

# Inhaltsverzeichnis

## Fertigungsverfahren

### 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	Supply Chain Management (SMC) .....	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 .....	38
2.1.3.1	Unterscheidung nach Werkstoffen .....	38
2.1.3.2	Unterscheidung nach mechanischen Eigenschaften .....	38
2.1.3.3	Unterscheidung nach Gießverfahren .....	39
2.1.3.4	Art der Formfüllung .....	40
2.1.3.5	Art des Vergießens .....	41
2.1.3.6	Sonstige Unterscheidungsmerkmale .....	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

2.1.8.3	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 Erstarrungsmodul .....	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	Stauffüllung und Strahlfüllung .....	113
2.1.13	Simulation der Formfüllung .....	114
2.2	Pulvermetallurgie (PM) .....	115
2.2.1	Metallpulver .....	116
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

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
<b>2.5</b>	<b>Spanloses Trennen und Abtragen.....</b>	<b>169</b>	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 <sup>1</sup> ).....	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 <sup>1</sup> .....	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
<b>2.6</b>	<b>Zerspanungstechnik.....</b>	<b>189</b>	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 (Schleifmittelskörnung).....	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.....	340
2.6.3.3	Legierter Stahl.....	222	2.6.19.4	Sägemaschinen.....	343
2.6.3.4	Nichtrostende Stähle.....	223	2.6.20	Werkstückspanntechnik.....	344
2.6.3.5	Gusseisenwerkstoffe.....	224	2.6.20.1	Mechanische Spannsysteme.....	345
2.6.3.6	Schwer zerspanbare Werkstoffe.....	225	2.6.20.2	Hydraulische und pneumatische Spann- systeme.....	346
2.6.3.7	Graphit.....	225	2.6.20.3	Vakuum-Spannsysteme.....	347
2.6.3.8	Aluminium-Legierungen.....	226	2.6.20.4	Magnetspanntechnik.....	349
2.6.3.9	Kunststoffe.....	227	2.6.20.5	Gefrierspanntechnik.....	349
2.6.3.10	Verbundwerkstoffe (Composites).....	227	<b>2.7</b>	<b>Wärmebehandlung von Stahl.....</b>	<b>350</b>
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			

<b>3 Fertigen mit Nichtmetallen</b>	<b>357</b>		
<b>3.1 Produkte aus Kunststoffen</b>	<b>357</b>		
3.1.1 Kunststoffe	357	4.1.3 Schweißen polymerer Werkstoffe	472
3.1.1.1 Einteilung und Arten	357	4.1.4 Löten	474
3.1.1.2 Bauteilgestaltung	363	4.1.4.1 Werkstoffkundliche Aspekte I	475
3.1.2 Fertigungsverfahren	364	4.1.4.2 Lötprozess	478
3.1.2.1 Extrudieren <sup>1</sup>	365	4.1.4.3 Werkstoffkundliche Aspekte II	478
3.1.2.2 Folienblasen	367	4.1.5 Kleben	480
3.1.2.3 Kalandrieren	368	4.1.5.1 Werkstoffkundliche Aspekte	481
3.1.2.4 Spritzgießen	369	4.1.5.2 Bindemechanismen innerhalb der Klebstoffschicht	482
3.1.2.5 Varianten des Spritzgießens	375	<b>4.2 Oberflächenmodifikation von Bauteilen</b>	<b>485</b>
3.1.2.6 Simulation des Spritzgießprozesses	377	4.2.1 Vorbehandlung	485
3.1.2.7 Hohlkörperblasen (Blasformen)	380	4.2.1.1 Entfernen von Belägen	486
3.1.2.8 Schäumen	381	4.2.1.2 Aktivierung von Oberflächen	488
3.1.2.9 Thermoformen	382	4.2.1.3 Glätten von Oberflächen	489
<b>3.2 Faserverstärkte Kunststoffe (FVK)</b>	<b>383</b>	4.2.1.4 Eigenspannungen	489
3.2.1 Einteilung und Arten	384	4.2.1.5 Aufrauen von Oberflächen	490
3.2.2 Bauteilgestaltung	386	4.2.2 Oberflächenmodifikation	491
3.2.3 FVK-Fertigungsverfahren	389	4.2.2.1 Modifikation durch Diffusion	492
3.2.3.1 Warmpressen	389	4.2.2.2 Modifikation unter Verwendung eines flüssigen Elektrolyten	493
3.2.3.2 Faserspritzen	391	4.2.2.3 Modifikation unter Verwendung des schmelzflüssig oder gelöst vorliegenden Schichtwerkstoffs	498
3.2.3.3 Handlaminieren	392	4.2.2.4 Beschichten aus der Gas- oder Dampfphase	506
3.2.3.4 Resin Transfer Molding (RTM) (Harzinjektionsverfahren)	393	4.2.3 Nachbehandlung	510
3.2.3.5 Vakuuminfusion	394	4.2.3.1 Reduzierung des gelösten Wasserstoffs	510
3.2.3.6 Faserwickeln	395	4.2.3.2 Konservieren	510
3.2.3.7 Prepreg-Techniken	396	4.2.4 Entfernen von Schichten	511
<b>3.3 Produkte aus Keramik</b>	<b>397</b>	4.2.5 Thermisches Entgraten (TEM)	512
3.3.1 Einführung und geschichtliche Entwicklung	397	<b>4.3 Montagetechnik</b>	<b>513</b>
3.3.2 Bauteile aus Silikatkeramik	399	4.3.1 Grundlagen	513
3.3.2.1 Rohstoffe	399	4.3.2 Der Materialfluss	516
3.3.2.2 Aufbereitung	401	4.3.2.1 Lagern	516
3.3.2.3 Formgebung	402	4.3.2.2 Puffern	517
3.3.2.4 Zwischenbearbeitung	402	4.3.2.3 Bunkern	518
3.3.2.5 Sintern	403	4.3.2.4 Magazinieren	519
3.3.2.6 Oberflächenmodifikation	406	4.3.2.5 Fördern	520
3.3.3 Produkte aus Nichtsilikatkeramik	406	4.3.3 Fügearbeiten	523
3.3.3.1 Gewinnung der Rohstoffe	408	4.3.3.1 Fügestrukturen	523
3.3.3.2 Aufbereitung	412	4.3.3.2 Fügeverfahren	523
3.3.3.3 Formgebung	415	4.3.4 Montagearbeitsplätze	529
3.3.3.4 Zwischenbearbeitung	418	4.3.4.1 Manuelle Montage	529
3.3.3.5 Hochtemperaturbehandlung	420	4.3.4.2 Maschinelle Montage	532
3.3.3.6 Endbearbeitung	427	4.3.4.3 Montage 4.0	533
<b>3.4 Produkte aus Silikatglas</b>	<b>428</b>	4.3.5 Montageplanung	534
3.4.1 Geschichte der Silikatgläser	428	<b>5 Roboter im Fertigungsprozess</b>	<b>535</b>
3.4.2 Silikatgläser heute	430	<b>5.1 Einführung zur Robotertechnik</b>	<b>535</b>
3.4.3 Rohstoffe und Aufbereitung	431	<b>5.2 Einteilung</b>	<b>536</b>
3.4.3.1 Rohstoffe	431	<b>5.3 Kinematischer Aufbau</b>	<b>537</b>
3.4.3.2 Aufbereitung	432	<b>5.4 Roboterprogrammierung</b>	<b>541</b>
3.4.4 Schmelzen und Raffinieren	433	<b>5.5 Koordinatensysteme</b>	<b>544</b>
3.4.4.1 Schmelzen	433	<b>5.6 Robotersensorführung</b>	<b>545</b>
3.4.4.2 Raffinieren	434	<b>5.7 Bearbeitungsaufgaben</b>	<b>547</b>
3.4.5 Urformgebung	434	<b>6 Laser in der Fertigungstechnik</b>	<b>549</b>
3.4.5.1 Urformgebung unter Schwerkraft	435	<b>6.1 Grundlagen zur Lasertechnik</b>	<b>549</b>
3.4.5.2 Urformgebung unter Druckanwendung	436	6.1.1 Wichtige Laserarten zur Bearbeitung	549
3.4.5.3 Temperung	438	6.1.2 Physikalische Grundlagen	550
3.4.5.4 Urformen durch Pulvertechnologie	439	6.1.3 Aufbau von Laserstrahlquellen	551
3.4.6 Spanlose Formgebung	439	6.1.4 Betriebs- und Wartungskosten	554
3.4.7 Spanabhebende Formgebung	440	6.1.5 Strahlführung zum Bearbeitungsort	554
3.4.8 Fügen	440	6.1.5.1 Strahlführung mit Lichtleitkabel (LLK)	554
3.4.9 Oberflächenmodifikation	440	6.1.5.2 Strahlführung als Freistrah	556
<b>4 Fügen, Modifizieren und Montieren</b>	<b>443</b>	6.1.5.3 Welding-on-the-fly	556
<b>4.1 Stoffschlüssiges Fügen</b>	<b>443</b>	6.1.6 Strahlformung am Bearbeitungsort	557
4.1.1 Fügetechniken in einer Übersicht	443	6.1.7 Strahlqualität	558
4.1.2 Schweißen von Metallen	444		
4.1.2.1 Pressschweißverfahren	446		
4.1.2.2 Schmelzschweißverfahren	457		
4.1.2.3 Werkstoffkundliche Aspekte	468		

<b>6.2</b>	<b>Werkstückbearbeitung</b>	<b>560</b>	8.4.6.4	Messtaster mit Inkrementalmaßstab	641
6.2.1	Grundlagen	560	8.4.6.5	Feinzeiger	641
6.2.1.1	Fokussierung	560	8.3.6.6	Fühlhebelmessgeräte	642
6.2.1.2	Verschmutzungsschutz	561	8.4.6.7	Winkelmessgeräte	643
6.2.1.3	Absorption	562	8.4.6.8	Neigungsmessgeräte	643
6.2.2	Laseranwendungen	563	8.4.6.9	Autokollimationsfernrohr (AKF)	645
6.2.2.1	Laserschweißen	563	8.4.7	Längenmessgeräte	649
6.2.2.2	Laserschneiden	567	8.4.7.1	Induktive und kapazitive Messtaster	649
6.2.2.3	Laserbohren	569	8.4.7.2	Trägerfrequenzverstärker	652
6.2.2.4	Laserlöten	570	8.4.7.3	Pneumatische Wegaufnehmer	653
6.2.2.5	Laserbearbeiten von Diamantwerkzeugen	570	8.4.7.4	Optische Wegaufnehmer	653
6.2.2.6	Laserbeschriften und Laserstrukturieren	571	8.4.8	Messtechnische Hilfsmittel	656
6.2.2.7	Laserhärten	572	8.4.9	Messgeräte	657
6.2.2.8	Laserbeschichten	572	8.4.9.1	Messmikroskop und Profilprojektor	657
<b>7</b>	<b>Additive Fertigung (AM)</b>	<b>573</b>	8.4.9.2	Komparator	659
<b>7.1</b>	<b>Allgemeines</b>	<b>573</b>	8.4.10	Mehrstellenmessgeräte	661
<b>7.2</b>	<b>Ziele</b>	<b>573</b>	8.4.11	Laserscanner	662
<b>7.3</b>	<b>AM-Verfahren</b>	<b>576</b>	8.4.12	Formmessgeräte	662
7.3.1	Stereolithographie <sup>1</sup> (STL)	578	8.4.12.1	Formmessgeräte für runde Teile	663
7.3.2	Lasersintern (LS)	582	8.4.12.2	Geradheitsmessgeräte	664
7.3.3	Fused Layer Modeling (FLM)	587	<b>8.5</b>	<b>Interferometrische Messverfahren</b>	<b>665</b>
7.3.4	Material-Jetting und Binder-Jetting	588	8.5.1	Grundlagen	665
7.3.5	Bioplotter, Herstellung medizinischer Implantate	590	8.5.1.1	Aufbau von Interferometern zur Wegmessung	665
<b>7.4</b>	<b>Rapid Manufacturing (RM)</b>	<b>591</b>	8.5.1.2	Strahlungsquellen	667
			8.5.2	Einflüsse auf die Messunsicherheit	667
			8.5.3	Anwendungen der längenmessenden Interferometrie	668
			8.5.3.1	Kippwinkelmessung	669
			8.5.3.2	Geradheitsmessung	669
			8.5.3.3	Ebenheitsmessung	670
			8.5.4	Formprüfung	670
			<b>8.6</b>	<b>Oberflächenmesstechnik</b>	<b>671</b>
			8.6.1	Mechanische Oberflächenmessung	671
			8.6.2	Berührungslose Oberflächenmessung	673
			8.6.2.1	Optische Oberflächenmesstechnik	673
			8.6.2.2	Weißlichtinterferometer	673
			8.5.2.3	Streulichtmessungen	673
			8.6.3	Rastersondenmikroskope	674
			8.6.3.1	Rasterkraftmikroskop (AFM – Atomic Force Microscope)	674
			8.6.3.2	Rastertunnelmikroskop (STM – Scanning Tunnel Microscope)	675
			8.6.4	Oberflächenkenngrößen	675
			<b>8.7</b>	<b>Koordinatenmesstechnik</b>	<b>677</b>
			8.7.1	Einführung	677
			8.7.2	Aufbau und Wirkungsweise	678
			8.7.3	Bauarten	679
			8.7.4	Messsysteme	679
			8.7.5	Zusatzausstattungen	682
			8.7.6	Steuerungen und Antriebe	683
			8.7.7	Messwertverarbeitung und Messwertauswertung	683
			8.7.8	Tastelementkalibrierung	686
			8.7.9	Planung und Durchführung eines Messauftrags	687
			8.7.10	Messprogrammerstellung	689
			<b>8.8</b>	<b>Röntgen-Computertomographie (CT)</b>	<b>693</b>
			8.8.1	Funktionsweise	693
			8.8.2	Anlagentechnik	694
			8.8.3	Auflösung	696
			8.8.4	Anwendungen	697
			<b>8.9</b>	<b>Messen und Prüfen durch Bildverarbeitung</b>	<b>700</b>
			8.9.1	Grundlagen	701
			8.9.2	Szenenbeleuchtung	704
			8.9.3	2D-Bildverarbeitung	708
			8.9.4	3D-Bildaufnahme und Digitalisierung	713
			8.9.5	Laser-Trackingsysteme	716

## Mess- und Prüftechnik

### 8 Fertigungsmesstechnik

<b>8.1</b>	<b>Grundlagen der geometrischen Messtechnik</b>	<b>593</b>
8.1.1	Messabweichungen	595
8.1.1.1	Ordnung von Messabweichungen	596
8.1.1.2	Messabweichungen durch geometrische Einflüsse	597
8.1.1.3	Verformungen durch Eigengewicht, Messkraft, Spannkraft	602
8.1.1.4	Temperatureinfluss	606
8.1.1.5	Abweichungen durch Schwingungen	608
<b>8.2</b>	<b>Die Geometrische Produktspezifikation (GPS)</b>	<b>610</b>
8.2.1	Das Konzept zur Tolerierung von Bauteilen	610
8.2.2	GPS-Grundnormen	612
8.2.3	Elementare Grundsätze des GPS-System – Das Prinzip des „Aufrufens“	613
8.2.4	Maße und Ausgleichsgeometrien	615
<b>8.3</b>	<b>Maßverkörperungen</b>	<b>621</b>
8.3.1	Endmaße	621
8.3.1.1	Parallelendmaße	621
8.3.2	Maßstäbe und Drehgeber	623
8.3.2.1	Strichmaße	623
8.3.2.2	Inkrementalmaßstäbe	623
8.3.2.3	Absolutmaßstäbe	627
<b>8.4</b>	<b>Form- und Lagebestimmung</b>	<b>628</b>
8.4.1	Gerade	628
8.4.2	Ebene	630
8.4.2.1	Messplatten	630
8.4.2.2	Ebenheitsprüfung	631
8.4.3	Kreis, Zylinder	632
8.4.4	Winkelverkörperungen	633
8.4.4.1	Rechter Winkel	633
8.4.4.2	Beliebige Winkel	634
8.4.5	Lehren	635
8.4.6	Anzeigende Messgeräte	637
8.4.6.1	Messschieber	637
8.4.6.2	Messschrauben	638
8.4.6.3	Messuhren	640

<b>9 Werkstoffprüfung</b>	<b>717</b>	<b>11.2 Qualifizierung von Industrierobotern</b>	<b>819</b>
<b>9.1 Einführung</b>	<b>717</b>	11.2.1 Übersicht und Allgemeines	819
<b>9.2 Chemische Zusammensetzung</b>	<b>718</b>	11.2.2 Pose-Genauigkeit und Pose-Wiederholgenauigkeit	820
<b>9.3 Innere Werkstofftrennungen</b>	<b>721</b>	11.2.3 Lineargenauigkeit/Bahngenauigkeit	823
9.3.1 Penetrationsverfahren <sup>1</sup>	721	11.2.4 Formgenauigkeit/Ebenenengenauigkeit	824
9.3.2 Wirbelstromverfahren	722	11.2.5 Dynamisches Bewegungsverhalten	825
9.3.3 Streuflussverfahren	723	11.2.6 Positions-Stabilisierungszeit	826
9.3.4 Durchstrahlung	725	11.2.7 Statische Nachgiebigkeit	827
9.3.5 Durchschallung	727	11.2.8 Weitere Merkmale	827
<b>9.4 Härteprüfung</b>	<b>730</b>	<b>Anhang: Kleine Werkstoffkunde der Metalle</b>	
9.4.1 Quasistatische Eindringhärteprüfverfahren	731	<b>A 1 Werkstoffe</b>	<b>828</b>
9.4.1.1 Härteprüfverfahren nach Brinell	732	<b>A 1.1 Entwicklungsphasen</b>	<b>828</b>
9.4.1.2 Härteprüfverfahren nach Vickers	736	<b>A 1.2 Eigenschaften der Konstruktionswerkstoffe</b>	<b>830</b>
9.4.1.3 Härteprüfverfahren nach Rockwell	739	A 1.2.1 Einleitung	830
9.4.2 Dynamische Härteprüfverfahren	742	A 1.2.2 Dichte	830
<b>9.5 Gefüge</b>	<b>744</b>	A 1.2.3 Elastizitätsmodul und Bruchzähigkeit	831
9.5.1 Lichtmikroskopische Darstellung	744	A 1.2.4 Versagensspannung	832
9.5.1.1 Probennahme	745	A 1.2.5 Wärmeleitfähigkeit	833
9.5.1.2 Herstellung des Schliffs	746	A 1.2.6 Temperaturleitfähigkeit	834
9.5.1.3 Gefügebewertung	748	A 1.2.7 Verlustfaktor	835
9.5.2 Elektronenmikroskopische Darstellung	749	A 1.2.8 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	836
<b>9.6 Mechanische Eigenschaften</b>	<b>751</b>	A 1.2.9 Zusammenfassung	837
9.6.1 Zugversuch	751	<b>A 2 Atomaufbau und Bindungstypen</b>	<b>838</b>
9.6.2 Druckversuch	758	<b>A 2.1 Metallbindung</b>	<b>838</b>
9.6.3 Torsionsversuch	760	<b>A 2.2 Atombindung</b>	<b>839</b>
9.6.4 Kerbschlagbiegeversuch	761	<b>A 2.3 Ionenbindung</b>	<b>839</b>
9.6.5 Schwingfestigkeitsversuch	763	<b>A 3 Aufbau metallischer Werkstoffe</b>	<b>840</b>
9.6.6 Bruchmechanik	770	<b>A 3.1 Gitteraufbau des Idealkristalls</b>	<b>840</b>
9.6.7 Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung	775	<b>A 3.2 Gitterfehler im Realkristall</b>	<b>842</b>
9.6.7.1 Schädigungsmechanismen	775	A 3.2.1 Punktförmige Gitterfehler	842
9.6.7.2 Durchführung des Zeitstandversuchs	776	A 3.2.2 Linienförmige Gitterfehler	844
		A 3.2.3 Flächige Gitterfehler	845
<b>10 Maschinen- und Bauteilverhalten</b>	<b>779</b>	<b>A 3.3 Gleichgewichtszustände</b>	<b>847</b>
<b>10.1 Bauteilprüfung</b>	<b>779</b>	A 3.3.1 Bei lückenloser Mischkristallreihe	847
10.1.1 Kennwerte für Werkstoffe und Bauteile	779	A 3.3.2 Unlöslichkeit im festen Zustand	848
10.1.2 Nachweis der Betriebsfestigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen	781	A 3.3.3 Begrenzte Löslichkeit im festen Zustand	848
10.1.2.1 Auswahl schwingbruchgefährdeter Querschnitte	781	A 3.3.4 Intermetallische bzw. intermediäre Phase	850
10.1.2.2 Experimentelle Beanspruchungsanalyse	781	<b>A 3.4 Phasenumwandlungen</b>	<b>851</b>
10.1.2.3 Datenaufbereitung und Zählverfahren	783	A 3.4.1 Erstarrung	851
10.1.2.4 Festlegung der Versuchslasten	785	A 3.4.2 Umwandlungen im festen Zustand	856
10.1.2.5 Prüfstandsversuche	786	<b>A 4 Eigenschaften metallischer Werkstoffe</b>	<b>858</b>
10.1.2.6 Serienüberwachung und Qualitätskontrolle	788	<b>A 4.1 Thermische Leitfähigkeit</b>	<b>858</b>
10.1.3 Innendruckprüfung	789	<b>A 4.2 Verformung bei nur unbedeutenden Diffusionsprozessen</b>	<b>858</b>
10.1.3.1 Pulsationsform	789	A 4.2.1 Elastische Verformung	858
10.1.3.2 Prüfmedien	790	A 4.2.2 Plastische Verformung	859
10.1.3.3 Prüfeinrichtung	790	<b>A 4.3 Verfestigung</b>	<b>862</b>
10.1.3.4 Versuchsergebnisse	791	A 4.3.1 Verfestigung durch linienförmige Gitterfehler	862
10.1.4 Umweltprüfverfahren	793	A 4.3.2 Verfestigung durch flächige Gitterfehler	863
10.1.4.1 Vibrationsprüfungen und Schockprüfungen	793	A 4.3.3 Verfestigung durch punktförmige Gitterfehler	867
<b>10.2 Schwingungen von Maschinen und Bauteilen</b>	<b>797</b>	<b>A 4.4 Verfestigungsabbau</b>	<b>867</b>
10.2.1 Einführung	797	A 4.4.1 Erholung	867
10.2.2 Eigenfrequenzen und Eigenformen	798	A 4.4.2 Rekristallisation	868
10.2.3 Modalanalyse	799	<b>A 4.5 Plastische Verformung bei Diffusionsprozessen</b>	<b>869</b>
10.2.3.1 Rechnerische Modalanalyse <sup>1</sup>	799	<b>Fachwörterbuch Deutsch-Englisch, Sachwortverzeichnis</b>	<b>870</b>
10.2.3.2 Experimentelle Modalanalyse	800	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>895</b>
10.2.3.3 Beispiele zur Modalanalyse	803		
<b>11 Qualifizierung von Maschinen</b>	<b>805</b>		
<b>11.1 Qualifizierung von Werkzeugmaschinen</b>	<b>805</b>		
11.1.1 Einleitung und Übersicht	805		
11.1.2 Direkte Messungen der Maschineneigenschaften	806		
11.1.3 Abnahme- und Prüfwerkstücke	812		
11.1.4 Fähigkeitsuntersuchungen	816		