

Handbuch der Fertigungstechnik

Herausgegeben

von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.Dr.-Ing. E.h. Günter Spur
und Prof. Dr.-Ing. Theodor Stöferle t

Band 1 Urformen

Band 2 Umformen und Zerteilen (in drei Teilbänden)

Band 3 Spanen (in zwei Teilbänden)

Band 4 Abtragen, Beschichten und Wärmebehandeln
(in zwei Teilbänden)

Band 5 Fügen, Handhaben und Montieren

Band 6 Fabrikbetrieb

Carl Hanser Verlag München Wien

Handbuch der Fertigungstechnik

Band 4/1

Abtragen, Beschichten

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.Dr.-Ing. E.h. Günter Spur

Mit 578 Bildern und 105 Tabellen

Carl Hanser Verlag München Wien

Inhalt

1	Abtragen	1
1.1	Einführung in die Abtragtechnik	1
1.1.1	Allgemeines	1
1.1.2	Geschichtliche Entwicklung	1
1.1.3	Einteilung der abtragenden Fertigungsverfahren	4
	Literatur zu Abschnitt 1.1.	13
1.2	Abtragen durch Flüssigkeit	16
1.2.1	Grundlagen	16
1.2.2	Technologie	19
1.2.3	Anwendungsbeispiele des Abtragens durch Wasserstrahlen	22
1.2.3.1	Allgemeines	22
1.2.3.2	Anwendung beim Gußputzen	22
1.2.3.3	Anwendung beim Entgraten	23
1.2.3.4	Anwendung beim Schneiden	23
	Literatur zu Abschnitt 1.2.	28
1.3	Abtragen durch Gas	29
1.3.1	Allgemeines	29
1.3.2	Autogenes Brennschneiden	29
1.3.2.1	Anwendungsbedingungen	29
1.3.2.2	Vorgänge in der Wirkzone	30
1.3.2.3	Technologie	31
1.3.2.3.1	Brenner und Düsen	31
1.3.2.3.2	Parameter	32
1.3.2.3.3	Bahnführungsmaschinen	39
1.3.2.3.4	Umweltschutz	44
1.3.2.3.5	Wirtschaftlichkeit	45
1.3.2.4	Anwendungsbeispiele	47
1.3.3	Metallpulverbrennschneiden	52
1.3.4	Metallpulverschmelzschnitten	53
1.3.5	Mineralpulverbrennschneiden	53
1.3.6	Longcav-Brennschneiden	54
1.3.7	Brennfugen	55
1.3.8	Brennflämmen	56
1.3.9	Brennbohren	58
1.3.10	Flammstrahlen	59
	Literatur zu Abschnitt 1.3.	60
1.4	Abtragen durch elektrische Gasentladung	61
1.4.1	Abtragen mit Funken	61
1.4.1.1	Grundlagen	61
1.4.1.2	Verfahrensübersicht	64
1.4.1.3	Funkenerosives Senken	66
1.4.1.3.1	Allgemeines	66
1.4.1.3.2	Senkerosionsanlage	67
1.4.1.3.3	Technologie	69
1.4.1.3.4	Oberflächenbeschaffenheit	75
1.4.1.3.5	Funkenerosives Senken mit überlagerter Elektrodenbewegung	78
1.4.1.4	Funkenerosives Schneiden	81
1.4.1.4.1	Allgemeines	81
1.4.1.4.2	Schneiderosionsanlage	81

	1.4.1.4.3	Technologie	83	
1.4.1.5		Elektroden	88	
	1.4.1.5.1	Allgemeines	88	
	1.4.1.5.2	Elektrodenarten	88	
	1.4.1.5.3	Verfahren zur Elektrodenherstellung	89	
	1.4.1.5.4	Spann- und Handhabungssysteme	98	
	1.4.1.5.5	Elektrodenwerkstoffe	99	
	1.4.1.5.6	Anwendungsbeispiele	103	
1.4.1.6		Bearbeiten auf Erodieranlagen	106	
	1.4.1.6.1	Allgemeines	106	
	1.4.1.6.2	Anforderungen an Erodieranlagen	107	
	1.4.1.6.3	Aufbau von Erodieranlagen	111	
	1.4.1.6.4	Werkzeuge und Zusatzeinrichtungen	115	
	1.4.1.6.5	Planung und Steuerung von Arbeitsabläufen	118	
	1.4.1.6.6	Arbeitstechniken	119	
	1.4.1.6.7	Anwendungsbeispiele	120	
	1.4.1.6.8	Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften	130	
1.4.2		Abtragen mit Lichtbogen	135	
	1.4.2.1	Allgemeines	135	
	1.4.2.2	Lichtbogen-Sauerstoffschneiden	135	
	1.4.2.3	Lichtbogen-Druckluftschneiden	137	
	1.4.2.4	Lichtbogenschneiden mit Kohle- oder Metallelektrode	137	
1.4.3		Abtragen mit Plasma	139	
	1.4.3.1	Allgemeines	139	
	1.4.3.2	Argon-Wasserstoff Technologie	140	
	1.4.3.3	Luft-Plasma Technologie	142	
	1.4.3.4	Wasser-Injektions-Plasma Technologie	144	
	1.4.3.5	PMC-grün Technologie	147	
	1.4.3.6	Wirtschaftlichkeit	150	
		Literatur zu Abschnitt 1.4	152	
1.5		Abtragen durch gebündelte Strahlen	156	
	1.5.1	Allgemeines	156	
	1.5.2	Voraussetzungen	156	
	1.5.2.1	Physikalische Voraussetzungen	156	
		1.5.2.1.1	Energietransfer vom Strahl auf den Werkstoff	156
		1.5.2.1.2	Erforderliche Strahlleistungsdichte	159
	1.5.2.2	Apparative Voraussetzungen	160	
		1.5.2.2.1	Allgemeines	160
		1.5.2.2.2	Erzeugung von Elektronenstrahlen	161
		1.5.2.2.3	Fokussierung von Elektronenstrahlen	164
		1.5.2.2.4	Erzeugung von Laserstrahlen	167
		1.5.2.2.5	Fokussierung von Laserstrahlen	173
		1.5.2.2.6	Vergleich von Laser- und Elektronenstrahlen	175
1.5.3		Fertigungsanlagen	176	
	1.5.3.1	Allgemeines	176	
	1.5.3.2	Elektronenstrahlanlagen	176	
	1.5.3.3	Laserstrahlanlagen	181	
		1.5.3.3.1	Festkörperlaser	181
		1.5.3.3.2	CO ₂ -Gaslaser	188
	1.5.3.4	Vergleich von Laser- und Elektronenstrahlanlagen	196	
1.5.4		Abtragprozeß	197	
	1.5.4.1	Allgemeines	197	

1.5.4.2	Eindringtiefe und Energieabgabe	197
1.5.4.3	Reflexion und Absorption von Laserstrahlen	200
1.5.4.4	Rückstreuung von Elektronenstrahlen	201
1.5.4.5	Aufheizen der Abtragzone	202
1.5.4.6	Dynamik des Abtragprozesses	203
1.5.4.7	Thermische Beeinflussung der Randzone	209
1.5.5	Verfahren	214
1.5.5.1	Herstellen von Bohrungen und Durchbrüchen	214
1.5.5.1.1	Technologie	214
1.5.5.1.2	Anwendungsbeispiele	223
1.5.5.2	Schneiden und Trennen von Flach- und Formteilen	230
1.5.5.2.1	Technologie des Feinschneidens	230
1.5.5.2.2	Technologie des Ritzens und Anreißens (Scribens)	233
1.5.5.2.3	Technologie des Schneidens mittels CO ₂ -Laserstrahlen	234
1.5.5.2.4	Anwendungsbeispiele	243
1.5.5.3	Abtragen von Dünnschichten	249
1.5.5.3.1	Technologie	249
1.5.5.3.2	Anwendungsbeispiele	253
1.5.5.4	Sonderverfahren	256
1.5.5.4.1	Allgemeines	256
1.5.5.4.2	Auswuchten von Rotoren	256
1.5.5.4.3	Beschriften und Markieren	257
1.5.5.4.4	Abisolieren von Kunststoffummantelungen	258
1.5.5.4.5	Freilegen von kunststoffbeschichteten Metalloberflächen	259
	Literatur zu Abschnitt 1.5	260
1.6	Chemisches Abtragen	263
1.6.1	Allgemeines	263
1.6.2	Ätzabtragen	263
1.6.3	Thermisch-chemisches Entgraten	263
1.6.4	Chemisch-thermisches Abtragen	265
	Literatur zu Abschnitt 1.6	265
1.7	Elektrochemisches Abtragen	266
1.7.1	Grundlagen	266
1.7.2	Elektrochemisches Profilabtragen	268
1.7.2.1	Elektrochemisches Senken	268
1.7.2.1.1	Allgemeines	268
1.7.2.1.2	Anforderungen an elektrochemische Senkanlagen	268
1.7.2.1.3	Elektrolytarten	270
1.7.2.1.4	Anforderungen an Werkzeugelektroden und Vorrichtungen	270
1.7.2.1.5	Einflußgrößen	271
1.7.2.1.6	Elektrochemische Senkbarkeit	273
1.7.2.2	Elektrochemisches Bohren	281
1.7.2.3	Elektrochemisches Drehen	282
1.7.2.4	Elektrochemisches Entgraten	283
1.7.2.5	Elektrochemisches Markieren	284
1.7.3	Kombination elektrochemischer und spanender Bearbeitungsverfahren	284
1.7.3.1	Elektrochemisches Schleifen	284
1.7.3.2	Elektrochemisches Honen	285
1.7.3.3	Elektrochemisches Läppen	286
1.7.4	Elektrochemisches Oberflächenabtragen	287

1.7.4.1	Allgemeines	287
1.7.4.2	Elektrochemisches Polieren	287
1.7.4.3	Elektrochemisches Badentgraten	287
1.7.4.4	Elektrochemisches Entmetallisieren	288
1.7.4.5	Elektrochemisches Beizen	288
1.7.5	Elektrochemisches Ätzen	289
1.7.5.1	Allgemeines	289
1.7.5.2	Tauchätzen	291
1.7.5.3	Sprühätzen	291
1.7.5.4	Sonstige Ätzverfahren	291
1.7.6	Elektrochemische Abtraganlagen	292
1.7.6.1	Elektrochemische Senkanlagen	292
1.7.6.1.1	Allgemeines	292
1.7.6.1.2	Aufbau der Anlagen	292
1.7.6.1.3	Vorrichtungen	301
1.7.6.1.4	Anwendungsbeispiele	302
1.7.6.2	Elektrochemische Entgrat-, Kontur- und Gravieranlagen	304
1.7.6.2.1	Allgemeines	304
1.7.6.2.2	Aufbau der Anlagen	305
1.7.6.2.3	Vorrichtungen	308
1.7.6.2.4	Anwendungsbeispiele	309
1.7.6.3	Elektrochemische Sprühätzanlagen zur Leiterplattenfertigung	310
1.7.6.3.1	Allgemeines	310
1.7.6.3.2	Einteilung	314
1.7.6.3.3	Anforderungen	314
1.7.6.3.4	Regenerationsanlagen	318
1.7.7	Anwendungsbeispiele des elektrochemischen Tauchätzens	321
1.7.7.1	Anwendung in der Leiterplattenfertigung	321
1.7.7.1.1	Allgemeines	321
1.7.7.1.2	Ätzsystem	321
1.7.7.1.3	Regeneration und Badausrüstung	325
1.7.7.1.4	Prozeßparameter	327
1.7.7.2	Anwendung in der Luftfahrttechnik	327
1.7.7.2.1	Allgemeines	327
1.7.7.2.2	Anforderungen	332
1.7.7.2.3	Werkstückvorbereitung	334
1.7.7.2.4	Aufbereitung der Badflüssigkeit	337
1.7.7.2.5	Elektrochemische Tauchätzanlagen	337
	Literatur zu Abschnitt 1.7	338
2	Beschichten	341
2.1	Einführung in die Beschichtungstechnik	341
2.1.1	Allgemeines	341
2.1.2	Einteilung der beschichtenden Fertigungsverfahren	343
2.1.3	Bedeutung der beschichtenden Fertigungsverfahren	346
	Literatur zu Abschnitt 2.1	348
2.2	Grundlagen des Beschichtens	349
2.2.1	Allgemeines	349
2.2.2	Grundlagen des metallischen Beschichtens	349
2.2.3	Grundlagen des nichtmetallischen Beschichtens	359
2.2.3.1	Organisches Beschichten	359
2.2.3.2	Anorganisches Beschichten	360
	Literatur zu Abschnitt 2.2	362

2.3	Beschichten aus dem gas- oder dampfförmigen Zustand	363
2.3.1	Allgemeines.	363
2.3.2	Aufdampfen.	366
2.3.2.1	Allgemeines.	366
2.3.2.2	Grundlagen.	366
2.3.2.3	Technologie.	371
2.3.2.4	Anwendung und Bedeutung.	376
2.3.3	Sputtern.	378
2.3.3.1	Allgemeines.	378
2.3.3.2	Grundlagen.	378
2.3.3.3	Technologie.	382
2.3.3.4	Anwendung und Bedeutung.	389
2.3.4	Ionenplattieren.	390
2.3.4.1	Allgemeines.	390
2.3.4.2	Grundlagen.	390
2.3.4.3	Technologie.	391
2.3.4.4	Anwendung und Bedeutung.	395
2.3.5	Beschichten durch Plasmapolymerisation.	396
2.3.5.1	Allgemeines.	396
2.3.5.2	Grundlagen.	396
2.3.5.3	Technologie.	402
2.3.5.4	Anwendung und Bedeutung.	407
2.3.6	Beschichten durch Ionenstrahlen.	408
2.3.6.1	Allgemeines.	408
2.3.6.2	Grundlagen.	410
2.3.6.3	Technologie.	413
2.3.6.4	Anwendung und Bedeutung.	416
2.3.7	Beschichten durch chemisches Abscheiden aus der Gasphase.	419
2.3.7.1	Allgemeines.	419
2.3.7.2	Grundlagen.	420
2.3.7.3	Technologie.	422
2.3.7.4	Anwendung und Bedeutung.	424
	Literatur zu Abschnitt 2.3.	427
2.4	Beschichten aus dem flüssigen, breiigen oder pastenförmigen Zustand	433
2.4.1	Nichtmetallisches organisches Beschichten.	433
2.4.1.1	Lackieren.	433
2.4.1.1.1	Allgemeines.	433
2.4.1.1.2	Vorbehandlung.	433
2.4.1.1.3	Lacksysteme.	439
2.4.1.1.4	Spritzlackieren ohne elektrostatische Lackaufladung	447
2.4.1.1.5	Sprühen mit elektrostatischer Lackaufladung.	451
2.4.1.1.6	Tauchlackieren.	455
2.4.1.1.7	Fluten.	459
2.4.1.1.8	Walzen, Gießen und Rakeln.	459
2.4.1.1.9	Bandbeschichten.	461
2.4.1.1.10	Zentrifugieren und Trommeln.	462
2.4.1.1.11	Streichen und Rollen.	462
2.4.1.2	Befetten.	463
2.4.1.2.1	Allgemeines.	463
2.4.1.2.2	Anforderungen.	463
2.4.1.2.3	Befettungsverfahren.	464
2.4.1.2.4	Befettungsmittellösungen.	464

	2.4.1.2.5	Prüfverfahren	466
	2.4.1.2.6	Einflußfaktoren	470
2.4.2		Nichtmetallisches anorganisches Beschichten	472
	2.4.2.1	Emaillieren	472
	2.4.2.1.1	Allgemeines	472
	2.4.2.1.2	Grundlagen	474
	2.4.2.1.3	Einteilung	475
	2.4.2.1.4	Emailfritte	475
	2.4.2.1.5	Metallträger für die Emaillierung	476
	2.4.2.1.6	Emaillierverfahren	476
	2.4.2.1.7	Nachbehandlung, Prüfung und Anwendung von Emaillierungen	478
2.4.3		Metallisches Beschichten	480
	2.4.3.1	Thermisches Spritzen	480
	2.4.3.1.1	Allgemeines	480
	2.4.3.1.2	Einteilung	480
	2.4.3.1.3	Vorbehandlung	482
	2.4.3.1.4	Metallspritzwerkstoffe	483
	2.4.3.1.5	Thermische Spritzverfahren	483
	2.4.3.1.6	Nachbehandlung, Prüfung und Anwendung von Metallspritzschichten	489
	2.4.3.1.7	Arbeitssicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz	490
	2.4.3.2	Schmelztauchen	492
	2.4.3.2.1	Allgemeines	492
	2.4.3.2.2	Einteilung	492
	2.4.3.2.3	Grundlagen	493
	2.4.3.2.4	Schmelztauchwerkstoffe	494
	2.4.3.2.5	Metallträger	494
	2.4.3.2.6	Schmelztauchverfahren	495
	2.4.3.2.7	Weiterverarbeitung von Werkstücken mit Schmelztauchüberzug	497
	2.4.3.2.8	Korrosionsschutz durch Schmelztauchüberzüge	498
		Literatur zu Abschnitt 2.4	499
2.5		Beschichten aus dem ionisierten Zustand durch elektrolytische oder chemische Abscheidung	503
	2.5.1	Allgemeines	503
	2.5.2	Grundlagen	504
	2.5.3	Technologie	506
	2.5.3.1	Allgemeines	506
	2.5.3.2	Vorbehandlung	507
	2.5.3.3	Fertigungsabläufe beim Galvanisieren	510
	2.5.3.4	Prozeßparameter	513
	2.5.3.5	Nachbehandlung	515
	2.5.4	Galvanotechnisch erzeugte Schichtüberzüge	516
	2.5.4.1	Schichtarten	516
	2.5.4.2	Schichteigenschaften	518
	2.5.5	Anwendungsbedingungen	519
		Literatur zu Abschnitt 2.5	521
2.6		Beschichten aus dem festen Zustand	523
	2.6.1	Pulverbeschichten	523
	2.6.1.1	Allgemeines	523
	2.6.1.2	Technologie	524

2.6.1.2.1	Oberflächenvorbereitung	524
2.6.1.2.2	Herstellung von Pulverlacken	524
2.6.1.2.3	Pulverlackssysteme und deren Prüfung	526
2.6.1.3	Pulverbeschichtungsverfahren	530
2.6.1.4	Anwendungsbedingungen	537
2.6.2	Metallplattieren	539
2.6.2.1	Plattierverfahren	539
2.6.2.1.1	Allgemeines	539
2.6.2.1.2	Walzplattieren	540
2.6.2.1.3	Sprengplattieren	540
2.6.2.1.4	Gießplattieren	541
2.6.2.2	Plattierwerkstoffe	541
2.6.2.3	Verarbeitung von Plattierwerkstoffen	544
2.6.2.4	Anwendungsbeispiele	546
	Literatur zu Abschnitt 2.6	547
2.7	Beschichten durch Schweißen	549
2.7.1	Allgemeines	549
2.7.2	Auftragwerkstoffe	549
2.7.3	Auftragschweißverfahren	551
	Literatur zu Abschnitt 2.7	554
	Nachweis der Bilder	555
	Sachwortregister	557

Handbuch der Fertigungstechnik

Band 4/2

Wärmebehandeln

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c.Dr.-Ing. E.h. Günter Spur

Mit 573 Bildern und 97 Tabellen

Carl Hanser Verlag München Wien

Inhalt

3	Wärmebehandlung der Metalle	585
3.1	Einführung in die Wärmebehandlung	585
3.1.1	Allgemeines	585
3.1.2	Bedeutung der Wärmebehandlung	586
3.2	Grundlagen der Wärmebehandlung	592
3.2.1	Allgemeines	592
3.2.2	Wärmeübertragung	594
3.2.3	Gitterstörungen	599
3.2.4	Thermisch aktivierte Atombewegungen	602
3.2.5	Festigkeitsbestimmende Werkstoffwiderstände	609
3.2.6	Umwandlungen im festen Zustand	614
3.2.7	Erholung und Rekristallisation	619
3.2.8	Eigenspannungen	621
3.2.9	Eindiffusion von Fremdelementen	622
3.2.10	Oxidationsvorgänge	626
3.2.11	Spannungen bei rascher Abkühlung	629
3.2.12	Eigenspannungen nach rascher Abkühlung	631
3.3	Einteilung der Wärmebehandlungsverfahren	639
3.3.1	Allgemeines	639
3.3.2	Thermische Verfahren	639
3.3.3	Thermochemische Verfahren	643
3.3.4	Thermomechanische Verfahren	645
	Literatur zu den Abschnitten 3.1 bis 3.3	647
3.4	Wärmebehandlungsanlagen und -Öfen	649
3.4.1	Übersicht der Wärmebehandlungsprozesse und -anlagen	649
3.4.1.1	Wärmebehandlungsprozesse	649
3.4.1.2	Einteilung und Bauarten von Wärmebehandlungsanlagen	652
3.4.2	Energetische Beurteilung von Industrieöfen	665
3.4.2.1	Aufstellen von Bilanzen	665
3.4.2.2	Definition von Wirkungsgraden	667
3.4.2.3	Wärmerückgewinnung aus dem Abgas	669
3.4.2.4	Wärmerückgewinnung aus dem Gut	670
3.4.3	Grundlagen der Wärmeübertragung in Ofenräumen	674
3.4.3.1	Definition von Transportgleichungen	674
3.4.3.2	Wärmeübertragung durch Konvektion	676
3.4.3.3	Wärmeübertragung durch Strahlung	680
3.4.3.4	Überlagerung von Konvektion und Strahlung	685
3.4.3.5	Kopplung zwischen verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen	686
3.4.4	Temperaturverläufe in Ofenraum und Gut	689
3.4.4.1	Charakteristische Ofenraumtemperaturen	689
3.4.4.2	Mittlere Temperaturen in Chargenöfen	691
3.4.4.3	Grundtypen brennstoffbeheizter Industrieöfen	694
3.4.4.4	Erwärmung des Gutes	698
3.4.4.5	Beispiele von Temperaturverläufen	703
3.4.5	Kühlverfahren	705
3.4.5.1	Einteilung	705
3.4.5.2	Gaskühlung mit Düsenfeldern	705
3.4.5.3	Badabschreckung	708
3.4.5.4	Spritzwasserkühlung	710

3.4.5.5	Anwendungsbeispiele	711
	Literatur zu Abschnitt 3.4	712
3.5	Wärmebehandlung von Stählen	715
3.5.1	Grundlagen	715
3.5.2	Thermische Verfahren	723
3.5.2.1	Glühen	723
3.5.2.1.1	Diffusionsglühen	723
3.5.2.1.2	Grobkornglühen	734
3.5.2.1.3	Spannungsarmglühen	739
3.5.2.1.4	Rekristallisationsglühen	747
3.5.2.1.5	Weichglühen	758
3.5.2.1.6	Normalglühen	765
3.5.2.1.7	BG-Glühen (Isothermglühen)	774
3.5.2.2	Härten und Vergüten	779
3.5.2.2.1	Härten nach Volumenerwärmung	779
3.5.2.2.2	Anlassen	792
3.5.2.2.3	Vergüten	800
3.5.2.2.4	Randschichthärten	806
3.5.2.2.5	Impulshärten	814
3.5.3	Thermochemische Verfahren	816
3.5.3.1	Allgemeines	816
3.5.3.2	Einsatzhärten	817
3.5.3.2.1	Grundlagen	817
3.5.3.2.2	Aufkohlen	828
3.5.3.2.3	Carbonitrieren	836
3.5.3.2.4	Prüfung des Einsatzhärtungsergebnisses	841
3.5.3.2.5	Einsatzhärbarkeit	844
3.5.3.2.6	Eigenschaften einsatzgehärteter Teile	848
3.5.3.2.7	Begleiterscheinungen beim Einsatzhärten	850
3.5.3.3	Nitrieren und Nitrocarburieren	854
3.5.3.3.1	Grundlagen	854
3.5.3.3.2	Gasnitrieren und Gasnitrocarburieren	864
3.5.3.3.3	Plasmanitrieren und Plasmanitrocarburieren	870
3.5.3.3.4	Salzbadnitrocarburieren	873
3.5.3.3.5	Pulvernitrocarburieren	875
3.5.3.3.6	Prüfung des Nitrier- bzw. Nitrocarburierergebnisses	875
3.5.3.3.7	Eigenschaften nitrierter und nitrocarburierter Teile	878
3.5.3.3.8	Begleiterscheinungen beim Nitrieren und Nitrocarburieren	884
3.5.3.3.9	Einflüsse vorangegangener Arbeitsgänge	885
3.5.3.4	Borieren	887
3.5.3.4.1	Grundlagen	887
3.5.3.4.2	Borieren in festen Spendermedien	890
3.5.3.4.3	Borieren in Salzschnmelzen	893
3.5.3.4.4	Weitere Boriervverfahren	893
3.5.3.4.5	Prüfung des Borierergebnisses	895
3.5.3.4.6	Eigenschaften borierter Teile	895
3.5.3.5	Eindiffundieren metallischer Elemente	897
3.5.3.5.1	Grundlagen	897
3.5.3.5.2	Chromieren	899
3.5.3.5.3	Vanadieren	900
3.5.3.5.4	Aluminieren	902

	3.5.3.5.5 Silizieren.....	903
	3.5.4 Thermomechanische Verfahren.....	903
	Literatur zu Abschnitt 3.5.....	914
3.6	Wärmebehandlung von Eisen-Kohlenstoff-Gußwerkstoffen.....	922
	3.6.1 Allgemeines.....	922
	3.6.2 Stabiles System Eisen-Graphit und metastabiles System Eisen-Zementit.....	922
	3.6.3 Glühen im Austenitgebiet.....	928
	3.6.3.1 Einstellen eines kohlenstoffgesättigten Austenits.....	928
	3.6.3.2 Erste Graphitisierungsstufe bei schwarzem Temperguß.....	928
	3.6.3.2.1 Graphitkeimbildung.....	928
	3.6.3.2.2 Graphitwachstum.....	930
	3.6.3.3 Glühfrischen von weißem Temperguß.....	931
	3.6.3.4 Glühen von graphithaltigen Gußeisenwerkstoffen.....	933
	3.6.3.5 Einfluß von Mikroseigerungen bei der Austenitisierung.....	935
	3.6.4 Wärmebehandlungen zur Änderung der gebundenen Kohlenstoffgehalte.....	936
	3.6.4.1 Eutektoidisches Umwandeln.....	936
	3.6.4.2 Ferritglühen.....	937
	3.6.4.3 Perlitglühen.....	939
	3.6.5 Härten und Vergüten.....	941
	3.6.5.1 Härten nach Volumenerwärmung.....	941
	3.6.5.2 Anlassen (Vergüten).....	947
	3.6.5.3 Bainitvergüten.....	949
	3.6.5.4 Vergüten karbidischer Gußeisensorten.....	954
	3.6.6 Spannungsarmglühen.....	961
	3.6.7 Randschichthärten.....	962
	3.6.7.1 Allgemeines.....	962
	3.6.7.2 Thermophysikalisches Rand schichthärten.....	963
	3.6.7.3 Nitrieren.....	966
	Literatur zu Abschnitt 3.6.....	968
3.7	Wärmebehandlung von Nichteisenmetallen.....	972
	3.7.1 Allgemeines.....	972
	3.7.2 Thermisches Entspannen.....	972
	3.7.2.1 Allgemeines.....	972
	3.7.2.2 Thermisches Entspannen von Aluminium.....	974
	3.7.2.3 Thermisches Entspannen von Kupfer.....	975
	3.7.2.4 Thermisches Entspannen von Magnesium.....	976
	3.7.2.5 Thermisches Entspannen von Nickel.....	976
	3.7.2.6 Thermisches Entspannen von Titan.....	977
	3.7.2.7 Thermisches Entspannen von Zirkonium.....	978
	3.7.3 Weichglühen.....	978
	3.7.3.1 Allgemeines.....	978
	3.7.3.2 Weichglühen von Aluminium.....	979
	3.7.3.3 Weichglühen von Kupfer.....	981
	3.7.3.4 Weichglühen von Magnesium.....	982
	3.7.3.5 Weichglühen von Nickel.....	982
	3.7.3.6 Weichglühen von Titan.....	984
	3.7.3.7 Weichglühen von Zirkonium.....	985
	3.7.4 Homogenisieren.....	985
	3.7.4.1 Allgemeines.....	985
	3.7.4.2 Homogenisieren von Aluminium.....	987

3.7.4.3	Homogenisieren von Kupfer.	987
3.7.4.4	Homogenisieren von Magnesium.	987
3.7.4.5	Homogenisieren von Nickel.	988
3.7.5	Lösungsglühen und Auslagern.	988
3.7.5.1	Allgemeines.	988
3.7.5.2	Lösungsglühen und Auslagern von Aluminium.	992
3.7.5.3	Lösungsglühen und Auslagern von Kupfer.	1001
3.7.5.4	Lösungsglühen und Auslagern von Magnesium.	1004
3.7.5.5	Lösungsglühen und Auslagern von Nickel.	1004
3.7.5.6	Lösungsglühen und Auslagern von Titan.	1006
3.7.5.7	Lösungsglühen und Auslagern von Zink.	1008
3.7.5.8	Lösungsglühen und Auslagern von Blei.	1008
	Literatur zu Abschnitt 3.7.	1009
3.8	Werkstoffprüfung.	1012
3.8.1	Allgemeines.	1012
3.8.2	Härtbarkeitsprüfung.	1012
3.8.2.1	Allgemeines.	1012
3.8.2.2	Härtbarkeitsprüfung nach Grossmann.	1013
3.8.2.3	Stirnabschreckversuch (Jominy-Versuch).	1016
3.8.2.4	Beziehungen zwischen Stirnabschreck- und Querschnitts- härteverlauf.	1018
3.8.2.5	Berechnung der Härtebarkeit.	1019
3.8.3	Metallographische Prüfung.	1019
3.8.3.1	Allgemeines.	1019
3.8.3.2	Makroskopie.	1020
3.8.3.3	Lichtmikroskopie.	1020
3.8.3.4	Elektronenmikroskopie.	1025
3.8.3.5	Röntgen-Feinstrukturanalyse.	1027
3.8.4	Festigkeitsprüfung.	1027
3.8.4.1	Allgemeines.	1027
3.8.4.2	Festigkeitsprüfung mit ruhender Beanspruchung.	1028
3.8.4.3	Festigkeitsprüfung mit schlagartiger Beanspruchung.	1032
3.8.4.4	Festigkeitsprüfung mit schwingender Beanspruchung.	1034
3.8.5	Bruchmechanische Prüfung.	1040
3.8.5.1	Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik.	1040
3.8.5.2	Ermittlung der Bruchzähigkeit.	1042
3.8.5.3	Weitere bruchmechanische Konzepte.	1043
3.8.6	Härteprüfung.	1045
3.8.6.1	Allgemeines.	1045
3.8.6.2	Statische Härteprüfung.	1045
3.8.6.3	Dynamische Härteprüfung.	1049
	Literatur zu Abschnitt 3.8.	1050
	Nachweis der Bilder.	1054
	Sachwortregister.	1055