



Bibliothek des technischen Wissens

Rolf Kümmerer
Michael Dambacher
Andreas Hartmann

Dietmar Schmid
Burkhard Heine
Hans Kaufmann

Markus Bürger
Wolfgang Rimkus

Konstruktionslehre

Maschinenbau

5., überarbeitete Auflage, mit CD

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL • Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG,
Düsselderger Straße 23 • 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 14009

Die Autoren, mit den Arbeitsschwerpunkten im Buch

Rolf Kümmerer, Dr.-Ing., Prof., Aalen: *Konstruktionsmethodik und Konstruktionssystematik, Entwerfen und Gestalten*

Dietmar Schmid, Dr.-Ing., Prof., Essingen: *Einzelbeiträge in allen Kapiteln*

Markus Bürger, Dipl.-Ing. (FH), Schwetzingen: *Maschinenelemente*

Michael Dambacher, Dipl.-Ing., Studiendirektor, Aalen: *Festigkeitslehre*

Burkhard Heine, Dr. rer. nat. Prof., Aalen: *Werkstoffvorauswahl*

Wolfgang Rimkus, Dr. Dipl.-Ing. (FH), Aalen: *Computer und Konstruktion*

Andreas Hartmann, Dipl.-Ing., Stadtbergen: *Rapid Prototyping, FMEA*

Hans Kaufmann, Dipl.-Ing. (FH), Studiendirektor, Aalen: *Pneumatik und Hydraulik*

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Schmid, Essingen

Bildbearbeitung: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar
Agathe Schmid-König, Technische Illustration und Gestaltung, 64668 Rimbach

Betreuung der Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, Ostfildern

Dem Buch wurden die neuesten Ausgaben der Normen und Gesetze zu Grunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die Normblätter selbst und die amtlichen Gesetzestexte. Wie in Lehrbüchern üblich, werden etwa bestehende Patente, Gebrauchsmuster oder Warenzeichen meist nicht erwähnt. Das Fehlen eines solchen Hinweises bedeutet daher nicht, dass die dargestellten Produkte davon frei sind. Die Bilder sind von den Autoren entworfen bzw. entstammen aus deren Arbeitsumfeld. Soweit Bilder, insbesondere Fotos, einem Copyright Dritter unterliegen sind diese mit dem ©-Symbol und dem Urhebername versehen und im Quellenverzeichnis aufgelistet.

5. Auflage 2017

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-1469-6

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2017 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten

<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald und Grafik und Sound, 50679 Köln

Umschlagfotos: SKF, Göteborg; Skizze eines Wälzlagers von *Sven Wingquist*, um 1907

Druck: Tutte Druckerei & Verlagsservice GmbH, 94121 Salzweg

Vorwort

Die Konstruktionslehre ist die *Königsdisziplin* der Technik. Die Konstruktion einer Maschine oder Anlage definiert die Eigenschaften, die prinzipiellen Herstellungsverfahren, den Gebrauch, die Umweltbeziehungen und nicht zuletzt die Kosten. Eine gute Konstruktion ist die Voraussetzung für einen Produkterfolg.

In diesem Buch wird der Leser und Lernende eingeführt in das *methodische und systematische Konstruieren*, mit Anleitung zum intuitiven Herangehen an die Aufgabenstellungen, zum Auswählen und zum Bewerten von Lösungsideen und Lösungen, jeweils unterlegt mit einer Vielzahl von Beispielen und Übungen.

Im Kapitel *Entwerfen und Gestalten* werden alle wichtigen Gesichtspunkte einer Konstruktionsaufgabe, aus gehend von den generellen Gestaltungsgrundlagen und den fertigungsorientierten Gestaltungsprinzipien bis hin zu allen anderen Eigenschaften einer Konstruktion, wie z. B. Ergonomie, Umwelt und Sicherheit, ausführlich behandelt.

Das Kapitel *Maschinenelemente* bringt dann eine Vielzahl von bekannten Einzellösungen und Normteilen, aus denen sich Konstruktionen zusammensetzen. Hier findet man in systematischer Aufreihung die Bauteile, die, meist technisch abgesichert, als Zukaufteile in Konstruktionen integriert werden können.

Der *Computer in der Konstruktion* ist zu einem Elementarwerkzeug geworden und befruchtet in vielfältiger Weise die Konstruktionsaufgaben. Er ist unabdingbar für Recherche, Zeichnungserstellung, Berechnung, Archivierung, Präsentation und Kommunikation. In diesem Sinne wird eine Übersicht gegeben. Für die kreative Gestaltung und Problemlösung, also für den eigentlichen Erfindungsvorgang beim Konstruieren, ist der Computer wenig hilfreich, sogar eher hinderlich.

Zum Verständnis konstruktiver Ausgestaltungen, zur Berechnung von Einzelementen, zum Abstrahieren von Zusammenhängen und zum Vermeiden von „Kardinalfehlern“ sind Kenntnisse in der *Festigkeitslehre* unabdingbar. Die Festigkeitslehre ist oft ein eigenständiges Lehrgebiet, häufig ist sie aber auch integriert in andere Fächer, wie z. B. der Technischen Mechanik oder der Konstruktionslehre. Damit der Leser des Buches zumindest die wichtigsten festigkeitsrelevanten Beziehungen zur Hand hat, ist dem Buch eine *Kleine Festigkeitslehre* angehängt.

Zielgruppen für das Buch sind Techniker und Studierende der Fachrichtungen Maschinenbau, Produktionstechnik und Mechatronik, sowie all jene, die sich mit technischen Gestaltungen auseinandersetzen, wie z. B. Studierende des Design, des technischen Vertriebs und der Wirtschaftsingenieur – Wissenschaften.

Die vierfarbige Ausgestaltung des Buches ist für ein Konstruktionslehrbuch ungewöhnlich. Sie ist aber für unsere Zielsetzung notwendig. Konstruktionslehre darf eben kein graues, abstraktes, von Zahlen und schwarzen Strichen geprägtes Lehrgebiet sein, sondern ihr gehört als wichtigste Technikdisziplin die allerbeste Ausstattung, um die Nutzer zu kreativem Gestalten anzuregen, sie zu beflügeln und ihnen die schon bekannten Lösungen und Maschinenelemente in anschaulichster Weise aufzuzeigen. So findet man in diesem Buch auch sehr viele Fotografien und mehrfarbige Zeichnungen.

Die **5. Auflage** befasst sich auch mit den Veränderungen durch die **4. Industrielle Revolution** (Industrie 4.0). Es wird an mehreren Stellen im Buch darauf eingegangen. Zu den üblichen Forderungen an eine Konstruktion kommen nun die Vernetzbarkeit und das intelligente Verhalten im Sinne von *smart products* hinzu. Auf der zugehörigen CD¹ befinden sich die Bilder des Buchs, ein Repetitorium, die Lösungen zu den Aufgaben der Festigkeitslehre (Anhang 1) und die Berechnungen zu den Werkstoffeigenschaften (Anhang 2). Damit eröffnen sich viele Möglichkeiten der Wissensvertiefung und Wissensverbreiterung. Desweiteren sind eine Reihe von wichtigen Gesetzen und eine ausgearbeitete anschauliche Darstellung der EU-Maschinenrichtlinie enthalten.

Im Sommer 2017

Dietmar Schmid

¹ **Rechtliche Hinweise zur CD (siehe auch CD selbst).** Die digitale Weitergabe der CD oder das Veröffentlichen der Inhalte der CD oder des Buches oder Teile davon, z. B. im Internet oder in einem Intranet sind nicht erlaubt. Lehrer an allgemeinbildenden und beruflichen Schulen sowie Ausbilder dürfen die CD zur Erstellung von Unterrichtsmaterialien für *ihren eigenen* Unterricht verwenden und in Klassenstärke in Papierform vervielfältigen. Schüler dürfen die Inhalte im Rahmen des Schulunterrichts für die Ausarbeitung von Referaten, Präsentationen etc. verwenden. An Hochschulen dürfen Inhalte z. B. über einen Beamer oder ähnlichem Gerät während einer Lehrveranstaltung *gezeigt* werden. Eine weitergehende Nutzung, z. B. von Bildern in Skripten oder in wissenschaftlichen Arbeiten ist ohne Genehmigung des Verlags nicht erlaubt. In allen Fällen ist die Quellenangabe *Konstruktionslehre, Verlag Europa-Lehrmittel* obligatorisch. Alle weiteren Nutzungen müssen beim Verlag schriftlich angefragt werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Konstruktionsmethodik und Konstruktionssystematik		7
1.1	Einleitung	7
1.1.1	Begriffe, Definitionen.....	7
1.1.2	Geschichtliche Entwicklung.....	10
1.2	Vorgehensplan beim systematischen Konstruieren	14
1.3	Analyse der Aufgabenstellung	16
1.3.1	Anforderungsliste.....	18
1.3.2	Kern der Aufgabe, Problemkern, Gesamtfunktion.....	21
1.3.3	Aufgliedern der Gesamtfunktion in Teilfunktionen.....	23
1.3.4	Darstellung des Problemkerns.....	23
1.4	Systematische Lösungssuche	24
1.4.1	Bemerkungen zur Methodik und zum Denkprozess.....	24
1.4.2	Methoden zur Ideenfindung.....	27
1.4.3	Problemlösungs-Sitzungen.....	28
1.4.4	Einzelne Methoden.....	28
1.4.4.1	Brainstorming.....	28
1.4.4.2	Brainwriting-Methoden.....	30
1.4.4.3	Morphologischer Kasten.....	33
1.4.4.4	Verwendung von Katalogen.....	35
1.5	Bewertung und Auswahl	39
1.5.1	Allgemeines zum Wertbegriff.....	39
1.5.2	Bewertungskriterien.....	42
1.5.3	Bewertungsverfahren.....	43
1.5.3.1	Rangfolgeverfahren.....	43
1.5.3.2	Klassenbildung, Notengebung.....	43
1.5.3.3	Punktebewertungen.....	43
1.5.3.4	Punktebewertungen nach Wertefunktionen.....	45
1.5.3.5	Nutzwertanalyse.....	45
1.5.3.6	Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225.....	47
1.6	Darstellung von Lösungsideen während der Lösungssuche	50
1.7	Übungen und Beispiele zur Lösungssuche	53
1.8	FMEA – Failure Mode And Effekt Analysis	59
1.8.1	Die Auswirkungen von Fehlern.....	59
1.8.2	Durchführung einer Konstruktions-FMEA.....	60
1.9	Von der Konstruktion zur Fertigung	63
1.9.1	Stücklisten und Erzeugnisgliederung.....	64
1.9.2	Erzeugnisstrukturierung.....	67
1.9.3	Teileverwendungsnachweis.....	68
1.9.4	Nummernsysteme.....	69
1.9.5	Sachmerkmale und Relationsmerkmale.....	70
2 Entwerfen und Gestalten		71
2.1	Prinzipielles Vorgehen	71
2.2	Allgemeine Gestaltungsgrundlagen	72
2.2.1	Gestaltungsgrundregeln.....	72
2.2.2	Allgemeine Gestaltungsregeln.....	76
2.2.2.1	Grundforderungen bei der Gestaltung.....	76
2.2.2.2	Einfache Gestaltungselemente und Formelemente.....	76
2.2.2.3	Prinzip der konstanten Wandstärke.....	78
2.2.2.4	Prinzip der Kraftleitung – Der Kraftfluss.....	80
2.2.2.5	Wirkung von Kerben auf den Kraftfluss.....	81
2.2.2.6	Berücksichtigung der Gefügestruktur bei Umformverfahren.....	85
2.3	Gestaltungsrichtlinien	86
2.3.1	Festigkeitsgerechtes Gestalten.....	86
2.3.1.1	Gestaltung bei Zugbeanspruchung.....	88
2.3.1.2	Gestaltung bei Druckbeanspruchung.....	88
2.3.1.3	Gestaltung bei Biegebeanspruchung.....	89
2.3.1.4	Gestaltung bei Schubbeanspruchung.....	90
2.3.1.5	Gestaltung bei Torsionsbeanspruchung.....	90
2.3.1.6	Gestaltung bei zusammengesetzter Beanspruchung.....	91
2.3.2	Werkstoffgerechtes Gestalten.....	93
2.3.2.1	Allgemeines.....	93
2.3.2.2	Einteilung der Werkstoffe.....	95
2.3.2.3	Metallische Werkstoffe.....	96
2.3.2.4	Polymere.....	99
2.3.2.5	Keramiken und Gläser.....	101
2.3.2.6	Verbundwerkstoffe.....	102
2.3.2.7	Werkstoffe für den Leichtbau.....	104
2.3.2.8	Praktische Werkstoffwahl.....	105
2.3.3	Fertigungsgerechtes Gestalten.....	106
2.3.3.1	Gussgerechtes Gestalten.....	110
2.3.3.2	Schweißgerechtes Gestalten.....	122
2.3.3.3	Lötgerechtes Gestalten.....	139
2.3.3.4	Klebegerechtes Gestalten.....	145
2.3.3.5	Schmiedegerechtes Gestalten.....	149
2.3.3.6	Zerspangerechtes Gestalten.....	156
2.3.3.7	Vorrichtungsgerechtes Gestalten.....	164
2.3.3.8	Gestalten von Blechteilen.....	167
2.3.4	Konstruieren mit Kunststoffen.....	173
2.3.4.1	Allgemeines.....	173
2.3.4.2	Werkstofftechnische Gesichtspunkte.....	176
2.3.4.3	Gestaltung.....	177
2.3.4.4	Werkzeugkonstruktion.....	183
2.3.5	Kostengerechtes Gestalten.....	191
2.3.5.1	Allgemeines.....	191
2.3.5.2	Kostenbegriffe.....	192
2.3.5.3	Relativkosten.....	193
2.3.5.4	Konstruktionskosten.....	195
2.3.5.5	Materialkosten.....	195
2.3.5.6	Fertigungskosten.....	196
2.3.6	Automatisierungsgerechtes Gestalten.....	197
2.3.6.1	Allgemeines.....	197
2.3.6.2	Automatisierungsgerechte Gestaltung.....	198
2.3.7	Montagegerechtes und demontagegerechtes Gestalten.....	200
2.3.7.1	Allgemeines.....	200
2.3.7.2	Montage.....	200
2.3.7.3	Demontage.....	202
2.3.7.4	Rationalisierung.....	202
2.3.7.5	Gestaltung.....	203
2.3.8	Ergonomische Gestaltung.....	205
2.3.8.1	Der Mensch ist das Maß.....	205
2.3.8.2	Methodik zur Ergonomie.....	209
2.3.8.3	Gestaltung von Griffen, Stellteilen und Bediengeräten.....	210
2.3.8.4	Projektbeispiel PHG.....	212
2.3.9	Sicherheitsgerechtes Gestalten von Maschinen.....	213
2.3.9.1	Bauteilversagen und mangelnde Stabilität.....	214
2.3.9.2	Ungeschützt bewegte Maschinenteile.....	217
2.3.9.3	Teile mit gefährlicher Oberfläche.....	220
2.3.9.4	Transportmittel und bewegte Arbeitsmittel.....	220
2.3.9.5	Geprüfte Sicherheit.....	220

2.3.9.6 EU-Maschinenrichtlinie 221
 2.3.9.7 Europäische Sicherheitsnormen 224
 2.3.10 Umweltgerechtes Gestalten 227
 2.3.10.1 Lärm 227
 2.3.10.2 Vibration 233
 2.3.10.3 Recyclinggerechte Konstruktion 236
 2.3.11 Transportgerechtes und lagergerechtes
 Gestalten 239
 2.3.12 Formgerechtes und ästhetisches Gestalten. 241

3 Maschinenelemente 243

3.1 Einführung 243
3.2 Achsen und Wellen 244
 3.2.1 Übersicht 244
 3.2.2 Formgebung 248
3.3 Naben und Verbindungen zu Wellen 251
 3.3.1 Die Nabe 251
 3.3.2 Welle-Nabe-Verbindungen (WNV)..... 252
 3.3.2.1 Kraftschlüssige WNV 253
 3.3.2.2 Formschlüssige WNV 258
 3.3.2.3 Stoffschlüssige WNV 262
3.4 Drehlager und Führungen 263
 3.4.1 Wälzlager 264
 3.4.1.1 Einführung..... 264
 3.4.1.2 Bezeichnungen 265
 3.4.1.3 Lagerarten (Auswahl)..... 267
 3.4.1.4 Einsatz..... 270
 3.4.1.5 Reibung und Schmierung 270
 3.4.1.6 Einbau und Ausbau 273
 3.4.1.7 Passungen beim Einsatz von Wälzlagern ... 274
 3.4.1.8 Gestaltung 275
 3.4.1.9 Lagerluft und Betriebsspiel 277
 3.4.1.10 Steifigkeit 278
 3.4.1.11 Lebensdauer und Tragfähigkeit..... 279
 3.4.1.12 Lebensdauerberechnung 280
 3.4.2 Hydrodynamische Lager 285
 3.4.2.1 Einführung..... 285
 3.4.2.2 Werkstoffe und Bauformen 286
 3.4.2.3 Normung, Ausführungsformen und Einbau. 287
 3.4.2.4 Wartungsfreie Trockenlaufgleitlager 289
 3.4.3 Hydrostatische Gleitlager 291
 3.4.4 Aerostatische Lager (Luftlager) 292
 3.4.5 Magnetlager..... 293
 3.4.6 Führungen 294
 3.4.6.1 Allgemeine Anforderungen 294
 3.4.6.2 Wälzführungen 295
 3.4.6.3 Hydrodynamische Führungen 297
 3.4.6.4 Hydrostatische Führungen 299
 3.4.6.5 Aerostatische Führungen 302
 3.4.6.6 Magnetische Führungen 302
3.5 Dichtungen 303
 3.5.1 Allgemeines 303
 3.5.2 Statische Dichtungen 304
 3.5.2.1 Unlösbare und bedingt lösbare Dichtungen. 304
 3.5.2.2 Lösbare Berührdichtungen 305
 3.5.3 Dynamische Dichtungen 309
 3.5.3.1 Berührungsdichtungen 309
 3.5.3.2 Berührungslose Dichtsysteme 313
 3.5.3.3 Hermetische Abdichtungen 315
3.6 Technische Federn 316
 3.6.1 Physikalische Grundlagen 316
 3.6.2 Einteilung 318
 3.6.3 Anwendung 319

3.6.4 Technische Grundlagen 320
 3.6.4.1 Schraubenfedern 320
 3.6.4.2 Tellerfedern 321
 3.6.4.3 Blattfedern 322
 3.6.4.4 Drehstabfedern 322
 3.6.4.5 Spiralfedern 322
 3.6.4.6 Ringfedern 323
 3.6.4.7 Gasdruckfedern 323
 3.6.4.8 Luftfedern 324
 3.6.4.9 Gummifedern, Elastomerfedern 324
 3.6.4.10 Memory-Metallfedern 325
 3.6.4.11 Integration einer Federfunktion 325
3.7 Schrauben 326
 3.7.1 Einführung..... 326
 3.7.2 Kenngrößen und Ausführungsformen 327
 3.7.3 Sicherung von Schraubverbindungen 331
 3.7.4 Verschraubung von Blechen 333
 3.7.5 Schraubenmontage 334
 3.7.6 Festigkeitsgerechte Verschraubung 335
 3.7.7 Berechnungen 338
 3.7.7.1 Vorspannung 338
 3.7.7.2 Dynamische Belastung 345
 3.7.7.3 Scherbelastung von Passschrauben 346
3.8 Kupplungen 347
 3.8.1 Allgemeines 347
 3.8.2 Nichtschaltende Kupplungen 348
 3.8.2.1 Starre Kupplungen 348
 3.8.2.2 Ausgleichende Kupplungen 349
 3.8.3 Schaltende Kupplungen und Bremsen 356
 3.8.3.1 Selbsttätige Schaltkupplungen 356
 3.8.3.2 Fremdbetätigte Kupplungen 357
3.9 Getriebe 359
 3.9.1 Allgemeine kinematische Eigenschaften.... 360
 3.9.2 Zugmittelgetriebe 365
 3.9.2.1 Allgemeines 365
 3.9.2.2 Riementriebe 366
 3.9.3 Stufenlos verstellbare Getriebe 370
 3.9.3.1 Umschlingungsgetriebe 370
 3.9.3.2 Reibradgetriebe 371
 3.9.3.3 Wälzgetriebe 371
 3.9.3.4 Hydrodynamische Wandler 372
 3.9.4 Zahnräder und Zahnradgetriebe 373
 3.9.4.1 Zahnräder und Zahnradpaarungen 373
 3.9.4.2 Zahnradgeometrie geradzahnter
 Stirnräder 373
 3.9.4.3 Schrägverzahnungen 377
 3.9.4.4 Schneckenverzahnungen 378
 3.9.4.5 Kegelradverzahnung 379
 3.9.4.6 Innenverzahnung 380
 3.9.4.7 Schraubradverzahnung 382
 3.9.4.8 Zahnradwerkstoffe und ihre Behandlung ... 382
 3.9.4.9 Belastungen am Zahnfuß und
 Modulauswahl 383
 3.9.4.10 Getriebestufung und Zähnezahlauswahl.... 384
 3.9.4.11 Getriebeart und Konstruktion 385
 3.9.4.12 Schaltgetriebe 388
 3.9.4.13 Getriebebeispiele 389
 3.9.5 Getriebe mit ungleichförmigen
 Bewegungen 393
 3.9.5.1 Kurbelgetriebe 393
 3.9.5.2 Getriebe mit aussetzender Bewegung 394
 3.9.6 Getriebe für Linearbewegungen 395
 3.9.6.1 Lineare Zugmittelgetriebe 395
 3.9.6.2 Zahnstange-Ritzel-Trieb 396
 3.9.6.3 Gewindetrieb 397
 3.9.6.4 Schnecke-Zahnstange-Trieb 401

4 Antriebe	402	Anhang 1: Kleine Festigkeitslehre	473
4.1 Einführung und Übersicht	402	1 Aufgaben und Ziele	473
4.1.1 Fluidtechnik	402	2 Grundbelastungsfälle	474
4.1.2 Elektrische Antriebstechnik	402	3 Beanspruchung auf Zug	474
4.2 Pneumatik	403	3.1 Zugspannung	474
4.2.1 Drucklufterzeugung	403	3.2 Zugversuch	475
4.2.2 Druckluftnetz	404	3.3 Zulässige Zugspannung	477
4.2.3 Ventile	404	4 Beanspruchung auf Druck	478
4.2.4 Aktoren	405	4.1 Druckspannung	478
4.3 Hydraulische Anlagen	408	4.2 Druckversuch	478
4.3.1 Physikalische Grundlagen	409	4.3 Zulässige Druckspannung	479
4.3.1.1 Hydrostatik	409	4.4 Knickung	479
4.3.1.2 Hydrodynamik	410	4.5 Flächenpressung	481
4.3.2 Komponenten	411	5 Beanspruchung auf Biegung	482
4.3.3 Aktoren	412	5.1 Biegespannung	482
4.3.4 Hydrospeicher	414	5.2 Biegemoment	483
4.4 Elektrische Antriebe	415	5.3 Zulässige Biegespannung	484
4.4.1 Rechnerische Grundlagen	415	6 Beanspruchung auf Schub	485
4.4.2 Erste Orientierung	417	6.1 Schubspannung	485
4.4.3 Drehstromantriebe am Drehstromnetz	419	6.2 Schubmodul	486
4.4.3.1 Allgemeines	419	6.3 Zulässige Schubspannung	486
4.4.3.2 Drehstrom-Asynchronmotoren (ASM)	421	7 Beanspruchung auf Torsion	487
4.4.3.4 Energieeffizienz	422	7.1 Torsionsspannung	487
4.4.4 Getriebemotoren	423	7.2 Torsionsmoment	488
4.4.5 Drehstromantriebe mit Umrichter	425	7.3 Zulässige Torsionsspannung	489
4.4.6 Direktantriebe, Linearmotoren	427	8 Dynamische Beanspruchung	490
4.4.7 Kleinmotoren	428	8.1 Schwingende Beanspruchung	490
4.4.8 Schrittmotoren	429	8.2 Spannungsermittlung	490
4.4.9 Piezoaktoren	429	8.3 Zug-Druck-Wechselsfestigkeit	451
		8.4 Dauerschwingfestigkeit	492
		8.5 Zulässige Spannung	494
		9 Kerbwirkung	495
		9.1 Spannungskonzentration	495
		9.2 Statische Beanspruchung	495
		9.3 Formzahl	496
		9.4 Festigkeitsverhalten unter Kerbwirkung	497
		9.5 Kerbschlagbiegeversuch	498
		10 Wärmespannungen	499
		10.1 Wärmeausdehnungskoeffizient	499
		10.2 Wärmedehnung	499
		10.3 Einachsiger Spannungszustand	500
		10.4 Mehrachsiger Spannungszustand	500
		10.5 Eigenspannungen	500
		11 Allgemeiner Spannungs- und Verformungszustand	501
		11.1 Spannungen an schrägen Schnitten	501
		11.2 Mohr'scher Spannungskreis	502
		11.3 Verallgemeinertes Hooke'sches Gesetz	504
		11.4 Festigkeitshypothesen	505
		11.4.1 Normalspannungshypothese (NH)	506
		11.4.2 Schubspannungshypothese (SH)	506
		11.4.3 Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH)	506
		12 Aufgaben zur Festigkeitslehre	507
5 Computer und Konstruktion	431	Anhang 2: Werkstoffvorauswahl	511
5.1 CAD-Systeme	431	1 Vorbemerkungen	511
5.1.1 Entwicklung	431	2 Wärmeleitfähigkeit – Temperaturleitfähigkeit	513
5.1.2 Der CAD-Arbeitsplatz	432	3 Dichte	517
5.1.3 Arten von CAD-Systemen	433	4 Elastizitätsmodul	518
5.1.4 Werkzeuge und Begriffe	435	5 Versagensspannung	521
5.2 Konstruktionsautomatisierung	438	6 Bruchzähigkeit	526
5.2.1 Knowledge Based Engineering	438	7 Verlustfaktor	532
5.2.2 Eltern-Kind-Beziehungen	439	8 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	534
5.3 Produktdatenmodell	440	Fachwörterbuch Deutsch – Englisch,	Sachwortverzeichnis
5.4 Schnittstellen	440		536
5.5 Baugruppe	444	Quellenverzeichnis	544
5.6 Top- Down und Bottom- Up	446		
5.7 Bionik	447		
5.7.1 Topologieoptimierung	448		
5.7.2 Gestaltoptimierung	449		
5.8 Simulationswerkzeuge	451		
5.9 Virtualisierung	453		
5.9.1 Stereoskopische Betrachtung	453		
5.9.2 Virtual Environments (VE)	453		
5.9.3 Anwendungen von VE-Systemen	456		
5.10 3D-Druck – Additive Fertigung	457		
5.10.1 Körperliche Modelle (Rapid Prototyping)	457		
5.10.2 Endprodukte (Rapid Manufacturing)	458		
5.10.3 Werkzeuge und Vorrichtungen (Rapid Tooling)	459		
5.10.4 Innovation in der Konstruktionstechnik	459		
5.10.5 Additive Fertigungsverfahren	463		
5.10.5.1 Allgemeines	463		
5.10.5.2 Einteilung der Verfahren	464		
5.10.5.3 Prozesse und Verfahren	466		
5.11 Produktdatenmanagement (PDM)	471		
5.12 Product Lifecycle Management (PLM)	472		

1 Konstruktionsmethodik und Konstruktionssystematik

1.1 Einleitung

1.1.1 Begriffe, Definitionen

Forschen, Entwickeln, Konstruieren

Forschen (Grundlagenforschung, anwendungsorientierte Grundlagenforschung, angewandte Forschung) ist geistige Tätigkeit mit dem Ziel, in methodischer, systematischer und nachprüfbarer Weise neue Erkenntnisse zu gewinnen, die eine wesentliche Voraussetzung für das Entwickeln technischer Vorhaben schaffen.

Entwickeln ist zweckgerichtetes Auswerten und Anwenden von Forschungsergebnissen und Erfahrungen technischer und wirtschaftlicher Art, um zu Systemen, Verfahren und Stoffen zu gelangen (Neuentwicklung), oder um bereits vorhandene zu verbessern (Weiterentwicklung). Das Entwickeln umfasst vielfältige Vorgänge, die Grundlagen für das Konstruieren und Fertigen schaffen.

Konstruieren¹ ist das vorwiegend schöpferische, auf Wissen und Erfahrung gegründete und optimale und kostengünstige Lösungen anstrebende Vorausdenken technischer Erzeugnisse, ermitteln ihres funktionellen und strukturellen Aufbaus und das Erstellen der erforderlichen Fertigungsunterlagen. Als Teil des Entwickelns umfasst es das gedankliche und darstellende Gestalten, die Wahl der Werkstoffe und Fertigungsverfahren und ermöglicht eine technisch und wirtschaftlich vertretbare stoffliche Verwirklichung (**Bild 1**).

¹ Konstruieren, von lat. construere = zusammenschichten, erbauen, errichten; Konstruktion, von lat. constructio = Bauart (z. B. einer Maschine), nach Regeln vorgenommene Zusammenstellung

Die Ergebnisse des Konstruierens sind Fertigungsunterlagen mit

- Zeichnungen,
- Stücklisten und
- Erzeugnisgliederungen,

möglichst auf der Basis von gesicherten Berechnungen, von Erfahrungen, von Erprobungen mit Modellen unter Beachtung der verfügbaren Ressourcen an Werkstoffen und Produktionsmitteln.

Die Produktionskosten sind abzuschätzen oder zu berechnen. Für die Produktlebenszeit bis hin zur Produkentsorgung ist ein Produktdatenmodell anzulegen (**Bild 2**).

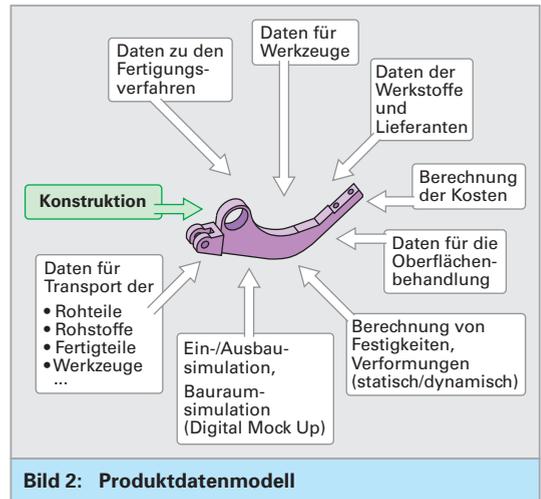


Bild 2: Produktdatenmodell

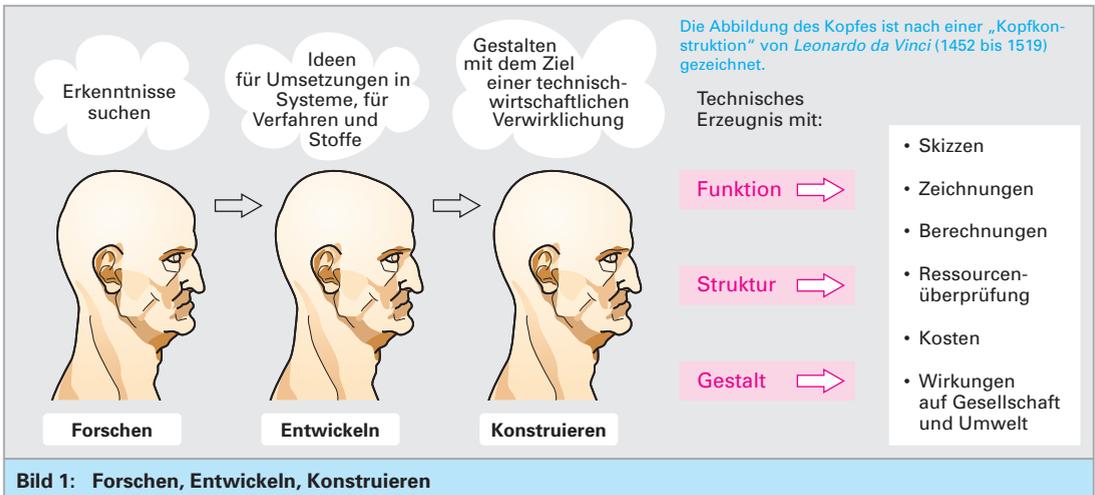


Bild 1: Forschen, Entwickeln, Konstruieren

Konstruktion technischer Erzeugnisse

Technische Erzeugnisse (Bild 1) sind:

- **Einzelne Werkstücke**, z. B. Hebel, Felge, Fahrradrahmen,
- **Baugruppen**, z. B. Ventil, Getriebe, Scheinwerfer,
- **Vorrichtungen und Werkzeuge**, z. B. Bohrvorrichtung, Schnittwerkzeug,
- **Geräte zum Signalumsatz**, z. B. Messuhr, Zähler,
- **Apparate zum Stoffumsatz**, z. B. Reaktor, Verdampfer, Mischer,
- **Maschinen zum Energieumsatz**, z. B. Bohrmaschine, Fräsmaschine, Turbine,
- **Maschinen-Anlagen**, z. B. Bearbeitungszentrum, Fertigungsstrasse.

Anstelle von technischen Erzeugnissen wird häufig auch der Begriff *technische Systeme* verwendet.

In Abhängigkeit vom Schwierigkeitsgrad und vom Neuheitsgrad der Aufgabenstellung unterscheidet man verschiedene **Konstruktionsarten** (Tabelle 1), deren Grenzen jedoch fließend sind:

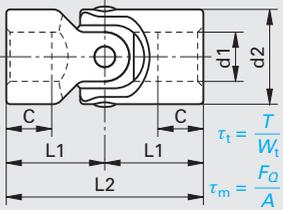
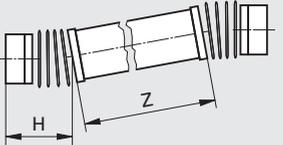
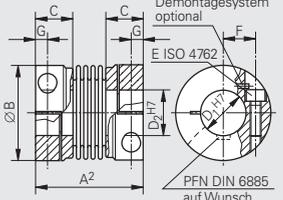
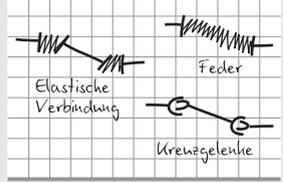
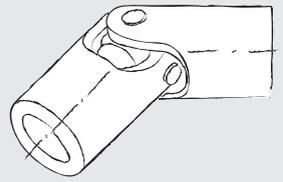
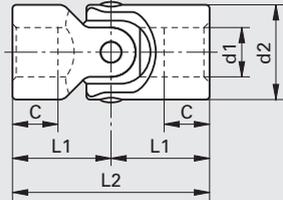
- Variantenkonstruktion,
- Anpassungskonstruktion,
- Neukonstruktion.

Einzelne Werkstücke z.B. Hebel	
Baugruppen z.B. Rückschlagventil Hydraulikzylinder	
Vorrichtungen und Werkzeuge z.B. Ejektorbohrer	
Geräte zum Signalumsatz z.B. Messtaster	
Apparate zum Stoffumsatz z.B. Folienblaskopf	
Maschinen zum Energieumsatz z.B. Werkzeugmaschine	
Maschinen-Anlagen z.B. Montagestation	

Bild 1: Technische Erzeugnisse (Beispiele)

Tabelle 1: Konstruktionsarten		
Konstruktionsart	Tätigkeit	Qualifikation / Anforderung an den Konstrukteur
<p>Variantenkonstruktion</p>	Vorhandene Konstruktion/Lösung wird lediglich in Größe und Anordnung variiert.	Keine hohen Anforderungen.
<p>Anpassungskonstruktion</p>	Anpassen einer bekannten Lösung an veränderte Anforderungen/ Randbedingungen. Das grundsätzliche Lösungsprinzip bleibt erhalten. Vielfach ist hier eine Neukonstruktion einzelner Baugruppen/Teilbereiche erforderlich.	Deutlich höhere Anforderungen.
<p>Neukonstruktion</p>	Finden/Erfinden einer neuen Lösungsidee bei gleicher, veränderter oder neuer Aufgabenstellung. Keine Vorbilder vorhanden. Keine Lösungen bekannt.	Höchste Anforderungen.

Weitere, häufig verwendete Begriffe sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Tabelle 1: Weitere Begriffe																																	
<p>Skizze</p> 	<p>Überwiegend freihändig erstellte bildliche Darstellung.</p>	<p>Gestalten</p> 	<p>Gesamtheit aller Tätigkeiten mit dem die Gestalt von Erzeugnissen bestimmt wird wie z. B. Entwerfen, Berechnen, Dimensionieren.</p>																														
<p>Lösungsprinzip Prinzipielle Lösung Lösungsidee</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>Biegsame Welle Winkelnachgiebige Kupplung</p> </div>	<p>Beschreibt die Vorstellung zur grundsätzlichen Verwirklichung einer oder mehrerer Funktionen durch Auswahl geeigneter Gestaltungselemente, z. B. in Form von Prinzipskizzen oder durch Stichworte.</p>	<p>Zeichnung</p> 	<p>Eine aus Linien bestehende bildliche Darstellung.</p>																														
<p>Lösungsalternative</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p>Gelenkwelle</p> </div>	<p>Weitere Lösungsidee bzw. weiteres Lösungsprinzip.</p>	<p>Technische Zeichnung</p> 	<p>Zeichnung in der für technische Zwecke erforderlichen Art (z. B. Einhaltung von strengen Darstellungsregeln) und Vollständigkeit (Maßeintragungen, technische Hinweise, Tabellen).</p>																														
<p>Prinzipskizze/Funktionsskizze</p> 	<p>Zeichnerische Darstellung zur Beschreibung der Wirkungsweise/Funktion eines Lösungsprinzips mit einfachen Strichen und/oder Symbolen.</p>	<p>Fertigungsunterlagen z.B. Stückliste</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Pos.</th> <th>Menge</th> <th>Benennung</th> <th>Sach-Nr.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>Verbindungswelle</td> <td>4712</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1</td> <td>Gelenkkreuz</td> <td>4713</td> </tr> <tr> <td>⋮</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Pos.	Menge	Benennung	Sach-Nr.	1	1	Verbindungswelle	4712	2	1	Gelenkkreuz	4713	⋮				<p>Alle für die Anfertigung/Herstellung von technischen Erzeugnissen erforderlichen Zeichnungen, Stücklisten, technischen Hinweisen, Tabellen.</p>														
Pos.	Menge	Benennung	Sach-Nr.																														
1	1	Verbindungswelle	4712																														
2	1	Gelenkkreuz	4713																														
⋮																																	
<p>Konstruktionsskizze</p> 	<p>Meist freihändig erstellte zeichnerische Darstellung eines Teils, einer Baugruppe, eines Produktes (einem Entwurf ähnlich).</p>	<p>Pflichtenheft/Lastenheft</p> <p><u>Gelenkwelle:</u> Drehzahl 200 ... 800 1/min Arbeitswinkel ≤ 35° Werkstoff Einsatzstahl, Edelstahl Ausführung ausziehbar ⋮</p>	<p>Schriftlich formulierte Aufgabenstellung in der die geforderten und gewünschten Eigenschaften eines Produktes zusammengestellt sind. Anforderungen des Kunden oder des Lieferanten.</p>																														
<p>Entwurf</p> 	<p>Grafische Darstellung von Gestalt und Anordnung von Teilen/Baugruppen eines zu entwickelnden Produktes.</p>	<p>Anforderungsliste</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Lfd. Nr.</th> <th>Zuordnung</th> <th>Anforderung</th> <th>Daten</th> <th>Verantwortung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>F</td> <td>Ausf. ausziehbar</td> <td></td> <td>Maier</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>M</td> <td>Ausziehlänge</td> <td>≤100mm</td> <td>"</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>M</td> <td>Arbeitswinkel</td> <td>≤ 35°</td> <td>Müller</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>F</td> <td>einfache Wartung</td> <td></td> <td>"</td> </tr> <tr> <td>⋮</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Lfd. Nr.	Zuordnung	Anforderung	Daten	Verantwortung	1	F	Ausf. ausziehbar		Maier	2	M	Ausziehlänge	≤100mm	"	3	M	Arbeitswinkel	≤ 35°	Müller	4	F	einfache Wartung		"	⋮					<p>Schriftlich dargestellte Sammlung aller Anforderungen an ein Produkt ggf. mit Gewichtung. Zusammenstellung aller Daten für die Konstruktion durch den Konstrukteur.</p>
Lfd. Nr.	Zuordnung	Anforderung	Daten	Verantwortung																													
1	F	Ausf. ausziehbar		Maier																													
2	M	Ausziehlänge	≤100mm	"																													
3	M	Arbeitswinkel	≤ 35°	Müller																													
4	F	einfache Wartung		"																													
⋮																																	

1.1.2 Geschichtliche Entwicklung

Schon Jahrhunderte vor unserer heutigen Zeitrechnung haben Menschen Neues entdeckt und Erfindungen gemacht und dies auf verschiedene Art und Weise dokumentiert und so auch der Nachwelt überliefert. Man denke nur an Höhlenmalereien, Felsbilder (**Bild 1**), Reliefdarstellungen in Assyrien und Ägypten (**Bild 2**), Bemalung von Gefäßen und Erstellung von Skulpturen.

Diese Darstellungen waren sicherlich auch ein Element der Kommunikation, um z. B. zu zeigen, wie ein Gegenstand oder Apparat hergestellt oder transportiert werden kann.

Die Mittel der zeichnerischen Darstellung wurden wesentlich von Malern des Mittelalters beeinflusst und verbessert, insbesondere von *Leonardo da Vinci*¹ (**Bild 3**). Er hat seine genialen Erfindungen meist perspektivisch, d. h. in räumlicher Sichtweise dargestellt. Die Gestalt und Wirkungsweise seiner Objekte konnte er anderen so besser vermitteln. Diese Art der Darstellung erfordert ein extrem gutes räumliches Vorstellungsvermögen, gepaart mit künstlerischer Begabung.

1. Industrielle Revolution

Zu Beginn der technischen Entwicklung stellte der „Erfinder“ seine Objekte meist auch selbst her. Konstruieren war damals eine Tätigkeit, die handwerkliche Kunst und konkretes anschauliches Denken miteinander verband. Die Konstruktionszeichnungen wurden vom Konstrukteur künstlerisch ausgearbeitet und häufig mit Details auch in perspektivischer Ansicht versehen (**Bild 4**). Mit der Industrialisierung und der einhergehenden Spezialisierung und Arbeitsteilung erfolgte eine Trennung zwischen Erfinden (Konstruieren) und Herstellen eines Objektes. Die perspektivische Darstellung als Kommunikationsmittel war nicht mehr geeignet. Zunehmend wurden Mehrtafelprojektionen, z. B. die Parallelprojektion, realisiert, deren Erstellungen – im Gegensatz zu künstlerischen Darstellungen – an strenge Regeln gebunden sind.

*Franz Reuleaux*³ führte den Maschinenbau auf mathematische Grundsätze zurück. Zusammen mit *Carl Ludwig Moll* gab er 1854 die „Konstruktionszeichnungen für den Maschinenbau“ heraus. 1861 erschien „Der Konstrukteur“ mit dem er ein Werkzeug zur systematischen Konstruktion von Maschinen an die Hand gab.

¹ *Leonardo da Vinci*, geboren: 1452 bei Vinci (Italien), gestorben: 1519 in Amboise (Frankreich), gilt als Universalgenie.

² *James Nasmyth*, engl. Konstrukteur und Erfinder des Dampfhammers, 1808 bis 1890

³ *Franz Reuleaux*, 1829 bis 1905, dt. Ingenieur und Professor für Maschinenlehre in Berlin

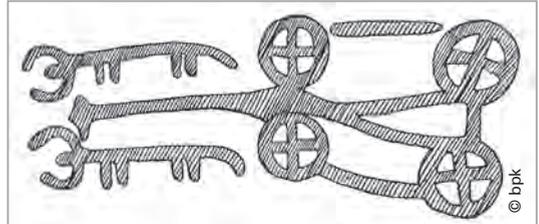


Bild 1: Felszeichnung eines steinzeitlichen Wagens (Höhlenmalerei in Schweden)



Bild 2: Transportwagen in Ägypten (2. Jahrh. v. Chr.)

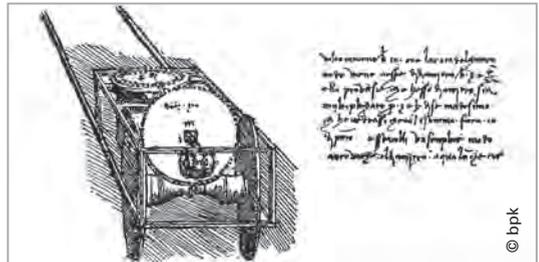
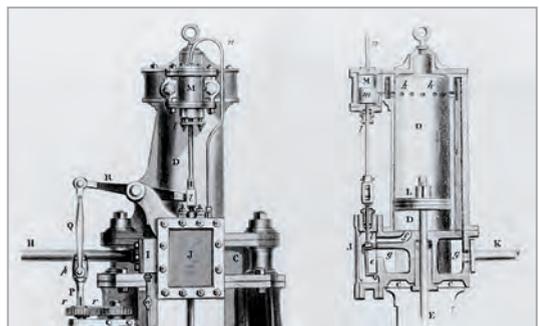


Bild 3: Messwagen von Leonardo da Vinci



© by *Charles Tomlinson*: Cyclopaedia of useful arts, mechanical and chemical, manufactures, mining and engineering, G. Virtue & Co., London, New York, 1854

Bild 4: Detail aus der Konstruktion des Dampfhammers von J. Nasmyth, 1839

2. Industrielle Revolution

Die 2. Industrielle Revolution zu Anfang des 20. Jahrhunderts ist gekennzeichnet durch die Herstellung serienidentischer (Massen-) Produkte und ist geprägt von höchstem Grad an Arbeitsteilung (Fließbandgesellschaft). Verbindliche Maße mit Toleranzangaben in den Konstruktionszeichnungen waren eine Voraussetzung, ebenso die Technik der Vervielfältigung. Die Konstruktionen wurden auf Transparentpapier mit Bleistift oder mit Tusche am Reißbrett gezeichnet (**Bild 1**). Das Transparentpapier ermöglichte durch Belichtung die Herstellung von Kopien (Blaupausen).



Bild 1: Reißbretter im traditionellen Konstruktionsbüro, um 1950

3. Industrielle Revolution

Die Integration der Computertechnik in den Bereich der Produktion hielt Anfang der 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts Einzug in die Konstruktionsbüros. Sie dienten in dieser Zeit zuerst der Herstellung von Zeichnungen (2D-CAD) im Sinne von Computer Aided *Drafting* und lösten in Verbindung mit dem Aufkommen von Tischrechnern (**Bild 2**) die Reißbretter ab.



Bild 2: CAD als Hilfsmittel zum Zeichnen (2D-CAD), um 1970

Mit der Weiterentwicklung der Computertechnik hinsichtlich Rechengeschwindigkeit und Speichervolumen erweiterte sich das CAD zu einer Konstruktionshilfe (Computer Aided *Design*) mit den Möglichkeiten der 3D-Darstellung, der Simulation, der Animation und vielen Möglichkeiten für Berechnungen, z. B. von Festigkeiten und dem Temperaturverhalten (**Bild 3**).

4. Industrielle Revolution

Mit dem 21. Jahrhundert begann auch in der Industrie die intensive Nutzung des Internets. In Deutschland nennt man diese Entwicklung *Industrie 4.0*. Texte, Bilder, Sprache können schnell und weltweit ausgetauscht werden. Dem Konstrukteur stehen mit wenigen Mausklicks Kataloge, Archive, Normen u. v. m. zur Verfügung. Z. B. können Maschinenelemente der Zulieferer in eigene Konstruktionen eingefügt werden. Eigene Konstruktionen können zur Überprüfung schnell an Partner übermittelt werden.

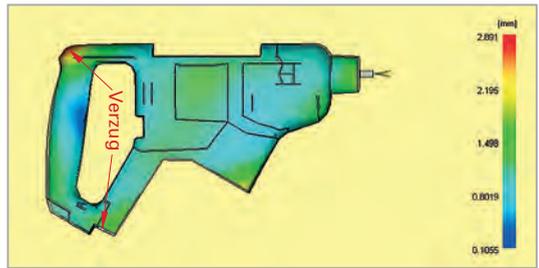


Bild 3: Simulation des Teileverzugs durch Schwindung

Die zu konstruierende Produkte werden selbst internettauglich. Als Cyber Physische Systeme¹ (CPS) werden mechanische und elektronische Produktkomponenten mit Kommunikationskomponenten versehen und können so ohne menschliches Zutun sich geschickt (smart²) verhalten, z. B. im Störfalle Hilfe holen (**Bild 4**).

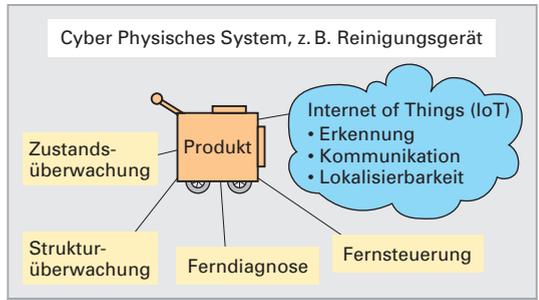


Bild 4: Cyber Physisches Produkt

¹ engl. cybernetics = Kybernetik = Steuerungstechnik aus griech. kybernetes = Steuermann

² engl. smart = geschickt, nützlich

Noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden technische Erfindungen oder Neues von begabten Konstrukteuren überwiegend *intuitiv*¹ und *iterativ*² entwickelt.

Das **intuitive Vorgehen (Bild 1)** ist ein einfallbetontes Konstruieren. Auf Grund einer ersten Idee, gewissermaßen des ersten Geistesblitzes wird eine Lösung erarbeitet.

Das **iterative Vorgehen (Bild 2)** basiert ebenfalls auf der ersten Eingebung. Bei der Weiterbearbeitung wird aber immer wieder und bewusst der Werdegang der Konstruktion mit der Aufgabenstellung verglichen und wo nötig angepasst. Die Entstehung erfolgt also *in Schleifen*.

Voraussetzung ist bei beiden Vorgehensweisen ein umfassendes Wissen auf vielen Gebieten und jahrelange Erfahrung in der Praxis. Aus dieser Zeit stammen noch Aussagen wie z. B.: „Konstruieren ist eine Kunst“, „Zum Konstruieren braucht man schöpferische Begabung, ein konstruktives Gefühl“, „Zum Konstrukteur muss man geboren sein“.

Der berufserfahrene Konstrukteur (**Bild 3**) konnte dabei auf sein praktisches Wissen zurückgreifen. Der junge Konstrukteur muss aber erst in vielen Berufsjahren die Erfahrung sammeln, um eigenverantwortlich größere Aufgaben bearbeiten zu können. Bis dahin versucht er häufig, sich an „gelungenen“ Konstruktionen zu orientieren, um von dort Lösungsmöglichkeiten für die gegebene Aufgabe abzuleiten (assoziatives³ Arbeiten).

Beide Praktiken sind nicht mehr zeitgemäß. Sie sind in vielen Fällen unrationell und unwirtschaftlich.

Dieses intuitive und iterative Arbeiten hatte den „Vorteil“, dass von begabten Konstrukteuren sehr schnell eine Lösung gefunden wurde. Nachteilig war, dass keine alternativen Lösungen vorlagen, die zum Vergleich herangezogen werden konnten; optimale Lösungen wurden selten gefunden. Außerdem war es auch sehr schwer, einem Anfänger das Konstruieren zu vermitteln.

Anwendung findet dieses Vorgehen noch bei Einzelfertigung, z. B. bei der Vorrichtungskonstruktion, Werkzeugkonstruktion, im Schiffsbau und im Kranbau.

In der Mitte des vorigen Jahrhunderts hat man erkannt, dass auch die Konstruktion der in den exakten Wissenschaften vorhandenen Denk- und Arbeitsweisen bedarf. Diese beinhalten:

- Analyse eines Sachverhaltes,
- Prinzipien des Fragens,
- Logisch-analytisches Denken,
- Systematik der Arbeitsschritte,

- Variation und Kombination von Elementen,
- Synthese zu einer Lösung.

Die Ergebnisse der modernen Konstruktionsforschung gestatten heute, den Konstruktionsprozess systematisch bzw. methodisch anzugehen. Dabei werden, wie noch gezeigt wird, die Bereiche der Intuition und/oder Assoziation nicht ausgeklammert.

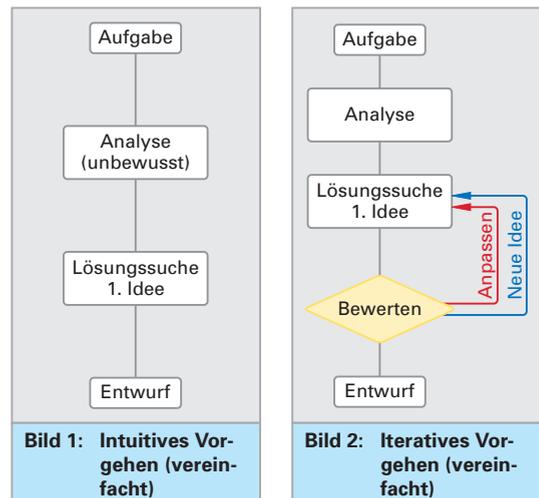
Unter **systematischem Vorgehen (Bild 1, folgende Seite)** versteht man:

- Systematischen *Ablauf* beim Lösen technischer Probleme durch Unterteilung in zeitlich nacheinander ablaufende Arbeitsschritte, sogenannte Problemlösungsphasen,
- systematische *Suche* nach Lösungsmöglichkeiten.

Ein effektives methodisches Konstruieren nutzt sowohl die Vorteile der *Intuition* als auch die einer *Systematik*.

Durch das bewusste Gliedern der Aufgabe in Einzelschritte wird das Finden, das Erfinden und das Aufsuchen von Lösungen erleichtert.

- Das schrittweise logische Vorgehen führt zu einem rationalen Konstruieren.
- Beschreibbare Lösungswege werden leichter erkannt.
- Das Haften an bisher Üblichem (Betriebsblindheit) ist weniger ausgeprägt und konventionelle Lösungen werden zumindest nicht kritiklos übernommen.



¹ Intuition von lat. *intuito* = unmittelbare Anschauung durch Eingebung

² Iteration von lat. *iteratio* = Wiederholung, auch schrittweises arbeiten

³ assoziativ von franz. *association* = Verknüpfung von Vorstellungen

Die Vorteile des systematischen Vorgehens sind:

- Planvollere Vorgehensweise, man vergisst weniger.
- Konstruieren ist *lehrbar* und *erlernbar*.
- Geringere Einarbeitungszeit für junge Konstrukteure.
- Verbesserung des Wirkungsgrades der Konstruktivität.
- Besserer Überblick über mögliche Lösungen.
- Günstigste Lösung kann mit größerer Sicherheit gefunden werden.
- Geringere Gefahr, eine gute Lösung zu übersehen.
- Es werden viele Lösungsideen – auch von Studierenden – gefunden. Die beste Idee von vielen Ideen wird verwirklicht.
- Bei ähnlichen Aufgabenstellungen zu einem späteren Zeitpunkt kann man auf die früher gefundenen Lösungsideen zurückgreifen. Zeitersparnis.
- Auffinden patentrechtlich schützbarer Lösungen einfacher; Marktvorteil für ein Unternehmen gegenüber Wettbewerbern.
- Das planmäßig-schrittweise Vorgehen bei der Aufgabenbearbeitung gestattet es, neben dem Konstruktionsergebnis auch den Konstruktionsvorgang zu dokumentieren.
- Die verwendeten Problemlösungsmethoden haben einen hohen Grad an Allgemeingültigkeit und können zur methodischen Lösungsfindung weit über den Konstruktionsbereich hinaus angewendet werden.
- Eine Arbeitsteilung wird möglich. Man kann im Team arbeiten.

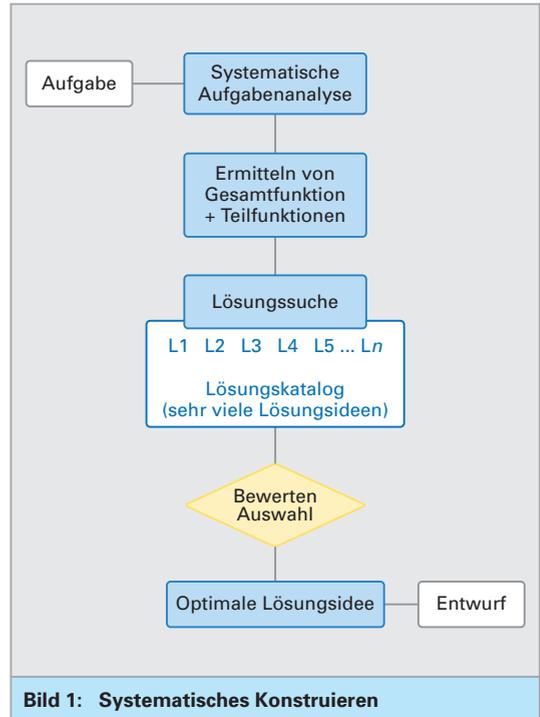
Nachteile sind:

- Vorgehensweise erfordert unter Umständen mehr Zeit, mehr Disziplin und mehr Fleiß.
- Eventuell höhere Konstruktionskosten.

Die Anwendung des systematischen Konstruierens ist:

- Heute überwiegend anzutreffen, vor allem bei komplexen Konstruktionen für Serien- und Massenprodukte.
- Bei Konstruktionen ohne Vorbild, also bei Neukonstruktionen.
- In der Ausbildung.

Konstruieren ist eine schöpferische Tätigkeit unter Anwendung von Intuition, Methodik und Systematik gepaart mit fachlichem Grundlagen- und Expertenwissen, dazu kommt Erfahrung und Rechnereinsatz.

**Bild 1: Systematisches Konstruieren****Literatur**

- **Pahl G., Beitz W.**, Feldhusen J., Grote K. H.: Konstruktionslehre. Springer-Verlag
- **Koller R.**: Konstruktionslehre für den Maschinenbau. Springer-Verlag
- **Roth K.**: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Springer-Verlag, Band 1: Konstruktionslehre, Band 2: Konstruktionskataloge
- **Gerhard E.**: Entwickeln und Konstruieren mit System. Expert-Verlag
- **Hansen F.**: Konstruktionswissenschaft. Hanser-Verlag
- **Steinwachs H.-O.**: Praktische Konstruktionsmethode. Vogel-Verlag
- **Rodenacker W.**: Methodisches Konstruieren. Springer-Verlag
- **Schlottmann D.**: Konstruktionslehre. Springer-Verlag
- **VDI 2221**; Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
- **VDI 2222**; Konstruktionsmethodik, Bl. 1: Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien, Bl. 2: Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen
- **VDI 2223**; Methodisches Entwerfen technischer Produkte
- **VDI 2225**; Konstruktionsmethodik, Bl. 1: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Vereinfachte Kostenermittlung, Bl. 2: Tabellenwerk, Bl. 3: Technisch-wirtschaftliche Bewertung, Bl. 4: Bemessungslehre

1.2 Vorgehensplan beim systematischen Konstruieren

Ein geordnetes schrittweises Vorgehen beginnt mit der Produktplanung, für den Konstrukteur meist mit einer vorgegebenen Aufgabenstellung.

Der anschließende Lösungsprozess ist als eine Kette von Entscheidungen anzusehen. Der Konstrukteur kommt ständig in Konfliktsituationen, in denen er unter mehreren, manchmal auch unter sehr vielen Alternativen auswählen muss. Ebenso wirkt das vielfältige Angebot an Konstruktionsmethoden und unterstützenden Methoden für die einzelnen Erarbeitungsschritte zunächst verwirrend.

In Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2222 lässt sich der Konstruktionsprozess in die folgenden vier Hauptphasen gliedern (**Bild 1**):

1. Analyse der Aufgabenstellung
2. Konzipieren, Lösungssuche, Auswahl
3. Entwerfen, Dimensionieren, Gestalten
4. Ausarbeiten.

Während des gesamten Konstruktionsprozesses, d.h. in allen vier Arbeitsphasen besteht für den Konstrukteur Informationsbedarf. Etwa 20% seiner Arbeitszeit beschäftigt er sich mit der Informationsbeschaffung und Informationsverarbeitung. Ziel muss es deshalb sein, ihm das Benötigte in Form praktischer Hilfsmittel in kürzester Zeit bereitzustellen.

Einige wichtige Hilfsmittel sind:

- Merkmallisten zur Erstellung der Anforderungsliste,
- Lösungssammlungen,
- Konstruktionskataloge,
- Morphologische Kästen,
- Gestaltungsrichtlinien,
- Normen und Richtlinien,
- Wiederholteilsammlungen,
- Katalogteilsammlungen,
- Werkstoffkataloge,
- Relativkostenkataloge,
- Berechnungsprogramme,
- Kataloge vorhandener Betriebsmittel,
- CAD.

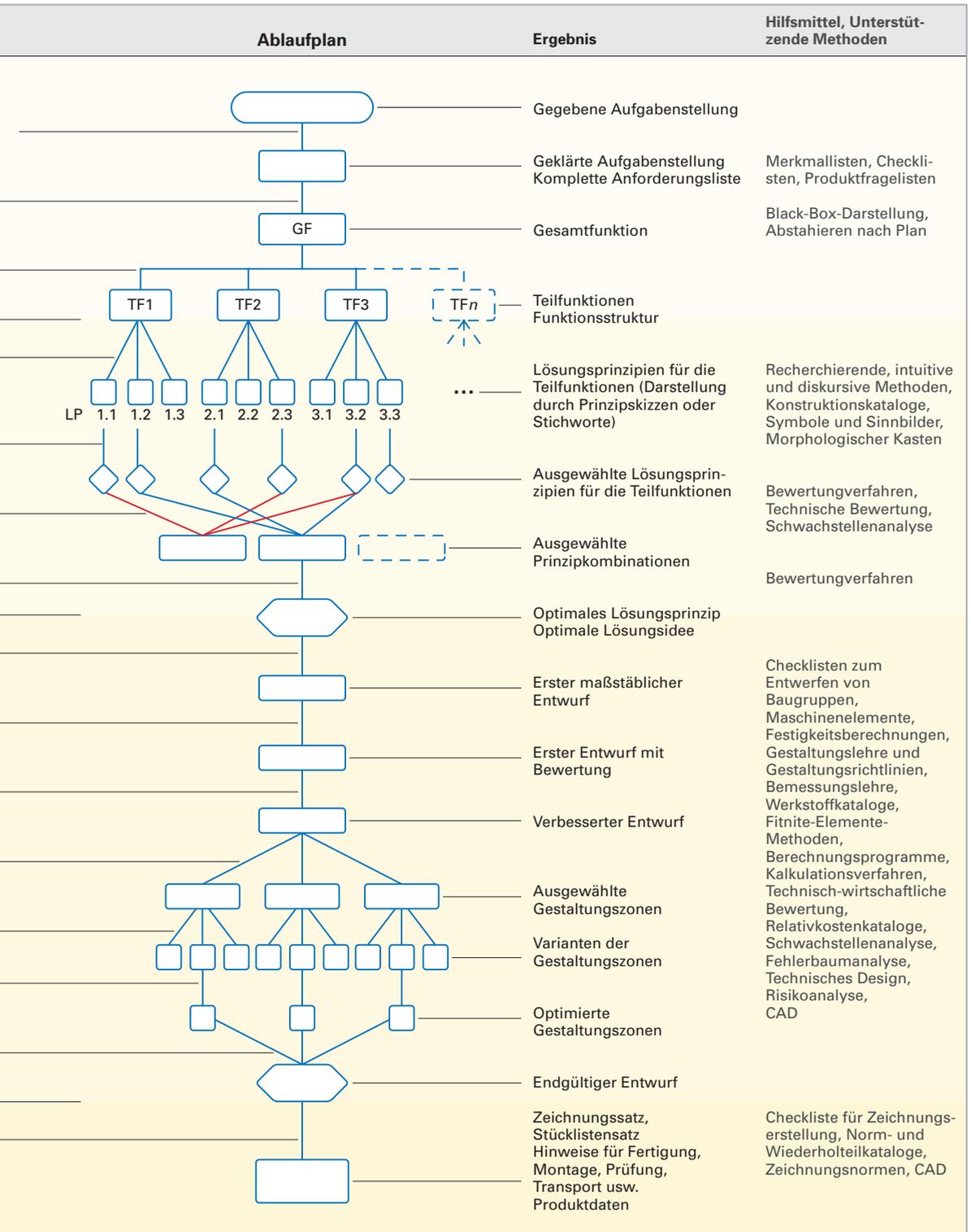
Ziel der nachfolgenden Betrachtungen ist es, die systematische, methodische Vorgehensweise vorzustellen.

Es wird bewusst auf Theorien verzichtet. Es werden nur solche unterstützenden Methoden und Hilfsmittel vorgestellt, die für Schüler und Studierende leicht und schnell erlernbar sind und die deshalb auch in der Praxis aus Zeitgründen meist eingesetzt werden.

Hauptschritte	Tätigkeiten des Konstrukteurs
Analyse der Aufgabenstellung	Klären und präzisieren der Aufgabenstellung Aufstellen der Anforderungsliste
	Abstahieren des Problemkerns Gesamtfunktion (GF) erkennen
	Aufspalten der GF in Teilfunktionen (TF) Funktionsstruktur
Konzipieren, Lösungssuche	Suche nach Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen
	Auswahl geeigneter Lösungsprinzipien (LP) für die Teilfunktionen
	Kombination von Lösungsprinzipien für die Teilfunktionen zur Erfüllung der Gesamtfunktion
	Bewerten der Kombinationen Auswahl des besten Lösungsprinzips
Entwerfen Dimensionieren Bewerten Gestalten ¹	Abschätzen der Hauptabmessungen Evtl. Vorentwürfe; Berechnungen Erster maßstäblicher Entwurf
	Technisch-wirtschaftliche Bewertung
	Ausmerzen von Schwachstellen
	Auswählen von Gestaltungszonen
	Variation der Gestaltungszonen
	Auswahl der besten Gestaltung Technisch-wirtschaftliche Bewertung
	Zusammenstellung des Entwurfs
	Ausarbeiten, Erstellen der Fertigungsunterlagen

¹ Erforderliches Zurückspringen auf frühere Tätigkeiten/Arbeitsschritte ist aus Darstellungsgründen nicht aufgeführt.

Bild 1: Ablauf einer Konstruktion, Tätigkeiten,



1.3 Analyse der Aufgabenstellung

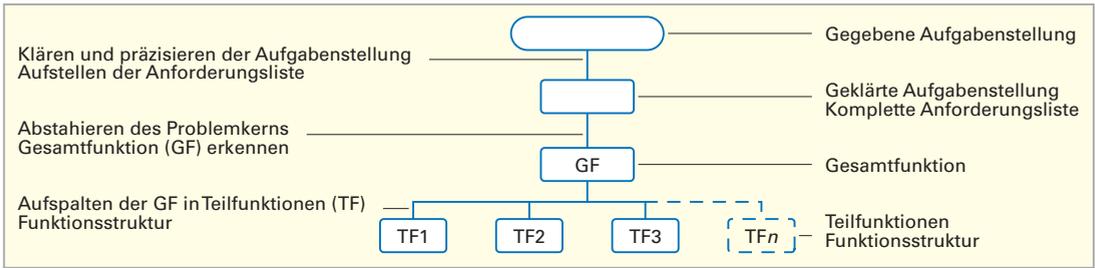


Bild 1: Analyse der Aufgabenstellung

Die erste Tätigkeit für den Konstrukteur ist die Analyse der Aufgabenstellung (**Bild 1**). Aufgabenstellungen kommen aus den verschiedensten Gründen und aus verschiedenen Bereichen auf den Konstrukteur zu (**Bild 2**).

Unternehmensinterne Aufgabenstellungen:

- Aufgaben zur Konstruktion von Betriebseinrichtungen und Fertigungseinrichtungen,
- Konstruktionsverbesserungen und Weiterentwicklungen bestehender Produkte,
- Produktplanung für neue Produkte, z. B. auf Grund einer Marktanalyse.

Externe Aufgabenstellung:

- Kundenaufträge.

Aufgaben zur Ausbildung:

- Gezielte, meist einfache Aufgabenstellung für Übungszwecke.

In den meisten Fällen enthält die vorgegebene Aufgabenstellung aber nicht alle Informationen und Angaben, die zur Bearbeitung der Aufgabe benötigt werden oder die Angaben sind nicht genau genug. Der Konstrukteur muss deshalb die genannten Anforderungen und Bedingungen überprüfen, ggf. berichtigen, vervollständigen, quantifizieren und evtl. gewichten. Dazu sind viele Gespräche und Rückfragen z. B. mit den Auftraggebern, mit den Lieferanten oder mit Behörden notwendig.



Bild 2: Art und Herkunft der Konstruktionsaufgabe

Aufgaben können sehr unterschiedlich genau gestellt sein:

1. Extremfall:

Der Vorgesetzte sagt: *„Die Konkurrenz hat da ein tolles Produkt auf den Markt gebracht. So was ähnliches brauchen wir auch! Machen Sie mal Vorschläge.“* Die Aufgabe ist viel zu kurz und allgemein abgefasst. Es fehlen eine ausreichende Beschreibung und sämt-

liche Anforderungen an das Produkt. Zur Klärung und Präzisierung dieser Aufgabe sind vom Konstrukteur viele Rückfragen notwendig.

2. Extremfall:

Die Aufgabe ist sehr präzise in allen Einzelheiten formuliert und alle Anforderungen sind in einer Anforderungsliste erfasst. Der Konstrukteur muss nichts ergänzen oder nachfragen.

Eine Aufgabenstellung sollte *mindestens* enthalten:

- Eindeutige und ausreichende Beschreibung des gewünschten technischen Erzeugnisses in Form von Texten, evtl. auch in Form von Bildern und Skizzen, z. B. von am Markt vorhandener Geräte, welche die Probleme schon lösen oder noch nicht befriedigend lösen.
- Technische Anforderungen und Betriebsbedingungen, mit Zahlenangaben und Normen, z. B. Betriebsstunden und Umgebungstemperaturen.
- Wirtschaftliche Forderungen und Bedingungen, z. B. was darf das Produkt maximal kosten.
- Ergonomische und ggf. auch psychologische Nutzeranforderungen, z. B. muss das Gerät robust gegen missbräuchliche Nutzung sein.
- Umweltbedingte Anforderungen, z. B. welche Lärmemissionsgrenzwerte sind einzuhalten.
- Welcher Zeitplan ist einzuhalten.
- Wie sind die Lieferbedingungen, z. B. die Gewährleistungen.

Die Wirksamkeit der Konstruktionsarbeit beginnt mit der Klarheit der Aufgabenformulierung!

Unzureichende Aufgabenstellungen führen dazu, dass die Konstruktionstätigkeit zwecks Informationsbeschaffung unterbrochen werden muss, fertige Entwürfe oder Zeichnungen müssen oft unter großem Zeitaufwand (Konstruktionskosten) überarbeitet werden.

Deshalb muss vor der Lösungssuche zum einen die Aufgabenstellung präzisiert werden, um sämtliche Anforderungen an die spätere Lösung zu kennen, zum andern sollte durch Abstraktion das Wesentliche der Aufgabe, der Problemkern herausgearbeitet werden.

Dies wird innerhalb der Konstruktionssystematik im ersten Schritt "Analyse der Aufgabenstellung" erarbeitet (Bild 1, vorhergehende Seite).

Dazu gehören:

1. Ausarbeitung einer kompletten Anforderungsliste, ggf. mit Rangfolge und/oder Gewichtung.
2. Klären der Aufgabenstellung, ermitteln des Problemkerns durch Abstraktion, ermitteln der zu erfüllenden Gesamtfunktion.
3. Aufgliedern der Gesamtfunktion in Teilfunktionen und ggf. aufstellen der Funktionsstruktur (Bild 1).

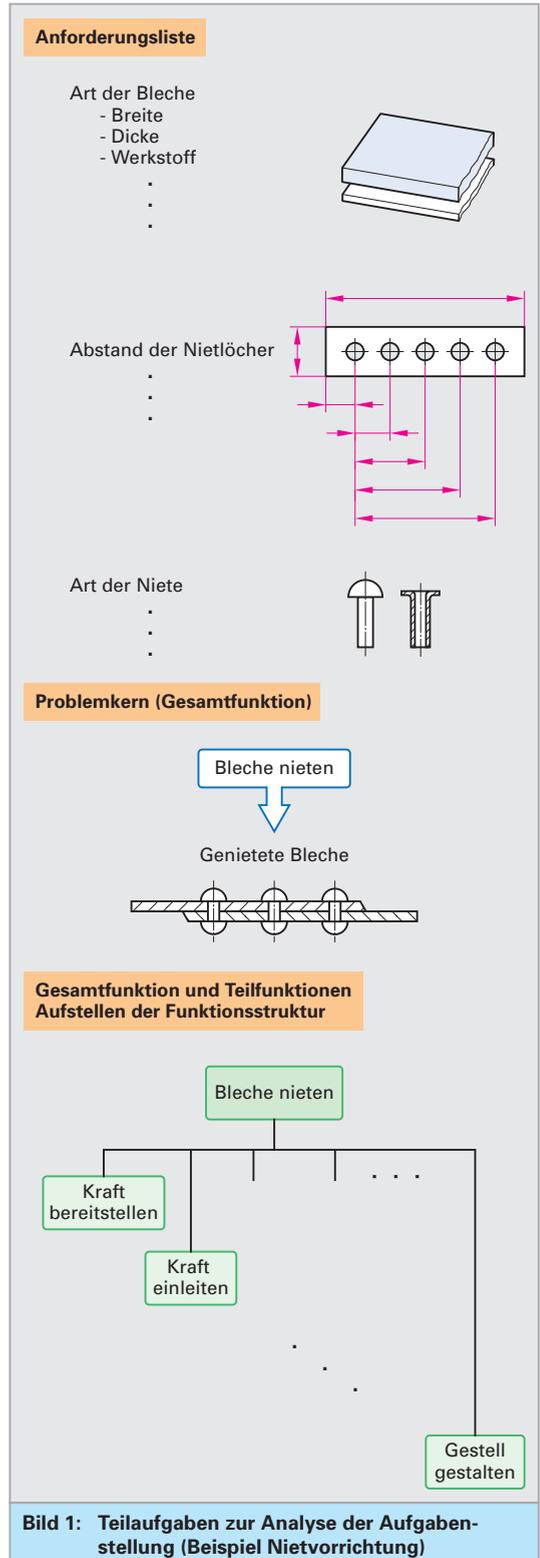


Bild 1: Teilaufgaben zur Analyse der Aufgabenstellung (Beispiel Nietvorrichtung)

1.3.1 Anforderungsliste

Die Anforderungsliste ist das komplette Verzeichnis aller Forderungen, Bedingungen und Wünsche an das zu konstruierende Produkt.

Die Anforderungsliste sollte nicht vom Konstrukteur allein, sondern von allen Beteiligten (Auftraggeber, Entwicklungsingenieur, Fertigungsfachmann, Arbeitsvorbereiter, Verkäufer und Kunde) erarbeitet werden (**Bild 1**). Hierzu bedarf es meist einer geführten und gut vorbereiteten Sitzung mit Tagesordnung und Tischvorlagen zu den einzelnen Gesichtspunkten. Ein Moderator muss die Sitzung leiten und ein Protokollführer muss die wichtigsten Ergebnisse festhalten.

Aus der Überlegung heraus, dass das zu konstruierende Produkt später selbstverständlich funktionieren soll, natürlich auch herstellbar, montierbar, preiswert und außerdem bedienerfreundlich, umweltfreundlich usw. sein soll, ergeben sich folgende Anforderungen an das Produkt und damit für die Konstruktion.

Da die Anforderungsliste insbesondere später bei der Bewertung und Auswahl von Lösungsalternativen gebraucht wird, müssen bei den Anforderungen drei verschiedene wichtige Gruppen unterschieden werden:

Festforderungen (Ja/Nein-Forderungen)

Solche Forderungen müssen unter allen Umständen erfüllt werden. Als Kriterien tragen diese Ja/Nein-Forderungen zum Ausscheiden nicht geeigneter Lösungsideen bereits vor der Anwendung von Bewertungsverfahren bei.

Mindestforderungen (Tolerierte Forderungen)

Sie sind mit \leq oder \geq angegeben bzw. enthalten Sollwertangaben mit Toleranzbereich und Aussagen bezüglich Mindesterfüllung bzw. Idealerfüllung. Diese Kriterien gehen später in Bewertungsverfahren ein und beschreiben dann z. B. den Wert einer Lösung.

Die wichtigsten Anforderungen aufgrund der einzelnen Lebensabschnitte eines Produkts sind:

- Funktion mit physikalisch-technischen Gesichtspunkten,
- Herstellbarkeit und Montierbarkeit,
- Wirtschaftlichkeit,
- Ergonomische, ggf. auch psychologische Gesichtspunkte,
- Vertrieb, Transport,
- Gebrauch, Instandhaltung,
- Recycling.

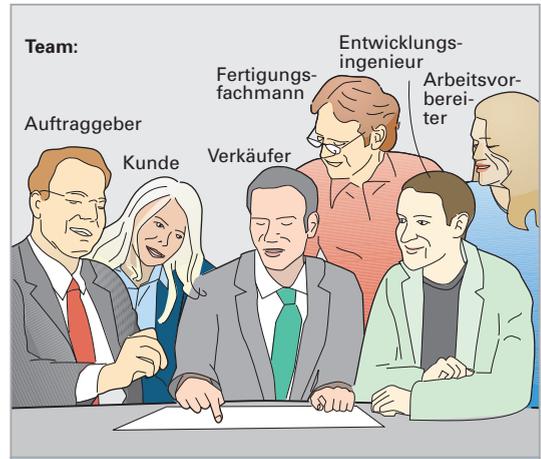


Bild 1: Erarbeiten der Anforderungsliste im Team

Sämtliche Anforderungen werden in eine Liste eingetragen. Ein mögliches Formblatt ist in **Bild 2** gezeigt. Das Formblatt kann den jeweiligen Erfordernissen angepasst werden.

Firma:		Anforderungsliste für		Auftrag Nr.:	
Bearbeiter:				Auftraggeber:	
Lfd. Nr.	Zuordnung F M W	Anforderung	Daten	Verantwortung	Änderung
1					
2					
F = Festforderung, M = Mindestforderung, W = Wunsch					
Ausgabe: Blatt ... von ...				Ersetzt Ausgabe vom:	

Bild 2: Formblatt für eine Anforderungsliste (Beispiel)

Wünsche

Sie sollen wenn möglich erfüllt werden. Ihre Nichterfüllung darf den Wert einer Lösungsalternative nicht schmälern, ihre Erfüllung jedoch den Wert erhöhen!

Bei einer späteren Bewertung dürfen Mindestforderungen und Wünsche *auf keinen Fall* gemischt als Kriterien benutzt werden!

Die gestellten Forderungen sollten möglichst quantifiziert sein, Pauschalforderungen sind zu vermeiden.

Beispiele:

- Nicht „kostengünstig“ sondern < 2000 €.
- Nicht „geräuscharm“ sondern < 65 dB (A).
- Nicht „umweltfreundlich“ sondern Angabe von maximal zulässigen Werten, z. B. für Temperatur oder Emissionswerte.

Zur Erstellung einer kompletten Anforderungsliste benötigt der Konstrukteur meist zusätzliche Informationsquellen. Hilfsmittel zur Erstellung sind sogenannte *Checklisten* oder *Merkmallisten*.

Das Durchlesen solcher Listen bewirkt eine Assoziation im Hinblick auf die vorliegende Aufgabenstellung und gibt eine gewisse Gewähr, dass nichts Wesentliches vergessen wird. **Tabelle 1** zeigt beispielhaft eine solche Merkmalliste.

Nach Fertigstellung der Anforderungsliste sollte diese von den zuständigen Stellen, z. B. von der Geschäftsleitung genehmigt und unterschrieben werden; spätere Änderungen oder Erweiterungen sollten ebenfalls nur mit dieser Genehmigung möglich sein.

In der Praxis hat sich als zweckmäßig erwiesen, für die in einer Anforderungsliste aufgeführten Forderungen und Wünsche die Quelle anzugeben, aufgrund derer diese entstanden sind. Es ist dann möglich, auf den Urheber der Beschlüsse und auf seine eigentlichen Beweggründe zurückzugehen.

Bild 1, folgende Seite zeigt eine gekürzte Anforderungsliste für die Konstruktion einer Nietvorrichtung.

Tabelle 1: Merkmalliste für Anforderungen, Auswahl	
Merkmalsart	Beispiele
Geometrie	Abmessungen, Fläche, Volumen, Raumbedarf, Anzahl, Anschlussmaße, Kollision.
Gewicht	Maximalgewicht, Konstruktion nach den Methoden des Leichtbaus.
Kinematik und Steuerungsart	Bewegungsart, Bewegungsrichtung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung, Ruck, kontinuierliche / intermittierende Arbeitsweise, Numerische Steuerung, Fernsteuerung, PC-Steuerung.
Beanspruchung	Kräfte und Momente mit Größe, Richtung und Häufigkeit; mechanische, klimatische, chemische, thermische, biologische, akustische, elektrische bzw. elektronische Belastung, elektromagnetische Verträglichkeit (EMV); Impuls, Stöße, Gewicht, Last, Verformung, Steifigkeit, Dämpfung, Vibration, Federungseigenschaften, Stabilität, Resonanzen.
Energie	Energieart, Leistung, Wirkungsgrad, Verluste, Reibung, Zustandsgrößen (z. B. Druck, Temperatur, Feuchtigkeit), Erwärmung, Kühlung, Anschlussenergie, Speicherung, Umformung.
Werkstoffe, Hilfsstoffe	Physikalische und chemische Eigenschaften der Stoffe, Hilfsstoffe, vorgegebene Werkstoffe, Schmiermittel.
Kommunikationschnittstellen	Datenschnittstellen, Kommunikationsprotokolle (Software, Hardware), Eingangs- und Ausgangssignale, Schutz vor unberechtigtem Datenzugriff, Firewall, Internetzugang.
Sicherheit, Schutzmaßnahmen	Funktionsicherheit, Arbeitsschutz, Störanfälligkeit, Standsicherheit, Umweltschutz, Unfallverhütung, Überlastsicherung, Explosionsschutz.
Ergonomie	Bedienbarkeit, Handhabbarkeit, Beleuchtung, Lärmbelastung, Beanspruchung der Bedienungsperson, Bedienkraft, Gestaltung.
Fertigung	Mögliche Herstellverfahren, größte Abmessungen, Fertigungsmittel, Vorrichtungen, Werkzeuge, Prüfmittel, Materialauswahl, Normteile, Katalogteile, geforderte Toleranzen.
Überwachung, Monitoring	Mess- und Prüfmöglichkeit, besondere Vorschriften (z. B. TÜV, ASME, DIN, ISO), Bildschirmanzeigen, Fernabfragen, Diagnosecomputer, Fehlerprotokolle.
Montage/ Demontage	Vorschriften, Baugruppen, Integralbauweise, Montagehilfen, manuelle Montage, Roboter- montage.
Transport	Begrenzung nach Größe oder Gewicht, Begrenzung durch Hebezeuge oder Fahrzeuge, Stapelfähigkeit, Transporthilfen, Lastösen.
Nutzung	Nutzungsdauer, Betriebszeit, Einsatzzeit, Einschaltdauer, Zuverlässigkeit, Verschleiß, Dichtigkeit, Austauschbarkeit, Oberflächenschutz, Einsatzort.
Instandhaltung	Wartungs- und Instandhaltungsintervalle, Verschleißteile, Austausch, Ersatz, Instandsetzung.
Recycling	Wieder- und Weiterverwendung, Wieder- und Weiterverwertung, Entsorgung, Deponie, Beseitigung.
Kosten	Herstellkosten, Konstruktionskosten, Kosten für Fertigungsmittel, Amortisation, Rendite.
Termin	Zeit für Konstruktion, Serienbeginn, Liefertermin, Netzplan.

EUROPA AG		Anforderungsliste für	Auftrag Nr.:		
Bearbeiter: A. Lustig		Nietvorrichtung		Auftraggeber:	1704 Affemann 1.4.09
Datum:					
Lfd. Nr.	Zuordnung F M W	Anforderung	Daten	Verantwortung	Änderung
1	F	Bleche - Breite	30 - 300 mm	J. Häfele	
2	F	- Dicke	2 - 10 mm		
3	F	- Länge im Nietbereich	200 - 1000 mm		
4	F	Abstand Nietlöcher vom Blechrand	10 - 40 mm		10 - 50 mm
		Niete:		F. Schneider	
5	F	- Vollniete n. DIN 660, 661, 662	≤ ø 6 mm		
6	F	- Hohlните n. DIN 7338, 7339, 7340	≤ ø 8 mm		
7	F	Döpper und Gegenhalter auswechselbar			
8	F	Energieart: Muskelkraft			
9	h	Handkraft	< 250 N		
10	h	Fußkraft	< 400 N		
11	W	Gute Bedienbarkeit			
12	W	Gute Verstellmöglichkeit			
13	W	Bedienung für Rechts- u. Linkshänder			
14	h	Arbeitshöhe: Werkbank o. ä.			
15	W	Platzbedarf: Gedrängte Bauweise			
16	F	Selbständige Rückstellung des Bedienelementes			
17	W	Wartungsfrei			
18	h	Anzahl Vorrichtungen	5 ... 10		
19	h	Kosten	< 350 Euro	G. Stark	
20	h	Termin	< 4 Monate		

F = Festforderung, M = Mindestforderung, W = Wunsch

Ausgabe: 24.4.09

Blatt 1 von 2

Ersetzt Ausgabe

vom:

Bild 1: Anforderungsliste für eine Nietvorrichtung (Auszug)