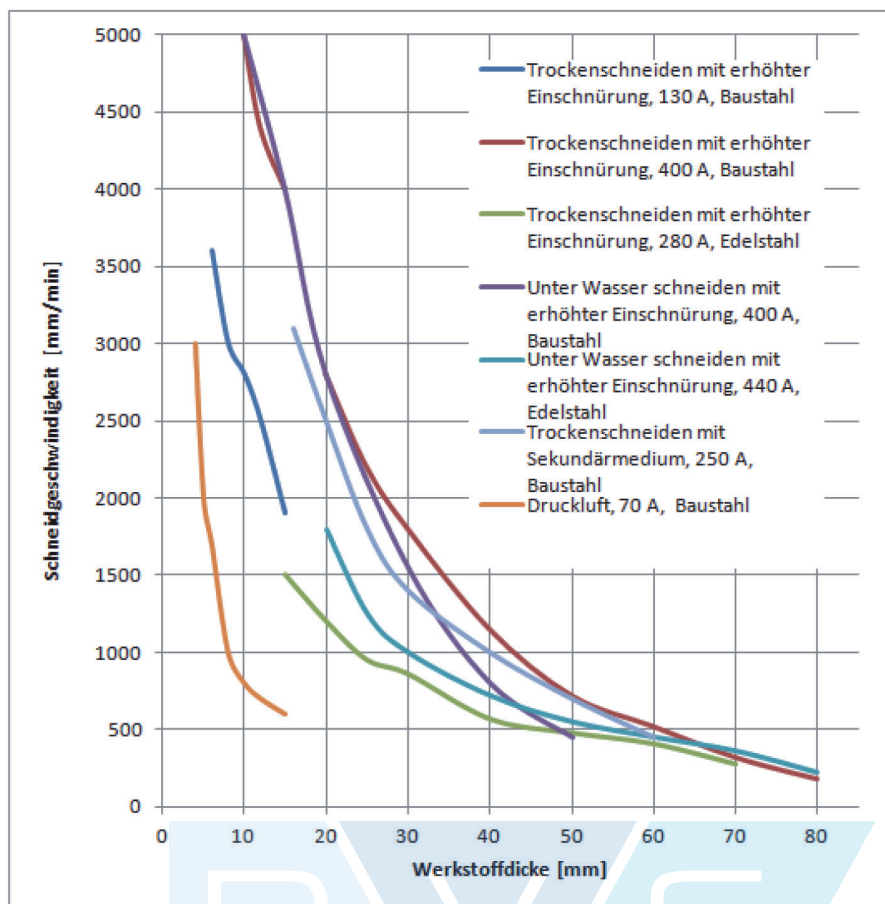


Abbildung 52: Beispielhafte Schneidgeschwindigkeiten verschiedener Plasmaschneidanlagen (Hersteller- und systemabhängig)

Grundsätzlich gilt, dass bei Steigerung der Schneidgeschwindigkeit, die Schnittqualität ab einem bestimmten Punkt abnimmt. Aus diesem Grund sind in den Schneidtabellen oft „Qualitäts-“ und „Trennschnittwerte“ sowie Werte für Innen- und Außenkonturen angegeben. Ist die höchste Qualität des Schnittergebnisses gefordert, wird mit den Qualitätswerten mit normaler Geschwindigkeit gearbeitet. Steht hingegen die Schnelligkeit des Schneidprozesses im Vordergrund und nicht die Qualität, werden die Trennwerte ausgewählt.

Im Vergleich zur höchsten Qualität ist die Schnittfläche bei den Schneidaten zum Trennen riefiger und es können größere Winkelabweichungen auftreten. Welche Kenngrößen zur Bestimmung der Qualität eines Plasmaschnittes herangezogen werden, fasst die DIN EN ISO 9013 zusammen. Neben der *Rechtwinkligkeits- und Neigungstoleranz* u wird auch die *gemittelte Rauhtiefe* Rz_5 zur Beurteilung genutzt. Optional können außerdem Aussagen zur *Anschmelzung*, zur *Bart- oder Tropfenbildung an der Unterkante* sowie zum *Rillennachlauf* getroffen werden.

5.2 Arbeitssicherheit

Wie bei allen Schweiß- und Schneidarbeiten müssen auch beim Plasmaschneiden Arbeitsschutzvorschriften beachtet werden. Um sowohl Bediener als auch Wartungspersonal zu schützen, gilt es den folgenden Kriterien besondere Beachtung zu schenken. Gefahrenpotenziale können ausgehen von:

- elektrischem Strom,
- Strahlung,
- Lärm,
- Rauch, Staub und Gasen,
- heißen Metallspritzern,
- und im weiteren Sinne auch von Umweltbelastungen.

Zur Wahrung der Sicherheit sind die entsprechenden Warn-, Gebots-, Verbots-, Rettungs- und Brandschutzzeichen zu beachten. Sie sind meist in Form von Schildern am Schneidsystem oder im Gebäude beispielsweise an Türen angebracht.

Elektrischer Strom

Beim Plasmaschneiden wird mit hohen Leerlauf- und Schneidspannungen gearbeitet. Das Gefahrpotenzial ist prinzipiell hoch. Der elektrische Strom kann im schlimmsten Fall den Körper durchströmen und massiven Schaden anrichten. In Verbindung mit den hohen Spannungen kann neben Muskelkrämpfen und Herzrhythmusstörungen auch ein Herzstillstand möglich sein. Aus diesem Grund müssen alle Schneidanlagen eine Reihe von Sicherheitsanforderungen erfüllen. Beispielsweise durch konstruktive Sicherheitsmaßnahmen in der Plasmaanlage die gewährleisten, dass die Anlage sich nicht einschalten lässt, wenn kein Brenner angeschlossen ist oder dieser nicht vollständig montiert ist. Im Handschneidbereich ist die Sicherheitsschaltung so geregelt, dass sich der Brenner nicht einschalten lässt, wenn die Schutzkappe nicht aufgeschraubt ist. Sie wirkt isolierend und soll verhindern, dass der Bediener zufällig die spannungsführende Düsenkappe berührt.

Zu beachten sind ebenfalls Gefahren, die durch elektromagnetische Strahlungen verursacht werden. Durch die kurzzeitige Hochspannungszündung entstehen elektromagnetische Felder, die zur Beeinflussung von medizinischen Geräten wie Herzschrittmachern, Hörgeräten oder Implantaten führen können.

Licht- und Wärmestrahlung

Beim Plasmaschneiden entstehen starke sichtbare und unsichtbare (ultraviolette) Strahlungen und Wärmestrahlung. Sie können zu Augenverletzungen und Hautverbrennungen führen. Daher sollte der Bediener unbedingt Arbeitsschutzkleidung (Kopfbedeckung, Handschuhe, feste Schuhe) und einen Blendschutz tragen. Der Arbeitsbereich ist so zu gestalten, dass die Reflexion und Übertragung von UV-Licht reduziert wird. Dies kann durch Trennwände und dunkle Oberflächen realisiert werden.

Lärm

Da das Gas mit hohem Druck und hoher Geschwindigkeit aus der Düsenöffnung austritt, entsteht ein hoher Lärmpegel in Form eines Pfeifens. Je nachdem wie die Geometrie der Düse beschaffen ist, welche Stromstärke genutzt wird und wie hoch der Schneiddruck durch das Gas ist, wird der Lärmpegel beeinflusst. Lärmmessungen beim (maschinellen) Trocken-Plasmaschneiden mit 1 m Abstand zum Lichtbogenmittelpunkt ergaben, dass der Schallpegel zwischen 90 db(A) und 122 db(A) liegt. Geringere Schallpegel können nur beim Handschneiden durch die niedrigen Ströme oder unter Wasser durch die zusätzliche Abschirmung erreicht werden.

Lärm ist als Gefahr einzuschätzen, denn er kann unter Umständen Gehörschäden verursachen. Aus diesem Grund sollte immer ein Gehörschutz in Form von bspw. Kapselgehörschützern oder Gehörschutzstöpseln getragen werden.

Rauch, Gase und Staub

Durch das Aufschmelzen und Wegblasen des Materials in Zusammenarbeit mit Reaktionen zwischen Material und Schneidgasen entstehen gesundheitsschädliche Gase, Rauch und Staub. Um gesundheitli-

che Folgen zu vermeiden, sollte stets für eine gute Belüftung und eine Absaugung gesorgt werden. Des Weiteren sollte darauf geachtet werden, dass die Oberflächen der Materialien nicht mit Lösungs- oder Entfettungsmitteln behandelt wurden, da sich diese unter dem UV-Licht des Lichtbogens zersetzen und giftige Gase bilden können.

Ein wichtiger Grenzwert ist der MAK-Wert (maximale Arbeitsplatzkonzentration), der nicht überschritten werden darf. Daher muss der Betreiber der Plasmaanlage in jedem Falle durch Messungen nachweisen, dass die Lüftungseinrichtungen wirksam arbeiten.

Metallspritzer

Heiße Metallspritzer stellen eine akute Brand- und Verletzungsgefahr dar. Sie entstehen beispielsweise beim Einstechen ins Metall. Aber auch beim Schneiden selbst lässt es sich nicht vermeiden, dass Schlacke, kleine Funken oder Spritzer durch die nähere Prozessumgebung fliegen. Daher ist es sehr wichtig, dass Schutzkleidung getragen wird (Sicherheitsschuhe, Lederschürze, Handschuhe). Weiterhin ist in der Nähe des Arbeitsplatzes ein Feuerlöscher anzubringen. Der wichtigste Punkt ist jedoch, dass innerhalb des Arbeitsbereiches keine brennbaren Stoffe oder Flüssigkeiten aufbewahrt werden.

Umwelt

Neben Leistungsfähigkeit und Produktivität rückt die Umwelt zunehmend in das Blickfeld der Anwender, denn auch durch Umweltbelastungen können Gefahren ausgehen. Dabei gilt es verschiedene Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Zum einen müssen die beim Schneiden entstandenen Stäube und Schlackereste gemäß gesetzlichen Richtlinien (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz) fachgerecht entsorgt werden. Des Weiteren sind die Plasmaanlagen selbst nach Außerbetriebnahme auf der Basis örtlich geltender Rechtsvorschriften durch ein qualifiziertes Entsorgungsunternehmen zu verwerten.

5.3 Sonderverfahren – Thermisches Abtragen durch Gasentladung

5.3.1 Lichtbogen-Sauerstoffschneiden

Bei diesem Verfahren, das auch unter dem Namen „Oxyarc-Schneiden“ bekannt ist, wird mittels einer hohlen, umhüllten Elektrode ein Lichtbogen zum Werkstück gezogen, durch dessen abgegebene Wärme der Werkstoff teilweise aufgeschmolzen wird. Der durch die Hohl Elektrode zugeführte Sauerstoff verbrennt das auf Zündtemperatur erhitzte Material und bläst es aus der Schnittfuge (Abbildung 53). Dieses Verfahren findet hauptsächlich Anwendung beim Verschrotten von Bauteilen aus un-, niedrig und hoch legiertem Stahl sowie verschiedenen Nichteisenmetallen.

5.3.2 Lichtbogen-Druckluftfugen

Dieses Verfahren ist auch unter dem Begriff „Arcair“ bekannt. Zwischen einer kupferummantelten Kohle-Grafitelektrode und dem Werkstück wird ein Lichtbogen gezogen (Abbildung 54). Dieser schmilzt den Werkstoff. Durch einen Druckluftstrahl (3 bis 10 bar) wird das schmelzflüssige Material aus der Fuge geblasen. Vorteilhaft gegenüber dem autogenen Brennfugen sind die höhere Arbeitsgeschwindigkeit und die Möglichkeit, auch Werkstoffe bearbeiten zu können, die nicht brennschneidgeeignet sind. Nachteilig sind die raue Oberfläche, die schlechte Erkennbarkeit der auszuarbeitenden Fehler sowie die hohe Geräusch- und Rauchentwicklung. Zu beachten ist, dass eine Aufkohlung der Werkstückkante möglich ist. Es kann auch zum Trennen (Verschrotten) von Bauteilen verwendet werden.

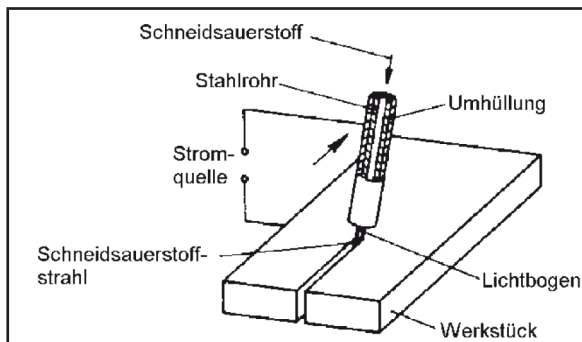


Abbildung 53: Lichtbogen-Sauerstoffschneiden

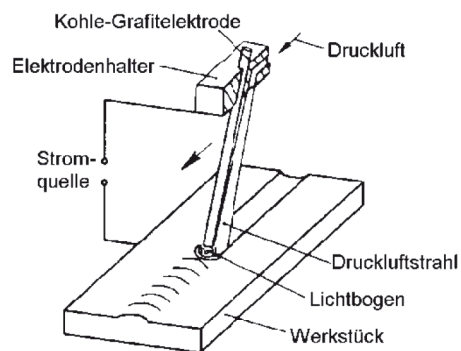


Abbildung 54: Lichtbogen-Druckluftfugen



6 Laserstrahlschneiden

Das Laserstrahlschneiden ist zum Trennen unterschiedlicher Werkstoffe geeignet. So können neben Stählen und Nichteisenmetallen u.a. auch Kunststoffe, Keramiken, Holz und Glas bearbeitet werden.

Mit den heute industriell verfügbaren Laserstrahlquellen können Werkstückdicken bis über 30 mm bei unlegierten Stählen und über 25 mm bei hoch legierten Stählen geschnitten werden. Verfahrensspezifische Merkmale sind die sehr hohe Schnittqualität, die geringe Schnittfugenbreite, die weitestgehend senkrechten und flankenparallelen Schnittkanten und die geringe Wärmeeinbringung, die das Laserstrahlschneiden zu einem Präzisionsschneidverfahren machen, mit dem ähnliche Maßtoleranzen eingehalten werden können wie mit mechanischen Bearbeitungsverfahren.

6.1 Vorgänge beim Laserstrahlbrennschneiden

1. Beim Laserstrahlbrennschneiden wird das zu schneidende Werkstück an der Oberfläche durch einen fokussierten Laserstrahl auf Zündtemperatur erwärmt.
2. Der Schneidsauerstoff verbrennt (oxidiert) den Werkstoff in der Schneidfuge.
3. Durch die kinetische Energie des Schneidsauerstoffstrahls wird die dünnflüssige Schlacke aus der Schneidfuge ausgetrieben und damit eine Werkstückkontur erzeugt.
4. Die Schneidfuge entsteht durch die Bewegung des Laserschneidkopfes über dem Werkstück und/oder durch die Bewegung des Werkstückes unter dem feststehenden Laserstrahl, Abbildung 55.

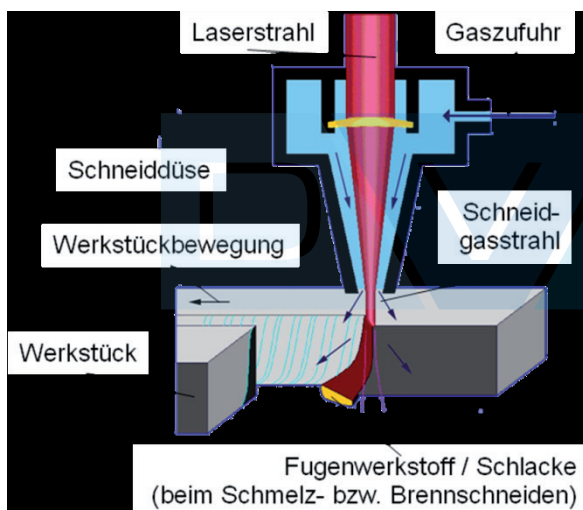


Abbildung 55: Laserstrahlbrennschneiden – schematische Darstellung des Verfahrensprinzips

6.2 Verfahrensvarianten

Entsprechend DIN 2310 Teil 6 unterscheidet man nach der vorherrschenden Art der Umwandlung des Werkstoffes die Varianten

- Laserstrahlbrennschneiden
- Laserstrahlschmelzschnitten
- Laserstrahlschmelzschnitten

6.2.1 Laserstrahlbrennschneiden

Beim Laserstrahlbrennschneiden wird das zu schneidende Werkstück an der Oberfläche durch einen fokussierten Laserstrahl auf Zündtemperatur erhitzt. Der Schneidsauerstoff verbrennt (oxidiert) den Werkstoff in der Schneidfuge. Durch die kinetische Energie des Schneidsauerstoffstrahls wird die dünnflüssige Schlacke ausgetrieben.

Die exotherme Reaktion des Sauerstoffs mit dem Werkstoff erzeugt ca. 40% der notwendigen Energie für den Schneidprozess. Hierdurch sind auch bei relativ geringen Laserleistungen hohe Schneidgeschwindigkeiten erzielbar. Das Schneiden unlegierter und niedrig legierter Stähle ist die häufigste Anwendung des Laserstrahlbrennschneidens. Es können aber auch hoch legierte Stähle geschnitten werden, da im Vergleich zum autogenen Brennschneiden durch die höhere Temperatur hier eine dünnflüssigere Schlacke entsteht.

6.2.2 Laserstrahlschmelzschnneiden

Beim Laserstrahlschmelzschnneiden wird der zu schneidende Werkstoff durch einen fokussierten Laserstrahl hoher Intensität über der gesamten Werkstückdicke aufgeschmolzen und durch einen Gasstrahl hoher kinetischer Energie aus der Schneidfuge ausgetrieben (Hochdruckschneiden). Als Schneidgase werden Stickstoff, Argon oder Druckluft verwendet. Im Gegensatz zum Laserstrahlbrennschneiden, bei dem das Schneidgas durch exotherme Reaktion den Schneidprozess unterstützt, muss hier die gesamte Energie zum Aufschmelzen des Werkstoffes in der Schneidfuge durch den Laserstrahl aufgebracht werden. Dadurch liegt die maximale Schneidgeschwindigkeit bei mittleren und größeren Blechdicken ($\geq 4\text{ mm}$) unterhalb der des Laserstrahlbrennschneidprozesses. Dünne Bleche unterhalb von 3 mm Dicke können mit dem Hochdruckverfahren schneller bearbeitet werden.

6.2.3 Laserstrahlschmelzschnneiden

Beim Laserstrahlschmelzschnneiden wird der zu schneidende Werkstoff durch einen fokussierten Laserstrahl hoher Intensität über der gesamten Werkstückdicke verdampft. Das verdampfte Material wird durch Expansion und einen Gasstrahl hoher kinetischer Energie aus der Schneidfuge ausgeblasen. Als Schneidgase werden Stickstoff, Argon oder Helium verwendet. Wie beim Laserstrahlschmelzschnneiden muss auch hier die gesamte Energie zum überwiegenden Verdampfen des Werkstoffes in der Schneidfuge durch den Laserstrahl aufgebracht werden. Ein weiteres Verfahren, das auf den zunehmend kleineren Dimensionen des Laserstrahls im Fokus und damit höheren Intensitäten des Strahls basiert, das sogenannte Remote-Schneiden, findet zunehmend Einsatz in der industriellen Praxis. Dabei wird der Laserstrahl eines Festkörperlaser über schnelle Spiegelablenksysteme (sog. Galvoköpfe) mehrfach und mit hoher Geschwindigkeit (mehrere tausend mm/sec) über die Werkstückkontur geführt. Schneiddüsen und -gase kommen hier nicht als unterstützendes Schneidmedium zum Einsatz. Die Trennfuge wird über das Verdampfen des Werkstoffes erzeugt. Dieses Verfahren liefert ebenfalls gratfreie Schnittqualitäten und kommt gegenwärtig ausschließlich bei Dünnblechen $< 3\text{ mm}$ zum Einsatz..

6.3 Schneidgase

Für einen korrekten Ablauf der einzelnen Verfahrensvarianten des Laserstrahlschneidens ist die Verwendung eines geeigneten Schneidgases notwendig. Das Schneidgas treibt Schlacken, Schmelzen oder Metaldämpfe aus der Schnittfuge aus, unterstützt bei bestimmten Werkstoffen den Schneidvorgang durch exotherme Reaktion mit diesem, kühlt die Schnittkanten, schützt die Fokussieroptik vor Rauchen und Schneidpartikeln und den Werkstoff vor unerwünschten Reaktionen mit dem Sauerstoff aus der Umgebungsluft. Die den Trennprozess unterstützenden Schneidgase sollten eine Mindestqualität von 99,95% betragen. Üblicherweise werden die Schneidgase aus Flüssiggas-Tankanlagen bereitgestellt.

Sauerstoff

Sauerstoff wird beim Laserstrahlbrennschneiden eingesetzt. Durch die exotherme Reaktion des Sauerstoffs mit dem Werkstoff wird dem Schneidprozess zusätzliche Energie zur Energie des Laserstrahls zugeführt. Das Material der Schneidfuge wird hierbei verbrannt und durch den Sauerstoffstrahl ausgetrieben. Durch die energiereiche Verbrennungsreaktion, können in Bereichen der Werkstücke, die durch scharfkantige Konturelemente gekennzeichnet sind, Unregelmäßigkeiten auftreten, die beim Schneiden mit Stickstoff nicht auftreten. Dieses ist insbesondere bei größeren Blechdicken der Fall. Daher sollten scharfkantige Werkstückkanten mit dem Radius $r = 0$ durch kleine Radien $r \geq 0,5\text{ mm}$ ersetzt werden.

Stickstoff

Stickstoff wird zum Schneiden von hoch legierten Stählen und NE-Metallen verwendet. Eine hohe Reinheit ist notwendig, um Anlauffarben (dünne Oxidschichten) an der Schnittunterkante zu vermeiden. Zum

Austreiben der Schmelze wird mit Stickstoffdrücken von 8 bis 25 bar gearbeitet (Hochdruckschneiden), um grat- und bartfreie Schnitte zu erzielen. Durch die Verwendung von Stickstoff bleiben die Schnittkanten oxidfrei und können ohne Nacharbeit weiter verarbeitet werden (Oberflächenveredelungen).

Argon

Argon wird bevorzugt zum Schneiden von Titan und Titanlegierungen eingesetzt.

6.4 Werkstoffe

Un- und niedrig legierter Stahl

Zum Laserstrahlschneiden von un- und niedrig legiertem Stahl ist das Laserstrahlbrennschneiden mit CO₂-Laser die noch am häufigsten angewandte Methode. Mit einer Laserleistung von 3 kW können Bleche bis zu 20 mm wirtschaftlich geschnitten werden.

Zum Schneiden von Blechen zwischen 12 und 30 mm Dicke sind eine konstante Laserleistung oberhalb von 5 kW und eine gute Strahlqualität notwendig.

Ein geringer und stabiler Schneidsauerstoffdruck (ca. 0,5 bis 1 bar) ist erforderlich, um Kolkungen an der Schnittfläche zu vermeiden. Zu beachten ist, dass sich eine dünne Oxidschicht auf der Schnittfläche bildet, die insbesondere bei mittleren und größeren Blechdicken (Oxidschicht nimmt mit der Blechdicke zu) bei manchen Verwendungen stören kann (nachträgliche Oberflächenveredelungen). Unter Umständen muss die Oxidschicht vor einer weiteren Verarbeitung entfernt werden.

Durch den Einsatz des Hochdruck-Stickstoffschneidens können mit geringeren Schneidgeschwindigkeiten oxidfreie Schnittflächen hergestellt werden.

Beschichteter Stahl

Beschichtete Blechoberflächen (Primer, Anstriche) können bei Verwendung von Sauerstoff als Schneidgas zu spontanen oder kontinuierlichen Grat- oder Schlackebildung führen. Die Schnittqualität nimmt mit zunehmenden und variierenden Dicken der Oberflächenbeschichtung ab. Durch den Einsatz des Hochdruck-Stickstoffschneidens, ist an dünnen bis mittleren Werkstückdicken aus beschichteten Blechen eine gute bis zufriedenstellende Schnittqualität erzielbar.

Hoch legierter Stahl

In der industriellen Praxis wird primär Stickstoff zum Schneiden hoch legierter Stähle verwendet.

Saubere und oxidfreie Schnittflächen sind beim Schneiden mit inerten Gasen, wie Stickstoff oder Argon zu erzielen. In der Praxis wird meist Stickstoff verwendet, wobei mit Gasdrücken von 10 bis 25 bar gearbeitet wird. Die Reinheit des Stickstoffs auf die erzielbare Schneidgeschwindigkeit ist gering, jedoch werden durch Verunreinigungen mit Sauerstoff-Verfärbungen der Schnittkanten verursacht, die die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes beeinträchtigt.

Das Schneiden von hoch legierten Stählen mit Sauerstoff hat keine industriell relevante Bedeutung mehr.

Aluminium und Aluminiumlegierungen

Das CO₂-Laserschneiden von Aluminium und Aluminiumlegierungen wird durch große Wärmeleitfähigkeit und das hohe Reflexionsvermögen für den CO₂-Laserstrahl erschwert. Hohe Laserleistung und sehr gute Strahlqualität verbessern die Schneidbarkeit. Beim Laserstrahlbrennschneiden ergeben sich eine raue Schnittfläche sowie starke Bartbildung. Das Hochdruck-Schneiden mit Stickstoff bei Schneidgasdrücken von 10 – 25 bar liefert grat- und bartfreie Schnittqualitäten. Die Schneidgeschwindigkeit an Aluminiumwerkstoffen nimmt überproportional mit der Werkstückdicke ab. Sowohl bei Aluminiumlegierungen als auch bei Buntmetallen wird dem Festkörperlaser, mit seiner kürzeren Wellenlänge und damit besseren Absorption der Strahlung für diese Werkstoffe, eine größere Bedeutung zukommen.

Kupfer- und Kupferlegierungen

Kupfer hat ein sehr hohes Reflexionsvermögen für CO₂-Laserstrahlen. Auch die hohe Schmelztemperatur und thermische Leitfähigkeit beeinflussen die Schneideignung von Kupfer und seinen Legierungen (Messing, Bronze) negativ. Bei Kupfer wird häufig Sauerstoff als Schneidgas eingesetzt. Messing und Bronze können auch mit dem Hochdruckverfahren (N₂) gratfrei bearbeitet werden. Trotz hoher Laserleistung ist das Schneiden auf kleinere Blechdicken beschränkt (Blechdicken bis ca. 4 mm). Festkörperlaser sind für diese Aufgabenstellung besser geeignet.

Titan

Sauerstoff und Stickstoff sind zum Schneiden von Titan ungeeignet, da es durch die Bildung von spröden Oxiden bzw. Nitriden zu feinen Anrissen auf der Schnittfläche kommt. Daher wird bevorzugt das Hochdruckschneiden mit hochreinem Argon eingesetzt.

Nicht metallische Werkstoffe

Auch nicht metallische Werkstoffe, wie Holz, Glas, Keramik, Gummi und Kunststoffe können mit dem Laserstrahlschneiden getrennt werden. Bei diesen Materialien ist das Absorptionsverhalten für die Strahlen des CO₂-Lasers mit der Wellenlänge von 10,6 µm besonders gut. Festkörperlaser der Wellenlänge von 1 µm sind hierfür nicht oder nicht gut geeignet. Als Schneidgas wird hauptsächlich Druckluft eingesetzt. Wenn leicht entzündliche Materialien, wie Textilien, zu schneiden sind, wird auch Stickstoff verwendet. Da beim Schneiden von einigen Werkstoffen, z.B. synthetischen Textilien, giftige Dämpfe oder Stäube entstehen können, müssen die verwendeten Schneidanlagen über leistungsstarke Absaug- und Filtereinrichtungen verfügen.

6.5 Schneidgeschwindigkeit

Die mögliche Schneidgeschwindigkeit ist beim Laserstrahlschneiden vor allem vom Werkstoff des Werkstücks, seiner Dicke und der Verfahrensart (Schmelz-/ Brennschneiden) abhängig. Daneben spielen die eingesetzte Laserleistung, der Intensitätsverteilung im Strahl, die Brennweite der Fokussieroptik (Brennfleckdimensionen) eine wichtige Funktion.

Die Diagramme in Abbildung 60 stellen eine Orientierungshilfe bezüglich erreichbarer Schneidgeschwindigkeiten beim Einsatz von CO₂-Lasern unterschiedlicher Leistungen zum Schneiden verschiedener Werkstoffe (links). Das Diagramm rechts zeigt den Zusammenhang zwischen Blechdicke und erreichbarer Schneidgeschwindigkeit im Vergleich der beiden Lasertypen CO₂- und Faserlaser in der Leistungsklasse 2 kW.

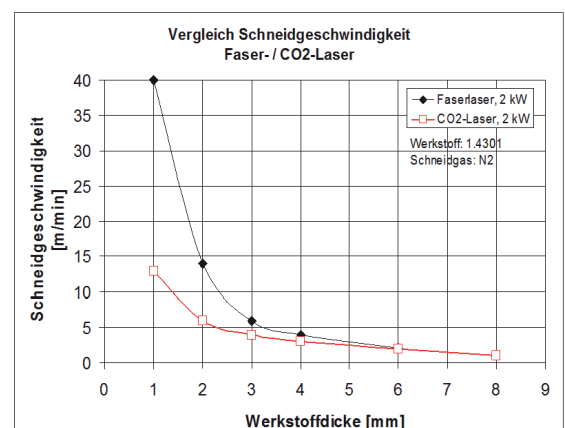
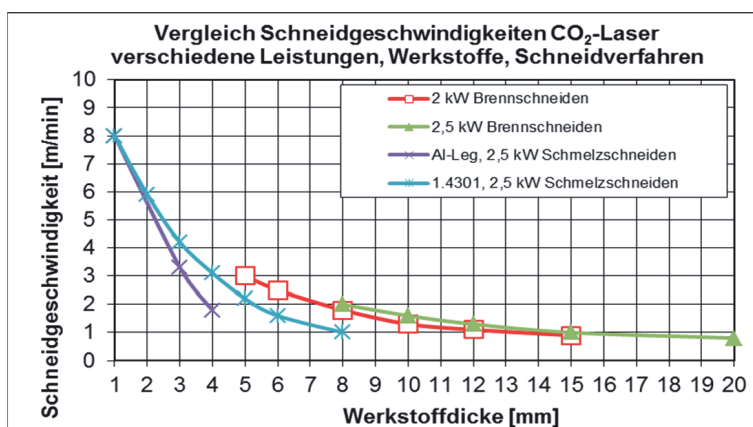


Abbildung 56: Links: Schneidgeschwindigkeiten beim Laserstrahlbrennschneiden an Baustahl und Laserstrahlschmelzschnitten an hoch legiertem Stahl und Al-Mg3 (CO₂-Laser) Rechts: Schneidgeschwindigkeiten im Vergleich zwischen CO₂- und Faserlaser

6.6 Führungssysteme zum Laserstrahlschneiden

Zum Laserstrahlschneiden stehen Handhabungssysteme zum 2- und 3-dimensionalen Schneiden zur Verfügung.

Die häufigste Anwendung ist das Schneiden von 2 bis 2,5 dimensional Blechwerkstücken. Hier kommen verschiedene Bauarten von Maschinen zum Einsatz, die sich dadurch unterscheiden, welche der Komponenten Laserstrahlquelle, Laserstrahl und Werkstück bewegt werden. Beim Schneiden standardformatiger Bleche bis 1,5 x 3 m hat sich die Variante der „fliegenden Optik“ in zwei Achsen (stationärer Laser, stationäres Werkstück, geführter Laserstrahl, plus Z-Achse) bewährt. Zum Schneiden großer, langer Bleche wird die Laserstrahlquelle häufig in Längsrichtung mitgefahren und der Laserstrahl nur in Querrichtung bewegt. Zum Schneiden von V- und Y-Fugen stehen Laserdrehköpfe zur Verfügung.

Zum CO₂-Laserstrahlschneiden räumlicher Konturen werden 5-Achsen-Portalsysteme oder Gelenkarmroboter mit integrierter Strahlführung verwendet. Aufgrund der einfacheren Strahlführung über Lichtleitfasern wird in diesem Bereich zunehmend auch der Festkörperlaser eingesetzt.

Die Abbildungen 57 bis 59 zeigen eine Großblech-Laserstrahlschneidanlage, einen unter 45° angesetzten Brennerkopf für einen Fasenanschnitt und ein Bauteil mit Fasenanschnitt als Nahtvorbereitung für das nachfolgende Schweißen.



Abbildung 57: Großblech-Laserstrahlschneidanlage



Abbildung 58: Prozessansicht auf das Laserstrahlbrennschneiden unter 45°

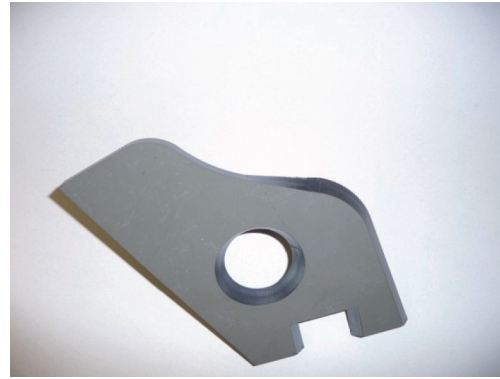


Abbildung 59: Werkstück mit angeschnittener Fase

7 Wasserstrahlschneiden

7.1 Verfahrensprinzip

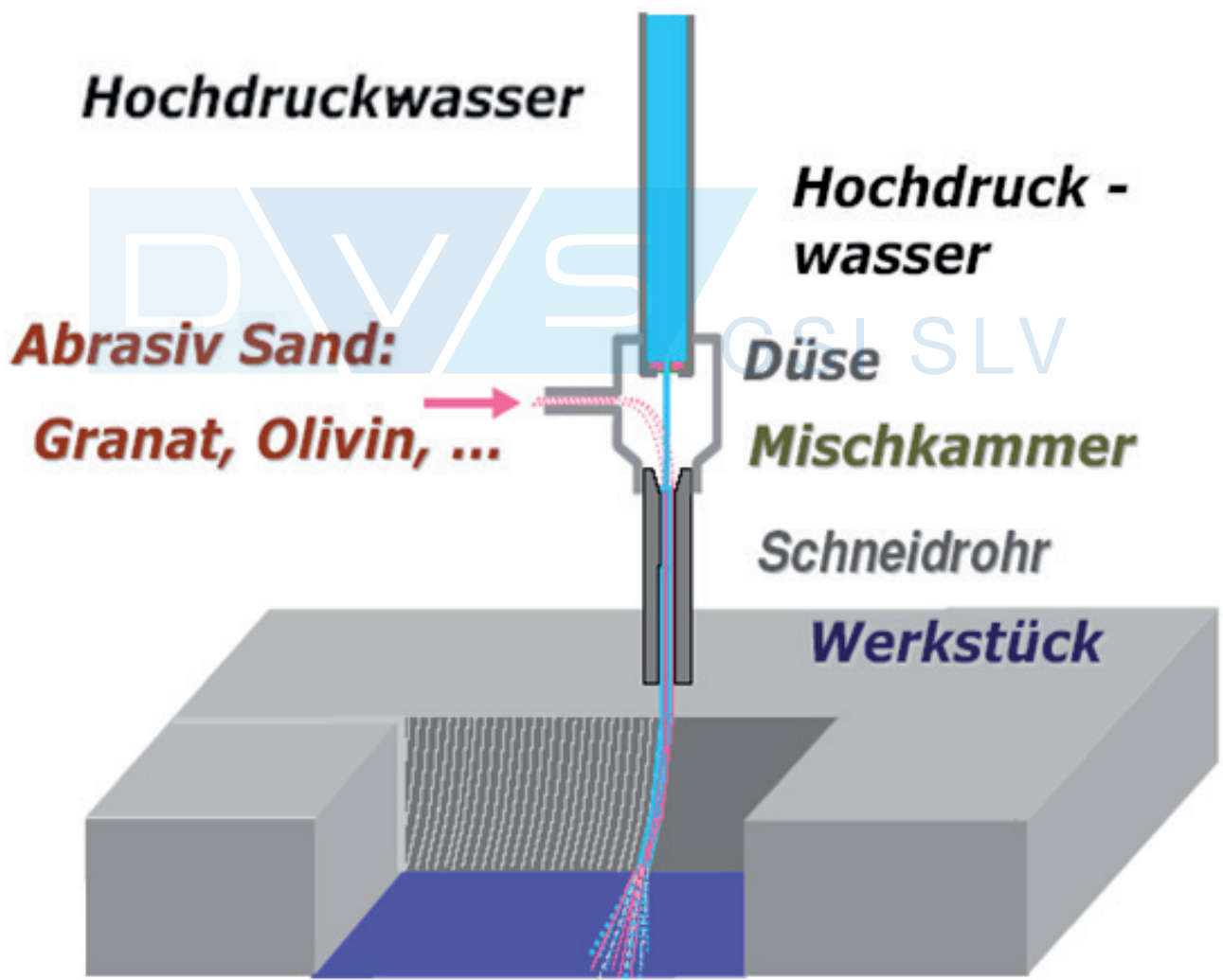


Abbildung 60: Prinzip-Skizze Wasserstrahlschneiden

Beim Wasserstrahlschneiden wird durch eine Hochdruckpumpe gefiltertes Wasser bei einem Druck von bis zu 6000 bar komprimiert. Über ein Rohrleitungssystem wird das Wasser zum Schneidkopf geführt und in diesem über eine Schneiddüse auf das zu trennende Werkstück gelenkt. Die Austrittsgeschwindigkeit des Wasserstrahls beträgt bis zu 1000 m/s und erzeugt durch seine hohe kinetische Energie die Schnitt-

fuge. Mit diesem Verfahren werden u.a. Kunst- und Schaumstoffe, Gummi, Holz, auch Metalle bis hin zum Saphir getrennt. Genauigkeiten besser als 1/10 mm sind jedoch mit hochwertigen 3-Achsen-Anlagen erreichbar. Neben dem Trennen wird das Wasserstrahlschneiden auch zum Entgraten verwendet. Bedingt durch die hohe Austrittsgeschwindigkeit des Wassers entsteht beim Schneiden ein hoher Schalldruck bis zu 120 dB. Durch Schneiden unter Wasser und durch Umgebung der Düse mit einer Wasserglocke, kann die Schallemission bedeutend reduziert werden.

Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens kann dadurch erheblich gesteigert werden, dass dem Wasserstrahl Abrasivmittel (z.B. Granatsand) zugeführt werden. Diese werden einem Vorratsbehälter entnommen und in der Mischkammer dem hoch beschleunigten, aus Tropfen bestehenden Wasserstrahl zugesetzt. Das aus Luft, Wasser und Abrasivmittel bestehende Gemisch wird durch eine Hartmetalldüse fokussiert und bewirkt am Werkstück einen Mikrozerspanungsprozess. Der Wasserstrahl selbst trägt hierbei nur minimal zum Materialabtrag bei.

Als Vorteile des Wasserstrahlschneidens sind u.a. zu nennen:

- nahezu alle Materialien sind schneidbar (un- und hoch legierte Stähle, Nichteisenmetalle, Kunststoffe, Schaumstoffe, Glas, Gummi, Naturstein, Werkstoffverbunde u.a.)
- geringe Schnittfugenbreite
- rechtwinklige Schnittkanten
- keine thermische Beeinflussung der Schnittkanten, keine Wärmeeinflusszone, keine Oxidschicht an den Schnittkanten
- geringe Umweltbelastung

Schnitte an rostfreiem Stahl und Granit zeigt Abbildung 61.

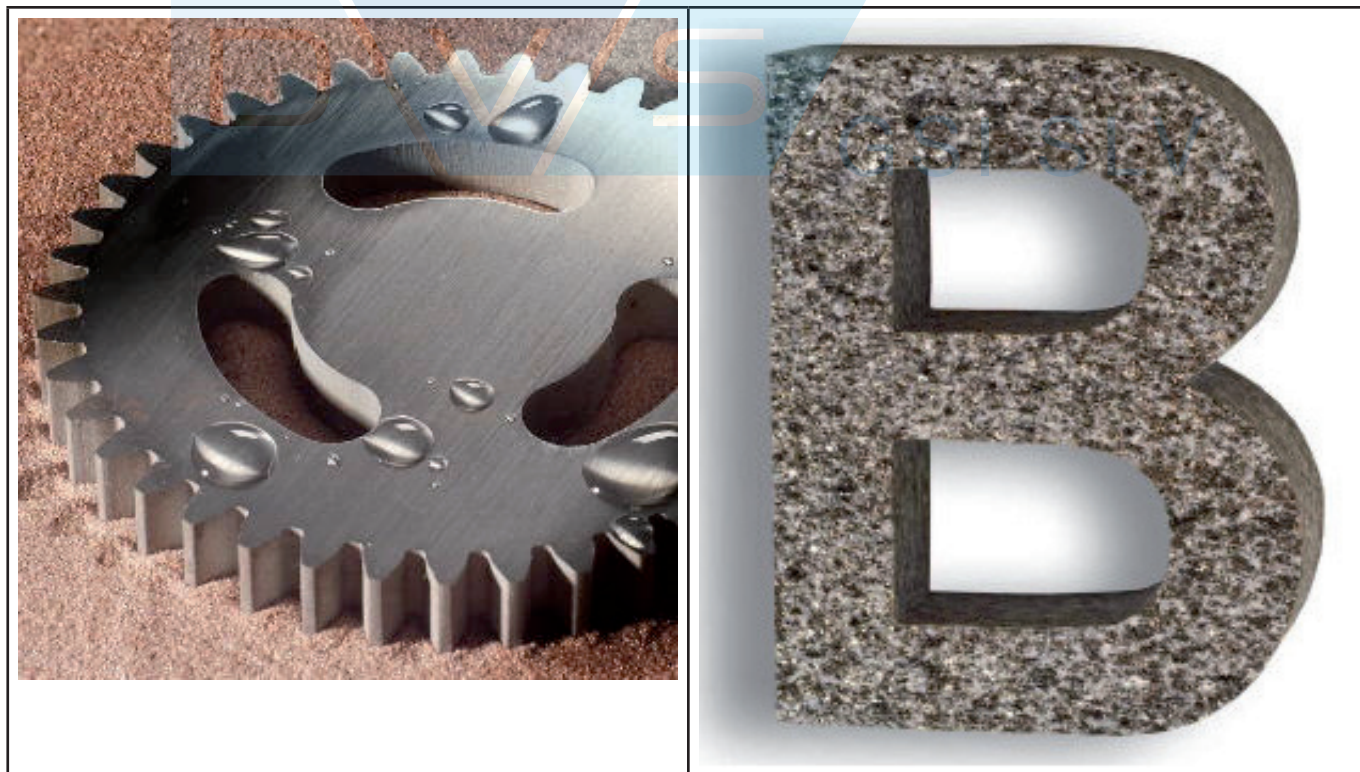


Abbildung 61: Schnitt an rostfreiem Stahl (10 mm) und Granit (40) mm mit dem Wasserstrahlschneidverfahren (Werkbild Fa. Hohl)

In der Tabelle 5 sind einige Richtwerte für das Schneiden verschiedener Werkstoffe mit dem Wasserstrahlschneiden zusammengestellt.

Tabelle 5: Richtwerte beim Wasserstrahlschneiden (links ohne, rechts mit Abrasivmittel)

Werkstoff	Werkstückdicke [mm]	Schneidgeschwindigkeit [mm/min]	Werkstoff	Werkstückdicke [mm]	Schneidgeschwindigkeit [mm/min]
Gummi	2	25000	Hoch legierter Stahl	10	230
	10	10000		40	50
	20	2000		100	15
Kunststoffe (PU)	2	20000	Titan	10	270
	5	6000		40	55
	10	2000		100	20
Kunststoffe (PTFE, PVC)	2	6000	Aluminium	10	700
	5	2000		40	140
	10	800		100	35
Sperrholz	2	25000	Marmor	10	800
	5	4000		40	150
	10	500		120	40
Schaumstoff	10	25000	Glas	10	600
	100	5000		40	120



7.2 Literatur

- DIN EN ISO 9013: Einteilung thermischer Schnitte - Geometrische Produktspezifikation und Qualität
- DIN 32516: Thermische Schneidbarkeit metallischer Werkstoffe
- DIN 2310-6: Thermisches Schneiden – Einteilung, Prozesse
- DIN 32510: Brennbohren mit Sauerstofflanzen in mineralische Werkstoffe - Verfahrensgrundlagen, Temperaturen, Mindestausrüstung
- DIN EN ISO 17658: Schweißen - Unregelmäßigkeiten an Brennschnitten, Laserstrahlschnitten und Plasmaschnitten - Terminologie
- VDI/DVS 6005: Lüftungstechnik beim Schweißen und bei den verwandten Verfahren
- DIN EN 60825-1: Sicherheit von Laser-Einrichtungen
- Merkblatt DVS 2101 Umgang mit Sauerstoffkernlanzen
- Merkblatt DVS 2102 Unregelmäßigkeiten und deren Ursachen beim autogenen Brennschneiden von un- und niedrig legierten Stählen
- Merkblatt DVS 2103 Plasmaschneiden von un- und niedrig legierten Stählen
- Merkblatt DVS 2107 Plasmaschneiden metallischer Werkstoffe
- Merkblatt DVS 3206 Unregelmäßigkeiten und deren Ursachen beim Laserschneiden von metallischen Werkstoffen
- Richtlinie DVS 1185: DVS Lehrgang - Fachkraft zum thermischen Schneiden



8 Testfragen

(1) Welche Werkstoffeigenschaften sind für die Brennschneideignung ausschlaggebend?

- ☐ Streckgrenze
- ☐ chemische Zusammensetzung
- ☐ Wärmeleitfähigkeit
- ☐ elektrische Leitfähigkeit
- ☐ Verbrennbarkeit im Sauerstoff

(2) Welche der nachfolgend aufgeführten Werkstoffe sind brennschneidgeeignet?

- ☐ Aluminium
- ☐ unlegierter Stahl
- ☐ hoch legierter Stahl
- ☐ Kupfer

(3) Welche Unterscheidungsmerkmale gibt es bei Brennschneiddüsen für Acetylen und langsam verbrennende Gasen (z.B. Propan)?

- ☐ Aufschrift auf der Düse
- ☐ Propandüsen sind zweiteilig.
- ☐ Propandüsen gibt es nur bei Druckbrennern.
- ☐ Es sind keine Unterschiede vorhanden.

(4) Welche Definitionen zum Brennschneiden sind korrekt?

- ☐ Beim Brennschneiden verdampft der Werkstoff, da die Temperatur oberhalb 3200°C ist.
- ☐ Beim Brennschneiden verbrennt der Werkstoff im Sauerstoffstrahl.
- ☐ Der expandierende Sauerstoff trennt den Werkstoff.
- ☐ Beim Brennschneiden wird in der Regel ein Heizgas eingesetzt.
- ☐ Bevor der Werkstoff Stahl zündet, befindet er sich in der Schmelzphase .

(5) Welche Voraussetzung zum Brennschneiden sind richtig?

- ☐ $T_s(\text{Oxide}) < T_s(\text{Werkstoff}) < T(\text{Zünd})$
- ☐ $T_s(\text{Werkstoff}) < T(\text{Zünd}) < T_s(\text{Oxide})$
- ☐ $T(\text{Zünd}) < T_s(\text{Werkstoff}) < T_s(\text{Oxide})$
- ☐ $T_s(\text{Werkstoff}) < T_s(\text{Oxide}) < T(\text{Zünd})$
- ☐ $T_s(\text{Oxid}) < T(\text{Zünd}) < T_s(\text{Werkstoff})$

(6) Der Vorgang des Lochstechens

- ☐ Beschreibt die Herstellung der unteren Öffnung der Schneidsauerstoffdüse.
- ☐ Beschreibt das schrittweise Zertrennen des Grundwerkstoffes.
- ☐ Wird beim heutigen autogenen Brennschneiden nicht mehr benötigt.
- ☐ Ist eine Voraussetzung, wenn mit einem Trennschnitt innerhalb des Bauteils begonnen wird.
- ☐ Findet nur beim Einsatz des Laserschneidens statt.

(7) Mit welchen Drücken wird beim Wasserstrahlschneiden gearbeitet?

- ☐ 40 bar
- ☐ 400 bar
- ☐ 4000 bar
- ☐ 40000 bar

(8) Welche Werkstoffe können mit dem Wasserstrahlschneiden getrennt werden?

- ☐ Schaumstoff
- ☐ Stähle
- ☐ Leder
- ☐ Holz
- ☐ Aluminiumwerkstoffe

(9) Mit dem Plasmaschneiden werden geschnitten:

- ☐ Aluminiumwerkstoffe
- ☐ un- und niedriglegierte Stähle
- ☐ keramische Werkstoffe
- ☐ rostfreie Stähle
- ☐ nickelbasis Werkstoffe

(10) Folgende Arten von Laserstrahlquellen eignen sich besonders zum Trennen von metallischen Werkstoffen:

- ☐ Gaslaser (z.B. CO₂-Laser)
- ☐ Halbleiterlaser (z.B. Diodenlaser)
- ☐ Festkörperlaser (z.B. Faserlaser)
- ☐ Flüssigkeitslaser (z.B. Dye-Laser)

(11) Zum dreidimensionalen Schneiden mit Laserstrahlung sind Anlagen mit CO₂-Lasern besser geeignet, denn durch die längere Wellenlänge der Strahlung des CO₂-Lasers kann der Strahl besonders einfach mithilfe von dünnen Fasern geleitet werden.

- ☐ richtig
- ☐ falsch (Die CO₂-Strahlung kann gegenwärtig industriell überhaupt nicht mithilfe von Fasern geleitet werden. Dies liegt an der längeren Wellenlänge ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) dieser Strahlung und der damit verbundenen starken Absorption für die bisher bekannten Faserwerkstoffe). Die Strahlführung über Fasern eignet sich besonders für Festkörperlaser mit der kürzeren Wellenlänge um $1 \mu\text{m}$.

(12) Zum Laserstrahlbrennschneiden werden in der Schneiddüse die folgenden Gase bzw. Gasgemische aufbereitet und dem Schneidprozess zur Verfügung gestellt:

- ☐ Sauerstoff mit einem kleinem Anteil an Luft (dabei übernimmt die Luft die Aufgabe eines zusätzlichen Kühlmediums, um den auftretenden Verzug der Werkstücke zu vermeiden).
- ☐ Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch. Dabei stellt der reine Sauerstoff zusätzliche Energie zum Verbrennungsvorgang zur Verfügung. Der Stickstoff sorgt für das Ausblasen der flüssigen Schmelze aus der Trennfuge.
- ☐ Sauerstoff. Der Sauerstoff hoher Reinheit (3.5) stellt dem Prozess zusätzliche Verbrennungsenergie zur Verfügung und darf nicht mit anderen, z.B. reaktionsträgen Gasen verunreinigt werden.
- ☐ Stickstoff. Der stark fokussierte Laserstrahl liefert ausreichend Energie für den Verbrennungsprozess. Der mit hohem Druck aus der Schneiddüse austretende Stickstoff bläst die zähflüssige Schlacke aus der Schneidfuge heraus.

(13) Die erzielbaren Schneidgeschwindigkeiten im Dünnblechbereich bis 4 mm Dicke, der beiden Lasertypen CO₂- und Faserlaser sind nahezu gleich. Der Faserlaser verfügt über einen besseren Wirkungsgrad als der CO₂-Laser, deshalb eignet er sich besser zum Schneiden von Blechwerkstoffen im Dünnblechbereich.

- ☐ richtig
- ☐ falsch

(14) Das Laserstrahlschneiden ist gegenwärtig für das Fertigschneiden von Schweißnahtfugen ungeeignet. Dies liegt insbesondere an den hohen Investitionskosten für die Laseranlagen und der noch mangelnden Schnittqualität in diesem Bereich der Blechbearbeitung mit Laserstrahlung.

- ☐ falsch (Durch das Fertigschneiden der Schweißfugen stellt das Laserstrahlschneiden eine sehr gute und wirtschaftliche Alternative (insbesondere bei großen Werkstücken) zum vorbereitenden Schneiden und dem nachträglichen Fugenvorbereiten durch z.B. mechanische Verfahren dar. Das Laserstrahlschrägschneiden kann mehrere Fertigungsschritte bei der Fugenvorbereitung, ersetzen.)
- ☐ richtig