Volkmar Schuler • Jürgen Twrdek

Praxiswissen Schweißtechnik

Werkstoffe, Prozesse, Fertigung

7., überarbeitete und aktualisierte Auflage

Springer Vieweg

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Schmelzschweißprozesse 7

2.1 Gasschmelzschweißen 8

2.1.1 Brenngase 8

2.1.2 Sauerstoff 10

2.1.3 Armaturen 10

2.1.4 Schweißbrenner 13

2.1.5 Schweißzusätze 17

2.1.6 Schweißarten 17

2.2 Grundlagen des Lichtbogenschweißens 18

2.2.1 Die Vorgänge im Lichtbogen 18

2.2.2 Schweißstromquellen 20

2.3 Das Lichtbogenhandschweißen 30

2.3.1 Stabelektroden 31

2.3.2 Bezeichnung der Elektroden 35

2.4 Unterpulverschweißen 36

2.4.1 Schweißzusätze zum UP-Schweißen 37

2.4.2 Elektroden 38

2.4.3 Schweißpulver 39

2.5 Schutzgasschweißen 41

2.5.1 Schutzgase zum Schweißen 42

2.5.2 Metallschutzgasschweißen 50

2.5.3 Wolfram-Inertgasschweißen 64

2.5.4 Wolfram-Plasmaschweißen 73

2.6 Gießschmelzschweißen 76

2.7 Strahlschweißprozesse 79

2.7.1 Elektronenstrahlschweißen 79

2.7.2 Laserschweißen 84

2.8 Elektroschlackeschweißen 92

Weiterführende Literatur 94

3 Prozesse des Pressschweißens ... 95
3.1 Widerstandspressschweißen ... 96
3.1.1 Stromquellen und Stromformen beim Widerstandsschweißen ... 97
3.1.2 Widerstandspunktschweißen ... 99
3.1.3 Buckelschweißen ... 116
3.1.4 Rollennahtschweißen ... 120
3.1.5 Pressstumpfschweißen ... 123
3.1.6 *Abbrennstumpfschweißen* ... 124
3.1.7 Induktives Widerstandspressschweißen ... 126
3.2 Lichtbogenpressschweißen ... 127
3.2.1 Bolzenschweißen ... 127
3.2.2 Pressschweißen mit magnetisch bewegtem Lichtbogen ... 135
3.3 Diffusionsschweißen ... 137
3.3.1 Ablauf ... 137
3.3.2 Werkstoffe ... 138
3.3.3 Anwendung ... 139
3.4 Reibschweißen ... 140
3.4.1 Verfahrensprinzip ... 140
3.4.2 Reibschweißmaschinen ... 141
3.4.3 Werkstoffe ... 143
3.5 Kaltpressschweißen ... 145
3.6 Sprengschweißen ... 148
3.6.1 Ablauf ... 148
3.6.2 Werkstoffe ... 149
3.6.3 Anwendung ... 150
3.7 Ultraschallschweißen ... 151
Weiterführende Literatur ... 154

4 Löten ... 157
4.1 Einteilung der Lötprozesses ... 157
4.1.1 Temperaturen beim Löten ... 160
4.1.2 Grundlagen des Lötens ... 160
4.1.3 Kapillareffekt ... 160
4.1.4 Vor- und Nachteile des Lötens ... 162
4.1.5 Lötbarkeit ... 162
4.1.6 Löteignung der Werkstoffe ... 163
4.2 Lötverfahren ... 163
4.2.1 MSG-Löten (MIG-Brazing) ... 163
4.2.2 Flammlöten (Fugenlöten) ... 164
4.2.3 Kolbenlöten ... 164

4.2.4 Badlöten ... 165
4.2.5 Salzbad ... 165
4.2.6 Widerstandslöten ... 165
4.2.7 Induktionslöten ... 165
4.2.8 Ofenlöten ... 165
4.2.9 Plasma-Lichtbogenlöten ... 165
4.2.10 Strahllöten ... 165
4.2.11 Infrarotlöten ... 166
4.3 Lote ... 166
4.3.1 Einteilung der Lote nach den Arbeitsbereichen (Temperatur) ... 166
4.4 Flussmittel ... 170
4.5 Lötgerechtes Konstruieren ... 172
4.6 Eigenschaften von Lötverbindungen ... 173
4.7 Festigkeit von Lötverbindungen ... 174
4.8 Unregelmäßigkeiten von Lötverbindungen ... 175
4.9 Prüfung von Personal und Verfahrensprüfungen ... 175
4.10 Arbeitsschutz beim Löten ... 175
Weiterführende Literatur ... 176

5 Kleben von Kunststoffen und Metallen – ein kompakter Überblick ... 177
5.1 Lastübertragung in Klebungen ... 178
5.2 Grundlagen ... 179
5.2.1 Kohäsion bei Metallen ... 180
5.2.2 Kohäsion bei Kunststoffen ... 180
5.2.3 Adhäsion ... 185
5.2.4 Benetzung ... 186
5.3 Klebstoffe ... 188
5.3.1 Chemisch härtende Klebstoffe (Reaktionsklebstoffe) ... 189
5.3.2 Haftklebstoffe – Klebstoffe ohne Verfestigung ... 198
5.3.3 Physikalisch abbindende Klebstoffe ... 199
5.4 Oberflächenbehandlung ... 200
5.4.1 Aufbau metallischer und polymerer Oberflächen ... 200
5.4.2 Oberflächenvorbereitung – Reinigung ... 201
5.4.3 Oberflächenvorbehandlungen ... 201
5.5 Klebstoffauswahl und klebgerechte Gestaltung ... 203
5.6 Klebtechnische Verarbeitung ... 205
5.6.1 Automatische Klebstoffverarbeitung ... 205
5.6.2 Manuelle Verarbeitung ... 205
5.7 Qualitätssicherung beim Kleben ... 206
5.8 Arbeitssicherheit beim Kleben ... 209
Literatur ... 210

6 Fügen durch Umformen 211
6.1 Grundlagen 211
6.2 Clinchen 213
6.2.1 Verfahrensbeschreibung und Varianten 213
6.2.2 Qualitätsrelevante Kenngrößen 214
6.2.3 Anwendungen 215
6.2.4 Geräte und Systeme 215
6.3 Nieten 216
6.3.1 Stanznieten 217
6.3.2 Blindnieten 220
6.3.3 Schließringbolzen 222
6.3.4 Funktionselemente 224
Weiterführende Literatur 228

7 Kunststoffe schweißen 231
7.1 Einteilung der Kunststoffe 231
7.1.1 Weitere Eigenschaften von Kunststoffen 233
7.2 Schweißprozesse 235
7.2.1 Heizelementstumpfschweißen (HS) (auch Spiegelschweißen genannt) 235
7.3 Heizelementmuffenschweißen 238
7.4 Heizelementwendelschweißen (HM) 239
7.5 Warmgasfächel- und Warmgasziehschweißen 241
7.5.1 Warmgasfächelschweißen 241
7.5.2 Warmgasziehschweißen 241
7.6 Warmgas-Extrusionsschweißen 243
7.7 Ultraschallschweißen 244
7.7.1 Schweißvorgang 245
7.7.2 Konstruktion der Bauteile mit Energierichtungsgebern 245
7.8 Vibrationsschweißen 246
7.9 Laserschweißen 246
7.10 Durchstrahlschweißen 247
7.11 Hochfrequenzschweißen 249
7.12 Reibschweißen 250
7.13 Schweißzusätze 251
7.14 Prüfung von Kunststoffschweißern 252
7.14.1 Fachkundliche Prüfung 253
7.14.2 Praktische Prüfung 253
7.15 Merkmale und Anwendungen der Kunststoffe (Tab. 7.5, 7.6 und 7.7) 254
Weiterführende Literatur 258

8 Auftragschweißen und Thermisches Spritzen 259
8.1 Auftragschweißen 260
8.1.1 Aufmischungsgrad 261
8.1.2 Lichtbogenhand- und WIG-Schweißen 262
8.1.3 Metallschutzgasschweißen 262
8.1.4 Plasma-Pulver-Auftragschweißen 264
8.1.5 Laserauftragschweißen (Laser-Cladding) 265
8.1.6 RES – Elektro-Schlacke-Bandauftragschweißen 267
8.1.7 Schweißzusätze 268
8.2 Thermisches Spritzen 269
8.2.1 Flammspritzen 272
8.2.2 Drahtflammspritzen 273
8.2.3 Pulverflammspritzen 274
8.2.4 Lichtbogenspritzen 275
8.2.5 Plasmaspritzen 277
8.2.6 Hochgeschwindigkeitsflammspritzen 278
8.2.7 Laserspritzen 279
8.2.8 Detonationsspritzen 279
8.2.9 Kaltgasspritzen 280
8.2.10 Prüfen von Spritzschichten 281
8.2.11 Werkstoffvorbereitung und Zusätze zum Thermischen Spritzen 281
8.2.12 Spritzzusätze in Form von Drähten, Stäben und Schnüre 282
8.2.13 Eigenschaften von Beschichtungen und mögliche Nachbehandlungen 283
8.2.14 Auswahl einiger Spritzzusätze, deren Eigenschaften und Einsatz 284
Weiterführende Literatur 287

9 Thermisches Trennen 289
9.1 Werkstoffe und Materialdicken 291
9.2 Autogenes Brennschneiden 293
9.2.1 Zündtemperatur muss kleiner sein als die Schmelztemperatur 294
9.2.2 Schmelztemperatur Oxide muss kleiner sein als die Schmelztemperatur des Grundwerkstoffes 294
9.2.3 Entstehenden Oxide müssen dünnflüssig sein 294
9.2.4 Geringe Wärmeleitfähigkeit des Grundwerkstoffs 294
9.2.5 Werkstoff muss im Sauerstoff-Strom verbrennbar sein 295
9.2.6 Betriebsgase zum autogenen Brennschneiden 295
9.2.7 Brennschneidgeräte 297
9.2.8 Brennschnittgüte 298
9.2.9 Sonderverfahren des autogenen Brennschneidens 300

9.3 Plasmaschneiden ... 302
9.3.1 Verfahrensprinzip ... 302
9.3.2 Einteilung der Verfahren (Abb. 9.15) ... 303
9.3.3 Plasmagase ... 304
9.3.4 Plasmabrenner und Plasmaschnitte (Abb. 9.18 und 9.19) ... 305
9.3.5 Plasmafugen (Abb. 9.20) ... 306
9.3.6 HotWire-Plasmaschneiden ... 306
9.4 Laserstrahlschneiden ... 307
9.4.1 Laserarten zum Schneiden ... 308
9.5 Wasserstrahlschneiden ... 309
9.5.1 Qualitätsstufen für Wasserstrahlschnitte ... 311
Weiterführende Literatur ... 312

10 Flammrichten ... 313
10.1 Verfahrensprinzip ... 313
10.2 Ausführung ... 314
10.3 Ausrüstung ... 321
10.4 Eignung der Werkstoffe und Besonderheiten beim Flammrichten ... 321
10.4.1 Stähle ... 321
Literatur ... 324

11 Werkstoffe und ihr Verhalten beim Schweißen ... 325
11.1 Einteilung der Werkstoffe ... 325
11.1.1 Metallische Werkstoffe ... 325
11.2 Schweißen von unlegierten Baustählen ... 331
11.2.1 Chemische Zusammensetzung der Maschinenbaustähle ... 333
11.3 Schweißen von Feinblechen ... 336
11.3.1 Spezieller Informationsteil zum Feuerverzinken ... 337
11.4 Schweißen höherfester Baustähle (Feinkornbaustähle) ... 344
11.4.1 Schweißen der Feinkornbaustähle ... 349
11.4.2 Schutzgase nach DIN EN ISO 14175 zum MAG-Schweißen von Feinkornbaustählen ... 351
11.4.3 Spezieller Informationsteil ... 352
11.5 Schweißen verschleißfester Stähle ... 355
11.5.1 Schweißzusatz für Hartauftragungen ... 358
11.6 Schweißen von Betonstählen ... 359
11.6.1 Feuerverzinkte und nichtrostende Betonstahlgüten ... 364
11.6.2 Spezieller Informationsteil ... 365
11.7 Schweißen von Einsatz- und Vergütungsstählen ... 368
11.8 Schweißen warmfester Stähle ... 371
11.8.1 Schweißtechnische Hinweise ... 374
11.8.2 Vorwärm- und Zwischenlagentemperatur ... 375
11.8.3 Wärmenachbehandlung ... 375

11.9 Schweißen kaltzäher Stähle ... 377
11.9.1 Schweißen der kaltzähen Stähle ... 381
11.10 Schweißen der nichtrostenden (hochlegierten) Stähle ... 385
11.10.1 Schweißen nichtrostender, ferritischer Stähle ... 386
11.10.2 Schweißen nichtrostender, martensitischer und ausscheidungshärtender Stähle ... 388
11.10.3 Schweißen nichtrostender, austenitischer Stähle ... 390
11.10.4 Schweißen der unstabilisierten, austenitischen Stähle ... 395
11.10.5 Schweißen der stabilisierten, austenitischen Stähle ... 396
11.10.6 Schweißen der vollaustenitischen Stähle ... 397
11.10.7 Allgemein gültige Regeln beim Schweißen nichtrostender Stähle ... 398
11.11 Schweißen von Duplexstählen ... 399
11.11.1 Empfehlungen zum Schweißen der Duplexstähle ... 400
11.12 Schweißen der hitzebeständigen Stähle ... 402
11.12.1 Empfehlungen zum Schweißen der ferritischen, hitzebeständigen Stähle ... 405
11.12.2 Empfehlungen zum Schweißen der austenitischen, hitzebeständigen Stähle ... 405
11.13 Schweißen der (hoch)warmfesten Stähle ... 407
11.14 Schweißen von Stahlguss und Gusseisenwerkstoffen ... 407
11.14.1 Schweißen von Stahlguss und Eisengusswerkstoffen ... 412
11.14.2 Schweißen von Stahlguss ... 413
11.14.3 Schweißen der Gusseisenwerkstoffe ... 418
11.15 Nichteisenwerkstoffe ... 426
11.15.1 Schweißen von Nickelwerkstoffen ... 427
11.15.2 Schweißen von Aluminiumwerkstoffen ... 437
11.15.3 Schweißen von Kupferwerkstoffen ... 451
11.15.4 Schweißen von Titanwerkstoffen ... 465
11.15.5 Schweißen von Magnesiumwerkstoffen ... 472
11.16 Allgemeine Grundregeln für die Auswahl von Schweißzusätzen ... 473
11.16.1 Spezieller Informationsteil ... 475
11.17 Wärmebehandlung der Stähle ... 479
11.17.1 Kurzbeschreibung der Glühverfahren für Stähle ... 481
11.17.2 Praktische Hinweise zum Spannungsarmglühen von unlegiertem Baustahl ... 483
11.17.3 Spezieller Informationsteil ... 485
Weiterführende Literatur ... 486

12 Anforderungsgerechte Gestaltung von Schweißkonstruktionen 489
12.1 Beanspruchungsgerechte Gestaltung 489
12.1.1 Statisch und dynamisch beanspruchte Bauteile 491
12.1.2 Biege- und verdrehsteife Konstruktionen 495
12.1.3 Zug- und druckbeanspruchte Stäbe 498
12.1.4 Vibrationsgerechte Gestaltung 501
12.1.5 Vakuumgerechte Gestaltung 505
12.2 Fertigungsgerechte Gestaltung 507
12.2.1 Allgemein 507
12.2.2 Nahtausführung/Konstruktion 508
12.2.3 Schweißprozess 510
12.3 Werkstoffgerechte Gestaltung 522
12.3.1 Nahtvorbereitung und Fugenform 522
12.3.2 Gestaltung bei Oberflächenbeschichtungen 523
12.3.3 Verbindungen an plattierten Blechen 526
12.3.4 Mischverbindungen 529
12.3.5 Verminderung der Terrassenbruchneigung 533
12.4 Korrosionsgerechte Gestaltung 536
12.4.1 Atmosphärische Korrosion 537
12.4.2 Lochkorrosion (Lochfraß) 538
12.4.3 Spaltkorrosion 541
12.4.4 Interkristalline Korrosion 543
12.4.5 *Spannungsrisskorrosion* 543
12.5 Prüfgerechte Gestaltung 546
12.6 Instandsetzungsgerechte Gestaltung 548
12.6.1 Allgemeines zu Instandsetzung 548
12.6.2 Verstärkungen 549
12.6.3 Riegeln 551
12.7 Mechanisierungs-/Automatisierungsgerechte Gestaltung 554
Weiterführende Literatur 560

13 Anwendungsgerechte Gestaltung von Schweißkonstruktionen 563
13.1 Stahlbau – Trägergestaltung und Trägeranschlüsse 563
13.1.1 DIN 18800, DIN EN 1090 und DIN EN 1993 563
13.1.2 Konstruktionsmaterialien (Werkstoffe) 565
13.1.3 Prüfbescheinigungen 566
13.1.4 Tragwerke 566
13.1.5 Halbzeuge 568
13.1.6 Herstellung 569
13.1.7 Grundsätze für die Konstruktion 570
13.1.8 Vollwandträger 570
13.1.9 Aussteifungen 574

13.1.10 Fachwerkträger ... 577
13.1.11 Hohlprofilkonstruktionen ... 583
13.1.12 Rahmenecken ... 584
13.1.13 Trägeranschlüsse ... 585
13.2 Behälter-, Apparate-, Druckgefäße-, Tank- und Rohrleitungsbau ... 588
13.2.1 Vorschriften im Behälterbau ... 588
13.2.2 Herstellung der Druckbehälter ... 590
13.2.3 Werkstoffe für Druckbehälter ... 590
13.2.4 Schweißzusätze für Druckbehälter ... 592
13.2.5 Allgemeine Gestaltungsregeln im Druckbehälterbau ... 593
13.2.6 Nahtformen und Schweißnahtvorbereitungen im Druckbehälterbau ... 597
13.2.7 Flanschanschlüsse ... 598
13.2.8 Rohrverbindungen ... 602
13.2.9 Stutzenanschlüsse ... 606
13.2.10 Mäntel, Böden und Doppelmäntel für Behälter, Apparate und Tanks ... 607
13.2.11 Halbrohre zum Anschweißen an Behälter ... 614
13.2.12 Einschweißen von Rohren in Rohrböden ... 615
13.2.13 Rauchgasdichte Rohrwände ... 616
13.2.14 Bestiften (Bolzenschweißung) an leeren Rohren ... 617
13.3 Gestaltung von Maschinenelementen ... 618
13.3.1 Allgemeine Gestaltungsregeln für Maschinenelemente ... 618
13.3.2 Hebel, Stangen und Gabeln ... 619
13.3.3 Drehende Maschinenteile ... 622
13.4 Gestaltung im Fahrzeugbau ... 623
13.4.1 Schweißverbindungen im Nutzfahrzeugbau ... 629
13.5 Schweißen und Löten im Luft- und Raumfahrzeugbau ... 637
13.5.1 Schweißprozesse im Luft- und Raumfahrzeugbau ... 639
13.6 Schweißen in Feinwerktechnik und Elektronik ... 645
Weiterführende Literatur ... 653

14 Berechnung von Schweißnähten ... 655
14.1 Grundsätze der Schweißnahtberechnung im Maschinenbau ... 655
14.1.1 Belastungen von Tragwerken ... 656
14.2 Grundregeln für die Fugenformen von Schweißnähten ... 659
14.2.1 T-Stoß ... 659
14.2.2 Stumpfstoß ... 662
Weiterführende Literatur ... 668

15 Schweißeigenspannungen und -verformungen 669
15.1 Entstehung von Eigenspannungen 669
15.2 Schrumpfungsarten 670
15.2.1 Beeinflussende Faktoren 670
15.2.2 Maßnahmen zur Verminderung von Schweißeigenspannungen... 670
15.2.3 Bauteilverzug und Schweißfolgeplan 674
15.2.4 Abbau von Eigenspannungen 680
15.2.5 Auswirkungen von Schweißeigenspannungen 686
15.2.6 Rechnerische Berücksichtigung der Eigenspannungen 686
Literatur 688

16 Darstellung und Ausführung von Schweißverbindungen 689
16.1 Zeichnerische Darstellung von Schweißnähten 689
16.1.1 Zusatzsymbol versetzt, unterbrochene Naht 695
16.1.2 Einseitig geschweißte Stumpfnähte mit Angabe der Wurzelüberhöhung 696
16.1.3 Mehrere Pfeillinien 696
16.1.4 Offene und geschlossene Gabel 697
16.1.5 Stumpfnähte 697
16.1.6 Kehlnähte 698
16.1.7 Bolzenschweißfolge 699
16.1.8 Stegabstände und Öffnungswinkel bei Stumpfnähten 700
16.2 Stoßarten, Fugenformen und deren Auswahl 701
Weiterführende Literatur 705

17 Wirtschaftlichkeitsüberlegungen 707
Weiterführende Literatur 715

18 Qualitätssicherung 717
18.1 Schweißtechnische Qualitätsanforderungen, Schweißaufsicht und Schweißverfahrensprüfungen 718
18.1.1 Schweißverfahrensprüfungen 724
18.2 Schweißen in gesetzlich geregelten Bereichen 728
18.2.1 Anmerkung Rohrleitungen 729
18.2.2 Zulassung im Bauaufsichtlichen Bereich (Stahlbau etc.) 729
18.2.3 DIN EN 1090-1: Konformitätsnachweisverfahren für tragende Bauteile 730
18.2.4 Zulassung im Druckbehälterbereich – HP 0 Zulassung nach AD 2000 Merkblatt 734
18.2.5 Zulassung im Schienenfahrzeugbau – Bescheinigung nach DIN EN 15085 735
18.2.6 Zulassung in der Kerntechnik 737
18.2.7 Zulassung nach DIN 2303 – Qualitätsanforderungen an Herstell- und Instandsetzungsbetriebe für wehrtechnische Produkte 737

18.3 Schweißnaht – Verfahren und Möglichkeiten der Prüfung 737
18.3.1 Zerstörungsfreie Werkstoff-/Schweißnahtprüfungen (Auswahl) 738
18.3.2 Sichtprüfung (VT = Visual Testing) 738
18.3.3 Farbeindringverfahren (PT = Penetrant Testing) 739
18.3.4 Magnetpulverprüfung (MT – Magnetic particle Testing) 742
18.3.5 Ultraschallprüfung (UT = Ultrasonic Testing) 744
18.3.6 Durchstrahlungsprüfung (RT = Radiografic Testing) 751
18.3.7 Wirbelstromprüfung (ET = Eddy Current Testing) 756
18.4 Fehlertoleranzen und Unregelmäßigkeiten von Schweißverbindungen 757
18.4.1 DIN EN ISO 5817 Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (Stahl) 758
18.4.2 DIN EN ISO 10042 Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten (Aluminium) 759
18.4.3 DIN EN ISO 13920 Allgemeintoleranzen Schweißkonstruktionen 759
18.4.4 DIN EN ISO 6520 Unregelmäßigkeiten beim Schweißen – Fehlergruppeneinteilung 760
18.5 Schulung und Prüfung von Schweißern und Bedienern von Schweißeinrichtungen 766
18.5.1 Schweißprozesse 770
18.5.2 Schweißzusatzgruppe 770
18.5.3 Schweißzusätze 770
18.5.4 Schweißnahteinzelheiten 771
18.5.5 Prüfstellen/Prüfer 772
18.5.6 Fachkundeprüfung 772
18.5.7 Geltungsdauer/Verlängerung der Qualifikation 772
18.5.8 Geltungsbereiche 773
18.5.9 Abmessungen 775
18.5.10 Schweißpositionen 776
18.5.11 Schweißnahteinzelheiten 777
18.5.12 Durchführung der Schweißer-Prüfung 778
18.5.13 Schweißbedingungen (Schweißerprüfung) 779
18.5.14 Prüfverfahren (Schweißprobe) 779
18.5.15 Abnahmeforderungen (Prüfstücke) 781
18.5.16 Schweißer-Prüfungsbescheinigung 781
18.6 Gesundheits-, Arbeits- und Brandschutz (GABS) 783
18.6.1 Gefahrenquelle Elektrischer Strom 785
18.6.2 Gefahrenquelle Optische Strahlung 787
18.6.3 Schadstoffe beim Schweißen – Schweißrauche 789
18.6.4 Brandschutz beim Schweißen und verwandte Verfahren 791
Weiterführende Literatur 794

19 Anhang 795
19.1 Internationale Werkstoffvergleiche 795
19.2 Normen in der Schweißtechnik 799
19.2.1 Rechtsverbindlichkeit und Bindung technischer Normen 800
19.2.2 Haftungsrechtliche Bedeutung technischer Normen 800
19.2.3 DVS-Merkblätter und -Richtlinien 801

Stichwortverzeichnis 803