

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	Schweißbarten	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	Widerstandsschweißen	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	Abbreinstumpfschweißen	124
3.1.7	Induktives Widerstandsschweißen	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 des 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	Warmgasfächer- 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 Flammsspritzen	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 Grundwerkstoffes	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	<i>Spannungsrisskorrosion</i>	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	Schweiß Eigenspannungen 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 Schweiß eigenspannungen	670
15.2.3	Bauteilverzug und Schweißfolgeplan	674
15.2.4	Abbau von Eigenspannungen	680
15.2.5	Auswirkungen von Schweiß eigenspannungen	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	Schweißnaht Einzelheiten	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	Schweißnaht Einzelheiten	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 – Schweißbrauche	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