

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-Überschüß-Flamme	26
1.1.4.2.3	Die Acetylen-Überschüß-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 – Nachwärmern	61
1.2.6.2	Warmformgebung	62
1.2.7	Flammhärteln	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
	Schrifftum	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	Brennschneidefehler	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-Sauerstoffschniden	110
2.4	Plasmuschneiden	112
2.4.1	Grundlagen der Plasmatechnologie	112
2.4.2	Verfahrensprinzip des Plasmuschneidens	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 Schneiddaten	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-Schmelzschniden	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 Strahlauf treffstelle	206
3.3.2	Tiefschweißeffekt	208
3.4	Schweißeignung 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 -Laserarten	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 Schweißeignung 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 -zuliefererindustrie	262
4.6.2.4	Stahlhalbzeugefertigung 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	Zukunftsansichten	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