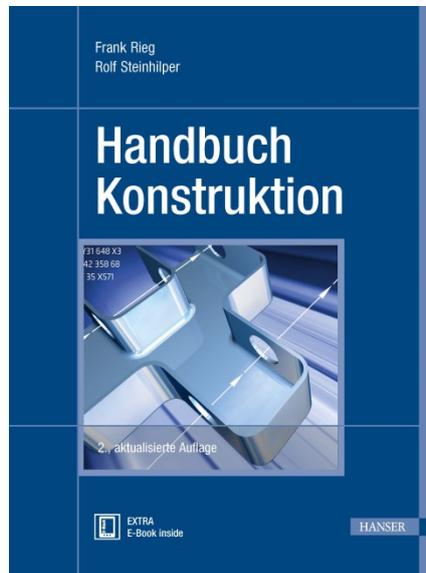


HANSER



Leseprobe

zu

Handbuch Konstruktion

2., aktualisierte Auflage

von Frank Rieg und Rolf Steinhilper

ISBN (Buch): 978-3-446-45224-4

ISBN (E-Book): 978-3-446-45619-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-45224-4>

sowie im Buchhandel
© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort der Herausgeber

Die Konstruktion gilt als Königsdisziplin des Ingenieurs. In den Köpfen der Konstrukteure entstehen Produkte und Dienstleistungen für König Kunde.

Damit verantworten Konstrukteure den Kern des industriellen Wertschöpfungsprozesses oder, deutlicher ausgedrückt, sie tragen Verantwortung für Erfolg oder Misserfolg. Bestechende konstruktive Lösungen standen am Anfang manches unternehmerischen Aufstiegs, missglückte Konstruktionen waren nicht selten der Auslöser des Niedergangs.

Das erfolgreiche Industrieunternehmen von heute ist ein aktives Element der global vernetzten Welt. Rund um den Globus entstehen mit hohem Tempo laufend neue Technologien, also neue Werkstoffe und Verfahren für bessere Produkte, welche dann neue Märkte und Chancen erschließen.

Damit wachsen nicht nur die Herausforderungen und Aufgaben der Konstruktion – es erweitern sich auch die Gestaltungs- und Entfaltungsmöglichkeiten der Konstrukteure.

Vor diesem Hintergrund gebührt dem Hanser Verlag unser großer Respekt für seine Initiative, dieses nun in zweiter Auflage erscheinende umfassende Handbuch der Konstruktion auf den Weg gebracht zu haben. Darin stecken Jahre harter Arbeit sowie viele Jahrzehnte wertvoller Erfahrungen von sage und schreibe 94 erstklassigen Autoren aus den vielfältigen Wissensgebieten, die in gute Konstruktionsarbeit einfließen. Durch die vorliegende Auflage weht frischer Wind, nicht nur aufgrund der gründlichen Durchsicht und Aktualisierung aller Kapitel. Zusätzlich enthält sie neue Beiträge zu Megatrends wie Digitalisierung, Industrie 4.0 sowie Biointelligenz.

Unser aufrichtiger Dank gilt vor allem den Fachleuten und geschätzten Kollegen, die als Autoren mit ihren Beiträgen

die Leser einladen, an ihrem Wissen teilzuhaben, um methodisch vorzugehen, neue Lösungen zu entwickeln, und damit die Leistungsfähigkeit der industriellen Wertschöpfung bzw. nicht zuletzt auch die Wettbewerbsfähigkeit ihres Unternehmens zu steigern und zu erweitern.

Der geneigte Leser mag sich fragen, wie er sowohl das beträchtliche Wissensangebot auf über 1000 Buchseiten als auch die oft unterschiedlichen, zuweilen gar widersprüchlichen Anforderungen aus den verschiedenen Wissensgebieten in seiner täglichen Arbeit überhaupt bewältigen soll. Doch darauf gibt es Antworten:

Konstrukteursarbeit ist seit jeher in hohem Maße Zielkonfliktmanagement, und aus Zielkonflikten gibt es dreierlei Auswege: Der nächstliegende ist der Kompromiss, nicht von ungefähr gern als fauler Kompromiss gescholten. Der mutigere ist das Setzen von Prioritäten – und der genialste heißt Innovation: mit einem konstruktiven Geniestreich vorher widersprüchliche Anforderungen plötzlich gemeinsam verwirklichen.

Wo finden Innovationen heute statt? Die Leitmeinung dazu lautet: interdisziplinär – also zwischen den Disziplinen.

So wünschen wir unseren Lesern, dass sie in diesem Handbuch nicht nur „zwischen den Zeilen“ lesen können, wo zusätzlich zu den vorgestellten technischen Themen auch mancherlei ökonomische, ökologische und selbst soziale Fortschritte durchschimmern, sondern dass sie auch und gerade „zwischen den Kapiteln“ Stimulantien für ihre Arbeit verspüren, um neue Ideen voranzubringen.

Bayreuth, im Mai 2018

Frank Rieg
Rolf Steinhilper

Inhaltsverzeichnis

Vorwort der Herausgeber	V
Autorenverzeichnis	XXXIX
TEIL I Grundlagen	1
1 Metallische Werkstoffe	5
<i>Uwe Glatzel, Florian Scherm</i>	
1.1 Aufbau und charakteristische Merkmale der Metalle	6
1.2 Benennung von Werkstoffen	8
1.3 Eisen und Stahl	10
1.3.1 Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	10
1.3.2 Beeinflussung der Eigenschaften durch Legierungselemente	11
1.3.3 Systematik der Einteilung von Stählen	12
1.3.4 Europäische Normung	13
1.3.5 Einteilung und Kennzeichnung der Stähle	13
1.3.5.1 Unlegierte Stähle	13
1.3.5.2 Nichtrostende Stähle	13
1.3.5.3 Andere legierte Stähle	13
1.3.5.4 Qualitätsstähle (unlegiert/legiert)	14
1.3.5.5 Edelstähle (unlegiert/legiert)	14
1.3.5.6 Bezeichnung nach Verwendungszweck sowie mechanischen und physikalischen Eigenschaften (DIN 10027-1)	14
1.3.5.7 Bezeichnung nach der chemischen Zusammensetzung (DIN 10027-1)	14
1.3.5.8 Bezeichnung nach Werkstoffnummern (DIN 10027-2)	18
1.3.6 Beispiele für wichtige Stahlsorten: Einteilung nach Einsatzbereich und Verwendung	19
1.3.6.1 Warmgewalzte Erzeugnisse aus unlegierten Baustählen (DIN EN 10025)	19
1.3.6.2 Schweißgeeignete Feinkornbaustähle	19
1.3.6.3 Einsatzstähle	19
1.3.6.4 Vergütungsstähle	19
1.3.6.5 Nitrierstähle	20
1.3.6.6 Federstähle	20
1.3.6.7 Automatenstähle	20
1.3.6.8 Stähle für Feinbleche zur Kaltumformung	20

1.3.6.9	Nichtrostende Stähle	20
1.3.7	Gusswerkstoffe	21
1.4	Leichtmetalle	22
1.4.1	Werkstoffe auf Al-Basis	22
1.4.1.1	Aluminium-Knetlegierungen	22
1.4.1.2	Beschreibung verschiedener Aluminiumlegierungsgruppen	23
1.4.1.3	Aluminium-Gusslegierungen	24
1.4.2	Werkstoffe auf Mg-Basis	24
1.4.3	Werkstoffe auf Ti-Basis	26
1.4.3.1	Reintitan	27
1.4.3.2	Titanlegierungen	27
1.5	Hochtemperaturlegierungen	29
1.6	Kupfer	29
1.7	„Exotische“ metallische Werkstoffe	30
1.8	Weiterführende Informationen	30
2	Kunststoffgerechtes Konstruieren von Spritzgießbauteilen	33
	<i>Elmar Moritzer, Roger Weinlein</i>	
2.1	Physikalisches Werkstoffverhalten thermo- und duroplastischer Werkstoffe	33
2.2	Materialkostensteuerung in der Konstruktion	36
2.3	Allgemeine Gestaltungsregeln	36
2.4	Gestaltungsregeln für Flächenanbindungen	38
2.4.1	Gestaltungsregeln für räumliche Strukturen	40
2.4.2	Schraubdomes und Nocken	41
2.4.3	Angüsse	41
2.4.4	Bindenähte	42
2.4.5	Werkzeugentlüftung	42
2.5	Weiterführende Informationen	43
3	Konstruieren mit technischer Keramik	47
	<i>Walter Krenkel</i>	
3.1	Keramische Werkstoffe	47
3.1.1	Monolithische Keramiken	48
3.1.2	Faserverbundkeramiken	49
3.2	Bauteilgestaltung und Konstruktionsrichtlinien	52
3.2.1	Besonderheiten beim Konstruieren mit keramischen Werkstoffen	53
3.2.2	Allgemeine Konstruktionsrichtlinien für ein keramikgerechtes Design	54
3.2.3	Konstruktions- und Gestaltungsrichtlinien für Bauteile aus Faserverbundkeramiken	55

3.3	Beispiele für Metall-Keramik-Hybridkonstruktionen	59
3.3.1	Gleitlager aus SiC/SiC-Keramiken	59
3.3.2	Keramische Leichtbaubremse aus C/SiC	60
3.3.3	Heißgasrohre für Kraftwerke	60
3.4	Zusammenfassung und Ausblick	61
3.5	Weiterführende Informationen	62
4	Festigkeitsrechnung	67
	<i>Frank Rieg, Florian Nützel, Christoph Wehmann</i>	
4.1	Grundlagen der Festigkeitsrechnung	67
4.2	Einachsige Beanspruchung	69
4.2.1	Zugbeanspruchung	69
4.2.2	Druckbeanspruchung	70
4.2.3	Biegebeanspruchung	70
4.2.4	Torsionsbeanspruchung	72
4.2.5	Schubbeanspruchung	74
4.3	Mehrachsige Beanspruchung	74
4.3.1	Spannungs- und Dehnungszustand	74
4.3.2	Superpositionsprinzip	75
4.3.3	Beanspruchung von Scheiben	75
4.3.4	Beanspruchung von Platten	77
4.3.5	Beanspruchung von Schalen	78
4.3.6	Festigkeitsannahmen	79
4.3.7	Normalspannungshypothese	79
4.3.8	Schubspannungshypothese	80
4.3.9	Gestaltänderungsenergiehypothese	80
4.4	Statische und dynamische Beanspruchung	80
4.4.1	Lastfälle	80
4.4.2	Mehrachsige schwingende Beanspruchung einer Getriebewelle	82
4.4.3	Festigkeitsannahmen bei schwingender Beanspruchung	83
4.5	Kerbwirkung	85
4.5.1	Ruhende Beanspruchung, Formzahlen	85
4.5.2	Wechselnde Beanspruchung, Kerbwirkungszahlen	86
4.5.3	Kerbwirkung und Festigkeitsannahmen	88
4.6	Oberflächen- und Größeneinfluss	88
4.6.1	Einfluss des Oberflächenbeiwerts	88
4.6.2	Einfluss des Größenbeiwerts	89
4.6.3	Berechnung der Gestaltsfestigkeit	89
4.7	Werkstoffeigenschaften	90
4.7.1	Zugversuch und Spannungs-Dehnungs-Diagramm	90
4.7.2	Dauerschwingversuch und Wöhlerkurve	91
4.8	Nichtlineare Effekte	93

4.9	Knickung und Beulung	97
4.10	Hertz'sche Pressung	99
4.10.1	Kugel-Kugel-Kontakt	99
4.10.2	Kugel-Ebene-Kontakt	100
4.10.3	Zylinder-Zylinder-Kontakt	101
4.10.4	Zylinder-Ebene-Kontakt	102
4.11	Festigkeitsnachweis	102
4.12	Weiterführende Informationen	104
5	Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit	109
	<i>Bernd Bertsche, Martin Dazer, Mark Henß</i>	
5.1	Betriebsfestigkeit	109
5.1.1	Einordnung der Betriebsfestigkeit in die Schwingfestigkeit	109
5.1.1.1	Statische und dauerfeste Auslegung	110
5.1.1.2	Zeitfeste und betriebsfeste Auslegung	111
5.1.2	Ermittlung von Betriebsbelastung und Lastkollektiv	112
5.1.2.1	Das Lastkollektiv	115
5.1.3	Die ertragbare Belastung – Wöhlerlinie	117
5.1.3.1	Spannungs- und dehnungskontrollierte Wöhlerlinien	117
5.1.3.2	Ermittlung der Wöhlerlinien	118
5.1.4	Betriebsfestigkeitsrechnung	118
5.1.4.1	Schadensakkumulation	118
5.1.4.2	Zweiparametrische Schädigungsrechnung	121
5.1.4.3	Nennspannungskonzept und örtliches Konzept	121
5.2	Systemzuverlässigkeit	123
5.2.1	Statistische Beschreibung und Darstellung des Ausfallverhaltens von Bauteilen	123
5.2.2	Mathematische Beschreibung des Ausfallverhaltens durch Verteilungsfunktionen	125
5.2.3	Weibull-Verteilung: Grundbegriffe und Gleichungen	125
5.2.3.1	Zweiparametrische Weibull-Verteilung	125
5.2.3.2	Dreiparametrische Weibull-Verteilung	128
5.2.3.3	Grafische Darstellung der Weibull-Verteilung	128
5.2.4	Zuverlässigkeit bei Systemen	129
5.2.5	Verfügbarkeit von Systemen	131
5.2.6	Prognostics and Health Management (PHM)	131
5.3	Weiterführende Informationen	132
6	Maschinenelemente	137
	<i>Klaus Brökel, Carsten Böhme, Christian Kliewe, Enrico Kloß, André Knopp, Sven-Uwe Kreja, Reinhard Rahn, Roland Wegmann</i>	
6.1	Systematik der Maschinen- und Konstruktionselemente	137
6.2	Verbindungselemente	138
6.2.1	Schraubenverbindungen	138

6.2.2	Niete	142
6.2.3	Stift- und Bolzenverbindungen	145
6.3	Lager- und Führungselemente	148
6.3.1	Wälzlagerungen	148
6.3.2	Gleitlagerungen	153
6.3.3	Linearführungen	158
6.4	Elemente zur Verbindung von Welle und Nabe	162
6.4.1	Reibschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	163
6.4.2	Spannelementverbindungen	165
6.4.3	Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen	167
6.5	Achsen und Wellen	170
6.6	Gleichförmig übersetzende Getriebe	174
6.6.1	Zahnradgetriebe	175
6.6.2	Zugmittelgetriebe	180
6.6.2.1	Keilriemen	180
6.6.2.2	Zahnriemengetriebe	181
6.6.2.3	Flachriemengetriebe	182
6.6.2.4	Kettengetriebe	184
6.7	Elastische Elemente	185
6.7.1	Federn und Federsysteme	185
6.8	Dichtungssysteme	191
6.9	Weiterführende Informationen	195
7	Technisches Zeichnen	201
	<i>Gerhard Engelken</i>	
7.1	Übersicht	201
7.2	Technisches Freihandzeichnen	201
7.3	Zeichnungen – Normen, Begriffe und Grundregeln	201
7.3.1	Normen	201
7.3.2	Begriffe	202
7.3.3	Formate, Blattgrößen, Vordrucke, Maßstäbe	203
7.3.4	Linien und ihre Anwendung	203
7.4	Zeichnung – Träger von Informationen	205
7.4.1	Geometrieinformation	205
7.4.1.1	Ansichten in Parallelprojektionen	205
7.4.1.2	Axonometrische Darstellungen	206
7.4.1.3	Besondere Ansichten	207
7.4.1.4	Darstellung von Einzelheiten	207
7.4.1.5	Vereinfachte Darstellungen	208
7.4.1.6	Schnittdarstellungen	208
7.4.2	Bemaßungsinformation	210

7.4.2.1	Normzahlen und Normzahlreihen	210
7.4.2.2	Elemente der Maßeintragung	210
7.4.2.3	Eintragen von Maßen	212
7.4.2.4	Eintragen von Toleranzen	213
7.4.3	Technologie- und Qualitätsinformation	213
7.4.4	Organisatorische Information	213
7.4.4.1	Schriftfeld	213
7.4.4.2	Stückliste	214
7.5	CAD – Computer Aided Design	215
7.5.1	Die Nutzung von 2D-CAD-Systemen	215
7.5.2	Die Nutzung von 3D-CAD-Systemen	215
7.5.3	Normtebibliotheken und Internetportale	216
7.6	Weiterführende Informationen	218
8	Form- und Lagetoleranzen	221
	<i>Wolfgang Schütte</i>	
8.1	Notwendigkeit geometrischer Toleranzen	222
8.1.1	Aufgaben der Zeichnungsdarstellung	222
8.1.2	Probleme der Zeichnungsdarstellung	222
8.1.3	Geometrische Produktspezifikationen	223
8.2	Gestaltabweichungen	225
8.3	Tolerierungsgrundsatz	226
8.3.1	Unabhängigkeitsprinzip	227
8.3.2	Hüllprinzip	228
8.4	Grundlegende Definitionen zur Form- und Lagetolerierung	230
8.4.1	Formtolerierung am Beispiel „gerade Kante“	230
8.4.2	Lagetolerierung am Beispiel „parallele Kanten“	231
8.5	Zeichnungseintragung	231
8.5.1	Grundregel zur Anwendung von Form- und Lagetoleranzen	231
8.5.2	Geometrieelemente	231
8.5.3	Toleriertes Element	232
8.5.4	Mehrere gemeinsam tolerierte Elemente	233
8.5.5	Bezugselement	233
8.5.6	Bezug aus mehreren Bezugselementen	234
8.6	Toleranzarten und Bezüge	235
8.6.1	Grundlegende Normen	235
8.6.2	Formtoleranzen	236
8.6.3	Bezüge und Bezugssysteme	236
8.6.4	Profiltoleranzen	239
8.6.5	Richtungstoleranzen	240
8.6.6	Orttoleranzen	240
8.6.7	Lauftoleranzen	241
8.7	Allgemeintoleranzen für Form und Lage	241

8.8	Methodische Festlegung von Form- und Lagetoleranzen	242
8.9	Weiterführende Informationen	243
9	Elektromechanische Antriebe	247
	<i>Detmar Zimmer, Malte Strop, Uwe Brückner, Magnus Schadomsky, Thomas Künneke</i>	
9.1	Grundlagen	248
9.1.1	Bewegungsformen	248
9.1.2	Arbeit, Leistung und kinetische Energie	249
9.1.3	Wirkungsgrad	250
9.1.4	Schlupf	250
9.2	Antriebsauslegung	251
9.2.1	Arbeitsprozesse	252
9.2.2	Motoren	252
9.2.3	Betriebspunkt	252
9.2.4	Lastkollektive und äquivalente Belastung	254
9.2.5	Antriebsauslegung mit Lastkollektiv	255
9.2.6	Antriebsauslegung mit Anwendungsfaktor	257
9.2.7	Maximale Beschleunigung	258
9.3	Komponenten von Antriebssystemen	258
9.3.1	Elektrische Maschinen	259
9.3.1.1	Gleichstrommotoren	259
9.3.1.2	Wechselstrommotoren	259
9.3.1.3	Drehfeldmotoren	260
9.3.1.4	Linearmotoren	263
9.3.2	Frequenzumrichter und Servoregler	264
9.3.2.1	Frequenzumrichter	264
9.3.2.2	Servoregler	266
9.3.3	Getriebe	266
9.3.3.1	Funktion	266
9.3.3.2	Belastung der Umgebungs konstruktion	268
9.3.3.3	Thermisch zulässige Leistung	268
9.3.3.4	Anwendungsspezifische Aspekte	271
9.3.4	Kupplungen	272
9.3.4.1	Ausgleichskupplungen	272
9.3.4.2	Schaltkupplungen	273
9.3.5	Bremsen	274
9.3.5.1	Permanentmagnetbremsen	274
9.3.5.2	Federkraftbremsen	275
9.3.5.3	Ansteuerung der Bremsen	276
9.3.5.4	Energieeffiziente Federkraftbremse	276
9.4	Antriebssysteme	278
9.4.1	Berechnung	278
9.4.2	Funktionsintegration	279
9.4.3	Modularisierung	280
9.5	Mehrmotoren-Antriebssysteme	281
9.5.1	Konzeption	282

9.5.2	Betrieb	283
9.5.3	Ausblick	284
9.6	Antriebstechnik und additive Fertigungsverfahren	284
9.7	Weiterführende Informationen	286
10	Steuerungen	291
	<i>Gerhard Fischerauer</i>	
10.1	Grundkonzepte der Leittechnik	291
10.2	Gliederungssystematik	293
10.2.1	Steuerungshierarchie	293
10.2.2	Signalformen	294
10.2.3	Zeitverhalten	295
10.2.4	Energieformen	295
10.3	Beschreibungsmethoden	297
10.3.1	Schalttabelle, Boolesche Algebra	297
10.3.2	Petri-Netz, Zustandsfolgediagramm	298
10.3.3	Zeitablaufdiagramm	299
10.3.4	Textbasierte Beschreibungen	299
10.4	Verbindungsprogrammierbare Steuerungen	300
10.4.1	Schaltnetze für Verknüpfungssteuerungen	300
10.4.2	Schaltwerke für Ablaufsteuerungen	301
10.5	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	302
10.6	Kommunikation	305
10.7	Entwicklungstendenzen	307
10.8	Weiterführende Informationen	308
11	Mechatronik	313
	<i>Gerhard Fischerauer</i>	
11.1	Grundbegriffe der Mechatronik	313
11.2	Modellbildung mechatronischer Systeme	315
11.2.1	Grundsätzliches, Grundlagen der Systembeschreibung	315
11.2.2	Kinematik von Mehrkörpersystemen	316
11.2.3	Kinetik von Mehrkörpersystemen	317
11.2.4	Elektrische Modellbildung	318
11.3	Systemsimulation	319
11.3.1	Mechanisches Beispiel: Einmassenschwinger	319
11.3.2	Elektromechanisches Beispiel: Elektromagnet	321

11.4	Aktoren	323
11.4.1	Elektromagnete	324
11.4.2	Elektromotoren	324
11.4.3	Fluidische Aktoren	325
11.4.4	Materialeffektbasierte Aktoren	325
11.4.5	Vergleich verschiedener Aktoren	325
11.5	Sensoren für mechatronische Systeme	327
11.5.1	Weg- und Winkelmessung	327
11.5.2	Geschwindigkeits- und Winkelgeschwindigkeitsmessung	328
11.5.3	Linearbeschleunigungsmessung	328
11.5.4	Kraft- und Drehmomentmessung	329
11.6	Entwicklungstendenzen	330
11.7	Weiterführende Informationen	330
12	Maschinenakustik	335
	<i>Joachim Bös, Holger Hanselka</i>	
12.1	Einführung	335
12.2	Grundbegriffe und Grundkonzepte der technischen Akustik	336
12.2.1	Lärm, Schall, Frequenz, Ton, Klang, Geräusch	336
12.2.2	Schalldruck – Schalldruckpegel – Dezibel – Hinweise zu Pegelangaben	337
12.2.3	Schallschnelle – Schnellepegel – Schallkennimpedanz	340
12.2.4	Schallintensität – Schallintensitätspegel	341
12.2.5	Schalleistung – Schalleistungspegel	341
12.2.6	Schall als räumliches und zeitliches Phänomen – Wellenlänge und Periodendauer	342
12.2.7	Fourieranalyse, Frequenzspektrum, Campbell-Diagramm, Ordnungsanalyse	344
12.2.8	Frequenzbewertung, A-, C-, Z-Bewertung	346
12.2.9	Bezugswerte für die Pegelbildung	347
12.2.10	Einführung in die Pegelarithmetik	349
12.2.11	Schmalbandfilter – Oktavfilter – Terzfilter – Summenpegel	352
12.3	Mechanismen der Geräusentstehung	355
12.3.1	Direkte und indirekte Geräusentstehung	355
12.3.2	Maschinenakustische Grundgleichung	355
12.3.3	Anregungskräfte	358
12.3.4	Körperschallfunktion	358
12.3.5	Abstrahlgrad	359
12.4	Möglichkeiten der Geräusminderung	361
12.4.1	Reduktion der Anregungskräfte	362
12.4.2	Reduktion der Körperschallfunktion	365
12.4.3	Reduktion des Abstrahlgrades	365
12.4.4	Abschließende Bemerkungen	366
12.5	Weiterführende Informationen	366

13	Hydraulik	371
	<i>Horst-Walter Grollius</i>	
13.1	Aufbau eines Hydrosystems	372
13.2	Schaltpläne	373
13.3	Hydropumpen	375
13.4	Hydromotoren	376
13.5	Hydrozylinder	377
13.5.1	Doppeltwirkende Zylinder	377
13.5.2	Gleichgangzylinder	378
13.5.3	Einfachwirkende Zylinder	378
13.5.4	Teleskopzylinder	379
13.5.5	Endlagendämpfung	380
13.6	Hydroventile	380
13.6.1	Wegeventile	381
13.6.2	Sperrventile	382
13.6.3	Druckventile	383
13.6.4	Stromventile	383
13.7	Servoventile	384
13.8	Hydrauliköle	385
13.9	Zubehörteile	386
13.10	Projektierung von Hydrosystemen	387
13.11	Weiterführende Informationen	387
14	Pneumatik	391
	<i>Horst-Walter Grollius</i>	
14.1	Schaltpläne pneumatischer Systeme	392
14.2	Druckluftherzeugung und -aufbereitung	396
14.3	Zylinder	398
14.3.1	Einfachwirkende Zylinder	398
14.3.2	Doppeltwirkende Zylinder	399
14.3.3	Sonderzylinder	400
14.4	Schwenkmotoren	401
14.5	Druckluftmotoren	402
14.6	Ventile	403
14.6.1	Wegeventile	403

14.6.2	Sperrventile	404
14.6.3	Druckventile	405
14.6.4	Stromventile	405
14.6.5	Zeitverzögerungsventile	405
14.7	Grundsaltungen	406
14.8	Weiterführende Informationen	408
 TEIL II Entwickeln und Konstruieren		 411
1	Der allgemeine Konstruktionsprozess – Grundlagen des methodischen Konstruierens	415
	<i>Christian Schindler</i>	
1.1	Einführung	415
1.2	Grundlagen	416
1.2.1	Umfeld	416
1.2.2	Einflüsse auf die Konstruktion	417
1.2.3	Einflussmöglichkeiten während der Konstruktion	420
1.2.4	Produktlebenszyklus	420
1.3	Der allgemeine Lösungsprozess	420
1.4	Der Konstruktionsprozess	421
1.5	Die Spezifikationsphase	422
1.5.1	Lasten- und Pflichtenheft	423
1.5.2	Der Subprozess der Spezifikation	423
1.6	Die Konzeptphase	428
1.6.1	Abstrahieren der Anforderungen	428
1.6.2	Aufstellen einer Funktionsstruktur	429
1.6.3	Lösungssuche	431
1.6.3.1	Recherchierende Methoden	431
1.6.3.2	Heuristische Methoden	432
1.6.3.3	Diskursive Methoden	433
1.6.3.4	Systematische Kombination zur Gesamtlösung	434
1.6.4	Weiterentwicklung von Prinziplösungen	436
1.7	Lösungsauswahl und -bewertung	438
1.7.1	Punktebewertung	439
1.7.2	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	440
1.7.3	Nutzwertanalyse	440
1.7.4	Schwachstellenanalyse	441
1.8	Die Gestaltungsphase	443
1.8.1	Gestaltungsgrundregeln	445
1.8.2	Sicheres Gestalten	446

1.8.2.1	Beherrschen stochastischer Gefahren	447
1.8.2.2	Vermeiden deterministischer Gefahren	449
1.8.3	Gestaltungsprinzipien	450
1.8.3.1	Kraftfluss	451
1.8.3.2	Aufgabenteilung	452
1.8.3.3	Selbsthilfe	452
1.8.3.4	Stabilität	454
1.8.3.5	Fehlerminimierung	454
1.8.4	Gestaltungsrichtlinien	454
1.8.4.1	Auslegungsgerechtes Gestalten	454
1.8.4.2	Lebensphasengerechtes Gestalten	456
1.8.4.3	Beachten des Standes der Technik	457
1.8.4.4	Nicht technische Restriktionen	457
1.9	Die Ausarbeitungsphase	457
1.10	Berechnungen und Versuche	458
1.10.1	Auslegung	458
1.10.2	Verifikation	459
1.10.3	Validierung	459
1.11	Schlussbemerkung	459
1.12	Weiterführende Informationen	460
2	Design for X (DFX)	465
	<i>Sandro Wartzack, Harald Meerkamm, Stefan Bauer, Hartmut Krehmer, Andreas Stockinger, Michael Walter, Benjamin Schleich</i>	
2.1	Einleitung	465
2.2	Grundlagen des DFX	466
2.2.1	Definition des DFX	466
2.2.2	Komplexität des DFX	467
2.3	Strukturierungsansätze	468
2.3.1	Prozessorientierte Strukturierung	468
2.3.2	Hierarchische Strukturierung	468
2.4	Vorstellung wichtiger Aspekte des DFX	468
2.4.1	Fertigungsgerechtes Konstruieren (DFP/DFM – Design for Production/Design for Manufacturing)	468
2.4.2	Montagegerechte Gestaltung (DFA – Design for Assembly)	471
2.4.3	Umweltgerechte Gestaltung (DFE – Design for Environment)	471
2.4.4	Nutzerzentrierte Gestaltung (UCD – User-centered Design)	472
2.5	Ansätze zur Beherrschung der Komplexität des DFX	472
2.5.1	Prozessunterstützung FORFLOW	473
2.5.2	Methoden und Strategien zur Entscheidungsfindung	474
2.5.2.1	Strategie-Balance 3D	474
2.5.2.2	Multikriterielle Bewertung	476
2.5.3	Wissensbereitstellung	477

2.5.4	Konstruktions-Assistenzsystem	477
2.5.5	Computer Supported Cooperative Work – CSCW	481
2.5.6	Physikalische Absicherung – Rapid Prototyping	481
2.5.7	Virtuelle Absicherung – Simulation	482
2.6	Zusammenfassung	483
2.7	Weiterführende Informationen	483
3	Leichtbau	487
	<i>Dieter Krause, Johann Schwenke, Thomas Gumpinger, Benedikt Plaumann</i>	
3.1	Einführung in die Produktentwicklung im konsequenten Leichtbau	488
3.2	Wissen im Leichtbau	489
3.2.1	Strategien des Leichtbaus	489
3.2.2	Leichtbau-Bauweisen	490
3.2.3	Gestaltungsprinzipien und -regeln	492
3.2.4	Stabilitätsverlust und Versagensarten	493
3.3	Vorgehen zur Leichtbaukonstruktion	494
3.3.1	Strategie zur Werkstoffauswahl	495
3.3.2	Berechnungswerkzeuge im Leichtbau	497
3.3.3	Versuche zur Verifikation und Validierung	498
3.4	Werkstoffe im Leichtbau	499
3.4.1	Metalle	500
3.4.2	Faserkunststoffverbunde (FKV, auch Faserverbundkunststoff, FVK)	501
3.5	Weiterführende Informationen	506
4	Strukturoptimierung	511
	<i>Kevin Deese, Michael Frisch, Stefan Hautsch</i>	
4.1	Dimensionierung	512
4.1.1	CAD-basierte Dimensionierung	512
4.1.2	FE-basierte Dimensionierung	512
4.1.3	Anwendungen der Dimensionierung	513
4.1.3.1	Blechdimensionierung	513
4.1.3.2	Querschnittsdimensionierung	513
4.1.3.3	Additive Fertigung	513
4.2	Formoptimierung	514
4.2.1	CAD-basiertes Vorgehen	515
4.2.2	Netzbasiertes Vorgehen	515
4.3	Topologieoptimierung	516
4.4	Weiterführende Informationen	518

5	Recyclinggerechtes Konstruieren	521
	<i>Bernd Rosemann, Markus Mörtl, Joachim Crone</i>	
5.1	Überblick	521
5.2	Begriffe	521
5.2.1	Recycling	521
5.2.2	Recyclinggerechtes Konstruieren im Kontext des Produktlebenszyklus	522
5.3	Rahmenbedingungen	523
5.3.1	Legislative Anforderungen	523
5.3.1.1	Stoffbezogene Anforderungen (RoHS und WEEE)	523
5.3.1.2	Altfahrzeugverordnung	524
5.3.1.3	Batteriegesetz	525
5.3.1.4	Ökodesign-Richtlinie	525
5.3.1.5	Anforderungen des Chemikalienrechts (REACH)	526
5.3.1.6	Dokumentation	527
5.3.2	Marktanforderungen	528
5.3.2.1	Angabe von Inhaltsstoffen	528
5.3.2.2	Recycler-Anforderungen	528
5.3.3	Aktualisierungsbedarf	528
5.4	Entwicklung recyclinggerechter Produkte – Design for Recycling	528
5.4.1	Methodik des Design for Recycling	528
5.4.1.1	Stellhebel bei der recyclinggerechten Produktgestaltung	528
5.4.1.2	Recyclinggerechte Produktgestaltung im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess ..	529
5.4.2	Gestaltungshinweise und Anwendungsbeispiele für die recyclinggerechte Produktgestaltung ..	530
5.4.2.1	Formulierung einer Recyclingstrategie im Rahmen der Produktentwicklung	530
5.4.2.2	Analyse und Bewertung von Vorgänger- und Konkurrenzprodukten	531
5.4.2.3	Regeln für eine verwertungsgerechte Produktgestaltung	534
5.4.2.4	Beispiel Verwertung	534
5.4.2.5	Regeln für eine instandsetzungsgerechte Produkt- und Prozessgestaltung	535
5.4.2.6	Beispiel Instandsetzung	535
5.4.2.7	Regeln für eine modernisierungsgerechte Produkt- und Prozessgestaltung	538
5.4.2.8	Beispiel Modernisierung	538
5.5	Innovationsfeld Design for Recycling	539
5.6	Rechnerunterstützung im Produktlebenslauf	540
5.6.1	Informationsbereitstellung für die Konstruktion	540
5.6.1.1	Material- und Stoffdaten	540
5.6.1.2	Compliance-Anforderungen	542
5.6.2	Informationsbereitstellung für die Verwertung	542
5.6.2.1	Recyclingpass – als Information für den Verwerter	542
5.6.2.2	Demontage-Informationen – das Internationale Demontage-Informationssystem (IDIS)	542
5.6.2.3	Reparatur- und Wartungsinformationen (RMI)	543
5.7	Ausblick	543
5.8	Weiterführende Informationen	544

6	Sicherheitsgerechte Maschinen	551
	<i>Alfred Neudörfer</i>	
6.1	Rechtliche Basis des sicherheitsgerechten Konstruierens	551
6.1.1	EG-Maschinenrichtlinie	552
6.1.2	Normen und sicherheitsgerechtes Konstruieren	555
6.2	Gefahren, Gefährdungen und Risiken an Maschinen	557
6.2.1	Gefahrstellen	559
6.2.2	Risikobeurteilung	559
6.2.3	Praktische Durchführung von Risikobeurteilungen	559
6.3	Konstruktionsmaßnahmen gegen stochastische Gefährdungen	564
6.3.1	Das Safe-Life-Prinzip	565
6.3.2	Das Fail-Safe-Prinzip	565
6.3.3	Das Prinzip der Redundanz	567
6.3.4	Zuverlässigkeit von Steuerungen	568
6.4	Konstruktive Maßnahmen gegen deterministische Gefährdungen	570
6.4.1	Unmittelbare Sicherheitstechnik	570
6.4.2	Mittelbare Sicherheitstechnik	571
6.4.3	Verriegelungen trennender Schutzeinrichtungen	573
6.4.4	Sicherheitsschalter	575
6.5	Hinweisende Sicherheitstechnik	577
6.6	Sicherheitstechnische Besonderheiten großer Maschinen	579
6.7	Sicherheitsrelevante Befehlsgeräte	580
6.7.1	Hauptbefehlseinrichtungen	580
6.7.2	Not-Befehlseinrichtungen	580
6.8	Weiterführende Informationen	582
7	Ergonomiegerechtes Konstruieren	585
	<i>Ralph Bruder, Bastian Kaiser</i>	
7.1	Einleitung	585
7.2	Vorgehensweisen bei der ergonomischen Produktentwicklung	587
7.2.1	Vorgehensweise nach VDI-Richtlinie 2242	587
7.2.2	Gestaltungsprozess nach DIN EN ISO 9241-210	589
7.2.2.1	Gestaltungsgrundsätze	589
7.2.2.2	Gestaltungsvorgehen	591
7.2.2.3	Nutzungsorientierte und technische Gestaltung	592
7.2.2.4	Methoden der aktiven Nutzereinbindung	593
7.2.2.5	Dokumentation der Vorgehensweise	594
7.3	Fallbeispiel	594
7.3.1	Nutzungskontext festlegen und Nutzeranforderungen ermitteln	594
7.3.2	Erste Studien	595
7.3.3	Iterationsschritt	595

7.3.4	Fazit	596
7.4	Weiterführende Informationen	596
8	Umweltgerechtes Konstruieren	601
	<i>Herbert Birkhofer, Karola Schulze, Shulin Zhao, Julian Sarnes</i>	
8.1	Einleitung	601
8.2	Produkte und ihre Umweltbeeinträchtigungen	602
8.2.1	Der Produktlebenslauf	602
8.2.2	Die Prozesse im Produktlebenslauf	602
8.2.3	Beeinflussung von Umweltbeeinträchtigungen	604
8.3	Umweltrechtliche Vorgaben und Umweltkennzeichnungen	605
8.3.1	Europäische Richtlinien und Verordnungen	605
8.3.2	Umwetlabels	606
8.3.3	Typen von Umweltkennzeichnungen	607
8.4	Entwicklung umweltgerechter Produkte: EcoDesign	607
8.4.1	Methodik des EcoDesign	607
8.4.2	Ökologische Schwachstellen ermitteln	608
8.4.2.1	Ökobilanz	608
8.4.2.2	Eco-indicator 99	609
8.4.2.3	Checklisten	610
8.4.2.4	Hinweise zur ökologischen Bewertung	610
8.4.3	Ökologische Stellhebel ermitteln und Entwicklungsziel ableiten	612
8.4.3.1	Ökologisches Optimierungspotential bestimmen	612
8.4.3.2	Ökologisches Entwicklungsziel ableiten	613
8.4.4	Lösungen erarbeiten – Umweltbeeinträchtigungen gezielt reduzieren	614
8.4.4.1	Art und Menge der verwendeten Werkstoffe optimieren	615
8.4.4.2	Emissionen minimieren	616
8.4.4.3	Art und Menge des Energiebedarfs optimieren	616
8.4.4.4	Art und Intensität der Produktnutzung optimieren	617
8.4.5	Maßnahmen ganzheitlich beurteilen	617
8.4.5.1	Wechselwirkungen mit anderen Umweltwirkungen	617
8.4.5.2	Wechselwirkungen mit Marktanforderungen	618
8.5	Zusammenfassung und Ausblick	619
8.6	Weiterführende Informationen	619
9	Biointelligenz im Produkt und in der Produktion	623
	<i>Robert Mieke, Johannes Full, Alexander Sauer</i>	
9.1	Biointelligenz: Was ist das und warum brauchen wir das?	623
9.1.1	Zukünftige Herausforderungen für die industrielle Produktion	623
9.1.2	Die biologische Transformation – der Weg zu biointelligenten Produkten und Systemen	625
9.1.2.1	Integrationsstufen der biologischen Transformation	626
9.1.2.2	Entwicklungsstufen der biologischen Transformation	626

9.2	Design for Bio-Intelligence – Konstruktion und Entwicklung biointelligenter Produkte und Systeme	628
9.2.1	Veränderung der Kundenbedürfnisse	628
9.2.2	Integration von biobasierten Materialien in den Konstruktionsprozess	630
9.2.2.1	Fertigung mit biobasierten Materialien	630
9.2.2.2	Qualitätseigenschaften biobasierter Produkte	630
9.2.3	Technologien biointelligenter Systeme	630
9.2.3.1	Imitieren – kraftflussorientierte Faserorientierung in Verbundwerkstoffen	631
9.2.3.2	Kooperieren – biobasierte Energie- und Materialkreisläufe	631
9.2.3.3	Assimilieren – biointelligente Selbstoptimierung und Regulierung	632
9.2.4	Berücksichtigung einer veränderten Gesetzeslage für biointelligente Systeme	632
9.3	Zusammenfassung	633
9.4	Weiterführende Informationen	633
10	Geräuschgerechtes Konstruieren	637
	<i>Rainer Storm</i>	
10.1	Einführung; inhaltliche Ein- und Abgrenzung	638
10.2	Akustisch relevante Phasen einer Produktentwicklung	641
10.2.1	Phase 1: Das Lasten- und Pflichtenheft	647
10.2.1.1	Falle 1: Angaben zu Luftschallpegeln	648
10.2.1.2	Falle 2: Angaben zu Körperschallpegeln	651
10.2.1.3	Falle 3: Referenzwerte (Bezugswerte) zu Pegelangaben	653
10.2.1.4	Falle 4: Einfluss undefinierter Einbausituationen auf den Körperschallpegel an Koppelpunkten und Verbindungsstellen	655
10.2.1.5	Falle 5: Grenzwerte und Grenzkurven für Spektren	657
10.2.1.6	Falle 6: Akustische Effekte der konstruktiven Umgebung	660
10.2.2	Phase 2: Zielführende Konzepte für Vorentwürfe	663
10.2.3	Phase 3: Akustische Machbarkeitsanalysen an Prototypen	666
10.2.3.1	Erste Einflussgröße „Dynamische Anregungskräfte“	667
10.2.3.2	Zweite Einflussgröße „Eingangsimpedanz“	676
10.2.3.3	Dritte Einflussgröße „Körperschalltransferfunktion“	687
10.2.3.4	Vierte Einflussgröße „Abstrahlgrad“	695
10.2.4	Phase 4: Istzustands-, Schwachstellen- und Ursachenanalyse, akustische Zusatzoptionen	697
10.2.4.1	Akustische Analysen an Funktionsprototypen und technischen Prototypen und Vorserienprodukten	697
10.2.4.2	Zusatzoptionen „Sound Design“ und „Schwingungsüberwachung“	706
10.2.5	Phase 5: Abnahmemessungen, Abgleich mit Pflichtenheft, akustisches Fine-Tuning; Beitragsanalyse; End-of-Line-Prüfung	707
10.2.5.1	Abnahmemessungen, Abgleich mit Pflichtenheft, akustisches Fine-Tuning	707
10.2.5.2	Beitragsanalyse und Übertragungsweganalyse	709
10.2.5.3	End-of-Line-Prüfungen	710
10.2.6	Phase 6 (begleitende Zusatzphase): Aufbau einer eigenen Kernkompetenz „Akustik“	711
10.3	Anhang zu Kapitel II.10.2.4.1: Beispiel für die Entwicklung von Prototypen	711
10.4	Weiterführende Informationen	713

11	Modulare Produktstrukturierung	719
	<i>Dieter Krause, Johanna Spallek, Christoph Bleses, Thomas Kipp</i>	
11.1	Produktstruktur und Produktarchitektur	719
11.2	Produktfamilie und Produktvariante	720
11.3	Modulare Produktstruktur	721
	11.3.1 Modular strukturierte Produkte	721
	11.3.2 Potentiale und Grenzen modularer Produktstrukturen	722
11.4	Allgemeines Vorgehen der modularen Produktstrukturierung	724
11.5	Modulare Produktstrukturstrategien	726
	11.5.1 Gleichmodulstrategie	727
	11.5.2 Modulbaukastenstrategie	727
	11.5.3 Plattformstrategie	728
11.6	Methoden zur Entwicklung modularer Produktfamilien	728
	11.6.1 Planning for Product Platforms nach Robertson/Ulrich	728
	11.6.2 Method of Module Heuristics nach Stone	729
	11.6.3 Integration Analysis Methodology nach Pimmler/Eppinger	730
	11.6.4 Modular Function Deployment nach Erixon	731
	11.6.5 Modulare Produktentwicklung nach Göpfert	733
	11.6.6 Der Integrierte PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien nach Krause	733
	11.6.6.1 Strategische Planung modularer Produktprogramme	734
	11.6.6.2 Aufnahme der bestehenden Vielfalt	734
	11.6.6.3 Variantengerechte Produktgestaltung	734
	11.6.6.4 Lebensphasenmodularisierung	736
	11.6.6.5 Einordnung des Integrierten PKT-Ansatzes zur Entwicklung modularer Produktfamilien und zukünftige Trends	739
11.7	Weiterführende Informationen	740
12	Design Matrix	745
	<i>Frank Deubzer, Matthias Kreimeyer, Udo Lindemann, Maik Maurer</i>	
12.1	Analyse und Planung komplexer Systeme	745
	12.1.1 Komplexität in der Entwicklung	745
	12.1.2 Vernetzung in der Produktarchitektur – ein Beispiel	746
12.2	Methoden zur Handhabung komplexer Systeme	748
	12.2.1 Der Umgang mit komplexen Systemen in der Wissenschaft	748
	12.2.2 Allgemeine Prinzipien zum Umgang mit Komplexität	748
	12.2.3 Matrix-basierte Methoden zur Handhabung von Komplexität	749
12.3	Analyse und Synthese auf Basis matrix-basierter Methoden	752
	12.3.1 Definition des zu betrachtenden Systems	753
	12.3.2 Erfassung von Abhängigkeiten	753
	12.3.3 Modellierung von Abhängigkeiten	754
	12.3.4 Vorgehen zur Analyse	755

12.4	Anwendungen von matrix-basierten Methoden	756
12.4.1	Beispiel Produktarchitektur	756
12.4.2	Beispiel Prozess- und Projektmanagement	758
12.4.3	Beispiel Organisationsgestaltung	761
12.5	Leistungsfähigkeit von Methoden im Umgang mit Komplexität	762
12.5.1	Werkzeugunterstützung	762
12.5.2	Hinweise und Empfehlungen	763
12.6	Weiterführende Informationen	764
 TEIL III Verfahren und Methoden		 767
1	Kostenrechnung in der Konstruktion	771
	<i>Markus Mörtl</i>	
1.1	Einführung	771
1.2	Märkte und deren Veränderung	772
1.3	Kostenverantwortung liegt in den frühen Phasen	773
1.4	Kostenrechnung und deren Grundlagen	774
1.4.1	Kostenbegriff	774
1.4.2	Kostenarten	775
1.4.3	Kostenträger	775
1.4.4	Kostenstellen	775
1.4.5	Einzel-, Gemeinkosten	775
1.4.6	Fixe, variable Kosten	776
1.4.7	Selbstkosten	776
1.4.8	Lebenslaufkosten	776
1.4.9	Kostenrechnungsarten	777
1.4.9.1	Zuschlagskalkulation	777
1.4.9.2	Teilkostenrechnung und Deckungsbeitragsrechnung	778
1.4.9.3	Platzkostenrechnung	779
1.4.9.4	Prozesskostenrechnung	779
1.5	Einflussmöglichkeiten zur Kostensenkung	779
1.5.1	Aufgabenstellung	781
1.5.2	Konzept	781
1.5.3	Gestalt	781
1.5.4	Stückzahl	781
1.5.5	Baugröße	781
1.5.6	Fertigung und Montage	782
1.5.7	Eigen-/Fremdfertigung	782
1.5.8	Varianten	782
1.6	Kostenschätzen und Kurzkalkulationsverfahren	783
1.6.1	Methodisches Vorgehen	783
1.6.2	Kontinuierliche Kostenverfolgung und -dokumentation	783

1.6.3	Organisatorischer Rahmen für Kostensenkungsprojekte	785
1.6.4	Kostenschätzen und Genauigkeit	786
1.6.5	Aufwandsreduzierung beim Kostenschätzen und Kalkulieren	786
1.6.6	Kurzkalkulationsverfahren	786
1.6.6.1	Gewichtskostenkalkulation	786
1.6.6.2	Materialkostenmethode	787
1.6.6.3	Kalkulation bei geometrischer Ähnlichkeit und Halbähnlichkeit	787
1.6.6.4	Summarisches Herstellkostenwachstumsgesetz	787
1.7	Änderungskosten in indirekten Bereichen	787
1.8	Abkürzungen	788
1.9	Weiterführende Informationen	789
2	Gewerblicher Rechtsschutz	793
	<i>Bettina Alber-Laukant</i>	
2.1	Patente	795
2.1.1	Ist die gemachte Erfindung patentierbar? – Voraussetzungen für die Erteilung eines Patents ...	796
2.1.2	Wo kann die Erfindung angemeldet werden? – Die nationale, europäische und internationale Patentanmeldung	797
2.1.3	Wie sieht ein Patent aus? – Formale Erfordernisse an den Aufbau einer Patentanmeldung	799
2.1.3.1	Titelblatt	799
2.1.3.2	Beschreibung	802
2.1.3.3	Patentansprüche	802
2.1.4	Die Einreichung – Und was passiert danach? – Das Einreichungs- und Prüfungsverfahren, die Einspruchsmöglichkeiten, die Erteilung eines Patents	803
2.1.5	Was kann man bei störenden Fremdpatenten machen? – Die Lizenzrechte, die Patentrecherche	806
2.2	Gebrauchsmuster	807
2.3	Eingetragenes Design	808
2.4	Gewerbliche Kennzeichen	810
2.4.1	Marken	811
2.4.2	Unternehmensbezeichnungen	813
2.4.3	Geografische Herkunftsangaben	814
2.4.4	Markenrechtsverletzungen	814
2.5	Weitere Schutzrechte	814
2.5.1	Urheberrecht	814
2.5.2	Topografie	815
2.5.3	Software	815
2.6	Patentrecherche	815
2.7	Weiterführende Informationen	817

3	Service Engineering	821
	<i>Rolf Steinhilper</i>	
3.1	Service Engineering – was ist das?	821
3.1.1	Service Engineering – eine junge Wissenschaftsdisziplin	821
3.1.2	Interaktionen zwischen Konstrukteur und Service: allzu leicht unterschätzt	822
3.1.3	Typologisierung von Dienstleistungen: wegbereitend für treffsichere Maßnahmen zur Effizienzsteigerung	822
3.1.4	Service Engineering für technische Produkte – eine höchst lohnende, jedoch anspruchsvolle Aufgabe	824
3.2	Service Engineering für Konsumgüter	825
3.2.1	Reparieren lohnt sich doch	825
3.2.2	Typische Defekte generieren typische Konstruktionsaufgaben	826
3.2.3	Typische Servicefälle erfordern passende Servicekonzepte	827
3.2.4	Neue Akteure im Servicemarkt: Abschied vom klassischen Konzept „Werkskundendienst“	828
3.2.5	Neue Serviceaktivitäten neuer Akteure – eine Informationsquelle für Konstrukteure	830
3.3	Service Engineering für Automobile	830
3.3.1	Die größte Umwälzung seit der Erfindung des Automobils fordert besonders dessen Service ...	830
3.3.2	Das Phänomen Rückrufaktionen: Konstruktionsmängel oder zu hastige Markteinführung?	831
3.3.3	Kfz-Service – mehr als eine Mobilitätsdienstleistung	833
3.3.4	Computergestützte Kfz-Fehlerdiagnose – ein Drittel des Serviceaufwands	834
3.3.5	Ersatz teurer Komponenten statt Reparatur	835
3.3.6	Ersatzteilversorgung während und nach der Produktionsdauer eines Automodells	837
3.3.7	Refabrikation von Kfz-Austauschersatzteilen	838
3.3.8	Schutzrechte	842
3.3.9	Haftung für Servicearbeiten	843
3.3.10	Anspruchsvolle Kfz-Servicefälle in drei Kategorien	845
3.3.10.1	Ersatzteilgetriebene Servicefälle	845
3.3.10.2	Technologietrendgetriebene Servicefälle	847
3.3.10.3	Phänomengetriebene Servicefälle	848
3.3.11	Neue Kfz-Serviceoptionen im Blickpunkt des Konstrukteurs	849
3.3.11.1	Innovationen für Austauschoptionen kleinerer Module	849
3.3.11.2	Ausweitung des Refabrikations-Knowhows auf neues Produkt-Terrain	851
3.3.11.3	Entwicklung neuer In-Situ-Instandsetzungstechnologien im Kfz	851
3.3.11.4	Neue Kommunikations- und Kooperationsnetzwerke	852
3.3.11.5	Kfz-Bauteil-Regeneration mit Additiven Fertigungsverfahren	852
3.3.12	Handlungsfelder des Konstrukteurs	853
3.4	Service Engineering für Investitionsgüter	853
3.4.1	Die Investitionsgüter-Instandhaltung hat ihre eigenen Determinanten.	853
3.4.2	Die „Total Cost of Ownership“ sowie Zusatznutzen entscheiden über den Service-Anbieter sehr wesentlich mit	855
3.4.3	Ersatzteilversorgung für Investitionsgüter: Trends in die Fläche und in Richtung intelligenter Bedarfsprognosen	855
3.5	Instandhaltungsgerechtes Konstruieren	856
3.5.1	Geringer Instandhaltungsaufwand erfordert Zuverlässigkeit plus Instandhaltbarkeit	856
3.5.2	Grundsätzliche Regeln zum instandhaltungsgerechten Konstruieren	857
3.5.2.1	Handlungsfeld „Optimieren der Zuverlässigkeit“	858
3.5.2.2	Handlungsfeld „Verringern des Instandhaltungsaufwands“	860
3.5.2.3	Handlungsfeld „Erleichtern der Instandhaltungsmaßnahmen“	861

3.6	Am Horizont: Serviceführerschaft	862
3.6.1	Innovationen beim Service Engineering folgen anderen Rhythmen	862
3.6.2	Das Geschäftsfeld Service hat die weiteste Dimension	862
3.7	Weiterführende Informationen	863
4	Qualitätsmanagement in der Entwicklung und Konstruktion	867
	<i>Albert Weckenmann, Martin Bookjans</i>	
4.1	Einführung	867
4.1.1	Bedeutung des Qualitätsmanagements für den nachhaltigen Unternehmenserfolg	867
4.1.2	Qualitätsmanagementwerkzeuge im Produktlebenszyklus	868
4.2	Grundwerkzeuge	869
4.2.1	Seven Tools of Quality	869
4.2.2	Seven New Tools of Quality	871
4.3	Quality Function Deployment	873
4.3.1	Historische Entwicklung	873
4.3.2	House of Quality	873
4.3.3	Kano-Modell	875
4.4	Wertanalyse	875
4.5	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)	876
4.5.1	Arten von FMEA	876
4.5.2	Vorgehensweise	876
4.6	Fehlerbaum- und Ereignisablaufanalyse	878
4.6.1	Ereignisablaufanalyse	878
4.6.2	Fehlerbaumanalyse	879
4.7	Design for Six Sigma	881
4.7.1	Six Sigma – der Ursprung des Design for Six Sigma	881
4.7.2	Ziele und Einsatzgebiete des Design for Six Sigma	883
4.7.3	Ablaufschemas für Design-for-Six-Sigma-Projekte	883
4.7.4	DMADV – Kernprozess des Design for Six Sigma	883
4.8	Robust Design	884
4.8.1	Verlustfunktion nach Taguchi	885
4.8.2	Arten von Einflussfaktoren	885
4.8.3	Phasen des Robust Design	886
4.9	TRIZ/TIPS	886
4.9.1	Klassifikation von Produktinnovationen	886
4.9.2	Morphologische Widerspruchsmatrix	887
4.10	Mizenboushi	888
4.11	Poka Yoke	889
4.12	Virtuelles Qualitätsmanagement und Industrie 4.0	889

4.13	Weiterführende Informationen	893
5	Reverse Engineering	897
	<i>Bernd Rosemann, Stefan Freiberger</i>	
5.1	Zweck und Einsatz des Reverse Engineering	897
5.2	Technologische Voraussetzungen, Vorgehensweise und technische Anwendungsgrenzen	899
5.2.1	Der Reverse-Engineering-Prozess	899
5.2.2	Bauteilerfassung (Scanning)	899
5.2.3	Geometrieverarbeitung	903
5.2.4	Weiterverarbeitung der Flächenmodelle	905
5.3	Anwendungen des Reverse Engineering	905
5.3.1	Anwendung im Maschinenbau	905
5.3.2	Reverse Engineering in der Product Customization	905
5.4	Rechtliche Aspekte des Reverse Engineering	905
5.5	Weiterführende Informationen	907
	TEIL IV Computereinsatz	909
1	Konstruieren mit CAD	913
	<i>Reinhard Hackenschmidt</i>	
1.1	CAD-Grundlagen	913
1.1.1	Geometrisches Modellieren	913
1.1.2	Repräsentationsformen geometrischer Grundelemente	913
1.1.3	Modellformen	915
1.1.4	Parametrisches Modellieren	917
1.1.5	Featurebasiertes Modellieren	918
1.1.6	Aufbau von 3D-Produktmodellen	919
1.2	Funktionsübersicht CAD-Systeme	919
1.2.1	Designstadium	919
1.2.2	Modellierungsphase	921
1.2.3	Weiterführende Werkzeuge	923
1.3	Datenqualität	924
1.3.1	Austausch von CAD-Modellen	925
1.3.2	Qualitätssicherung im CAD-Bereich	926
1.3.3	Organisatorische Lösungen	928
1.4	Weiterführende Entwicklungen	930
1.5	Weiterführende Informationen	930

2	Finite-Elemente-Analyse	935
	<i>Bernd Roith, Martin Neidnicht, Frank Rieg</i>	
2.1	Einleitung	935
2.2	Das grundsätzliche Vorgehen	937
2.3	Beispiele für typische Einsatzgebiete der FEA	944
2.3.1	Lineare Festigkeitsrechnung – Kolben	944
2.3.2	Nichtlineare Festigkeitsrechnung – Tellerfeder	949
2.3.3	Thermomechanische Analyse: Ventil	951
2.3.4	Eigenfrequenz-Analyse: Kurbelwelle	955
2.3.5	Kondensation der Problemgröße	957
2.4	Weiterführende Informationen	959
3	CNC-Produktion	963
	<i>Stefan Freiburger, Bernd Rosemann</i>	
3.1	Einführung in CNC	963
3.2	CNC-Maschinen in Produktion und Montage	963
3.3	Funktionen von CNC-Maschinen	964
3.4	Positionserkennung	965
3.5	CNC-Programm	966
3.6	Simulation in der NC-Fertigung	970
3.7	Weiterführende Informationen	973
4	Simulation	977
	<i>Bettina Alber-Laukant, Reinhard Hackenschmidt, Martin Neidnicht, Bernd Roith</i>	
4.1	Computergestützte Simulationswerkzeuge	978
4.2	Computer-Aided-x: CAx	979
4.3	Vorgehensweise bei einer Simulation	980
4.4	Modellbildung	982
4.4.1	Physikalische und mathematische Modelle	982
4.4.1.1	Physikalische Modelle	982
4.4.1.2	Mathematische Modelle	982
4.4.1.3	Analytische Modelle	984
4.4.1.4	Numerische Simulation	985
4.4.1.5	Einordnung der mathematischen Analyseverfahren	990
4.4.2	Grafische Modelle	991

4.5	Qualität, Ergebnisse und Prognosefähigkeit der Simulation	993
4.6	Weiterführende Informationen	994
5	Additive Fertigungsverfahren	997
	<i>Michael F. Zäh, Johannes Schilp, Johannes Weirather, Christian Zeller, Benedikt Schmiegel, Michael Ott, Sebastian Westhäuser</i>	
5.1	Einführung	997
5.2	Definition	998
5.3	Verfahrenskette	1000
5.3.1	Pre-Prozess	1000
5.3.2	In-Prozess	1001
5.3.3	Post-Prozess und nachgelagerte Prozesse	1001
5.4	Einteilung der additiven Fertigungsverfahren	1002
5.5	Vorstellung wichtiger Schichtbauverfahren	1002
5.5.1	Laserstrahlschmelzen	1002
5.5.2	Elektronenstrahlschmelzen	1005
5.5.3	Laser-Sintern	1006
5.5.4	Laserauftragschweißen	1006
5.5.5	3D-Drucken	1007
5.6	Richtlinien für die Konstruktion additiver Bauteile	1007
5.6.1	Funktionsintegration	1007
5.6.2	Bauteilgröße und Bauteilpositionierung	1010
5.6.3	Verarbeitbare Werkstoffe	1010
5.6.4	Mechanische Kennwerte	1011
5.6.5	Oberflächengüte und Aufmaß	1011
5.6.6	Treppenstufeneffekt (Stair Casing)	1011
5.6.7	Supports und Maßhaltigkeit	1012
5.7	Potenziale	1012
5.8	Zusammenfassung und Ausblick	1012
5.9	Weiterführende Informationen	1013
6	Virtuelle Produktentstehung	1017
	<i>Reiner Anderl, Thomas Rollmann, Diana Völz, Felix Heimrich, Christian Steinmetz, Simon Frisch (†), Roland Nattermann, Sebastian Maltzahn, Christian Mosch</i>	
6.1	Prozesskette Virtuelle Produktentstehung und Simultaneous Engineering	1019
6.1.1	Wissensbasierte Produktentstehung	1019
6.1.2	Simultaneous Engineering (SE)	1020
6.2	Datenmanagement	1022
6.2.1	Produktdatenmanagement (PDM)	1022

6.2.2	Simulationsdatenmanagement (SDM)	1024
6.2.3	Industrie 4.0	1026
6.3	Zusammenfassung	1028
6.4	Weiterführende Informationen	1028
7	3D-Datenaustausch und Datenformate in der Produktentwicklung	1031
	<i>Alexander Troll</i>	
7.1	Grundlagen des Austauschs von CAX-Modelldaten	1031
7.1.1	Datenaustausch als Teil der Produktentwicklung	1031
7.1.2	Kopplung von CAX-Werkzeugen	1032
7.1.3	Austauschbare Inhalte von CAX-Modellen	1033
7.2	Neutralformate – Arten, Inhalte und Vorzüge	1036
7.2.1	Offene CAX-Datenformate für die 3D-Geometrieübertragung	1036
7.2.1.1	ACIS (Dateiendung *.sat, *.acis)	1036
7.2.1.2	Parasolid (Dateiendung *.x_t, *.xt)	1037
7.2.1.3	Jupiter Tessellation JT (Dateiendung *.jt)	1037
7.2.1.4	STL (Dateiendung *.stl)	1037
7.2.1.5	Virtual Reality Markup Language VRML (Dateiendung *.vrm) und Extensible 3D X3D (Dateiendung *.x3dv)	1038
7.2.2	Neutrale, standardisierte CAX-Datenformate für Produktdaten	1038
7.2.2.1	Initial Graphics Exchange Standard IGES (Dateiendung *.igs, *.iges)	1038
7.2.2.2	Standard for the Exchange of Product (Model) Data STEP (Dateiendung *.stp, *.step)	1038
7.2.3	Vor- und Nachteile neutraler CAX-Formate	1041
7.2.3.1	Datenkonsistenz	1041
7.2.3.2	Umfang der austauschbaren Daten	1041
7.2.3.3	Komplexität und Flexibilität	1041
7.3	Datenaustausch in der betrieblichen Praxis	1042
7.3.1	Normen, Richtlinien und Best Practices	1042
7.3.1.1	Datenaustausch nach VDA – Vereinbarungen, Vorgehen, Inhalte	1042
7.3.1.2	Datenaustausch nach DIN 4003-1 ff.	1045
7.3.2	Allgemeine Vorgehenshilfen für die Verwendung neutraler CAX-Datenformate	1046
7.3.2.1	Anforderungsklärung im CAX-Datenaustausch	1046
7.3.2.2	Kriterien für die Formatauswahl	1046
7.4	Weiterführende Informationen	1046
8	Workflowunterstützung in der Produktentwicklung	1051
	<i>Kristin Paetzold</i>	
8.1	Einleitung	1051
8.2	Grundlagen zur Beschreibung von Entwicklungsprozessen	1051
8.2.1	Charakterisierung von Entwicklungsprozessen	1052
8.2.2	Systemtheoretische Überlegungen für den Konstruktionsprozess	1053
8.2.2.1	Methoden als Handlungseinheiten	1053

8.2.2.2	Mikrologik im Entwicklungsprozess	1054
8.2.2.3	Makrologik im Entwicklungsprozess	1055
8.2.2.4	Unternehmensspezifische Anpassung der generischen Entwicklungsprozesse	1056
8.3	Workflow-Betrachtungen für die Entwicklung	1059
8.3.1	Grundlagen für eine Workflow-Management-Unterstützung in der Entwicklung	1060
8.3.2	Analyse der Daten- und Informationsflüsse zur Prozessunterstützung	1062
8.3.2.1	Analyse der Aktivitäten	1062
8.3.2.2	Behandlung von Interdependenzen mit Koordinationsmechanismen	1063
8.3.3	Modellierung des primären und sekundären Prozesswissens für die Workflow-Unterstützung ..	1064
8.3.3.1	Rechnerunterstützung für die Workflowanwendung	1065
8.4	Ausblick	1066
8.5	Weiterführende Informationen	1067

TEIL V Produktion und Management **1069**

1 Nummerung und Stücklisten **1073** *Reinhard Hackenschmidt*

1.1	Nummerung	1073
1.1.1	Anforderungen	1073
1.1.2	Gestaltung	1074
1.1.3	Aufbau	1076
1.1.4	Fehler und Fehlerarten	1078
1.1.5	Fehlererkennung und -vermeidung	1079
1.2	Stücklisten	1081
1.2.1	Mengenübersichts-Stücklisten	1082
1.2.2	Baukasten-Stücklisten	1082
1.2.3	Struktur-Stücklisten	1084
1.2.4	Varianten-Stücklisten	1085
1.2.5	Stücklistenverwendung in der SAP R/3 Produktionsplanung und -steuerung	1085
1.3	Weiterführende Informationen	1086

2 Spanende Fertigung **1091** *Bernd Rosemann*

2.1	Einleitung	1091
2.2	Produkte und deren Fertigung	1091
2.2.1	Produkterstellung	1091
2.2.2	Fertigungsverfahren	1092
2.3	Fertigungsverfahren des Zerspanens	1093
2.3.1	Einordnung und Einsatz spanender Fertigungsverfahren	1093
2.3.2	Verhältnisse beim Spanprozess und der Spanbildung	1095

2.3.3	Spanen mit geometrisch bestimmten Schneiden	1096
2.3.4	Übersicht der Verfahren des Spanens mit geometrisch bestimmten Schneiden	1097
2.3.5	Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden	1100
2.3.6	Übersicht der Verfahren des Spanens mit geometrisch unbestimmten Schneiden	1101
2.4	Entwickeln fertigungsgerechter Produkte: Design for Manufacturing	1104
2.4.1	Fertigungs- und verfahrensgerechte Produktgestaltung	1104
2.4.2	Fertigungsgerechtes Gestalten im Konstruktionsablauf	1104
2.5	Fertigungsgerechte Werkstückgestaltung	1104
2.5.1	Fertigungsgerechte Werkstoffwahl	1105
2.5.2	Auswahl von Fertigungsverfahren	1108
2.5.3	Gestaltungsrichtlinien für die Grobgestalt	1110
2.5.4	Gestaltungsrichtlinien für die Feingestalt	1116
2.5.5	Gestaltungshinweise für verfahrensgerechte Bauteilkonstruktionen	1118
2.5.5.1	Drehen	1119
2.5.5.2	Bohren, Senken und Gewindeschneiden	1122
2.5.5.3	Fräsen	1126
2.5.5.4	Schleifen	1128
2.6	Trends	1130
2.6.1	Neuartige Schneidengeometrien mit vielfachen Vorteilen	1130
2.6.2	Hochgeschwindigkeitsfräsen statt Senkerodieren	1131
2.6.3	Hartdrehen anstelle Schleifen	1131
2.6.4	Komplettbearbeitung und Drehfräsen statt Drehen	1132
2.6.5	Multiprozessbearbeitung	1133
2.7	Zusammenfassung und Ausblick	1136
2.8	Weiterführende Informationen	1136
3	Umformen	1141
	<i>Edmund Böhm</i>	
3.1	Einführung	1141
3.1.1	Was ist „Umformen“?	1141
3.1.2	Einteilung der Umformverfahren	1141
3.1.3	Verfahrensübersicht	1142
3.2	Werkstoffe und ihre Eigenschaften	1143
3.2.1	Werkstoffauswahl	1143
3.2.2	Formänderung	1143
3.2.3	Einflussfaktoren	1144
3.2.4	Blechprüfung	1145
3.3	Blechumformen	1146
3.3.1	Biegen	1146
3.3.2	Tiefziehen	1151
3.3.3	Streckziehen	1154
3.3.4	Drücken	1155
3.4	Massivumformen	1156

3.4.1	Schmieden	1156
3.4.2	Kaltfließpressen	1159
3.4.3	Strangpressen	1162
3.4.4	Walzen	1163
3.5	Besondere Umformverfahren	1166
3.6	Konstruktion und Fertigung	1169
3.6.1	Beispiel Teleskop-Hubvorrichtungen	1169
3.6.2	Beispiel Feinschneidtechnik	1171
3.6.3	Beispiel Kontaktstecker und Leadframes für die Elektronikindustrie	1172
3.6.4	Beispiel umformtechnisches Fügen	1172
3.6.5	Beispiele aus der Massivumformung	1174
3.6.6	Beispiel Kupplungslamellenträger	1175
3.7	Beispiele aus verschiedenen Branchen	1176
3.7.1	Allgemeiner Maschinenbau	1176
3.7.2	Stahl-(Hoch-)Bau	1178
3.7.3	Apparate- und Behälterbau	1179
3.7.4	Fahrzeugbau	1180
3.8	Weiterführende Informationen	1181
4	Fügetechnik – Schweißen (Schweißkonstruktionen)	1185
	<i>Edmund Böhm</i>	
4.1	Einführung	1185
4.1.1	Was ist „Schweißen“?	1185
4.1.2	Einordnung in die Fertigungstechnik	1185
4.1.3	Systematische Einteilung	1185
4.2	Anwendungsgebiete	1185
4.2.1	Aufgabengebiete	1185
4.2.2	Anwendungsbereiche	1186
4.3	Schweißverfahren (Übersicht)	1187
4.3.1	Einteilung	1187
4.3.2	Schweißen von Metallen	1187
4.3.3	Schweißen von Kunststoffen	1189
4.4	Entwurf und Konstruktion	1190
4.4.1	Konstruktionsvorgaben	1190
4.4.1.1	Ausführungsmöglichkeiten	1190
4.4.2	Dokumentation	1190
4.4.3	Benennungen und Symbole	1191
4.4.4	Zeichnerische Darstellung	1191
4.4.5	Toleranzen bei Schweißverbindungen	1192
4.5	Gestaltungsgrundsätze	1193
4.5.1	Schweißgerechte Gestaltung	1193
4.5.2	Prüfgerechte Gestaltung	1193
4.5.3	Fertigungsgerechte Gestaltung	1193

4.5.4	Korrosionsschutzgerechte Gestaltung	1193
4.5.5	Sicherheitsgerechte Gestaltung	1194
4.5.6	Umweltorientierte Gestaltung	1194
4.5.7	Kostenbewusste Gestaltung	1194
4.6	Berechnung von Schweißnähten	1194
4.6.1	Belastungen und Lastannahmen	1194
4.6.2	Belastungsarten	1194
4.6.3	Beanspruchungsarten	1195
4.6.4	Zusammengesetzte Spannungen	1195
4.7	Werkstoffauswahl	1196
4.7.1	Schweißbeignung	1196
4.7.2	Stahl- und Eisenwerkstoffe	1196
4.7.3	Nichteisenmetalle	1197
4.7.3.1	Leichtmetalle	1197
4.7.3.2	Schwermetalle	1197
4.7.4	Nichtmetalle (Kunststoffe)	1197
4.7.5	Schweißzusatzstoffe	1198
4.8	Anforderungen an die Fertigung	1198
4.8.1	Arbeitsvorbereitung	1198
4.8.2	Geräte-/Maschinenausstattung	1198
4.8.3	Werkzeuge und Vorrichtungen	1198
4.8.4	Werkstoff-/Halbzeug-Logistik	1199
4.9	Ausführung von Schweißverbindungen	1199
4.9.1	Umwelteinflüsse bei der Herstellung	1199
4.9.2	Einflüsse auf die Schweißnaht	1199
4.10	Prüfung und Qualität von Schweißverbindungen	1200
4.10.1	Herstellungsbetrieb	1200
4.10.2	Schweißpersonal	1200
4.10.3	Verfahrensprüfungen	1200
4.10.4	Prüfverfahren	1200
4.10.5	Schweißnahtfehler	1201
4.11	Beispiele von Schweißkonstruktionen	1201
4.11.1	Allgemeiner Maschinenbau	1201
4.11.2	Stahl-(Hoch-)bau	1201
4.11.3	Apparate- und Behälterbau	1205
4.12	Weiterführende Informationen	1212
5	Fügetechnik – Kleben	1217
	<i>Georges Romanos</i>	
5.1	Einleitung, Anwendungen	1217
5.2	Klebstoffe	1219
5.2.1	Chemisch abbindende Klebstoffe (Reaktionsklebstoffe)	1220
5.2.1.1	Polyadditionsklebstoffe	1220

5.2.1.2	Polymerisationsklebstoffe	1221
5.2.1.3	Polykondensationsklebstoffe	1222
5.2.2	Physikalisch abbindende Klebstoffe	1223
5.2.3	Kombinationsklebstoffe, dual härtende Klebstoffe	1224
5.3	Herstellung von Klebverbindungen	1224
5.3.1	Oberflächenbehandlung	1225
5.3.2	Klebstoffverarbeitung	1226
5.3.3	Klebstoffauftragung	1227
5.3.4	Fügen, Fixieren	1228
5.3.5	Aushärtung (Verfestigung)	1228
5.3.6	Verarbeitung von Dichtstoffen	1229
5.3.7	Fertigungskontrolle	1229
5.3.8	Qualitätssicherung, Prozesskette Kleben	1230
5.4	Tragfähigkeitsverhalten	1231
5.4.1	Beanspruchungsbedingungen	1231
5.4.2	Temperatureinfluss, Zeitabhängigkeit	1232
5.4.3	Ermüdung bei schwingender Belastung	1233
5.4.4	Langzeitbeständigkeit, Umwelteinflüsse	1234
5.5	Dimensionierung, Festigkeitsnachweis	1234
5.5.1	Dimensionierungsgrundlagen	1234
5.5.2	Spannungsberechnung mithilfe von Näherungsmethoden	1235
5.5.3	Anwendung numerischer Methoden, Simulation	1236
5.6	Prüfung	1238
5.7	Gestaltungshinweise	1239
5.8	Weiterführende Informationen	1244
Stichwortverzeichnis	1247	

Autorenverzeichnis

Dr.-Ing. Bettina Alber-Laukant

Patentingenieurin, Akademische Oberrätin am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Professor Dr.-Ing. Reiner Anderl

Leiter des Fachgebiets Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK), Technische Universität Darmstadt

Dr.-Ing. Stefan Bauer

Geschäftsleitung Forschung und Entwicklung, MEKRA Lang GmbH & Co. KG, Ergersheim

Professor Dr.-Ing. Bernd Bertsche

Leiter des Instituts für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart

Professor i. R. Dr. h. c. Dr. h. c. Dr.-Ing.**Herbert Birkhofer**

Ehemals Leiter des Fachgebiets Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt

Dr.-Ing. Christoph Blees

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg; jetzt Porsche AG, Stuttgart

Professor Dr.-Ing. Edmund Böhm

Fakultät Maschinenbau, Hochschule Ravensburg-Weingarten

Dr.-Ing. Martin Bookjans

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg unter Professor Weckenmann; jetzt Syndikuspatentanwalt in der Brose Gruppe, Coburg

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Carsten Böhme

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, CIM Innovation und Technologie gGmbH, Wismar

Dr.-Ing. Joachim Bös

Akademischer Direktor und stellvertretender Leiter des Fachgebiets Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, Technische Universität Darmstadt

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. em.**Klaus Brökel (VDI)**

Ehemaliger Leiter des Lehrstuhls Konstruktionstechnik/CAD der Universität Rostock

Uwe Brückner, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, Universität Paderborn

Professor Dr. Ralph Bruder

Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft (IAD), TU Darmstadt

Dr. rer. nat. Joachim Crone

Dr.Crone EcoConsulting, München

Martin Dazer, M. Sc.

Bereichsleiter Zuverlässigkeitstechnik am Institut für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart

Kevin Deese, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Frank Deubzer

R&D Prozesse und Methoden, Volkswagen Truck & Bus AB

Professor Dr.-Ing. Gerhard Engelken

Fachgebiet Konstruktion und CAD, Hochschule RheinMain

Professor Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer

Ordinarius, Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik, Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Stefan Freiberger

Mitglied im Leitungskreis des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik an der Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Michael Frisch

Akademischer Rat, Leiter Bereich Sporttechnologie – Lehrstuhl für Trainings- und Bewegungswissenschaft, Universität Bayreuth

Simon Frisch (†), M. Sc.

war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK), Technische Universität Darmstadt

Johannes Full, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Bereich Ressourceneffiziente Produktion – Management nachhaltiger Wertschöpfungssysteme

Professor Dr.-Ing. habil. Uwe Glatzel

Inhaber des Lehrstuhls Metallische Werkstoffe, Universität Bayreuth

Professor Dr.-Ing. Horst-Walter Grollius

war in leitenden Positionen in der Industrie tätig und seit 1987 Professor für Konstruktionstechnik an der Bergischen Universität Wuppertal

Dr.-Ing. Thomas Gumpinger

Geschäftsführer Odego GmbH, ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Reinhard Hackenschmidt

Akademischer Direktor am Lehrstuhl Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Professor Dr.-Ing. Holger Hanselka

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Stefan Hautsch, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Felix Heimrich, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK), Technische Universität Darmstadt

Mark Henß, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente (IMA), Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Bastian Kaiser

Teamleiter Ergonomie, imk automotive GmbH, Geschäftsstelle Stuttgart

Dr.-Ing. Thomas Kipp

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg, jetzt Director Innovations & Components, CoC Air Supply R/ASD, Knorr Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH

Dr.-Ing. Christian Kliewe

Teamleiter Konstruktion Hafenmobilkrane, Liebherr MCCtec Rostock

Dipl.-Ing. Enrico Kloß

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik/CAD, Universität Rostock; jetzt CIM – Innovation und Technologie gGmbH, Wismar

Dr.-Ing. André Knopp

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/Leichtbau, Universität Rostock; jetzt Suzlon Energy Ltd., German Branch, Rostock

Professor Dr.-Ing. Dieter Krause

Leiter des Instituts für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg

Dr.-Ing. Hartmut Krehmer

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Universität Erlangen-Nürnberg; jetzt Schaeffler Technologies, Herzogenaurach

Dipl.-Ing. Sven-Uwe Kreja

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik/CAD, Universität Rostock; jetzt Senior Design Engineer, Neue Warnow Design & Technology GmbH, Rostock

Professor Dr.-Ing. Walter Krenkel

Inhaber des Lehrstuhls Keramische Werkstoffe, Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer, Ingénieur ECP

Vice President Product Strategy & Management Truck bei der MAN Truck & Bus AG, München

Thomas Künneke, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, Universität Paderborn

Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

TUM Emeritus of Excellence, Lehrstuhl für Produktentwicklung und Leichtbau, Technische Universität München

Dr.-Ing. Sebastian Maltzahn

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK), Technische Universität Darmstadt; jetzt PDM Projektmanager, Continental Automotive GmbH

Dr.-Ing. habil. Maik Maurer

Product Manager, Security, Akamai Technologies, Cambridge (MA)

Professor i. R. Dr.-Ing. Harald Meerkamm

Ehemaliger Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Dr.-Ing. Robert Miede

Gruppenleiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Bereich Ressourceneffiziente Produktion – Management nachhaltiger Wertschöpfungssysteme

Professor Dr.-Ing. Elmar Moritzer

Inhaber des Lehrstuhls für Kunststofftechnologie, Universität Paderborn

Dr.-Ing. Markus Mörtl

Akademischer Oberrat, Lehrstuhl für Produktentwicklung und Leichtbau, Technische Universität München, Garching

Dr.-Ing. Christian Mosch

Projektmanager Standardisierung Industrie 4.0 beim VDMA. Er verantwortet die Strategie der Industrie-4.0-Interoperabilität im Maschinenbau.

Dr.-Ing. Roland S. Nattermann, M. Sc.

PLM Development Lead bei der MEYER WERFT GmbH & Co. KG, Papenburg

Dr.-Ing. Martin Neidnicht

thyssenkrupp Rothe Erde GmbH, Technische Berechnung – Algorithmenentwicklung Finite Elemente, Lippstadt

Dr.-Ing. Alfred Neudörfer

Akademischer Direktor a. D., Institut für Druckverfahren und Drucksysteme, Technische Universität Darmstadt

Dr.-Ing. Florian Nützel

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth; jetzt OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Dr.-Ing. Michael Ott

Siemens Healthineers am Standort Kemnath, Head of Production/Innovation/Automation

Professorin Dr.-Ing. Kristin Paetzold

Institutsleitung, Institut für Technische Produktentwicklung, Universität der Bundeswehr München

Dr.-Ing. Benedikt Plaumann

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg; jetzt RMS Regelungs- und Messtechnik Dipl.-Ing., Schaefer GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Reinhard Rahn

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD, Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik, Universität Rostock

Dr.-Ing. Bernd Roith

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth; jetzt Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)

Professor Dr.-Ing. Frank Rieg

Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth

Professor Dr. Thomas Rollmann

Professur für Wirtschaftsingenieurwesen, Frankfurt University of Applied Sciences

Dr.-Ing. Georges Romanos

Henkel AG & Co. KGaA, Product Development Automotive & Metals Industries, Garching

Dr. Ing. Bernd Rosemann

Akademischer Oberrat am Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik, Universität Bayreuth

Dr.-Ing. Julian Sarnes

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt; heute Technischer Leiter bei ZSM Metrology GmbH in Bad Soden-Salmünster

Professor Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Bereichsleiter „Ressourceneffiziente Produktion“ am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion EEP der Universität Stuttgart

Magnus Schadomsky, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, Universität Paderborn

Dr.-Ing. Florian Scherm

Akademischer Rat am Lehrstuhl Metallische Werkstoffe, Universität Bayreuth

Professor Dr.-Ing. Christian Schindler

Leiter des Lehrstuhls und Instituts für Schienenfahrzeuge und Transportsysteme (IFS) und Geschäftsführender Direktor des Research Center Railways (RCR) der RWTH Aachen University; ehemals Professor für Konstruktion an der TU Kaiserslautern

Professor Dr.-Ing. Johannes Schilp

Inhaber des Lehrstuhls für Produktionsinformatik der Universität Augsburg und Wissenschaftsbereichsleiter der Fraunhofer Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV)

Dr.-Ing. Benjamin Schleich

Oberingenieur am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Benedikt Schmiegel, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Produktionsinformatik der Universität Augsburg

Dr.-Ing. Karola Schulze

Ehemals wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt; heute Produktmanagerin bei Dentsply Sirona in Bensheim

Professor Dr.-Ing. Wolfgang Schütte

Leiter des Labors für Produktentwicklung und Konstruktionslehre LPK, Fachhochschule Südwestfalen in Iserlohn

Johann Schwenke, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg

Johanna Spallek, M. Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg

Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Inhaber des Lehrstuhls für Umweltgerechte Produktionstechnik an der Universität Bayreuth und Leiter der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation

Christian Steinmetz, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK), Technische Universität Darmstadt

Dr.-Ing. Andreas Stockinger

Leitung Toleranzmanagement Gesamtfahrzeug, Absicherung Gesamtfahrzeug, BMW Group, München

Dr.-Ing. Rainer Storm

Akadem. Direktor i. R., ehem. Leiter der AG Maschinenakustik am heutigen Fachgebiet Systemzuverlässigkeit, Adaptronik und Maschinenakustik SAM, Technische Universität Darmstadt

Malte Strop, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktions- und Antriebstechnik, Universität Paderborn

Dr.-Ing. Alexander Troll

Qualitätsmanager, Qualitätslenkung Motor für die Bereiche Industrie und Power; MAN Truck & Bus AG, Nürnberg

Professorin Dr. Diana Völz

Fachgebiet Konstruktion, Produktentwicklung und CAD, Frankfurt University of Applied Sciences

Professor Dr.-Ing. Michael S.J. Walter

Hochschule für angewandte Wissenschaften Ansbach

Professor Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Professor Dr.-Ing. Professor h. c. Dr.-Ing. E. h.**Dr. h. c. mult. Albert Weckenmann**

Ehemals Ordinarius Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Dr.-Ing. Roland Wegmann

Ehemaliger Mitarbeiter am Lehrstuhl Konstruktionstechnik/CAD der Universität Rostock, Spezialgebiet: Theorie und Entwicklung hydrodynamischer Gleitlager

Dr.-Ing. Christoph Wehmann

Ingenieur in der Vorentwicklung mit Schwerpunkt Berechnung und Simulation, Trelleborg Sealing Solutions Germany GmbH, Stuttgart

Prof. Dr. Roger Weinlein

Leiter des Instituts für Kunststofftechnik Darmstadt (IKD), Hochschule Darmstadt; Arbeitsgebiete: Konstruieren mit Kunststoffen, Rapid Prototyping, Aufbereitung, Wärmeübertragung

Dipl.-Phys. (Univ.) Johannes Weirather

Ehemals wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München

Dipl.-Ing. Sebastian Westhäuser

Ehem. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Professor Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Institutsleiter, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München

Christian Zeller, M. Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb), Technische Universität München

Dr.-Ing. Shulin Zhao

Ehemals wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Darmstadt; heute Geschäftsführerin von ZSM Metrology GmbH in Bad Soden-Salmünster

Professor Dr.-Ing. Detmar Zimmer

Leiter des Lehrstuhls für Konstruktions- und Antriebstechnik, Universität Paderborn

TEIL II

Entwickeln und Konstruieren

1	Der allgemeine Konstruktionsprozess – Grundlagen des methodischen Konstruierens	413
2	Design for X (DFX)	463
3	Leichtbau	485
4	Strukturoptimierung	509
5	Recyclinggerechtes Konstruieren	519
6	Sicherheitsgerechte Maschinen	549
7	Ergonomiegerechtes Konstruieren	583
8	Umweltgerechtes Konstruieren	599
9	Biointelligenz im Produkt und in der Produktion	621
10	Geräuschgerechtes Konstruieren	635
11	Modulare Produktstrukturierung	717
12	Design Matrix	743

Der allgemeine Konstruktionsprozess – Grundlagen des methodischen Konstruierens

Christian Schindler



Der Begriff *Konstruktion* bezeichnet einerseits den *Prozess* der Überlegungen, Prinzipien, Berechnungen und Verfahren, die die Funktion eines zu realisierenden technischen Produktes gewährleisten, inklusive der Erstellung der technischen Unterlagen, anhand derer ein technisches Produkt hergestellt werden kann. Andererseits wird unter *Konstruktion* auch oft das Ergebnis dieser Arbeit, nämlich das auf Basis von Konstruktionsunterlagen hergestellte technische *Produkt*, verstanden.

1.1 Einführung

Der *Entwicklungs- und Konstruktionsprozess* wird in diesem Kapitel, wie in vielen Veröffentlichungen, synonym für den *Produktentwicklungsprozess* verwendet (Pahl 2013, Leidig 2010). Andere Wissenschaftler sehen die Konstruktion hingegen im engeren Sinn als die kreative, konzipierende und gestaltende Teilaufgabe der Produktentwicklung an und trennen sie von den untersuchenden und absichernden Tätigkeiten Berechnung und Simulation, Versuch und Prototypenbau (Ehrlenspiel 2007, Andreasen 2005).

Die Aufgabe des Konstruierens bzw. Entwickelns wird heute in den meisten Fällen nicht mehr allein, sondern im Team arbeitsteilig durchgeführt, wobei für unterschiedliche Tätigkeiten unterschiedliche Experten benötigt werden.

Konstruieren wird oft mit künstlerischer Fähigkeit gleichgesetzt. Wie der Künstler, so benötigt auch der Konstrukteur ein hohes Maß an Kreativität. Was ihn allerdings vom Künstler unterscheidet, ist die Tatsache, dass das Produkt des Künstlers in der Regel nur herstellbar sein muss, während das technische Produkt auch eine technische Funktion hat und diese erfüllen muss.

Aus Sicht der Arbeitspsychologie ist Konstruieren eine schöpferisch-geistige Tätigkeit, die ein sicheres Fundament

an Grundlagenwissen auf den Gebieten der Mathematik und der Naturwissenschaften sowie der allgemeinen und speziellen Ingenieurwissenschaften erfordert (Weth 1994). Methodisch ist Konstruieren ein Optimierungsprozess, basierend auf dem allgemeinen Problemlösungsprozess, mit dem Ziel, die technische Aufgabenstellung unter den vorliegenden Randbedingungen (Zeit, Budget, Ressourcen, Stand der Technik, Normen- und Gesetzeslage ...) bestmöglich zu erfüllen.

Dabei hilft dem Konstrukteur neben fundierten Fachkenntnissen das Wissen um die Methoden zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses. Aber auch Erfahrung, Intuition, Kreativität, Sinn für Ästhetik und jede Menge Glück sind Grundlage einer erfolgreichen Konstrukteurskarriere.

Die Konstruktionsmethodik vermittelt dazu Verfahren und Leitfäden zum grundsätzlichen Vorgehen beim Konstruieren und auch Lösungsmethoden für spezielle Probleme während des Konstruktionsprozesses. Dabei ist es unerheblich, ob es sich bei der gestellten Aufgabe um die Entwicklung eines mechanischen oder elektrischen Produktes, eines Softwareproduktes oder eine Kombination davon handelt. Die meisten der heutigen Produkte beinhalten sowieso Anteile aller drei Disziplinen. In den letzten Jahren hat sich daher der Begriff des mechatronischen Produktes etabliert.

Dieses Kapitel beschreibt den Prozess des methodischen Konstruierens in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 und nimmt dabei vor allem Bezug auf das Werk „Konstruktionslehre“ von Pahl und Beitz, heute betreut und behutsam weiterentwickelt von Feldhusen und Grote (VDI 2221, Pahl 2013). Da die Konstruktionsmethodik dem Konstrukteur eine Fülle von Angeboten macht, wie eine Konstruktionsaufgabe methodisch gelöst werden kann, und der Umfang dieses Kapitels limitiert ist, beschränkt sich der Autor in der Hauptsache auf die Methoden, die er selbst erfolgreich anwendet und zu denen er auch eigene Beispiele liefern kann.

meist der Stückzahl dieses konkreten Auftrags gleich. Skaleneffekte sind hier nur bedingt zu gewinnen. Die Konstruktion muss in vorgegebener Zeit durchgeführt werden, da der Liefertermin des Produktes feststeht und Terminverzug oft eine Konventionalstrafe nach sich zieht. Aufgrund der geringen Stückzahl, auf die die Entwicklungskosten verteilt werden können, und aus Zeitmangel werden aufwendige Untersuchungen oft nicht durchgeführt. Nachbesserungen, auch nach Auslieferung und Inbetriebnahme des Produktes, sind nicht selten.

In der Konsumgüterindustrie herrschen hohe Stückzahlen vor. Der einzelne Kunde ist in der Regel nicht bekannt. Die Kundenwünsche werden über Marktstudien ermittelt. Auftraggeber der Konstruktion ist hier das eigene Unternehmen. Auch hier bestehen Zeitvorgaben für die Fertigstellung der Entwicklung. Ihre Überschreitung führt aber nur insoweit zu Mehrkosten, als dass eine längere Entwicklungszeit auch höhere Kosten verursacht und die Gefahr besteht, dass der Wettbewerb ein ähnliches Produkt eher am Markt platziert.

Generell gilt: Je größer die Stückzahl eines Produktes, desto größer ist die Auswirkung eines Serienfehlers, der wegen der hohen Kosten zu seiner Beseitigung und wegen des Imageschadens für den Hersteller zu vermeiden ist. Hier lohnt es sich umso mehr, durch umfangreiche Berechnungen und Versuche an Teilsystemen und Prototypen verschiedener Entwicklungsstufen, deren Kosten auf die hohe Stückzahl verteilt werden können, die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Fehlers am Produkt zu vermeiden. Moderne Computersimulationsmethoden haben aber in den letzten Jahren auch den Herstellern kleiner Stückzahlen die Möglichkeit verschafft, ihre Neuentwicklungen zumindest virtuell ausgiebig zu testen, sodass diese erheblich an Zuverlässigkeit gewonnen haben.

II

1.2 Grundlagen

1.2.1 Umfeld

Konstrukteure arbeiten in unterschiedlicher Umgebung. Diese differenziert sich nach:

- Art und Stückzahl des zu entwickelnden Produkts
- Art und Größe des Unternehmens
- eigener Funktion im Unternehmen

Die Produktart hat einen großen Einfluss auf die Arbeit des Konstrukteurs. An sie ist meist auch die Stückzahl gekoppelt (Abb. 1.1). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Investitions- und Konsumgütern. Erstere werden i. d. R. von konkreten Kunden einzeln beauftragt und vom Herstellerunternehmen mehr oder weniger auf diese zugeschnitten entwickelt. Dabei ist die Produktstückzahl

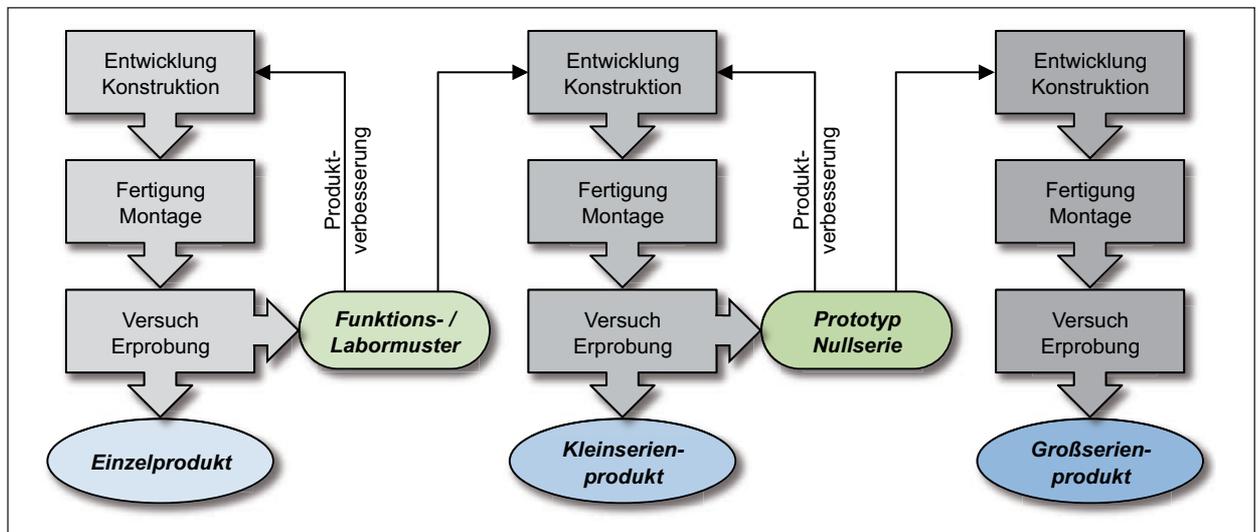


Abb. 1.1 Einfluss der Stückzahl auf den Entwicklungsaufwand nach VDI 2221

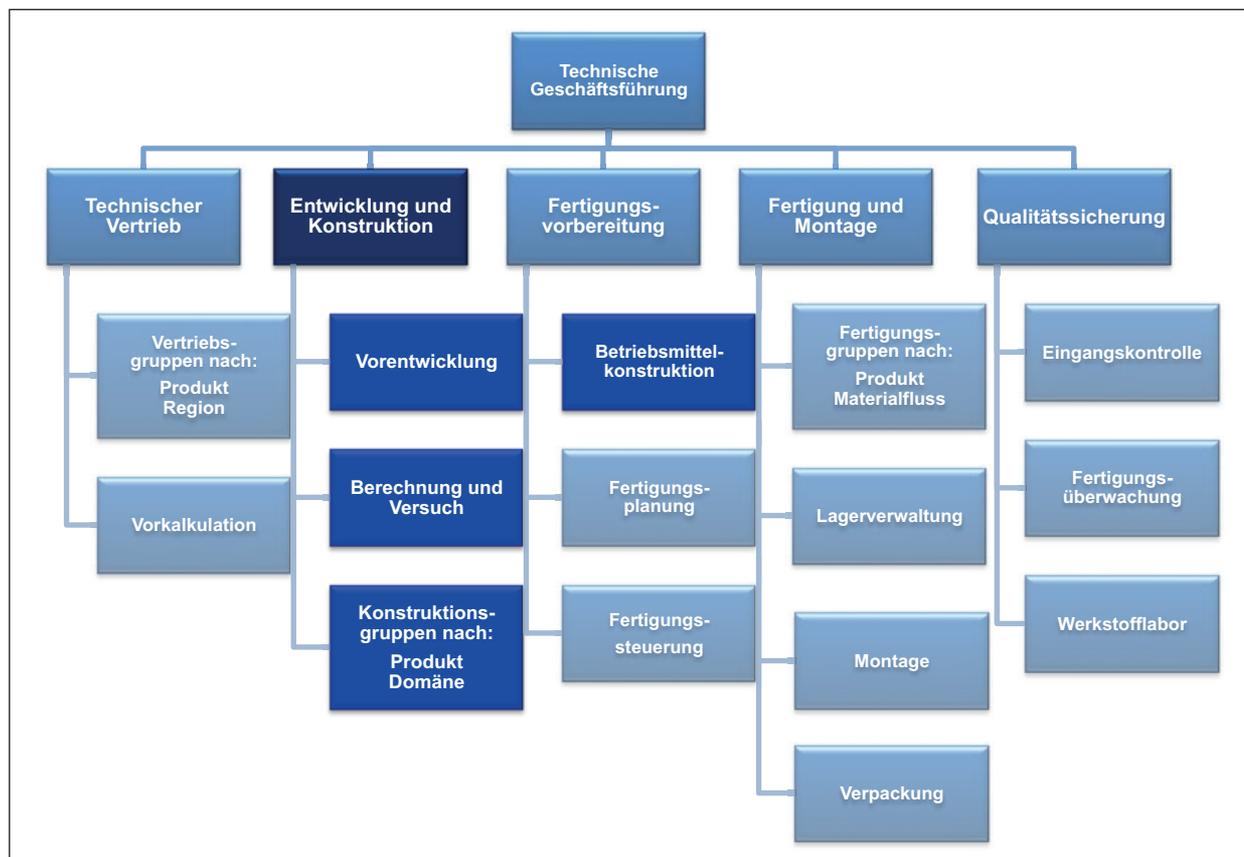


Abb. 1.2 Typische Organisation eines technischen Unternehmensteils im Mittelstand

Während z. B. Pkw-Hersteller immer noch eine zweistellige Zahl von Prototypen eines neuen Fahrzeugtyps im Crash-Versuch „vernichten“, legt die Schienenfahrzeugbranche ihre Fahrzeuge ausschließlich durch Crash-Simulationsrechnungen und Bauteilversuche aus.

Die meisten Konstrukteure arbeiten in den Bereichen *Entwicklung* und *Konstruktion* (Abb. 1.2).

Dabei wird oft unter *Entwicklung* die Organisationseinheit verstanden, in dem die Vorentwicklung, also die nicht kundenprojektbezogene Neu- und Weiterentwicklung von Produkten oder Produkteigenschaften, angesiedelt ist. Die Durchführung tiefer gehender Detailuntersuchungen durch Berechnung, Versuch und ggfs. Laboranalyse sind ebenso typische Entwicklungsaufgaben. Die Konstruktion ist verantwortlich für die eigentliche Produktentwicklung. Hier ist der technische Projektverantwortliche i. d. R. organisatorisch beheimatet. In vielen Unternehmen ist der Konstruktionsbereich nach Produktgruppen oder, wenn nur eine Produktart entwickelt wird, nach Produktsystemen organisiert.

Im klassischen Maschinenbauunternehmen sind die anderen Domänen Elektrotechnik- und Softwareentwicklung in separaten Fachabteilungen, meist innerhalb der Konstruktion, angesiedelt. Neben diesen Organisationseinheiten

benötigt man Konstrukteure in der Betriebsmittelkonstruktion der Fertigungsvorbereitung.

Je nach Unternehmensgröße sind die Bereiche Entwicklung und Konstruktion weiter aufgegliedert (Großkonzern) oder in einer Einheit, oft auch Technisches Büro (TB) genannt, zusammengefasst (Kleinunternehmen). Im zweiten Fall werden die konstruktiven Tätigkeiten der Fertigungsvorbereitung von den Produktentwicklern mit bearbeitet.

Großkonzerne, wie Siemens, Daimler oder BASF, leisten sich oft neben dezentralen produktnahen Entwicklungs- und Konstruktionsbereichen eine zentrale Forschung und Entwicklung, die den Konzerngeschäftsfeldern als Dienstleister zur Verfügung steht.

1.2.2 Einflüsse auf die Konstruktion

Wie lange, mit welchen Ressourcen und in welcher Tiefe ein technisches Produkt entwickelt wird, hängt von vielen Faktoren ab. Zunächst sind die Produktkomplexität und der Innovationsgrad zu nennen. Von immenser Wichtigkeit ist der Markt, repräsentiert durch die (potenziellen) Kunden und den Wettbewerb. Der Markt bestimmt die Innovationszyklen und -schrittgrößen für ein Produkt und letztendlich den Preis.

Die *Produktkomplexität* hängt zum einen von der Systemgrenze des zu entwickelnden technischen Produktes, zum anderen aber auch von den zu realisierenden Anforderungen ab. Zweifelsohne ist der Entwicklungsaufwand für eine Anlage, z. B. ein Kraftwerk, höher als für eine Bohrmaschine und der für ein Passagierflugzeug höher als für einen Pkw. Nur sehr einfache Produkte können von einer Person allein entwickelt und konstruiert werden.

Innovation ist die am Markt erfolgreiche Platzierung eines Produktes, einer Dienstleistung oder eines Verfahrens, welches an sich neuartig ist oder zumindest neue Eigenschaften besitzt. Im Gegensatz dazu wird die reine Erfindung als *Invention* bezeichnet (Müller-Prothmann 2009). Gute Inventionen aus Deutschland, aus denen Firmen in anderen Ländern erfolgreiche Produkte generierten, sind z. B. der Computer, den Zuse erfand, oder der MP3-Player, dessen Datenkompressionsverfahren am Fraunhofer Institut in Erlangen entwickelt wurde. Erfolgreiche deutsche Innovationen sind hingegen das Automobil, das ja bekanntlich von Benz erfunden wurde, und die elektrische Lokomotive, deren Erfinder Siemens ist.

In der Regel bestimmt der Neuheitsgrad eines zu konstruierenden technischen Produktes auch den Entwicklungsaufwand (Abb. 1.3).

Eine *Wiederholentwicklung* erfordert den geringsten Aufwand und birgt nahezu kein Entwicklungsrisiko. Die technischen Unterlagen sind vorhanden. Sie müssen gegebenenfalls vor der Freigabe noch mal vom Konstrukteur geprüft werden. Aufwand entsteht nur dann, wenn entweder die Unterlagen den vormals tatsächlich produzierten Zustand nicht wiedergeben, sich der Produktentstehungsprozess im Unternehmen inzwischen geändert hat, z. B. durch Outsourcing, oder wenn bestimmte Zuliefererteile nicht mehr erhältlich sind.

Im letztgenannten Fall überschreitet man bereits die Grenze zur *Anpassentwicklung*, bei der, bis auf wenige kleinere Änderungen, die ursprüngliche technische Lösung beibehalten wird. Gleiches gilt für die *Variantenentwicklung*, bei der grundsätzlich die gleiche technische Lösung wie schon beim Vorgängerprodukt verwendet wird. Allerdings werden bestimmte Größen- oder Leistungsparameter verändert. In beiden Fällen sind die technischen Unterlagen zu überarbeiten. Bei bereits vorentwickelten modularen Produkten reduziert sich der Aufwand auf die Konfiguration der technischen Unterlagen aus dem vorhandenen Modulbaukasten.

Für den in der Literatur für alle Entwicklungen mit höherem Neuheitsgrad verwendeten Begriff der *Neuentwicklung*

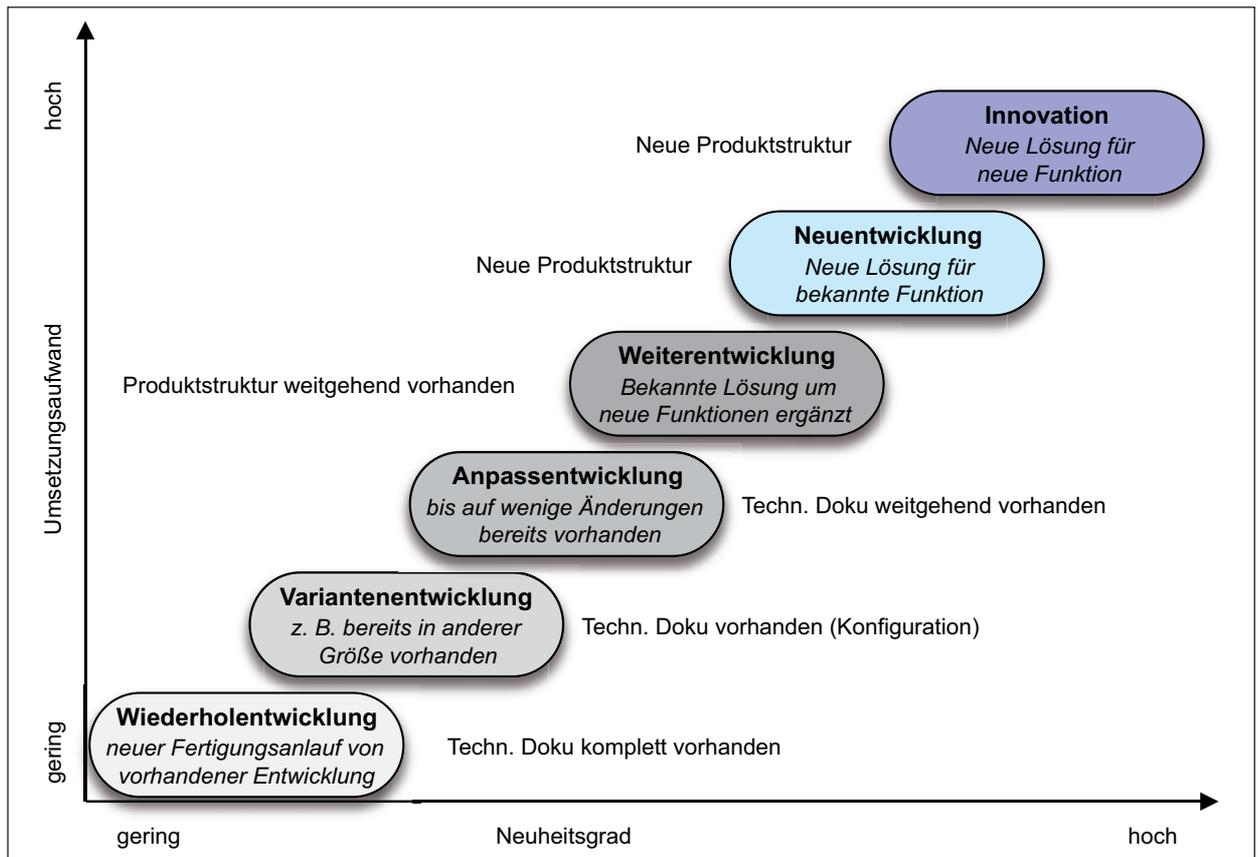


Abb. 1.3 Entwicklungen mit steigendem Neuheitsgrad und Umsetzungsaufwand

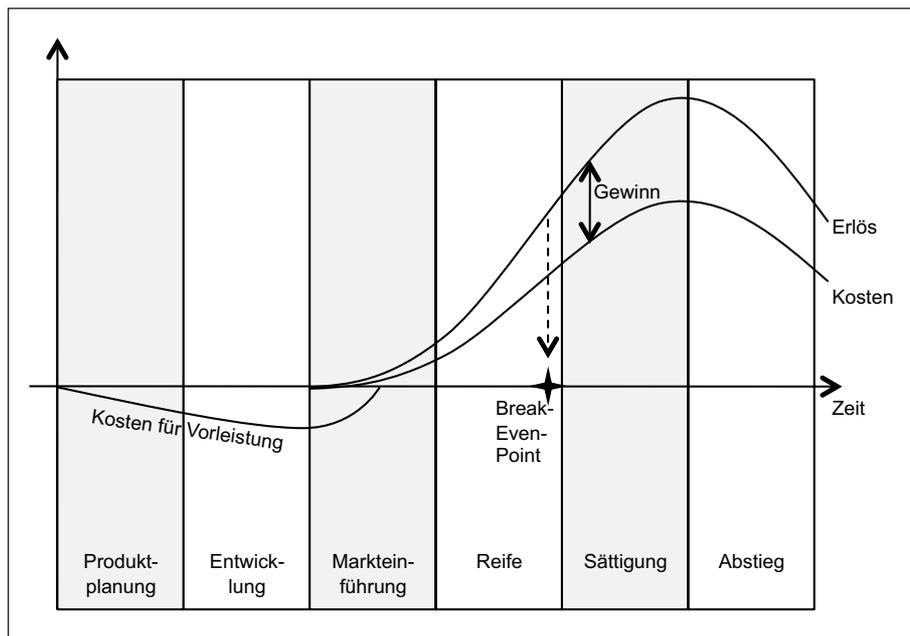


Abb. 1.4 Lebenszyklus (Modellzyklus) eines Produktes aus Sicht des Herstellers nach Ehrlenspiel et al. (Ehrlenspiel 2007)

oder *Neukonstruktion* besteht eine große Spannweite. Es wird vorgeschlagen, zwischen folgenden weiteren Innovationsstufen zu unterscheiden:

- Die *Weiterentwicklung* als die Entwicklung eines zwar neu anmutenden Produktes, welches sich nicht grundsätzlich durch die verwendete Lösung und die Produktstruktur vom Vorgänger unterscheidet, aber über einige neue Eigenschaften verfügt, z. B. die neue Serie eines bekannten Automobiltyps mit neuartiger Fahrwerkregelung.
- Die *Neuentwicklung*, bei der für eine bekannte Funktion eine innovative Lösung gefunden wurde, z. B. MP3-Player

als Nachfolger des Kassettenabspielgerätes. Hier ist in der Regel eine neue Produktstruktur zu erstellen.

- Die echte *Innovation* als Entwicklung eines Produktes mit neuer Lösung für eine bisher unbekannte Funktion, z. B. das Mobiltelefon oder der Fernseher.

Der Markt regelt zum einen den wirtschaftlichen Lebenszyklus eines Produktes, auch Modellzyklus genannt, in dem zum Ende der sogenannten Reifephase der Umsatz sinkt (siehe Abb. 1.4; Ehrlenspiel 1998). Gründe sind entweder Konkurrenzprodukte, die billiger, funktioneller oder

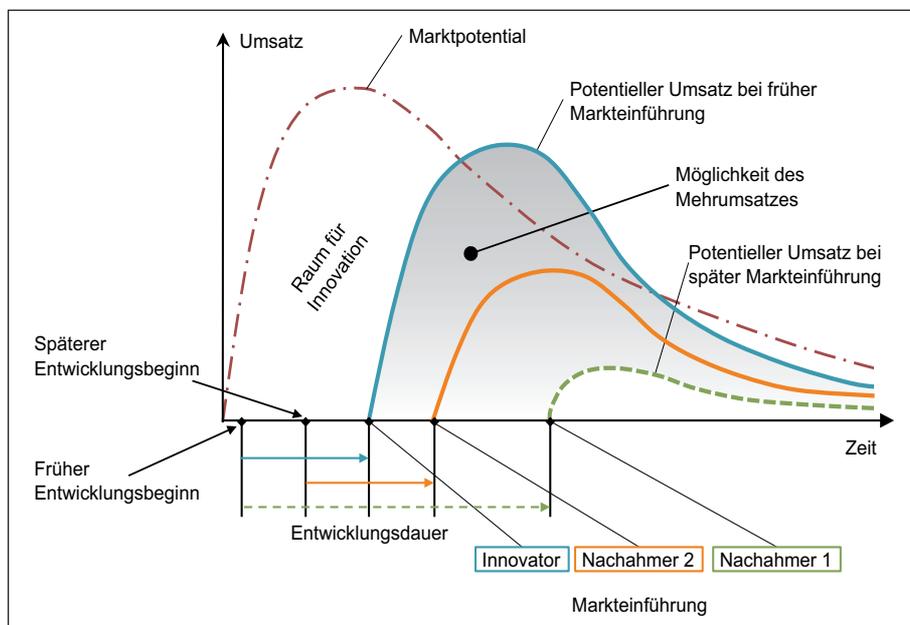


Abb. 1.5 Vorteil des Innovators gegenüber dem Nachzügler am Markt nach Kramer (Kramer 1997)

auch schicker sind, oder Neuentwicklungen, welche die nachgefragte Funktion über eine bessere Lösung anbieten. Im ersten Fall ist lediglich eine Weiterentwicklung des bestehenden Produktes erforderlich, wie seit Jahrzehnten z.B. in der Automobilindustrie üblich. Im Fall einer echten Innovation ist der Hersteller i.d.R. gezwungen, als sogenannter Nachahmer das neuartige Produkt deutlich billiger als der innovative Konkurrent am Markt zu platzieren, da er aufgrund verzögerten Erkennens des Innovationspotentials oder zu langer eigener Entwicklungsdauer das Produkt erst später anbieten kann (siehe Abb. 1.5; Kramer 1997). Beispiele erfolgreicher Innovatoren sind Toyota mit dem Hybridantrieb und Apple mit dem ersten Mobiltelefon mit berührungsempfindlichem Bildschirm, dem Smartphone.

1.2.3 Einflussmöglichkeiten während der Konstruktion

Der Einfluss des Konstrukteurs auf das Ergebnis der Entwicklung ist immens, und zwar nicht nur die technische Ausführung, sondern auch die Produktkosten betreffend. Laut Ehrlenspiel et al. legt der Konstrukteur durch seine Arbeit etwa 70% der Produktkosten fest, während er nur zwischen 2% und 10% selbst realisiert (siehe Abb. 1.6; Ehrlenspiel 2007). Eine zu dünne Personaldecke im Bereich Entwicklung und Konstruktion kann sich daher als kontraproduktiv erweisen.

1.2.4 Produktlebenszyklus

Am häufigsten wird unter dem Begriff *Produktlebenszyklus* die Abfolge der verschiedenen Abschnitte, die die

individuelle Ausführung eines Produktes von der ersten Produktidee (die noch der Gesamtheit aller ausgeführten Einheiten gilt) bis zur Entsorgung durchläuft, verstanden. Im Unterschied zum o. g. Modellzyklus wird er auch als intrinsisch bezeichnet (siehe Abb. 1.7; Pahl 2013).

Der Teil des Produktlebenszyklus, der die Phasen von der Produktidee bis zur Bereitstellung des Produktes (je nach Produktart vor oder nach der Inbetriebnahme) umfasst, wird als *Produktentstehungsprozess* bezeichnet. Er beginnt mit der Idee bzw. der strategischen Entscheidung eines Unternehmens, ein bestimmtes Produkt zu entwickeln, zu produzieren und am Markt anzubieten. In der *Produktplanungsphase* wird dieses Vorhaben weiter konkretisiert und endet in der Regel mit dem Auftrag an die Entwicklung, das Produkt zu konstruieren.

Nun beginnt der eigentliche Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozess, der Hauptgegenstand dieser Ausführungen ist.

1.3 Der allgemeine Lösungsprozess

Das Konstruieren und Entwickeln eines technischen Systems sowie jeder Teilschritt dieses Prozesses ist für den Konstrukteur ein zu lösendes Problem bzw. eine zu erledigende Aufgabe. Das allgemeine denkpsychologische Vorgehen zum Lösen einer Aufgabe ist dabei grundsätzlich gleich. Grob kann der Prozess in zwei Phasen, die der Analyse und die der Synthese unterteilt werden (siehe Abb. 1.8;



Abb. 1.6 Kostenfestlegung und -entstehung in verschiedenen Unternehmensbereichen nach Ehrlenspiel

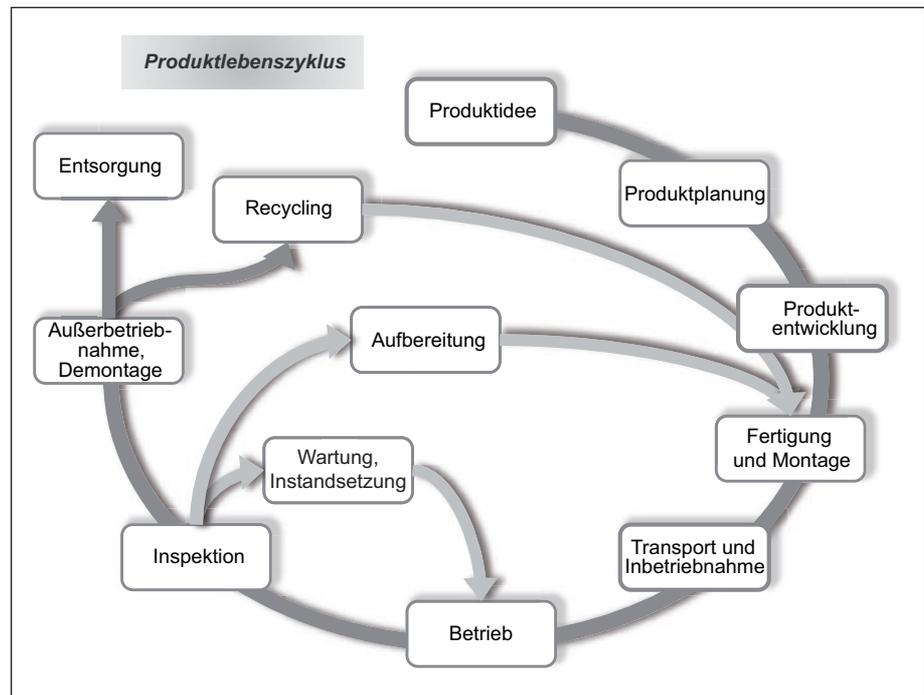


Abb. 1.7 Der intrinsische Produktlebenszyklus

Pahl 2013). In der Analysephase macht sich der Entwickler schrittweise mit dem Problem vertraut. Nachdem er die Aufgabe erhalten hat (Konfrontation), beschäftigt er sich eingehend mit dem Problem, um es zu verstehen, holt Hintergrundinformationen ein und versucht alle Unklarheiten zu beseitigen. Jetzt ist er in der Lage, das Problem für sich selbst vollständig zu definieren.

Nun beginnt die Synthesephase. Der Konstrukteur entwickelt mehrere Lösungsansätze. Durch Beurteilung anhand gegebener Kriterien ist er in der Lage, eine Entscheidung zu fällen, welche seiner Lösungen die Aufgabe am besten erfüllt.

Nach jedem Arbeitsschritt kann das Ergebnis überprüft werden. Entspricht es nicht den Anforderungen, so müssen ein oder mehrere Schritte im Lösungsprozess zurückgegangen werden und von dort aus muss das vorliegende Ergebnis verbessert, verändert oder ergänzt werden.

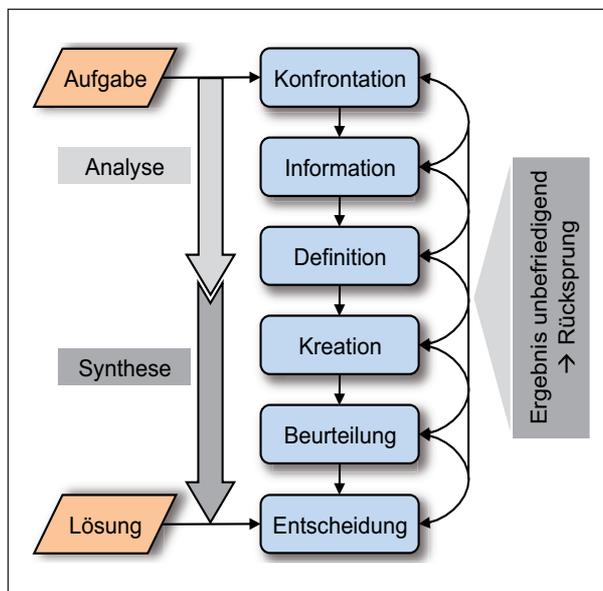


Abb. 1.8 Das Prinzip des Allgemeinen Lösungsprozesses nach Pahl/Beitz (Pahl 2013)

1.4 Der Konstruktionsprozess

Der allgemeine Konstruktions- oder Produktentwicklungsprozess ist in Abb. 1.9 gezeigt. Er gliedert sich in die vier Hauptphasen, wie sie bei Pahl/Beitz (Pahl 2013) beschrieben und allgemein anerkannt sind. Die VDI-Richtlinie 2221 kennt diese Phasen auch. Hier wird der Produktentwicklungsprozess aber anhand von sieben, den Phasen unterlagerten Arbeitsabschnitten beschrieben, während sich die vier Phasen überschneiden. Der Verfasser bevorzugt die gröbere Einteilung in streng sequenzieller Form, da sie einfacher ist, zu jeder Phase ein konkretes

Arbeitsergebnis liefert und die Aufgaben gegeneinander leichter abgrenzbar sind, was sie für die Einführung von Entwicklungsmeilensteinen im Sinne der Qualitätssicherung des Konstruktionsprozesses prädestiniert.

In der *Spezifikationsphase* muss sich der Konstrukteur oder die Gruppe von Konstrukteuren, der/die mit einer Produktentwicklung betraut wird, über die Aufgabenstellung klar werden, sie möglichst weitgehend vervollständigen, präzisieren und konkretisieren. In der Literatur wird diese Phase meist mit „Planen und Klären der Aufgabe“ beschrieben, woraus oftmals der Begriff Planungsphase resultiert (Pahl 2013, Koller 1994). Treffender ist der Begriff Spezifikationsphase, da das Resultat dieser Phase die technische Spezifikation bzw. das sogenannte Pflichtenheft für das zu entwickelnde Produkt ist, während die Planungsphase oft mit der dem Konstruktionsprozess vorgelagerten Produktplanungsphase des Produktentstehungsprozesses verwechselt wird (vgl. Abb. 1.7).

In der *Konzeptphase* werden die prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten zur Erfüllung der gestellten Aufgabe entwickelt und die bevorzugte Prinziplösung wird anhand von aus der Spezifikation resultierenden Bewertungskriterien und ggfs. grober vergleichender Berechnungen ausgewählt.

In der *Gestaltungsphase* wird das zu konstruierende technische System auf Basis des gefundenen Lösungskonzeptes sukzessive und iterativ konkretisiert. Neben Maßen, Werkstoffen und weiteren technischen Eigenschaften sind hier auch die wirtschaftlichen Gesichtspunkte zu berücksichtigen. In dieser Phase finden außerdem die dimensionierenden Berechnungen und Versuche statt. Nach Pahl/Beitz ist diese dritte Phase die „Entwurfsphase mit dem Ziel der gestalterischen Festlegung des Produktes“. Entwerfen wird als „Gestalten plus Vervollständigen und Kontrollieren“ definiert (Pahl 2013). Nach Koller werden die Begriffe *Entwerfen* und *Gestalten* synonym verwendet (Koller 1994). Im deutschen Sprachgebrauch ist der Begriff *Entwurf* aber gleichbedeutend mit dem Begriff *Konzept*, was in der Konstruktionsmethodik eben streng unterschieden wird (Dt. Wortschatz 1998). Deshalb wird hier konsequent der Begriff *Gestaltung* verwendet.

In der *Ausarbeitungsphase* sind die technischen Unterlagen zur Herstellung, zum Betrieb, zur Instandhaltung und ggf. zur Entsorgung des Produktes zu vervollständigen und zu

prüfen, bevor sie für die Produktion oder die Beschaffung freigegeben werden können.

1.5 Die Spezifikationsphase

Die Aufgabe, sich vor Beginn der eigenen Überlegungen ein umfassendes Bild von der durchzuführenden Konstruktion zu machen, wird in ihrer Wichtigkeit für den Erfolg einer Produktentwicklung von den meisten Konstrukteuren unterschätzt. Viele glauben zu wissen, wie ihre Aufgabenstellung lautet und was die Wünsche ihrer Kunden sind. In der Regel haben sie bereits eine Lösung im Kopf und brennen darauf, diese weiterzuentwickeln und möglichst schnell „aufs Papier“ zu bringen bzw. als 3D-CAD-Modell im Computer aufzubauen.

Durch dieses in der Praxis auch aufgrund vermeintlichen Zeitdrucks weit verbreitete Vorgehen wird in zahlreichen Entwicklungsprojekten viel Geld verschwendet und die Innovationspotentiale werden nur ungenügend ausgeschöpft. Nicht nur, dass die „erstbeste“ Lösung in der Regel nicht die beste ist. Es passiert auch oft, dass der Konstrukteur während der Entwicklung merkt, dass seine Lösung gar nicht alle Anforderungen erfüllt. Er muss aufwendig nachbessern und im schlimmsten Fall sogar jetzt noch nach einer neuen Prinziplösung suchen. Er gerät nun in echten Zeitdruck und es ist vorherzusehen, dass auch die neue Lösung nicht optimal sein wird. Bei Fertigung, Inbetriebsetzung und auch in der frühen Anwendungsphase zeigen sich dann die Schwächen des halbherzig entwickelten Produkts.

Um diese Fehler zu vermeiden, ist eine gründliche Vorbereitung auf die Konstruktionsaufgabe unumgänglich. Ergebnis dieser Phase ist eine auf Basis des Lastenheftes (falls vorhanden) erstellte vollständige Liste aller Anforderungen und Randbedingungen, die übersichtlich geordnet, priorisiert und weitestgehend quantifiziert sind. Bei größeren Projekten ist es üblich, daraus ein Pflichtenheft, auch technische Spezifikation genannt, zu erstellen (Abb. 1.10).

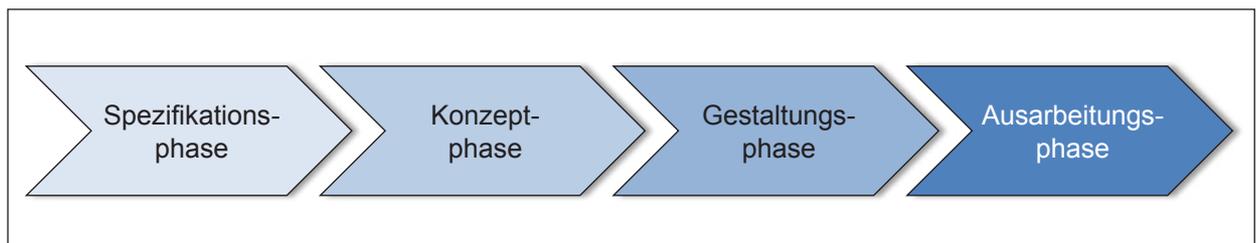


Abb. 1.9 Der Produktentwicklungsprozess in Anlehnung an VDI 2221 und Pahl/Beitz (VDI 2221, Pahl 2013)

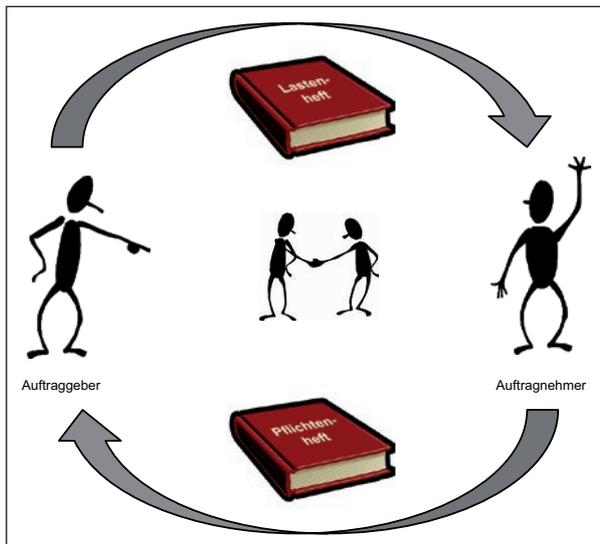


Abb. 1.10 Lasten- und Pflichtenheft als Grundlage des Entwicklungsauftrags

1.5.1 Lasten- und Pflichtenheft

Die Begriffe *Lastenheft* und *Pflichtenheft* werden oftmals verwechselt. Sie sind u. a. in der VDI/VDE-Richtlinie 3694 definiert (VDI/VDE 3694).

Danach ist das *Lastenheft* die Zusammenstellung aller Anforderungen des Auftraggebers hinsichtlich Liefer- und Leistungsumfang eines Auftragnehmers. „Im Lastenheft sind die Anforderungen aus Anwendersicht (Kundensicht) einschließlich aller Randbedingungen zu beschreiben. Diese sollten quantifizierbar und prüfbar sein. Im Lastenheft wird definiert, was für eine Aufgabe vorliegt und wofür diese zu lösen ist“ (Zitat VDI/VDE 3694).

In der Regel ist das Lastenheft ein in Prosa gehaltenes Dokument. Der Ersteller ist der Auftraggeber. Er ist somit für den Inhalt verantwortlich. Ein gutes Lastenheft ist funktional und lösungsneutral verfasst, um dem Auftragnehmer maximale Freiheit zu geben, die beste mögliche Lösung zu realisieren, und ihn nicht bereits durch Vorgabe einer bestimmten Lösung in seiner Kreativität einzuengen.

Im Anlagen- und Investitionsgütergeschäft sind umfangreiche Lastenhefte üblich. Hier besteht sogar eher die Tendenz zum Überspezifizieren. Aber auch bei komplexen industriellen Massenprodukten, wie z. B. Pkws, sind Lastenhefte gebräuchlich. Hier werden sie nur nicht vom Kunden, der ja in diesem Geschäft vorher nicht bekannt ist, sondern von der Unternehmensleitung bzw. einem von ihr beauftragten interdisziplinären Team aus Spezialisten erstellt, die sich vorher u. a. ein Bild von den Marktanforderungen gemacht haben.

Jedoch nicht jeder Konstruktions- und Entwicklungsauftrag wird per Lastenheft vergeben. Gerade im Mittelstand werden kleinere Aufträge auch heute noch spärlich dokumentiert. Oft erhält der Konstrukteur einen Auftrag lediglich durch ein kurzes Gespräch mit seinem Vorgesetzten. In diesem Fall ist es ratsam, sich eine Besprechungsnotiz anzufertigen, die man ggfs. dem Vorgesetzten zur Bestätigung zusendet.

Das *Pflichtenheft* ist die Antwort des Konstrukteurs bzw. seines Unternehmens auf das Lastenheft. Nach VDI/VDE 3694 beschreibt es die Realisierung aller Anforderungen des Lastenhefts. „Im Pflichtenheft werden die Anwendervorgaben (Kundenvorgaben) detailliert und in einer Erweiterung die Realisierungsforderungen unter Berücksichtigung (erster) konkreter Lösungsansätze beschrieben. Im Pflichtenheft wird definiert, wie und womit die Forderungen zu realisieren sind.“ (Zitat VDI/VDE 3694).

Pflichtenhefte werden meist in größeren Unternehmen erstellt, die es gewohnt sind, Produkte umfangreich zu spezifizieren. Kleinere Unternehmen erstellen oft auch dann kein Pflichtenheft, wenn sie von ihrem Auftraggeber ein umfangreiches Lastenheft bekommen haben.

Wichtig ist es, dass das Pflichtenheft nicht als internes Dokument zur konkreteren Anforderungsbeschreibung, sondern als offizielles Dokument angesehen wird. Dabei ist darauf zu drängen, dass der Auftraggeber sich das Pflichtenheft anschaut und seinen Inhalt bestätigt. Nur so kann der Konstrukteur sicher sein, dass er seinen Kunden richtig verstanden hat und er die richtige Lösung entwickelt (Abb. 1.10).

1.5.2 Der Subprozess der Spezifikation

In der Spezifikationsphase sind alle Anforderungen und Randbedingungen für das zu entwickelnde Produkt zusammenzustellen, zu analysieren, zu ordnen, zu gewichten, zu konkretisieren und zu vervollständigen, ggfs. zu hinterfragen und zu erweitern, und schließlich mit dem Auftraggeber abzustimmen (Abb. 1.11).

Im ersten Arbeitsschritt *sammelt* der Konstrukteur alle Anforderungen, indem er z. B. zunächst das Lastenheft durcharbeitet und alle gefundenen Anforderungen und Restriktionen in einer Liste dokumentiert. Liegt kein Lastenheft vor, so muss er sich auf die ggfs. spärliche schriftliche Aufgabenstellung oder seine Erinnerung an die mündliche Aufgabenstellung durch den Kunden oder den Vorgesetzten stützen. Ergänzend sollte er sich Informationen aus Marktstudien und durch Rücksprache beim Auftraggeber einholen. Eine Recherche über Anforderungen zu ähnlichen Aufgabenstellungen, publizierte oder interne Forschungsergebnisse, Benchmarks mit Konkurrenzprodukten sowie die Abfrage des Erfahrungswissens

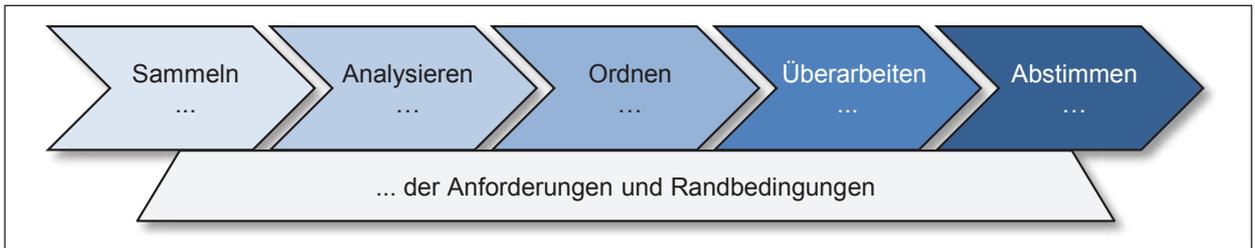


Abb. 1.11 Arbeitsschritte in der Spezifikationsphase

im eigenen Unternehmen können zusätzliche wertvolle Hinweise liefern.

Dabei dürfen die Randbedingungen und Restriktionen für die Lösung der Aufgabe nicht außer Acht gelassen werden. Termine, Budget und Ressourcen sind die offensichtlichen Restriktionen für fast jedes Projekt. Aber auch Gesetze, Normen und Richtlinien sowie die Möglichkeiten des eigenen Unternehmens schränken die Lösungsmenge ein. Hat zum Beispiel ein Unternehmen keine Erfahrung im Schweißen von Aluminium und soll die Schweißbaugruppe aber im Haus gefertigt werden, so ist der Konstrukteur gezwungen, eine solche Fügetechnik und/oder einen solchen Werkstoff zu verwenden, die/der im Unternehmen beherrscht wird, es sei denn, das Management entschließt sich, die Schweißer des Unternehmens im Aluminiumschweißen auszubilden.

Wichtig ist es auch, die Anforderungen zu erkennen, die nicht explizit im Lastenheft formuliert sind. Diese impliziten Anforderungen werden vom Kunden als selbstverständlich angesehen, sodass er gar nicht darauf gekommen ist, sie im Lastenheft zu erwähnen. Dazu gehören immer die grundlegenden Anforderungen an ein Produkt. So muss ein Auto an einer herkömmlichen Zapfsäule ohne weitere Hilfsmittel einfach betankbar sein. Ein Notebook muss ein Netzteil und ein Kugelschreiber eine versenkbare Schreibspitze haben. Es ist wichtig, diese versteckten An-

forderungen vollständig zu erkennen, da bei Nichterfüllung das Projekt mit Sicherheit scheitert.

Auch sogenannte Attraktivitätsanforderungen sind in der Regel impliziter Art, da der Kunde sie zwar gern als „add on“ mitnimmt, dafür aber nicht bereit ist zu zahlen und sie deswegen nicht spezifiziert. Verchromte Zierleisten am Pkw wären so ein Beispiel.

Einfacher hingegen sind die im Lastenheft explizit erwähnten Anforderungen, z. B. nach einem Kofferraumvolumen von 400 Litern.

Glaubt der Konstrukteur, ausreichend Informationen über seine Aufgabe gesammelt zu haben, so folgt die *Analyse*. Zunächst muss er sich über den Zweck, den Wesenskern bzw. die Hauptfunktion des von ihm zu entwickelnden technischen Produktes klar werden. Dies muss lösungsneutral geschehen (Tab. 1.1).

Dabei ist es wichtig zu erkennen, wo die Grenzen der Innovation für eine Konstruktionsaufgabe liegen. Die Aufgabe „Entwicklung eines Rasenmähers“ kann durchaus neutral als „Entwicklung einer Lösung zur Begrenzung der Länge des Rasens“ formuliert werden. Neben der hergebrachten Art, ein technisches System (Rasenmäher) zu konstruieren, mit dem der Rasen von Zeit zu Zeit durch Abschneiden gekürzt wird, ist es durchaus denkbar, per Gentechnik einen Rasen zu entwickeln, der nur eine bestimmte Höhe erreicht. Für ein Unternehmen, das Gartenmaschinen

Tab. 1.1 Lösungsneutrale Formulierung des Zwecks bekannter technischer Systeme

Produkt	Zweck
Mobiltelefon	ortsunabhängiges Kommunizieren ermöglichen
Fahrrad	eine Person und kleine Güter transportieren
Fahrradbremse	Geschwindigkeit des Fahrrades reduzieren
Kran	Transport von Gütern im Raum durchführen
Rasenmäher	Kürzen des Rasens auf eine definierte Länge
Fenster	Tageslichtdurchlässig und offenbar vor der Witterung schützen
Eimer	Speichern von Stoffen
Kopierer	Daten vervielfältigen
Türschloss am Auto	ungewolltes Öffnen verhindern

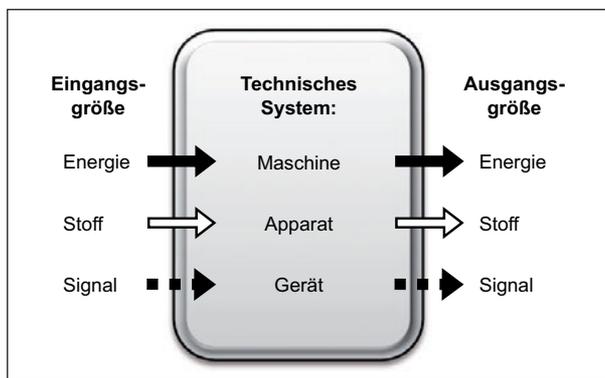


Abb. 1.12 Das Black-Box-Modell nach Rodenacker

produziert, wäre letztgenannte Lösung allerdings eher geschäftsschädigend.

Beim Identifizieren des Zwecks kann die sogenannte „Black-Box-Methode“, die der Systemtechnik entstammt, helfen (Abb. 1.12).

Nach Rodenacker kann man jedes technische System danach beurteilen, ob seine Hauptaufgabe (der Zweck) der Umsatz von Energie, Stoffen bzw. Materie oder Signalen bzw. Information ist (Rodenacker 1976). Beispielsweise ist ein Verbrennungsmotor in erster Linie ein Energiewandler, ein Druckbehälter ein Stoffspeicher und ein Telefon ein Signalwandler. Energieumsetzende technische Systeme sind demnach Maschinen, stoffumsetzende werden als Apparate und signalumsetzende als Geräte bezeichnet. Insofern ist die Bezeichnung Telefon- oder Fernsehapparat falsch. Natürlich werden i. d. R. auch die beiden anderen Größen, die nicht das Wesen des gerade behandelten technischen Systems ausmachen, in ihm umgesetzt. So wandelt ein Verbrennungsmotor (Kraft)stoffe in Energie und Abgase. Ein Telefon benötigt für die Signalübertragung elektrische Energie.

Ist der Zweck des zu konstruierenden Systems identifiziert, kann die Anforderungsliste aufgestellt werden. Dazu ist es ratsam, ein Formular zu entwickeln, das nach den Regeln des Dokumentenmanagements geführt wird (Tab. 1.2). Sinnvollerweise wird so ein Dokument im Unternehmen z. B. per Werksnorm standardisiert.

Neben den allgemeinen Informationen zum Unternehmen bzw. zur bearbeitenden Abteilung (Benutzer), zum aktuellen Projekt/Produkt sollte der Zweck des Systems angegeben werden. Schon für kleinere Konstruktionsaufgaben kann die Zahl der Anforderungen leicht dreistellig werden, bei großen Entwicklungsprojekten geht sie in die Zehntausende. In jedem Fall wird empfohlen, eine sinnvolle Gliederung der Anforderungen vorzubereiten. Bei Varianten-, Anpass- und Weiterentwicklungen, also dort, wo die Produktstruktur zumindest auf oberer Ebene bekannt ist, wird dies häufig nach Subsystemen oder Baugruppen durchgeführt. Alternativ kann dann nach charakterisierenden Stichpunkten (vgl. Leitlinie) weiter untergliedert werden. Auch eine Unterteilung nach bearbeitenden Abteilungen oder Personen kann sinnvoll sein. Oben sollten die für das Gesamtsystem geltenden wichtigsten Anforderungen und Restriktionen stehen.

Die breiteste Spalte ist für die qualitative Beschreibung der Anforderungen zu reservieren. Eintragungen lauten z. B. „Schutz gegen Oberflächenkorrosion“. In der quantitativen Beschreibung würde dies mit Zahlen hinterlegt, z. B. „7 Jahre“. Dann folgt die Spalte „Anforderungsart“, in der später nach Forderungen (muss) und Wünschen (kann) unterschieden wird.

Wichtig ist es, die Quelle der Anforderung zu dokumentieren. Später werden den einzelnen Anforderungen verantwortliche Personen oder Organisationseinheiten zugeordnet, die deren Erfüllung sicherstellen müssen. Da Anforderungen nicht vollständig zu einem Zeitpunkt

Tab. 1.2 Formaler Aufbau einer Anforderungsliste

Benutzer		Anforderungsliste für ein Regalbediengerät				Identifikations-/ Klassifikationsnr.	
						Blatt: Nr.	Seite: Nr.
Zweck, Aufgabe:							
Gliederung	Anforderung		Anforderungsart	Eingabe-/ Änderungsdatum	Verantwortung	Quelle	
	qualitativ	quantitativ					
1.	1.1						
	1.2						
	1.3						
2.	2.1						
	2.2						
	2.3						



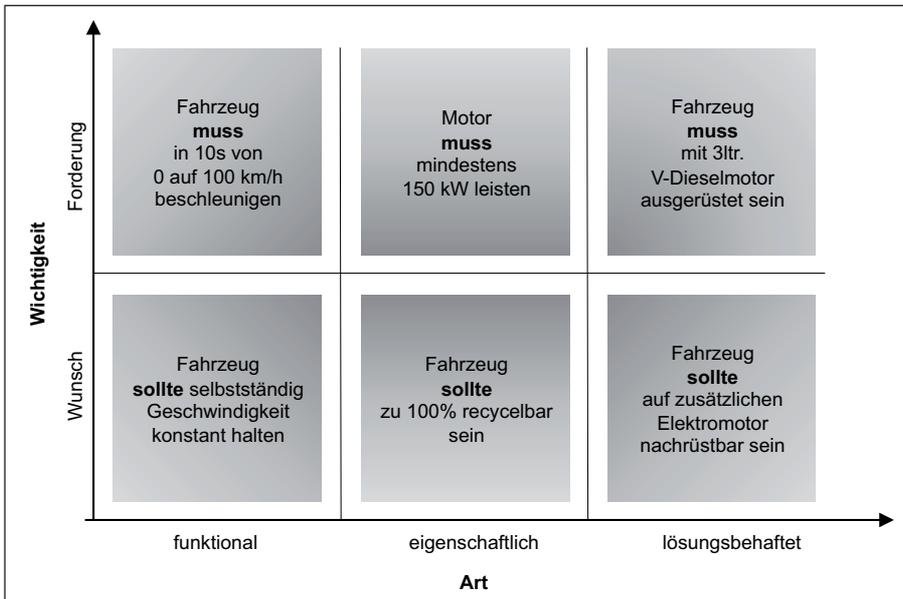


Abb. 1.13 Anforderungsarten

verfügbar sind, bietet es sich an, das Eingabedatum, oder im Fall einer Anforderungsänderung das Änderungsdatum, einzutragen.

Es gibt verschiedene Arten von Anforderungen (Abb. 1.13). Zunächst einmal ist zwischen Forderungen und Wünschen zu unterscheiden. Korrekt im Lastenheft beschrieben wäre eine Forderung mit „muss“, „darf nicht“ o. Ä. und ein Wunsch mit „sollte“, „kann“, „darf“ oder synonym. Hier ist jedoch Vorsicht geboten, da sich z. B. auf Nachfrage beim

Kunden oft herausstellt, dass mit einer Sollte-Formulierung eine Muss-Forderung gemeint ist.

Des Weiteren unterscheidet man zwischen funktionalen, eigenschaftlichen und lösungsbehafteten Anforderungen. Erstere sind am besten geeignet, da sie später einfach in Funktionen überführt werden können. Eigenschaftliche Anforderungen, wie z. B die Farbe oder das Design, können manchmal nicht in Funktionen überführt werden und werden oft erst zu einem späteren Zeitpunkt wichtig. Am Bei-

Tab. 1.3 Checkliste als Leitlinie zum Ordnen und Vervollständigen von Anforderungen nach Pahl 2013

Hauptmerkmal	Ausgewählte Beispiele
Geometrie	Größe, Höhe, Breite, Länge, Durchmesser, Anordnung, Erweiterung
Kinematik	Bewegungsart, Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit, Beschleunigung
Kräfte	Kraftgröße, -richtung, -häufigkeit, Gewicht, Last, Verformung, Resonanz
Energie	Leistung, Wirkungsgrad, Verlust, Reibung, Ventilation, Kühlung
Stoff	physikalische und chemische Eigenschaften des Ein- und Ausgangsstoffes
Signal	Eingangs- und Ausgangssignale, Anzeigeart, Signalform
Sicherheit	unmittelbare Sicherheitstechnik, Schutzsysteme
Ergonomie	Mensch-Maschine-Beziehung: Bedienung, Bedienungsart, Übersichtlichkeit
Fertigung	Einschränkung Produktionsstätte, Qualität und Toleranzen
Kontrolle	Mess- und Prüfmöglichkeit, besondere Vorschriften (TÜV, ASME, DIN, ISO, AD)
Montage	Zusammenbau, Einbau, Baustellenmontage, Fundamentierung
Transport	Begrenzung durch Hebezeug und Transportweg, Versandbedingungen
Gebrauch	Geräusche, Verschleiß, Anwendung und Absatzgebiet, Einsatzort
Instandhaltung	Wartungsfreiheit, Inspektion, Austausch und Instandsetzung
Recycling	Wiederverwendung, Wiederverwertung, Entsorgung, Endlagerung
Kosten	max. zulässige Herstellkosten, Werkzeugkosten, Investition und Amortisation
Termin	Ende der Entwicklung, Netzplan, Lieferzeit

Tab. 1.4 Beispiel für die Konkretisierung von Anforderungen

<p>1. Der Bediener darf nicht ermüden.</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ einstellbare Arbeitshöhe (zw. 80 u. 100 cm) ■ geringe Hitzeausstrahlung (< 30 ° C in 0,5 m Abstand) ■ angenehme Farbgestaltung ■ ergonomische Bedienelemente (nach DIN ...) 	<p>2. Das Bedienungsprinzip muss leicht verständlich sein.</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ übersichtliche Grundelemente ■ wenige Grundelemente
---	--

spiel in Abb. 1.13 erkennt man aber, dass eine eigenschaftliche Forderung, hier die Leistung eines Motors, durchaus in eine funktionale (z. B. links daneben) überführt werden kann, wenn man den technischen Grund für die Forderung beim Auftraggeber hinterfragt und er, wie in diesem Fall, nicht aus Prestigegründen auf der Forderung beharrt. Gleiches gilt für die oft vorkommenden, aber die Lösungsvielfalt stark einschränkenden lösungsbehafteten Anforderungen. Ziel muss es demnach sein, möglichst viele Anforderungen in funktionale zu überführen.

In der Regel werden die Anforderungen zunächst unsortiert oder anhand einer Grobgliederung in die Liste eingefügt. Alle bekannten Informationen werden in die entsprechenden Spalten eingetragen. Zum besseren Ordnen der Anforderungen bieten sich die Hauptmerkmale der sogenannten Leitlinie an (Tab. 1.3).

Nach dem Ordnen folgt die gründliche *Überarbeitung* der Anforderungsliste. D. h. die Anforderungen müssen, wo irgend möglich, konkretisiert und quantifiziert werden. Dazu ein Beispiel:

Die Lastenheftforderung für eine Werkzeugmaschine lautet „leichte Bedienbarkeit“. Der Konstrukteur sollte sich im ersten Schritt, ggfs. im Dialog mit dem Auftraggeber, darüber klar werden, was damit genauer gemeint ist, nämlich z. B.:

1. Der Bediener darf nicht ermüden.
2. Das Bedienungsprinzip muss leicht verständlich sein.

In einer zweiten Konkretisierungsstufe ergeben sich dann vielleicht die in Tab. 1.4 formulierten Forderungen.

Weiterhin ist zu prüfen, ob nicht noch weitere Anforderungen vergessen wurden. Als Assoziationshilfe kann man sich dabei der Stichpunkte der rechten Spalte aus Tab. 1.3 bedienen. Um dies zu unterstützen, bietet die Konstruktionswissenschaft noch eine zweite Methode, die Szenariomethode. Hier geht der Konstrukteur gedanklich alle potenziellen Lebenssituationen des zu entwickelnden Produktes durch und prüft, welche Anforderungen hier notwendig sein könnten. Es wird empfohlen, zunächst die Leitlinie und danach die Szenariomethode anzuwenden.

In Tab. 1.5 ist ein Auszug einer vollständig ausgefüllten Anforderungsliste gezeigt. Ist sie fertiggestellt, so sollte sie mit dem Auftraggeber durchgesprochen und von diesem gegengezeichnet werden. Bei größeren Konstruktionsprojekten wird aus der Liste der Anforderungen das Pflichtenheft entwickelt. In den letzten Jahren haben sich verstärkt sogenannte Anforderungsmanagementprogramme etabliert. Sie ermöglichen neben der Dokumentation der Anforderungen auch ihre Verwaltung während des Produktlebenszyklus, z. B. können Anforderungen rückverfolgt, geändert und versioniert werden (Stephan 2013).

Tab. 1.5 Vollständig ausgefüllte Anforderungsliste (Auszug)

Schindler				Anforderungsliste für ein Regalbediengerät				KIMA 2012-001			
								Blatt: Nr. 1 Seite: Nr. 1			
Zweck, Aufgabe: <i>Ladeeinheit an frei wählbaren Lagerplätzen störungsfrei ein- und auslagern</i>											
Gliederung		Anforderung		Anforderungsart	Eingabe-/Änderungsdatum	Verantwortung	Quelle				
								qualitativ	quantitativ		
1. Geometrie	1.1	unterschiedliche Masthöhen	3 m - 30 m	F	01.02.10	Müller	LH				
	1.2	Schienenprofil als Halbzeug	HEB 160	W	22.02.10	Meier	Kunde				
	1.3	Transportfähigkeit der Bauteile	Max. 11 m	F	05.04.10	Wagner	Abt. 3				
2. Kinematik	2.1	Fahrgeschwindigkeit	5 m/s	F	23.04.10	Huber	LH				
	2.2	Beschleunigung	4 m/s ²	F	09.03.10	Mayer	LH				
	2.3	Positionierung	0,5 s	W	10.03.10	Schmidt	LH				
3. Kräfte	3.1	Zuladung	500 kg	F	09.03.10	Wagner	LH				
	3.2	Pufferfahrt	10 m/s ²	F	19.10.10	Huber	EN 1222				

F - Forderung, W - Wunsch, LH - Lastenheft

Stichwortverzeichnis

Symbole

2D-CAD-Systeme 215
3D-CAD-Systeme 215
3D-Datenaustausch. *Siehe CAx-Datenaustausch*
3D-Drucken 1007
 α -Eisen 10
 γ -Eisen 10
 δ -Eisen 10

A

A-Bewertung 346 f.
Ablaufdiagramm 299
Ablaufkette 299
Ablaufsprache, AS 303
Ablaufsteuerung 295
Ablaufverwaltung 1024
Abmaßverarbeitung 899
Abschätzverfahren für die Körperschallfunktion 359
Absorption 687
Abstrahlgrad 355, 359, 365, 665, 695
– Reduktion 365
Abstrahlmaß 357, 359 f., 697
Abstraktion 749
abtragswirksame Geometrie 1111
Abtrennverhalten 1106
Achsenbezeichnungen 965
Achsen 170
Acoustic Emission 707
Acrylatklebstoffe 1221
Activity Based Costing 779
Adaption 433
Additive Fertigungsverfahren 490, 997
Admittanz 356, 664
Affinitätsdiagramm 872
Aftermarket 824, 838
After-Sales-Service 824
Ähnlichkeit
– geometrische 787
– geometrische Halb- 787
aktive Maßnahmen der Geräuschminderung 361
Aktor 313, 323
akustische Diagnosetools 646
akustische Grenzkurven 655
akustische Grenzwerte 655
akustische Istzustandsmessung 646
akustische Machbarkeitsanalyse 666
akustische Modellgesetze 644
akustische Produktfreigabe 646
akustischer Biegewellenkurzschluss 360
akustischer Fingerprint 645, 673
akustischer Kurzschluss 360 f., 695
akustische Transferfunktion 356
– Pegel 357
akustische Zustandsüberwachung 707
Alarmmethode 889
Allgemeine Gestaltungsregeln
– bei Kunststoffkonstruktionen 36
Allgemeintoleranzen 241
AltfahrzeugV 524
Aluminium
– Eigenschaften 22
– Einteilung von Aluminiumwerkstoffen 22
– Legierungsgruppen 23
– Werkstoffzustände 23
Aluminiumlegierungen 500
Amplitude 343
AMR 327 f.
Analogiebetrachtungen 431
Analyse 420
Analysephase 875
Analyseverfahren
– mathematische 990
Analyseziel 756
Analyse-Phase 883
Änderungen 787
Anforderungen 423
– eigenschaftliche 426
– explizite 424
– funktionale 426
– lösungsbehaftete 427
Anforderung Feingestalt 1116
Anforderungsarten 426
Anforderungsliste 425, 647

Anguss 41
Anisotropie 56
Anpassentwicklung 418
Anregungskraft 358, 362f., 656, 664
– Reduktion 362f.
Anregungsmechanismen 675
Anregungsstelle 656
Anti Vibration Control (AVC) 702
Antriebe
– elektromechanische 247
Antriebsauslegung 251
Antriebssysteme 278
– Komponenten 258
Anweisungsliste, AWL 303
Anwendungsmerkmale 1074
Apparatebau 1179, 1205
äquivalenter Dauerpegel 351
Aramidfaser 503
Arbeit
– Grundgleichung 249
Arbeitnehmererfindungen 801
Arbeitsfolge je Fertigungsschritt 1109
Arbeitsprozesse 252
Arbeitsraum 317, 1112
Arbeitsraumdimensionen 1113
Arbeitssystem 586
Arbeitssystemmodell 585
Arbeitsvorbereitung
– beim Schweißen 1198
Argumentationsdokumentation 1019
Artificial Neural Networks (ANN) 512
Ashby 6
Assimilieren 627
Assoziativität 216, 749
Attraktivitätsanforderungen 424
Ätzverfahren 1134
Aufarbeitung 521
Aufbau und charakteristische Merkmale der Metalle 6
Aufbereitung 522
Aufgabenstellung 781
Aufgabenteilung 452
Aufmaß 1011
Aufrüsten 522
Aufwerfen der Anbindung 41
Ausarbeitungsphase 422, 457
Ausfallfreie Zeit 126
Ausfallrate 123
Ausfallverhalten 123
Ausfallwahrscheinlichkeit 123
Ausgleichskupplungen 272
Ausgleichsschlitze 675
Aushärtung
– beim Kleben 1228

Auslegung 458
Auslegungsrechnungen 458
Aussagefähigkeit 763
Austauschteile 837f.
Austauschteileproduktion 839
Auswahl von Fertigungsverfahren 1108, 1110
– Feingestalt 1108
– Grobgestalt 1108
– Wirtschaftlichkeit 1108
Automatenstähle 20
Automobil-Servicekonzepte 833
AVC 702
axonometrische Darstellung 206

B

Badewannenkurve 123, 127
Balance3D 474
Balkenstatik 70
Bandbreite 352
Banding 750
Bandschleifen 1102
Batteriegesetz 525
Baueinheit 293
Baugröße 781
Baugruppen 921, 925f., 928, 930
Baukastenstruktur 1084
Baukasten-Stückliste 1081, 1083f.
Baumdiagramm 872
Baustahl 19
– Preis 8
Baustuktur 443
Bauteilerfassung 899
– zerstörende Bauteilerfassung 900
– zerstörungsfreie Bauteilerfassung 900
Bauteilgröße 1010
Bauweisen 490
B-Bewertung 346
Beanspruchung 80
– einachsige 69
– mehrachsige 74
– ruhende 85
– schwingende 83
Beanspruchungsberechnung 447
Bearbeitungsaufmaße 1116
Bearbeitungsverfahren 1106
Behälterbau 1179, 1205
Beitragsanalyse 646, 707, 709
Belastung 110
BEM 643
Bemaßung 212
Bemaßungsinformation 210
Benchmarking 431, 643, 663

- Benennung von Werkstoffen 8
 - Berechnungswerkzeuge 497
 - berührungslose Messverfahren 900
 - Computertomografie (CT) 901
 - Interferenzmessverfahren 901f.
 - Laserscanning 901f.
 - Lichtschnittverfahren 900
 - Magnetresonanztomografie (MRT) 901
 - Schallmesstechnik 901f.
 - Shape from Shadow (SFS) 901f.
 - Streifenprojektionsverfahren 900
 - Beschaffenheitsmerkmale 1074
 - Beschleunigung 258
 - Beseitigen von Abfall 522
 - Betrieb 456
 - Betriebseingriffswinkel 177
 - Betriebsfestigkeit 111
 - Betriebskraft 140, 358
 - Betriebspunkt 252
 - Beulen 493
 - Beulung 97
 - Beurteilungspegel 351
 - Bewegungen
 - Grundgleichungen 249
 - Bewegungsschrauben 138
 - Bewertung 346, 432
 - A-Bewertung 346f.
 - B-Bewertung 346
 - C-Bewertung 346
 - multikriterielle 476
 - Z-Bewertung 346
 - Bewertung Luftschallpegel 651
 - Bewertungskurven 346f.
 - Beziehungsart 745, 750, 763
 - Beziehungsmerkmale 1074
 - Bézier-Darstellungen 914
 - Bézier-Kurve 915
 - Bezugsdrehzahl 345
 - Bezugselement 231, 233f.
 - Bezugssystem 236
 - Bezugswert 347f., 653
 - Biegebeanspruchung 70
 - Biegefedern 189
 - Biegen 1146
 - Biegespannung 1195
 - Biegesteifigkeit 360, 682
 - mittlere 679
 - Biegewechselfestigkeit 171
 - Biegewelle 360
 - Biegewellenausbreitungsgeschwindigkeit 361
 - Biegewellenlänge 360
 - Binär
 - Steuerung 295
 - Verknüpfungsglied 300
 - Bindenähte 41f.
 - biobasierte Materialien 630
 - Biointelligenz 623
 - biologische Transformation 625
 - Bionik 431
 - Bioökonomie 624
 - bistabiles Kippglied 301
 - Black-Box 749
 - Black-Box-Methode 425
 - Blauer Engel - weil lärmarm 646
 - Blechdimensionierung 513
 - Blechprüfung 1145
 - Blechumformen 1146
 - Blockschaltbild der maschinenakustischen Grundgleichung 357
 - Bohren 1098
 - Bolzen 147
 - Bolzenverbindungen 145
 - Boolesche
 - Algebra 297
 - Variable 297
 - Brainstorming 432
 - Break-even-point 778
 - Bremsen 274
 - Bruchmechanikkonzept 118
 - Bruchzähigkeit 53
 - Brückenknoten 757
 - Bürstspanen 1100, 1133
 - Bus 305
 - CAN 306
 - Echtzeit-Ethernet 307
 - Ethernet 306
 - Feldbus 305
 - Bx-Lebensdauer 127
- ## C
- CAD/CAM-Datenaustausch. *Siehe CAX-Datenaustausch*
 - CAD/CAM-Programmierung 969
 - Campbell-Diagramm 344ff., 698
 - CATIA 918, 921, 923, 929f.
 - CAX-Datenaustausch
 - CAX-Datenformate. *Siehe Neutralformate*
 - Einführung 1044
 - Inhalte von 3D-Modellen 1033
 - Qualität von 3D-Modellen 1043
 - Vereinbarungen 1042
 - CAX-Modell 1033
 - CAX-Technologien 897
 - Computer Aided Design (CAD) 897
 - Computer Aided Engineering (CAE) 897
 - Computer Aided Manufacturing (CAM) 897

- C-Bewertung 346
- C/C 50
- C/C-SiC 50
- CE-Kennzeichnung 524, 554
- CE-Konformitätskennzeichnung 649
- Ceramic Matrix Composites 49
- CFK 504
- charakteristische Lebensdauer, Weibull 126
- Checkliste von Osborn 432
- Clustering 750, 757
- CMC 49
- CNC-Fertigungssimulation 970
- CNC-Produktion 963
- CNC-Programm 966
- Compliance 542
- Computed-Radiography-Systeme 538
- Computer-Aided-x 979
- Computersimulationsmethoden 416
- Computer Supported Cooperative Work 481
- Computertomografie (CT) 900 f.
- Concurrent Engineering 473
- Condition Monitoring 707
- Constraints 918
- Coriolis-Kraft 328
- Creo Parametric 916, 918 f., 921 f., 925, 930
- Cross Sectional Scanning (CSS) 900
- CSG-Darstellung 916
- C/SiC 50
- CSMA 306
- Customer-Feedback-Methode 593
- Cyanacrylat-Klebstoffe 1222

- D**
- Dämmung 678
- Dämpfungsverhalten 273
- Darstellung
 - vereinfachte 208
- Dateiverwaltung 1024
- Datenmanagement 1022
- Datensicht 1060
- Dauerfestigkeit 91
- Dauerpegel 351
- dB 338
- dB(A) 346
- dB(A) 346
- dB(Z) 346
- dBZ 346
- Deckungsbeitrag 778
- Deckungsbeitragsrechnung 778
- Defektursachen 827
- Define-Phase 883
- Dehnschaftschrauben 141
- Dehnung 68
- dehnverträgliche Verbindung 54
- Demontage 522
- Design 465
 - of Experiments 512
- Design for Assembly 471, 480
- Design for Bio-Intelligence 628
- Design for Environment 471
- Design for Manufacturing 468
- Design for Production 468
- Design for Recycling 528
- Design for Six Sigma 881
- Design for X 454
- Design of Experiments (DoE) 642, 645, 666
- Design-Phase 884
- Design Structure Matrix 730, 749
- Design-to-Market 897
- Detektionsmechanismus 889
- Deutsche Patent- und Markenamt (DPMA) 795
- Dezibel 338
- DFX 465
- DFX-Richtlinien 467
- Dichte
 - Metalle 7
- Dichtewelle 342
- Dichtstoffe 1219
 - Verarbeitung 1229
- Dichtungen
 - berührungsfreie 194
 - statische 193
- Dichtungskräfte 140
- Dichtungsschrauben 139
- Dichtungssysteme 191
- Dienstleistungsklassen 823
- Differentialbauweise 469, 490
- Differenzialzylinder 380, 400
- Differenzpegel 349
- Digitalisieren 901
- Dimensionierung 512
 - CAD-basierte 512
 - FE-basierte 512
 - von Klebverbindungen 1234
- dimetrische Projektion 207
- DIN 4000-1 1074 f., 1087
- DIN EN ISO 1101 235
- direkte Geräuschenstehung 355
- Dispersion 361
- DMADV 883
- DMAIC-Zyklus 882
- DMS 330
- DMU 926, 928, 930
- DoE. *Siehe Design of Experiments (DoE)*

- Dokumentation 594
 - der Risikobeurteilung 563
- Domain Mapping Matrix 762
- Domäne 745, 750
- Downcycling 544
- Drehen 1097
- Drehfeldmotor 260
- Drehfräsen 1132
- Drehstabfeder 189
- Drehstromasynchronmotor 262
- Drehstromsynchronmotor 261
- Drehzylinder 400
- Druckbeanspruchung 70
- Drücken 1155
- Druckluft 391
- Drucklufterzeugung 396
- Druckluftmotoren 402
- Druckspannung 1195
- Druckventile 383, 405
- Duplexstähle 21
- Durchsetzfügen 1172
- Duroplaste 34
- dynamische Anregungskraft 646

- E**
- Eckfrequenz 667
- Edelmetalle 7
- Edelstähle 14
- Effektivwert 338
- EG-Maschinenrichtlinie 552
- Eigen-/Fremdfertigung 782
- Eigenfrequenz-Analyse 955
- Eigenmoden 677
- Eigentonbereich 691, 693
- Einbausituationen 655
- Eindeutigkeit
 - bei Zeichnungsdarstellung 222
- Einfallstellen 38
- Einflüsse
 - Zerspanbarkeit 1106
- Einflussgrößen 663, 666
 - Anregungskraft 667
- Eingangsimpedanz 355 f., 365, 655 f., 664, 676, 682
- Eingangsschnelle 356
- eingetragenes Design 808
- Eingriffsmethode 889
- Eingriffsstrecke 176
- Eingriffszähnezahl 181
- Einmassenschwinger 677
- Einsatzstähle 19
- Einteilung von Stählen
 - chemische Zusammensetzung 14
 - mechanische und physikalische Eigenschaften 14
 - Werkstoffnummer 18
- Einzahlwert 655, 658
- Einzelheiten 207
- Einzelerschallquellen 704
- Einzelteilzeichnung 202
- Eisen 8
- Eisengusswerkstoffe 21
- Eisen-Kohlenstoff-Diagramm 10
- Elastizitätsmodul 69
- Elastomere 34
- elektrochemische Spannungsreihe 455
- ElektroG 523
- Elektromagnet 321, 324
- Elektromagnetlager 153
- Elektromechanik 313
- Elektromotor 324
 - Anbauten 262
- Element 745
- Element als Bezug
 - abgeleitet und real 234
- Elementarfunktionen 429
- Elementarzelle
 - Metalle 8
- Elemente
 - elastische 185
- Elementformulierung 950
- Elementverwaltung 1024
- ELV-Richtlinie 524
- Emissionen 616
- E-Modul
 - Metalle 7
- Endlagendämpfung 380
- End of Line 642
- End-of-Line-Prüfstand 646
- End-of-Line-Prüfung 707
- energetische Verwertung 531
- Energie
 - Grundgleichung 249
- Energiebedarf
 - Art und Menge optimieren 616
- Energiegröße 349
- energy harvesting 313, 330
- Energy using Products 526
- ENGDAT 1044
- Engineering 898
 - Forward Engineering 898
 - Reverse Engineering 898
- Entfestigung 1106
- Entkopplung 736
- Entlastungskerbe 675
- Entscheidungsbaum 872
- Entscheidungsunterstützung 1019

Entsorgung 457
 Entwicklungsaufwand 416
 entwicklungsbegleitende Kalkulation 786
 Entwicklungsphase 876
 Entwicklungsprozess 1051
 – Makrologik 1055
 – Methoden 1054
 – Mikrologik 1054
 Entwicklungsstufen 626
 Entwurf 422
 Entwurfsphase 422
 EoL 642, 646, 710
 EoL-Prüfstand 710
 Epoxidharzklebstoffe 1221
 Ereignisablaufanalyse 878
 Erfinder 801
 erfinderische Tätigkeit 797
 Erfindungshöhe 797
 Ergonomie 457, 585
 ergonomiegerechtes Konstruieren 585
 Ermüdung
 – bei Klebverbindungen 1233
 Ermüdungsausfälle 124
 Erodieren 1131
 ErP 526
 Ersatzteillogistik 828f.
 Ersatzteilversorgung 837f., 855
 erweiterte maschinenakustische Grundgleichung 671
 Erzeugnisstruktur 1082ff.
 ESP 315, 327f.
 EU-Margerite – Ecolabel 646
 EU-Maschinenrichtlinie 447
 EU-Richtlinie 2000/14/EC 649
 Europäische Patentamt (EPA) 795
 Europäisches Patenterteilungsverfahren 798
 Evolventenverzahnung 175
 Explosionsumformen 1166

F

Fachhandel 829
 Fahrzeugbau 1180, 1208
 Fail-Safe-Prinzip 565
 Fallbeispiel 594
 Faserkunststoffverbunde 501
 Faser Pull-out 50
 Faserverbundkeramiken 49
 Faserverbundkunststoff 501
 Fast Fourier Transform 344
 FEA. *Siehe Finite-Elemente-Analyse (FEA)*
 Feature-Ansatz 918
 Features 1035
 Federbauformen 189

Federkennlinie 187
 Federn 185
 Federstähle 20
 Federsteifigkeit 186
 Federsystem 190
 Fehler 925f.
 Fehleranalyse 877
 Fehlerarten 1078
 Fehlerbaumanalyse 879
 Fehlerbaum- und Ereignisablaufanalyse 878
 Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse 876
 Fehlersammelliste 869
 Feilen 1100
 Feinbearbeitung 1093
 Feinbleche zur Kaltumformung 20
 Feingestalten 443
 Feinschneidtechnik 1171
 Feinstbearbeitung 1093
 Feinst- und Mikrobearbeitung 1130
 Feldbus 305
 Feldebene 293
 Feldtest 459
 FEM. *Siehe Finite-Elemente-Methode (FEM)*
 Fertigbarkeit 1116
 fertigungsgerechte Gestaltung 1193
 fertigungsgerechtes Konstruieren 468
 fertigungsgerechte Werkstoffwahl 1105
 Fertigungskosten
 – Toleranzbereiche 1115
 Fertigungs-Stückliste 1081
 Fertigungsverfahren 1091f.
 – alternative 1105
 – Beschichten 1092
 – Differenzierung von Fertigungsverfahren 1092
 – Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit 1109
 – einsetzbare 1105
 – fertigungsbedingte Restriktionen 1091
 – Fügen 1092
 – kostengünstige Herstellung 1091
 – Produktivität 1109
 – Stoffeigenschaften ändern 1092
 – Trennen 1092
 – Umformen 1092
 – verfügbare 1105
 – Werkstückdetaillierung 1091
 – Werkstückgestaltung 1091
 – Wirtschaftlichkeit 1109
 FE-Solver 947
 Festigkeitshypothese 79, 83
 Festigkeitsklassen 140f.
 Festigkeitsnachweis 83
 – von Klebverbindungen 1234

- Festigkeitsrechnung 67, 944
 - nichtlineare 949
- FFT 344
- Filter 352
 - Bandbreite 352, 659
 - mit absolut konstanter Bandbreite 352
 - mit relativ konstanter Bandbreite 352
 - Mittenfrequenz 352
 - Oktavfilter 352, 659
 - Schmalbandfilter 352
 - Schmalband (Narrow Band) 659
 - Terzfilter 352, 659
- Filterbandbreite 352
- Filtermittenfrequenz 352
- Finite-Elemente-Analyse (FEA) 935, 986
- Finite-Elemente-Methode (FEM) 497, 643
- Fixieren
 - beim Kleben 1228
- Fixwertmethode 889
- Flächenanbindungen 38
- Flächenkorrosion 454
- Flächenmodellierung 923
- Flächenpressung 140
- Flächenrückführung 903 ff.
- Flächenträgheitsmomente 72
- Flachriemen 182
- Flankenpressung 178
- flexible Oberflächenfeinbearbeitung 1133
- Fließkurven 1143
- FluidSIM 406
- Fluidtechnik 391
- Flussgröße 323
- Flüssigkeitsschall 336
- FMEA 876
- FMEA-Formblatt 878
- Fokusgruppen-Diskussion 593
- FORFLOW 473
- Formabweichung 230
- Formänderung 1143
- Formenwelt 1130
- Formfedern 191
- Formgedächtnislegierungen 30
- Formgenauigkeit 243
- Formoptimierung 514
 - CAD-basiertes Vorgehen 515
 - netzbasiertes Vorgehen 515
- Formparameter, Weibull 126
- Formschluss 138
- Formschlussverbindungen 167
- Formtoleranzen 236
- Formtolerierung 230
- form- und kraftschlüssig 56
- Form- und Lagetoleranzen 221
- Formzahlen 85
- Forward Engineering 898
- Fourieranalyse 344
- Fourierspektrum 344
- Fraktion 522
- Fräsen 1098, 1101
- Fräsmaschine 968
- Freiformflächen 903, 914, 920
- Freiformschmieden 1156
- Freigabe- und Änderungswesen 1024
- Freihandzeichnen 201
- Freiheitsgrad 315
- Fremdanregungsanalyse 646
- Frequenz 336, 343
- Frequenzabhängigkeit 638
- Frequenzanalyse 344
- Frequenzbereich 344, 658
 - Eigentonbereich 677
 - quasistatischer 677
- Frequenzspektrum 344
 - kontinuierlich besetztes Spektrum 673
 - Linienspektrum 672
- Frequenzumrichter 264
- Frontloading 977
- Frühausfälle 123
- Fügen
 - umformtechnisches 1172
- Führungselemente 148
- Fundament
 - beim Hersteller 656
 - beim Nutzer oder Anwender 655
 - Betonfundament 656
 - Prüffundament 656
- Funktionen
 - von CNC-Maschinen 964
- Funktionentrennung 60
- Funktionsanalyse 429, 876
- Funktionsbausteinsprache, FBS 303
- Funktionseinheit 292
- Funktionsintegration 1007
 - bei Antriebssystemen 279
- Funktionsmerkmale 1074
- Funktionsmodell 757
- Funktionsseite 1061
- Funktionsstruktur 428, 720, 729
- Funktionsträger 452
- Funktionstrennung 685, 687
- Funktionsverifikation 443
- Fußpunkterregung 663

G

- Gaußpunkte 949
- Gebrauchsmuster 807
- Gebrauchstauglichkeit 587, 590
- Gebrauchtteil 829, 837
- Gefahren 447
- Gefahrstellen 559
- Gelege 505
- Gelenkverbindungen 145
- Gelenkwellen 174
- Gemeinkostenzuschlagsatz 775, 777
- Gemeinschaftsgeschmacksmuster 809
- Gemeinschaftsmarken 795
- Generative Fertigung 1134
- Generative Fertigungsmaschinen 964
- Geometriearten 903
 - Freiformflächen 903
 - Regelgeometrie 903
- Geometrieelemente 228, 231
- Geometrieinformation 205
- Geometrieverarbeitung 899, 903
 - Abmaßverarbeitung 899
 - Flächenmodell 905
 - Flächenrückführung 899
 - Volumenmodell 905
- geometrische Regelflächen 1110
- geometrische Repräsentation 1033
 - Boundary Representation 1033
 - Constructive Solid Geometry 1033
- Geräte- und Produktsicherheitsgesetz 446
- Geräusch 337
- Geräuschestehung 355
 - direkte 355
 - indirekte 355
 - Mechanismen 355
- Geräuschestehungskette 357
- Geräuschminderung 361
 - aktive Maßnahmen 361
 - Maßnahmen zur 362
 - Möglichkeiten 361
 - passive Maßnahmen 361
 - primäre Maßnahmen 361
 - sekundäre Maßnahmen 361
- Geräuschpegel 340
- Gesamtfunktion 428
- Gesamtlösung 428
- Gesamtschalleistungspegel 349
- geschäftliche Bezeichnungen 810
- Geschwindigkeitsanregung 663
- Geschwindigkeitserregung 355
- Gesenkbiegen 1148
- Gesenkschmieden 1156
- Gestalt
 - Variationsmerkmale 781
- Gestaltabweichungen 225
- Gestaltänderungsenergiehypothese 80
- Gestalten
 - räumliches 40
 - restriktionsgerechtes 454
- Gestaltoptimierung 514
- Gestaltung 422
 - einer Klebverbindung 1239
- Gestaltungsgrundregeln 445
- Gestaltungsgrundsätze 589, 1193
- Gestaltungshinweise 1118
 - Bohren 1122
 - Drehen 1118
 - Fräsen 1126
 - Gewindeschneiden 1122
 - Schleifen 1128
 - Senken 1122
- Gestaltungsmöglichkeiten von Nummerungen 1074
- Gestaltungsphase 422
- Gestaltungsprinzipien 450, 492
- Getriebe 174, 266
- Getriebebauformen 179
- Gewebe 505
 - gewerbliche Kennzeichen 810
 - gewerblicher Rechtsschutz 793
- Gewichtskostenkalkulation 786
- Gewichtsreduktion 511
- Gewichtsreduzierung 488
- Gewichtung 755, 762
- Gewinde 138
- Gewindeart 141
- Gewindeflanken 138
- Gewindewalzen 1165
- Gewinn 772
- Gewinnschwellendiagramm 778
- GFK 504
- Glasfaser 502
- Gleichgangzylinder 378
- Gleichmodulstrategie 727
- Gleitlager 59, 153
- Gleitspanen 1103
- Graph 753f.
- Grenzfrequenz 360f., 696
- Grenzkurven 657
- Grenzrisiko 446
- Grenzstückzahl 778
- Grenzwerte 657
- Grobbearbeitung 1093
- Grobgestalten 443
- Größenbeiwert 89
- Grübchentragfähigkeit 177

Grundfließbild 429
 Grundgleichung der Maschinenakustik 355
 – Blockschaltbild 357
 – Pegelschreibweise 357
 Grund-Stückliste 1081
 Grundverfahren der 3D-Messtechnik 900
 Gruppenzeichnung 202
 Gusseisen 10
 Gusseisenwerkstoffe 21
 Gyroskop 313, 328

H

Haftklebstoffe 1223
 Haftung 843
 Haigh-Diagramm 121
 Halbleiterschutz 815
 Halbschalenkonstruktion 1176
 Halbwertsbreite 693
 Handhabungsproblem 752
 Handschallpegelmesser 353
 Handwerk 821
 Harmonische 344
 Harmonisierte Normen 555
 Hartdrehen 1131
 Hartzerspannung 1130
 Hauptbewegung 1111
 Hauptfunktion 424
 Haupt-Stückliste 1081
 Hauptzeit 1109
 Hautbildungszeit 1224
 Heißgasrohr 60
 Herkunftsmerkmale 1074
 herstellbare Formenwelt 1110
 Herstellkosten 1109
 Herstellkostenwachstumsgesetz 781, 787
 Hertz 336
 Hertzsche Pressung 148
 Hierarchie 746
 Hierarchisierung 749
 High Speed Cutting 1131
 HIL 321
 Histogramm 869
 Hobeln 1098
 Hochgeschwindigkeitsfräsen 1131
 Hochgeschwindigkeitsumformung 1166
 Hochleistungspolymere 36
 Hochtemperaturlegierungen 29
 Hochtemperatur-Leichtbau 49
 Hohlmantelspannbuchsen
 – hydraulische 166
 Honen 1102
 Honeycomb 689

Hooke'sches Gesetz 69, 937
 Hörbereich 336
 Hörschwelle 337f.
 House of Quality 873
 HSC 1131
 Hubschleifen 1102
 Hüllbedingung 227
 Hüllprinzip 228
 Hybridbauweise 60
 Hybridmodellierer 919
 Hydraulik 371
 Hydrauliköle 385
 Hydraulikschaltplan 436
 hydrodynamischer Kurzschluss 360
 Hydromotoren 376
 Hydropumpen 375
 Hydrosystem 372
 – Projektierung 387
 Hydroventile 380
 Hydrozylinder 377
 Hz 336

I

Ideenfindung 432
 Ideengenerierung 432
 Identifikation 316
 Identifizierung 1074
 Identifizierungsnummer 1074
 Imitieren 627
 Impacthammer 667, 679, 700
 Impedanz 356
 Impedanzsprung 687
 implizierte Anforderungen 424
 Inbetriebsetzung 456
 indirekte Bereiche 779, 787
 indirekte Geräuschenstehung 355
 Individualisierung 779, 782
 Industrie 4.0 308
 Informationsparameter 294
 Innenhochdruck-Umformen 1166
 Innovation 418
 Innovationsgrad 417
 Innovationszyklen 417
 In-Prozess 1001
 Instandhaltbarkeit 857
 Instandhaltung 457, 1116
 Instandhaltungsaufwand 857
 Instandsetzung 521, 531, 535, 1116
 instandsetzungsgerecht 535
 Instrumentenfließbild 436
 Integralbauweise 470, 490
 Integralwerkstoffe 689

Integrationsstufen 626
Integrierende Bauweise 491
Integrierter PKT-Ansatz zur Entwicklung modularer Produktfamilien 733
Interferenzmessverfahren 901
internationale Patentanmeldungen 798
internationale Patentklassifikation 800
Interrelationendiagramm 872
interstruktureller Körperschallfluss 665
Invention 418
Investitionsgüter 416, 853
ISO 2768 242
isometrische Darstellung 206
ISO-Normen 557
Iteration 590

J

Joy of Use 587

K

Kalkulations-Stückliste 1081
Kaltfließpressen 1159
Kaltschmieden 1159
Kano-Modell 875
Kapselung 749
Kartenabfragemethode 432
Kegel-Spannsätze 165
Kegelstifte 147
Keilriemen 180
Keilverbindung 164
Keilwellenverbindungen 168
Kennimpedanz 665
keramikgerechtes Design 54
keramische Werkstoffe 47
Kerbgrundkonzept 118
Kerbstifte 147
Kerbwirkung 85
Kerbwirkungszahlen 86
Kette der indirekten Geräuschenstehung 357
Kettengetriebe 184
Kfz-Service 830 f.
Kippen 493
Klang 337
Klassen 1074
Klassenbildung 1074
Klassierung 115
Klassifikation 1023
Klassifikationsnummernsysteme 1074
Klassifizierung 749, 1074
Klassifizierungssysteme 1074
Kleben 1217

Klebstoff
– Acrylat 1221
– anaerob härtender 1222
– chemisch abbindender 1220
– Cyanacrylat 1222
– Epoxidharz 1221
– Phenolharz 1222
– physikalisch abbindender 1223
– Polymid 1223
– Polyurethan 1221
– UV-härtender Acrylat- 1222
Klebstoffauftrag 1227
Klebstoffe 1219
– dual härtende 1224
– Haft-, Kontakt- 1223
– Kombinations- 1224
– Schmelz- 1224
Klebstoffverarbeitung 1226
Kleilverbindung 1224
– Beanspruchung 1231
– Berechnung 1235
– Dimensionierung, Festigkeitsnachweis 1234
– Gestaltung 1239
– Langzeitbeständigkeit 1234
– Prüfung 1238
– Schwingfestigkeit 1233
– Simulation 1236
– Temperatureinfluss 1232
– Tragfähigkeitsverhalten 1231
Klemmkraft 140
Klemmverbindungen 164
Knicken 493
Knicklänge 97
Knickung 97
Kohlenstoff 503
Kohlenstofffasern 50
Koinzidenzfrequenz 360, 696
Koinzidenzgrenzfrequenz 360
Kollektionsverfahren 431
Kombination 433
Kombinationsklebstoffe 1224
Komplettbearbeitung 1094
Komplexe Geometrie 903
Komplexität 745
Komponente 725
Konfigurationsraum 317
konsequenter Leichtbau 488
Konstruieren
– geräuschgerechtes 639
– methodisches 415
– sicherheitsgerechtes 555
– soundgerechtes 639
Konstruktion additiver Bauteile 1007

- Konstruktions-Assistenzsystem 477
- Konstruktionselemente 137
- Konstruktionskatalogen 433
- Konstruktionsmaßnahmen
 - gegen Gefährdungen 564
- Konstruktionsprozess 415
- Konstruktionsregeln
 - fertigungsgerechte 1019
- Konstruktions-Stückliste 1081
- Konstruktionstabellen 1019
- Konstruktionsvorlagen 1019
- konstruktive Geräuschminderungsmaßnahme 638
- Konsumgüter 416, 825
- Kontaktklebstoffe 1223
- Kontaktkorrosion 455
- Kontaktmethode 889
- Kontaktplan, KOP 303
- Kontrollieren 443
- konvexe Linearisierung (CONLIN) 512
- Konzept 118, 121, 422
- Konzeptphase 422
- Kooperieren 627
- Koordinatenbestimmung 900
- Koordinatenmesstechnik 900
 - 3D-Koordinatenmesstechnik 900
- Koppelstellen 656
- Kopplung 1032
- Kopplung von CAx-Werkzeugen 1032
- Körperschall 651
- Körperschallabklingverhalten 690
- Körperschallfunktion 356, 358, 365, 665
 - Abschätzverfahren 359
 - Reduktion 365
- Körperschallgrad 356
- Körperschallmaß 356
- Körperschallpegel 651
 - Schwingbeschleunigung 651
 - Schwinggeschwindigkeit 651
 - Schwingweg 651
- Körperschalltransferfunktion 355, 665, 687
- Körperschallverteilung 665
- Korrelationsdiagramm 870
- Korrosion 447
- Korrosionsgeschwindigkeit 454
- korrosionsschutzgerechte Gestaltung 1193
- Kosten 774, 788
 - Änderungs- 787
 - Einzel- 775
 - Entwicklungs- u. Konstruktions- 777
 - Fertigungsgemein- 775, 777
 - Fertigungslohn- 777
 - fixe 776, 778
 - Gemein- 775
 - Herstell- 777
 - indirekte 779
 - Lebenslauf- 776
 - Materialeinzel- 777
 - Materialgemein- 775, 777
 - Selbst- 778
 - variable 776, 778
 - Vertriebsgemein- 775, 777
 - Verwaltungsgemein- 775, 778
- Kostenarten 775
- kostenbewusste Gestaltung 1194
- Kosten der Produktnutzung 776
- Kosteneinflussgrößen 779
- Kostenrechnungsart 777
- Kostenschätzen 786
 - Aufwandsreduzierung 786
- Kostenesenken
 - Organisation 785
 - Team 785
 - Zulieferer 785
- Kostenstelle 775
- Kostenträger 775
- Kostentreiber 788
- Kostenverantwortung 773
- Kostenverfolgung 783
- Kostenverfolgungstabelle 784
- Kraftausgleich 452
- Krafteinleitung 56
- Krafteinleitungsstelle 664, 685
- Krafterregung 355, 663
- Kraftfluss 451
- Kraftimpuls 362f.
- Kraftpegel 362
- Kraftschluss 138
- Kreativitätsmethode 432
- Kreativitätsprozess 432
- Kreisbogenocken 675
- Kreisfrequenz 343, 651
- Kreislaufwirtschaft 521
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz 521
- Kreisscheibe 75
- Kreisstruktur 314
- Kreiswellenzahl 343
- Kriechen 454
- Kristallstruktur
 - hexagonal 8
 - kubisch-flächenzentriert 8
 - kubisch-raumzentriert 8
- kritische Frequenz 360
- KrW-/AbfG 521
- Kugelbuchsenführung 161
- Kugellager 150
- Kugelstrahler 650, 695

Kugelstrahlereckfrequenz 360
Kugelstrahler nullter Ordnung 359
Kühl-/Schmierstoffe 1106
Kunststoffprofilstrukturen 37
Kunststoffschweißen 1189
Kupfer 29
Kupplungen 272
Kupplungslamellenträger 1175
Kurbelwellen 1132
Kurzhub-Membranzylinder 399
Kurz kalkulation 786

L

Lageabweichung 223, 229
Lagegenauigkeit 243
Lagerbelastung 149
Lagerelemente 148
Lagetoleranzen 236
Lagetolerierung 231
Lagrange'sche Formulierung 951
Längskräfte 140
Längsstift 145
Läppen 1103
Lärm 336
Lärmpegel 340
Laserauftragsschweißen 1134
Laserscanning 901
Laserstrukturieren 1134
Lastannahme 115
Lastenheft 422, 647
Lastfälle 80
Lastkollektiv 111 f., 115, 254
Lauftoleranzen 241
Lautstärke 340, 350
Lautstärkepegel 340
Lebensdauer 123
- nominelle 149
Lebensdauerberechnung 109
Lebensphasen
- einer Maschine 554
Lebensphasenmodularisierung 736
Lebenszyklus 419
Leckageklassen 193
legierte Stähle 13, 15
Legierungselement
- Metall 11
Leichtbau 451, 487
Leichtbaubremse 60
Leichtbaukonstruktion 494
Leichtbauweise 682
Leichtmetalle 7, 1197
- Aluminium 22

- Magnesium 24
- Titan 26
Leistung
- Grundgleichung 249
Leistungsgröße 341, 349 f.
Leistungstiefe 782
Leistungsverzweigung 179
Leistungswurzelgröße 349 f.
Leitebene 293, 305
Leitlinie 425
Leittechnik 291
Lichtschnittverfahren 900
Life cycle costs 772
Linearführungen 158
Linearmotor 263
Linienarten 204
Linienbreiten 204
Lizenzrechte 806
Lochblech 366
Logarithmusrechnung 349
logische Variable 297
Longitudinalwelle 342
Lösungsauswahl 438
Lösungsprozess 420
Lotuseffekt 431
Ludwik-Gleichung 1146
Luftschall 336
Luftschallabstrahlung 665
Luftschallausbreitungsgeschwindigkeit 361
Luftschallpegel 648
Luftschallwellenlänge 360

M

Machbarkeitsanalyse 666
magisches Dreieck 457
Magnesium
- Bezeichnung Magnesiumlegierungen 25
- Legierungselemente 26
Magnesiumlegierungen 501
Magnetlager 153
Magnetresonanztomografie (MRT) 900 f.
Maintenance on Demand 707
Manufacturing 999
Marken 810
Markenrechtsverletzungen 814
Markov-Modell 131
Marktanforderungen 423
Maschinen
- elektrische 259
- sicherheitsgerechte 551
Maschinenakustik 333, 335
maschinenakustische Einflussgrößen 663

- maschinenakustische Grundgleichung 355, 663, 671
 - Blockschaltbild 357
 - Pegelschreibweise 357
- Maschinendiagnose 707
- Maschinenelemente 137
- Maschinenrichtlinie 551
- Maschinenrichtlinie 2006/42/EG 651
- Maschinenzustandsüberwachung 646
- Masse
 - Punktmassen 688
 - schlaffe 687
 - Sperrmasse 678, 688
 - Vorsatzmasse 678
- Massebelegung 361
- Maßeintragung 210
- Massenbelegung 688
 - mittlere 679
- Massenimpedanz 679
- Massenwirkungsfrequenz 678f.
- Maßhaltigkeit 1012
- Massivumformen 1156
- Massivumformung 1174
- Maßnahme
 - Verrippung 683
- Maßstab 749
- Maßstäbe 203
 - nach DIN ISO 5455 203
- Maßtoleranzen 223
- Materialeffekte
 - Aktoren 325
 - Magnetoelastizität 325, 327, 329
 - Piezoelektrizität 313, 325 ff., 329
 - Piezowiderstand 330
- Materialeffizienz 1110
- Materialeinsparungen 511
- Materialkosten 1109
- Materialkostenmethode 787
- Materialkostensteuerung
 - in der Kunststoffkonstruktion 36
- Materialleichtbau 489
- Materialvielfalt 535
- Matrix 749, 754
- Matrixtafel 872
- Maximum-Likelihood-Methode 123
- MDOF 678
- Measure-Phase 883
- mechanische Kennwerte 1011
- Mechatronik 771
- Mechatronik (Definition) 314
- Mehrgleitflächenlager 157
- Mehrkörpersimulation 987
- Meißeln 1100
- Membrantheorie 78
- MEMS 313, 328, 330
- Mengenübersichts-Stückliste 1081f.
- Messgenauigkeit 350
- Messgrößenaufnehmer 313
- Messschrauben 139
- Messverfahren 900
 - berührungslose 901
 - taktile 900
- metallische Eigenschaften 6
- metallische Gläser 30
- Metall-Keramik-Hybridkonstruktion 59
- Metall-Keramik-Verbindung 56
- Metallschäume 689
- Methode der kleinsten Fehlerquadrate 123
- Methoden
 - diskursive 431
 - heuristische 431
 - intuitive 431
- Method of Module Heuristics 729
- Method of Moving Asymptotes (MMA) 512
- Mindestbiegeradien 1147, 1152f.
- Minimumbedingung 230
- Mittelhub-Rollmembranzyylinder 399
- Mittelspannungseinfluss 121
- Mittelungspegel 351
- Mittenfrequenz 352
- Mizenboushi 888
- MKS 316, 321
- Modalanalyse 700
- Modelchecker 926
- Modell
 - Definition 316
 - funktionsorientiertes 316
 - gestaltorientiertes 316
 - kinematisches 317
 - kinetisches 318
- Modellbildung 982
- Modelle
 - analytische 984
 - grafische 991
 - mathematische 982
 - physikalische 982
- Modellgesetze 704
- Modellieren 913
- Modellierungsstrategien 1045
- Modellzyklus 420
- Modernisierung 522, 531, 538, 776
- Modernisierungspotential 538
- Modifikation 433
- Modul 721, 756
 - Metalle 7
- modulare Produktentwicklung 719

- integrierter PKT-Ansatz 733
- Modular Function Deployment 731
- Modularisierung
 - von Antriebssystemen 280, 282 ff.
- Modularisierungs-Netzplan 738
- Modularität 722
- Modulbaukastenstrategie 727
- Module 747
- Module Indication Matrix 732
- Module Interface Graph 734
- Module Process Chart 739
- Modulus 1079 f.
- Monopol 359
- Monopolstrahler 359, 695
- montagegerechte Gestaltung 471
- Monte-Carlo-Methode 131, 990
- morphologischer Kasten 435
- morphologische Widerspruchsmatrix 887
- Motoren 252
- Motorhochlauf 345 f.
- Multiple-Domain-Matrix 753, 756
- Multiprozessbearbeitung 1133 f.
- Multisensormessgeräte 901
- Mutter 138

N

- Nacharbeit 1116
- Nachfertiger 838
- Nachhallzeit 649
- Nachweisrechnung 459
- NC-Fertigung 970, 973
- Nebenansprüche 803
- Nebenbewegung 1111
- Nebenzeit 1109
- Negativrippen 688
- Nennspannungskonzept 118, 121
- Nennzugfestigkeit 141
- Netzplan 872
- Netzwerktheorie
 - Betweenness Centrality 1065
 - Closeness Centrality 1065
 - Degree of Centrality 1065
- Neuentwicklung 418
- Neuheitsgrad 418
- Neukonstruktion 419
- Neutralformate 1036
 - ACIS 1036
 - IGES 1038
 - JT 1037
 - Parasolid 1037
 - STEP 1038
 - STL 1037

- Vor- und Nachteile 1041
- VRML 1038
- Nichteisenmetalle 1197
- Nichtmetalle 1197
- nichtrostende Stähle 13, 20
- Niederspannungs-Richtlinie 552
- Niete 142
- Nietformen 144
- Nitrierstähle 20
- Normalspannung 1195
- Normalspannungshypothese 79
- Normen
 - für Technisches Zeichnen 201
- Normteilibibliotheken 216
- Normung 555
- Normzahlen
 - nach DIN 323-1 210
- Not-Befehleinrichtungen 580
- Nummernkreise 1073, 1077
- Nummerung 1073
- nutzbare Restlebensdauer 131
- Nutzereinbindung 593
- nutzerzentrierte Gestaltung 472
- Nutzung 456
- Nutzungsanforderungen 592
- Nutzungskontext 591
- Nutzwert 441
- Nutzwertanalyse 439
- Nyquist/Shannon-Abtasttheorem 643

O

- Oberflächenbehandlung
 - für Klebverbindungen 1225
- Oberflächenbeiwert 88
- Oberflächengüte 1011
- Oberflächenschnelle 356
- Oberton 344
- Oberwellen 670, 673
- Octree 917
- OFC 50
- OFTP 1044
- Ökoleichtbau 489
- Oktavfilter 352
- Oktavspektrum 352
- Opferanoden 455
- Optimalitätskriterienverfahren (OC) 517
- optische Messverfahren 900
- Ordnung 345
- Ordnungsschema 433
- Organisation 417
- Organisationssicht 1060

- Ortstoleranzen 240
Outsourcing 782
- P**
- pA 648
Palmgren-Miner-Hypothese
– originale Form 119
Parallelnummernsysteme 1076
Parallelprojektion 205
Parameteroptimierung 512
parametrisches Modellieren 917
Pareto-Diagramm 870
Partitionierung 749, 771
Passfederverbindung 167
passive Maßnahmen der Geräuschminderung 361
Passungswahl 152
Patentanmeldung 799
Patentansprüche 802
Patente 795
patentierbare Bereiche 797
Patentjahresgebühren 805
Patentkategorien 797
Patentrecherche 806
PCT-Anmeldung 798
PDM 1022
Pegeländerung 350
Pegelangabe 350
Pegelarithmetik 349
Pegel der akustischen Transferfunktion 357
Pegel der Körperschallfunktion 356
Pegel des Abstrahlgrades 357
Pegeldifferenz 349
Pegelmesser 353
Pegelrechnung 349
Pegelsumme 349
Penalty-Verfahren 512
Periodendauer 336, 343
Periodensystem 5
Permanentmagnetlager 153
Personal 420
Petri-Netz 298
Pfadkostenrechnung 779
Pflichtenheft 422, 647
Phon 340
physikalische Effekte 433
physikalisches Werkstoffverhalten 33, 35
– amorphe Thermoplaste 33, 35
PKW-Karosserie 1180
Plagiat 907
Planungsphase 422
Plastisole 1223
Platten 77
Plattenimpedanz 679
Plattformstrategie 728
Platzkostenrechnung 779
Pneumatik 391
pneumatische Systeme 392
– Bauteilkennzeichnung nach DIN ISO 1219-2 393
Poka Yoke 889
Polyadditionsklebstoffe 1221
Polykondensationsklebstoffe 1222
Polymerisationsklebstoffe 1221
Polyurethanklebstoffe 1221
Portfolio-Analyse 872
Positionierung 1010
Positionserkennung 965
Positionsnummer 203
Positionsnummerierung 1081
Post-Prozess 1001
Potentialgröße 323
Präferenzmatrixverfahren 439
Preistrend 825
Pre-Prozess 1000
Pressverbände 164
Primärbezug 239
primäre Lärminderung 336
primäre Maßnahmen der Geräuschminderung 361
Prinzipien der 3D-Messtechnik 901
Prinziplösung 422
Priorität 802
Privilegienverwaltung 1024
Probekörper 533
Problemlösung 1054
Produkt
– modular 721
Produktarchitektur 719 f., 745, 756
Produktart 416
Produktdatenmanagement 1022
Produktdatenmanagementsysteme 1022
Produktdokumentation 457
Produktentstehung
– wissensbasierte 1019
Produktentstehungsprozess 420
Produktentwicklung
– Phasen 978
Produktentwicklungsprozess 415, 873
Produktergonomie 587
Produkterstellung 1091
– ganzheitlich und präventiv 1091
– Hauptforderungen 1091
Produktfamilie 720
– modulare 728
Produktgestaltung
– variantengerechte 734
Produktinnovationen 886

Produktionsergonomie 587
Produktionsfehler 447
Produktionskosten 1110 ff., 1114
– Beeinflussung durch Fertigungskosten 1109
– Beeinflussung durch Materialkosten 1109
Produktkomplexität 417
Produktkonfiguration 1023
Produktkonzept 781
Produktkosten 420
Produktlebenslauf 602
Produktlebensphasen 723
Produktlebenszyklus 420, 869
Produktpiraterie 772
Produktplanung 420
Produktprogrammplanung 734
Produktrecycling 521
Produktspezifikationen
– geometrische 221
Produktstruktur 425, 719
– Strategie 726
Produktstrukturierung 719, 1023
ProENGINEER 922 f., 926
Profilschienenführungen 161
Profiltoleranzen 239
Profilüberdeckung 176
Profilwellen 168
Prognoserechnungen 666
Prognostics and Health Management 131 f.
Programmierung
– manuelle 967
– werkstatorientierte 967
Program Structuring Model 734
Projektionsmethode 206
Projektplanungsphase 875
Proof-Test 53
Prototyp 643 f., 697
Prototyping 999
Prozess 291, 315, 745, 749
Prozesskette 1019
Prozesskostenrechnung 779
Prozessmanagement 758
Prozessparametern 1106
Prozesssimulation 988
prüfgerechte Gestaltung 1193
Prüfung
– von Klebverbindungen 1238
Prüfzeichen 1079
Prüfziffernverfahren 1079 f., 1087
Punktebewertung 439
– gewichtete 439
Punkteskala 439
Punktmassen 701

Q

QFD 873
Qualitätsinformationen 213
Qualitätsmanagement 865, 867
Qualitätsmanagementwerkzeuge 868
Qualitätsregelkarte 870
Qualitätssicherung 58, 124
– beim Kleben 1230
Qualitätsstähle 14
Qualitätsstufe 521
Quality Function Deployment 731, 873
Querkräfte 140
Querschnittaufnahmeverfahren 900
Querschnittsdimensionierung 513
Querstift 145

R

Radialwellendichtring 192
Randbedingungen 424
Rangfolgeverfahren 439
Rapid Manufacturing 897
Rapid-Technologien 897
– Rapid Manufacturing 897
– Rapid Prototyping 481, 897
– Rapid Tooling 897
Rapid Tooling 897
Raspeln 1100
Räumen 1098
Raumfahrt 55
räumliches Gestalten 40
REACH (Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals)
527
Reaktionsklebstoffe 1220
Realisierungsphase 876
recherchierende Methoden 431
Reckwalzen 1164
Recycling 521, 776
– Compliance 542
– Haftungsrisiken 542
– Informationspflichten 540
– Materialrecycling 521
– Produktrecycling 521
– Wiederverwendung 521
Recyclingarten 603
Recyclingform 521
recyclinggerechte Produktgestaltung
– Anwendungsbeispiele 530
– Bauzusammenhang 529
– Bewertungsverfahren 530
– Checklisten 530
– Design for Recycling 528

- Gestaltungsmerkmale 528
- Gestaltungsregeln 530
- Innovation: Design for Recycling 539
- Konstruktionsmethodik 529
- Stellhebel 528
- Werkstoffverwendung 528
- recyclinggerechtes Konstruieren 521
- Recyclingpass 528, 542
- Recyclingstrategie 521, 530
- Redundanz 448, 567
- Redundanzgrad 131
- Refabrikation 837f., 1116
- Referenzwert 347
- Referenzwerte 653
 - DIN 45630, Bl. 1 (1971) 654
 - DIN EN ISO 1683 (2015) 654
- Refurbishing 521
- Regelgeometrie 903
- Regelkreis 292
- Regelung 292, 314
- Regenerat 522
- Regranulat 522
- Regression
 - lineare 512
 - nichtlineare 512
- Regressionsanalyse 123
- Regulierungsmechanismen 889f., 892
- Reiben 1098
- Reibkorrosion 692
- Reibleiste 687, 691
- Reibungsdämpfung 692
- Relation 745
- Reluktanzmotor 324
- Remaining Useful Life 131
- Remanufacturing 837, 839
- Reparatur 521
- Repräsentationsform 913
- Resonanz 345
- Resonanzanregung 708
- Resonanzfrequenz 673
- Ressourceneffizienz 1110
- Restricted Substances 527
- Restriktionen 423
- Reverse Engineering 897, 899
- Rezyklat 522
- Richtlinien
 - für Umweltgerechtigkeit 605
- Richtungsabweichung 231
- Richtungstoleranzen 240
- Ringfederspannsätze 166
- Ringschrauben 139
- Ringwalzen 1164
- Rippe 365

- Rippenelemente 701
- Rippenkonstruktionen 39
- Rippenstrukturen 39
- Risikobeurteilung 559
- Risikograph 562
- Risikomatrix 562
- Roboter 964
- Robust Design 884
- Rohrbefestigung 1207
- Rohrleitungsfließbild 436
- RoHS 523
- RoHS-Verbote 523
- Rollenführung 158
- Rollenlager 150
- Rolloutplanung 929
- RS-Flipflop 301
- ruckfreie Nocken 675
- Rückrufaktionen 831
- Rüstzeit 1109

S

- Sachmerkmalleisten 1074f.
- Sachnummerung 1023
- Sachpatente 797
- Sachverständige 830
- Safe-Life-Prinzip 447, 565
- Sägen 1099
- Sammelanmeldung 809
- Sandwichblech 687
- Sandwichstrukturen 491
- Scanning 899
- Schaben 1100
- Schadensakkumulation 118
- Schadensakkumulationshypothese 111
- Schadensursachen
 - von Gleitlagern 155
- Schädigungslosigkeit 587
- Schadstoffe 522
- Schalen 78
- Schalenbauweise 492
- Schall 336
- Schallausbreitungsgeschwindigkeit 340, 665
- Schalldruck 337, 342, 649
- Schalldruckpegel 338
- Schallentstehung
 - direkte 639
 - indirekte 639
- Schallentstehungskette 357
- Schallgeschwindigkeit 340
- Schallintensität 341
- Schallintensitätsmessung 700
- Schallintensitätspegel 341

- Schallkennimpedanz 340
- Schalleistung 341 f., 648
- Schalleistungspegel 341, 648
- Schallmesstechnik 901
- Schallpegel 648
 - Emissionsschalldruckpegel 648
 - Immissionsschalldruckpegel 648
 - Lärmimmissionspegel 648
 - Schalldruckpegel 648
 - Schallintensitätspegel 648
 - Schalleistungspegel 648
- Schallschnelle 340
- Schaltfunktionen 965
- Schaltkupplungen 273
- Schaltnetz 300
- Schaltpläne 392
 - von Hydrosystemen 373
- Schaltsystem
 - kombinatorisches 300
 - sequentielles 301
- Schalttabelle 297
- Schaltwerk 301
- Schälversuch 1237
- Scheiben 75
- Scheitelwert 343
- Scherfestigkeit 146
- Scherspannung 146
- Scheuerleisten 365
- Schlankheitsgrad 97
- Schleifen 1101
- Schleifen mit rotierendem Werkzeug 1101
- Schlupf 250
- Schlussfolgerungsdokumentation 1019
- Schmalbandfilter 352
- Schmelzklebstoffe 1224
- Schmelzpunkt
 - Metalle 7
- Schmerzschwelle 338
- Schmieden 1156
- Schneeballeffekt 487
- Schneidstoffe 1108
 - Anforderungen 1108
 - Eigenschaften 1108
 - Einsatzfelder 1109
 - Schneidstoffkosten 1108
- Schnelle 340
- Schnellepegel 340
- Schnittdarstellungen 208
- Schnittkräfte 1106
- Schnittstellenprobleme 928
- Schockwellenumformen 1166
- Schraffurarten 209
- Schrägverzahnung 177
- Schraubdome 41
- Schraube 138
- Schraubenfeder 190
- Schraubenlinie 138
- Schraubenverbindungen 138
- Schriftfeld 213
 - nach DIN EN ISO 7200 214
- Schrittfolgenmethode 889
- Schubbeanspruchung 74
- Schubspannung 1195
- Schubspannungshypothese 80
- Schutzeinrichtungen 449, 571, 573
- Schutzmaßnahmen 446
- Schutzrechte 842, 907
- Schwachstellenanalyse 698
- Schwebung 674
- Schweißbeignung 1196
- Schweißen 1185
 - schweißgeeignete Feinkornbaustähle 19
 - schweißgerechte Gestaltung 1193
- Schweißkonstruktionen
 - Beispiele 1201, 1212
- Schweißnähte
 - Berechnung 1194
- Schweißnahtfehler 1201
- Schweißnahtquerschnitte 1196
- Schweißverbindungen 1191
 - Ausführung 1199
 - Qualitätsprüfung 1200
 - Toleranzen 1192
- Schweißverfahren 1187
- Schweißzusatzstoffe 1198
- Schwenkbiegen 1147
- Schwenkmotoren 401
- Schwermetalle 1197
- Schwindung 37
- Schwindungszuschläge
 - bei Kunststoffen 38
- Schwingbeschleunigung 651 f.
- Schwingerreger 700
- Schwinggeschwindigkeit 651 f.
- Schwingungstilger 693
- Schwingungsüberwachung 706 f.
- Schwingweg 651 f.
- SDOF 678
- Seilzugfestigkeit 181
- sekundäre Lärminderung 336
- sekundäre Maßnahmen der Geräuschminderung 361
- Sekundärrohstoffe 521
- Selbstkosten 776
- Selbstverstärkungseffekt 452
- Selektivität 749
- Senken 1098

- Sensitivität 763
 Sensor 313, 327
 Sequential Response Surface Method (SRSM) 512
 Service-Akteure 829
 Service Engineering 821
 Service-Netzwerke 828
 Serviceportfolio 827
 Servoregler 264
 Servoventile 384
 Setzen 454
 Seven New Tools of Quality 871
 Seven Tools of Quality 869
 Shaker 700
 Shape from Shadow 901
 Sicherheit 446, 587
 – einer Schraubenverbindung 140
 Sicherheitsabstand 498
 Sicherheitsfaktor 498
 sicherheitsgerechte Gestaltung 1194
 Sicherheitsnachweis 104, 173
 Sicherheitsschalter 575
 Sicherheitstechnik 571
 – hinweisende 450, 577
 – mittelbare 449
 – unmittelbare 449
 Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen 552
 SiC/SiC 50
 Signal 294
 – analoges 294
 – binäres 294, 297
 – digitales 294
 silanmodifiziertes Polymer 1223
 Silikon
 – additionsvernetzend 1221
 – feuchtigkeitsvernetzendes 1223
 – UV-härtendes 1222
 Simulation 113, 482, 977
 – bei Klebverbindungen 1236
 – in der NC-Fertigung 970, 973
 – numerische 985
 Simulationstechniken 978
 Simulationswerkzeuge 978
 Simultaneous Engineering 1019f.
 Six Sigma 881
 Skelettbauweise 685, 687
 Skeletttechnik 921
 Software 762
 Sommerfeldzahl 156
 Sonagramm 344
 Sound Design 706
 soundgerechtes Konstruieren 639
 Sound Quality 706
 Sound Quantity 706
 Spacerkonstruktion 689
 spanende Fertigungsverfahren 497, 1091, 1093
 – Anwendungsflexibilität 1093
 – Anwendungsspanne 1094
 – Eigenschaften 1093
 – Feinbearbeitung 1093
 – Feinstbearbeitung 1093
 – Flexibilität 1094
 – Grobbearbeitung 1093
 – Komplettbearbeitung 1094
 – Nachteile 1094
 – Produktivität 1094
 – Vorteile 1094
 Spannbuchsen 147
 Spannelementverbindungen 165
 Spannmöglichkeit 1115
 Spannschrauben 139
 Spannstifte 147
 Spannung 949
 Spannungsberechnung
 – bei Klebverbindungen 1235
 Spannungs-Dehnungs-Diagramm 69, 91
 Spannungsquerschnitt 140
 Spannungsverlauf 81
 Spannungszustand
 – räumlicher 74
 Sparleichtbau 489
 Spektrogramm 344
 Spektrum 344
 Sperrmasse 365, 678, 682, 687, 708
 Sperrventile 382, 404
 Spezifikationsphase 422
 Spiralfedern 189
 sprechende Nummern 1077
 Spritzgießwerkzeug 42
 Sprödbbruchverhalten 47
 SPS 302
 Spurenelement 11
 Stabilitätsverlust 493
 Stahl 10
 – Einfluss der Legierungselemente 11
 Stahlbau 1178, 1201
 Stähle
 – austenitische nichtrostende 21
 – austenitisch ferritische nichtrostende 21
 – Einteilung nach Einsatzbereich und Verwendung 19
 – Einteilung nach mechanisch-physikalischen Eigenschaften 14
 – Einteilung nach Werkstoffnummern 18
 – ferritische nichtrostende 20
 – martensitische nichtrostende 21
 – Systematik 12
 Stahlgruppennummer 18
 Stahlguss 10

Stahl- und Eisenwerkstoffe 1196
 Stand der Technik 457
 Stanzbiegeteile 1176
 Stärke 440
 Stärkediagramm 440
 Stellglied 313, 323
 Stellschrauben 139
 Steuerkette 292
 Steuerung 292
 – Ablauf- 295
 – asynchrone 295
 – elektrische 296
 – fluidische 295
 – Kontakt- 301
 – Kurven- 295
 – mechanische 295
 – Nocken- 295
 – prozessgeführte 295
 – speicherprogrammierbare 302
 – synchrone 295
 – verbindungsprogrammierbare 300
 – Verknüpfungs- 295
 – Wegplan- 295
 – zeitgeführte 295
 Steuerungshierarchie 293
 Steuerungssicht 1061
 STI 646, 702
 Stiftverbindungen 145
 Stirnradverzahnung 176
 Stoffe mit Gefährdungspotenzial 522
 stoffliche Verwertung 531
 Störbauteile 522
 Störstoffe 522, 528
 Stoßarten 1190
 Stoßen 1098
 Strahlschmelzen 999
 Straken 900
 Strangpressen 1162
 Streckziehen 1154
 Streifenprojektionsverfahren 900
 Stress-Strength-Interference 110
 Stribeck-Kurve 153
 Strömungssimulation 988
 Stromventile 383, 405
 Struktur 745
 Strukturdämpfung 689, 691
 strukturierter Text, ST 303
 Strukturierung
 – hierarchische 468
 – prozessorientierte 468
 Strukturimpedanz 679
 Strukturintensitätsanalyse 646, 702
 Strukturleichtbau 489

Strukturmerkmal 756
 Strukturoptimierung 511
 Strukturresonanz 345
 Struktur-Stückliste 1081f., 1084
 Stücklisten 202, 214, 1082
 Stückzahl 416, 781
 Substitution 433
 Summenpegel 349, 352, 652, 658
 Superpositionsprinzip 75
 Support 1012
 SVHC 527
 Sweep-Darstellungen 916
 Swim-Lane-Modelle 1058
 Symbolsprachen 436
 Synchron-Drehfeldmotor 263
 Synthese 420
 System 314, 745, 748
 Systemanalyse 876, 981
 System-FMEA 878
 Systemgraph 763
 Systemleichtbau 489
 Systems Engineering 748
 Szenariomethode 427

T

taktile Messverfahren 900
 – 3D-Koordinatenmesstechnik 900
 – Konturscanning 901f.
 – Koordinatenmesstechnik 900
 – punktuelle Antastung 901f.
 TA Lärm 648
 Target Costing 772
 Team 761
 Tearing 749
 technische Kunststoffe 36
 technische Spezifikation 422
 technisch-wirtschaftliche Bewertung 439
 Technologieinformationen 213
 Teilfunktionen 428
 Teilkostenrechnung 778
 teilkristalline Thermoplaste 34
 Teillösungen 428
 Teleskopzylinder 379
 Temperaturverlauf 955
 Terzfilter 352
 Terzspektrum 352
 Tesselierung 904
 thermischer Ausdehnungskoeffizient 52
 thermo-mechanische Analyse 951
 Tiefziehen 1151
 Tilger 687, 693, 695
 Tilgerleiste 694

Titan
 – Titanlegierungen mit α -Gefüge 27
 – Titanlegierungen über α + β -Gefüge 29
 – Titanlegierungen über β -Gefüge 28
 Toleranzarten 235
 Toleranz-Design 886
 Toleranzen 222
 – Eintragen von 213
 Toleranzpfeil 233
 Toleranzprüfung 230
 Toleranzzone 230f.
 Tolerierungsgrundsatz 226
 Ton 336
 Tonalität 694
 Tonhöhe 336
 Tooling 999
 Topfzeit 1224
 Topologieoptimierung 516, 923f., 989
 Torsionsbeanspruchung 72
 Torsionsschwingungen 171
 Torsionswechselfestigkeit 171
 TPA 710
 Tragfähigkeit
 – einer Klebung 1231
 Trägheitsradius 97
 Transferpfadanalyse 710
 Transport 456
 Treppenstufeneffekt 1011
 Triangulation 904
 TRIZ 432
 TRIZ/TIPS 886
 Trockenlauflager 158
 Trumkraftverhältnis 183

U

Überdeckungsgrad 673
 – Profilüberdeckung 673
 – Sprungüberdeckung 673
 Überlebenswahrscheinlichkeit 123
 Übersetzung 267
 Übertragungsadmittanz 356
 Übertragungsimpedanz 686f.
 Übertragungsweganalyse 709
 Umformen 1141
 Umformmaschinen 1169
 Umformverfahren 1141
 Umformvermögen 1106
 Umgruppierung 433
 Umkehrung 433
 Umschlingungswinkel 181
 Umweltbeeinträchtigungen 604
 umweltgerechte Gestaltung 471
 Umweltkennzeichnungen 605
 umweltorientierte Gestaltung 1194
 Umweltwirkungen 617
 Unabhängigkeitsprinzip 227
 unlegierte Stähle 13
 Unrunddrehen 1132
 Unteransprüche 803
 Unternehmenskennzeichen 813
 Upgrading 538, 776
 Urban Mining 544
 urformende Verfahren
 – Differenzierung von Fertigungsverfahren 1092
 Urheberrecht 814
 Ursachenanalyse 645, 663, 697
 Ursache-Wirkungs-Diagramm 871
 Usability 587
 User-centered Design 472
 User Experience 590
 User-Experience-Test 594

V

Validierung 459, 1020
 Variantenentwicklung 418
 Variantenmanagement 782, 1023
 Varianten-Stückliste 1081, 1085
 Variety Allocation Model 736
 VDI-Richtlinie
 – VDI 2063 638
 – VDI 3720 638
 Ventile 380
 – für Pneumatik 403
 Verbotungsrecht 796, 806
 Verbindung
 – reibschlüssige 164
 Verbindungselemente 138
 Verbundbauweise 470, 491
 Verfahren der 3D-Messtechnik 900
 – direkte Verfahren/Koordinatenbestimmung 900
 – indirekte Verfahren/Koordinatenbestimmung 900
 Verfahren der Flächenrückführung 904
 – diskrete Flächenrückführung 904
 – Freiformflächenkonstruktion 904
 – parametrische Beschreibung 904
 – Tessellierung 904
 – Triangulation 904
 verfahrensgerechte Bauteilkonstruktionen 1118
 Verfahrenskombination 1134
 Verfahrenspatente 797
 Fahrwege 1112
 Verfestigung 1106
 Verformungen 140
 Verfügbarkeit 131, 857

Vergleichsspannung 1195
 Vergleichsspannungen 85
 Vergrößerung 433
 Vergütungsstähle 19
 Verifikation 459, 1020
 Verifikationsrechnungen 458
 Verify-Phase 884
 Verkehrsgeltung 811
 Verkleinerung 433
 Verknüpfungssteuerung 295
 Verlaufsdiagramm 871
 Verlustfunktion nach Taguchi 885
 Vermeiden 522
 Vernetzung 746
 Verpackung 456
 Versagensarten 493
 Versagensformen 139
 Verschiebungsgrößen-Verfahren 938
 Verschleiß 447
 Versetzungen 6
 Verspannungsschaubild 140
 Versteifungsrippe 365
 Versuch 459, 498
 Verteilungsfunktion 123
 Verträglichkeit 435
 Vervollständigen 443
 Verwenden 522
 Verwerten 522
 Verwertungsfachbetrieb 535
 verwertungsgerecht 534
 Verwertungsklassen 532
 Verwertungsversuch 535
 Verzahnungsgesetz 175
 Verzug 38
 – bei Kunststoffen 38
 Vielfalt
 – externe 734
 – interne 734
 Vielfaltsbaum 735
 V-Modell 1057
 Vollkostenrechnung 777
 Volllinie 204
 Vollständigkeit 228
 – bei Zeichnungsdarstellung 222
 Volumenprimitiva 915
 Vorentwurf 663
 Vorsatzmasse 678, 686
 Vorschaltmasse 365, 678
 Vorspannkraft 140
 Voxel-Modellierung 916

W

Wahrheitstabelle 297
 Walzbiegen 1150
 Wälzermüdung 149
 Wälzfürhungen 158
 Wälzgetriebe 175
 Wälzkreise 175
 Wälzlager 148
 Wälzlagertoleranzen 152
 Wälzpunkt 175
 Wanddickenanpassung 40
 Warmbiegen 1150
 Wärmeabgabe 270
 Wärmeaufnahme 271
 Warmfließpressen 1161
 Wasserfalldiagramm 344
 Wechselfestigkeit 93
 Wechselstrommotor 259
 Wechselwirkungen 617
 WEEE (Waste Electric and Electronic Equipment) 523
 Wegbedingungen 966
 Wegerregung 663
 Wegeventile 381, 403
 Wegfunktionen 965
 Weibull-Statistik 48
 Weiterentwicklung 419
 Weiterverwendung 531
 Welle 79, 170
 Welle-Nabe-Verbindungen 162
 – formschlüssige 167
 Wellenlänge 342
 Wellenschwingungen 707
 Wellenzahl 343
 Weltorganisation zum Schutz geistigen Eigentums (WIPO) 795
 Werkkundendienst 830
 Werksnormen 930
 Werkstoffauswahl 1143
 Werkstoffe 499, 1010
 – Art und Menge optimieren 615
 Werkstoffnummern nach DIN 17007 9
 Werkstoffparameter 499
 Werkstoffwahl 495
 Werkzeug 1111
 Werkzeugauslaufwege 1112
 Werkzeugentlüftung 42
 Werkzeugmaschine
 – virtuelle 970
 Werkzeugmaschinen 963
 Werkzeugverschleiß 1106
 Wertanalyse 875
 Wertefunktion 439
 Werteskala 439

- Wertschöpfung 521
 Wertstoffe 528
 Wesenskern 429
 Widerspruchsmatrix 887
 Widerstandsmoment 145
 Wiederholentwicklung 418
 Winkelbeschleunigung 249
 Winkelgeschwindigkeit 81, 249
 Wirkenergie-Umformen 1166
 Wirkflächenform 433
 Wirkungsgrad 250
 Wirkungsplan
 – bürstenloser Gleichstrommotor 324
 – Definition 315
 – Elektromagnet mit Gegenfeder 322
 – Feder-Masse-Dämpfer-Element 320
 – Implementierung 321
 – MEMS-Gyroskop 328
 Wissensbereitstellung 477
 Wöhlerkurve 92
 Wöhlerlinie 117
 Workflowanwendung
 – Rechnerunterstützung 1065
 Workflow-Management-Systeme 1065
 Workflow-Management-Unterstützung 1060
 Workflowunterstützung 1051
 WVA-Nummern 1077
- Z**
- Zählverfahren 115
 Zahneingriffsfrequenz 674
 Zahnfußspannung 178
 Zahnfußtragfähigkeit 177
 Zahnkraftkomponenten 178
 Zahnradgetriebe 175
 Zahnradpaarungen 175
 Zahnriemen 181
 Zahnriemengetriebe 181
 Z-Bewertung 346
 Zehner-Regel 868
 Zeichnungsangabe 229
 Zeichnungsdarstellung 222
 Zeichnungseintragung 231
 Zeichnungsformate
 – nach DIN EN ISO 5457 203
 Zeichnungssatz 202, 457
 Zeitablaufdiagramm 299
 Zeitbereich 344
 Zeitfestigkeit 111
 Zeitschwingfestigkeit 91
 Zeitspanvolumina 1130
 Zeitverzögerungsventil 405, 407
- Zellmodellierung 916
 Zementit 10
 Zerspanbarkeit 1105
 – Einflüsse 1106
 – Einfluss wichtiger Legierungsbestandteile 1108
 – Ferrit 1107
 – Festigkeit 1106
 – Karbidausbildung 1108
 – Legierungselemente 1107
 – Perlit 1107
 – Prozesskriterien 1106
 – Qualitätskriterien 1106
 – reines Eisen 1107
 – Spanformen 1107
 – unlegierte, untereutektoide Stähle 1107
 – Werkzeugverschleiß 1107
 – Wirtschaftlichkeitskriterien 1106
 – Zementit 1107
 Zerspanen 1093
 Zerspankräfte 1106
 Zerspanung
 – Schwierigkeiten 1106
 Zerspanungsbedingungen 1106
 Zerspanungsprozess 1106
 Zerspanungstechnik 1093
 zerstörende Bauteilerfassung 900
 zerstörungsfreie Bauteilerfassung 900
 Zielbereiche 440
 Zielfraktion 522
 Zielkosten 440, 772
 Ziffernsystem 396
 ztfeder
 – Software für Tellerfederberechnung 984
 Zubehörteile
 – eines Hydrosystems 386
 Zufallsausfälle 124
 Zugänglichkeit 1112
 Zugbeanspruchung 69
 Zugmittelgetriebe 180
 Zugspannung 67
 Zugversuch 90
 Zulieferernummer 1077
 Zusatzpatent 805
 Zuschlagskalkulation 777
 – differenzierende 777
 – summarische 777
 Zustand 314 f.
 Zustandsdiagnostik 330
 Zustands(folge)diagramm 298
 Zustandsgraph 298
 Zustandsgröße 315
 Zustandsraumdarstellung
 – Definition 318

- elektrisches Netzwerk 319
- Feder-Masse-Dämpfer-Element 321

Zuverlässigkeit 110, 123, 857

- von Steuerungen 568

Zuverlässigkeitsschaltbilder 129

Zweck 424

Zweckänderung 433

Zweckleichtbau 489

Zylinder 398

- doppelwirkender 377, 399
- einfachwirkender 378

Zylinderstifte 147