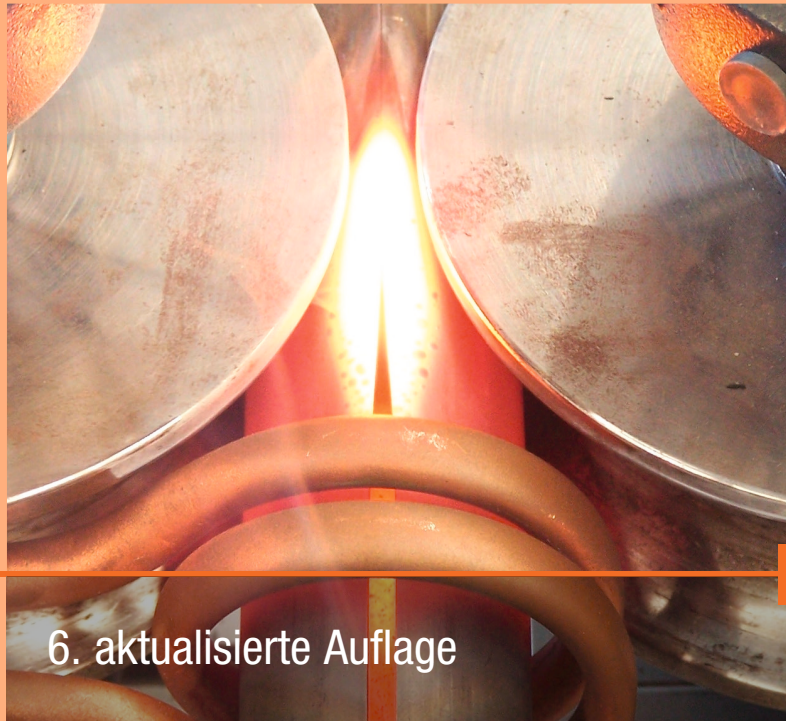


Klaus-Jürgen Matthes
Werner Schneider (Hrsg.)

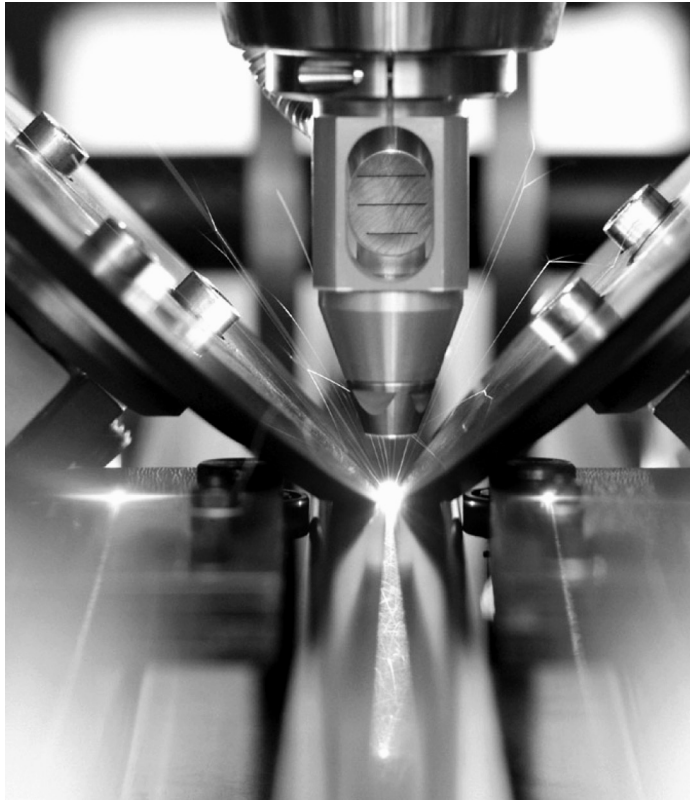
Schweißtechnik

Schweißen von metallischen
Konstruktionswerkstoffen



HANSER

Matthes/Schneider (Hrsg.)
Schweißtechnik



Klaus-Jürgen Matthes
Werner Schneider (Hrsg.)

Schweißtechnik

Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen

6., aktualisierte Auflage

Mit 497 Bildern, 95 Tabellen und 21 Tafeln



Fachbuchverlag Leipzig

im Carl Hanser Verlag

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Matthes
Dr.-Ing. Werner Schneider
Institut für Füge- und Montagetechnik
Technische Universität Chemnitz

Autoren:

Dr.-Ing. Marcel Todtermuschke (Kapitel 1 und 2)
Dr.-Ing. Mario Kusch (Kapitel 3.1 bis 3.7, 3.10, 3.11, 3.14, 3.15)
Dr.-Ing. Stefan Thurner (Kapitel 3.7 bis 3.11)
Dr.-Ing. Heiko Lang (Kapitel 4)
Dr.-Ing. Werner Schneider (Kapitel 5 und 6)
Dipl.-Ing. Holger Letsch (Kapitel 7)
Dr.-Ing. habil. Dietmar Schober (Kapitel 3.12, 3.13, 4.4, 8 bis 11)

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.

ISBN 978-3-446-44561-1
E-Book-ISBN 978-3-446-44554-3

Einbandbild: TU Chemnitz, Bild Seite 2: TRUMPF GmbH + Co. KG

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 dürfen.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag
© 2016 Carl Hanser Verlag München
www.hanser-fachbuch.de
Lektorat: Ute Eckardt
Herstellung: Katrin Wulst
Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig
Druck und Bindung: Kösel, Krugzell
Printed in Germany

Vorwort

Die schweißtechnische Ausbildung hat in Chemnitz eine langjährige Tradition. Ab dem Jahr 1922 erfolgte eine theoretische und praktische Ausbildung in den Hörsälen und Laborräumen der damaligen Höheren Technischen Lehranstalt. Es wurden die ersten schweißtechnischen Lehrgänge in Verfahrenstechniken des Gas- und Lichtbogenschweißens durchgeführt und Schweißerprüfungen abgenommen. Dieser Tradition fühlen sich die Herausgeber und Autoren verpflichtet.

Forschung, Entwicklung und Anwendung des Schweißens und verwandter Verfahren haben große volkswirtschaftliche Bedeutung. Geschweißte Bauteile finden wir sowohl im Maschinen-, Apparate- und Stahlbau als auch im Automobil-, Schiff- und Flugzeugbau sowie in vielen weiteren technischen Produkten. Die fortschreitende Automatisierung in der Schweißtechnik ermöglicht u. a. auch eine umfassende fertigungstechnische Nutzung physikalischer und chemischer Effekte zum örtlich begrenzten Energieeintrag (Wärme und/oder Druck). Diese unterschiedlichen physikalischen und chemischen Effekte und ihre Kombinationen bilden die Grundlage für die Gliederung dieses Buches und der Verfahrensbeschreibungen.

Neben den theoretischen Grundlagen werden die Schweißverfahren vorgestellt und ihre Anwendungsgebiete aufgezeigt. Schwerpunkte bei den einzelnen Verfahren sind:

- Wirkprinzipien und gerätetechnische Umsetzung,
- Verfahrensmerkmale und Anwendungen,
- Merkblätter und Fachnormen,
- Verfahrensprinzip und Anlagentechnik,
- Verfahrensvarianten,
- Zusatzwerkstoffe,
- Schweißbeignung,
- Gestaltungs- und Fertigungshinweise,

- Qualitätsmerkmale, Gütesicherung und Prüfverfahren sowie
- Arbeits- und Gesundheitsschutz.

Schweißen dient dazu, eine Schweißverbindung oder eine geschweißte Beschichtung herzustellen. Voraussetzung für eine qualitätsgerechte Ausführung ist die Berücksichtigung der Einflussfaktoren auf die Schweißbarkeit. Diese Einflussfaktoren umfassen sowohl die konstruktive Gestaltung und die stofflichen Gegebenheiten des zu schweißenden Produkts als auch die fertigungstechnischen Bedingungen. Die fachkundige Ausführung des Schweißvorganges kann nur dann zur qualitätsgerechten Verbindungen führen, wenn das Vorbereiten der Fugestelle und das Nachbereiten sowie Kontrollieren der Verbindung mit Sorgfalt und Umsicht ausgeführt werden. Eine komplexe Berücksichtigung der verschiedenen Einflüsse ist im realen Schweißprozess deshalb in jedem Fall unerlässlich.

Das vorgelegte Lehr- und Fachbuch wendet sich vor allem an Studierende des Maschinenbaus, der Produktionstechnik und der Konstruktionstechnik an Universitäten, Fachhochschulen, Berufsakademien und Weiterbildungseinrichtungen. Es soll ihnen die Möglichkeit geben, den Lernstoff aus den Vorlesungen zu vertiefen sowie Seminare und Übungen gezielt und fundiert vorzubereiten. Natürlich bietet es auch Studienbewerbern die Möglichkeit, sich über das Wissensgebiet „Schweißen und verwandte Verfahren“ umfangreich zu informieren. Nicht zuletzt wird es zur Auffrischung und als Nachschlagewerk für in der Praxis tätige Ingenieure und interessierte Leser nutzbar sein.

Das Buch präsentiert den aktuellen Stand des Fachgebietes und der Fachnormen. Die systematische Gliederung des Buches und die annähernd 800

Begriffe des Sachwortverzeichnisses geben dem Nutzer eine klare Orientierung und ermöglichen ein schnelles Auffinden der gesuchten Texte, Tafeln und Bilder.

Bei der vollständig überarbeiteten 5. Auflage dieses Buches haben neue, sehr fachkompetente Autoren mitgewirkt. In der nun vorliegenden 6. Auflage wurden in erster Linie Aktualisierungen von Normen, Fehlerkorrekturen sowie einige Ergänzungen vorgenommen.

Wir wünschen den Lesern, dass sie die Antworten auf ihre Fragen zu den Schweißverfahren finden und dass trotz der Fülle des Stoffs Klarheit und Verständnis dominieren.

Den Autoren und allen, die an der Fertigstellung dieses Fachbuches maßgeblich mitgearbeitet haben, wird für die gute Zusammenarbeit gedankt.

Die Herausgeber

Inhalt

Vorwort	5	3	Schweißen mit Lichtbogen	64
1 Grundlagen	15	3.1	<i>Grundlagen der Lichtbogentechnik</i>	64
1.1 <i>Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580</i>	15	3.1.1	Physik des Lichtbogens	64
1.2 <i>Fügen durch Schweißen</i>	17	3.1.2	Zünden des Lichtbogens	67
1.3 <i>Wirkprinzipien beim Schweißen</i>	19	3.1.3	Betrieb des Lichtbogens	68
2 Schweißbarkeit	29	3.2	<i>Schweißstromquellen zum Lichtbogen-</i> <i>schweißen</i>	70
2.1 <i>Grundlagen und Einteilung</i>	29	3.2.1	Überblick	70
2.2 <i>Schweißbeignung von Stählen</i>	31	3.2.2	Schweißumformer	70
2.3 <i>Schweißsicherheit</i>	36	3.2.3	Schweißtransformatoren.....	71
2.3.1 <i>Konstruktive Gestaltung</i>	37	3.2.4	Schweißgleichrichter	72
2.3.2 <i>Beanspruchungszustand</i>	40	3.2.5	Schweißumrichter	75
2.3.3 <i>Regelwerke zur Auslegung von Schweißkonstruktionen</i> ..	40	3.2.6	Statische Kennlinien von Schweißstromquellen	75
2.3.4 <i>Anwendung von Finite-Elemente-Methoden zur Bemessung geschweißter Tragwerke</i>	43	3.2.7	Dynamische Eigenschaften von Schweißstromquellen.....	76
2.4 <i>Schweißmöglichkeit</i>	44	3.2.8	Regelungsprinzipien zur Arbeitspunktstabilisierung ..	77
2.4.1 <i>Grundlagen</i>	44	3.2.9	Modulationsarten bei Impulsstromquellen.....	78
2.4.2 <i>Vorbereitungen zum Schweißen</i>	45	3.2.10	Angaben auf dem Leistungsschild	79
2.4.3 <i>Durchführung des Schweißens</i>	47	3.3	<i>Schweißbrenner zum Lichtbogenschweißen</i>	81
2.4.4 <i>Nacharbeiten beim Schweißen</i>	55	3.3.1	Stabelektrodenhalter	81
2.4.5 <i>Anwendung numerischer Simulationen für die Prozessanalyse beim Schweißen</i>	55	3.3.2	Stromkontakteinrichtung zum UP-Schweißen	81
2.5 <i>Qualitätssicherung beim Schweißen</i>	56	3.3.3	Schweißbrenner mit nichtabschmelzender Elektrode.....	82
2.6 <i>Arbeitsschutz beim Schweißen</i>	59	3.3.4	Schweißbrenner mit abschmelzender Elektrode ...	84
2.7 <i>Schweißen im Produkt-, Umwelt- und Energiemanagement</i>	60	3.3.5	Bolzenschweißpistolen	85
		3.4	<i>Drahtvorschubsysteme zum Lichtbogenschweißen</i>	86
		3.4.1	Grundaufbau	86
		3.4.2	Stirnrollenantrieb.....	86
		3.4.3	Planetarantrieb.....	88

3.4.4	Bauformen mit potenzialführender Drahtelektrode	88	3.7.3.4	Schweißparameter.....	123
3.4.5	Bauformen mit nicht potenzialführender Drahtelektrode	89	3.7.4	Fehler beim Lichtbogenschweißen	124
3.4.6	Drahtrichteinheiten	90	3.7.4.1	Häufige Ursachen und Fehlerbilder	124
3.5	<i>Zusatzwerkstoffe zum Lichtbogenschweißen</i>	90	3.7.4.2	Poren	124
3.5.1	Stabelektroden.....	90	3.7.4.3	Schlackeeinschlüsse	126
3.5.2	Schweißstäbe	93	3.7.4.4	Bindefehler	126
3.5.3	Massivdrahtelektroden	95	3.7.4.5	Geometrische Unregelmäßigkeiten	126
3.5.4	Fülldrahtelektroden	98	3.7.5	Gefährdungen für den Schweißer	127
3.5.5	Schweißpulver zum UP-Schweißen.....	101	3.8	<i>Wolfram-Inertgasschweißen (Prozess 141)</i>	127
3.5.6	Schweißpulver zum Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA).....	104	3.8.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik	128
3.5.7	Schweißbolzen	104	3.8.1.1	Funktionsweise.....	128
3.6	<i>Gase zum Lichtbogenschweißen</i>	105	3.8.1.2	Schutzgase.....	129
3.6.1	Aufgaben von Schutzgasen...	105	3.8.1.3	Wolframelektroden	132
3.6.2	Eigenschaften von Schutzgasen	106	3.8.1.4	Zusatzwerkstoff	134
3.6.3	Einteilung und Bezeichnung von Schutzgasen.....	107	3.8.1.5	Schweißstromquellen und Brenner-technik.....	134
3.6.4	Herstellung von Schutzgasen	107	3.8.2	Verfahrensvarianten.....	135
3.6.5	Lieferarten und Entnahmestellen.....	109	3.8.2.1	Zünden des Lichtbogens	135
3.6.6	Kennzeichnung von Druckgasflaschen.....	110	3.8.2.2	Stromart und Polarität.....	136
3.7	<i>Lichtbogenhandschweißen (Prozess 111)</i>	111	3.8.2.3	Mechanisierungsgrad.....	139
3.7.1	Verfahrensprinzipien und Anlagentechnik.....	111	3.8.2.4	WIG-Schweißen mit Zusatzwerkstoff	139
3.7.1.1	Funktionsweise.....	111	3.8.3	Anwendung	141
3.7.1.2	Schweißstromquellen	112	3.8.3.1	Verbindungsschweißen	141
3.7.1.3	Elektrodenhalter	112	3.8.3.2	Reparaturschweißen	141
3.7.1.4	Stabelektroden.....	112	3.8.3.3	WIG-Orbitalschweißen	141
3.7.2	Anwendung	117	3.8.3.4	WIG-Punktschweißen	142
3.7.2.1	Allgemeines.....	117	3.8.3.5	WIG-Engspaltschweißen	143
3.7.2.2	Reparaturschweißen	118	3.8.3.6	WIG-Auftragschweißen	145
3.7.2.3	Auftragschweißen	118	3.8.3.7	Sonderanwendungen	145
3.7.2.4	Verbindungsschweißen	118	3.8.4	Fertigungshinweise.....	146
3.7.3	Fertigungshinweise.....	118	3.8.4.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung	146
3.7.3.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung	118	3.8.4.2	Zündvorgang	146
3.7.3.2	Zündvorgang	120	3.8.4.3	Brennerführung	147
3.7.3.3	Führen der Elektrode.....	121	3.8.4.4	Heften.....	147
			3.8.4.5	Gasschutz	148
			3.8.4.6	Richtwerte	149
			3.8.5	Fehler beim WIG-Schweißen	150
			3.8.5.1	Gaseinschlüsse	150
			3.8.5.2	Bindefehler	151

3.8.5.3	Wolframeinschlüsse.....	151	3.10	<i>Metall-Schutzgasschweißen (Prozess 13)</i>	188
3.8.5.4	Oxideinschlüsse	151	3.10.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik	189
3.8.5.5	Häufige Fehlerbilder und Ursachen	152	3.10.1.1	Funktionsweise.....	189
3.8.6	Gefährdungen für den Schweißer	154	3.10.1.2	Schutzgase.....	190
3.9	<i>Plasmaschweißen (Prozess 15)</i>	155	3.10.1.3	Zusatzwerkstoff	194
3.9.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik	156	3.10.1.4	Schweißstromquellen und Brennertechnik.....	194
3.9.1.1	Funktionsweise.....	156	3.10.2	Lichtbogenarten.....	196
3.9.1.2	Prozess- und Schutzgase.....	159	3.10.2.1	Allgemein	196
3.9.1.3	Wolframelektroden	162	3.10.2.2	Kurzlichtbogen	196
3.9.1.4	Zusatzwerkstoff	164	3.10.2.3	Übergangslichtbogen.....	197
3.9.1.5	Schweißstromquellen und Brennertechnik.....	165	3.10.2.4	Sprühlichtbogen	197
3.9.2	Verfahrensvarianten.....	168	3.10.2.5	Impulslichtbogen.....	197
3.9.2.1	Zünden des Lichtbogens	168	3.10.2.6	Hochleistungs-Kurz- lichtbogen	198
3.9.2.2	Stromart und Polarität.....	168	3.10.2.7	Instabiler Lichtbogen.....	198
3.9.2.3	Mechanisierungsgrad.....	172	3.10.2.8	Rotierender Lichtbogen	198
3.9.2.4	Plasmaschweißen mit Zusatzwerkstoff	172	3.10.2.9	Hochleistungs-Sprüh- lichtbogen	199
3.9.2.5	Schmelzbadausbildung	174	3.10.2.10	Kräfte beim Werkstoff- übergang.....	199
3.9.3	Anwendung	175	3.10.3	Verfahrensvarianten.....	201
3.9.3.1	Verbindungsschweißen	175	3.10.3.1	Hochleistungsschweißen.....	201
3.9.3.2	Plasma-Punktschweißen	175	3.10.3.2	Energiereduzierte MSG- Prozesse	205
3.9.3.3	Plasma-Auftragschweißen	177	3.10.3.3	Modifizierte MSG- Impulsprozesse.....	207
3.9.3.4	Mikroplasmaschweißen	178	3.10.3.4	MSG-Hybridprozesse	209
3.9.4	Fertigungshinweise.....	179	3.10.3.5	Zünden des Lichtbogens	210
3.9.4.1	Allgemeines.....	179	3.10.3.6	Mechanisierungsgrad.....	211
3.9.4.2	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung	180	3.10.4	Anwendung	211
3.9.4.3	Zündvorgang	180	3.10.4.1	Verbindungsschweißen	211
3.9.4.4	Brennerführung	181	3.10.4.2	MSG-Engspaltschweißen.....	212
3.9.4.5	Heften	182	3.10.4.3	MSG-Auftragschweißen.....	213
3.9.4.6	Gasschutz	182	3.10.4.4	Sonderanwendungen	214
3.9.4.7	Richtwerte	183	3.10.5	Fertigungshinweise.....	215
3.9.5	Fehler beim Plasma- schweißen.....	185	3.10.5.1	Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung	215
3.9.5.1	Gaseinschlüsse	185	3.10.5.2	Zündvorgang.....	216
3.9.5.2	Nahtunterwölbung.....	186	3.10.5.3	Brennerführung	216
3.9.5.3	Einbrandkerben.....	186	3.10.5.4	Heften	218
3.9.5.4	Oxideinschlüsse	186	3.10.5.5	Gasschutz	218
3.9.5.5	Häufige Fehlerbilder und Ursachen.....	186	3.10.5.6	Richtwerte	219
3.9.6	Gefährdungen für den Schweißer	186	3.10.6	Fehler beim MSG-Schweißen	220
			3.10.6.1	Gaseinschlüsse	220
			3.10.6.2	Bindefehler	221

3.10.6.3	Häufige Fehlerbilder und Ursachen.....	222	3.12	<i>Lichtbogenschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen.....</i>	263
3.10.7	Gefährdungen für den Schweißer	222	3.12.1	Grundlagen.....	263
3.11	<i>Unterpulverschweißen (Prozess 12).....</i>	224	3.12.2	Pressstumpfschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (Prozess 185).....	264
3.11.1	Verfahrensprinzip und Anlagentechnik.....	224	3.12.2.1	Verfahrensprinzip.....	264
3.11.1.1	Funktionsweise.....	224	3.12.2.2	Anwendungsbereiche.....	264
3.11.1.2	Schweißpulver	226	3.12.2.3	Ausrüstungen.....	264
3.11.1.3	Elektroden	241	3.12.2.4	Zusatzstoffe	265
3.11.1.4	Stromquellen und Brenner-technik	242	3.12.2.5	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	265
3.11.1.5	Stromart und Polung	242	3.12.2.6	Fertigungshinweise	265
3.11.1.6	Mechanisierungsgrad und Aufbau einer UP-Anlage.....	243	3.12.3	Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (MBS-Schweißen)	266
3.11.2	Verfahrensvarianten des Unterpulverschweißens	245	3.12.3.1	Verfahrensprinzip.....	266
3.11.2.1	Schweißpositionen	245	3.12.3.2	Anwendungsbereiche.....	266
3.11.2.2	Kaltdrahtschweißen.....	246	3.12.3.3	Zusatzstoffe	266
3.11.2.3	Bandschweißen.....	246	3.12.3.4	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	266
3.11.2.4	Heißdrahtschweißen mit zwei Schweißköpfen	248	3.12.3.5	Fertigungshinweise.....	266
3.11.2.5	Paralleldrahtschweißen.....	248	3.13	<i>Lichtbogenbolzenschweißen.....</i>	267
3.11.2.6	Tandemschweißen.....	249	3.13.1	Grundlagen.....	267
3.11.2.7	Engspaltschweißen	250	3.13.2	Verfahrensprinzip.....	268
3.11.2.8	Schweißen mit Metallpulverzugabe	252	3.13.2.1	Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung (Prozess 785) ..	268
3.11.3	Anwendung des UP-Verfahrens.....	252	3.13.2.2	Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung (Prozess 786).....	268
3.11.4	Fertigungshinweise.....	253	3.13.2.3	Hubzündungs-Bolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas (Prozess 783)	269
3.11.4.1	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	253	3.13.3	Anwendungsbereiche.....	270
3.11.4.2	Fugenvorbereitung.....	253	3.13.4	Zusatzstoffe	270
3.11.4.3	Schmelzbadsicherungen.....	255	3.13.5	Fertigungshinweise.....	270
3.11.4.4	Nahtformung.....	256	3.13.6	Ausrüstungen.....	272
3.11.4.5	Freie Drahtelektrodenlänge..	257	3.14	<i>Sensorik beim Lichtbogenschweißen.....</i>	273
3.11.4.6	Werkstückneigung.....	258	3.14.1	Überblick	273
3.11.4.7	Zünden des UP-Lichtbogens.	259	3.14.2	Taktile Sensoren.....	274
3.11.4.8	Heften	259	3.14.3	Elektromagnetische Sensoren	275
3.11.4.9	Richtwerte	259	3.14.4	Lasersensoren.....	276
3.11.4.10	Leistungsvergleiche	262	3.14.5	Lichtbogensensoren.....	277
3.11.5	Fehler beim UP-Schweißen...	262			
3.11.6	Spezielle Gefährdungen durch das UP-Verfahren für den Bediener	263			

3.15	<i>Gefährdungen beim Lichtbogenschweißen</i>	279	4.3.2.4	Werkstückdicken.....	312
3.15.1	Elektrischer Strom	279	4.3.3	Ausrüstung.....	312
3.15.2	Elektromagnetische Strahlung	280	4.3.4	Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe.....	315
3.15.3	Rauch, Stäube und Gase.....	281	4.3.5	Technologische Merkmale	317
3.15.4	Sauerstoffmangel.....	282	4.3.5.1	Nachrechtsschweißen (NR)...	317
3.15.5	Spritzer und Schlacke.....	282	4.3.5.2	Nachlinksschweißen (NL).....	318
3.15.6	Druckgasflaschen.....	282	4.4	<i>Gaspressschweißen (Prozess 47)</i>	318
4	Schweißen mit Brenngas-Sauerstoff-Flamme	283	4.4.1	Verfahrensprinzip	319
4.1	<i>Grundlagen der Autogentechnik</i>	283	4.4.2	Anwendungsbereiche	320
4.1.1	Autogenflamme.....	283	4.4.3	Zusatzstoffe	320
4.1.1.1	Allgemeines.....	283	4.4.4	Fertigungshinweise.....	320
4.1.1.2	Verbrennung	284	4.4.5	Ausrüstungen.....	321
4.1.1.3	Flammeneinstellung	285	5	Schweißen mit Widerstandserwärmung	322
4.1.2	Autogenbrenner.....	287	5.1	<i>Einteilung der Widerstandsschweißverfahren</i>	322
4.1.2.1	Allgemeines.....	287	5.2	<i>Widerstandspressschweißen (Prozess 2)</i>	323
4.1.2.2	Brennerarten.....	288	5.2.1	Grundlagen des Widerstandspressschweißens.....	323
4.1.2.3	Betreiben der Autogenbrenner	291	5.2.1.1	Widerstandserwärmung durch konduktive Stromübertragung	323
4.1.2.4	Flammenstörungen.....	291	5.2.1.2	Widerstandserwärmung durch induktive Stromübertragung (Prozess 74).....	324
4.1.3	Betriebsmittel der Autogentechnik	292	5.3	<i>Ausrüstungen zum Widerstandspressschweißen</i>	324
4.1.3.1	Allgemeines.....	292	5.3.1	Aufbau einer Widerstandsschweißmaschine (konduktive Stromübertragung)..	324
4.1.3.2	Sauerstoff.....	292	5.3.1.1	Schweißstromquellen für das Punkt-, Rollennaht- und Buckelschweißen.....	325
4.1.3.3	Brenngase.....	292	5.3.1.2	Schweißstromquellen für das Abbrennstumpfschweißen und Stumpfschweißen.....	329
4.1.3.4	Gegenüberstellung von Gasen der Autogentechnik ...	302	5.3.1.3	Mechanischer Teil der Schweißeinrichtungen	330
4.1.4	Sicherheitshinweise und -vorschriften für den Umgang mit Sauerstoff und Brenngasen	303	5.3.2	Aufbau einer Widerstandsschweißmaschine (induktive Stromübertragung)	330
4.1.5	Armaturen und Zubehör	304	5.4	<i>Widerstandsschweißverfahren mit konduktiver Stromübertragung</i>	331
4.1.5.1	Allgemeines.....	304			
4.1.5.2	Druckminderer	304			
4.1.5.3	Gasschläuche	305			
4.1.5.4	Sicherheitseinrichtungen	307			
4.2	<i>Einteilung der Verfahren der Autogentechnik nach DIN 8522</i>	309			
4.3	<i>Gasschmelzschweißen (Gasschweißen)</i> ...	309			
4.3.1	Grundlagen.....	309			
4.3.2	Anwendung	312			
4.3.2.1	Allgemeines.....	312			
4.3.2.2	Fugenformen.....	312			
4.3.2.3	Schweißpositionen	312			

5.4.1	Widerstandspunkt- schweißen (Prozess 21).....	331	5.4.4.6	Qualitätsmerkmale, Gütesicherung und Prüfverfahren..	383
5.4.1.1	Verfahrensmerkmale.....	331	5.4.4.7	Schweißanlagen.....	384
5.4.1.2	Verfahrensprinzip/- beschreibung.....	332	5.4.5	Pressstumpfschweißen (Prozess 25).....	385
5.4.1.3	Elektroden.....	334	5.4.5.1	Verfahrensmerkmale.....	385
5.4.1.4	Schweißbeignung.....	337	5.4.5.2	Verfahrensprinzip/ -beschreibung.....	385
5.4.1.5	Konstruktive Gestaltung.....	341	5.4.5.3	Konstruktive Gestaltung.....	386
5.4.1.6	Fertigungshinweise.....	344	5.4.5.4	Prozessparameter.....	386
5.4.1.7	Qualitätsmerkmale, Gütesicherung und Prüfverfahren..	349	5.4.5.5	Schweißanlagen.....	386
5.4.1.8	Schweißanlagenaufbau.....	357	5.5	<i>Widerstandsschweißverfahren mit induktiver Stromübertragung.....</i>	387
5.4.1.9	Qualitätssicherungsgeräte....	359	5.5.1	Induktionsschweißen (Prozess 74).....	387
5.4.2	Rollenahtschweißen (Prozess 22).....	360	5.5.1.1	Verfahrensmerkmale.....	387
5.4.2.1	Verfahrensmerkmale.....	360	5.5.1.2	Verfahrensprinzip/- beschreibung.....	387
5.4.2.2	Verfahrensprinzip/- beschreibung.....	361	5.5.1.3	Schweißbeignung.....	389
5.4.2.3	Rollenelektroden für Nahtschweißen.....	361	5.5.1.4	Fertigungshinweise.....	389
5.4.2.4	Schweißbeignung.....	362	5.5.2	Verfahrensvarianten.....	389
5.4.2.5	Konstruktive Gestaltung.....	363	5.6	<i>Arbeits- und Gesundheitsschutz.....</i>	390
5.4.2.6	Fertigungshinweise.....	363	6	Widerstandsschmelzschweißen.....	391
5.4.2.7	Schweißanlagenaufbau.....	366	6.1	<i>Grundlagen zum Elektroschlackeschweißen (Prozess 72).....</i>	391
5.4.2.8	Verfahrensvarianten.....	368	6.2	<i>Elektroschlacke-Verbindungsschweißen..</i>	392
5.4.3	Buckelschweißen (Prozess 23).....	369	6.2.1	Zusatzwerkstoffe und Pulver	393
5.4.3.1	Verfahrensmerkmale.....	369	6.2.2	Schweißbeignung.....	393
5.4.3.2	Verfahrensprinzip/- beschreibung.....	370	6.2.3	Fertigungshinweise.....	393
5.4.3.3	Elektroden zum Buckel- schweißen.....	370	6.2.4	Schweißeinrichtungen.....	394
5.4.3.4	Schweißbeignung.....	371	6.3	<i>Elektroschlacke-Auftragschweißen mit Bandedelektrode.....</i>	395
5.4.3.5	Konstruktive Gestaltung.....	373	6.3.1	Zusatzwerkstoffe und Pulver	395
5.4.3.6	Fertigungshinweise.....	375	6.3.2	Fertigungshinweise.....	395
5.4.3.7	Qualitätsmerkmale, Gütesicherung und Prüfverfahren..	376	6.3.3	Schweißeinrichtungen.....	396
5.4.3.8	Schweißanlagen.....	376	7	Schweißen mit Strahlen.....	397
5.4.4	Abbreinstumpfschweißen (Prozess 24).....	378	7.1	<i>Grundlagen der Strahltechnik.....</i>	397
5.4.4.1	Verfahrensmerkmale.....	378	7.2	<i>Lichtstrahlschweißen – Schweißen mit inkohärentem Licht (Prozess 75).....</i>	398
5.4.4.2	Verfahrensprinzip/- beschreibung.....	380	7.3	<i>Elektronenstrahlschweißen (Prozess 51).....</i>	399
5.4.4.3	Schweißbeignung.....	380	7.3.1	Grundlagen des Elektronenstrahlschweißens.....	400
5.4.4.4	Konstruktive Gestaltung.....	381	7.3.1.1	Entstehung und Besonderheiten des Elektronenstrahls	400
5.4.4.5	Prozessparameter.....	383	7.3.1.2	Elektronenstrahlerzeugung..	401

7.3.1.3	Elektronenstrahlführung	402	7.4.6	Gegenüberstellung Elektronenstrahlschweißen - Laserstrahlschweißen	449
7.3.1.4	Elektronenstrahlschweiß- anlagen.....	403			
7.3.2	Anwendung des Elektronen- strahlschweißens.....	407	8	Schweißen durch Bewegungsenergie	452
7.3.2.1	Tiefschweißeffekt	407	<i>8.1</i>	<i>Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung kinetischer Energie.....</i>	452
7.3.2.2	Vorbereitung der Werk- stücke	409	<i>8.2</i>	<i>Rotationsreißschweißen (Prozess 42).....</i>	452
7.3.2.3	Schweißparameter und Hinweise für die Schweiß- praxis	411		8.2.1 Verfahrensprinzip	453
7.3.2.4	Schweißbeignung metal- lischer Werkstoffe	415		8.2.2 Ausrüstungen.....	454
7.3.2.5	Industrielle Anwendung	418		8.2.3 Anwendungsbereich	455
7.3.3	Weitere Verfahren der Elektronen- strahlmaterialbearbeitung....	419	<i>8.3</i>	8.2.4 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	455
7.3.4	Strahlenschutz	420		8.2.5 Fertigungshinweise.....	457
<i>7.4</i>	<i>Laserstrahlschweißen (Prozess 52).....</i>	420		<i>8.3 Rührreißschweißen (FSW - Friction Stir Welding)</i>	459
7.4.1	Grundlagen des Laserstrahl- schweißens	423		8.3.1 Verfahrensprinzip	459
7.4.1.1	Entstehung und Besonder- heiten von Laserlicht	423		8.3.2 Ausrüstungen.....	460
7.4.1.2	Eigenschaften des Laser- lichts	424		8.3.3 Anwendungsbereiche	461
7.4.2	Laseranlagen.....	425	<i>8.4</i>	8.3.4 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	462
7.4.2.1	Laserstrahlquellen	425		8.3.5 Fertigungshinweise.....	463
7.4.2.2	Laserstrahlführung	432		8.3.6 Punktreißschweißen	464
7.4.2.3	Fokussierende Optiken.....	433		8.3.6.1 Verfahrensprinzip	464
7.4.2.4	Bewegungseinrichtungen	434		8.3.6.2 Anwendungsbereiche	464
7.4.2.5	Steuerung und Bedienung....	434		<i>8.4 Ultraschallschweißen (Prozess 41)</i>	465
7.4.3	Anwendung des Laserstrahl- schweißens	435		8.4.1 Verfahrensprinzip	465
7.4.3.1	Tiefschweißeffekt	435	<i>8.5</i>	8.4.2 Anwendungsbereiche	466
7.4.3.2	Vorbereitung der Werk- stücke	436		8.4.3 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	467
7.4.3.3	Schweißparameter und Hinweise für die Schweiß- praxis	436		8.4.4 Fertigungshinweise.....	467
7.4.3.4	Schweißbeignung metal- lischer Werkstoffe	442	<i>8.6</i>	8.4.5 Ausrüstungen.....	468
7.4.3.5	Industrielle Anwendung	443		<i>8.5 Kaltpressschweißen (Prozess 48).....</i>	469
7.4.4	Weitere Verfahren der Lasermaterialbearbeitung	445		8.5.1 Verfahrensprinzip	469
7.4.5	Strahlenschutz	447		8.5.2 Anwendungsbereich und Ausrüstungen.....	470
				8.5.3 Konstruktive Gestaltung	470
				8.5.4 Fertigungshinweise.....	471
				<i>8.6 Sprengschweißen (Prozess 441).....</i>	472
				8.6.1 Verfahrensprinzip	472
				8.6.2 Anwendungsbereich	472
				8.6.3 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	474
				8.6.4 Fertigungshinweise.....	474
				8.6.5 Spezielle Gefährdungen	474

9	Schweißen durch festen Körper.....	475	10.2.1.3	Ausrüstungen.....	479
9.1	<i>Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung von Heizelementen</i>	475	10.2.1.4	Fertigungshinweise.....	480
9.2	<i>Heizelementschweißen.....</i>	475	10.2.2	Aluminothermisches Pressschweißen	481
9.2.1	Verfahrensprinzip.....	475	10.2.2.1	Verfahrensprinzip.....	481
9.2.2	Anwendungsbereich, Ausrüstungen	476	10.2.2.2	Anwendungsbereich	481
9.2.3	Konstruktive Gestaltung und Festigkeit	477	10.2.2.3	Fertigungshinweise.....	481
9.2.4	Fertigungshinweise.....	477	10.3	<i>Besondere Gefährdungen.....</i>	482
10	Schweißen mit Metallschmelzen	478	11	Schweißen durch Diffusion.....	483
10.1	<i>Grundlagen der schweißtechnischen Nutzung von Metallschmelzen</i>	478	11.1	<i>Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung der Diffusion</i>	483
10.2	<i>Gießschweißen (Thermitschweißen).....</i>	478	11.2	<i>Diffusionsschweißen (Prozess 45).....</i>	483
10.2.1	Aluminothermisches Schmelzschweißen (Prozess 71).....	478	11.2.1	Verfahrensprinzip.....	484
10.2.1.1	Verfahrensprinzip.....	478	11.2.2	Anwendungsbereich	485
10.2.1.2	Anwendungsbereich	479	11.2.3	Konstruktive Gestaltung.....	485
			11.2.4	Fertigungshinweise.....	485
				Literaturverzeichnis.....	488
				Sachwortverzeichnis	505

1

Grundlagen

1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Produktion (lat.: producere = hervor führen) ist der Prozess der Transformation von Ausgangsstoffen (Rohstoffen) in fertige bzw. weiter zu verarbeitende Produkte bzw. (Wirtschafts-)Güter. Dies erfolgt unter Einsatz von Energie sowie mithilfe spezifischer Produktionsmittel – sogenannter **Produktionstechnik** – nach festgelegtem Schema, d. h. auf der Basis wissenschaftlicher Erkenntnisse in Verfahren und Prozessen, die vom Menschen technologisch beherrscht werden. Die für die Produktion von Gütern mit geometrisch bestimmter Form aus festen Stoffen erforderlichen Bearbeitungsvorgänge werden als **Fertigungsverfahren** bezeichnet. Fertigungsverfahren können durch die Arbeitskraft des Menschen manuell vollzogen werden oder mechanisiert bzw. automatisiert erfolgen. Der Fortschritt in der

industriellen Produktionstechnik wird maßgeblich durch Mechanisierung bzw. Automatisierung des **Fertigungsprozesses** sowie der Optimierung seiner Elemente (Arbeitsgegenstand – Arbeitsmittel – Arbeitskraft) zueinander und zur Fertigungsorganisation bestimmt.

Die Vielzahl der Fertigungsverfahren zwingt zur Einordnung in ein überschaubares System, in dem sowohl die bislang bekannten, aber auch die in der Zukunft neu entwickelten Verfahren Platz finden. Die Einteilung der Fertigungsverfahren erfolgt entsprechend DIN 8580 in sechs Hauptgruppen: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Stoffeigenschaft ändern (Bild 1.1).

Die Fertigungsverfahren lassen sich u. a. nach der Art ihrer Wirkungsweise auf den zu bearbeitenden Werkstoff unterscheiden. Dabei bestehen wechselseitige Anforderungen zwischen dem Fertigungsverfahren und dem Werkstoff. So sind einerseits nicht alle Verfahren auf jeden Werkstoff anwendbar und andererseits lässt sich nicht jeder Werkstoff mit jedem

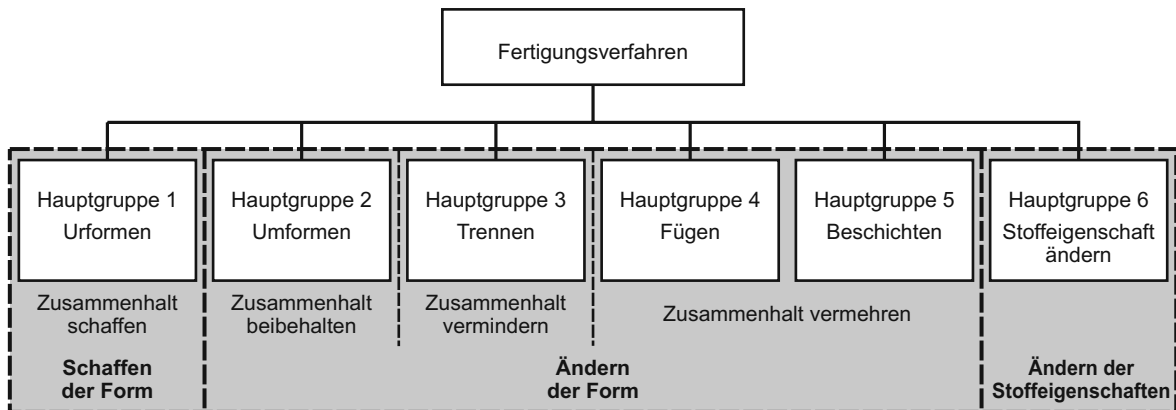


Bild 1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach Art des Zusammenhalts und deren Wirkungsweise nach DIN 8580

Tabelle 1.1 Teiloperationen des Montageprozesses nach VDI 2860

Montage				
Fügen (DIN 8593)	Handhaben (VDI 2860)	Kontrollieren (VDI 2860)	Justieren durch	Sonderoperation
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusammensetzen ▪ Füllen ▪ Anpressen und Einpressen ▪ Fügen durch Urformen ▪ Fügen durch Umformen ▪ Fügen durch Schweißen ▪ Fügen durch Löten ▪ Fügen durch Kleben ▪ textiles Fügen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Speichern ▪ Mengen verändern ▪ Bewegen ▪ Sichern ▪ Kontrollieren 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Messen ▪ Prüfen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einformen ▪ Umformen ▪ Trennen ▪ Fügen von Ausgleichsteilen ▪ Einstellen ▪ Nachbehandeln 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Markieren ▪ Erwärmen ▪ Kühlen ▪ Reinigen ▪ Entgraten ▪ Bedrucken ▪ Abdecken ▪ Abziehen ▪ Auspacken ▪ Ölen ▪ Einsprühen ▪ Abdichten

Fertigungsverfahren sinnvoll bearbeiten. Diese Einflüsse und Wechselbeziehungen müssen sowohl bei der Produkt- und Fertigungsprozessgestaltung als auch beim Qualitätsmanagement berücksichtigt werden. Für das Fügen und besonders beim stoffschlüssigen Fügen, wie z. B. Schweißen, Löten, Kleben u. a., besteht in besonderem Maße diese Abhängigkeit, da hier neben Bauteilen aus artgleichen Werkstoffen auch Werkstoffkombinationen gefügt werden. Dies zeigt auch, dass das Fügen eine besondere, grundlegende Bedeutung besitzt. Einerseits existieren kaum monolithische Produkte und andererseits ermöglicht das Fügen die Herstellung komplexer Produkte aus einzelnen, fertigungstechnisch einfacher herzustellenden Bauteilen und erreicht damit außerdem eine Flexibilität in der Prozesskette.

Neben der Einteilung des Fügens in die Gruppe der Fertigungsverfahren ist Fügen auch eine primäre Operation der **Montage**, zu der auch sekundäre Vorgänge wie Handhaben, Kontrollieren, Justieren sowie weitere Sonderoperationen, wie z. B. Reinigen oder Markieren, gehören (Tabelle 1.1). Das Fügen bewirkt bei der Montage, d. h. beim gezielten Zusammenbau, den aktiven Fertigungsfortschritt am

Werkstück bzw. Arbeitsgegenstand hin zum Produkt, d. h., der Zusammenhalt zwischen den Einzelteilen und Baugruppen wird örtlich geschaffen und insgesamt vermehrt.

Unterschiedliche Werkstoffe, wie Metall, Holz, Kunststoff, Textil oder Papier, erfordern jeweils spezifische Fügeverfahren. Gefügt werden können zwei Bauteile **unmittelbar**, d. h. ohne zusätzliche Stoffe, aber auch **mittelbar** mithilfe eines **Verbindungselements**, wie z. B. Schraube, Niet, Nagel oder Spreizring, bzw. eines **Zusatzwerkstoffes** wie Vergussmittel, Schweißelektrode oder Kitt. Dementsprechend gibt es eine große Anzahl verschiedenartiger Fügeverfahren.

Die Unterteilung der Fertigungsverfahrenshauptgruppe „Fügen“ in Gruppen erfolgt in DIN 8593-0 nach dem Ordnungsgesichtspunkt „Art des Zusammenhalts unter Berücksichtigung der Art der Erzeugung“. Die Arten des Zusammenhalts lassen sich dabei unterscheiden in

- Schwerkraft (Reiben), Formschluss oder Federkraft beim Zusammensetzen,
- Einschluss in einen das Füllgut umschließenden Körper beim Füllen,

- Kraftschluss beim An- und Einpressen,
- Formschluss, der durch Urformen bzw. Umformen hervorgerufen wird,
- Stoffverbindung beim Schweißen und Löten,
- Adhäsion beim Kleben sowie
- Formschluss und/oder Kraftschluss bei textilen Faserstoffen.

Daraus resultierend ergibt sich die Einteilung der Hauptgruppe „Fügen“ in neun Verfahrensgruppen (Bild 1.2).

Für das **Fügen** wurde folgende Definition entwickelt:

Fügen ist ein auf Dauer angelegtes Verbinden oder sonstiges Zusammenbringen von zwei oder mehreren Werkstücken (Fügeteilen) geometrisch bestimmter fester Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff, dabei wird der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.

Der Bereich der Fügeteile, in dem die Verbindung gezielt hergestellt wird, ist die **Fügestelle**. Diese variiert je nach Fügeverfahren in ihren Abmessungen und spezifischen Eigenschaften. Als **Fügevorgang** wird die zeitliche Folge der technologischen Operationen beim Fügen bezeichnet, wie z. B. „In-Lage-bringen“, „In-Lage-halten“ etc. Der **Fügeprozess** ist die Wechselbeziehung der Elemente des Prozesses sowie deren Wirkung aufeinander in ihrer zeitlichen Folge. Elemente des Fügeprozesses sind u. a. Arbeitsgegenstand (Fügeteile), Arbeitsmittel (z. B. Schweißbrenner, Zusatzwerkstoff etc.), Arbeitskraft (des Menschen) und Arbeitsorganisation (z. B. Gruppenarbeit).

1.2 Fügen durch Schweißen

Beim Fügen durch **Schweißen** wird der Zusammenhalt durch Stoffverbinden unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz erzielt. Dies wird teilweise durch den Einsatz von Schweißhilfsstoffen wie Schutzgasen, Schweißpulver oder Pasten erst ermöglicht oder kann durch diese erweitert werden. Kennzeichnend für eine

Schweißverbindung ist, dass alle Fügeteile sowie eventuell verwendete Zusatzwerkstoffe aus artgleichen bzw. artähnlichen Werkstoffen bestehen und daher auch näherungsweise gleiche Schmelztemperaturen aufweisen.

Die Fügestelle wird beim Schweißen als **Schweißzone** bezeichnet und umfasst das **Schweißgut** (tatsächlich aufgeschmolzener Werkstoff) und die **Wärmeeinflusszone (WEZ)**. Die WEZ ist der durch das Schweißen verfahrensbedingt thermisch beeinflusste Bereich direkt neben dem Schweißgut, in dem es infolge der thermischen Beeinflussung zu werkstofflichen Veränderungen (z. B. Kornveränderungen, Diffusionsvorgängen) kommen kann.

Die zum Schweißen erforderliche Energie wird stets von außen in die Fügeteile eingebracht, wobei dies verfahrensabhängig mehr oder weniger lokal an der eigentlichen Fügestelle erfolgt. Dabei können verschiedene physikalische Energieformen Anwendung finden. Die für das Schweißen häufigste Form ist **thermische Energie**, die als **Wärme** zugeführt wird. Das ermöglicht in vielen Fällen den Fügevorgang bzw. fördert in der Regel den Fügeprozess. Typische Formen der Wärmeerzeugung sind chemische Reaktionen, die Wirkung des elektrischen Stroms, Reibung, Wirkung von Strahlen u. a. (Bild 1.3).

Beim Schweißen unter ausschließlicher Anwendung von thermischer Energie wird der Werkstoff an der Fügestelle lokal bis zum Schmelzpunkt der Fügeteile erwärmt, dies führt zum Stoffverbinden. Dieser Prozess wird aus diesem Grund als **Schmelzschweißen** bezeichnet.

Neben der Einwirkung von Wärme kann der Schweißvorgang auch unter der Wirkung von Kraft oder Druck auf die Fügestelle bzw. einer Relativbewegung der Fügeteile erfolgen. Häufig ist eine zusätzliche Wärmeerbringung erforderlich. Derartige Prozesse werden als **Pressschweißen** bezeichnet.

1 Urformen	2 Umformen DIN 8582	3 Trennen	4 Fügen DIN 8593-0	5 Beschichten	6 Stoffeigen- schaft ändern
1.1 Urformen aus dem flüssigen Zustand	2.1 Druckumformen DIN 8583-1	3.1 Zerteilen DIN 8588	4.1 Zusammensetzen DIN 8593-1	5.1 Beschichten aus dem flüssigen Zustand	6.1 Verfestigen durch Umformen
1.2 Urformen aus dem plastischen Zustand	2.2 Zugdruckumformen DIN 8584-1	3.2 Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden DIN 8589-0	4.2 Füllen DIN 8593-2	5.2 Beschichten aus dem plastischen Zustand	6.2 Wärmebehandeln DIN EN 10052
1.3 Urformen aus dem breiigen Zustand	2.3 Zugumformen DIN 8585-1	3.3 Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden DIN 8589-0	4.3 An- und Einpressen DIN 8593-3	5.3 Beschichten aus dem breiigen Zustand	6.3 Thermo-mechanisches Behandeln
1.4 Urformen aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	2.4 Biegeumformen DIN 8586	3.4 Abtragen DIN 8590	4.4 Fügen durch Urformen DIN 8593-4	5.4 Beschichten aus dem körnigen oder pulverförmigen Zustand	6.4 Sintern Brennen
1.5 Urformen aus dem span- oder faserförmigen Zustand	2.5 Schubumformen DIN 8587	3.5 Zerlegen DIN 8591	4.5 Fügen durch Umformen DIN 8593-5	Die Gruppe 5.5 entfällt, da Beschichten aus dem spanförmigen Zustand nicht vorkommt.	6.5 Magnetisieren
Da Schweißen und Löten beim Urformen im Gegensatz zum Beschichten nicht zur Anwendung kommen, bleiben die Gruppennummern 1.6 und 1.7 frei.		3.6 Reinigen DIN 8592	4.6 Fügen durch Schweißen DIN 8593-6		5.6 Beschichten durch Schweißen
		4.7 Fügen durch Löten DIN 8593-7 DIN ISO 857-2	5.7 Beschichten durch Löten	6.7 Photo-chemische Verfahren	
1.8 Urformen aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand			4.8 Kleben DIN 8593-8	5.8 Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand (Vakuumbeschichten)	
1.9 Urformen aus dem ionisierten Zustand			4.9 Textiles Fügen	5.9 Beschichten aus dem ionisierten Zustand	

Bild 1.2 Detaillierte Übersicht der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

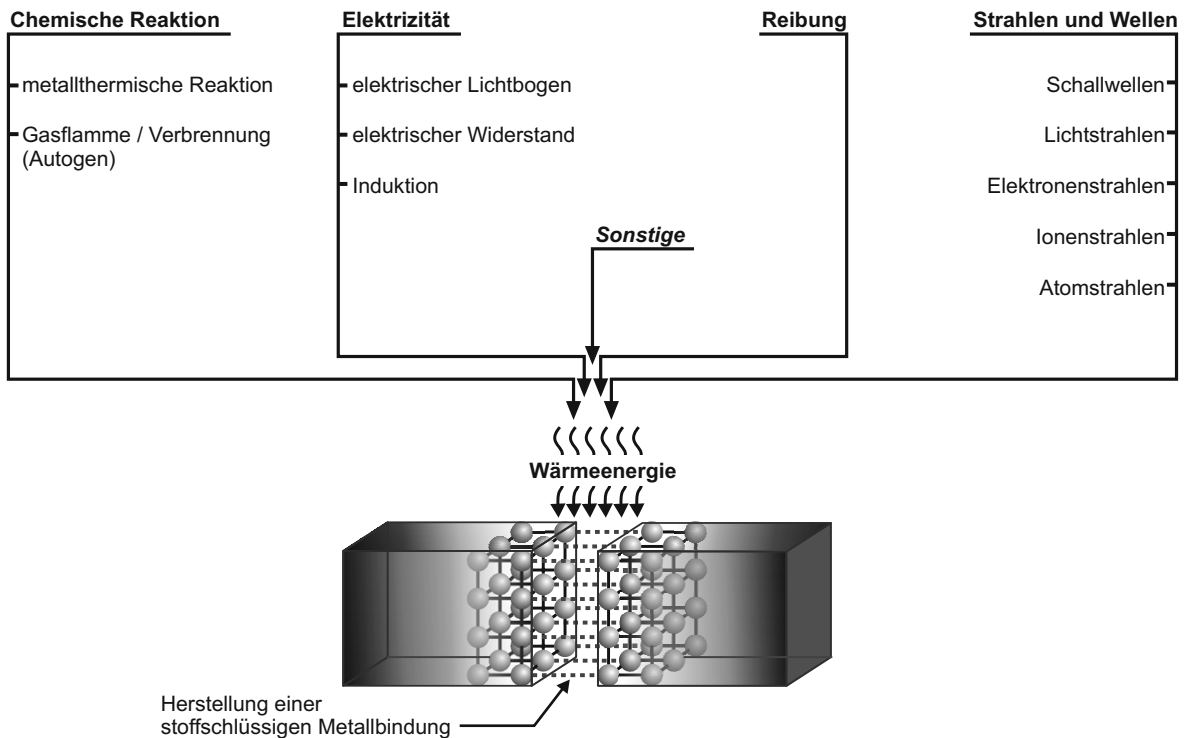


Bild 1.3 Formen der Wärmeezeugung an der Fugestelle

Eine weitere Unterscheidung der Schweißverfahren nach dem Grad ihrer Mechanisierung und Automatisierung ist ebenso möglich, wie auch nach der Anwendung – d. h. dem Zweck des Schweißens – in Verbindungs- und Auftragschweißverfahren (Bild 1.4). Das Verbindungsschweißen dient der Herstellung von Schweißverbindungen zwischen mindestens zwei Fügeteilen. Auch das **Beschichten** eines Bauteils mit artähnlichem Zusatzwerkstoff, aber beispielsweise höherem Verschleißwiderstand wird als Schweißen (**Auftragschweißen**) bezeichnet. Das Auftragschweißen ist demnach ein stoffschlüssiges Beschichten von Flächen, das je nach der Art der Zusammensetzung des Schweißzusatzes unterschieden wird in Panzern, Plattieren und Puffern.

1.3 Wirkprinzipien beim Schweißen

Die Schweißverbindung ist eine stoffschlüssige Verbindung. Sie beruht auf der Wirkung zwischenatomarer und zwischenmolekularer Kräfte. Sie zählt zu den **unlöslichen Verbindungen**, die nur durch Materialzerstörung getrennt werden können, z. B. durch mechanische oder thermische Trennverfahren.

Im Folgenden werden ausschließlich Metalle betrachtet. Deren Zusammenhalt basiert auf sogenannter Metallbindung, einer Sonderform der chemischen Bindung, wie sie bei Metallen und in deren Legierungen auftritt. Diese ist gekennzeichnet durch frei bewegliche Elektronen (sogenanntes „**Elektronengas**“) innerhalb eines Metallgitters aus Metallionen, was zugleich auch Ursache für Stromleitfähigkeit, Duktilität (Schmiedbarkeit, Verform-

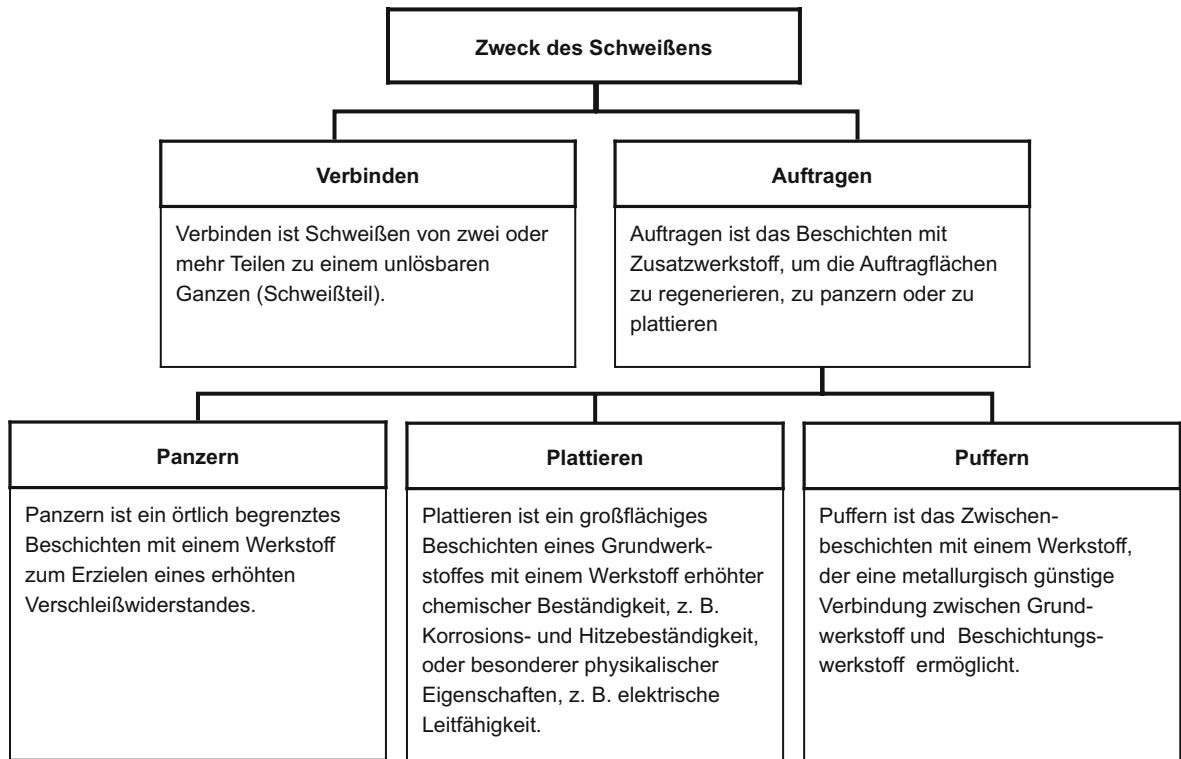


Bild 1.4 Einteilung des Schweißens nach dessen Zweck

barkeit) und den metallischen Glanz dieser Werkstoffe ist. Die eigentliche Bindung innerhalb des Metalls erfolgt durch Anziehungskräfte zwischen Metallionen und freien Elektronen.

Um eine Verbindung zweier fester Metalle herzustellen, ist es notwendig, die Metallgitterstruktur beider Fügepartner sehr stark anzunähern, damit die chemische Bindung der Metallionen an der Oberfläche des Werkstoffes (in der Fügestelle) wirksam wird. Zusätzlich zur Annäherung ist aber auch die Entfernung jeglicher Fremdschichten auf der Oberfläche (z. B. Oxide, Verunreinigungen etc.) der beiden Fügepartner im Bereich der Fügestelle erforderlich. Diese Anforderungen können u. a. durch das Aufschmelzen des Werkstoffes bzw. durch starke Druckeinwirkung oder auch Relativbewegung der Fügepartneroberflächen zueinander erzielt werden.

Schmelz- und Pressschweißen unterscheiden sich in deren physikalischem Ablauf. Das **Schmelzschweißen** ist ein Fügen bei örtlich begrenztem Schmelzfluss ohne Anwendung von Kraft mit oder ohne Schweißzusatz. Das **Pressschweißen** erfolgt unter Anwendung von Kraft ohne oder mit Schweißzusatz. Örtlich begrenztes Erwärmen der Fügepartner an der Fügestelle – auch bis zum Schmelzpunkt – ermöglicht oder erleichtert das Schweißen.

Bild 1.5 zeigt die **Wirkpaarungen** zwischen thermischer und mechanischer Energie, die je nach fertigungstechnischer und gerätetechnischer Umsetzung eine Einteilung der Schweißverfahren nach den **Wirkprinzipien** für das Pressschweißen und für das Schmelzschweißen zulassen.

In Tafel 1.1 werden ausgewählte Schweißverfahren entsprechend dieser Einteilung nach den Wirkprinzipien dargestellt. Diese Einteilung bei der

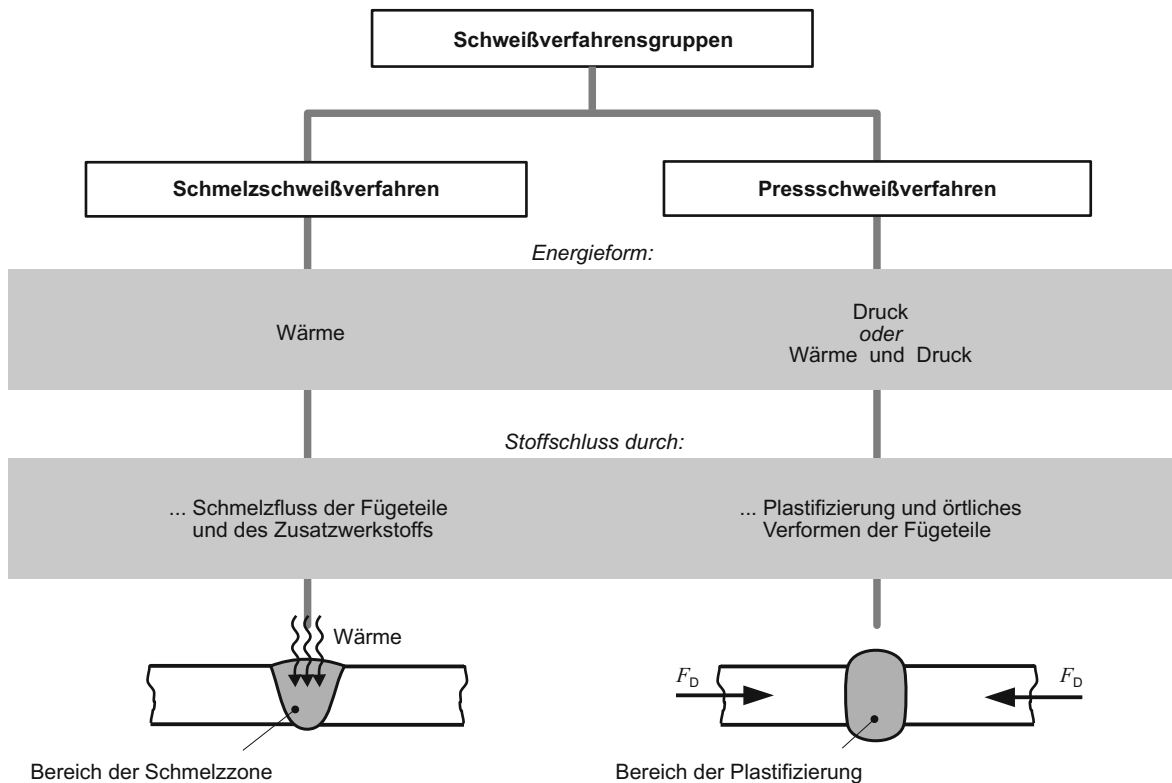


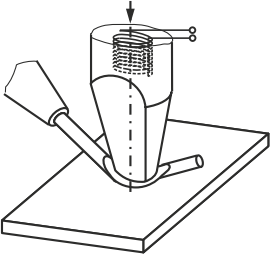
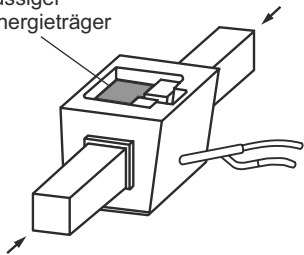
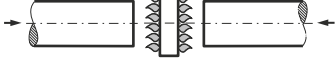
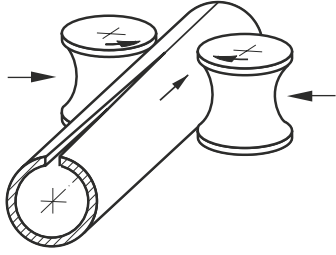
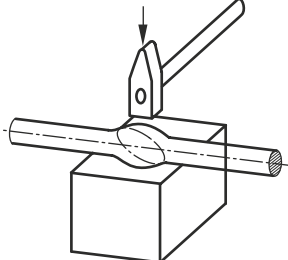
Bild 1.5 Wirkpaarungen beim Schweißen

Herstellung der Schweißverbindung ist ebenfalls Grundlage des Aufbaus dieses Buches in den nachfolgenden Kapiteln.

Für die in Tafel 1.1 dargestellten Verfahren wird neben der Verfahrensbezeichnung – sofern vorhanden – auch die jeweilige **Ordnungsnummer** (ONr.) für Schweißverfahren nach DIN EN ISO 4063 angegeben, die auch Anwendung in den weiteren Kapiteln dieses Buches findet. Die Gliederung dieser

höchstens dreistelligen Ordnungsnummer basiert in der ersten Ziffer auf dem physikalischen Grundprinzip, d. h. dem eingesetzten Energieträger zur Durchführung des Schweißens, wird aber gleichfalls für das thermische Schneiden sowie für Lötverfahren angewendet. Die nachfolgenden Ziffern (eine oder zwei) kennzeichnen gegebenenfalls vorhandene Verfahrensuntergruppen und -varianten.

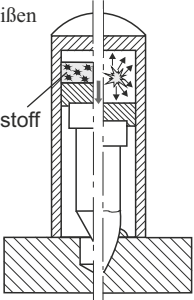
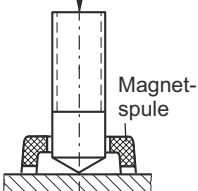
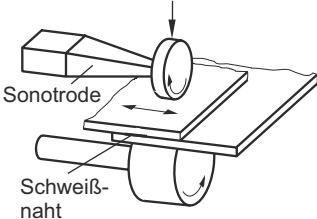
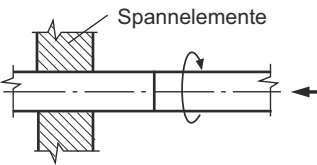
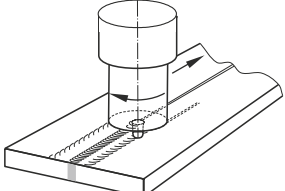
Tafel 1.1 Wirkprinzipien beim Schmelz- und Pressschweißen (in Anlehnung an DIN 8593-6 und DIN EN 14610)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press- schweißen	6.1.1 ... durch feste Körper DIN 1910-3 DIN EN 14610	Heizelement- schweißen	Fügen von Werkstücken durch Anpressen mit einem beheizten Schweißwerkzeug	
	6.1.2 ... durch Flüssigkeit DIN EN 14610	Gießpress- schweißen	Fügen, indem die Fügestelle der Werkstücke durch Umgießen mit einem flüssigen Energieträger erwärmt und ver- presst wird	flüssiger Energieträger 
	6.1.3 ... durch Gas DIN 1910-3 DIN EN 14610	Gaspress- schweißen [ONr. 47]	Fügen durch Ver- pressen von Werk- stücken mit durch Flammen erwär- mten Stoßflächen	
		Walz- schweißen	Fügen, indem erwärmte Werk- stücke gemeinsam gewalzt werden	
	Feuer- schweißen	Fügen von Werk- stücken durch Freiformen, Gesenkformen oder Durchdrücken der durch Feuer erwär- mten Stoßflächen		

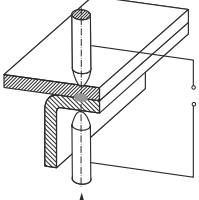
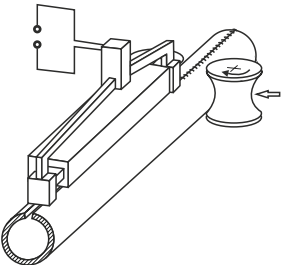
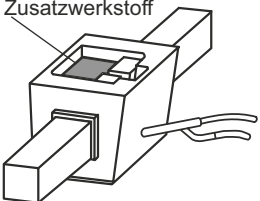
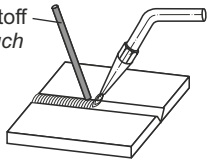
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press- schweißen	6.1.3 ... durch Gas DIN 1910-3 DIN EN 14610	Diffusions- schweißen [ONr. 45]	Fügen von Werk- stücken im Vaku- um, unter Schutz- gas oder in einer Flüssigkeit auf- grund von Diffu- sion an den Stoß- flächen durch Wärme und Kraft	<p>Heizelemente</p> <p>Werkstücke</p> <p>Arbeits- kammer</p>
	6.1.4 ... durch elektrische Gasent- ladung DIN EN 14610	Lichtbogen- press- schweißen	Fügen durch Ver- pressen von Werk- stücken, die durch einen kurzzeitig brennenden Licht- bogen erwärmt wurden	<p>Bolzenschweißen [ONr. 78]</p> <p>Licht- bogen</p> <p>alternative Verfahrensvariante: Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen [ONr.185]</p>
	6.1.5 ... durch Strahlung DIN 1910-3	Lichtstrahl- Extrusions- schweißen <i>Nur für Kunststoffe bekannt</i>	Kunststoff wird über einen durch Lichtstrahl beheizten Extruder zum Schweißkopf geführt, der die beheizte Masse zwischen die vorher erwärmten Stoß- flächen drückt	<p>Schweiß- schuh</p> <p>Zuführung Schweiß- zusatz</p> <p>Schweiß- gerät</p> <p>Vorwärmung</p>
	6.1.6 ... durch Bewegung DIN 1910-3 DIN EN 14610	Kaltpress- schweißen [ONr. 48]	Fügen, indem Werkstücke an der Fügestelle durch stetige Kraftein- wirkung ohne Wärme stark plastisch verformt werden	

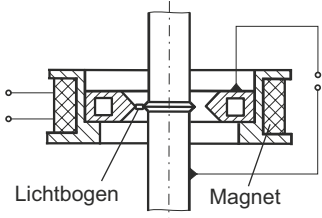
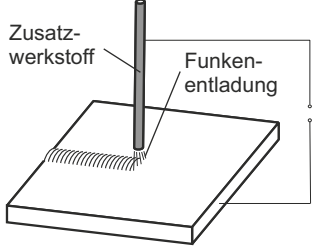
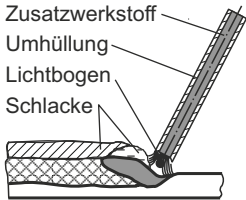
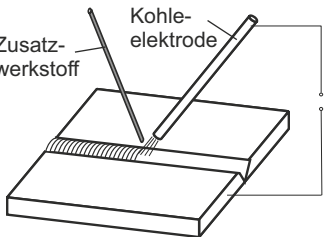
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press- schweißen	6.1.6 ... durch Bewegung DIN 1910-3 DIN EN 14610	Schock- schweißen	Fügen von Werk- stücken durch schlagartige Krafteinwirkung	Sprengschweißen [ONr. 441] 
				Magnetpuls- schweißen [ONr. 442] 
		Ultraschall- schweißen [ONr. 41]	Fügen durch Kraft und schwingende Bewegung mit Frequenzen im Ultraschallbereich ($f \geq 20$ kHz)	
		Reib- schweißen [ONr. 42]	Fügen, indem die durch Reibung erwärmten Werkstücke miteinander verpresst werden	<i>mind. ein Werkstück wird bewegt:</i> Rotationsreibschweißen  <i>Werkstücke werden nicht bewegt:</i> Rührreibschweißen [ONr. 43] 

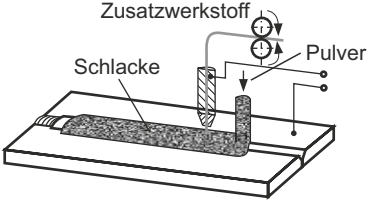
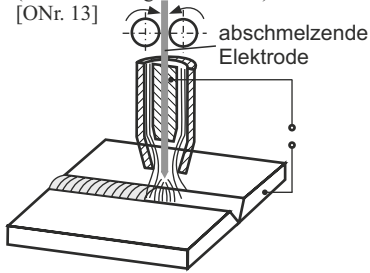
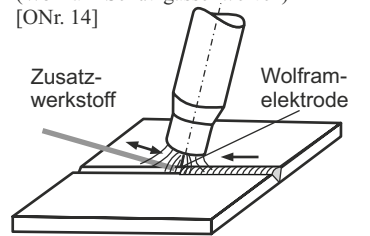
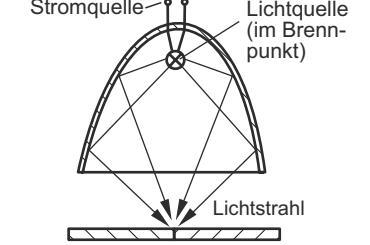
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press- schweißen	6.1.7 ... durch elek- trischen Strom DIN EN 14610	Widerstands- press- schweißen	Fügen von Werk- stücken durch partielle elektrische Widerstandserwär- mung in der Schweißzone und nachfolgendes Verpressen	<i>konduktives Pressschweißen:</i> Widerstandspunktschweißen [ONr. 21] 
				<i>andere Verfahrensvarianten:</i> Buckel-, Rollennaht-, Rolltransformator-, Schleifkontakt-, Abbrennstumpf- und Pressstumpfschweißen <i>induktives Pressschweißen:</i> Induktionsschweißen [ONr. 74] 
6.2 Schmelz- schweißen	6.2.1 ... durch feste Körper	<i>kein Prozess bekannt</i>		
	6.2.2 ... durch Flüssigkeit DIN EN 14610	Gieß- schmelz- schweißen	Fügen, indem die eingeförmte Füge- stelle durch Um- gießen mit einem flüssigen Zusätz- werkstoff ange- schmolzen wird	flüssiger Zusatzwerkstoff 
	6.2.3 ... durch Gas DIN EN 14610	Gasschmelz- schweißen [ONr. 3]	Fügen durch Erzeu- gen des Schweißba- des mit einer kon- zentrierten Brenn- gas-O ₂ -Flamme	Zusatzwerkstoff <i>(alternativ auch Pulver ein- setzbar)</i> 

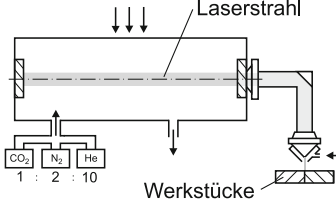
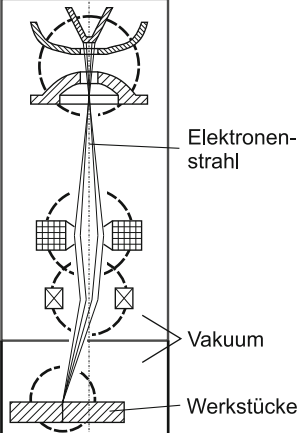
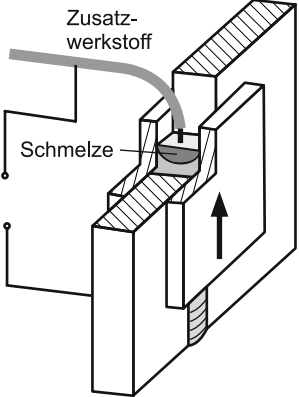
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelzschweißen	6.2.4 ... durch elektrische Gasentladung DIN EN 14610	(Lichtbogen)-Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen [ONr. 185]	Fügen von Werkstücken, indem ein magnetisch abgelenkter Lichtbogen die Schweißfuge aufschmilzt	 <p>Lichtbogen Magnet</p>
		Funkenschweißen	Fügen, indem durch Funkentladungen der Werkstoff der Elektrode zum Werkstück abgetragen wird	 <p>Zusatzwerkstoff Funkenentladung</p>
		Metalllichtbogen-schweißen [ONr. 11]	Fügen durch Aufschmelzen der Fugestelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer abschmelzenden, schlackebildenden Elektrode und dem Werkstück brennt	Lichtbogenhandschweißen [ONr. 111]  <p>Zusatzwerkstoff Umhüllung Lichtbogen Schlacke</p> <p><u>andere Verfahrensvarianten:</u> Schwerkraft-, Federkraft-, Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode, Unterschienschweißen</p>
		Kohlelichtbogen-schweißen	Fügen durch Aufschmelzen der Fugestelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer nicht abschmelzenden Kohlelektrode und dem Werkstück brennt	 <p>Zusatzwerkstoff Kohlelektrode</p>

Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelz- schweißen	6.2.4 ... durch elektrische Gas- entladung DIN EN 14610	Unterpulver- schweißen [ONr. 12]	Fügen durch Auf- schmelzen der Fügestelle mit einem Lichtbogen, der zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück brennt, wobei der Lichtbo- gen mit schlacke- bildendem Pulver abgedeckt ist	
		Schutzgas- schweißen	Fügen, indem die Fügestelle mit einem Lichtbogen, der unter Schutzgas zwischen einer Elektrode und dem Werkstück brennt, aufgeschmolzen wird	1. abschmelzende Elektrode (Metall-Schutzgasschweißen) [ONr. 13]  2. nicht abschmelzende Elektrode (Wolfram-Schutzgasschweißen) [ONr. 14] 
	Lichtstrahl- schweißen [ONr. 75]	Fügen von Werk- stücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines nicht kohärenten Licht- strahls aufge- schmolzen wird		

Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelzschweißen	6.2.5 ... durch Strahl DIN EN 14610	Laserstrahl-schweißen [ONr. 52]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines kohärenten Strahls aufgeschmolzen wird	
		Elektronenstrahl-schweißen [ONr. 51]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit einem Elektronenstrahl aufgeschmolzen wird	
6.2.6 ... durch Bewegung von Masse		<i>kein Prozess bekannt</i>		
6.2.7 ... durch elektrischen Strom DIN EN 14610		Widerstandsschmelzschweißen	Fügen von Werkstücken, indem die Fügezone durch Widerstandserwärmung geschmolzen wird	 <p>andere Verfahrensvariante: Kammerschweißen</p>

2

Schweißbarkeit

2.1 Grundlagen und Einteilung

Für die **Schweißbarkeit** gilt entsprechend DIN-Fachbericht ISO/TR 581 folgende, international gültige Definition:

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

Die Schweißbarkeit wird von den drei Einflussgrößen Werkstoff, Konstruktion und Fertigung mit näherungsweise gleicher Wichtung bestimmt. Alle drei Einflussgrößen stehen dabei in enger Wechselwirkung untereinander, und die gesamtheitliche Betrachtung der Schweißbarkeit ermöglicht eine qualitative Abschätzung bezüglich:

- der Eignung von Fügeteilen, diese in eine Verbindung zu überführen, bei denen der Zusammenhalt örtlich geschaffen und insgesamt vermehrt wird,
- der Sicherheit der gefügten Verbindung während des gesamten Betriebs-Lebenszyklus und
- der Möglichkeit, mit entsprechenden Technologien Werkstoff- und Bauelementkombinationen mit hoher Zuverlässigkeit zu fügen.

Die Wechselbeziehung zwischen den drei Einflussgrößen wird mit spezifischen Begrifflichkeiten eingeteilt. Dabei ist die **Schweißbeignung** eine Werkstoffeigenschaft, die im Wesentlichen von der

Fertigung und in geringem Maße von der Konstruktion beeinflusst wird. Die **Schweißsicherheit** als Konstruktionseigenschaft wird vor allem vom Werkstoff und in geringem Maße von der Fertigung beeinflusst. Die **Schweißmöglichkeit** ist eine Fertigungseigenschaft, die insbesondere von der Konstruktion und in geringem Maße vom Werkstoff beeinflusst wird. Jede dieser Eigenschaften hängt – wie die Schweißbarkeit eines Bauteils – von Werkstoff, Konstruktion und Fertigung ab, jedoch ist die Bedeutung der Einflussgrößen für diese drei Eigenschaften unterschiedlich (Bild 2.1).

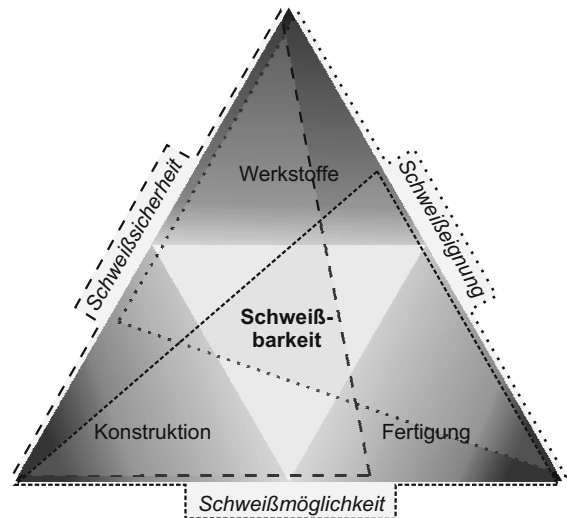


Bild 2.1 Beschreibung der Schweißbarkeit als Wechselbeziehung von Schweißbeignung, Schweißsicherheit und Schweißmöglichkeit

Als Verallgemeinerung der Schweißbarkeit kann für die Vielzahl der existierenden Fügeverfahren der Begriff der **Fügarkeit** definiert werden, und damit wird in Analogie die Eigenschaft von Fügeteilen be-