

Hans J. Fahrenwaldt
Volkmar Schuler

**Praxiswissen
Schweißtechnik**

Aus dem Programm

Fertigungstechnik

Vieweg Handbuch Maschinenbau

herausgegeben von A. Böge

Kleben – erfolgreich und fehlerfrei

von G. Habenicht

Spanlose Fertigung: Stanzen

von W. Hellwig

Werkzeugmaschinen Grundlagen

von A. Hirsch

Praxis der Montagetechnik

von P. Konold und H. Reger

Coil Coating

von B. Meuthen und A.-S. Jandel

Industrielle Pulverbeschichtung

von J. Pietschmann

Praxis der Umformtechnik

von H. Tschätsch

Praxis der Zerspantechnik

von H. Tschätsch

Hans J. Fahrenwaldt
Volkmar Schuler

Praxiswissen Schweißtechnik

Werkstoffe, Prozesse, Fertigung

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 555 Abbildungen und 141 Tabellen

Unter Mitarbeit von Herbert Wittel
und Jürgen Twdrek

Vieweg Praxiswissen



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

1. Auflage Oktober 2003
2., überarbeitete und erweiterte Auflage Dezember 2006

Alle Rechte vorbehalten
© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Lektorat: Thomas Zipsner

Der Vieweg Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.vieweg.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.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de
Technische Redaktion: Andreas Meißner, Wiesbaden
Druck und buchbinderische Verarbeitung: Wilhelm & Adam, Heusenstamm
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN 978-3-87155-970-9
ISBN 978-3-8348-0194-4

Vorwort

Im Maschinen- und Apparatebau wie auch im Bauwesen 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 sind manche älteren Verfahren in den Hintergrund getreten und durch wirtschaftlichere verdrängt worden. Somit hat sich das Spektrum der Fügeverfahren 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 1. 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. Einige Kapitel, wie das Laserschweißen und das Metallkleben, wurden vollständig überarbeitet, andere, beispielsweise Auftragschweißen, Schweißbeignung der Werkstoffe und Berechnungsverfahren im Maschinenbau, stark erweitert. Die Kapitel zur anforderungs- und anwendungsgerechten Gestaltung wurden weitgehend neu aufbereitet und mit vielen Bildern ausgeführter Lösungen aus der Praxis ergänzt. Die Qualitätssicherung unterliegt aufgrund der weltweiten Harmonisierung (z. B. Schweißerprüfungen) ständigen Veränderungen, weshalb das Kapitel 17 nur den aktuellen Stand 2006 darstellt. Bekanntgewordene Fehler wurden korrigiert.

Die Gliederung des Inhalts in der 1. Auflage 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 Schweißbeignung 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 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.

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 wurde in der Neuauflage die Auflistung der einschlägigen Normen und Regelwerke auf die wichtigsten Dokumente beschränkt.

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 Fügetechnik befasst sind. Aber auch Studierende, die im Rahmen von wissenschaftlichen Arbeiten weiterführende Informationen benötigen, werden das Buch mit Gewinn einsetzen 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 haben sie zu danken Herrn Dipl.-Ing. H. Wittel, der das Kapitel 12 ergänzt hat, und Herrn Dipl.-Ing. J. Twrdek für die Ergänzungen in den Kapiteln, die sich mit der Gestaltung befassen. Herrn Dipl.-Ing. Peter Heinrich von der Firma Linde AG danken wir für die Überarbeitung des Beitrags zum Thermischen Spritzen.

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

Stuttgart/Ulm, im November 2006

*Hans Joachim Fahrenwaldt
Volkmar Schuler*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
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 (ASI 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)	107
5	Metallkleben (von H. J. Fahrenwaldt).....	115
6	Fügen durch Umformen (von H. J. Fahrenwaldt).....	125
7	Kunststoffschweißen (von H. J. Fahrenwaldt)	131
8	Auftragschweißen und Thermisches Spritzen	141
	(von H. J. Fahrenwaldt/ P. Heinrich)	
8.1	Auftragschweißen	141
8.2	Thermisches Spritzen.....	147
8.3	Verfahren des Thermischen Spritzens.....	148
8.4	Wirtschaftlichkeit des Thermischen Spritzens als Beschichtungsverfahren....	157
8.5	Beispiele wirtschaftlicher Einsätze und Anwendungen.....	158
9	Thermisches Trennen (von H. J. Fahrenwaldt)	163
10	Flammrichten (von V. Schuler/J. Twrdek).....	175
11	Werkstoffe und Schweißen (von H. J. Fahrenwaldt).....	185
11.1	Stahl und Eisen	185
11.1.1	Die Beeinflussung des Grundwerkstoffs durch das Schweißen.....	185
11.1.2	Allgemeine Baustähle nach EN 10 025.....	192
11.1.3	Schweißgeeignete Betonstähle.....	195
11.1.4	Feinkornbaustähle.....	195
11.1.5	Niedriglegierte Stähle	199
11.1.6	Hochlegierte Stähle	199

11.1.7	Eisen–Kohlenstoff–Gusswerkstoffe	203
11.1.8	Schweißverbindungen von unterschiedlichen Metallen	208
11.2	Nichteisenmetalle	210
11.2.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen	210
11.2.2	Kupfer und Kupferlegierungen	216
11.2.3	Nickel und Nickellegierungen	219
11.2.4	Titan und Titanlegierungen	222
11.2.5	Molybdän und Molybdänlegierungen	224
11.2.6	Magnesium und Magnesiumlegierungen	225
12	Schweißnahtberechnung (von H. Wittel)	231
12.1	Abmessungen der Schweißnähte	231
12.2	Berechnung der Schweißnahtspannungen	235
12.3	Festigkeitsnachweis bei vorwiegend ruhender Beanspruchung	240
12.3.1	Schweißverbindungen im Stahlbau (DIN 18800–1)	240
12.3.2	Allgemeiner Spannungsnachweis im Kranbau (DIN 15018–1)	247
12.4	Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen	249
12.4.1	Wöhlerlinie	249
12.4.2	Dauerfestigkeitsschaubilder	251
12.4.3	Spannungskollektive	251
12.4.4	Lebensdauerabschätzung	253
12.5	Dauerfestigkeitsnachweis für Schweißverbindungen im Maschinenbau	255
12.5.1	Dauerfestigkeitsnachweis nach DS 952	255
12.5.2	Festigkeitsnachweis nach der FKM–Richtlinie	263
12.6	Betriebsfestigkeitsnachweis für Krantragwerke nach DIN 15018	274
12.7	Nachweis der Werkstoffermüdung für Stahlbauten nach Eurocode 3	279
12.7.1	Einführung	279
12.7.2	Teilsicherheitsbeiwerte	280
12.7.3	Ermüdungsfestigkeit	281
12.7.4	Ermüdungsfestigkeitsnachweis	283
12.7.5	Berechnungsbeispiel	286
12.8	Schweißeigenspannungen und -verformungen	288
12.8.1	Entstehung von Eigenspannungen	288
12.8.2	Schrumpfungsarten	289
12.8.3	Beeinflussende Faktoren	292
12.8.4	Maßnahmen zur Verminderung von Schweißeigenspannungen	292

12.8.5	Schweißplan und Schweißplanfolgeplan.....	295
12.8.6	Abbau von Eigenspannungen.....	301
12.8.7	Auswirkungen von Schweißeigenspannungen.....	304
12.8.8	Rechnerische Berücksichtigung der Eigenspannungen	305
13	Darstellung und Ausführung von Schweißverbindungen	309
	<i>(von V. Schuler/J. Twrdek)</i>	
13.1	Zeichnerische Darstellung von Schweißnähten.....	309
13.2	Stoßarten, Fugenformen und deren Auswahl	320
14	Anforderungsgerechte Gestaltung von Schweißkonstruktionen	325
	<i>(von V. Schuler/J. Twrdek)</i>	
14.1	Beanspruchungsgerechte Gestaltung.....	325
14.1.1	Statisch und dynamisch beanspruchte Bauteile.....	326
14.1.2	Biege- und verdrehsteife Konstruktionen.....	330
14.1.3	Zug- und druckbeanspruchte Stäbe	332
14.1.4	Vibrationsgerechte Gestaltung	334
14.1.5	Vakuumgerechte Gestaltung	338
14.2	Fertigungsgerechte Gestaltung.....	340
14.3	Werkstoffgerechte Gestaltung.....	353
14.3.1	Nahtvorbereitung und Fugenform	353
14.3.2	Gestaltung bei Oberflächenbeschichtungen	354
14.3.3	Verbindungen an plattierten Blechen.....	357
14.3.4	Mischverbindungen.....	360
14.3.5	Verminderung der Terrassenbruchneigung	363
14.4	Korrosionsgerechte Gestaltung	365
14.5	Prüfgerechte Gestaltung.....	370
14.6	Instandsetzungsgerechte Gestaltung.....	373
14.6.1	Allgemeines zu Instandsetzung	373
14.6.2	Riegeln.....	377
14.6.3	Auftragsschweißen.....	378
14.7	Mechanisierungs-/Automatisierungsgerechte Gestaltung.....	381

15 Anwendungsgerechte Gestaltung von Schweißkonstruktionen389*(von V. Schuler/J. Twrdek)*

15.1	Stahlbau – Trägergestaltung und Trägeranschlüsse	389
15.1.1	Tragwerke	389
15.1.2	Vorschriften	389
15.1.3	Werkstoffe.....	390
15.1.4	Schweißzusätze	390
15.1.5	Halbzeuge	391
15.1.6	Herstellung.....	391
15.1.7	Grundsätze für die Konstruktion	392
15.1.8	Vollwandträger.....	392
15.1.9	Aussteifungen.....	397
15.1.10	Fachwerkträger	399
15.1.11	Hohlprofilkonstruktionen.....	403
15.1.12	Rahmenecken.....	404
15.1.13	Trägeranschlüsse.....	405
15.2	Behälter-, Apparate-, Druckgefäße-, Tank- und Rohrleitungsbau.....	407
15.2.1	Vorschriften	407
15.2.2	Herstellung.....	409
15.2.3	Werkstoffe.....	409
15.2.4	Schweißzusätze	411
15.2.5	Allgemeine Gestaltungsregeln.....	411
15.2.6	Nahtformen und Schweißnahtvorbereitungen	414
15.2.7	Flanschanschlüsse	415
15.2.8	Rohrverbindungen.....	419
15.2.9	Stützenanschlüsse.....	422
15.2.10	Kompensatoren	424
15.2.11	Mäntel, Böden und Doppelmäntel für Behälter, Apparate und Tanks ..	425
15.2.12	Halbrohre zum Anschweißen an Behälter.....	432
15.2.13	Einschweißen von Rohren in Rohrböden.....	433
15.2.14	Rauchgasdichte Rohrwände	434
15.2.15	Bestiften (Bolzenschweißung) an leeren Rohren	435
15.3	Gestaltung von Maschinenelementen.....	436
15.3.1	Allgemeine Gestaltungsregeln.....	436
15.3.2	Hebel, Stangen und Gabeln.....	436
15.3.3	Drehende Maschinenteile.....	439
15.4	Gestaltung im Fahrzeugbau.....	440
15.5	Schweißen und Löten im Luft- und Raumfahrzeugbau	458

15.6	Schweißen in Feinwerktechnik und Elektronik	468
16	Wirtschaftlichkeitsüberlegungen (von V. Schuler/J. Twrdek)	479
17	Qualitätssicherung (von V. Schuler/J. Twrdek)	485
17.1	Schweißtechnische Qualitätsanforderungen und Schweißaufsicht	486
17.2	Schweißen in gesetzlich geregelten Bereichen	490
17.3	Schweißnaht – Verfahren und Möglichkeiten der Prüfung	495
17.4	Fehlertoleranzen und Unregelmäßigkeiten von Schweißverbindungen	505
17.5	Schulung und Prüfung von Schweißern und Bedienern von Schweißeinrichtungen	516
17.6	Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz (GABS)	527
18	Anhang (von H. J. Fahrenwaldt)	535
18.1	Tabellen und Diagramme	535
18.2	Normen in der Schweißtechnik	609
	Sachwortverzeichnis	621

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 Problemkreis 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.

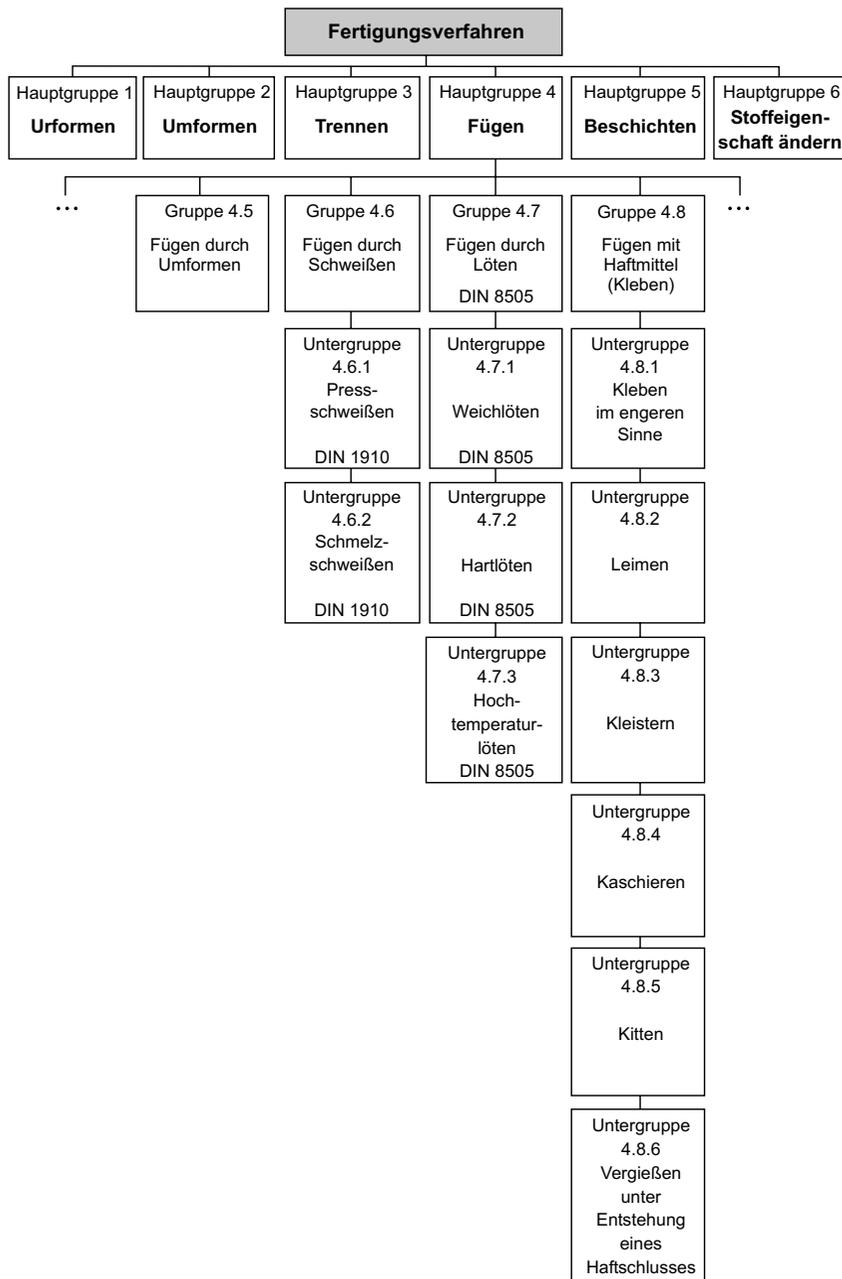


Bild 1-1 Einordnung des „Fügens“ in die Verfahren der Fertigungstechnik (nach DIN 8593)

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:

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

miteinander verknüpft.

Die Schweißneigung 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 Fügeile 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 Übersicht über die wichtigsten Schweißprozesse

Verfahren	Kennzahl ISO4063	Kurzzeichen	Abschmelzleistung [kg/h]	Leistungsdichte [W/cm ²]	Schweißgeschw. [m/min]	Blechdickenbereich [mm]	Aufmischungsgrad m. GW [%]	Erforderl. Handfertigkeit	Automatisierbarkeit	Thermischer Wirkungsgrad	Baustellentauglichkeit	Anlagenkosten	Bemerkung
												[T€]	
Gasschmelzschweißen	3	G	0,1-1,0	10 ³	0,03-0,15	0,5-8,0	5-30	s.groß	keine	40-50	s.gut	0,5	
Lichtbogenhand-schweißen	111	E	0,2-4,0	10 ⁴	0,15-0,3	1-100	15-40	groß	keine	50-60	s.gut	2-4	
Unterpulverschweißen, Erdraht	121	UP	4-16	10 ⁶	0,3-1	3-100	40-60	keine	s.gut	85-95	bedingt	20-30	
Unterpulverschweißen, Band	122	UP	2-4	10 ³	0,2-0,4	10-100	5-8	keine	s.gut	90	bedingt	25	
MSG, Massivdraht	131/135	MIG/MAG	1-8	10 ⁵	0,2-1,8	0,6-100	25-35	mäßig	s.gut	70	gut	10-30	a Maß 6...8 in einer Lage möglich
MSG, Fülldraht	136	MIG	3-15	10 ⁵	0,2-1,5	0,6-100	15-30	mäßig	s.gut	60	s.gut	10-30	
MSG, Hochleistungsschweißen		MAG	10-20	10 ⁵	0,5-6	0,6-100	25-35	groß	s.gut	70	bedingt	14-16	
Wolfram-Inertgasschweißen	141	WIG	0-0,6	10 ⁴	0,1-0,3	0,1-7	bis 100	groß	gut	60	bedingt	4-10	Engspalt-schweißen möglich
Mikro-WIG-Schweißen	141	WIG	0-0,1	10 ⁴	0,02-0,8	0,02-0,8	bis 100	s.groß	gut	60	bedingt	6	
WIG-Schweißen mit Kaltdrahtzusatz	141	WIG	0,8-1,5	10 ⁴	0,1-0,4		15-25	keine	gut	50	bedingt	8-15	
WIG-Schweißen mit Heißdraht	141	WIG		10 ⁴			15-25	keine	gut		bedingt	10-18	
WIG-Orbitalschweißen	141	WIG		10 ⁴			bis 100	keine	s.gut		gut	1,5-35	

Tabelle 1-1 Fortsetzung

Verfahren	Kennzahl ISO4063	Kurzzeichen	Abschmelzleistung [kg/h]	Leistungsdichte [W/cm ²]	Schweißgeschw. [m/min]	Blechdickenbereich [mm]	Aufmischungsgrad m. GW [%]	Erforderl. Handfertigkeit	Automatisierbarkeit	Thermisch. Wirkgrad	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	Keine	65	bedingt	7-8	
Mikroplasmawhweißen	15	WP	0-0,1	10 ⁶		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 Kaltleitzufuhr	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	
Elektrotagsschweißen	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	0,5-200	100	keine	s.gut		keine	300-1000	
Hochfrequenzschweißen		HF	0	0	21-175	1,5-16	100	keine	s.gut		keine	700-2000	

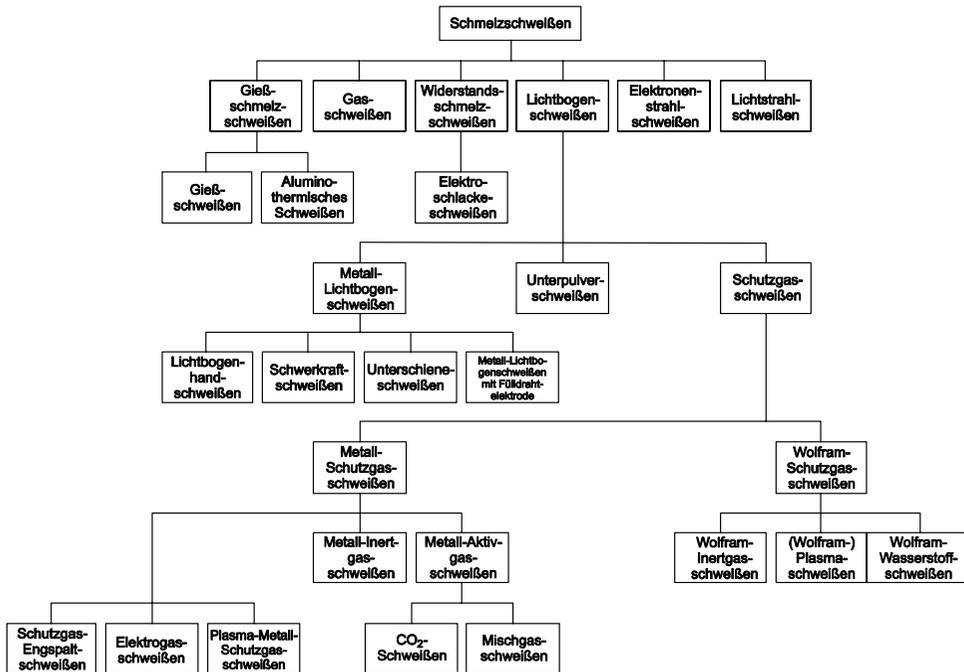
Tabelle 1-1 Fortsetzung

Verfahren	Kennzahl ISO4063	Kurzzeichen	Abschmelzleistung [kg/h]	Leistungsdichte [W/cm ²]	Schweißgeschw. [m/min]	Blechdickenbereich [mm]	Aufmischungs-Grad m. GW	Erforderl. Handfertigkeits-Grad m. Keit	Automatisierbarkeit	Thermisch. Wirkgrad	Baustell-tauglichkeit	Anlagenkosten	Bemerkung
[T€]													
Widerstandspunktschweißen	21	RP	0	10 ⁵	0	0,2-8 (20)	100	mäßig	s. gut	75	bedingt	15-100	
Widerstandsbuckelschweißen	23	RB	0	10 ⁴	0	0,5-10	100	keine	s. gut	70	keine	15-100	
Widerstands-Rollennahtschweißen	22	RR	0	10 ⁴	0,4-6	0,3-3	100	keine	s. gut	65	keine	30-200	
Widerstands-Pressstumpfschweißen	25	RPS	0	10 ⁵	0	A=200mm ²	100	keine	s. gut	65	keine	30-100	
Abbreinstumpfschweißen	24	RA	0	10 ⁴	0	A=80000mm ²	100	keine	s. gut	60	keine	30-2000	
Widerstandsbolzenschweißen Ø <10mm	782	RB0	0	10 ⁴	0	0,5-20	100	mäßig	bedingt	80	s. gut	3-10	Prozess mit Spitzenzündung
Widerstandsbolzenschweißen Ø <24mm	782	RB0	0	10 ⁴	0	3-30	100	mäßig	bedingt	85	s. gut	6-15	Prozess mit Hubzündung

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 Verfahrensguppe 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 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

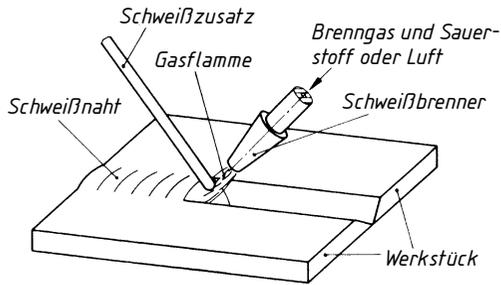
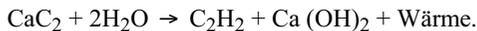


Bild 2-1
Gasschmelzschweißen
(nach DIN 1910)

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 Brennereinstellung 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 Acetylens 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 Entnahmematuren 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 3/4" 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, druckgesteuerte 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.

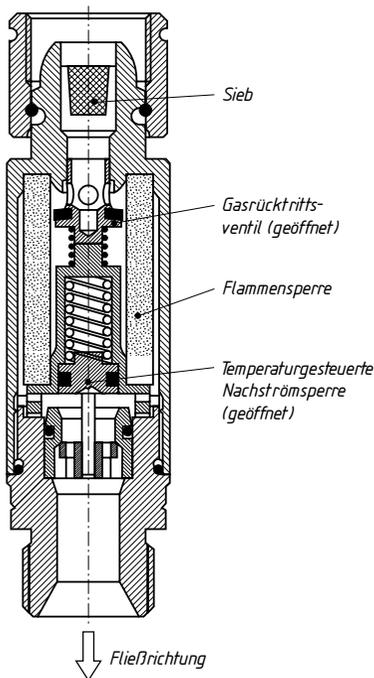


Bild 2-3

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

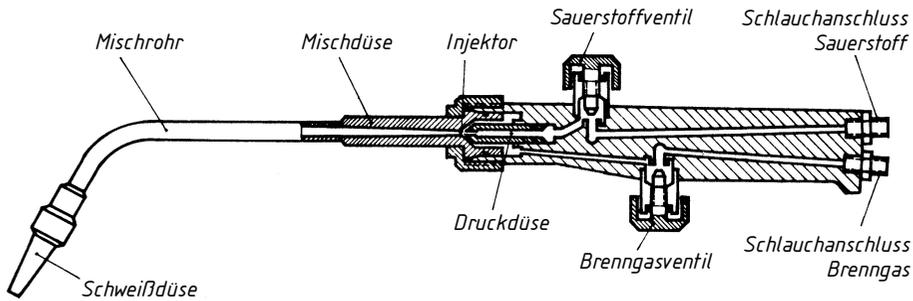


Bild 2-4 Schnittzeichnung eines Schweißbrenners nach dem Injektorprinzip. Der Injektor ist nicht verstellbar und gehört zum Brenneinsatz

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 Schweißersatz 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 Schweißersatz (Mischrohr, Mischdüse und Injektor) ausgewechselt werden.

Der Gasverbrauch richtet sich nach dem Schweißersatz, 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.

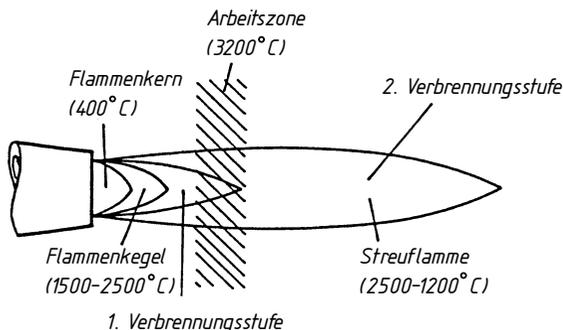


Bild 2-5

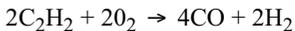
Zoneneinteilung und Temperaturen in einer neutral eingestellten Acetylen-Sauerstoff-Flamme

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		
Rohrstaahl 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

* Schweißbeignung nicht garantiert

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

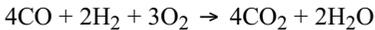


Kohlenmonoxid und Wasserstoff, die Produkte der unvollständigen Verbrennung der 1. Stufe werden in der 2. Verbrennungsstufe mit dem der Umgebung entzogenen Sauerstoff verbrannt.

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 Flammenkegel. 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-violetterem Aussehen und spitzem Flammenkegel. Bereits in der 1. Verbrennungsstufe tritt hier eine vollständige Verbrennung auf.

1. Stufe: $4\text{O}_2 + 2\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2$
2. Stufe: $4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Damit fehlt die reduzierende und temperaturerhöhende Wirkung der Verbrennung des CO. Kennzeichnend für diese Flammeneinstellung sind beim Schweißen von Stahl eine raue Nahtoberfläche und Schlackeneinschlüsse in der Naht. Verwendet wird diese Flammeneinstellung 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, verschwommenem 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: $\text{O}_2 + 2\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2 + 2\text{C}$
2. Stufe: $2\text{CO} + 2\text{H}_2 + 2\text{C} + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{C}$

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

eisen, 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.

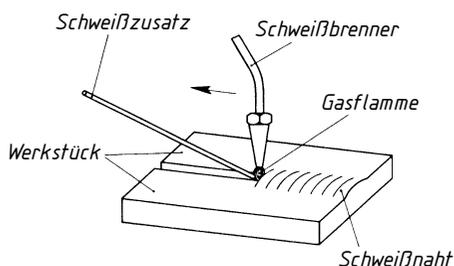


Bild 2-6
Nachlinks-Schweißen
(nach DIN 1910)

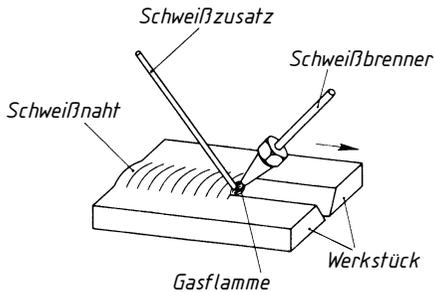


Bild 2-7
Nachrechts-Schweißen
(nach DIN 1910)

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.

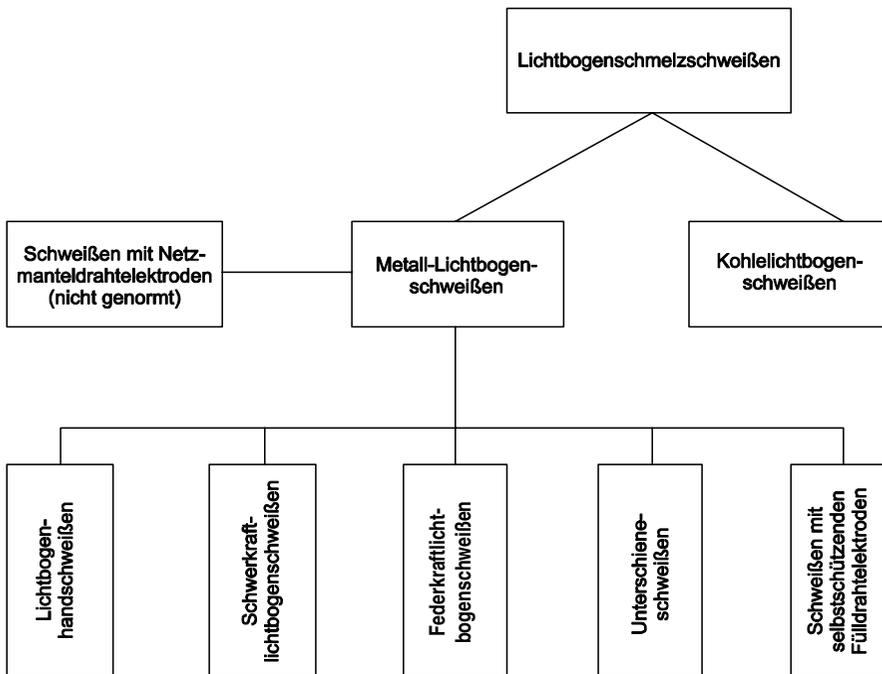
Bindefehler treten im Bereich der Schmelzlinie, d. h. im Übergang vom Schmelzgut zum Grundwerkstoff auf. Ursächlich für ihre Entstehung kann eine zu geringe Wärmeeinbringung oder eine falsche Brennerführung sein, die eine einseitige Erwärmung bzw. einen zu großen Flammenabstand zur Folge hat.

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.

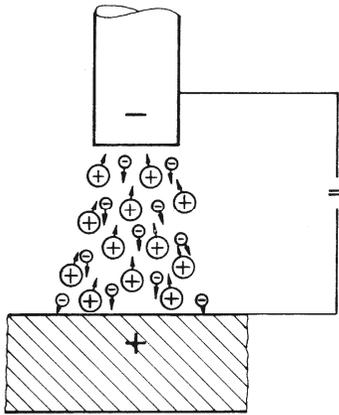


Bild 2-8 Der Stromfluss im Gleichstromlichtbogen

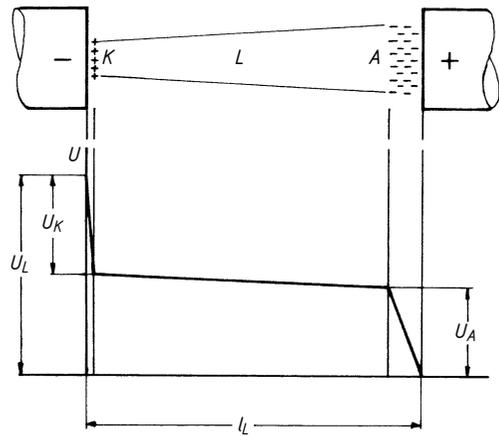


Bild 2-9 Der Spannungsverlauf im Lichtbogen beim Schweißen mit Gleichstrom

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.