

Handbuch der Schweißverfahren

Teil II:

**Autogentechnik, Thermisches Schneiden,
Elektronen-/Laserstrahlschweißen,
Reib-, Ultraschall- und
Diffusionsschweißen**

von

**D. Böhme und F.-D. Hermann
unter Mitarbeit von
H. Mair, H. Schultz, T. Wahl und M. Weinreich**



Inhaltsverzeichnis

Vorwort

| | | |
|-------------|---|----|
| 1 | Autogentechnik | 1 |
| 1.1 | Grundsätzliches zur Autogentechnik | 1 |
| 1.1.1 | Zur Geschichte der Autogentechnik | 1 |
| 1.1.2 | Einteilung der Verfahren der Autogentechnik | 2 |
| 1.1.3 | Betriebsmittel für die Verfahren der Autogentechnik | 2 |
| 1.1.3.1 | Sauerstoff | 2 |
| 1.1.3.1.1 | Eigenschaften und Erzeugung des Sauerstoffs | 2 |
| 1.1.3.1.2 | Bereitstellung und Verteilung des Sauerstoffs | 4 |
| 1.1.3.2 | Brenngase | 7 |
| 1.1.3.2.1 | Acetylen | 7 |
| 1.1.3.2.1.1 | Eigenschaften und Erzeugung des Acetylens | 8 |
| 1.1.3.2.1.2 | Bereitstellung und Verteilung des Acetylens | 13 |
| 1.1.3.2.2 | Flüssiggas | 19 |
| 1.1.3.2.2.1 | Eigenschaften und Erzeugung des Flüssiggases | 19 |
| 1.1.3.2.2.2 | Bereitstellung und Verteilung des Flüssiggases | 19 |
| 1.1.3.2.3 | Erdgas | 20 |
| 1.1.3.2.3.1 | Eigenschaften des Erdgases | 20 |
| 1.1.3.2.3.2 | Bereitstellung und Verteilung des Erdgases | 21 |
| 1.1.3.3 | Sicherheitshinweise und -vorschriften für den Umgang mit Sauerstoff und Brenngasen | 21 |
| 1.1.4 | Die Autogenflamme | 22 |
| 1.1.4.1 | Die Verbrennung | 23 |
| 1.1.4.2 | Die Flammeneinstellung | 25 |
| 1.1.4.2.1 | Die neutrale Flamme | 25 |
| 1.1.4.2.2 | Die Sauerstoff-Überschuß-Flamme | 26 |
| 1.1.4.2.3 | Die Acetylen-Überschuß-Flamme | 26 |
| 1.1.4.2.4 | Die „harte“ und die „weiche“ Flamme | 26 |
| 1.1.4.2.5 | Flammenstörungen | 26 |
| 1.1.5 | Autogenbrenner | 27 |
| 1.1.6 | Armaturen und Zubehör | 30 |
| 1.1.6.1 | Druckminderer | 30 |
| 1.1.6.2 | Gasschläuche | 32 |
| 1.1.6.3 | Sicherheitseinrichtungen | 32 |
| 1.2 | Die Verfahren der Autogentechnik | 35 |
| 1.2.1 | Das Gasschweißen | 35 |
| 1.2.1.1 | Methoden des Gasschweißens | 36 |
| 1.2.1.1.1 | Nachlinksschweißen (NL) | 36 |
| 1.2.1.1.2 | Nachrechtsschweißen (NR) | 36 |
| 1.2.1.1.3 | Beidseitiges Schweißen | 37 |
| 1.2.1.2 | Schweißnahtvorbereitung und Fugenform | 38 |
| 1.2.1.3 | Zusatzwerkstoffe und Hilfsstoffe zum Gasschweißen | 39 |
| 1.2.1.4 | Gasschweißen verschiedener metallischer Werkstoffe | 39 |
| 1.2.1.5 | Anwendungsbereiche des Gasschweißens | 43 |
| 1.2.2 | Das Gaspreßschweißen | 45 |
| 1.2.3 | Beschichten unter Anwendung der Gasflamme | 47 |
| 1.2.3.1 | Gas-Auftragschweißen | 48 |

| | | |
|------------|---|----|
| 1.2.3.2 | Panzern | 48 |
| 1.2.4 | Flammlöten | 51 |
| 1.2.5 | Flammrichten | 54 |
| 1.2.5.1 | Prinzip des Flammrichtens | 54 |
| 1.2.5.2 | Flammrichten verschiedener Werkstoffe | 57 |
| 1.2.5.3 | Anwendungsbeispiele des Flammrichtens | 57 |
| 1.2.6 | Flammwärmen | 61 |
| 1.2.6.1 | Vorwärmen – Nachwärmen | 61 |
| 1.2.6.2 | Warmformgebung | 62 |
| 1.2.7 | Flammhärten | 63 |
| 1.2.7.1 | Das Prinzip des Flammhärtens | 63 |
| 1.2.8 | Das Flammentspannen | 66 |
| 1.2.9 | Flammstrahlen | 69 |
| 1.2.9.1 | Flammstrahlen von Stahl | 70 |
| 1.2.9.2 | Flammstrahlen von Beton und Gestein | 70 |
| 1.2.9.3 | Ausführung des Flammstrahlens | 71 |
| Schrifttum | | 72 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 2 | Thermisches Schneiden | 73 |
| 2.1 | Einteilung der Schneidverfahren | 73 |
| 2.2 | Autogenes Brennschneiden | 75 |
| 2.2.1 | Grundlagen des Brennschneidens | 75 |
| 2.2.2 | Brenngas und Sauerstoff | 79 |
| 2.2.3 | Schneidbrenner | 79 |
| 2.2.4 | Schneiddüsen | 81 |
| 2.2.5 | Inbetriebnahme eines Schneidbrenners | 83 |
| 2.2.6 | Brennschneiden | 83 |
| 2.2.6.1 | Güte und Maßtoleranzen der Schnittflächen | 86 |
| 2.2.6.2 | Brennschneidfehler | 89 |
| 2.2.7 | Brennschneidmaschinen | 89 |
| 2.2.7.1 | Brennschneidmaschinen-Steuerungen | 95 |
| 2.2.7.2 | Brennschneidmaschinen-Antriebe | 96 |
| 2.2.7.3 | Sonder- und Hilfseinrichtungen | 97 |
| 2.2.8 | Arbeitsschutz beim Brennschneiden | 99 |
| 2.2.8.1 | Körperschutzmaßnahmen | 99 |
| 2.2.8.2 | Brenngase und Sauerstoff | 100 |
| 2.2.8.3 | Geräte und Armaturen | 101 |
| 2.2.8.4 | Brandgefahr | 101 |
| 2.2.9 | Wirtschaftliches Brennschneiden | 102 |
| 2.3 | Sonderverfahren | 103 |
| 2.3.1 | Pulverbrennschneiden | 103 |
| 2.3.2 | Brennbohren | 105 |
| 2.3.3 | Brennhobeln | 106 |
| 2.3.3.1 | Brennfugen | 107 |
| 2.3.3.2 | Lichtbogen-Druckluftfugen | 109 |
| 2.3.3.3 | Lichtbogen-Sauerstoffschneiden | 110 |
| 2.4 | Plasmaschneiden | 112 |
| 2.4.1 | Grundlagen der Plasmatechnologie | 112 |
| 2.4.2 | Verfahrensprinzip des Plasmaschneidens | 115 |
| 2.4.3 | Plasmabildende Medien | 119 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 2.4.3.1 | Argon | 119 |
| 2.4.3.2 | Wasserstoff | 120 |
| 2.4.3.3 | Stickstoff | 121 |
| 2.4.3.4 | Luft | 121 |
| 2.4.3.5 | Wasser | 122 |
| 2.4.4 | Verfahrenstechniken | 122 |
| 2.4.4.1 | Argon-Wasser-Stickstoff-Plasmaschneiden | 122 |
| 2.4.4.2 | Druckluft-Plasmaschneiden, Sauerstoff-Plasmaschneiden | 123 |
| 2.4.4.3 | Wasser-Injektion, Unterwasserplasmaschneiden | 124 |
| 2.4.5 | Ausrüstung zum Plasmaschneiden | 128 |
| 2.4.5.1 | Stromquellen | 128 |
| 2.4.5.2 | Brenner | 130 |
| 2.4.5.2.1 | Düse | 131 |
| 2.4.5.2.2 | Elektrode | 133 |
| 2.4.5.3 | Steuerung | 135 |
| 2.4.5.4 | Führungsmaschinen und Hilfseinrichtungen zum vollmechanischen Schneiden | 136 |
| 2.4.6 | Schnitteigenschaften | 139 |
| 2.4.6.1 | Schnittgüte | 140 |
| 2.4.6.2 | Schneidfehler | 142 |
| 2.4.7 | Werkstoffe und zugeordnete Schneidaten | 143 |
| 2.4.8 | Arbeitsschutz beim Plasmaschneiden | 148 |
| 2.4.8.1 | Leerlaufspannung | 148 |
| 2.4.8.2 | Lärm | 149 |
| 2.4.8.3 | Strahlung | 150 |
| 2.4.8.4 | Gase und Stäube | 151 |
| 2.4.8.5 | Schutz- und Abhilfemaßnahmen | 155 |
| 2.4.9 | Hinweise zu Wirtschaftlichkeitsüberlegungen | 158 |
| 2.5 | Laserstrahlschneiden | 164 |
| 2.5.1 | Einleitung | 164 |
| 2.5.2 | Laserstrahlschneidverfahren | 165 |
| 2.5.2.1 | Laserstrahl-Brennschneiden | 165 |
| 2.5.2.2 | Laserstrahl-Schmelzschneiden | 165 |
| 2.5.2.3 | Laserstrahl-Sublimierschneiden | 166 |
| 2.5.3 | Laserstrahl-Schneidanlage | 167 |
| 2.5.4 | Einflußfaktoren beim Laserstrahlschneiden | 167 |
| 2.5.4.1 | Strahlparameter | 167 |
| 2.5.4.2 | Strahlgeometrie | 172 |
| 2.5.4.3 | Schneidgase | 175 |
| 2.5.4.4 | Werkstoffe | 176 |
| 2.5.4.5 | Handhabungssysteme | 179 |
| 2.5.5 | Schnittqualität | 180 |
| 2.5.5.1 | Schnittflächengüte | 180 |
| 2.5.5.2 | Maßtoleranzen | 181 |
| 2.5.5.3 | Kennzeichnung der Schnittgüte und der Toleranzklasse | 183 |
| 2.5.6 | Anwendungsbereiche der verschiedenen thermischen Schneidverfahren Laserstrahl-Brennschneiden, Plasmaschneiden und autogenes Brennschneiden | 183 |
| 2.5.6.1 | Beispiele laserstrahlgeschnittener Werkstücke | 184 |
| 2.5.6.2 | Beispiele plasmageschnittener Werkstücke | 186 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 2.5.6.3 | Beispiele autogenbrenngeschnittener Werkstücke | 189 |
| 2.5.7 | Wirtschaftliche Gesichtspunkte zu den thermischen Schneidverfahren | 193 |
| 2.5.7.1 | Fertigungskostensatz | 193 |
| 2.5.7.2 | Maschinenstundensatz | 193 |
| 2.5.7.3 | Ermittlung des Maschinenstunden- und Fertigungskostensatzes | 195 |
| 2.5.7.4 | Schnittmeter-Kostenanalyse | 195 |
| Schrifttum | | 201 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 3 | Elektronenstrahlschweißen | 204 |
| 3.1 | Einführung | 204 |
| 3.2 | Physikalische Grundlagen | 205 |
| 3.2.1 | Erzeugung des Elektronenstrahles | 205 |
| 3.2.2 | Fokussieren und Ablenken des Elektronenstrahles | 206 |
| 3.2.3 | Strahldiagnostik | 206 |
| 3.2.4 | Vakuum | 206 |
| 3.3 | Eindringen des Elektronenstrahles in Metalle | 206 |
| 3.3.1 | Vorgänge an der Strahlauftreffstelle | 206 |
| 3.3.2 | Tiefschweißeffekt | 208 |
| 3.4 | Schweißbeugung metallischer Werkstoffe | 209 |
| 3.4.1 | Allgemeines | 209 |
| 3.4.2 | Stähle | 210 |
| 3.4.3 | Nichteisenmetalle | 211 |
| 3.4.4 | Werkstoffkombinationen | 211 |
| 3.5 | Vorbereitung der Werkstücke | 212 |
| 3.5.1 | Allgemeines | 212 |
| 3.5.2 | Oberflächenbearbeitung, Reinigen, Spaltbreite | 213 |
| 3.5.3 | Nahtformen | 214 |
| 3.5.4 | Rundnähte | 216 |
| 3.5.5 | Entlüftungsöffnungen | 216 |
| 3.5.6 | Schweißverzug | 217 |
| 3.5.7 | Schweißvorrichtungen | 218 |
| 3.6 | Elektronenstrahl-Schweißmaschine | 219 |
| 3.6.1 | Grundaufbau | 219 |
| 3.6.2 | Elektronenstrahlkanone | 219 |
| 3.6.3 | Arbeitskammer | 221 |
| 3.6.4 | Bewegungseinrichtungen, Vorrichtungen | 221 |
| 3.6.5 | Hochspannungsversorgung | 223 |
| 3.6.6 | Steuer- und Regeleinrichtungen | 224 |
| 3.6.7 | Vakuumeinrichtungen | 227 |
| 3.7 | Geschweißte Bauteile | 228 |
| 3.8 | Regelwerke | 232 |
| 3.8.1 | DIN-Normen | 232 |
| 3.8.2 | DVS-Merkblätter und -Richtlinien | 233 |
| 3.8.3 | Sonstige Regelwerke | 234 |
| Schrifttum | | 235 |

| | | |
|----------|-----------------------------|-----|
| 4 | Laserstrahlschweißen | 237 |
| 4.1 | Lasergrundlagen | 237 |
| 4.1.1 | Grundlagen | 238 |
| 4.1.1.1 | Allgemeines Laserprinzip | 239 |

| | | |
|-------------|---|------------|
| 4.1.1.2 | Lasertypen | 243 |
| 4.1.1.2.1 | Festkörperlaser | 243 |
| 4.1.1.2.2 | Der Gas-Laser | 246 |
| 4.1.1.2.2.1 | CO ₂ -Lasertypen | 248 |
| 4.1.1.2.2.2 | CO ₂ -Hochfrequenzlaser | 249 |
| 4.2 | Einbindung des Laserstrahlschweißens in die Fügeverfahren nach DIN 1910 und Merkblatt DVS 3203 | 250 |
| 4.3 | Physikalisch-technologische Grundlagen des Laserstrahlschweißens | 251 |
| 4.3.1 | Der Laser | 251 |
| 4.3.1.1 | Prozeßrelevante Laserparameter | 251 |
| 4.3.2 | Strahlführung | 253 |
| 4.3.2.1 | Prozeßrelevante Parameter der Strahlführung | 254 |
| 4.3.3 | Fokussierung und Schutz-/Arbeitsgasführung | 255 |
| 4.3.4 | Bearbeitungsmaschine | 256 |
| 4.3.4.1 | Prozeßrelevante Maschinenparameter | 257 |
| 4.4 | Besonderheiten des Laserstrahlschweißens | 257 |
| 4.5 | Physik des Laserstrahlschweißens | 259 |
| 4.6 | Laserstrahlschweißverfahren | 261 |
| 4.6.1 | Übersicht über die Schweißbeignung von Werkstoffen und Nahtgeometrien | 261 |
| 4.6.2 | Beispiele aus der industriellen Fertigung | 261 |
| 4.6.2.1 | Einsatzgebiet Feinwerktechnik und Elektrotechnik | 262 |
| 4.6.2.2 | Einsatzgebiet Dünnblechschweißen (Karosserie- und Behälterbau) | 262 |
| 4.6.2.3 | Aggregatefertigung in der Automobil- und -zulieferindustrie | 262 |
| 4.6.2.4 | Stahlhalbzeugfertigung und Schiffbau | 263 |
| 4.6.2.5 | Maschinenbau | 263 |
| 4.6.2.6 | Flugzeugbau | 264 |
| 4.6.3 | Sonderverfahren | 264 |
| 4.6.3.1 | Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff | 264 |
| 4.6.3.2 | Mehrlagiges Schweißen | 265 |
| 4.6.3.3 | Laserstrahlpreßschweißen | 265 |
| 4.7 | Stand der Forschung | 266 |
| 4.8 | Zukunftsaussichten | 267 |
| | Schrifttum | 267 |
| 5 | Reibschweißen | 269 |
| 5.1 | Verfahrensvarianten und Ausführungsarten | 269 |
| 5.2 | Verfahrensprinzip | 272 |
| 5.2.1 | Verfahrensablauf | 273 |
| 5.2.2 | Bindungsmechanismus | 275 |
| 5.3 | Maschinen und Einrichtungen für das Reibschweißen | 276 |
| 5.4 | Konstruktive Ausführung von Reibschweißverbindungen | 281 |
| 5.5 | Reibschweißgeeignete Werkstoffe und Werkstoffkombinationen | 286 |
| 5.5.1 | Verbindungen von Stahl mit Stahl | 288 |
| 5.5.2 | Verbindungen von Stahl mit Eisengußwerkstoffen | 288 |
| 5.5.3 | Verbindungen von Stahl mit Aluminium | 291 |
| 5.5.4 | Verbindungen von Aluminium mit Kupfer | 291 |
| 5.6 | Einsatz des Reibschweißens in der industriellen Fertigung | 292 |
| 5.7 | Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen | 294 |
| | Weiterführendes Schrifttum | 295 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 6 | Ultraschallschweißen | 298 |
| 6.1 | Verfahrensablauf und Bindungsmechanismus | 298 |
| 6.2 | Maschinen und Einrichtungen für das Ultraschallschweißen | 299 |
| 6.3 | Konstruktive Ausführung von Ultraschallschweißverbindungen | 300 |
| 6.4 | Ultraschallschweißgeeignete Werkstoffe | 301 |
| 6.5 | Einsatz des Ultraschallschweißens in der industriellen Fertigung | 303 |
| | Weiterführendes Schrifttum | 304 |
| 7 | Diffusionsschweißen | 305 |
| 7.1 | Verfahrensablauf und Bindungsmechanismus | 305 |
| 7.2 | Maschinen und Einrichtungen für das Diffusionsschweißen | 307 |
| 7.3 | Diffusionsschweißgeeignete Werkstoffe | 308 |
| 7.4 | Einsatz des Diffusionsschweißens in der industriellen Fertigung | 308 |
| | Weiterführendes Schrifttum | 310 |