

Inhaltsverzeichnis

Fertigungsverfahren

	2.1.8.3	Die Längenausdehnung	81
	2.1.8.4	Eigenschaftsänderungen beim Übergang flüssig – fest	81
	2.1.8.5	Dichte bei Legierungen	81
	2.1.8.6	Aufteilen des Volumendefizits	82
	2.1.8.7	Entstehen eines Innendefizits	82
	2.1.8.8	Entstehen von Luft- und Gaseinschlüssen bei der Formfüllung	84
	2.1.8.9	Entstehen von Spannungen und Rissen	86
	2.1.8.10	Schwindung der Gussteile in festem Zustand	87
	2.1.8.11	Thermische Eigenschaften der Gießwerkstoffe	89
	2.1.9	Wärmeabfuhr an Formen	92
	2.1.9.1	Wärmeübergang von der Schmelze zur Form	92
	2.1.9.2	Wärmebilanz einer Form	92
	2.1.9.3	Wärmedurchgangszahl	93
	2.1.9.4	Schichten	94
	2.1.9.5	Abkühlkurven für Gussteile	94
	2.1.9.6	Kontakttemperatur in der Grenzfläche von Schmelze/Gussteil zur Form	95
	2.1.9.7	Wärmefluss im System Schmelze/Gussteil zur Form	96
	2.1.9.8	Wärmeleitung in einem Körper und Bildung der Randschale	96
	2.1.9.9	Ermittlung der Erstarrungszeit	97
	2.1.9.10	Der Erstarrungsmodus	98
	2.1.10	Speisertechnik	99
	2.1.10.1	Art der Speiser	99
	2.1.10.2	Position und Geometrie der Speiser	100
	2.1.10.3	Formstoff zum Abformen der Speiser	100
	2.1.10.4	Anforderungen an Speiser	102
	2.1.10.5	Metallostatischer Druck	103
	2.1.10.6	Abtrennen der Speiser	104
	2.1.10.7	Abhängigkeit des Speisungsvolumens von thermischen Verhältnissen	105
	2.1.10.8	Belüftung innenliegender Speiser	105
	2.1.11	Formfüllvorgänge	106
	2.1.12	Strömungsvorgänge der Schmelze	109
	2.1.12.1	Schwerkraftgießen	109
	2.1.12.2	Druckgießen	110
	2.1.12.3	Schleudergießen	110
	2.1.12.4	Aufbau eines Gießsystems	110
	2.1.12.5	Staufüllung und Strahlfüllung	113
	2.1.13	Simulation der Formfüllung	114
	2.2	Pulvermetallurgie (PM)	115
	2.2.1	Metallpulver	115
	2.2.2	Die Herstellung pulvermetallurgischer Werkstücke	117
	2.2.2.1	Aufbereiten der Metallpulver	117
	2.2.2.2	Pressen der Grünlinge	118
	2.2.2.3	Sintern	120
	2.2.2.4	Nachbehandlung	122
	2.2.3	Pulverspritzgießen	123
	2.2.4	Sinterwerkstoffe und Sinterwerkstücke	124
	2.2.5	Gestaltung	124
	2.3	Galvanische Verfahren	125
	2.3.1	Galvanoformung	125
	2.3.2	Lithographie-Galvanik-Abformung (LIGA)	125
	2.4	Umformtechnik	126
	2.4.1	Übersicht	126
	2.4.2	Geschichtliche Entwicklung	128
	2.4.3	Metallkundliche Grundlagen	129
	2.4.4	Druckformen	133
	2.4.4.1	Warmwalzen	133
	2.4.4.2	Der Vorgang des Walzens	133
	2.4.4.3	Walzverfahren	135
	2.4.4.4	Freiformen, Übersicht	138
	2.4.4.5	Gesenkschmieden	141
	2.4.4.6	Eindrücken	145
	2.4.4.7	Durchdrücken	147
1	Einführung in die industrielle Fertigungstechnik	9	
1.1	Fertigungstechnik als eine Triebfeder der Menschheit	9	
1.2	Die Fertigungsverfahren im Überblick	11	
1.3	Entwicklungsphasen der industriellen Technik	14	
1.4	Industrie 4.0	16	
1.5	Aktuelle Ziele und Entwicklungen	18	
1.5.1	Werkzeugmaschinen	18	
1.5.2	Fertigungsverfahren	20	
1.5.3	Leichtbau	22	
1.5.4	Energieeffizienz und Ressourceneffizienz	23	
1.6	Geschwindigkeit und Qualität	24	
1.7	Management	26	
1.7.1	Produktdatenmanagement (PDM)	26	
1.7.2	ERP	26	
1.7.3	Manufacturing-Execution-Systeme – MES	27	
1.7.4	Lieferketten-Management	28	
2	Fertigen mit Metallen	29	
2.1	Gießereitechnik	29	
2.1.1	Gegossene Bauteile	29	
2.1.2	Geschichtliche Entwicklung	32	
2.1.3	Begriffe, Bezeichnungen	37	
2.1.3.1	Unterscheidung nach Werkstoffen	37	
2.1.3.2	Unterscheidung nach mechanischen Eigenschaften	37	
2.1.3.3	Unterscheidung nach Gießverfahren	38	
2.1.3.4	Art der Formfüllung	39	
2.1.3.5	Art des Vergießens	40	
2.1.3.6	Prüfen der Schmelze	41	
2.1.4	Gusswerkstoffe	42	
2.1.5	Gießverfahren	46	
2.1.5.1	Sandgießverfahren	46	
2.1.5.2	Schwerkraftkokillengießen	48	
2.1.5.3	Niederdruckkokillengießen	49	
2.1.5.4	Schleudergießen	49	
2.1.5.5	Feingießen	50	
2.1.5.6	Druckgießen	51	
2.1.5.7	Weitere Gießverfahren	55	
2.1.5.8	Vergleich der Gießverfahren	56	
2.1.6	Formtechnik	58	
2.1.6.1	Übersicht	58	
2.1.6.2	Grundlagen	59	
2.1.6.3	Modellarten	61	
2.1.6.4	Handformen	62	
2.1.6.5	Maschinenformen	64	
2.1.6.6	Formanlagen	67	
2.1.6.7	Kerne	68	
2.1.6.8	Direkte Herstellung von Formen und Kernen	70	
2.1.6.9	Formstoffe	71	
2.1.7	Anforderungen an Gussteile und Fertigungsbedingungen	72	
2.1.7.1	Einleitung	72	
2.1.7.2	Vollständigkeit	72	
2.1.7.3	Vermeiden von Kaltfließstellen	73	
2.1.7.4	Vermeiden innerer Hohlräume	74	
2.1.7.5	Maßhaltigkeit	75	
2.1.7.6	Maßbeständigkeit	76	
2.1.7.7	Korrosionsfestigkeit	77	
2.1.7.8	Oberflächenbeschaffenheit	77	
2.1.8	Eigenschaften metallischer Werkstoffe	78	
2.1.8.1	Volumeneigenschaften	78	
2.1.8.2	Werkstoffkennwerte im Vergleich	80	

2.4.5	Zugdruckumformen.....	152	2.6.5.3	Tiefbohren.....	249
2.4.5.1	Gleitziehen.....	152	2.6.5.4	Aussteuerwerkzeuge.....	255
2.4.5.2	Tiefziehen.....	154	2.6.6	Reiben und Feinbohren.....	256
2.4.5.3	Drücken.....	156	2.6.7	Fräsen.....	257
2.4.6	Zugumformen.....	157	2.6.7.1	Fräsverfahren.....	257
2.4.6.1	Längen.....	157	2.6.7.2	Schnittgrößen beim Fräsen.....	258
2.4.6.2	Weiten.....	157	2.6.7.3	Besondere Fräsverfahren.....	263
2.4.6.3	Tiefen.....	158	2.6.8	Maschinelle Gewindeherstellung.....	266
2.4.7	Biegen.....	161	2.6.8.1	Allgemeines.....	266
2.4.7.1	Physikalisch-technischer Vorgang.....	161	2.6.8.2	Innengewindefräsen.....	267
2.4.7.2	Biegeverfahren.....	162	2.6.8.3	Gewindedrehfräsen.....	269
2.4.8	Schubumformen.....	164	2.6.8.4	Gewindewirbeln.....	270
2.4.9	Pressmaschinen.....	165	2.6.8.5	Gewindedrehen.....	270
2.4.9.1	Weggebundene Pressmaschinen.....	165	2.6.9	Räumen.....	273
2.4.9.2	Kraftgebundene Pressmaschinen.....	167	2.6.10	Hobeln und Stoßen.....	275
2.4.9.3	Arbeitsgebundene Pressmaschinen.....	168	2.6.11	Hochgeschwindigkeitsbearbeitung.....	276
2.4.9.4	Servopressen.....	168	2.6.11.1	Übersicht.....	276
2.5	Spanloses Trennen und Abtragen.....	169	2.6.11.2	Technologischer Hintergrund.....	278
2.5.1	Mechanisches Zerteilen.....	169	2.6.11.3	Prozesskette und Komponenten.....	279
2.5.1.1	Scherschneiden.....	169	2.6.11.4	Schnittdaten.....	280
2.5.1.2	Bruchtrennen (Cracken).....	171	2.6.11.5	Bearbeitungsstrategie.....	280
2.5.1.3	CNC-Stanzen.....	172	2.6.11.6	Software und Programmierung.....	284
2.5.1.4	Wasserstrahlschneiden.....	173	2.6.11.7	HSC-Werkzeuge.....	285
2.5.1.5	Abtragen und Modifizieren durch Strahlen.....	174	2.6.11.8	Schneidstoffe.....	286
2.5.2	Thermisches Trennen und Abtragen.....	175	2.6.11.9	Werkzeugaufnahme.....	287
2.5.2.1	Trennen mit Brenngas/Sauerstoff-Flamme.....	175	2.6.11.10	Unwucht.....	289
2.5.2.2	Trennen mit Lichtbogen.....	176	2.6.12	Kühlschmierung.....	291
2.5.2.3	Trennen mit Plasma.....	177	2.6.12.1	Kühlschmierstoffe (KSS).....	292
2.5.2.4	Trennen mit Elektronenstrahl.....	177	2.6.12.2	Aufbereitung und Entsorgung.....	295
2.5.2.5	Trennen und Bearbeiten mit Laserstrahl.....	177	2.6.13	Minimalmengenschmierung (MMS).....	296
2.5.3	Abtragen durch Funkenerosion.....	178	2.6.14	Trockenbearbeitung.....	298
2.5.4	Elektrochemisches Abtragen (ECM).....	184	2.6.15	Schleifen.....	300
2.5.5	Ultraschallerosion.....	188	2.6.15.1	Schleifverfahren.....	300
2.6	Zerspantechnik.....	189	2.6.15.2	Schleifprozess.....	301
2.6.1	Einführung.....	189	2.6.15.3	Schleifkorn.....	302
2.6.1.1	Spanbildung.....	192	2.6.15.4	Schleifmittel.....	303
2.6.1.2	Zerspanungskräfte.....	195	2.6.15.5	Schleifkorngröße (Schleifmittelkörnung).....	305
2.6.1.3	Zerspanungsleistung.....	197	2.6.15.6	Schleifmittelbindung.....	306
2.6.1.4	Werkzeugverschleiß.....	198	2.6.15.7	Härte und Gefüge.....	307
2.6.1.5	Standzeit.....	201	2.6.15.8	Schleiftechnisches Grundprinzip.....	308
2.6.2	Schneidstoffe.....	206	2.6.15.9	Schnittwerte beim Schleifen.....	309
2.6.2.1	Übersicht.....	206	2.6.15.10	Schnittkraft und Schnittleistung beim Schleifen.....	310
2.6.2.2	Schneidstoffeigenschaften.....	207	2.6.15.11	Abrichten von Schleifkörpern.....	311
2.6.2.3	Schnellarbeitsstähle.....	208	2.6.16	Läppen.....	312
2.6.2.4	Hartmetalle.....	210	2.6.17	Honen.....	313
2.6.2.5	Cermets.....	211	2.6.18	Entgraten.....	314
2.6.2.6	Keramische Schneidstoffe und Diamant.....	212	2.6.18.1	Allgemeines.....	314
2.6.2.7	Auswahlkriterien.....	216	2.6.18.2	Entgratverfahren.....	315
2.6.2.8	Klassifizierung der Schneidstoffe.....	218	2.6.19	Werkzeugmaschinen.....	316
2.6.3	Zerspanbarkeit.....	221	2.6.19.1	Fräsmaschinen.....	316
2.6.3.1	Technologische Beschreibung.....	221	2.6.19.2	Drehmaschinen.....	336
2.6.3.2	Zerspanbarkeit der Stahlwerkstoffe.....	221	2.6.19.3	Schleifmaschinen.....	338
2.6.3.3	Legierter Stahl.....	222	2.6.19.4	Sägemaschinen.....	341
2.6.3.4	Nichtrostende Stähle.....	223	2.6.20	Werkstückspanntechnik.....	342
2.6.3.5	Gusseisenwerkstoffe.....	224	2.6.20.1	Mechanische Spannsysteme.....	343
2.6.3.6	Schwer zerspanbare Werkstoffe.....	225	2.6.20.2	Hydraulische und pneumatische Spann- systeme.....	344
2.6.3.7	Graphit.....	225	2.6.20.3	Vakuum-Spannsysteme.....	345
2.6.3.8	Aluminium-Legierungen.....	226	2.6.20.4	Magnetspanntechnik.....	347
2.6.3.9	Kunststoffe.....	227	2.6.20.5	Gefrierspanntechnik.....	347
2.6.3.10	Verbundwerkstoffe (Composites).....	227	2.7	Wärmebehandlung von Stahl.....	350
2.6.3.10	Bearbeitung harter Eisenwerkstoffe.....	228	2.7.1	Durchhärten.....	350
2.6.4	Drehen.....	230	2.7.2	Oberflächenhärten.....	353
2.6.4.1	Allgemeines.....	230	2.7.2.1	Oberflächenhärten durch Wärmebehandlung.....	353
2.6.4.2	Schnittgrößen beim Drehen.....	231	2.7.2.2	Härten durch chemische Veränderung der Randschicht.....	354
2.6.4.3	Innenausdrehen.....	236	2.7.3	Glühen von Stählen.....	356
2.6.4.4	Abstech- und Einstechdrehen.....	238			
2.6.4.5	Besondere Drehverfahren.....	240			
2.6.5	Bohren.....	241			
2.6.5.1	Bohrvorgang und Eigenschaften.....	241			
2.6.5.2	Bohrwerkzeuge.....	247			

3 Fertigen mit Nichtmetallen	357	4.1.3	Umformen, Urformen und Füllen.....	449
3.1 Produkte aus Kunststoffen	357	4.1.3.1	Umformen.....	449
3.1.1 Kunststoffe.....	357	4.1.3.2	Urformen.....	452
3.1.1.1 Einteilung und Arten.....	357	4.1.3.3	Füllen.....	453
3.1.1.2 Bauteilgestaltung.....	363	4.1.4	Textiles Fügen.....	454
3.1.2 Fertigungsverfahren.....	364	4.1.4.1	Fügen zur Herstellung von Rohware.....	454
3.1.2.1 Extrudieren.....	365	4.1.4.2	Fügen zur Herstellung von Fertigprodukten....	456
3.1.2.2 Folienblasen.....	367	4.1.5	Stoffschlüssiges Fügen.....	459
3.1.2.3 Kalandrieren.....	368	4.1.5.1	Fügetechniken in einer Übersicht.....	459
3.1.2.4 Spritzgießen.....	369	4.1.5.2	Schweißen von Metallen.....	460
3.1.2.5 Varianten des Spritzgießens.....	375	4.1.5.3	Pressschweißverfahren.....	462
3.1.2.6 Simulation des Spritzgießprozesses.....	377	4.1.5.4	Schmelzschweißverfahren.....	473
3.1.2.7 Hohlkörperblasen (Blasformen).....	380	4.1.5.5	Schweißen polymerer Werkstoffe.....	488
3.1.2.8 Schäumen.....	381	4.1.5.6	Löten.....	490
3.1.2.9 Thermoformen.....	382	4.1.5.7	Kleben.....	496
3.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)	383	4.2 Oberflächenmodifikation von Bauteilen	501	
3.2.1 Einteilung und Arten.....	384	4.2.1	Vorbereitung.....	501
3.2.2 Bauteilgestaltung.....	386	4.2.1.1	Entfernen von Belägen.....	502
3.2.3 FVK-Fertigungsverfahren.....	389	4.2.1.2	Aktivierung von Oberflächen.....	504
3.2.3.1 Warmpressen.....	389	4.2.1.3	Glätten von Oberflächen.....	505
3.2.3.2 Faserspritzen.....	391	4.2.1.4	Eigenspannungen.....	505
3.2.3.3 Handlaminiere.....	392	4.2.1.5	Aufräuen von Oberflächen.....	506
3.2.3.4 Resin Transfer Molding (RTM) (Harzinjektionsverfahren).....	393	4.2.2	Oberflächenmodifikation.....	507
3.2.3.5 Vakuuminfusion.....	394	4.2.2.1	Modifikation durch Diffusion.....	508
3.2.3.6 Faserwickeln.....	395	4.2.2.2	Modifikation unter Verwendung eines flüssigen Elektrolyten.....	509
3.2.3.7 Prepreg-Techniken.....	396	4.2.2.3	Modifikation unter Verwendung des schmelzflüssig oder gelöst vorliegenden Schichtwerkstoffs.....	514
3.3 Produkte aus Keramik	397	4.2.2.4	Beschichten aus der Gas- oder Dampfphase..	522
3.3.1 Einführung und geschichtliche Entwicklung....	397	4.2.3	Nachbehandlung.....	526
3.3.2 Bauteile aus Silikatkeramik.....	399	4.2.3.1	Reduzierung des gelösten Wasserstoffs.....	526
3.3.2.1 Rohstoffe.....	399	4.2.3.2	Konservieren.....	526
3.3.2.2 Aufbereitung.....	401	4.2.4	Entfernen von Schichten.....	527
3.3.2.3 Formgebung.....	402	4.2.5	Thermisches Entgraten (TEM).....	528
3.3.2.4 Zwischenbearbeitung.....	402	4.3 Montagetechnik	529	
3.3.2.5 Sintern.....	403	4.3.1	Grundlagen.....	529
3.3.2.6 Oberflächenmodifikation.....	406	4.3.2	Der Materialfluss.....	532
3.3.3 Produkte aus Nichtsilikatkeramik.....	406	4.3.2.1	Lagern.....	532
3.3.3.1 Gewinnung der Rohstoffe.....	408	4.3.2.2	Puffern.....	533
3.3.3.2 Aufbereitung.....	412	4.3.2.3	Bunkern.....	534
3.3.3.3 Formgebung.....	415	4.3.2.4	Magazinieren.....	535
3.3.3.4 Zwischenbearbeitung.....	418	4.3.2.5	Fördern.....	536
3.3.3.5 Hochtemperaturbehandlung.....	420	4.3.3	Montagearbeitsplätze.....	539
3.3.3.6 Endbearbeitung.....	427	4.3.3.1	Manuelle Montage.....	539
3.4 Produkte aus Silikatglas	428	4.3.3.2	Maschinelle Montage.....	542
3.4.1 Geschichte der Silikatgläser.....	428	4.3.3.3	Montage 4.0.....	543
3.4.2 Silikatgläser heute.....	430	4.3.4	Montageplanung.....	544
3.4.3 Rohstoffe und Aufbereitung.....	431	5 Roboter im Fertigungsprozess	545	
3.4.3.1 Rohstoffe.....	431	5.1 Einführung zur Robotertechnik	545	
3.4.3.2 Aufbereitung.....	432	5.2 Einteilung	546	
3.4.4 Schmelzen und Raffinieren.....	433	5.3 Kinematischer Aufbau	547	
3.4.4.1 Schmelzen.....	433	5.4 Roboterprogrammierung	551	
3.4.4.2 Raffinieren.....	434	5.5 Koordinatensysteme	554	
3.4.5 Urformgebung.....	434	5.6 Robotersensorführung	555	
3.4.5.1 Urformgebung unter Schwerkraft.....	435	5.7 Bearbeitungsaufgaben	557	
3.4.5.2 Urformgebung unter Druckanwendung.....	436	6 Laser in der Fertigungstechnik	559	
3.4.5.3 Temperung.....	438	6.1 Grundlagen zur Lasertechnik	559	
3.3.5.4 Urformen durch Pulvertechnologie.....	439	6.1.1	Wichtige Laserarten zur Bearbeitung.....	559
3.4.6 Spanlose Formgebung.....	439	6.1.2	Physikalische Grundlagen.....	560
3.4.7 Spanabhebende Formgebung.....	440	6.1.3	Aufbau von Laserstrahlquellen.....	561
3.4.8 Fügen.....	440	6.1.4	Betriebs- und Wartungskosten.....	564
3.4.9 Oberflächenmodifikation.....	440	6.1.5	Strahlführung zum Bearbeitungsort.....	564
4 Fügen, Modifizieren und Montieren	443	6.1.5.1	Strahlführung mit Lichtleitkabel (LLK).....	564
4.1 Fügen	443	6.1.5.2	Strahlführung als Freistrahle.....	566
4.1.1 Übersicht.....	443	6.1.5.3	Welding-on-the-fly.....	566
4.1.2 Zusammensetzen, Anpressen und Einpressen.....	444			
4.1.2.1 Zusammensetzen.....	444			
4.1.2.2 Anpressen und Einpressen.....	445			

- 6.1.6 Strahlformung am Bearbeitungsort..... 567
- 6.1.7 Strahlqualität..... 568
- 6.2 Werkstückbearbeitung..... 570**
- 6.2.1 Grundlagen..... 570
- 6.2.1.1 Fokussierung..... 570
- 6.2.1.2 Verschmutzungsschutz..... 571
- 6.2.1.3 Absorption..... 572
- 6.2.2 Laseranwendungen..... 573
- 6.2.2.1 Laserschweißen..... 573
- 6.2.2.2 Laserschneiden..... 577
- 6.2.2.3 Laserbohren..... 579
- 6.2.2.4 Laserlöten..... 580
- 6.2.2.5 Laserbearbeiten von Diamantwerkzeugen..... 580
- 6.2.2.6 Laserbeschriften und Laserstrukturieren..... 581
- 6.2.2.7 Laserhärten..... 582
- 6.2.2.8 Laserbeschichten..... 582

7 3D-Druck (Additive Fertigung, AM)..... 583

- 7.1 Allgemeines..... 583**
- 7.2 Ziele..... 583**
- 7.3 AM-Verfahren..... 586**
- 7.3.1 Stereolithographie (STL)..... 588
- 7.3.2 Lasersintern (LS)..... 592
- 7.3.3 Fused Layer Modeling (FLM)..... 597
- 7.3.4 Material-Jetting und Binder-Jetting..... 598
- 7.3.5 Bioplotter, Herstellung medizinischer Implantate..... 600
- 7.4 Rapid Manufacturing (RM)..... 601**

Mess- und Prüftechnik

8 Fertigungsmesstechnik..... 603

- 8.1 Grundlagen der geometrischen Messtechnik..... 603**
- 8.1.1 Messabweichungen..... 605
- 8.1.1.1 Ordnung von Messabweichungen..... 606
- 8.1.1.2 Messabweichungen durch geometrische Einflüsse..... 607
- 8.1.1.3 Verformungen durch Eigengewicht, Messkraft, Spannkraft..... 612
- 8.1.1.4 Temperatureinfluss..... 616
- 8.1.1.5 Abweichungen durch Schwingungen..... 618
- 8.2 Die Geometrische Produktspezifikation (GPS)..... 620**
- 8.2.1 Das Konzept zur Tolerierung von Bauteilen..... 620
- 8.2.2 GPS-Grundnormen..... 622
- 8.2.3 Elementare Grundsätze des GPS-System – Das Prinzip des „Aufrufens“..... 623
- 8.2.4 Maße und Ausgleichsgeometrien..... 625
- 8.3 Maßverkörperungen..... 631**
- 8.3.1 Endmaße..... 631
- 8.3.1.1 Parallelendmaße..... 631
- 8.3.2 Maßstäbe und Drehgeber..... 633
- 8.3.2.1 Strichmaße..... 633
- 8.3.2.2 Inkrementalmaßstäbe..... 633
- 8.3.2.3 Absolutmaßstäbe..... 637
- 8.4 Form- und Lagebestimmung..... 638**
- 8.4.1 Gerade..... 638
- 8.4.2 Ebene..... 640
- 8.4.2.1 Messplatten..... 640
- 8.4.2.2 Ebenheitsprüfung..... 641
- 8.4.3 Kreis, Zylinder..... 642
- 8.4.4 Winkelverkörperungen..... 643
- 8.4.4.1 Rechter Winkel..... 643
- 8.4.4.2 Beliebige Winkel..... 644
- 8.4.5 Lehren..... 645
- 8.4.6 Anzeigende Messgeräte..... 647

- 8.4.6.1 Messschieber..... 647
- 8.4.6.2 Messschrauben..... 648
- 8.4.6.3 Messuhren..... 650
- 8.4.6.4 Messtaster mit Inkrementalmaßstab..... 651
- 8.4.6.5 Feinzeiger..... 651
- 8.3.6.6 Fühlhebelmessgeräte..... 652
- 8.4.6.7 Winkelmessgeräte..... 653
- 8.4.6.8 Neigungsmessgeräte..... 653
- 8.4.6.9 Autokollimationsfernrohr (AKF)..... 655
- 8.4.7 Längenmessgeräte..... 659
- 8.4.7.1 Induktive und kapazitive Messtaster..... 659
- 8.4.7.2 Trägerfrequenzverstärker..... 662
- 8.4.7.3 Pneumatische Wegaufnehmer..... 663
- 8.4.7.4 Optische Wegaufnehmer..... 663
- 8.4.8 Messtechnische Hilfsmittel..... 666
- 8.4.9 Messgeräte..... 667
- 8.4.9.1 Messmikroskop und Profilprojektor..... 667
- 8.4.9.2 Komparator..... 669
- 8.4.10 Mehrstellenmessgeräte..... 671
- 8.4.11 Laserscanner..... 672
- 8.4.12 Formmessgeräte..... 672
- 8.4.12.1 Formmessgeräte für runde Teile..... 673
- 8.4.12.2 Geradheitsmessgeräte..... 674
- 8.5 Interferometrische Messverfahren..... 675**
- 8.5.1 Grundlagen..... 675
- 8.5.1.1 Aufbau von Interferometern zur Wegmessung..... 675
- 8.5.1.2 Strahlungsquellen..... 677
- 8.5.2 Einflüsse auf die Messunsicherheit..... 677
- 8.5.3 Anwendungen der längenmessenden Interferometrie..... 678
- 8.5.3.1 Kippwinkelmessung..... 679
- 8.5.3.2 Geradheitsmessung..... 679
- 8.5.3.3 Ebenheitsmessung..... 680
- 8.5.4 Formprüfung..... 680
- 8.6 Oberflächenmesstechnik..... 681**
- 8.6.1 Mechanische Oberflächenmessung..... 681
- 8.6.2 Berührungslose Oberflächenmessung..... 683
- 8.6.2.1 Optische Oberflächenmesstechnik..... 683
- 8.6.2.2 Weißlichtinterferometer..... 683
- 8.6.2.3 Streulichtmessungen..... 683
- 8.6.3 Rastersondenmikroskope..... 684
- 8.6.3.1 Rasterkraftmikroskop (AFM – Atomic Force Microscope)..... 684
- 8.6.3.2 Rastertunnelmikroskop (STM – Scanning Tunnel Microscope)..... 685
- 8.6.4 Oberflächenkenngrößen..... 685
- 8.7 Koordinatenmesstechnik..... 687**
- 8.7.1 Koordinatenmessgeräte..... 687
- 8.7.2 Aufbau und Wirkungsweise..... 688
- 8.7.3 Bauarten..... 689
- 8.7.4 Messsysteme..... 689
- 8.7.5 Messkopfsysteme..... 690
- 8.7.6 Zusatzausstattungen..... 692
- 8.7.7 Steuerungen und Antriebe..... 693
- 8.7.8 Messwertverarbeitung und Messwertauswertung..... 693
- 8.7.9 Tastelementkalibrierung..... 696
- 8.7.10 Durchführung eines Messauftrags..... 696
- 8.8 Röntgen-Computertomographie (CT)..... 701**
- 8.8.1 Funktionsweise..... 701
- 8.8.2 Anwendungen..... 702
- 8.9 Messen und Prüfen durch Bildverarbeitung..... 703**
- 8.9.1 Grundlagen..... 704
- 8.9.2 Szenenbeleuchtung..... 707
- 8.9.3 2D-Bildverarbeitung..... 710
- 8.9.4 3D-Bildaufnahme und Digitalisierung..... 715
- 8.9.5 Laser-Trackingssysteme..... 718

9	Werkstoffprüfung	719	Anhang: Kleine Werkstoffkunde	
9.1	Einführung	719	A 1 Werkstoffe	839
9.2	Chemische Zusammensetzung	720	A 1.1 Entwicklungsphasen	839
9.3	Innere Werkstofftrennungen	723	A 1.2 Eigenschaften der Konstruktionswerkstoffe	841
9.3.1	Penetrationsverfahren	723	A 1.2.1 Einleitung	841
9.3.2	Wirbelstromverfahren	724	A 1.2.2 Dichte	841
9.3.3	Streuflussverfahren	725	A 1.2.3 Elastizitätsmodul und Bruchzähigkeit	842
9.3.4	Durchstrahlung	727	A 1.2.4 Versagensspannung	843
9.3.5	Durchschallung	729	A 1.2.5 Wärmeleitfähigkeit	844
9.4	Härteprüfung	732	A 1.2.6 Temperaturleitfähigkeit	845
9.4.1	Quasistatische Eindringhärteprüfverfahren	733	A 1.2.7 Verlustfaktor	846
9.4.2	Dynamische Härteprüfverfahren	744	A 1.2.8 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	847
9.5	Gefüge	746	A 1.2.9 Zusammenfassung	848
9.5.1	Lichtmikroskopische Darstellung	746	A 2 Atomaufbau und Bindungstypen	849
9.5.2	Elektronenmikroskopische Darstellung	751	A 2.1 Metallbindung	849
9.6	Mechanische Eigenschaften	753	A 2.2 Atombindung	850
9.6.1	Zugversuch	753	A 2.3 Ionenbindung	850
9.6.2	Druckversuch	760	A 3 Aufbau metallischer Werkstoffe	851
9.6.3	Torsionsversuch	761	A 3.1 Gitteraufbau des Idealkristalls	851
9.6.4	Scherversuch	762	A 3.2 Gitterfehler im Realkristall	853
9.6.5	Kerbschlagbiegeversuch	763	A 3.2.1 Punktförmige Gitterfehler	853
9.6.6	Schwingfestigkeitsversuch	765	A 3.2.2 Linienförmige Gitterfehler	855
9.6.7	Bruchmechanik	772	A 3.2.3 Flächige Gitterfehler	856
9.6.8	Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung	777	A 3.3 Gleichgewichtszustände	858
10	Maschinen- und Bauteilverhalten	781	A 3.3.1 Bei lückenloser Mischkristallreihe	858
10.1	Bauteilprüfung	781	A 3.3.2 Unlöslichkeit im festen Zustand	859
10.1.1	Kennwerte für Werkstoffe und Bauteile	781	A 3.3.3 Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand	859
10.1.2	Nachweis der Betriebsfestigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen	783	A 3.3.4 Intermetallische bzw. intermediäre Phase	861
10.1.2.1	Auswahl schwingbruchgefährdeter Querschnitte	783	A 3.4 Phasenumwandlungen	862
10.1.2.2	Experimentelle Beanspruchungsanalyse	783	A 3.4.1 Erstarrung	862
10.1.2.3	Datenaufbereitung und Zählverfahren	785	A 3.4.2 Umwandlungen im festen Zustand	867
10.1.2.4	Festlegung der Versuchslasten	787	A 4 Eigenschaften metallischer Werkstoffe	869
10.1.2.5	Prüfstandsversuche	788	A 4.1 Thermische Leitfähigkeit	869
10.1.2.6	Serienüberwachung und Qualitätskontrolle	790	A 4.2 Verformung bei nur unbedeutenden Diffusionsprozessen	869
10.1.3	Innendruckprüfung	791	A 4.2.1 Elastische Verformung	869
10.1.3.1	Pulsationsform	791	A 4.2.2 Plastische Verformung	870
10.1.3.2	Prüfmedien	792	A 4.3 Verfestigung	873
10.1.3.3	Prüfeinrichtung	792	A 4.3.1 Verfestigung durch linienförmige Gitterfehler	873
10.1.3.4	Versuchsergebnisse	793	A 4.3.2 Verfestigung durch flächige Gitterfehler	874
10.1.4	Prüfverfahren für Umgebungseinflüsse	795	A 4.3.3 Verfestigung durch punktförmige Gitterfehler	878
10.2	Schwingungen von Maschinen und Bauteilen	800	A 4.4 Verfestigungsabbau	878
10.2.1	Einführung	800	A 4.4.1 Erholung	878
10.2.2	Eigenfrequenzen und Eigenformen	801	A 4.4.2 Rekristallisation	879
10.2.3	Modalanalyse	802	A 4.5 Plastische Verformung bei Diffusionsprozessen	880
10.3	Messungen an Werkzeugmaschinen (WZM)	807	Verzeichnis der Sachworte und Personen	881
10.3.1	Kraftmessung	807	Quellenverzeichnis	892
10.3.2	Verlagerungs- und Verformungsmessung	810		
10.3.3	Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmessung	811		
10.3.4	Schwingungsmessung und Schwingungsdiagnose	815		
10.3.5	Schwingungsformanalyse	818		
10.3.6	Fundament- und Geschossdeckenmessung	819		
10.3.7	Dynamischer Spindelrundlauf	821		
10.3.8	Lang- und Kurzzeitmessung von Temperaturen	821		
10.3.9	Geräuschmessung und Geräuschbeurteilung	823		
10.4	Abnahme von Werkzeugmaschinen	825		
10.4.1	Einleitung und Übersicht	825		
10.4.2	Direkte Messungen der Maschineneigenschaften	826		
10.4.3	Abnahme- und Prüfwerkstücke	832		
10.4.4	Fähigkeitsuntersuchungen	836		