

Inhaltsverzeichnis

Fertigungsverfahren

1 Einführung in die industrielle Fertigungstechnik	9	2.1.8.3 Die Längenausdehnung	81
1.1 Fertigungstechnik als eine Triebfeder der Menschheit	9	2.1.8.4 Eigenschaftsänderungen beim Übergang flüssig – fest.....	81
1.2 Die Fertigungsverfahren im Überblick	11	2.1.8.5 Dichte bei Legierungen.....	81
1.3 Entwicklungsphasen der industriellen Technik	14	2.1.8.6 Aufteilen des Volumendefizits.....	82
1.4 Industrie 4.0	16	2.1.8.7 Entstehen eines Innendefizits.....	82
1.5 Aktuelle Ziele und Entwicklungen	18	2.1.8.8 Entstehen von Luft- und Gaseinschlüssen bei der Formfüllung.....	84
1.5.1 Werkzeugmaschinen.....	18	2.1.8.9 Entstehen von Spannungen und Rissen	86
1.5.2 Fertigungsverfahren	20	2.1.8.10 Schwindung der Gussteile in festem Zustand	87
1.5.3 Leichtbau	22	2.1.8.11 Thermische Eigenschaften der Gießwerkstoffe	89
1.5.4 Energieeffizienz und Ressourceneffizienz	23	2.1.9 Wärmeabfuhr an Formen	92
1.6 Geschwindigkeit und Qualität	24	2.1.9.1 Wärmeübergang von der Schmelze zur Form	92
1.7 Management	26	2.1.9.2 Wärmebilanz einer Form	92
1.7.1 Produktdatenmanagement (PDM)	26	2.1.9.3 Wärmedurchgangszahl	93
1.7.2 ERP	26	2.1.9.4 Schlichten	94
1.7.3 Manufacturing-Execution-Systeme – MES	27	2.1.9.5 Abkühlkurven für Gussteile	94
1.7.4 Lieferketten-Management	28	2.1.9.6 Kontakttemperatur in der Grenzfläche von Schmelze/Gussteil zur Form	95
2 Fertigen mit Metallen	29	2.1.9.7 Wärmefluss im System Schmelze/Gussteil zur Form	96
2.1 Gießereitechnik	29	2.1.9.8 Wärmeleitung in einem Körper und Bildung der Randschale	96
2.1.1 Gegossene Bauteile	29	2.1.9.9 Ermittlung der Erstarrungszeit	97
2.1.2 Geschichtliche Entwicklung	32	2.1.10 Der Erstarrungsmodul	98
2.1.3 Begriffe, Bezeichnungen	37	2.1.10.1 Speisertechnik	99
2.1.3.1 Unterscheidung nach Werkstoffen	37	2.1.10.2 Art der Speiser	99
2.1.3.2 Unterscheidung nach mechanischen Eigenschaften	37	2.1.10.3 Position und Geometrie der Speiser	100
2.1.3.3 Unterscheidung nach Gießverfahren	38	2.1.10.4 Formstof zum Abformen der Speiser	100
2.1.3.4 Art der Formfüllung	39	2.1.10.5 Anforderungen an Speiser	102
2.1.3.5 Art des Vergießens	40	2.1.10.6 Metallostatischer Druck	103
2.1.3.6 Prüfen der Schmelze	41	2.1.10.7 Abtrennen der Speiser	104
2.1.4 Gusswerkstoffe	42	2.1.10.8 Abhängigkeit des Speisungsvolumens von thermischen Verhältnissen	105
2.1.5 Gießverfahren	46	2.1.10.9 Belüftung innenliegender Speiser	105
2.1.5.1 Sandgießverfahren	46	2.1.11 Formfülvorgänge	106
2.1.5.2 Schwerkraftkokillengießen	48	2.1.12 Strömungsvorgänge der Schmelze	109
2.1.5.3 Niederdruckkokillengießen	49	2.1.12.1 Schwerkraftgießen	109
2.1.5.4 Schleudergießen	49	2.1.12.2 Druckgießen	110
2.1.5.5 Feingießen	50	2.1.12.3 Schleudergießen	110
2.1.5.6 Druckgießen	51	2.1.12.4 Aufbau eines Gießsystems	110
2.1.5.7 Weitere Gießverfahren	55	2.1.12.5 Stauffüllung und Strahlfüllung	113
2.1.5.8 Vergleich der Gießverfahren	56	2.1.13 Simulation der Formfüllung	114
2.1.6 Formtechnik	58	2.2 Pulvermetallurgie (PM)	115
2.1.6.1 Übersicht	58	Metallpulver	115
2.1.6.2 Grundlagen	59	Die Herstellung pulvermetallurgischer Werkstücke	117
2.1.6.3 Modellarten	61	2.2.1 Aufbereiten der Metallpulver	117
2.1.6.4 Handformen	62	2.2.2 Pressen der Grünlinge	118
2.1.6.5 Maschinenformen	64	2.2.2.3 Sintern	120
2.1.6.6 Formanlagen	67	2.2.2.4 Nachbehandlung	122
2.1.6.7 Kerne	68	2.2.3 Pulverspritzgießen	123
2.1.6.8 Direkte Herstellung von Formen und Kernen	70	2.2.4 Sinterwerkstoffe und Sinterwerkstücke	124
2.1.6.9 Formstoffe	71	2.2.5 Gestaltung	124
2.1.7 Anforderungen an Gussteile und Fertigungsbedingungen	72	2.3 Galvanische Verfahren	125
2.1.7.1 Einleitung	72	2.3.1 Galvanoformung	125
2.1.7.2 Vollständigkeit	72	2.3.2 Lithographie-Galvanik-Abformung (LIGA)	125
2.1.7.3 Vermeiden von Kaltfließstellen	73	2.4 Umformtechnik	126
2.1.7.4 Vermeiden innerer Hohlräume	74	2.4.1 Übersicht	126
2.1.7.5 Maßhaltigkeit	75	2.4.2 Geschichtliche Entwicklung	128
2.1.7.6 Maßbeständigkeit	76	2.4.3 Metallkundliche Grundlagen	129
2.1.7.7 Korrosionsfestigkeit	77	2.4.4 Druckformen	133
2.1.7.8 Oberflächenbeschaffenheit	77	2.4.4.1 Warmwalzen	133
2.1.8 Eigenschaften metallischer Werkstoffe	78	2.4.4.2 Der Vorgang des Walzens	133
2.1.8.1 Volumeneigenschaften	78	2.4.4.3 Walzverfahren	135
2.1.8.2 Werkstoffkennwerte im Vergleich	80	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

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 Fräswerfahren.....	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 Fräswerfahren.....	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 Gewindedrehren.....	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 Kühlshmierung.....	291
2.5.2.3 Trennen mit Plasma.....	177	2.6.12.1 Kühlshmierstoffe (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 Schleifechnisches 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 Durchhärteten.....	350
2.6.4 Drehen.....	230	2.7.2 Oberflächenhärteten.....	353
2.6.4.1 Allgemeines.....	230	2.7.2.1 Oberflächenhärteten 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	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		
		2.7.3	

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 Vorbehandlung	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 Handlaminieren	392	4.2.1.5 Aufrauen 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 Pulvertchnologie	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 Freistrahl	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	8.4.6.1	Messschieber	647	
6.1.7	Strahlqualität	568	8.4.6.2	Messschrauben	648	
6.2	Werkstückbearbeitung	570	8.4.6.3	Messuhren	650	
6.2.1	Grundlagen	570	8.4.6.4	Messtaster mit Inkrementalmaßstab	651	
6.2.1.1	Fokussierung	570	8.4.6.5	Feinzeiger	651	
6.2.1.2	Verschmutzungsschutz	571	8.3.6.6	Fühlhebelmessgeräte	652	
6.2.1.3	Absorption	572	8.4.6.7	Winkelmessgeräte	653	
6.2.2	Laseranwendungen	573	8.4.6.8	Neigungsmessgeräte	653	
6.2.2.1	Laserschweißen	573	8.4.6.9	Autokollimationsfernrohr (AKF)	655	
6.2.2.2	Laserschneiden	577	8.4.7	Längenmessgeräte	659	
6.2.2.3	Laserbohren	579	8.4.7.1	Induktive und kapazitive Messtaster	659	
6.2.2.4	Laserlöten	580	8.4.7.2	Trägerfrequenzverstärker	662	
6.2.2.5	Laserbearbeiten von Diamantwerkzeugen	580	8.4.7.3	Pneumatische Vegaufnehmer	663	
6.2.2.6	Laserbeschriften und Laserstrukturieren	581	8.4.7.4	Optische Vegaufnehmer	663	
6.2.2.7	Laserhärtzen	582	8.4.8	Messtechnische Hilfsmittel	666	
6.2.2.8	Laserbeschichten	582	8.4.9	Messgeräte	667	
7	3D-Druck (Additive Fertigung, AM)	583	8.4.9.1	Messmikroskop und Profilprojektor	667	
7.1	Allgemeines	583	8.4.9.2	Komparator	669	
7.2	Ziele	583	8.4.10	Mehrstellenmessgeräte	671	
7.3	AM-Verfahren	586	8.4.11	Laserscanner	672	
7.3.1	Stereolithographie (STL)	588	8.4.12	Formmessgeräte	672	
7.3.2	Lasersintern (LS)	592	8.4.12.1	Formmessgeräte für runde Teile	673	
7.3.3	Fused Layer Modeling (FLM)	597	8.4.12.2	Geradheitsmessgeräte	674	
7.3.4	Material-Jetting und Binder-Jetting	598	8.5	Interferometrische Messverfahren	675	
7.3.5	Bioplotter, Herstellung medizinischer Implantate	600	8.5.1	Grundlagen	675	
7.4	Rapid Manufacturing (RM)	601	8.5.1.1	Aufbau von Interferometern zur Wegmessung	675	
			8.5.1.2	Strahlungsquellen	677	
			8.5.1.3	Einflüsse auf die Messunsicherheit	677	
			8.5.1.4	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	Fertigungsmesstechnik	603	8.6	Oberflächenmesstechnik	681	
8.1	Grundlagen der geometrischen Mess-technik	603	8.6.1	Mechanische Oberflächenmessung	681	
8.1.1	Messabweichungen	605	8.6.2	Berührungslose Oberflächenmessung	683	
8.1.1.1	Ordnung von Messabweichungen	606	8.6.2.1	Optische Oberflächenmesstechnik	683	
8.1.1.2	Messabweichungen durch geometrische Einflüsse	607	8.6.2.2	Weißlichtinterferometer	683	
8.1.1.3	Verformungen durch Eigengewicht, Messkraft, Spannkraft	612	8.5.2.3	Streulichtmessungen	683	
8.1.1.4	Temperatureinfluss	616	8.6.3.1	Rastersondenmikroskope	684	
8.1.1.5	Abweichungen durch Schwingungen	618	8.6.3.2	Rasterkraftmikroskop (AFM – Atomic Force Microscope)	684	
8.2	Die Geometrische Produktspezifikation (GPS)	620	8.6.4	Rastertunnelmikroskop (STM – Scanning Tunnel Microscope)	685	
8.2.1	Das Konzept zur Tolerierung von Bauteilen	620	8.7.1	Oberflächenkenngrößen	685	
8.2.2	GPS-Grundnormen	622	8.7.2	8.7	Koordinatenmesstechnik	687
8.2.3	Elementare Grundsätze des GPS-System – Das Prinzip des „Aufrufs“	623	8.7.3	Koordinatenmessgeräte	687	
8.2.4	Maße und Ausgleichsgeometrien	625	8.7.4	Aufbau und Wirkungsweise	688	
8.3	Maßverkörperungen	631	8.7.5	Bauarten	689	
8.3.1	Endmaße	631	8.7.6	Messsysteme	689	
8.3.1.1	Parallelendmaße	631	8.7.7	Messkopfsysteme	690	
8.3.2	Maßstäbe und Drehgeber	633	8.7.8	Zusatzausstattungen	692	
8.3.2.1	Strichmaße	633	8.7.9	Steuerungen und Antriebe	693	
8.3.2.2	Inkrementalmaßstäbe	633	8.7.10	Messwertverarbeitung und Messwertauswertung	693	
8.3.2.3	Absolutmaßstäbe	637	8.8.1	Tastelementkalibrierung	696	
8.4	Form- und Lagebestimmung	638	8.8.2	Durchführung eines Messauftrags	696	
8.4.1	Gerade	638	8.9.1	8.8	Röntgen-Computertomographie (CT)	701
8.4.2	Ebene	640	8.8.2	Funktionsweise	701	
8.4.2.1	Messplatten	640	8.9.2	Anwendungen	702	
8.4.2.2	Ebenheitsprüfung	641	8.9.3	8.9	Messen und Prüfen durch Bildverarbeitung	703
8.4.3	Kreis, Zylinder	642	8.9.4	Grundlagen	704	
8.4.4	Winkelverkörperungen	643	8.9.5	Szenenbeleuchtung	707	
8.4.4.1	Rechter Winkel	643	8.9.6	2D-Bildverarbeitung	710	
8.4.4.2	Beliebige Winkel	644	8.9.7	3D-Bildaufnahme und Digitalisierung	715	
8.4.5	Lehren	645	8.9.8	Laser-Trackingsysteme	718	
8.4.6	Anzeigende Messgeräte	647	8.9.9			

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		
9.5.2 Elektronenmikroskopische Darstellung	751		
9.6 Mechanische Eigenschaften	753	A 2 Atomaufbau und Bindungstypen	849
9.6.1 Zugversuch	753	A 2.1 Metallbindung	849
9.6.2 Druckversuch	760	A 2.2 Atombindung	850
9.6.3 Torsionsversuch	761	A 2.3 Ionenbindung	850
9.6.4 Scherversuch	762		
9.6.5 Kerbschlagbiegeversuch	763		
9.6.6 Schwingfestigkeitsversuch	765		
9.6.7 Bruchmechanik	772		
9.6.8 Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung	777		
10 Maschinen- und Bauteilverhalten	781	A 3 Aufbau metallischer Werkstoffe	851
10.1 Bauteilprüfung	781	A 3.1 Gitteraufbau des Idealkristalls	851
10.1.1 Kennwerte für Werkstoffe und Bauteile	781	A 3.2 Gitterfehler im Realkristall	853
10.1.2 Nachweis der Betriebsfestigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen	783	A 3.2.1 Punktförmige Gitterfehler	853
10.1.2.1 Auswahl schwingschlaggefährdeter Querschnitte	783	A 3.2.2 Linienförmige Gitterfehler	855
10.1.2.2 Experimentelle Beanspruchungsanalyse	783	A 3.2.3 Flächige Gitterfehler	856
10.1.2.3 Datenaufbereitung und Zählverfahren	785	A 3.3 Gleichgewichtszustände	858
10.1.2.4 Festlegung der Versuchslasten	787	A 3.3.1 Bei lückenloser Mischkristallreihe	858
10.1.2.5 Prüfstandsversuche	788	A 3.3.2 Unlöslichkeit im festen Zustand	859
10.1.2.6 Serienüberwachung und Qualitätskontrolle	790	A 3.3.3 Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand	859
10.1.3 Innendruckprüfung	791	A 3.3.4 Intermetallische bzw. intermediäre Phase	861
10.1.3.1 Pulsationsform	791	A 3.4 Phasenumwandlungen	862
10.1.3.2 Prüfmedien	792	A 3.4.1 Erstarrung	862
10.1.3.3 Prüfeinrichtung	792	A 3.4.2 Umwandlungen im festen Zustand	867
10.1.3.4 Versuchsergebnisse	793		
10.1.4 Prüfverfahren für Umgebungseinflüsse	795	A 4 Eigenschaften metallischer Werkstoffe	869
10.2 Schwingungen von Maschinen und Bauteilen	800	A 4.1 Thermische Leitfähigkeit	869
10.2.1 Einführung	800	A 4.2 Verformung bei nur unbedeutenden Diffusionsprozessen	869
10.2.2 Eigenfrequenzen und Eigenformen	801	A 4.2.1 Elastische Verformung	869
10.2.3 Modalanalyse	802	A 4.2.2 Plastische Verformung	870
10.3 Messungen an Werkzeugmaschinen (WZM)	807	A 4.3 Verfestigung	873
10.3.1 Kraftmessung	807	A 4.3.1 Verfestigung durch linienförmige Gitterfehler	873
10.3.2 Verlagerungs- und Verformungsmessung	810	A 4.3.2 Verfestigung durch flächige Gitterfehler	874
10.3.3 Steifigkeits- und Nachgiebigkeitsmessung	811	A 4.3.3 Verfestigung durch punktförmige Gitterfehler	878
10.3.4 Schwingungsmessung und Schwingungsdiagnose	815	A 4.4 Verfestigungsabbau	878
10.3.5 Schwingungsformanalyse	818	A 4.4.1 Erholung	878
10.3.6 Fundament- und Geschossdeckenmessung	819	A 4.4.2 Rekristallisation	879
10.3.7 Dynamischer Spindelrundlauf	821	A 4.5 Plastische Verformung bei Diffusionsprozessen	880
10.3.8 Lang- und Kurzzeitmessung von Temperaturen	821		
10.3.9 Geräuschmessung und Geräuschbeurteilung	823		
10.4 Abnahme von Werkzeugmaschinen	825	Verzeichnis der Sachworte und Personen	881
10.4.1 Einleitung und Übersicht	825	Quellenverzeichnis	892
10.4.2 Direkte Messungen der Maschineneigenschaften	826		
10.4.3 Abnahme- und Prüfwerkstücke	832		
10.4.4 Fähigkeitsuntersuchungen	836		