Mario Kusch
Klaus-Jürgen Matthes
Werner Schneider

Schweißtechnik

Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen

7., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Kusch/Matthes/Schneider (Hrsg.)
Schweißtechnik

Mario Kusch
Klaus-Jürgen Matthes
Werner Schneider (Hrsg.)

Schweißtechnik

Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen

7., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Herausgeber:

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

Autoren:
Dr.-Ing. Mario Kusch (Kapitel 3, 5 und 7)
Prof. Dr.-Ing. Heiko Lang (Kapitel 4)
Dipl.-Ing. Holger Letsch (Kapitel 6)
Dr.-Ing. Werner Schneider (Kapitel 5)
Dr.-Ing. habil. Dietmar Schober (Kapitel 3.12, 3.13, 4.4, 7 bis 10)
Dr.-Ing. Stefan Thurner (Kapitel 3.7 bis 3.10)
Dr.-Ing. Marcel Todtermuschke (Kapitel 1 und 2)

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 978-3-446-46745-3
E-Book-ISBN 978-3-446-47000-2

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.

© 2022 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München
www.hanser-fachbuch.de
Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg
Herstellung: Anne Kurth
Satz: Eberl & Kœsel Studio GmbH, Altusried-Krugzell
Covergestaltung: Thomas West
Titelbild: © stock.adobe.com/Ilshat
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen
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,
- Schweißeignung,
- 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 Fügestelle 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 systemati-

sche 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 aktualisierten 7. Auflage dieses Buches haben sehr fachkompetente Autoren mitgewirkt. Es wurden neueste technische Entwicklungen auf dem Gebiet der Schweißtechnik aufgenommen und das zitierte Norm- und Regelwerk dem aktuellen Stand angepasst.

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

1 Grundlagen 15
1.1 *Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580* 15
1.2 *Fügen durch Schweißen* 17
1.3 *Wirkprinzipien beim Schweißen* 19

2 Schweißbarkeit 29
2.1 *Grundlagen und Einteilung* 29
2.2 *Schweißeignung von Stählen* 31
2.3 *Schweißsicherheit* 36
2.3.1 Konstruktive Gestaltung 37
2.3.2 Beanspruchungszustand 40
2.3.3 Regelwerke zur Auslegung von Schweißkonstruktionen 40
2.3.4 Anwendung von Finite-Elemente-Methoden zur Bemessung geschweißter Tragwerke 43
2.4 *Schweißmöglichkeit* 44
2.4.1 Grundlagen 44
2.4.2 Vorbereitungen zum Schweißen 45
2.4.3 Durchführung des Schweißens 47
2.4.4 Nacharbeiten beim Schweißen 55
2.4.5 Anwendung numerischer Simulationen für die Prozessanalyse beim Schweißen 55
2.5 *Qualitätssicherung beim Schweißen* 56
2.6 *Arbeitsschutz beim Schweißen* 59
2.7 *Schweißen im Produkt-, Umwelt- und Energiemanagement* 60

3 Schweißen mit Lichtbogen 64
3.1 *Grundlagen der Lichtbogentechnik* 64
3.1.1 Physik des Lichtbogens 64
3.1.2 Zünden des Lichtbogens 67
3.1.3 Betrieb des Lichtbogens 69
3.2 *Schweißstromquellen zum Lichtbogenschweißen* 71
3.2.1 Überblick 71
3.2.2 Schweißumformer 71
3.2.3 Schweißtransformatoren 72
3.2.4 Schweißgleichrichter 73
3.2.5 Schweißumrichter 75
3.2.6 Statische Kennlinien von Schweißstromquellen 76
3.2.7 Dynamische Eigenschaften von Schweißstromquellen 77
3.2.8 Regelungsprinzipien zur Arbeitspunktstabilisierung .. 78
3.2.9 Modulationsarten bei Impulsstromquellen 79
3.2.10 Angaben auf dem Leistungsschild 80
3.3 *Schweißbrenner zum Lichtbogenschweißen* 82
3.3.1 Stabelektrodenhalter 82
3.3.2 Stromkontakteinrichtung zum UP-Schweißen 83
3.3.3 Schweißbrenner mit nichtabschmelzender Elektrode ... 83
3.3.4 Schweißbrenner mit abschmelzender Elektrode ... 85
3.3.5 Bolzenschweißpistolen 86
3.4 *Drahtvorschubsysteme zum Lichtbogenschweißen* 87
3.4.1 Grundaufbau 87
3.4.1.1 Stirnrollenantrieb 88
3.4.1.2 Planetarantrieb 89

3.4.2 Bauformen mit potenzialführender Drahtelektrode 90
3.4.2.1 Bauformen mit nicht potenzialführender Drahtelektrode 91
3.4.2.2 Drahtrichteinheiten 91
3.5 Zusatzwerkstoffe zum Lichtbogenschweißen 92
3.5.1 Stabelektroden 92
3.5.2 Schweißstäbe 96
3.5.3 Massivdrahtelektroden 97
3.5.4 Fülldrahtelektroden 99
3.5.5 Schweißpulver zum UP-Schweißen 103
3.5.6 Schweißpulver zum Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA) 105
3.5.7 Schweißbolzen 106
3.6 Gase zum Lichtbogenschweißen 108
3.6.1 Aufgaben von Schutzgasen 108
3.6.2 Eigenschaften von Schutzgasen 108
3.6.3 Einteilung und Bezeichnung von Schutzgasen 109
3.6.4 Herstellung von Schutzgasen 111
3.6.5 Lieferarten und Entnahmestellen 111
3.6.6 Kennzeichnung von Druckgasflaschen 112
3.7 Lichtbogenhandschweißen (Prozess 111) 113
3.7.1 Verfahrensprinzip und Anlagentechnik 113
3.7.1.1 Funktionsweise 113
3.7.1.2 Schweißstromquellen 114
3.7.1.3 Elektrodenhalter 115
3.7.1.4 Stabelektroden 115
3.7.2 Anwendung 120
3.7.2.1 Allgemeines 120
3.7.2.2 Reparaturschweißen 120
3.7.2.3 Auftragschweißen 120
3.7.2.4 Verbindungsschweißen 120
3.7.3 Fertigungshinweise 120
3.7.3.1 Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung 120
3.7.3.4 Zündvorgang 121
3.7.3.5 Führen der Elektrode 123
3.7.3.6 Schweißparameter 125
3.7.4 Fehler beim Lichtbogenhandschweißen 126
3.7.4.1 Häufige Ursachen und Fehlerbilder 126
3.7.4.2 Poren 128
3.7.4.3 Schlackeeinschlüsse 128
3.7.4.4 Bindefehler 128
3.7.4.5 Geometrische Unregelmäßigkeiten 128
3.7.5 Gefährdungen für den Schweißer 129
3.8 Wolfram-Inertgasschweißen (Prozess 141) 129
3.8.1 Verfahrensprinzip und Anlagentechnik 130
3.8.1.1 Funktionsweise 130
3.8.1.2 Schutzgase 131
3.8.1.3 Wolframelektroden 133
3.8.1.4 Zusatzwerkstoff 135
3.8.1.5 Schweißstromquellen und Brennertechnik 136
3.8.2 Verfahrensvarianten 137
3.8.2.1 Zünden des Lichtbogens 137
3.8.2.2 Stromart und Polarität 138
3.8.2.3 Mechanisierungsgrad 141
3.8.2.4 WIG-Schweißen mit Zusatzwerkstoff 142
3.8.3 Anwendung 143
3.8.3.1 Verbindungsschweißen 143
3.8.3.2 Reparaturschweißen 143
3.8.3.3 WIG-Orbitalschweißen 143
3.8.3.4 WIG-Punktschweißen 145
3.8.3.5 WIG-Engspaltschweißen 145
3.8.3.6 WIG-Auftragschweißen 146
3.8.3.7 Sonderanwendungen 147
3.8.4 Fertigungshinweise 147
3.8.4.1 Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung 147
3.8.4.2 Zündvorgang 148
3.8.4.3 Brennerführung 149
3.8.4.4 Heften 149
3.8.4.5 Gasschutz 149
3.8.4.6 Richtwerte 151
3.8.5 Fehler beim WIG-Schweißen 151
3.8.5.1 Gaseinschlüsse 151
3.8.5.2 Bindefehler 153

3.8.5.3 Wolframeinschlüsse ... 153
3.8.5.4 Oxideinschlüsse ... 153
3.8.5.5 Häufige Fehlerbilder und Ursachen ... 153
3.8.6 Gefährdungen für den Schweißer ... 156
3.9 Plasmaschweißen (Prozess 15) ... 157
3.9.1 Verfahrensprinzip und Anlagentechnik ... 158
3.9.1.1 Funktionsweise ... 158
3.9.1.2 Prozess- und Schutzgase ... 161
3.9.1.3 Wolframelektroden ... 164
3.9.1.4 Zusatzwerkstoff ... 165
3.9.1.5 Schweißstromquellen und Brennertechnik ... 166
3.9.2 Verfahrensvarianten ... 169
3.9.2.1 Zünden des Lichtbogens ... 169
3.9.2.2 Stromart und Polarität ... 170
3.9.2.3 Mechanisierungsgrad ... 174
3.9.2.4 Plasmaschweißen mit Zusatzwerkstoff ... 174
3.9.2.5 Schmelzbadausbildung ... 176
3.9.3 Anwendung ... 177
3.9.3.1 Verbindungsschweißen ... 177
3.9.3.2 Plasma-Punktschweißen ... 178
3.9.3.3 Plasma-Auftragschweißen ... 178
3.9.3.4 Mikroplasmaschweißen ... 179
3.9.3.5 Additive Fertigung ... 181
3.9.4 Fertigungshinweise ... 182
3.9.4.1 Allgemeines ... 182
3.9.4.2 Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung ... 183
3.9.4.3 Zündvorgang ... 183
3.9.4.4 Brennerführung ... 184
3.9.4.5 Heften ... 185
3.9.4.6 Gasschutz ... 185
3.9.4.7 Richtwerte ... 187
3.9.5 Fehler beim Plasmaschweißen ... 188
3.9.5.1 Gaseinschlüsse ... 188
3.9.5.2 Nahtunterwölbung ... 189
3.9.5.3 Einbrandkerben ... 189
3.9.5.4 Oxideinschlüsse ... 189
3.9.5.5 Häufige Fehlerbilder und Ursachen ... 190
3.9.6 Gefährdungen für den Schweißer ... 190
3.10 Metall-Schutzgasschweißen (Prozess 13) 191
3.10.1 Verfahrensprinzip und Anlagentechnik ... 192
3.10.1.1 Funktionsweise ... 192
3.10.1.2 Schutzgase ... 192
3.10.1.3 Zusatzwerkstoff ... 196
3.10.1.4 Schweißstromquellen und Brennertechnik ... 197
3.10.2 Lichtbogenarten ... 199
3.10.2.1 Allgemein ... 199
3.10.2.2 Kurzlichtbogen ... 200
3.10.2.3 Übergangslichtbogen ... 200
3.10.2.4 Sprühlichtbogen ... 200
3.10.2.5 Impulslichtbogen ... 200
3.10.2.6 Hochleistungs-Kurzlichtbogen ... 201
3.10.2.7 Instabiler Lichtbogen ... 201
3.10.2.8 Rotierender Lichtbogen ... 201
3.10.2.9 Hochleistungs-Sprühlichtbogen ... 202
3.10.2.10 Kräfte beim Werkstoffübergang ... 202
3.10.3 Verfahrensvarianten ... 204
3.10.3.1 Hochleistungsschweißen ... 204
3.10.3.2 Energiereduzierte MSG-Prozesse ... 208
3.10.3.3 Modifizierte MSG-Impulsprozesse ... 210
3.10.3.4 MSG-Hybridprozesse ... 212
3.10.3.5 Zünden des Lichtbogens ... 214
3.10.3.6 Mechanisierungsgrad ... 214
3.10.4 Anwendung ... 214
3.10.4.1 Verbindungsschweißen ... 214
3.10.4.2 MSG-Engspaltschweißen ... 215
3.10.4.3 MSG-Auftragschweißen ... 216
3.10.4.4 Additive Fertigung ... 217
3.10.4.5 Sonderanwendungen ... 218
3.10.5 Fertigungshinweise ... 219
3.10.5.1 Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung ... 219
3.10.5.2 Zündvorgang ... 220
3.10.5.3 Brennerführung ... 220
3.10.5.4 Heften ... 222
3.10.5.5 Gasschutz ... 222
3.10.5.6 Richtwerte ... 223
3.10.6 Fehler beim MSG-Schweißen ... 224

3.10.6.1 Gaseinschlüsse 224
3.10.6.2 Bindefehler 224
3.10.6.3 Häufige Fehlerbilder und Ursachen 227
3.10.7 Gefährdungen für den Schweißer 227
3.11 Unterpulverschweißen (Prozess 12) 227
3.11.1 Verfahrensprinzip und Anlagentechnik 228
3.11.1.1 Funktionsweise 228
3.11.1.2 Schweißpulver 229
3.11.1.3 Elektroden 244
3.11.1.4 Stromquellen und Brennertechnik 246
3.11.1.5 Mechanisierungseinrichtungen 248
3.11.2 Verfahrensvarianten des Unterpulverschweißens 249
3.11.2.1 Überblick 249
3.11.2.2 UP-Eindrahtschweißen 249
3.11.2.3 UP-Doppeldrahtschweißen ... 249
3.11.2.4 UP-Tandemschweißen 252
3.11.2.5 UP-Mehrdrahtschweißen 252
3.11.2.6 UP-Bandschweißen 253
3.11.2.7 UP-Kaltdrahtschweißen 254
3.11.2.8 UP-Heißdrahtschweißen 254
3.11.2.9 UP-Schweißen mit Metallpulverzugabe 254
3.11.3 Anwendung des UP-Verfahrens 255
3.11.3.1 Überblick 255
3.11.3.2 Verbindungsschweißen 255
3.11.3.3 UP-Auftragschweißen 255
3.11.3.4 UP-Engspaltschweißen 256
3.11.3.5 UP-Quernahtschweißen 257
3.11.3.6 Verfahrensvergleich 258
3.11.4 Fertigungshinweise 258
3.11.4.1 Konstruktive Gestaltung und Nahtvorbereitung 258
3.11.4.2 Schmelzbadsicherung 261
3.11.4.3 Heften 262
3.11.4.4 An- und Auslaufbleche 262
3.11.4.5 Werkstückneigung 263
3.11.4.6 Zünden des Lichtbogens 263
3.11.4.7 Nahtformung 264
3.11.4.8 Richtwerte 266
3.11.5 Fehler beim UP-Schweißen ... 269
3.11.5.1 Häufige Fehlerbilder und Ursachen 269
3.11.5.2 Durchschweißfehler 269
3.11.5.3 Nahtüberhöhung 269
3.11.5.4 Risse 270
3.11.5.5 Lunker 271
3.11.5.6 Schlackeeinschlüsse 271
3.11.6 Gefährdungen für den Schweißer 271
3.12 Lichtbogenschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen 271
3.12.1 Grundlagen 272
3.12.2 Pressstumpfschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (Prozess 185) 272
3.12.2.1 Verfahrensprinzip 272
3.12.2.2 Anwendungsbereiche 272
3.12.2.3 Ausrüstungen 273
3.12.2.4 Zusatzstoffe 273
3.12.2.5 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit 273
3.12.2.6 Fertigungshinweise 273
3.12.3 Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen (MBS-Schweißen) 274
3.12.3.1 Verfahrensprinzip 274
3.12.3.2 Anwendungsbereiche 274
3.12.3.3 Zusatzstoffe 274
3.12.3.4 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit 274
3.12.3.5 Fertigungshinweise 275
3.13 Lichtbogenbolzenschweißen 275
3.13.1 Grundlagen 276
3.13.2 Verfahrensprinzip 276
3.13.2.1 Kondensatorentladungs-Bolzenschweißen mit Hubzündung (Prozess 785) .. 276
3.13.2.2 Lichtbogenbolzenschweißen mit Spitzenzündung (Prozess 786) 276
3.13.2.3 Hubzündungs-Bolzenschweißen mit Keramikring oder Schutzgas (Prozess 783) 276
3.13.3 Anwendungsbereiche 277
3.13.4 Zusatzstoffe 278

3.13.5 Fertigungshinweise ... 279
3.13.6 Ausrüstungen ... 279
3.14 Sensorik beim Lichtbogenschweißen ... 281
3.14.1 Überblick ... 281
3.14.2 Taktile Sensoren ... 282
3.14.3 Elektromagnetische Sensoren ... 283
3.14.4 Lasersensoren ... 284
3.14.5 Lichtbogensensoren ... 285
3.15 Gefährdungen beim Lichtbogenschweißen ... 287
3.15.1 Elektrischer Strom ... 287
3.15.2 Elektromagnetische Strahlung ... 288
3.15.3 Rauch, Stäube und Gase ... 289
3.15.4 Sauerstoffmangel ... 290
3.15.5 Spritzer und Schlacke ... 290
3.15.6 Druckgasflaschen ... 290

4 Schweißen mit Brenngas-Sauerstoff-Flamme ... 291
4.1 Grundlagen der Autogentechnik ... 291
4.1.1 Autogenflamme ... 291
4.1.1.1 Allgemeines ... 291
4.1.1.2 Verbrennung ... 291
4.1.1.3 Flammeneinstellung ... 293
4.1.2 Autogenbrenner ... 295
4.1.2.1 Allgemeines ... 295
4.1.2.2 Brennerarten ... 295
4.1.2.3 Betreiben der Autogenbrenner ... 297
4.1.2.4 Flammenstörungen ... 299
4.1.3 Betriebsmittel der Autogentechnik ... 299
4.1.3.1 Allgemeines ... 299
4.1.3.2 Sauerstoff ... 299
4.1.3.3 Brenngase ... 301
4.1.3.4 Gegenüberstellung von Gasen der Autogentechnik ... 309
4.1.4 Sicherheitshinweise und -vorschriften für den Umgang mit Sauerstoff und Brenngasen ... 310
4.1.5 Armaturen und Zubehör ... 311
4.1.5.1 Allgemeines ... 311
4.1.5.2 Druckminderer ... 311
4.1.5.3 Gasschläuche ... 312
4.1.5.4 Sicherheitseinrichtungen ... 314
4.2 Einteilung der Verfahren der Autogentechnik nach DIN 8522 ... 316
4.3 Gasschmelzschweißen (Prozess 31) ... 317
4.3.1 Grundlagen ... 318
4.3.2 Anwendung ... 319
4.3.2.1 Allgemeines ... 319
4.3.2.2 Fugenformen ... 320
4.3.2.3 Schweißpositionen ... 320
4.3.2.4 Werkstückdicken ... 320
4.3.3 Ausrüstung ... 320
4.3.4 Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe ... 322
4.3.5 Technologische Merkmale ... 325
4.3.5.1 Nachrechtsschweißen (NR) ... 325
4.3.5.2 Nachlinksschweißen (NL) ... 327
4.4 Gaspressschweißen (Prozess 47) ... 327
4.4.1 Verfahrensprinzip ... 327
4.4.2 Anwendungsbereiche ... 328
4.4.3 Zusatzstoffe ... 328
4.4.4 Fertigungshinweise ... 328
4.4.5 Ausrüstungen ... 329

5 Schweißen mit Widerstandserwärmung ... 330
5.1 Einteilung der Widerstandsschweißverfahren ... 330
5.2 Konduktives Widerstandspressschweißen ... 331
5.2.1 Widerstandserwärmung durch konduktive Stromübertragung ... 331
5.2.2 Ausrüstungen zum konduktiven Widerstandspressschweißen ... 332
5.2.2.1 Aufbau einer konduktiven Widerstandsschweißmaschine ... 332
5.2.2.2 Schweißstromquellen zum konduktiven Widerstandspressschweißen ... 333
5.2.2.3 Mechanischer Teil der Schweißeinrichtungen ... 338
5.2.3 Widerstandspunktschweißen (Prozess 21) ... 339
5.2.3.1 Verfahrensmerkmale ... 339

5.2.3.2 Verfahrensprinzip/ -beschreibung 340
5.2.3.3 Schweißanlagenaufbau..... 342
5.2.3.4 Elektroden zum Widerstandspunktschweißen..... 343
5.2.3.5 Schweißeignung 346
5.2.3.6 Konstruktive Gestaltung..... 350
5.2.3.7 Fertigungshinweise..... 352
5.2.3.9 Prüfen der Schweißverbindung 359
5.2.3.10 Verfahrensvarianten..... 361
5.2.3.11 Arbeits- und Gesundheitsschutz 362
5.2.4 Rollennahtschweißen (Prozess 22)..... 363
5.2.4.1 Verfahrensmerkmale..... 363
5.2.4.2 Verfahrensprinzip/ -beschreibung 363
5.2.4.3 Schweißanlagenaufbau..... 364
5.2.4.4 Elektroden zum Rollennahtschweißen..... 366
5.2.4.5 Schweißeignung 367
5.2.4.6 Konstruktive Gestaltung 368
5.2.4.7 Fertigungshinweise..... 369
5.2.4.8 Qualitätssicherung..... 371
5.2.4.9 Prüfen der Schweißverbindung 373
5.2.4.10 Verfahrensvarianten..... 373
5.2.5 Buckelschweißen (Prozess 23)..... 376
5.2.5.1 Verfahrensmerkmale..... 376
5.2.5.2 Verfahrensprinzip/ -beschreibung 377
5.2.5.3 Schweißanlagenaufbau..... 377
5.2.5.4 Elektroden zum Buckelschweißen..... 378
5.2.5.5 Schweißeignung 379
5.2.5.6 Konstruktive Gestaltung..... 380
5.2.5.7 Fertigungshinweise..... 382
5.2.5.8 Qualitätssicherung..... 383
5.2.5.9 Prüfen der Schweißverbindung 385
5.2.5.10 Verfahrensvarianten..... 385
5.2.6 Abbrennstumpfschweißen (Prozess 24)..... 386
5.2.6.1 Verfahrensmerkmale..... 386
5.2.6.2 Verfahrensprinzip/ -beschreibung 387
5.2.6.3 Schweißanlagenaufbau..... 387
5.2.6.4 Schweißeignung 389
5.2.6.5 Konstruktive Gestaltung..... 389
5.2.6.6 Fertigungshinweise..... 390
5.2.6.7 Qualitätssicherung..... 392
5.2.6.8 Prüfen der Schweißverbindung 393
5.2.7 Pressstumpfschweißen (Prozess 25)..... 393
5.2.7.1 Verfahrensmerkmale..... 393
5.2.7.2 Verfahrensprinzip/ -beschreibung 394
5.2.7.3 Schweißanlagenaufbau..... 395
5.2.7.4 Schweißeignung 396
5.2.7.5 Konstruktive Gestaltung..... 396
5.2.7.6 Fertigungshinweise..... 397
5.2.7.7 Qualitätssicherung..... 398
5.2.7.8 Prüfen der Schweißverbindung 398
5.2.7.9 Verfahrensvariante Kammerschweißen..... 398
5.3 Induktives Widerstandspressschweißen.. 399
5.3.1 Widerstandserwärmung durch induktive Stromübertragung 399
5.3.2 Ausrüstungen zum induktiven Widerstandspressschweißen 400
5.3.2.1 Aufbau einer induktiven Widerstandsschweißmaschine..... 400
5.3.2.2 Schweißstromquellen zum induktiven Widerstandspressschweißen 401
5.3.2.3 Mechanischer Teil der Schweißeinrichtungen..... 401
5.3.3 Induktives Hochfrequenzschweißen (Prozess 743)..... 402
5.3.3.1 Verfahrensmerkmale..... 402
5.3.3.2 Verfahrensprinzip/ -beschreibung 402
5.3.3.3 Schweißeignung 404
5.3.3.4 Fertigungshinweise..... 405
5.3.4 Induktives Stumpfschweißen (Prozess 741) 405

5.4 Elektroschlackeschweißen (Prozess 72) .. 406
5.4.1 Grundlagen zum Elektroschlackeschweißen 406
5.4.2 Elektroschlacke-Verbindungsschweißen 407
5.4.2.1 Verfahrensprinzip/-beschreibung 407
5.4.2.2 Schweißanlagenaufbau..... 408
5.4.2.3 Schweißpulver 409
5.4.2.4 Zusatzwerkstoff 410
5.4.2.5 Schweißeignung 410
5.4.2.6 Fertigungshinweise..... 410
5.4.2.7 Verfahrensvarianten..... 412
5.4.3 Elektroschlacke-Auftragschweißen 413
5.4.3.1 Verfahrensprinzip/-beschreibung 413
5.4.3.2 Schweißanlagenaufbau..... 414
5.4.3.3 Schweißpulver 415
5.4.3.4 Zusatzwerkstoff 415
5.4.3.5 Fertigungshinweise..... 415

6 Schweißen mit Strahlen 417
6.1 Grundlagen der Strahltechnik 417
6.2 Lichtstrahlschweißen – Schweißen mit inkohärentem Licht (Prozess 75) 418
6.3 Elektronenstrahlschweißen (Prozess 51). 419
6.3.1 Grundlagen des Elektronenstrahlschweißens..... 420
6.3.1.1 Entstehung und Besonderheiten des Elektronenstrahls..... 420
6.3.1.2 Elektronenstrahlerzeugung.. 421
6.3.1.3 Elektronenstrahlführung..... 422
6.3.1.4 Elektronenstrahlschweißanlagen..... 423
6.3.2 Anwendung des Elektronenstrahlschweißens..... 427
6.3.2.1 Tiefschweißeffekt 427
6.3.2.2 Vorbereitung der Werkstücke 429
6.3.2.3 Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis 431
6.3.2.4 Schweißeignung metallischer Werkstoffe 435
6.3.2.5 Industrielle Anwendung 438
6.3.3 Weitere Verfahren der Elektronenstrahlmaterialbearbeitung 439
6.3.4 Strahlenschutz..... 440
6.4 Laserstrahlschweißen (Prozess 52)..... 441
6.4.1 Grundlagen des Laserstrahlschweißens 443
6.4.1.1 Entstehung und Besonderheiten von Laserlicht 443
6.4.1.2 Eigenschaften des Laserlichts..... 445
6.4.2 Laseranlagen..... 445
6.4.2.1 Laserstrahlquellen 445
6.4.2.2 Laserstrahlführung..... 452
6.4.2.3 Fokussierende Optiken..... 453
6.4.2.4 Bewegungseinrichtungen 454
6.4.2.5 Steuerung und Bedienung.... 454
6.4.3 Anwendung des Laserstrahlschweißens 455
6.4.3.1 Tiefschweißeffekt 455
6.4.3.2 Vorbereitung der Werkstücke 456
6.4.3.3 Schweißparameter und Hinweise für die Schweißpraxis 456
6.4.3.4 Schweißeignung metallischer Werkstoffe 462
6.4.3.5 Industrielle Anwendung 464
6.4.4 Weitere Verfahren der Lasermaterialbearbeitung 465
6.4.4.1 Überblick 465
6.4.4.2 Laserstrahlschneiden 466
6.4.4.3 Additive Fertigung mit dem Laserstrahl..... 468
6.4.5 Strahlenschutz..... 473
6.4.6 Gegenüberstellung Elektronenstrahlschweißen – Laserstrahlschweißen..... 474

7 Schweißen durch Bewegungsenergie 478
7.1 Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung kinetischer Energie..... 478
7.2 Reibschweißen..... 478
7.2.1 Rotationsreibschweißen (Prozess 42)..... 478
7.2.1.1 Verfahrensprinzip..... 479

7.2.1.2 Ausrüstungen ... 479
7.2.1.3 Anwendungsbereich ... 482
7.2.1.4 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit ... 483
7.2.1.5 Fertigungshinweise ... 484
7.2.1.6 Richtwerte ... 487
7.2.2 Linearreibschweißen ... 487
7.3 Rührreibschweißen (Prozess 43) ... 489
7.3.1 Verfahrensprinzip ... 489
7.3.2 Ausrüstungen ... 490
7.3.3 Anwendungsbereiche ... 491
7.3.4 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit ... 492
7.3.5 Fertigungshinweise ... 493
7.3.6 Punktreibschweißen ... 493
7.3.6.1 Verfahrensprinzip ... 493
7.3.6.2 Anwendungsbereiche ... 494
7.4 Ultraschallschweißen (Prozess 41) ... 495
7.4.1 Verfahrensprinzip ... 495
7.4.2 Ausrüstungen ... 496
7.4.3 Anwendungsbereiche ... 497
7.4.4 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit ... 498
7.4.5 Fertigungshinweise ... 498
7.5 Kaltpressschweißen (Prozess 48) ... 498
7.5.1 Verfahrensprinzip ... 500
7.5.2 Anwendungsbereich ... 501
7.5.3 Konstruktive Gestaltung ... 502
7.5.4 Fertigungshinweise ... 503
7.6 Sprengschweißen (Prozess 441) ... 503
7.6.1 Verfahrensprinzip ... 504
7.6.2 Anwendungsbereich ... 505
7.6.3 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit ... 505
7.6.4 Fertigungshinweise ... 506
7.6.5 Spezielle Gefährdungen ... 506
7.7 Magnetpulsschweißen (Prozess 442) ... 506
7.7.1 Verfahrensprinzip ... 507
7.7.2 Anwendungsbereich ... 507
7.7.3 Spezielle Gefährdungen ... 508

8 Schweißen durch festen Körper ... 509
8.1 Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung von Heizelementen ... 509
8.2 Heizelementschweißen ... 509
8.2.1 Verfahrensprinzip ... 509
8.2.2 Anwendungsbereich, Ausrüstungen ... 510
8.2.3 Konstruktive Gestaltung und Festigkeit ... 511
8.2.4 Fertigungshinweise ... 511

9 Schweißen mit Metallschmelzen ... 512
9.1 Grundlagen der schweißtechnischen Nutzung von Metallschmelzen ... 512
9.2 Gießschweißen (Thermitschweißen) ... 512
9.2.1 Aluminothermisches Schmelzschweißen (Prozess 71) ... 512
9.2.1.1 Verfahrensprinzip ... 512
9.2.1.2 Anwendungsbereich ... 513
9.2.1.3 Ausrüstungen ... 514
9.2.1.4 Fertigungshinweise ... 514
9.2.2 Aluminothermisches Pressschweißen ... 515
9.2.2.1 Verfahrensprinzip ... 515
9.2.2.2 Anwendungsbereich ... 515
9.2.2.3 Fertigungshinweise ... 515
9.3 Besondere Gefährdungen ... 516

10 Schweißen durch Diffusion ... 517
10.1 Grundlagen zur schweißtechnischen Nutzung der Diffusion ... 517
10.2 Diffusionsschweißen (Prozess 45) ... 517
10.2.1 Verfahrensprinzip ... 518
10.2.2 Anwendungsbereich ... 519
10.2.3 Konstruktive Gestaltung ... 520
10.2.4 Fertigungshinweise ... 520

Literaturverzeichnis ... 523

Sachwortverzeichnis ... 541

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

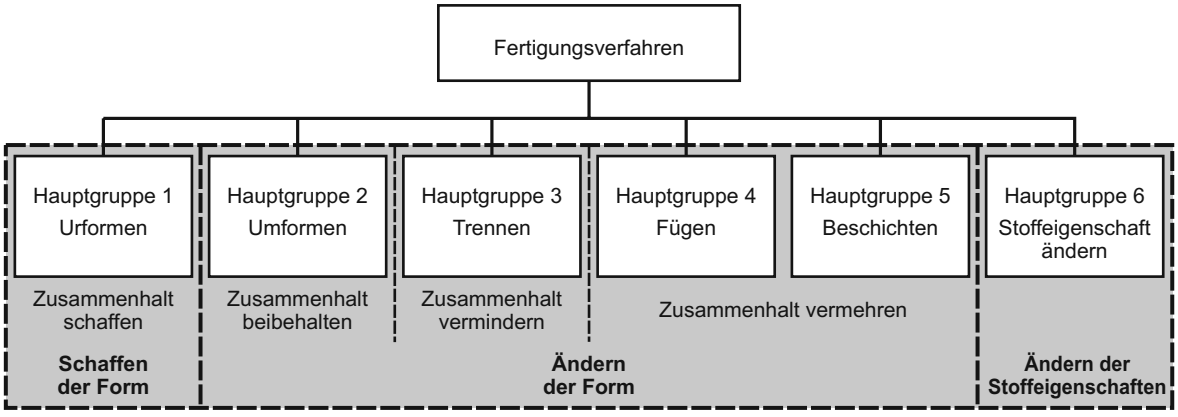


Bild 1.1 Einteilung der Fertigungsverfahren nach Art des Zusammenhalts und deren Wirkungsweise nach DIN 8580

Tabelle 1.1 Teiloperationen des Montageprozesses nach VDI 2860

Montage				
Fügen (DIN 8593)	**Handhaben (VDI 2860)**	**Kontrollieren (VDI 2860)**	**Justieren durch**	**Sonderoperation**
▪ Zusammensetzen ▪ Füllen ▪ Anpressen und Einpressen ▪ Fügen durch Urformen ▪ Fügen durch Umformen ▪ Fügen durch Schweißen ▪ Fügen durch Löten ▪ Fügen durch Kleben ▪ textiles Fügen	▪ Speichern ▪ Mengen verändern ▪ Bewegen ▪ Sichern ▪ Kontrollieren	▪ Messen ▪ Prüfen	▪ Einformen ▪ Umformen ▪ Trennen ▪ Fügen von Ausgleichsteilen ▪ Einstellen ▪ Nachbehandeln	▪ 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 Wärmeeinbringung erforderlich. Derartige Prozesse werden als **Pressschweißen** bezeichnet.

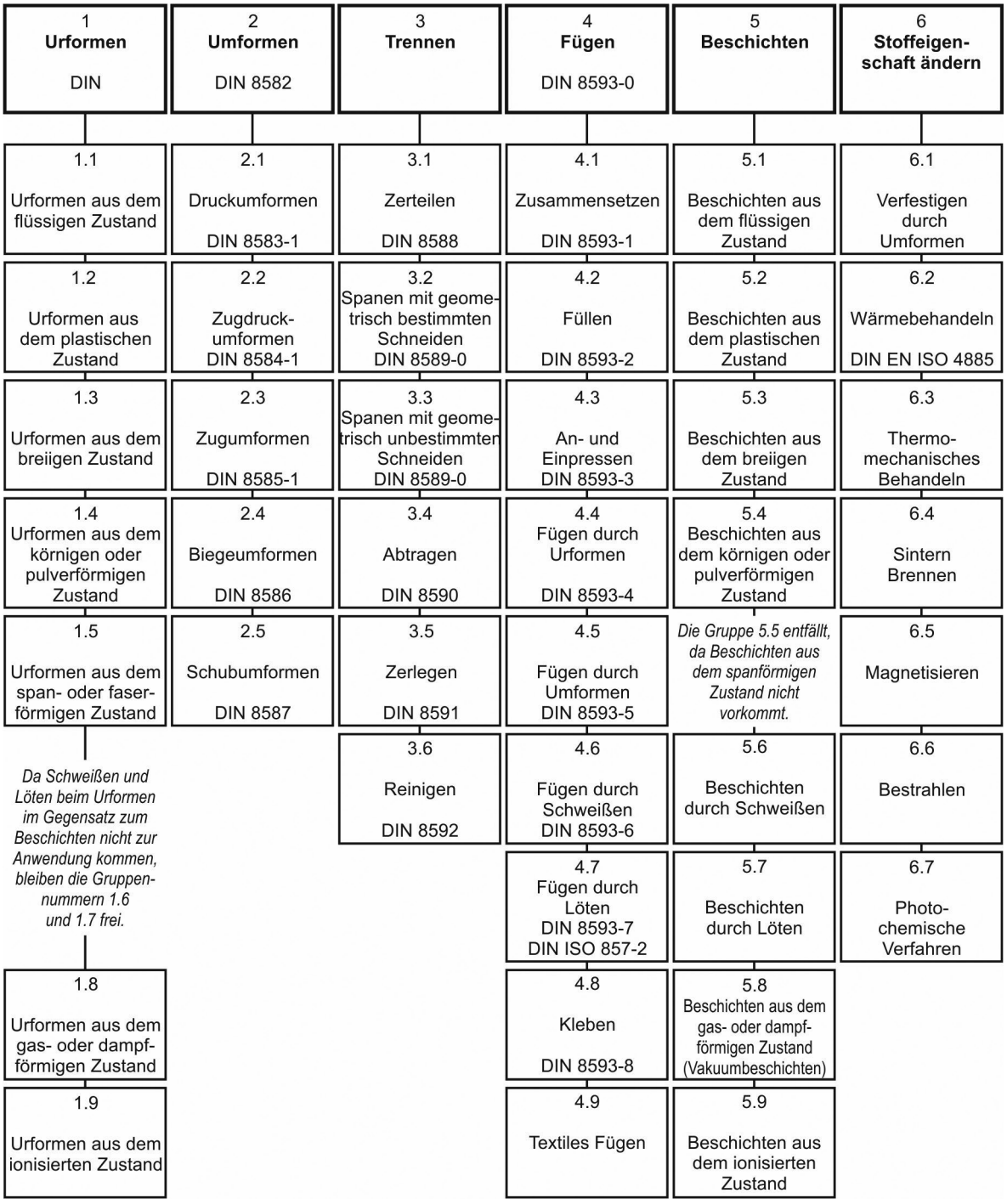


Bild 1.2 Detaillierte Übersicht der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

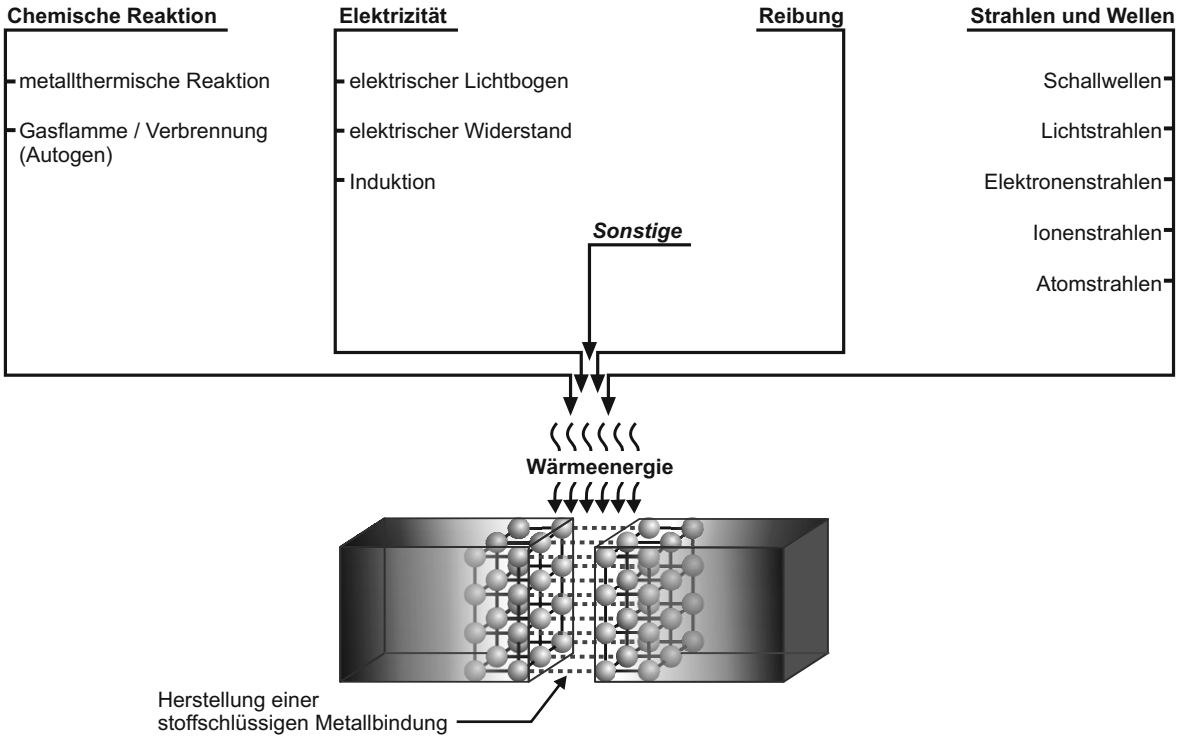


Bild 1.3 Formen der Wärmeerzeugung an der Fügestelle

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 **unlösbaren 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-

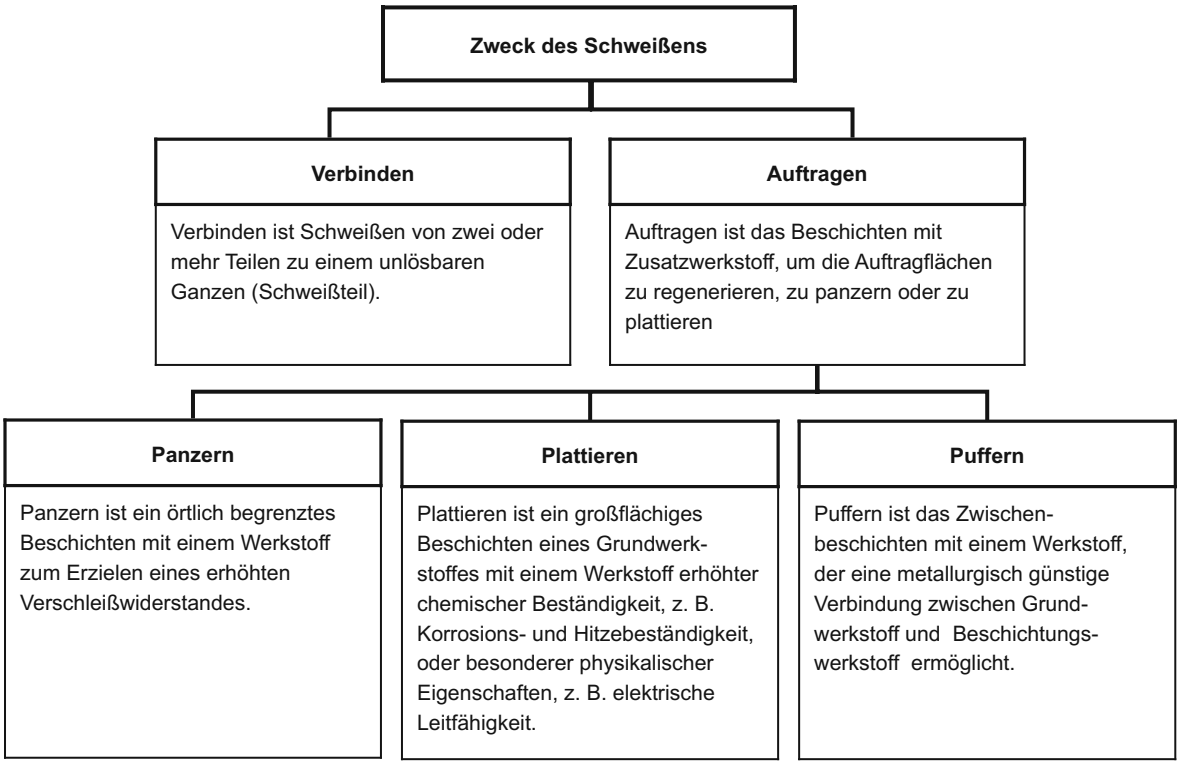


Bild 1.4 Einteilung des Schweißens nach dessen Zweck

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 Fügeteile im Bereich der Fügestelle erforderlich. Diese Anforderungen können u. a. durch das Aufschmelzen des Werkstoffes bzw. durch starke Druckeinwirkung oder auch Relativbewegung der Fügeteiloberflächen 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 Fügeteile 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

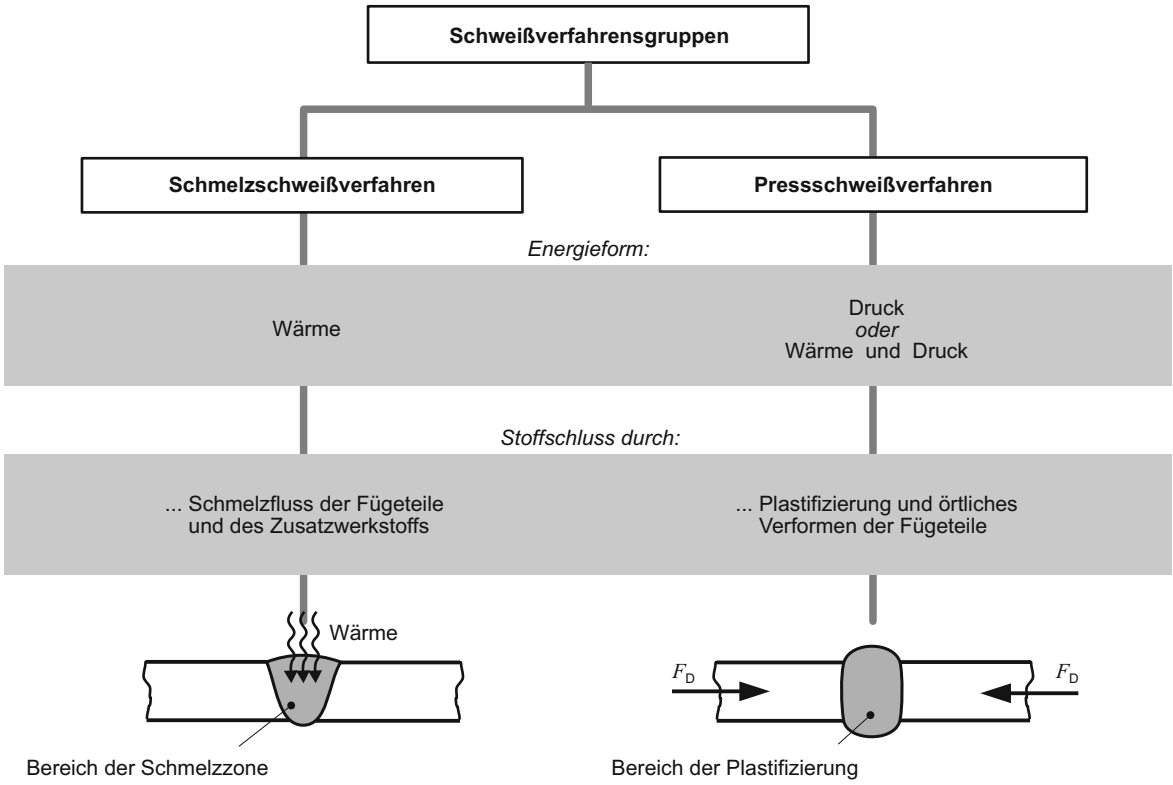
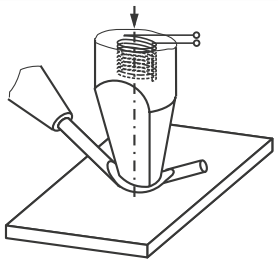
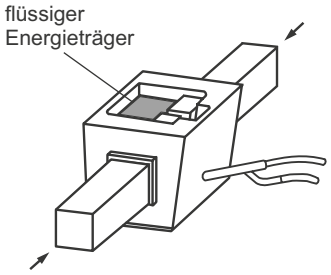
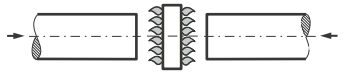
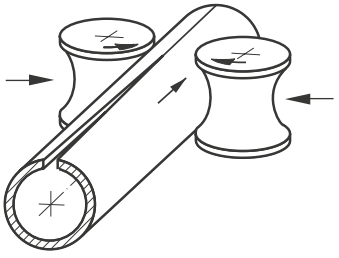
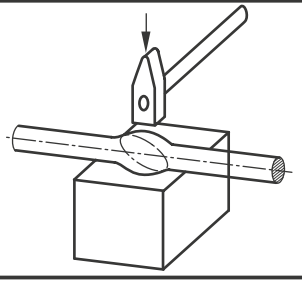


Bild 1.5 Wirkpaarungen beim Schweißen

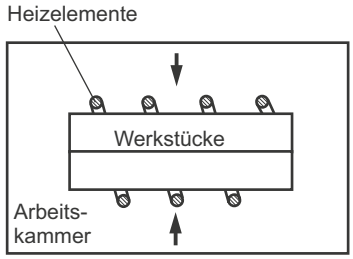
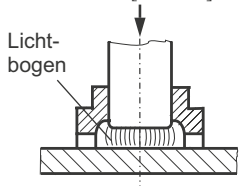
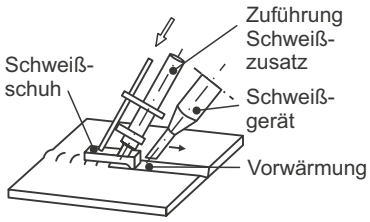
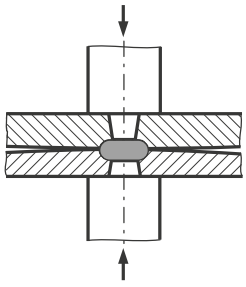
Herstellung der Schweißverbindung ist ebenfalls Grundlage des Aufbaus dieses Buches in den nachfolgenden Kapiteln.

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.

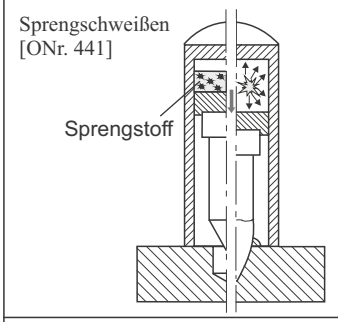
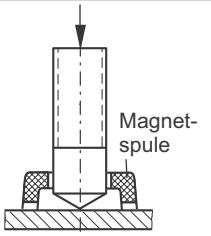
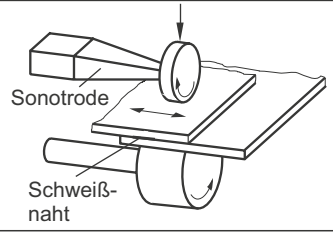
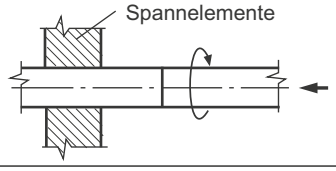
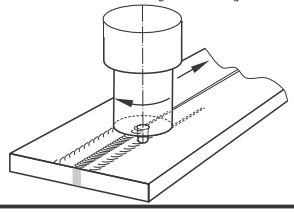
Tafel 1.1 Wirkprinzipien beim Schmelz- und Pressschweißen (in Anlehnung an DIN 8593-6)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press-schweißen	6.1.1 ... durch feste Körper	Heizelement-schweißen	Fügen von Werkstücken durch Anpressen mit einem beheizten Schweißwerkzeug	
	6.1.2 ... durch Flüssigkeit	Gießpress-schweißen	Fügen, indem die Fügestelle der Werkstücke durch Umgießen mit einem flüssigen Energieträger erwärmt und verpresst wird	
	6.1.3 ... durch Gas	Gaspress-schweißen [ONr. 47]	Fügen durch Verpressen von Werkstücken mit durch Flammen erwärmten Stoßflächen	
		Walz-schweißen	Fügen, indem erwärmte Werkstücke gemeinsam gewalzt werden	
		Feuer-schweißen	Fügen von Werkstücken durch Freiformen, Gesenkformen oder Durchdrücken der durch Feuer erwärmten Stoßflächen	

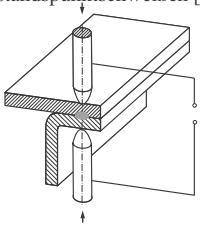
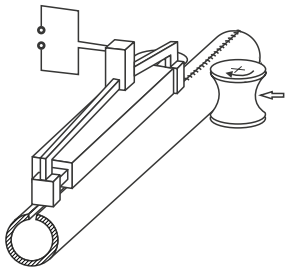
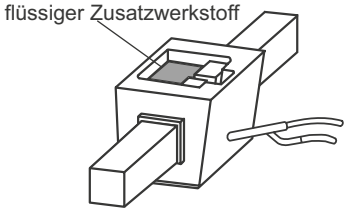
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press-schweißen	6.1.3 ... durch Gas	Diffusions-schweißen [ONr. 45]	Fügen von Werkstücken im Vakuum, unter Schutzgas oder in einer Flüssigkeit aufgrund von Diffusion an den Stoßflächen durch Wärme und Kraft	
	6.1.4 ... durch elektrische Gasentladung	Lichtbogen-press-schweißen	Fügen durch Verpressen von Werkstücken, die durch einen kurzzeitig brennenden Lichtbogen erwärmt wurden	Bolzenschweißen [ONr. 78]  alternative Verfahrensvariante: Schweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen [ONr.185]
	6.1.5 ... durch Strahlung	Lichtstrahl-Extrusions-schweißen *Nur für Kunststoffe bekannt*	Kunststoff wird über einen durch Lichtstrahl beheizten Extruder zum Schweißkopf geführt, der die beheizte Masse zwischen die vorher erwärmten Stoßflächen drückt	
	6.1.6 ... durch Bewegung	Kaltpress-schweißen [ONr. 48]	Fügen, indem Werkstücke an der Fügestelle durch stetige Krafteinwirkung ohne Wärme stark plastisch verformt werden	

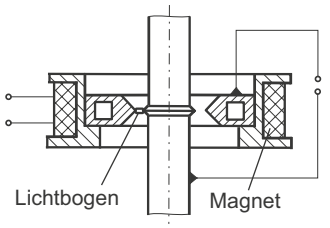
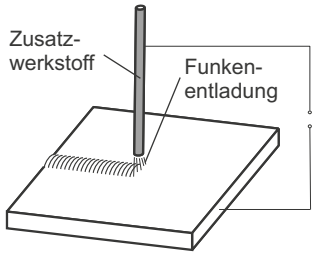
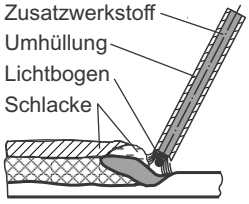
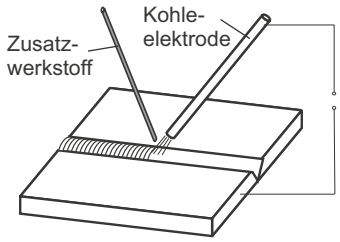
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press-schweißen	6.1.6 ... durch Bewegung	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	*mind. ein Werkstück wird bewegt*: Rotationsreibschweißen 
				Werkstücke werden nicht bewegt: Rührreibschweißen [ONr. 43] 

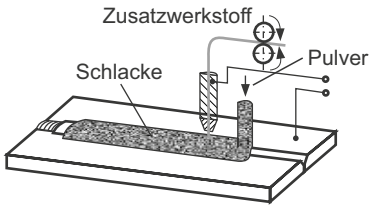
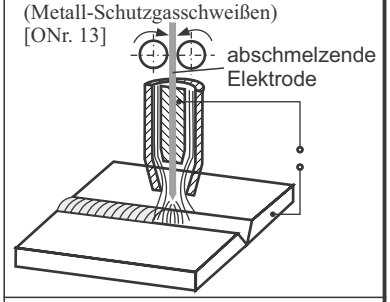
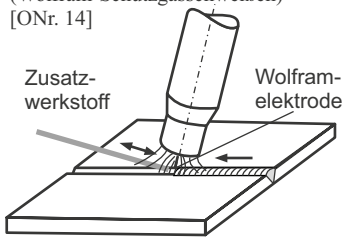
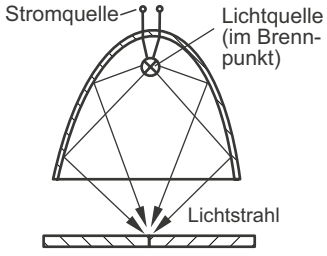
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.1 Press-schweißen	6.1.7 ... durch elektrischen Strom	Widerstands-press-schweißen	Fügen von Werkstücken durch partielle elektrische Widerstandserwärmung in der Schweißzone und nachfolgendes Verpressen	*konduktives Pressschweißen:* Widerstandspunktschweißen [ONr. 21]  *andere Verfahrensvarianten*: Buckel-, Rollennaht-, Rolltransformator-, Schleifkontakt-, Abbrennstumpf- und Pressstumpfschweißen
				induktives Pressschweißen: Induktionsschweißen [ONr. 74] 
6.2 Schmelz-schweißen	6.2.1 ... durch feste Körper	*kein Prozess bekannt*		
	6.2.2 ... durch Flüssigkeit	Gieß-schmelz-schweißen	Fügen, indem die eingeformte Fügestelle durch Umgießen mit einem flüssigen Zusatzwerkstoff angeschmolzen wird	
	6.2.3 ... durch Gas	Gasschmelz-schweißen [ONr. 3]	Fügen durch Erzeugen des Schweißbades mit einer konzentrierten Brenngas-O_2-Flamme	

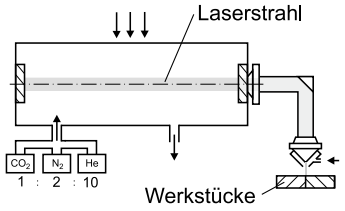
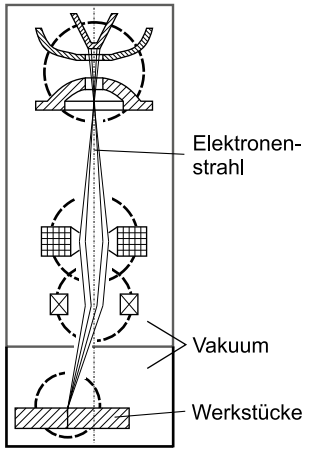
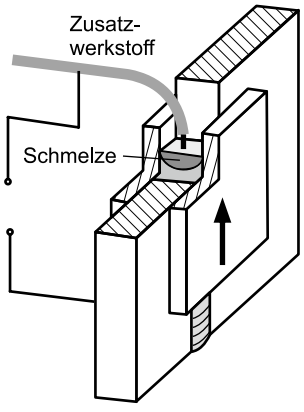
Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelzschweißen	6.2.4 ... durch elektrische Gasentladung	(Lichtbogen)-Schmelzschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen [ONr. 185]	Fügen von Werkstücken, indem ein magnetisch abgelenkter Lichtbogen die Schweißfuge aufschmilzt	
		Funkenschweißen	Fügen, indem durch Funkentladungen der Werkstoff der Elektrode zum Werkstück abgetragen wird	
		Metallichtbogenschweißen [ONr. 11]	Fügen durch Aufschmelzen der Fügestelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer abschmelzenden, schlackebildenden Elektrode und dem Werkstück brennt	Lichtbogenhandschweißen [ONr. 111]  andere Verfahrensvarianten: Schwerkraft-, Federkraft-, Metalllichtbogenschweißen mit Fülldrahtelektrode, Unterschieneschweißen
		Kohlelichtbogenschweißen	Fügen durch Aufschmelzen der Fügestelle mithilfe eines Lichtbogens, der zwischen einer nicht abschmelzenden Kohleelektrode und dem Werkstück brennt	

Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelzschweißen	6.2.4 ... durch elektrische Gasentladung	Unterpulverschweißen [ONr. 12]	Fügen durch Aufschmelzen der Fügestelle mit einem Lichtbogen, der zwischen einer abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück brennt, wobei der Lichtbogen mit schlackebildendem Pulver abgedeckt ist	
		Schutzgasschweißen	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] 
	6.2.5 ... durch Strahl	Lichtstrahlschweißen [ONr. 75]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines nicht kohärenten Lichtstrahls aufgeschmolzen wird	

Tafel 1.1 (Fortsetzung)

Untergruppe	Wirkprinzip	Beschreibung [Ordnungsnummer]		Beispiel
6.2 Schmelzschweißen	6.2.5 ... durch Strahl	Laserstrahlschweißen [ONr. 52]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit der Energie eines kohärenten Strahls aufgeschmolzen wird	
		Elektronenstrahlschweißen [ONr. 51]	Fügen von Werkstücken, indem die Fügestelle mit einem Elektronenstrahl aufgeschmolzen wird	
	6.2.6 ... durch Bewegung von Masse	*kein Prozess bekannt*		
	6.2.7 ... durch elektrischen Strom	Widerstandsschmelzschweißen	Fügen von Werkstücken, indem die Fügezone durch Widerstandserwärmung geschmolzen wird	 andere Verfahrensvariante: Kammerschweißen