

Hans J. Fahrenwaldt | Volkmar Schuler

Praxiswissen Schweißtechnik

Hans J. Fahrenwaldt | Volkmar Schuler

Praxiswissen Schweißtechnik

Werkstoffe, Prozesse, Fertigung

3., aktualisierte Auflage

Mit 560 Abbildungen und 141 Tabellen

Unter Mitarbeit von Herbert Wittel und Jürgen Twrdek

PRAXIS



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

1. Auflage 2003
- 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2006
- 3., aktualisierte Auflage 2009

Alle Rechte vorbehalten

© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lektorat: Thomas Zipsner | Imke Zander

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Technische Redaktion: Stefan Kreickenbaum, Wiesbaden
Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0382-5

Vorwort

Im Maschinen- und Apparatebau wie auch im Bauwesen oder im Schiffbau ist das Schweißen nach wie vor das dominierende Fügeverfahren. Die Tendenz zum Leichtbau führte in den vergangenen Jahren verstärkt zur Entwicklung neuer, oft nicht schweißgeeigneter Werkstoffe, für die neue Verfahren zum Verbinden erforderlich wurden. Auch traten manche älteren Verfahren in den Hintergrund (getreten) und wurden durch wirtschaftlichere verdrängt (worden). Somit hat sich das Spektrum sehr stark verändert.

Die Sicherheit eines Bauteils, einer Anlage oder Bauwerks wird aber nicht erst durch die Qualität der Fertigung und der verwendeten Verfahren bestimmt. Wesentlich von Einfluss ist die Konstruktion, die neben der Gestaltung auch die Berechnung und die Werkstoffauswahl umfasst. Dies trifft in besonderem Maße zu, wenn im Fertigungsablauf Fügeprozesse enthalten sind.

Das vorliegende Buch behandelt beide Bereiche der Fügetechnik, die Fertigung und die Konstruktion und gibt einen guten Überblick zu diesen Aspekten.

Die 2. Auflage des Buchs war stark nachgefragt worden, so dass nach kurzer Zeit nun eine Neuauflage erforderlich wurde. In diese flossen bei der Bearbeitung die gemachten Erfahrungen und Rückmeldungen aus dem Kreis der Leser ein. Bekanntgewordene Fehler wurden korrigiert.

Die Gliederung des Inhalts in den beiden früheren Auflagen hat sich bewährt und wurde beibehalten. So beginnt das Buch mit der Behandlung der klassischen Prozesse des Schmelz- und Pressschweißens wie auch des Lötens. Ergänzend werden das Metallkleben, das Kunststoffschweißen und das immer wichtiger werdende Fügen durch Umformen und Nieten vorgestellt. Abgeschlossen wird dieser Teil durch die Kapitel Auftragschweißen und Thermisches Spritzen, Trennverfahren sowie Flammrichten.

Danach wird das Thema „Werkstoffe und Schweißen“ behandelt. Vorgestellt werden die wichtigsten metallischen Werkstoffe, deren Schweißneigung und die möglichen Fehler beim Schweißen.

Den Abschluss bilden die umfangreichen Kapitel, die sich mit der Berechnung und Gestaltung von Schweißkonstruktionen sowie der Wirtschaftlichkeit und der Qualitätssicherung beschäftigen. Die detailreiche Darstellung mit vielen Beispielen aus dem Stahlbau, dem Maschinen- und Apparatebau sowie anderen wichtigen Industriezweigen erlauben eine schnelle Orientierung über erprobte Lösungen. Fotos, Skizzen und Zeichnungen geben in Verbindung mit erläuternden Texten wesentliche Hinweise für die Praxis.

In einem umfangreichen Anhang sind Tabellen insbesondere mit Angaben zu den Prozessparametern der behandelten Verfahren zusammengestellt. In Anbetracht der schnellen Entwicklung auf dem Gebiet der Normung kann kein Buch auf dem jeweils aktuellen Stand sein. Die Autoren haben versucht, diesem Umstand Rechnung zu tragen, indem unter www.viewegteubner.de online zum Buch eine **laufend aktualisierte** Liste der Normen angeboten wird.

Aufgrund der Vielfältigkeit der behandelten Themen und zusammengetragenen Informationen stellt das Buch ein Übersichtswerk dar, das als Nachschlagewerk für im Beruf stehende Ingenieure gedacht ist, die nicht ständig mit den Problemen der Füge-technik konfrontiert sind. Aber auch Studierende, die im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten weiterführende Informationen benötigen, werden das Buch mit Gewinn verwenden können.

Die Autoren haben bei ihrer Arbeit durch die Überlassung von Bildvorlagen Unterstützung durch Firmen der betreffenden Branchen erfahren, wofür sie an dieser Stelle ihren Dank sagen. Besonders zu danken haben sie Herrn Dipl.-Ing. H. Wittel und Herrn Dipl.-Ing. J. Twrdek, die die Kapitel „Berechnung von Schweißnähten“ und „Gestaltung“ betreut haben. Herrn Dipl.-Ing. W. Link, ehemals lfd. Technischer Aufsichtsbeamter der BG Metall Nord-Süd, danken wir für die aktualisierten Informationen zum Abschnitt „Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz GABS) in Kapitel 17.

Dem Verlag Vieweg+Teubner, seinen Mitarbeitern im Lektorat Technik, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Thomas Zipsner und Frau Imke Zander, danken wir für die gewährte Unterstützung und die immer angenehme Zusammenarbeit bei der Herstellung des Buchs.

Stuttgart/Ulm, im September 2008

*Hans Joachim Fahrenwaldt
Volkmar Schuler*

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung (von H. J. Fahrenwaldt)	1
2	Schmelzschweißprozesse (von H. J. Fahrenwaldt)	7
2.1	Gasschmelzschweißen (G/31)	7
2.2	Metall-Lichtbogenschweißen (11)	17
2.2.1	Die Vorgänge im Lichtbogen	17
2.2.2	Schweißstromquellen	22
2.2.3	Das Lichtbogenhandschweißen (E/111)	33
2.2.4	Unterpulver-Schweißen (UP/12)	42
2.3	Schutzgasschweißen (SG)	48
2.3.1	Wolfram-Inertgasschweißen (WIG/141)	49
2.3.2	Metall-Schutzgasschweißen (MSG/13)	53
2.3.3	Plasma-Schweißen (WP/15)	64
2.4	Gießschmelzschweißen (AS/71)	68
2.5	Elektronenstrahlschweißen (EB/51)	69
2.6	LASER-Schweißen (LA/52)	71
2.7	Elektroschlackeschweißen (RES/72)	81
3	Prozesse des Pressschweißens (von H. J. Fahrenwaldt)	83
3.1	Widerstandspressschweißen	83
3.1.1	Punktschweißen (RP/21)	84
3.1.2	Pressstumpf- und Abbrennstumpfschweißen (RPS/25 und RA/24) .	90
3.1.3	Induktives Widerstandspressschweißen (RI/74)	92
3.2	Gaspressschweißen (GP/47)	93
3.3	Lichtbogenpressschweißen	93
3.3.1	Bolzenschweißen (B/78)	94
3.3.2	Pressschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (MBL)	96
3.4	Diffusionsschweißen (D/45)	97
3.5	Reibschweißen (FR/42)	99
3.6	Kaltpressschweißen (KP/48)	101
3.7	Sprengschweißen (S/441)	102
3.8	Ultraschallschweißen (US/41)	104

4	Löten (von H. J. Fahrenwaldt)	106
5	Metallkleben (von H. J. Fahrenwaldt)	113
6	Fügen durch Umformen (von H. J. Fahrenwaldt)	123
7	Kunststoffschweißen (von H. J. Fahrenwaldt)	128
8	Auftragschweißen und Thermisches Spritzen	137
	(von H. J. Fahrenwaldt/P. Heinrich)	
8.1	Auftragschweißen	137
8.2	Thermisches Spritzen	143
8.3	Verfahren des Thermischen Spritzens	144
8.4	Wirtschaftlichkeit des Thermischen Spritzens als Beschichtungsverfahren	153
8.5	Beispiele wirtschaftlicher Einsätze und Anwendungen	154
9	Thermisches Trennen (von H. J. Fahrenwaldt)	159
10	Flammrichten (von V. Schuler/J. Twrdek)	171
11	Werkstoffe und Schweißen (von H. J. Fahrenwaldt)	180
11.1	Stahl und Eisen	180
11.1.1	Die Beeinflussung des Grundwerkstoffs durch das Schweißen	180
11.1.2	Allgemeine Baustähle nach DIN EN 10025	187
11.1.3	Schweißgeeignete Betonstähle	190
11.1.4	Feinkornbaustähle	190
11.1.5	Niedriglegierte Stähle	194
11.1.6	Hochlegierte Stähle	194
11.1.7	Eisen-Kohlenstoff-Gusswerkstoffe	198
11.1.8	Schweißverbindungen von unterschiedlichen Metallen	203
11.2	Nichteisenmetalle	205
11.2.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen	205
11.2.2	Kupfer und Kupferlegierungen	211
11.2.3	Nickel und Nickellegierungen	214
11.2.4	Titan und Titanlegierungen	217
11.2.5	Molybdän und Molybdänlegierungen	219
11.2.6	Magnesium und Magnesiumlegierungen	220

12	Schweißnahtberechnung (von H. Wittel)	225
12.1	Abmessungen der Schweißnähte	225
12.2	Berechnung der Schweißnahtspannungen	229
12.3	Festigkeitsnachweis bei vorwiegend ruhender Beanspruchung	234
12.3.1	Schweißverbindungen im Stahlbau (DIN 18800-1)	234
12.3.2	Allgemeiner Spannungsnachweis im Kranbau (DIN 15018-1)	241
12.4	Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen	243
12.4.1	Wöhlerlinie	243
12.4.2	Dauerfestigkeitsschaubilder	245
12.4.3	Spannungskollektive	245
12.4.4	Lebensdauerabschätzung	247
12.5	Dauerfestigkeitsnachweis für Schweißverbindungen im Maschinenbau	249
12.5.1	Dauerfestigkeitsnachweis nach DS 952	249
12.5.2	Festigkeitsnachweis nach der FKM-Richtlinie	257
12.6	Betriebsfestigkeitsnachweis für Krantragwerke nach DIN 15018	268
12.7	Nachweis der Werkstoffermüdung für Stahlbauten nach Eurocode 3	273
12.7.1	Einführung	273
12.7.2	Teilsicherheitsbeiwerte	274
12.7.3	Ermüdungsfestigkeit	275
12.7.4	Ermüdungsfestigkeitsnachweis	277
12.7.5	Berechnungsbeispiel	280
12.8	Schweißeigenstressspannungen und -verformungen	282
12.8.1	Entstehung von Eigenstressspannungen	282
12.8.2	Schrumpfungsarten	283
12.8.3	Beeinflussende Faktoren	286
12.8.4	Maßnahmen zur Verminderung von Schweißeigenstressspannungen	286
12.8.5	Bauteilverzug und Schweißfolgeplan	289
12.8.6	Abbau von Eigenstressspannungen	295
12.8.7	Auswirkungen von Schweißeigenstressspannungen	298
12.8.8	Rechnerische Berücksichtigung der Eigenstressspannungen	299
13	Darstellung und Ausführung von Schweißverbindungen	302
	(von V. Schuler/J. Twrdek)	
13.1	Zeichnerische Darstellung von Schweißnähten	302
13.2	Stoßarten, Fugenformen und deren Auswahl	313

14 Anforderungsgerechte Gestaltung von Schweißkonstruktionen	318
<i>(von V. Schuler/J. Twrdek)</i>	
14.1 Beanspruchungsgerechte Gestaltung	318
14.1.1 Statisch und dynamisch beanspruchte Bauteile	319
14.1.2 Biege- und verdrehsteife Konstruktionen	323
14.1.3 Zug- und druckbeanspruchte Stäbe	325
14.1.4 Vibrationsgerechte Gestaltung	327
14.1.5 Vakuumgerechte Gestaltung	331
14.2 Fertigungsgerechte Gestaltung	333
14.3 Werkstoffgerechte Gestaltung	346
14.3.1 Nahtvorbereitung und Fugenform	346
14.3.2 Gestaltung bei Oberflächenbeschichtungen	347
14.3.3 Verbindungen an plattierten Blechen	350
14.3.4 Mischverbindungen	353
14.3.5 Verminderung der Terrassenbruchneigung	356
14.4 Korrosionsgerechte Gestaltung	358
14.5 Prüfgerechte Gestaltung	363
14.6 Instandsetzungsgerechte Gestaltung	366
14.6.1 Allgemeines zu Instandsetzung	366
14.6.2 Riegeln	370
14.6.3 Auftragschweißen	371
14.7 Mechanisierungs-/Automatisierungsgerechte Gestaltung	374
15 Anwendungsgerechte Gestaltung von Schweißkonstruktionen	381
<i>(von V. Schuler/J. Twrdek)</i>	
15.1 Stahlbau – Trägergestaltung und Trägeranschlüsse	381
15.1.1 Tragwerke	381
15.1.2 Vorschriften	381
15.1.3 Werkstoffe	382
15.1.4 Schweißzusätze	382
15.1.5 Halbzeuge	383
15.1.6 Herstellung	383
15.1.7 Grundsätze für die Konstruktion	384
15.1.8 Vollwandträger	384
15.1.9 Aussteifungen	389
15.1.10 Fachwerkträger	391
15.1.11 Hohlprofilkonstruktionen	395
15.1.12 Rahmenecken	396
15.1.13 Trägeranschlüsse	397

15.2	Behälter-, Apparate-, Druckgefäße-, Tank- und Rohrleitungsbau	399
15.2.1	Vorschriften	399
15.2.2	Herstellung	401
15.2.3	Werkstoffe	401
15.2.4	Schweißzusätze	403
15.2.5	Allgemeine Gestaltungsregeln	403
15.2.6	Nahtformen und Schweißnahtvorbereitungen	406
15.2.7	Flanschanschlüsse	407
15.2.8	Rohrverbindungen	411
15.2.9	Stutzenanschlüsse	414
15.2.10	Kompensatoren	416
15.2.11	Mäntel, Böden und Doppelmäntel für Behälter, Apparate und Tanks	417
15.2.12	Halbrohre zum Anschweißen an Behälter	424
15.2.13	Einschweißen von Rohren in Rohrböden	425
15.2.14	Rauchgasdichte Rohrwände	426
15.2.15	Bestiften (Bolzenschweißung) an leeren Rohren	427
15.3	Gestaltung von Maschinenelementen	428
15.3.1	Allgemeine Gestaltungsregeln	428
15.3.2	Hebel, Stangen und Gabeln	428
15.3.3	Drehende Maschinenteile	431
15.4	Gestaltung im Fahrzeugbau	432
15.5	Schweißen und Löten im Luft- und Raumfahrzeugbau	450
15.6	Schweißen in Feinwerktechnik und Elektronik	460
16	Wirtschaftlichkeitsüberlegungen (von V. Schuler/J. Twrdek)	470
17	Qualitätssicherung (von V. Schuler/J. Twrdek)	476
17.1	Schweißtechnische Qualitätsanforderungen und Schweißaufsicht	477
17.2	Schweißen in gesetzlich geregelten Bereichen	481
17.3	Schweißnaht – Verfahren und Möglichkeiten der Prüfung	486
17.4	Fehlertoleranzen und Unregelmäßigkeiten von Schweißverbindungen	496
17.5	Schulung und Prüfung von Schweißern und Bedienern von Schweiß- einrichtungen	507
17.6	Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz (GABS)	518

18 Anhang (von H. J. Fahrenwaldt).....	527
18.1 Tabellen und Diagramme	527
18.2 Normen in der Schweißtechnik	601
Sachwortverzeichnis	613

1 Einleitung

Das Schweißen zählt systematisch zu den Fügetechniken. In DIN 8953 sind die Prozesse des Fügens in sechs Gruppen geordnet, **Bild 1-1**. Die vier wichtigsten Prozesse sind

das Fügen durch Umformen
Schweißen,
Löten und
Kleben, Leimen, Kitten.

Alle dort genannten Prozesse zählen zu den unlösbaren Verbindungen. Die Abgrenzung der unlösbaren Verbindungen zueinander erfolgt für die wichtigsten Verfahren zweckmäßig über deren Definition wie folgt:

Fügen durch Umformen umfasst die Prozesse, bei denen die Fügeteile oder Hilfsfügeteile örtlich umgeformt werden, so dass die Verbindung durch Formschluss gegen ungewolltes Lösen gesichert ist.

Schweißen ist das unlösbare Vereinigen von Grundwerkstoffen (Verbindungsschweißen) oder das Beschichten eines Grundwerkstoffes (Auftragschweißen) unter Anwendung von Wärme oder von Druck oder von beidem, mit oder ohne Schweißzusätze.

Löten ist das Verbinden metallischer Werkstücke mit Hilfe eines geschmolzenen Zusatzmetalls (Lot), dessen Schmelztemperatur unterhalb derjenigen der zu verbindenden Grundwerkstoffe liegt. Die Grundwerkstoffe werden nicht aufgeschmolzen, sondern nur benetzt. Gegebenenfalls wird mit Flussmitteln gearbeitet.

Kleben ist das Fügen zweier Teile unter Verwendung eines Klebstoffs, d. h. eines nichtmetallischen Werkstoffes, der die Fügeteile durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) sowie zwischen- und innermolekulare Kräfte im Klebstoff (Kohäsion) miteinander verbindet.

Der wichtigste Prozess davon ist derzeit das Schweißen. Je nach Art des zu verbindenden Grundwerkstoffes, dem Zweck des Schweißens oder der Art der Fertigung können weitere systematische Unterteilungen vorgenommen werden. **Tabelle 1-1** gibt einen Überblick über die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der wichtigsten Verfahren.

Das so genannte "Schweißtechnische Dreieck" umkreist den Problembereich der Schweißtechnik. Es verdeutlicht, dass die drei Einflussgrößen Werkstoff, Konstruktion und Fertigung beim Schweißen aufeinander abgestimmt sein müssen, wenn die „Schweißbarkeit des Bauteils“ gegeben sein soll. DIN 8528 Teil 1 definiert diesen Begriff wie folgt:

Die Schweißbarkeit eines Bauteils aus metallischem Werkstoff ist vorhanden, wenn der Stoffschluss durch Schweißen mit einem gegebenen Schweißverfahren bei Beachtung eines geeigneten Fertigungsablaufs erreicht werden kann. Dabei muss die Schweißung hinsichtlich ihrer örtlichen Eigenschaften und ihres Einflusses auf die Konstruktion, deren Teile sie sind, die gestellten Anforderungen erfüllen.

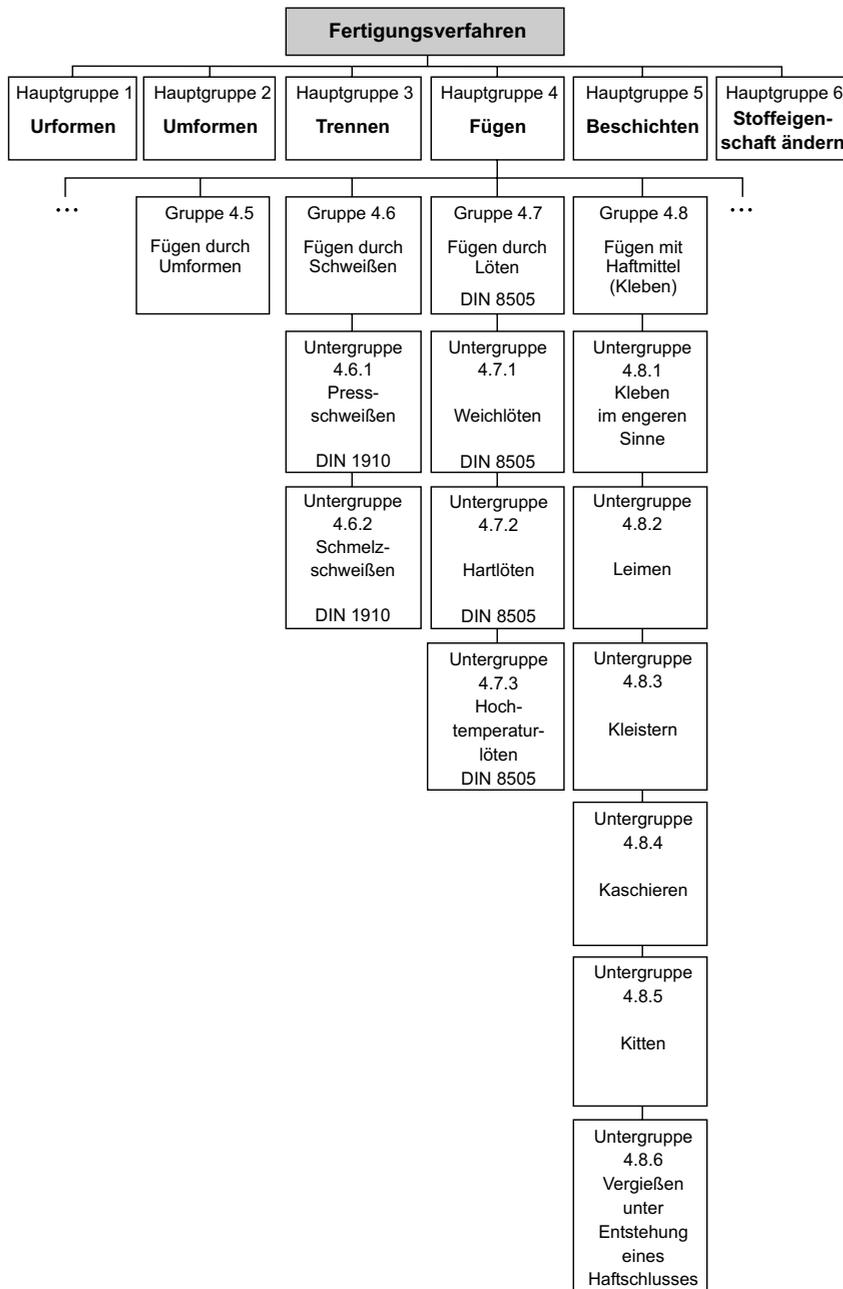


Bild 1-1 Einordnung des „Fügens“ in die Verfahren der Fertigungstechnik (nach DIN 8593)

Werkstoff, Konstruktion und Verfahren beeinflussen sich gegenseitig im Sinne eines technischen Systems, d. h. wird eine Größe verändert, so ist dies von Einfluss auf die beiden anderen Größen. Die genannten Größen werden durch die Eigenschaften:

- Schweißbeignung (Verfahren – Werkstoff),
- Schweißsicherheit (Werkstoff – Konstruktion) und
- Schweißmöglichkeit (Verfahren – Konstruktion)

miteinander verknüpft.

Die Schweißbeignung bezieht sich auf den Werkstoff. Sie ist gegeben, wenn der für die Konstruktion vorgesehene Werkstoff mit einem ganz bestimmten Prozess ohne wesentliche Beeinträchtigung der Eigenschaften geschweißt werden kann.

Durch Schweißen können Verbindungen geschaffen werden, die in der Schweißnaht die gleichen Eigenschaften aufweisen, wie sie der Grundwerkstoff zeigt. Eine Ausnahme bildet dabei derzeit noch die Dauerschwingfestigkeit, deren Werte in allen Fällen für die Schweißnaht unter denen des Grundwerkstoffs liegen. Für die Stähle stehen in den meisten Fällen geeignete Schweißverfahren zur Verfügung; auch die klassischen Gusswerkstoffe können heute in vielen Fällen zuverlässig geschweißt werden. Abgesehen von Legierungen mit besonderen Eigenschaften wird das Schweißen von NE-Metallen ebenfalls weitgehend beherrscht.

Der Werkstoff wird beim Schweißen durch die eingebrachte Wärme beeinflusst. Die dadurch u. U. eintretende Änderung der Gebrauchseigenschaften ist besonders zu berücksichtigen. Beim Schweißen von Stählen ist beispielsweise zu achten auf die Neigung zu Alterung, Aufhärtung und Ausbildung von Sprödbrüchen; von Einfluss ist weiterhin das Seigerungsverhalten und die Anisotropie der Eigenschaften.

Eine „sichere“ Schweißkonstruktion liegt dann vor, wenn die Schweißverbindungen einer Konstruktion im Betrieb weder verspröden, noch brechen oder Risse bilden. Zum anderen muss die Schweißkonstruktion unter der Einwirkung der Belastung funktionsfähig bleiben. Schweißsicherheit ist also definitionsgemäß eine Größe, die von Werkstoff und Konstruktion beeinflusst wird.

Vom Werkstoff her besteht u. U. die Gefahr der Versprödung durch die Wärmeeinwirkung (Aufhärtung) oder durch die verformungsbehindernde Wirkung eines mehrachsigen Spannungszustands. Letzterer bildet sich möglicherweise bei dickeren Bauteilen aus, hervorgerufen durch eine Behinderung der Schrumpfung der Fügeteile nach Beendigung des Schweißens.

Der Konstrukteur kann die Schweißsicherheit somit positiv beeinflussen durch eine beanspruchungsgerechte Gestaltung des Bauteils, d. h. durch eine günstige Nahtanordnung, die Vermeidung von Nahtanhäufungen und Steifigkeitssprüngen.

Unter dem Begriff der Schweißmöglichkeit sind alle Voraussetzungen zu verstehen, die von der Fertigung erfüllt werden müssen, damit eine einwandfreie Schweißkonstruktion entsteht. Die wesentlichen Größen, die die Schweißmöglichkeit beeinflussen, sind also Fertigung und Konstruktion. Das Hauptproblem ist hier die Auswahl des geeigneten Schweißverfahrens nach verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Verfahren, soweit diese im Betrieb zur Verfügung stehen. Weiter sind hier von Einfluss die Nahtvorbereitung, die Schweißfolge, das Vorwärmen bzw. die Nachbehandlung der Naht oder die Wahl des richtigen Schweißzusatzes.

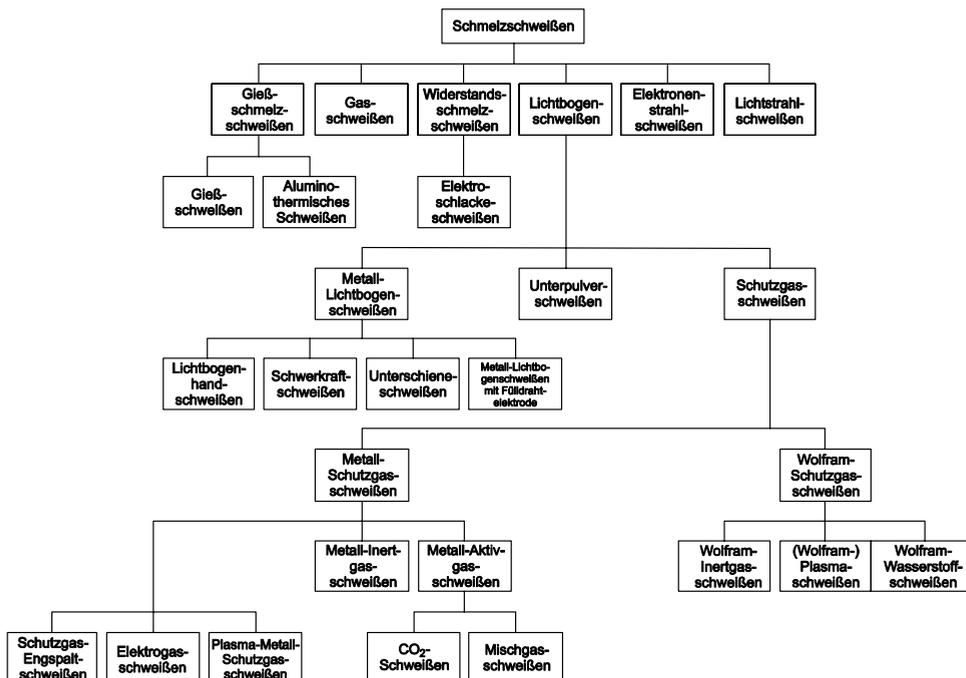
Tabelle 1-1 Fortsetzung

Verfahren	Kennzahl ISO4063	Kurzzeichen	Abschmelzleistung [kg/h]	Leist.- dichte [W/cm ²]	Schweißgeschw. [m/min]	Blechdickenbereich [mm]	Aufmischungsgrad m. GW [%]	Erforderl. Handfertigkeit	Automatisierbarkeit	Thermisch. Wirk.grad	Baustellentauglichkeit	Anlagenkosten [T€]	Bemerkung
Wolfram-Plasmaschweißen, manuell	15	WP	0-0,8	10 ⁶	0,2-0,8	0,2-12	bis 100	s. groß	K6eine	65	bedingt	7-8	
Mikroplasma-schweißen	15	WP	0-0,1	10 ⁶	0,01-0,8	0,01-0,8	bis 100	s. groß	bedingt	65	bedingt	7-8	
WP-Schweißen mechanisiert, Stichloch	15	WP	0	10 ⁶	0,2-0,6	2,5-12	100	keine	s.gut	65-70	bedingt	40	
WP-Schweißen mit Kaltdrahtzufuhr	15	WP	0,8-2	10 ⁶	0,1-0,5	2-20	15-25	keine	s.gut	50	bedingt	40	
Elektronenstrahlschweißen	51	EB	0	10 ⁸	0,2-5	0,01-260	bis 100	keine	s.gut	80	keine	50-1000	Al bis 350mm Dicke
Laserstrahlschweißen	52	LA	0-0,3	10 ⁹	0,2-22	0,01-10	bis 100	keine	s.gut	80	keine	50-1000	Geschw. stark dickenabhängig
Elektro-Schlackeschweißen	72	RES	10-12	10 ⁴	0,01-0,1	10-300	5-20	keine	s.gut	90	gut	20-30	
RES-Band-Auftragschweißen	72	RES	2-4	10 ³	0,05-0,1	15-100	3-5	keine	s.gut	90	gut	30-40	
Elektrogasschweißen	73	MSGG	5-10	10 ⁴	0,02-0,2	10-100	5-20	keine	s.gut	80	gut	25	
Reibschweißen	42	FR	0		0	0,5-200	100	keine	s.gut		keine	300-1000	
Hochfrequenzschweißen		HF	0		21-175	1,5-16	100	keine	s.gut		keine	700-2000	

2 Schmelzschweißprozesse

Unter dem Begriff Schmelzschweißen werden die Prozesse zusammengefasst, bei denen das Schweißen bei örtlich begrenztem Schmelzfluss ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz erfolgt (DIN 1910 Teil 2; 2002 ersetzt durch DIN ISO 857-1). Eine Übersicht über die zu dieser Verfahrensgruppe zählenden Prozesse gibt **Tabelle 2-1**.

Tabelle 2-1 Einteilung der Schmelzschweißprozesse (nach Killing)



2.1 Gasschmelzschweißen (G/31*)

Beim Gasschmelzschweißen, auch autogenes Schweißen genannt, entsteht der Schmelzfluss durch unmittelbares, örtlich begrenztes Einwirken einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme. Wärme und Schweißzusatz werden, wenn eingesetzt, getrennt zugeführt (Definition nach DIN EN ISO 857-1), **Bild 2-1**.

Brenngase

Als Brenngase kommen die in **Tabelle 2-2** genannten Gase in Betracht. Für die Beurteilung der Verwendbarkeit zum Schweißen ist neben der erreichbaren Flammentemperatur und der Verbrennungsgeschwindigkeit die Flammenleistung von Bedeutung. Als am besten geeignetes

* Bezeichnung nach ISO 4063

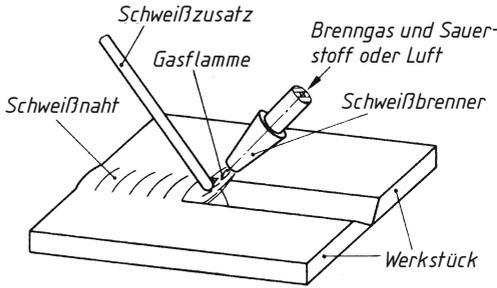
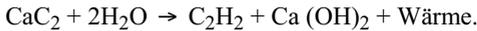


Bild 2-1
Gasschmelzschweißen
(nach DIN 1910)

Gas ergibt sich daraus das Acetylen. Dieses Gas erfüllt darüber hinaus noch weitere für die Anwendung wichtige Bedingungen: es ist nicht giftig, bildet bei richtiger Brenneinstellung keine Verbrennungsrückstände in der Naht und bietet bei reduzierend eingestellter Flamme einen guten Schutz des Schmelzbades.

Unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten sind noch die Explosionsgrenzen von Bedeutung, die beim Gemisch Sauerstoff/Acetylen zwischen 2,4 und 93 % Acetylen liegen.

Acetylen (Ethin, C_2H_2) ist ein Kohlenwasserstoff mit der Strukturformel $H-C \equiv C-H$. Gewonnen wird Acetylen in der Regel aus der Reaktion von Calciumcarbid und Wasser nach der Formel



Daneben existieren thermische Herstellungsverfahren, die von Kohlenwasserstoffen ausgehen. Acetylen wird heute gebrauchsfertig in Stahlflaschen in den Handel gebracht; die Verwendung von eigenen Acetylen-Entwicklern im Betrieb ist nicht mehr üblich.

Tabelle 2-2 Eigenschaften der Brenngase

Brenn- gas	Dichte ¹⁾	Heizwert H_u	max. Flam- mentemp. mit O_2	Zündtemp. in Luft	Explos. Grenzen in Luft	Verbr. Geschw.	Flam- men- leistung
	kg/m ³	kJ/m ³	°C	°C	Vol. %	m/s	kW/cm ²
Wasser- stoff (H_2)	0,09	10.800	2.100	585	4 bis 74	8,9	13,98
Acetylen (C_2H_2)	1,1	57.000	3.160	335	3,4 bis 80	13,5	42,74
Propan (C_3H_8)	1,88	93.000	2.750	510	2,0 bis 9,5	3,7	10,27
Methan (CH_4)	0,67	36.000	2.770	645	4 bis 17	3,3	8,51

¹⁾ bei 15 °C und 1 bar

Infolge der Dreifachbindung ist Acetylen bereits bei Drücken über 3,5 bar bzw. höheren Temperaturen instabil. Im Gegensatz zu anderen Gasen kann es somit nicht unter hohem Druck gespeichert werden. Ausgenutzt wird daher die sehr gute Lösungsfähigkeit des Acetons für Acetylen (bei 1 bar Druck können 25 Liter Gas in 1 Liter gelöst werden). Die zur Speicherung verwendeten Stahlflaschen werden heute mit einer hochporösen monolithischen Masse aus Calciumsilikaten oder Kunststoffgranulat gefüllt, in die sich das mit Acetylen beladene Aceton einlagert. So wird eine gleichmäßige Verteilung des Acetons im Speicherraum erreicht und gleichzeitig vermieden, dass Lösungsmittel bei der Gasentnahme mitgerissen wird. Diese Maßnahme erlaubt auch die Erhöhung des Flaschendruckes bis auf 19 bar. In der Praxis enthält eine 40 l-Flasche 13 Liter Aceton. Bei einem Flaschendruck von 18 bar ergibt dies ein speicherbares Volumen von ca. 6000 Liter Acetylen, wovon 5600 Liter nutzbar sind.

Infolge der Lösung des Acetylen im Aceton folgt das Gas nicht den bekannten Gasgesetzen. Der in einer Flasche noch vorhandene Gasvorrat kann daher nicht aus dem Flaschendruck ermittelt werden, vielmehr ist dazu eine Wägung erforderlich.

Aus Sicherheitsgründen ist die maximale Entnahmemenge im Dauerbetrieb auf 700 Liter Acetylen je Stunde begrenzt; bei höherem Bedarf sind daher Flaschenbatterien zu verwenden. Die Flaschen tragen eine kastanienbraune (früher gelbe) Kennfarbe; sind sie bereits mit der modernen hochporösen Füllung versehen, so sind sie zusätzlich mit einem roten Ring am Flaschenhals gekennzeichnet. Diese Flaschen dürfen auch waagrecht liegend verwendet werden; sonst sind die Flaschen unter einem Winkel von mindestens 15° zur Waagrechten zu lagern. Alle Flaschen sind vor Sonneneinstrahlung zu schützen. Der Anschluss der Entnahmemarmaturen an die Flasche erfolgt mit einem Spannbügel.

Sauerstoff

Der zur Verbrennung erforderliche Sauerstoff wird großtechnisch durch Verflüssigung und anschließende Rektifikation aus der atmosphärischen Luft gewonnen. Er kommt in Stahlflaschen mit einem Fülldruck von 200 oder 300 bar in den Handel. Für Großverbraucher ist es günstig, den Sauerstoff flüssig in Großbehältern zu beziehen und in Kaltvergasern an Ort und Stelle in den Verbrauchszustand umzuwandeln. Nach den Gasgesetzen (Boyle-Mariotte) enthält eine 50l-Flasche bei 200 bar Fülldruck 10 m³ Sauerstoff von 1 bar.

Das in einer Flasche vorhandene Sauerstoffvolumen kann nach der Beziehung $Q = p \cdot V$ unmittelbar aus dem Flaschendruck ermittelt werden.

Die Kennfarbe für Sauerstoff-Flaschen ist weiß (früher blau). Der Anschluss des Druckminderers an die Flasche erfolgt über ein G ¾" Rechts-Gewinde. Alle Teile, die mit dem Sauerstoff in Kontakt kommen, müssen unbedingt frei von Fett und Öl gehalten werden. Reiner Sauerstoff darf niemals zum Reinigen von Kleidungsstücken oder zum Belüften von Räumen bzw. Behältern verwendet werden. Sauerstoff ist schwerer als Luft und reichert Kleider und Räume von unten her an.

Armaturen

- Druckminderventile (DIN EN 585; 1998 ersetzt durch DIN EN ISO 2503)

Der Arbeitsbereich des Brenners liegt bei 0,5 bar für das Acetylen und 2,5 bar für den Sauerstoff. Das unter wesentlich höherem Druck in den Flaschen gespeicherte Gas muss

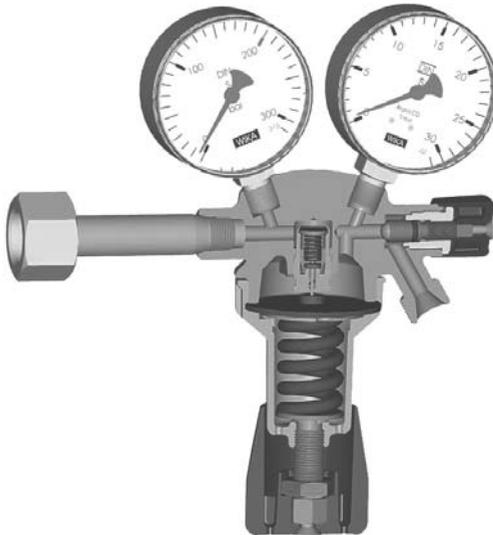


Bild 2-2 Druckminderventil (Werkbild CGE Rhöna)

also auf diesen Arbeitsdruck entspannt werden, was üblicherweise in einem membran-gesteuerten Druckminderventil erfolgt. **Bild 2-2** zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Ventils. Der Ventilteller wird von zwei Federn belastet, einmal von der Schließfeder – sie ist bestrebt, das Ventil zu schließen – und über die vom Arbeitsdruck beaufschlagte Membran von der Einstellfeder, deren Spannung mit der Einstellschraube verändert werden kann und die der Schließkraft entgegenwirkt. Bei eingestelltem Arbeitsdruck herrscht Kräftegleichgewicht. Wird der Arbeitsdruck zu hoch, so drückt dieser die Membran entgegen der Wirkung der Einstellfeder nach unten und das Ventil schließt sich. Beim Absinken des Arbeitsdruckes drückt die Einstellfeder den Ventilteller gegen die Schließkraft nach oben, so dass sich das Ventil wieder öffnet. Die Reduzierung des Druckes erfolgt dabei einstufig über die Drosselwirkung des Ventilsitzes.

Die Druckminderer, wie auch die im Folgenden besprochenen Armaturen, müssen ihrer Gasart entsprechende Kennbuchstaben tragen, wie O für Sauerstoff, A für Acetylen oder F für andere Brenngase.

– Rückschlagsicherungen (DIN EN 730)

Durch defekte Brenner kann es zu einem schleichenden Rücktritt von Sauerstoff in die Brenngasflasche kommen bzw. können Flammen in diese zurückschlagen. Um dies zu verhindern bzw. nach einem Flammenrückschlag die Zufuhr von Brenngas zu unterbinden, werden Rückschlagsicherungen oder Gebrauchsstellenvorlagen unmittelbar hinter dem Druckminderer in der Brenngasleitung angeordnet. Üblich sind heute trockene, druck-gesteuerte Gebrauchsstellenvorlagen mit oder ohne thermische Steuerung.

Wie **Bild 2-3** zeigt, handelt es sich um federbelastete Ventile. Der Druck des durchströmenden Gases öffnet diese Ventile gegen die Federkraft. Die Flammensperre wird im Allgemeinen durch poröse Körper (Keramik, Sintermetall) gebildet.

- Schläuche und Schlauchanschlüsse (DIN EN 559, 560 und 561)

Die Gasschläuche sind entsprechend den zulässigen Betriebsdrücken in zwei Klassen eingeteilt. Die Innendurchmesser folgen der Reihe R 20. Für Acetylen – wie für die anderen Brenngase – ist die Kennfarbe rot vorgeschrieben, die Schläuche für Flüssiggase sind orange und Sauerstoffschläuche sind blau. Um einem falschen Anschluss vorzubeugen, sind die Schlauchanschlüsse am Druckminderventil unterschiedlich ausgeführt. Für Brenngase sind Linksgewinde, für alle anderen nichtbrennbaren Gase Rechtsgewinde vorgesehen.

Schweißbrenner (DIN EN 731)

Im Schweißbrenner werden Brenngas und Sauerstoff in einem einstellbaren Verhältnis miteinander gemischt. Wichtig ist, dass dies auf einfache Weise reproduzierbar geschieht und während des Schweißens konstante Betriebsbedingungen eingehalten werden.

Die Bauarten werden unterschieden nach Gleichdruck- und Injektor-(Saug-)brenner. Beim Gleichdruckbrenner, wie er in den USA üblich ist, werden die beiden Gase unter gleichem Druck zugeführt. Im Gegensatz dazu steht bei dem in Deutschland üblichen Saugbrenner, **Bild 2-4**, der Sauerstoff unter einem Druck von etwa 2,5 bar, während das Acetylen mit einem Druck von etwa 0,2 bar zugeführt wird. Der Sauerstoff strömt mit höherer Geschwindigkeit aus der Druckdüse in den Injektor. Infolge des dort entstehenden Unterdrucks wird Acetylen angesaugt und mit dem Sauerstoff vermischt, was im Wesentlichen in der Mischdüse bzw. dem Mischrohr erfolgt. Nach Zündung des Gasgemisches entsteht dann an der Schweißdüse die Schweißflamme.

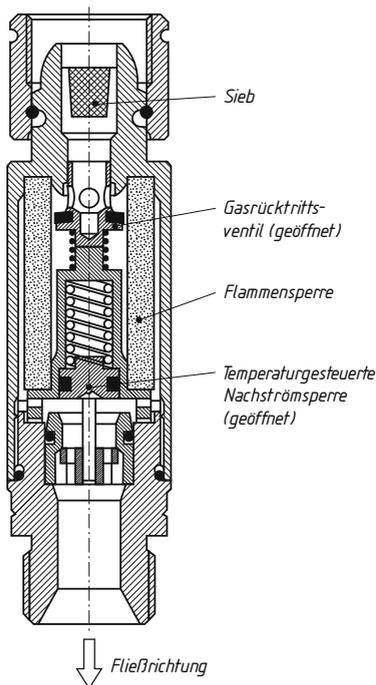


Bild 2-3

Schnittzeichnung einer trockenen Gebrauchstellenvorlage. In ihr sind Flammensperre, Gasrücktrittsventil und Nachströmsperre kombiniert (nach Ibeda)

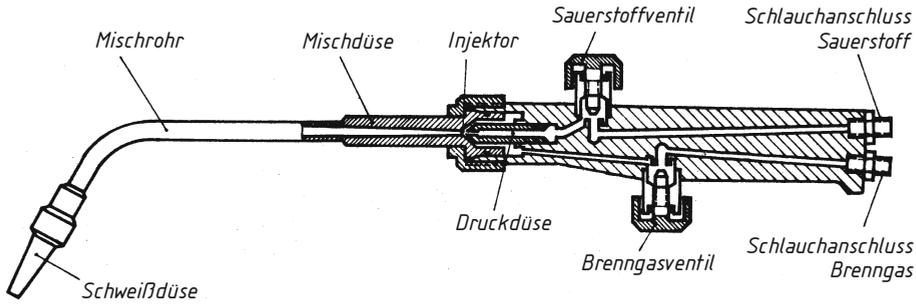


Bild 2-4 Schnittzeichnung eines Schweißbrenners nach dem Injektorprinzip. Der Injektor ist nicht verstellbar und gehört zum Brenneinsatz

Bei Inbetriebnahme des Brenners wird daher zuerst das Sauerstoffventil geöffnet und dann durch Einregulieren des Acetylendruckes ein zündfähiges Gasgemisch hergestellt. Umgekehrt wird nach beendeter Schweißarbeit zuerst das Acetylenventil geschlossen und erst dann das Sauerstoffventil. Die umgekehrte Reihenfolge würde zur Zerstörung des Brenners führen.

Der Schweißensatz ist bei beiden Bauarten auf die Dicke des zu verschweißenden Blechs abzustellen. Damit wird erreicht, dass der Flamme nur soviel Gas zugeführt wird, wie zum Schweißen der Blechdicke erforderlich ist. Beim Gleichdruckbrenner muss das Mischrohr mit Brennerdüse, beim Saugbrenner der einteilige Schweißensatz (Mischrohr, Mischdüse und Injektor) ausgewechselt werden.

Der Gasverbrauch richtet sich nach dem Schweißensatz, d. h. der zu verschweißenden Blechdicke. Als Richtwert gilt bei neutraler Flammeneinstellung ein Bedarf von je 100 Liter Sauerstoff und Acetylen je mm Blechdicke und Brennstunde.

– Schweißflamme

Für das Schweißen von Stahl soll die Acetylen-Sauerstoff-Flamme so eingestellt sein, dass ein Mischungsverhältnis von ca. 1:1 bis 1:1,2, also eine neutrale Flamme vorliegt. Bei dieser Flammeneinstellung beträgt die maximale Flammentemperatur etwa 3200 °C, und die Flamme hat im Arbeitsbereich eine reduzierende Wirkung. **Bild 2-5** zeigt schematisch eine neutrale Flamme. Sie gliedert sich in die erste Verbrennungsstufe mit dem Flammenkegel und seiner leuchtenden Hülle und die zweite Verbrennungsstufe, die Bei- oder Streuflamme.

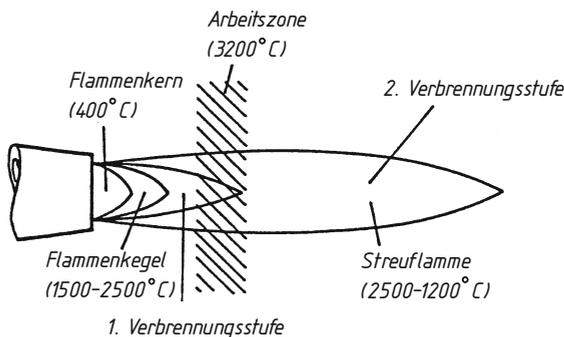


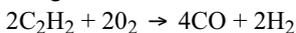
Bild 2-5
Zoneneinteilung und Temperaturen
in einer neutral eingestellten
Acetylen-Sauerstoff-Flamme

Tabelle 2-3 Schweißzusätze für das Gasschmelzschweißen (in Anlehnung an DIN 8554)

Grundwerkstoff		Schweißstabklasse					
		I	II	III	IV	V	VI
Allgemeine Baustähle nach DIN EN 10025	S 185*	X	X	X	X		
	S 235 JR		X	X	X		
	S 235 JR		X	X	X		
	S 235 JR		X	X	X		
	S 275 JR		X	X	X		
	S 235 J2			X	X		
	S 275 J2			X	X		
	S 355 J2			X	X		
Kesselblech nach DIN EN 10028	P 235 GH			X	X		
	P 265 GH			X	X		
	P 295 GH				X		
Rohr Stahl nach DIN EN 10216	P 235 T1	X	X	X	X		
	P 275 T1	X	X	X	X		
	P 355 N	X	X	X	X		
	P 235 T2			X	X		
	P 275 T2			X	X		
	P 355 N (St52.4)			X	X		
Kesselrohre nach DIN EN 10216-2	P 235			X	X		
	P 265				X		
	16 Mo3				X		
	13CrMo4-5					X	
	10CrMo9-10						X

* Schweißbeugung nicht garantiert

In der 1. Verbrennungsstufe wird das Acetylen in der Hitze gespalten. Mit dem beige- mengten Sauerstoff läuft bei neutraler Flamme die folgende Reaktion ab:

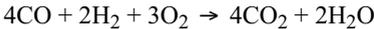


Kohlenmonoxid und Wasserstoff, die Produkte der unvollständigen Verbrennung der 1. Stufe werden in der 2. Verbrennungsstufe mit dem der Umgebung entzogenen Sauerstoff verbrannt.

Tabelle 2-4 Chemische Zusammensetzung und Schweißverhalten der Gasschweißstäbe
(nach DIN EN 12 536)

Schweiß- stabilklasse	Chemische Zusammensetzung						Verhalten		
	C	Si	Mn	P	S	Sonstige	Fließ- verhalten	Spritzer	Poren- neigung
	%	%	%	%	%	%			
OI	0,03- 0,12	< 0,20	0,35- 0,65	< 0,030	< 0,025		Dünn- fließend	viel	ja
OII	0,03- 0,20	0,05- 0,25	0,50- 1,20	< 0,025	< 0,025		Weniger dünn- fließend	wenig	ja
OIII	0,05- 0,15	0,05- 0,25	0,95- 1,25	< 0,020	< 0,020	Ni 0,35-0,80	Zäh- fließend	keine	ja
OIV	0,08- 0,15	0,10- 0,15	0,90- 1,20	< 0,020	< 0,020	Mo 0,45-0,65			
OV	0,10- 0,15	0,10- 0,25	0,80- 1,20	< 0,020	< 0,020	Mo 0,45-0,65 Cr 0,80-1,20			
OVI	0,03- 0,10	0,10- 0,25	0,40- 0,70	< 0,020	< 0,020	Mo 0,90-1,20 Cr 2,00-2,20			

Mo < 0,3 %; Ni < 0,3 %; Cr < 0,15 %; Cu < 0,35 % (incl.Überzug); V < 0,03 %



Diese vollständige Verbrennung erfolgt in einem Bereich etwa 2 bis 4 mm vor dem Flam-
menkegel. Hier herrscht die höchste Flammentemperatur, gleichzeitig ist hier der beste
Schutz des Schweißbads vor Sauerstoff und Stickstoff gegeben. In diesem Bereich hat
damit das Schweißen zu erfolgen.

Wird mit einem höheren Sauerstoffanteil gearbeitet, so entsteht eine kurze, harte Flamme
von bläulich-violetterm Aussehen und spitzem Flammenkegel. Bereits in der 1. Verbren-
nungsstufe tritt hier eine vollständige Verbrennung auf.

1. Stufe: $4O_2 + 2C_2H_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2$
2. Stufe: $4CO_2 + 2H_2 + O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2H_2O$

Damit fehlt die reduzierende und temperaturerhöhende Wirkung der Verbrennung des CO.
Kennzeichnend für diese Flammeneinstellung sind beim Schweißen von Stahl eine rauhe
Nahtoberfläche und Schlackeneinschlüsse in der Naht. Verwendet wird diese Flammen-
einstellung u. U. noch für das Schweißen von Messing, da dadurch die Ausdampfung des
Zinks vermindert wird.

Eine große, weiche Flamme mit hellrotem, leuchtendem Aussehen und breitem, ver-
schwommenem Flammenkegel erhält man beim Arbeiten mit Acetylenüberschuss. In der
1. Verbrennungsstufe tritt hier elementarer Kohlenstoff auf, der auch in der 2. Stufe nicht
vollständig verbrannt werden kann.

1. Stufe: $O_2 + 2C_2H_2 \rightarrow 2CO + 2H_2 + 2C$
2. Stufe: $2CO + 2H_2 + 2C + 2O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O + 2C$

Dieser freie Kohlenstoff kohlt bei Stahl die Schmelze auf, wodurch diese dünnflüssig wird.
Die Nahtoberfläche wird glatt, die Naht selbst hängt durch und ist hart. Beim Schweißen von

Gusseisen, von Aluminium und bei Auftragschweißungen kann diese Flamme mit Acetylenüberschuss Vorteile haben.

Schweißzusätze (DIN EN 12536)

Die zum Schweißen von Stählen dienenden Gasschweißstäbe werden in sechs Klassen, bezeichnet mit I bis VI, eingeteilt, **Tabelle 2-3**. In der Praxis finden davon nur noch Stäbe der Klassen III und IV Verwendung. Die einzelnen Klassen unterscheiden sich in der chemischen Zusammensetzung und im sich daraus ergebenden Schweißverhalten. **Tabelle 2-4** gibt einen Überblick über die Legierungszusammensetzung der Gasschweißstäbe, aus der auch das Verhalten beim Schweißen entnommen werden kann.

Die komplette Bezeichnung eines Schweißzusatzes lautet nach EN 12536 beispielsweise wie folgt:

Schweißstab 0 III EN 12536

Darin bedeuten:

0 Schweißverfahren: Gasschmelzschweißen

III Schweißstabklasse

Schweißarten

Beim Gasschmelzschweißen werden zwei Arten von Schweißungen unterschieden: das Nachlinks- und das Nachrechts-Schweißen. Die Bezeichnung erfolgt dabei aus der Aufeinanderfolge von Bad, Draht und Flamme.

Das Nachlinks-Schweißen, **Bild 2-6**, wird nur bei Blechdicken bis ca. 3 mm angewandt. Der Grund für diese Einschränkung ist das geringere Wärmeeinbringen durch die Folge „Naht-Flamme-Schweißzusatz“ in Schweißrichtung. Der Schweißbrenner wird bei dieser Arbeitstechnik geradlinig geführt, wobei ein Fortschreiten nach links erfolgt. Der Flammenkegel ist auf den ruhig geführten, tupfenden Draht gerichtet, wodurch gleichzeitig das Bad in die Fuge läuft. Die Beiflamme wärmt die Nahtfuge allerdings nur bei dünnen Blechen ausreichend vor.

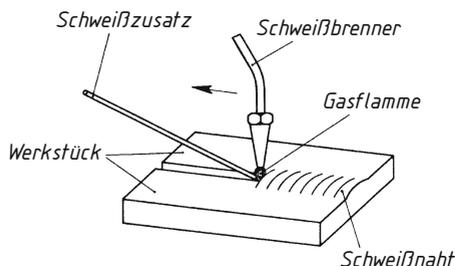


Bild 2-6
Nachlinks-Schweißen
(nach DIN 1910)

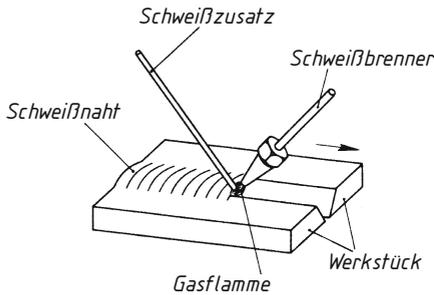


Bild 2-7
Nachrechts-Schweißen
(nach DIN 1910)

Ab einer Blechdicke von 3 mm ist das Nachrechts-Schweißen anzuwenden, das durch die Folge „Naht-Schweißzusatz-Flamme“ gekennzeichnet ist, **Bild 2-7**. Hier wird der Brenner ohne Pendelbewegung in Schweißrichtung nach rechts geführt. Mit dem Schweißdraht werden halbkreis- bis kreisförmige Rührbewegungen im Bad ausgeführt; dabei taucht der Stab in das Bad ein. Der Flammenkegel ist auf den Stab und die Schmelze gerichtet, wobei eine Schweißöse entsteht, die das Durchschweißen der Wurzel sicherstellt. Die Streuflamme hält die bereits fertige Naht warm, was eine gute Entgasung bewirkt.

Neben einer höheren Schweißgeschwindigkeit hat das Nachrechts-Schweißen gegenüber dem Nachlinks-Schweißen noch weitere Vorteile, z. B. wirkt die Streuflamme auch wie ein Schutzgasschleier auf das Schmelzbad. Günstig ist weiterhin, dass die heißeste Zone der Flamme auf die Flanke der Fuge und die Spitze des Flammenkegels in den Spalt gerichtet ist.

Unregelmäßigkeiten beim Gasschmelzschweißen

Neben den von einer falschen Flammeneinstellung herrührenden Fehlern sind beim Gasschweißen Fehler zu beobachten, die wesentlich auf eine falsche Ausführung der Schweißung zurückzuführen sind. Es sind dies

- durchhängende oder überhöhte Nähte,
- Poren,
- Bindefehler,
- Wurzelfehler.

Die beschriebenen Nahtfehler treten bei zu geringer Schweißgeschwindigkeit auf. Wird dabei zu wenig Schweißgut eingebracht, so hängt die Naht durch; ist die Menge des eingebrachten Schweißgutes jedoch zu groß, so erhält man eine überhöhte Naht. Ein schuppenförmiges Aussehen der Naht deutet auf eine ungleichmäßige Schweißgeschwindigkeit hin.

Die Bildung von Poren kann aus einer mit Rost und Fett verschmutzten Oberfläche der Fugenkanten herrühren. Auch eine falsche Führung des Brenners bzw. des Schweißstabes kann die Ursache für diesen Fehler sein.

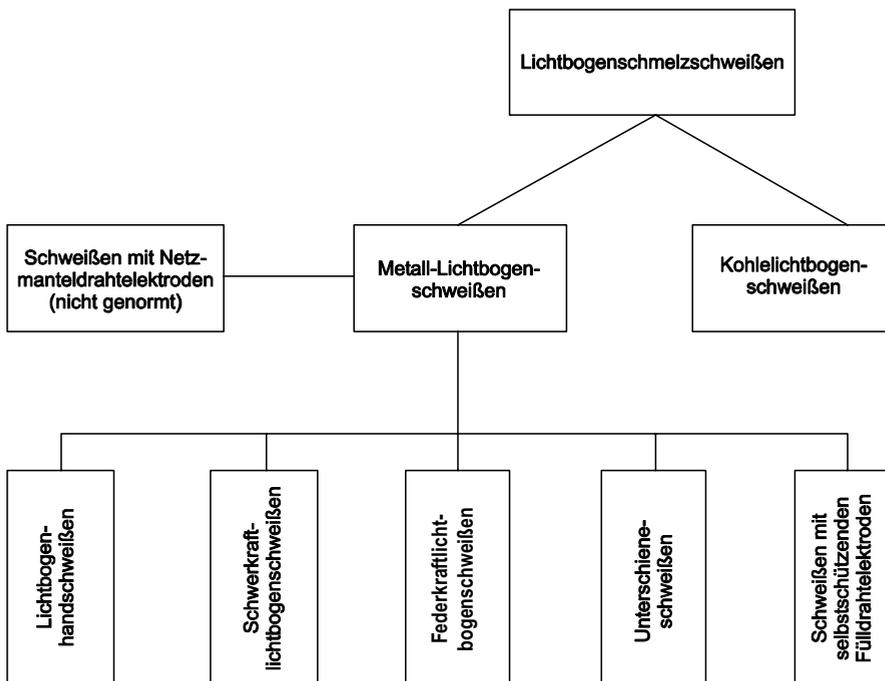
Bindefehler treten im Bereich der Schmelzlinie, d. h. im Übergang vom Schmelzgut zum Grundwerkstoff auf. Ursächlich für ihre Entstehung kann eine zu geringe Wärmeeinbringung oder eine falsche Brennerführung sein, die eine einseitige Erwärmung bzw. einen zu großen Flammenabstand zur Folge hat.

Beim Gasschmelzschweißen können im Wurzelbereich verschiedene Fehler auftreten. Zu nennen ist einmal die nicht durchgeschweißte Wurzel, die durch einen zu engen Wurzelspalt oder eine zu kleine Schweißöse bedingt sein kann. Eine durchhängende Wurzel tritt u. U. auf, wenn die Nachlinksschweißung bei einem zu dicken Blech angewandt wird. (Weitere Hinweise siehe Anhang 18.1.)

2.2 Metall-Lichtbogenschweißen (11)

Das Metall-Lichtbogenschweißen umfasst mehrere Verfahrensgruppen, wie sie in **Tabelle 2-5** dargestellt sind. DIN 1910 definiert diese Prozesse wie folgt: Der Lichtbogen brennt zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstoff. Gegen die Atmosphäre wird nur durch Schlacken und/oder Schutzgase geschützt, die von der Elektrodenumhüllung oder einem Pulver stammen. Gemeinsam ist allen diesen Prozessen die Verwendung des Lichtbogens als Energiequelle.

Tabelle 2-5 Die Verfahren des Metall-Lichtbogen-Schweißens (nach Killing)



2.2.1 Die Vorgänge im Lichtbogen

Beim Lichtbogen handelt es sich um eine Bogenentladung zwischen zwei Elektroden in einem Gas durch Ionisation der Gasmoleküle. In der Regel ist die atmosphärische Luft ein schlechter Leiter für den elektrischen Strom. Wird der Abstand zwischen den Elektroden jedoch klein und die angelegte Spannung hoch, so kann es zu einer Gasentladung, d. h. der Bildung eines Lichtbogens kommen.

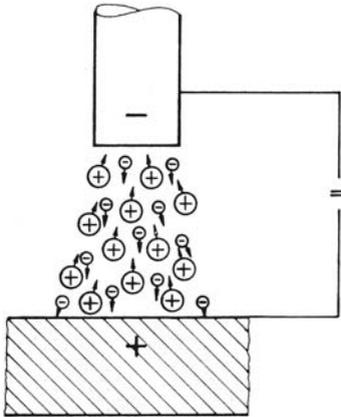


Bild 2-8 Der Stromfluss im Gleichstromlichtbogen

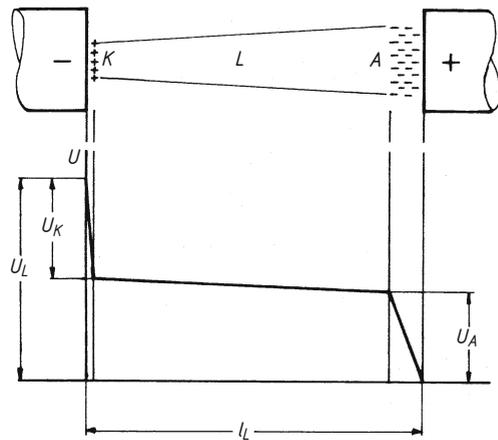


Bild 2-9 Der Spannungsverlauf im Lichtbogen beim Schweißen mit Gleichstrom

In dem sich zwischen den ungleichnamig gepolten Elektroden aufbauenden elektrischen Feld können elektrisch geladene Teilchen in Richtung auf den gegennamigen Pol beschleunigt werden. Wichtig sind in diesem Zusammenhang Elektronen, die als fast masselose negativ geladene Teilchen sehr stark beschleunigt werden und damit in der Lage sind, Energie zu transportieren. Bei ihrer auf die Anode gerichteten Bewegung treffen sie mit hoher Energie auf Gasmoleküle, die sich bei diesem Zusammenstoß in die sie bildenden Atome zerlegen. Diese können wieder ionisiert werden. Die positiven Ionen bewegen sich zur Kathode, die negativ geladenen Ionen und die aus der Atomhülle herausgeschlagenen Elektronen entsprechend zur Anode. Auf ihrem Weg zur Anode können die Elektronen durch solche Stoßvorgänge wieder Gasmoleküle ionisieren, so dass die Zahl der Ladungsträger exponentiell anwächst. Ein so durch Ionisation zum elektrischen Leiter gewordenen Gas wird auch als Plasma bezeichnet. Wie in **Bild 2-8** dargestellt, wird im so gebildeten Lichtbogen in beiden Richtungen Ladungen transportiert.

Dieser Vorgang, die Stoßionisation, ist in erster Linie für die Bildung des Lichtbogens von Bedeutung. Für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens sind weitere physikalische Vorgänge maßgebend. Im Wesentlichen sind es die Feldemission und die Glühemission. Unter der Feldemission versteht man den Austritt von Elektronen aus den Metallen aufgrund eines anliegenden elektrischen Felds. Die auch ohne Feld die Oberfläche dünn belegenden Elektronen werden beim Anlegen eines Feldes abgezogen und in Richtung auf die Anode beschleunigt, wodurch aus dem Metall neue Elektronen austreten können. Die Zahl der so emittierten Elektronen ist von der Höhe der angelegten Spannung abhängig. Wird einem Metall thermische Energie zugeführt, so kommt es ebenfalls zum Austritt von Elektronen aus der Oberfläche; dieser Effekt wird als Glühemission bezeichnet. Dabei muss die materialabhängige Austrittsarbeit überwunden werden, die aber bei den meisten Metallen selbst bei Temperaturen im Bereich des Schmelzpunktes nicht erreicht wird. Aus statistischen Betrachtungen kann jedoch abgeleitet werden, dass bei jeder Temperatur Elektronen vorhanden sind, deren Energie höher als die Austrittsarbeit ist. Damit kann bei den üblichen Lichtbogentemperaturen davon ausgegangen werden, dass die Glühemission zur Erhaltung des Lichtbogens beiträgt.

Im Lichtbogen fällt entsprechend seinem Widerstand im Stromkreis die Spannung ab. Wie **Bild 2-9** zeigt, ist dieser Spannungsabfall nicht kontinuierlich, vielmehr sind drei Bereiche zu unterscheiden.

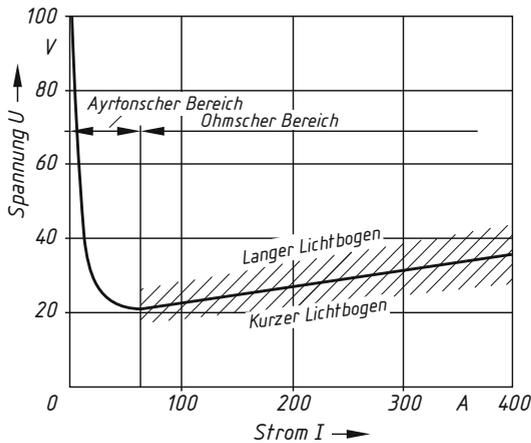


Bild 2-10
Die Lichtbogenkennlinie

Vor der Kathode wie auch der Anode bildet sich eine dünne Schicht ungleichmäßig gepolter Teilchen. Zwischen diesen Ladungsträgern und den Oberflächen der Elektroden entsteht so ein Spannungsgefälle mit großem Gradienten, das als Kathoden- bzw. Anodenfall bezeichnet wird. Der größte Teil des Spannungsabfalls entfällt auf diese beiden Bereiche. Der Abfall im Lichtbogenplasma selbst erfolgt linear und ist im Verhältnis zu Kathoden- und Anodenfall gering. Aus dem Spannungsverlauf in der Lichtbogensäule kann abgeleitet werden, dass mit der Länge des Lichtbogens auch die Lichtbogenspannung zunimmt. Der Lichtbogen ist somit ein beweglicher Teil des Schweißstromkreises; er folgt demgemäß den physikalischen Gesetzen, die für stromdurchflossene Leiter gelten.

Für die Beschreibung des Lichtbogenverhaltens ist die Lichtbogenkennlinie von Bedeutung, die den Zusammenhang von Lichtbogenspannung und Lichtbogenstrom wiedergibt. In **Bild 2-10** sind deutlich zwei Bereiche zu erkennen. Von untergeordneter Bedeutung für das Schweißen ist der Spannungsabfall bei kleinen Stromstärken, der so genannte Ayrton'sche Bereich. Für das Schweißen wird der durch ein lineares Ansteigen der Spannung mit zunehmender Stromstärke gekennzeichnete Ohmsche Bereich verwendet.

Wie bereits erwähnt, ist die Spannung im Lichtbogen je nach Länge des Lichtbogens verschieden. Bei konstanter Stromstärke erhält man also unterschiedliche Lichtbogenspannungen. Aus der Abbildung ist zu entnehmen, dass ein langer Lichtbogen bei gleicher Stromstärke eine höhere Spannung aufweist als ein kurzer.

Die Temperaturverteilung im Lichtbogen ist nicht einheitlich; sie ist zudem von der Art des Bogens und der Beschaffenheit des Plasmas abhängig. Im Plasma selbst treten beim Schweißen mit Metallelektroden Temperaturen um 5000 K auf, beim WIG-Schweißen über 10 000 K. Die höhere Temperatur wird an der Anode gemessen, da hier durch das Auftreffen der energiereichen Elektronen eine zusätzliche Erwärmung eintritt.

Das Lichtbogenschweißen kann grundsätzlich sowohl mit Gleichstrom als auch mit Wechselstrom erfolgen. Am günstigsten ist das Schweißen mit Gleichstrom. Durch die konstante Spannung bei unveränderter Polung brennt der Lichtbogen über längere Zeit, womit günstige Voraussetzungen für die Bildung der Ladungsträger und die Ionisation bei allen Verfahren gegeben sind.