

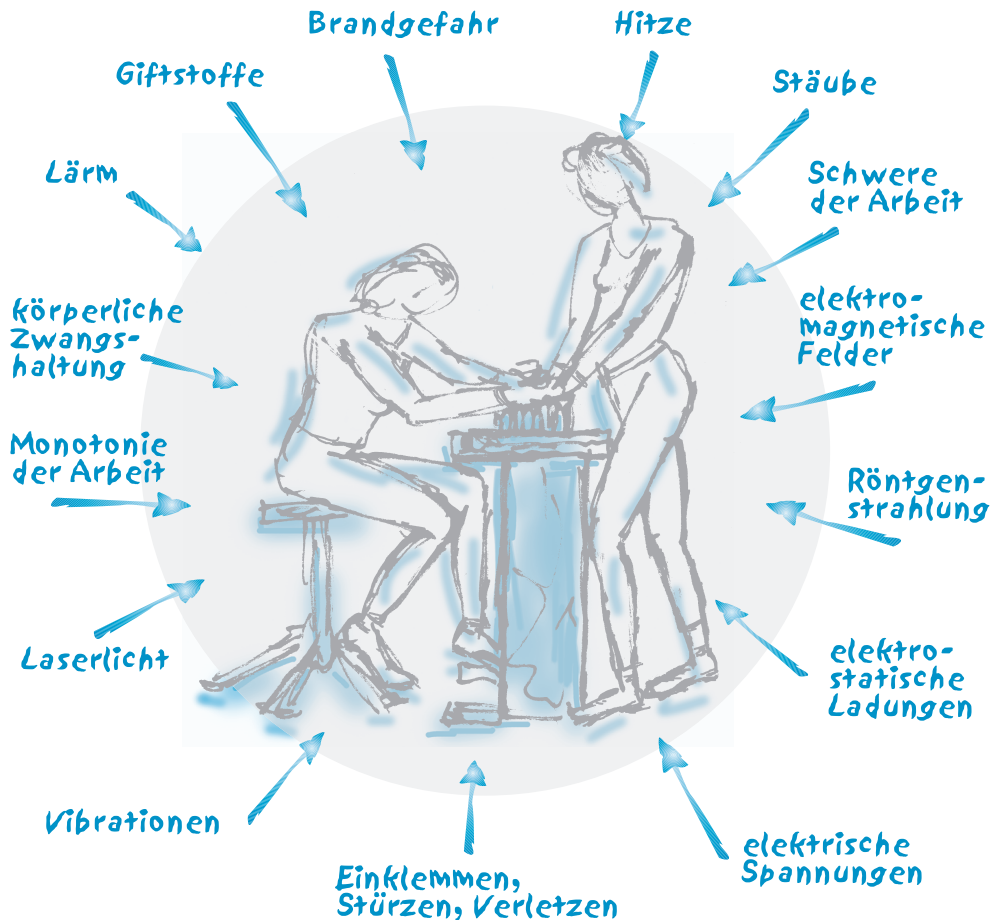
KONSTRUKTIONSLEHRE

MASCHINENBAU



Zum Nachdenken:

Belastungen und Gefahren am Arbeitsplatz



Bürgerliches Gesetzbuch (BGB):

§ 618 [Schutzvorschriften]

Der Dienstberechtigte hat Räume, Vorrichtungen oder Gerätschaften, die er zur Verrichtung der Dienste zu beschaffen hat, so einzurichten und zu unterhalten und Dienstleistungen, die unter seiner Anordnung oder seiner Leitung vorzunehmen sind, so zu regeln, dass der Verpflichtete gegen Gefahr für Leben und Gesundheit soweit geschützt ist, als die Natur der Dienstleistung es gestattet.



Bibliothek des technischen Wissens

Rolf Kümmerer
Michael Dambacher
Andreas Hartmann
Wolfgang Schäfer

Dietmar Schmid
Burkhard Heine
Hans Kaufmann

Markus Bürger
Wolfgang Rimkus
Rupert Zang

Konstruktionslehre

Maschinenbau

6., überarbeitete und erweiterte Auflage, mit CD

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL • Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG,
Düsseldorfer 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), Studiendirektor, Schwetzingen: *Maschinenelemente*

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

Rupert Zang, Dr.-Ing., Prof., Großostheim: *Geometrische Produktspezifikation GPS*

Wolfgang Schäfer, Dr. rer. nat., Bermatingen: *Kunststoffgerechte und FVK-gerechte Gestaltung*

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 zugrunde 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 Urhebernamen versehen und im Quellenverzeichnis aufgelistet.

6. Auflage 2019

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 978-3-8085-1888-5

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden. Zu beachten sind die rechtlichen Hinweise bezüglich der CD-Nutzung (siehe CD selbst).

© 2019 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

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

Druck: optimal media GmbH, 17207 Röbel/Müritz

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, ausgehend von den generellen Gestaltungsgrundlagen und den fertigungsorientierten Gestaltungsprinzipien, der Bauteiltolerierung 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 Einzelelementen, 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 Wirtschaftsingenieurwissenschaften.

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 **6. Auflage** wurde erheblich erweitert. Neu ist ein umfangreiches Kapitel **Geometrische Produktspezifikation GPS**. GPS ist weit mehr als „nur Symbolsprache“ für die Zeichnungserstellung. Es ist die Basis für ein Toleranzmanagementsystem. Des Weiteren gibt es, neben vielen Einzelverbesserungen, weitere neue Kapitel: **Korrosionsschutzgerechtes-Gestalten, Kunststoffgerechtes-Gestalten, FVK-gerechtes Gestalten, Bolzen und Stifte, Thermische Aktoren**.

Die Benennungen, Formelzeichen und bildlichen Darstellungen im Kapitel 8 (Dynamische Beanspruchung, Schwingfestigkeitsversuch, S. 522ff) wurden an die aktuelle Norm DIN 50100: 2016-12 angepasst. So heißt es nun z. B. „Langzeitfestigkeit“ statt wie bisher „Dauerfestigkeit“.

Inhaltsverzeichnis

| | | | | |
|-------------|--|------------|--|--|
| 1 | Konstruktionsmethodik und Konstruktionssystematik | 9 | | |
| 1.1 | Einleitung | 9 | | |
| 1.1.1 | Begriffe, Definitionen | 9 | | |
| 1.1.2 | Geschichtliche Entwicklung | 12 | | |
| 1.2 | Vorgehensplan beim systematischen Konstruieren | 16 | | |
| 1.3 | Analyse der Aufgabenstellung | 18 | | |
| 1.3.1 | Anforderungsliste | 20 | | |
| 1.3.2 | Kern der Aufgabe, Problemkern, Gesamtfunktion | 23 | | |
| 1.3.3 | Aufgliedern der Gesamtfunktion in Teilfunktionen | 25 | | |
| 1.3.4 | Darstellung des Problemkerns | 25 | | |
| 1.4 | Systematische Lösungssuche | 26 | | |
| 1.4.1 | Bemerkungen zur Methodik und zum Denkprozess | 26 | | |
| 1.4.2 | Methoden zur Ideenfindung | 29 | | |
| 1.4.3 | Problemlösungs-Sitzungen | 30 | | |
| 1.4.4 | Einzelne Methoden | 30 | | |
| 1.4.4.1 | Brainstorming | 30 | | |
| 1.4.4.2 | Brainwriting-Methoden | 32 | | |
| 1.4.4.3 | Morphologischer Kasten | 35 | | |
| 1.4.4.4 | Verwendung von Katalogen | 37 | | |
| 1.5 | Bewertung und Auswahl | 41 | | |
| 1.5.1 | Allgemeines zum Wertbegriff | 41 | | |
| 1.5.2 | Bewertungskriterien | 44 | | |
| 1.5.3 | Bewertungsverfahren | 45 | | |
| 1.5.3.1 | Rangfolgeverfahren | 45 | | |
| 1.5.3.2 | Klassenbildung, Notengebung | 45 | | |
| 1.5.3.3 | Punktebewertungen | 45 | | |
| 1.5.3.4 | Punktebewertung nach Wertefunktionen | 47 | | |
| 1.5.3.5 | Nutzwertanalyse | 47 | | |
| 1.5.3.6 | Technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI 2225 | 49 | | |
| 1.6 | Darstellung von Lösungsideen während der Lösungssuche | 52 | | |
| 1.7 | Übungen und Beispiele zur Lösungssuche | 55 | | |
| 1.8 | Die Geometrische Produktspezifikation GPS | 61 | | |
| 1.8.1 | Einleitung | 61 | | |
| 1.8.2 | Aufbau des ISO-GPS-Normensystems | 62 | | |
| 1.8.2.1 | Hintergrund | 62 | | |
| 1.8.2.2 | Zielsetzung | 63 | | |
| 1.8.2.3 | Spezifikation und Verifikation | 63 | | |
| 1.8.2.4 | GPS-Normenmatrix | 63 | | |
| 1.8.2.5 | Rechtsverbindlichkeit von Normen | 64 | | |
| 1.8.3 | Konzepte, Prinzipien und Regeln | 64 | | |
| 1.8.3.1 | Grundsatz des Aufrufens | 64 | | |
| 1.8.3.2 | Grundsatz der Normenhierarchie | 64 | | |
| 1.8.3.3 | Grundsatz der bestimmenden Zeichnung | 65 | | |
| 1.8.3.4 | Grundsatz des Geometrieelementes | 65 | | |
| 1.8.3.5 | Grundsatz der Unabhängigkeit | 66 | | |
| 1.8.3.6 | Grundsatz der Dezimaldarstellung | 66 | | |
| 1.8.3.7 | Grundsatz der Standardfestlegung | 66 | | |
| 1.8.3.8 | Grundsatz der Referenzbedingungen | 67 | | |
| 1.8.3.9 | Grundsatz des starren Werkstücks | 67 | | |
| 1.8.3.10 | Grundsatz der Dualität | 67 | | |
| 1.8.3.11 | Grundsatz der Funktionsbeherrschung | 68 | | |
| 1.8.3.12 | Grundsatz der allgemeinen Spezifikation | 68 | | |
| 1.8.3.13 | Grundsatz der Verantwortlichkeit | 68 | | |
| 1.8.4 | Dimensionelle Bauteiltolerierung | 69 | | |
| 1.8.4.1 | Lineare Größenmaße | 69 | | |
| 1.8.4.2 | Winkelgrößenmaße | 73 | | |
| 1.8.4.3 | Abstände | 74 | | |
| 1.8.5 | Geometrische Bauteiltolerierung | 76 | | |
| 1.8.5.1 | Grundlagen der Form- und Lagetolerierung | 76 | | |
| 1.8.5.2 | Merkmale der Toleranzzone | 80 | | |
| 1.8.5.3 | Toleriertes Geometrieelement | 81 | | |
| 1.8.5.4 | Bezüge und Bezugssysteme | 82 | | |
| 1.9 | FMEA – Failure Mode and Effect Analysis | 89 | | |
| 1.9.1 | Die Auswirkungen von Fehlern | 89 | | |
| 1.9.2 | Durchführung einer Konstruktions-FMEA | 90 | | |
| 1.10 | Von der Konstruktion zur Fertigung | 93 | | |
| 1.10.1 | Stücklisten und Erzeugnisgliederung | 94 | | |
| 1.10.2 | Erzeugnisstrukturierung | 97 | | |
| 1.10.3 | Teileverwendungsnachweis | 98 | | |
| 1.10.4 | Nummernsysteme | 99 | | |
| 1.10.5 | Sachmerkmale und Relationsmerkmale | 100 | | |
| 2 | Entwerfen und Gestalten | 101 | | |
| 2.1 | Prinzipielles Vorgehen | 101 | | |
| 2.2 | Allgemeine Gestaltungsgrundlagen | 102 | | |
| 2.2.1 | Gestaltungsgrundregeln | 102 | | |
| 2.2.2 | Allgemeine Gestaltungsregeln | 106 | | |
| 2.2.2.1 | Grundforderungen bei der Gestaltung | 106 | | |
| 2.2.2.2 | Einfache Gestaltungselemente und Formelemente | 106 | | |
| 2.2.2.3 | Prinzip der konstanten Wandstärke | 108 | | |
| 2.2.2.4 | Prinzip der Kraftleitung – Der Kraftfluss | 110 | | |
| 2.2.2.5 | Wirkung von Kerben auf den Kraftfluss | 111 | | |
| 2.2.2.6 | Berücksichtigung der Gefügestruktur bei Umformverfahren | 115 | | |
| 2.3 | Gestaltungsrichtlinien | 116 | | |
| 2.3.1 | Festigkeitsgerechtes Gestalten | 116 | | |
| 2.3.1.1 | Gestaltung bei Zugbeanspruchung | 118 | | |
| 2.3.1.2 | Gestaltung bei Druckbeanspruchung | 118 | | |
| 2.3.1.3 | Gestaltung bei Biegebeanspruchung | 119 | | |
| 2.3.1.4 | Gestaltung bei Schubbeanspruchung | 120 | | |
| 2.3.1.5 | Gestaltung bei Torsionsbeanspruchung | 120 | | |
| 2.3.1.6 | Gestaltung bei zusammengesetzter Beanspruchung | 121 | | |
| 2.3.2 | Werkstoffgerechtes Gestalten | 123 | | |
| 2.3.2.1 | Allgemeines | 123 | | |
| 2.3.2.2 | Einteilung der Werkstoffe | 125 | | |
| 2.3.2.3 | Metallische Werkstoffe | 126 | | |

| | | | | | |
|------------|--|------------|------------|--|------------|
| 3.5.2.1 | Unlösbare und bedingt lösbare Dichtungen | 336 | 3.9.4.2 | Zahnradgeometrie geradzahnter Stirnräder | 405 |
| 3.5.2.2 | Lösbare Berührdichtungen | 337 | 3.9.4.3 | Schrägverzahnungen | 409 |
| 3.5.3 | Dynamische Dichtungen | 341 | 3.9.4.4 | Schneckenverzahnungen | 410 |
| 3.5.3.1 | Berührungsdichtungen | 341 | 3.9.4.5 | Kegelradverzahnung | 411 |
| 3.5.3.2 | Berührungslose Dichtsysteme | 345 | 3.9.4.6 | Innenverzahnung | 412 |
| 3.5.3.3 | Hermetische Abdichtungen | 347 | 3.9.4.7 | Schraubradverzahnung | 414 |
| 3.6 | Technische Federn | 348 | 3.9.4.8 | Zahnradwerkstoffe und ihre Behandlung | 414 |
| 3.6.1 | Physikalische Grundlagen | 348 | 3.9.4.9 | Belastungen am Zahnfuß und Modulauswahl | 415 |
| 3.6.2 | Einteilung | 350 | 3.9.4.10 | Getriebebestufung und Zähnezahlauswahl | 416 |
| 3.6.3 | Anwendung | 351 | 3.9.4.11 | Getriebeart und Konstruktion | 417 |
| 3.6.4 | Technische Grundlagen | 352 | 3.9.4.12 | Schaltgetriebe | 419 |
| 3.6.4.1 | Schraubenfedern | 352 | 3.9.4.13 | Getriebebeispiele | 420 |
| 3.6.4.2 | Tellerfedern und Wellenfedern | 353 | 3.9.5 | Getriebe mit ungleichförmigen Bewegungen | 423 |
| 3.6.4.3 | Blattfedern | 354 | 3.9.5.1 | Kurbelgetriebe | 423 |
| 3.6.4.4 | Drehstabfedern | 354 | 3.9.5.2 | Getriebe mit aussetzender Bewegung .. | 424 |
| 3.6.4.5 | Spiralfedern | 354 | 3.9.6 | Getriebe für Linearbewegungen | 425 |
| 3.6.4.6 | Ringfedern | 355 | 3.9.6.1 | Lineare Zugmittelgetriebe | 425 |
| 3.6.4.7 | Gasdruckfedern | 355 | 3.9.6.2 | Zahnstange-Ritzel-Trieb | 426 |
| 3.6.4.8 | Luftfedern | 356 | 3.9.6.3 | Gewindetrieb | 427 |
| 3.6.4.9 | Gummifedern, Elastomerfedern | 356 | 3.9.6.4 | Schnecken-Zahnstangen-Trieb | 431 |
| 3.6.1.10 | Memory-Metallfedern | 357 | | | |
| 3.6.1.11 | Integration einer Federfunktion | 357 | | | |
| 3.7 | Schrauben, Bolzen, Stifte | 358 | 4 | Antriebe | 432 |
| 3.7.1 | Schrauben | 358 | 4.1 | Einführung und Übersicht | 432 |
| 3.7.1.1 | Einführung | 358 | 4.1.1 | Fluidtechnik | 432 |
| 3.7.1.2 | Kenngößen und Ausführungsformen .. | 359 | 4.1.2 | Elektrische Antriebstechnik | 432 |
| 3.7.1.3 | Sicherung von Schraubenverbindungen | 362 | 4.2 | Pneumatik | 433 |
| 3.7.1.4 | Verschraubung von Blechen | 364 | 4.2.1 | Drucklufterzeugung | 433 |
| 3.7.1.5 | Schraubenmontage | 365 | 4.2.2 | Druckluftnetz | 434 |
| 3.7.1.6 | Festigkeitgerechte Verschraubung | 366 | 4.2.3 | Ventile | 434 |
| 3.7.1.7 | Die Vorspannung | 368 | 4.2.4 | Aktoren | 435 |
| 3.7.1.8 | Dynamische Belastung | 374 | 4.3 | Hydraulische Anlagen | 438 |
| 3.7.1.9 | Scherbelastung von Passschrauben .. | 375 | 4.3.1 | Physikalische Grundlagen | 439 |
| 3.7.2 | Bolzen | 376 | 4.3.1.1 | Hydrostatik | 439 |
| 3.7.3 | Stifte | 378 | 4.3.1.2 | Hydrodynamik | 440 |
| 3.8 | Kupplungen | 379 | 4.3.2 | Komponenten | 441 |
| 3.8.1 | Allgemeines | 379 | 4.3.3 | Aktoren | 442 |
| 3.8.2 | Nichtschaltende Kupplungen | 380 | 4.3.4 | Hydrospeicher | 444 |
| 3.8.2.1 | Starre Kupplungen | 380 | 4.4 | Elektrische Antriebe | 445 |
| 3.8.2.2 | Ausgleichende Kupplungen | 381 | 4.4.1 | Rechnerische Grundlagen | 445 |
| 3.8.3 | Schaltende Kupplungen und Bremsen .. | 388 | 4.4.2 | Erste Orientierung | 447 |
| 3.8.3.1 | Selbsttätige Schaltkupplungen | 388 | 4.4.3 | Drehstromantriebe am Drehstromnetz .. | 449 |
| 3.8.3.2 | Fremdbetätigte Kupplungen | 389 | 4.4.3.1 | Allgemeines | 449 |
| 3.9 | Getriebe | 391 | 4.4.3.2 | Drehstrom-Asynchronmotoren (ASM) .. | 452 |
| 3.9.1 | Allgemeine kinematische Eigenschaften | 392 | 4.4.3.3 | Energieeffizienz | 453 |
| 3.9.2 | Zugmittelgetriebe | 397 | 4.4.4 | Drehstromantriebe mit Umrichter | 454 |
| 3.9.2.1 | Allgemeines | 397 | 4.4.5 | Direktantriebe, Linearmotoren | 456 |
| 3.9.2.2 | Riementriebe | 398 | 4.4.6 | Kleinmotoren | 459 |
| 3.9.3 | Stufenlos verstellbare Getriebe | 402 | 4.4.7 | Schrittmotoren | 460 |
| 3.9.3.1 | Umschlingungsgetriebe | 402 | 4.4.8 | Piezoaktoren | 460 |
| 3.9.3.2 | Reibradgetriebe | 403 | 4.5 | Thermische Aktoren | 462 |
| 3.9.3.3 | Wälzgetriebe | 403 | | | |
| 3.9.3.4 | Hydrodynamischer Wandler | 404 | | | |
| 3.9.4 | Zahnräder und Zahnradgetriebe | 405 | | | |
| 3.9.4.1 | Zahnräder und Zahnradpaarungen | 405 | | | |

| | | | | | |
|--|---|------------|---|--|------------|
| 5 | Computer und Konstruktion | 463 | 5.3 | Zulässige Biegespannung | 516 |
| 5.1 | CAD-Systeme | 463 | 6 | Beanspruchung auf Schub | 517 |
| 5.1.1 | Entwicklung | 463 | 6.1 | Schubspannung | 517 |
| 5.1.2 | Der CAD-Arbeitsplatz | 464 | 6.2 | Schubmodul | 518 |
| 5.1.3 | Arten von CAD-Systemen | 465 | 6.3 | Zulässige Schubspannung | 518 |
| 5.1.4 | Werkzeuge und Begriffe | 467 | 7 | Beanspruchung auf Torsion | 519 |
| 5.2 | Konstruktions-automatisierung | 470 | 7.1 | Torsionsspannung | 519 |
| 5.2.1 | Knowledge Based Engineering (KBE) | 470 | 7.2 | Torsionsmoment | 520 |
| 5.2.2 | Eltern-Kind-Beziehungen | 471 | 7.3 | Zulässige Torsionsspannung | 521 |
| 5.3 | Produktdatenmodell | 472 | 8 | Dynamische Beanspruchung | 522 |
| 5.4 | Schnittstellen | 472 | 8.1 | Schwingende Beanspruchung | 522 |
| 5.5 | Baugruppe | 476 | 8.2 | Spannungsermittlung | 522 |
| 5.6 | Top-Down und Bottom-Up | 478 | 8.3 | Zug-Druck-Wechselfestigkeit | 523 |
| 5.7 | Bionik | 479 | 8.4 | Langzeitfestigkeit | 524 |
| 5.7.1 | Topologieoptimierung | 480 | 8.5 | Zulässige Spannung | 526 |
| 5.7.2 | Gestaltoptimierung | 481 | 9 | Kerbwirkung | 527 |
| 5.8 | Simulationswerkzeuge | 483 | 9.1 | Spannungskonzentration | 527 |
| 5.9 | Virtualisierung | 485 | 9.2 | Statische Beanspruchung | 527 |
| 5.9.1 | Stereoskopische Betrachtung | 485 | 9.3 | Formzahl | 528 |
| 5.9.2 | Virtual Reality mit VR-Brille | 485 | 9.4 | Festigkeitsverhalten unter Kerbwirkung | 529 |
| 5.9.3 | Virtual Environments (VE) | 485 | 9.5 | Kerbschlagbiegeversuch | 530 |
| 5.9.4 | Anwendung von VE-Systemen | 488 | 10 | Wärmespannungen | 531 |
| 5.10 | 3D-Druck – Additive Fertigung | 489 | 10.1 | Wärmeausdehnungskoeffizient | 531 |
| 5.10.1 | Körperliche Modelle (Rapid Prototyping) | 489 | 10.2 | Wärmedehnung | 531 |
| 5.10.2 | Endprodukte (Rapid Manufacturing) | 490 | 10.3 | Einachsiger Spannungszustand | 532 |
| 5.10.3 | Werkzeuge und Vorrichtungen (Rapid Tooling) | 491 | 10.4 | Mehrachsiges Spannungszustand | 532 |
| 5.10.4 | Innovation in der Konstruktionstechnik | 491 | 10.5 | Eigenstressen | 532 |
| 5.10.5 | Additive Fertigungsverfahren | 495 | 11 | Allgemeiner Spannungs- und Verformungszustand | 533 |
| 5.10.5.1 | Allgemeines | 495 | 11.1 | Spannungen an schrägen Schnitten | 533 |
| 5.10.5.2 | Einteilung der Verfahren | 496 | 11.2 | Mohr'scher Spannungskreis | 534 |
| 5.10.5.3 | Prozesse und Verfahren | 498 | 11.3 | Verallgemeinertes Hooke'sches Gesetz | 536 |
| 5.11 | Produktdatenmanagement (PDM) | 503 | 11.4 | Festigkeitshypothesen | 537 |
| 5.12 | Product Lifecycle Management (PLM) | 504 | 11.4.1 | Normalspannungshypothese (NH) | 538 |
| | | | 11.4.2 | Schubspannungshypothese (SH) | 538 |
| | | | 11.4.3 | Gestaltsänderungsenergiehypothese (GEH) | 538 |
| Anhang 1: Kleine Festigkeitslehre | | 505 | 12 | Aufgaben zur Festigkeitslehre | 539 |
| 1 | Aufgaben und Ziele | 505 | Anhang 2: Werkstoffvorauswahl | | 543 |
| 2 | Grundbelastungsfälle | 506 | 1 | Vorbemerkungen | 543 |
| 3 | Beanspruchung auf Zug | 506 | 2 | Wärmeleitfähigkeit – Temperaturleitfähigkeit | 545 |
| 3.1 | Zugspannung | 506 | 3 | Dichte | 549 |
| 3.2 | Zugversuch | 507 | 4 | Elastizitätsmodul | 550 |
| 3.3 | Zulässige Zugspannung | 509 | 5 | Versagensspannung | 553 |
| 4 | Beanspruchung auf Druck | 510 | 6 | Bruchzähigkeit | 558 |
| 4.1 | Druckspannung | 510 | 7 | Verlustfaktor | 564 |
| 4.2 | Druckversuch | 510 | 8 | Linearer Wärmeausdehnungs- koeffizient | 566 |
| 4.3 | Zulässige Druckspannung | 511 | Fachwörterbuch Deutsch – Englisch, Sachwortverzeichnis | | 568 |
| 4.4 | Knickung | 511 | | | |
| 4.5 | Flächenpressung | 513 | | | |
| 5 | Beanspruchung auf Biegung | 514 | | | |
| 5.1 | Biegespannung | 514 | | | |
| 5.2 | Biegemoment | 515 | | | |

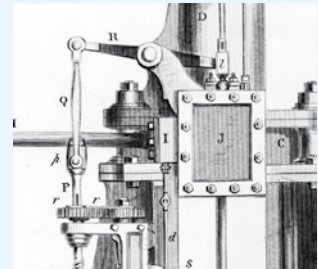
Entwicklungsphasen der Industrie

1. Industrielle Revolution, ab 1800, Industrie 1.0

- Gründerzeit mit Mechanisierung,
- Fertigung in Fabriken,
- Nutzung der Wasserkraft und Dampfkraft,
- Elektrogenerator und Elektromotor,
- Herstellung serienidentischer Teile,
- Metrisches Maßsystem, 1875.

Konstruieren und Zeichnen 1.0

- Zeichnungen sind **Kunstwerke**. Maschinen werden sowohl nach funktionalen Gesichtspunkten als auch nach ästhetischen konstruiert.
- Einführung von Werknormen für Maße, Toleranzen und Materialien,
- Der *Constructeur* ist Erfinder und Ersteller der Zeichnungen.



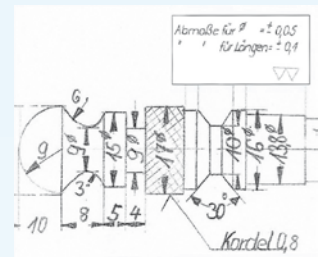
Detail einer Patentzeichnung für einen Dampfhammer, 1839

2. Industrielle Revolution ab 1900, Industrie 2.0

- Fließbandfertigung, Arbeitsteilung
- Massenproduktion für Fahrzeuge,
- Deutsche Industrienorm: DI 1: Kegelstifte, 1918,
- Elektrische Antriebstechnik für Maschinen in der Fertigung,
- Produkte aus Kunststoff,
- Entwicklung der Normen.

Konstruieren und Zeichnen 2.0

- Handzeichnungen mit Bleistift oder Tusche,
- Zeichenwerkzeuge: Lineal, Zirkel, Schablone, Zeichenbrett oder Zeichenmaschine mit zwei orthogonalen Linealen,
- Transparentpapier für Blaupausen.
- DIN 6 (1922): Zeichnungen · Anordnung der Ansichten und Schnitte.



Bleistiftzeichnung aus dem Berichtsheft eines Mechaniker-Lehrlings, 1960

3. Industrielle Revolution, ab 1970, Industrie 3.0

- Halbleiter,
- Integrierte Schaltkreise,
- Mikroprozessoren,
- Mikrocomputer,
- PC, SPS,
- CAD, CAM, CAQ, CIM,
- Roboter,
- NC-Maschinen.

Konstruieren und Zeichnen 3.0

- Computer Aided Drafting (CAD) als 2D-System zum Zeichnen mit Geraden und Kreiselementen, Symboldateien,
- 3D-Systeme zum Konstruieren (CAD = Computer Aided Design)
- Räumliche Objektdarstellung, farbschattiert,
- Schnittstelle zu CAM (Computer Aided Manufacturing).



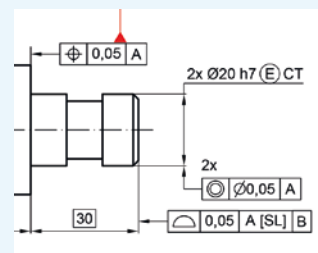
CAD mit Stiftplotter, Kurven werden mit Polygonen angenähert, 1978

4. Industrielle Revolution, ab 2000, Industrie 4.0

- Smart factory, smart products, smart ...,
- Cyber-Physikalische Systeme (CPS),
- 3D-Druck,
- Mikroelektromechanische Systeme (MEMS),
- Simulation im Cyberspace,
- GPS, Geometrische Produktspezifikation.

Konstruieren und Zeichnen 4.0

- Computer ist allgegenwärtig und über Internet vernetzt. Informationen, Berechnungen usw. können abgerufen, einbezogen und mit anderen geteilt werden.
- **GPS-Toleranzmanagement**,
- Konstrukte werden in virtuellen Environments, VE (Cyberspace) stereografisch betrachtet.



Beispiel für eine GPS-Tolerierung (Ausschnitt)

1 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**).

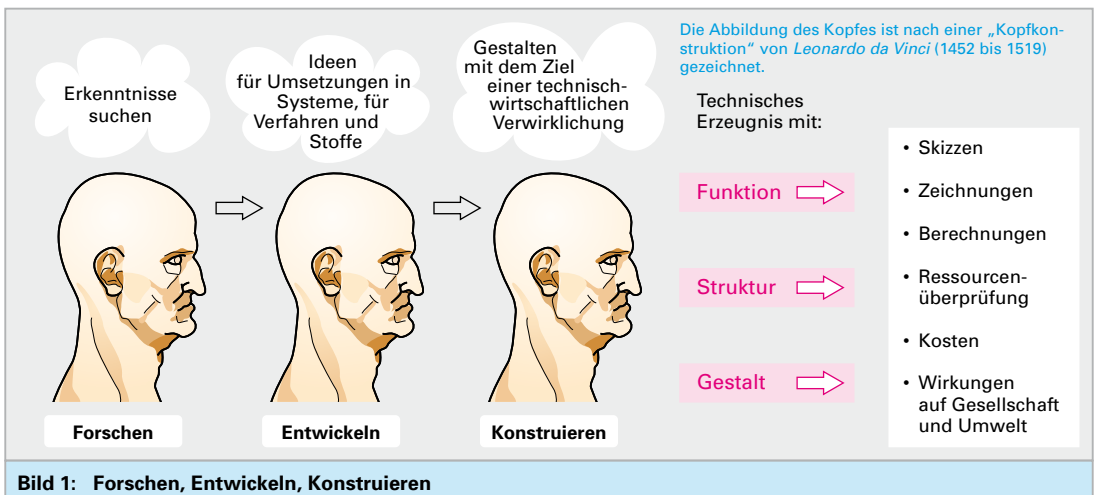
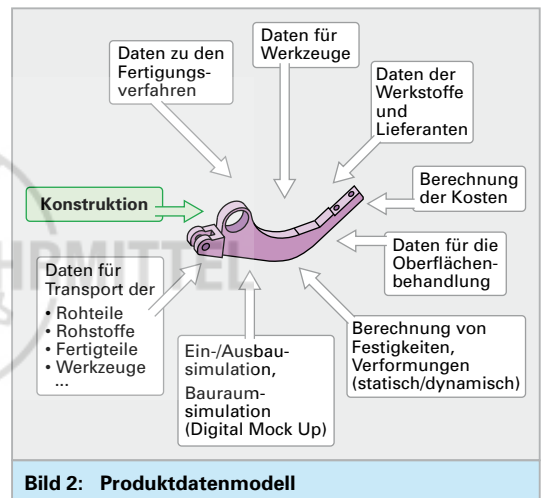
¹ Konstruieren, von lat. construere = zusammenschichten, erbauen, errichten; Konstruktion, von lat. constructio = Bauart (z. B. einer Maschine), nach Regeln vorgenommene Zusammenstellung

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 Produktsorgung ist ein Produktdatenmodell anzulegen (**Bild 2**).



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.

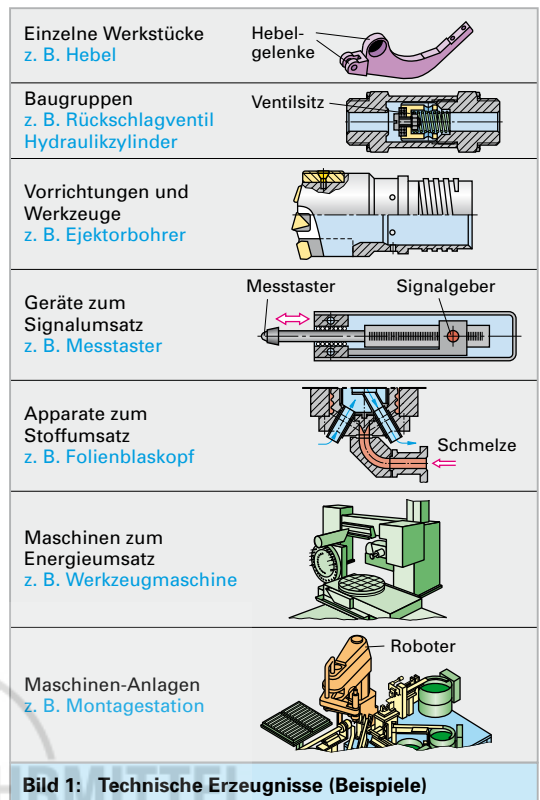
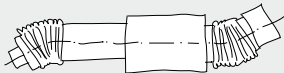
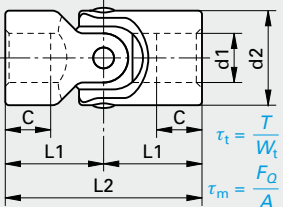
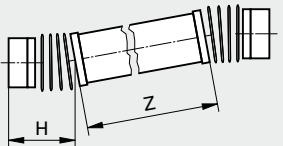
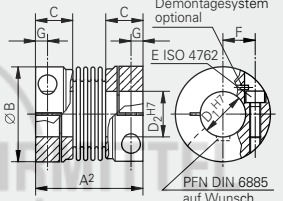
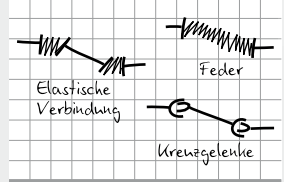
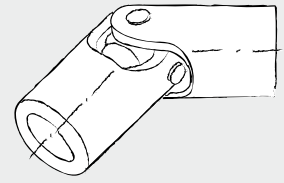
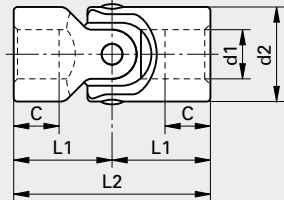


Bild 1: Technische Erzeugnisse (Beispiele)

| Tabelle 1: Konstruktionsarten | | |
|-----------------------------------|--|---|
| Konstruktionsart | Tätigkeit | Qualifikation / Anforderung an den Konstrukteur |
| Variantenkonstruktion | Vorhandene Konstruktion/Lösung wird lediglich in Größe und Anordnung variiert. | Keine hohen Anforderungen. |
| Anpassungskonstruktion | 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. |
| Neukonstruktion | 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 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|----------------|-------------|----------|----------------|---|-------------------|------------------|---|-------|-------------|------|--------------|--------|-----|-----|--|---------------|-------|--------|---|---|------------------|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|---|--|
| <div>Skizze</div> <div></div> | <div>Überwiegend freihändig erstellte bildliche Darstellung.</div> | <div>Gestalten</div> <div></div> | <div>Gesamtheit aller Tätigkeiten, mit dem die Gestalt von Erzeugnissen bestimmt wird, wie z. B. Entwerfen, Berechnen, Dimensionieren.</div> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <div>Lösungsprinzip</div> <div>Prinzipielle Lösung</div> <div>Lösungsidee</div> <div><div>Biegsame Welle</div><div>Winkelnachgiebige Kupplung</div></div> | <div>Beschreibt die Vorstellung zur grundsätzlichen Verwirklichung einer oder mehrerer Funktionen durch Auswahl geeigneter Gestaltungselemente, z. B. in Form von Prinzipskizzen oder durch Stichworte.</div> | <div>Zeichnung</div> <div></div> | <div>Eine aus Linien bestehende bildliche Darstellung.</div> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <div>Lösungsalternative</div> <div><div>Gelenkwelle</div></div> | <div>Weitere Lösungsidee bzw. weiteres Lösungsprinzip.</div> | <div>Technische Zeichnung</div> <div></div> | <div>Zeichnung in der für technische Zwecke erforderlichen Art (z. B. Einhaltung von strengen Darstellungsregeln) und Vollständigkeit (Maßeintragen, technische Hinweise, Tabellen).</div> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <div>Prinzipskizze/Funktionsskizze</div> <div></div> | <div>Zeichnerische Darstellung zur Beschreibung der Wirkungsweise/Funktion eines Lösungsprinzips mit einfachen Strichen und/oder Symbolen.</div> | <div>Fertigungsunterlagen</div> <div>z.B. Stückliste</div> <div><table><tr><th>Pos.</th><th>Menge</th><th>Benennung</th><th>Sach-Nr.</th></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>Verbindungs-welle</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></table></div> | Pos. | Menge | Benennung | Sach-Nr. | 1 | 1 | Verbindungs-welle | 4712 | 2 | 1 | Gelenkkreuz | 4713 | ... | ... | ... | ... | <div>Alle für die Anfertigung/Herstellung von technischen Erzeugnissen erforderlichen Zeichnungen, Stücklisten, technischen Hinweisen, Tabellen.</div> | | | | | | | | | | | | | | | |
| Pos. | Menge | Benennung | Sach-Nr. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | Verbindungs-welle | 4712 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 1 | Gelenkkreuz | 4713 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <div>Konstruktionsskizze</div> <div></div> | <div>Meist freihändig erstellte zeichnerische Darstellung eines Teils, einer Baugruppe, eines Produktes (einem Entwurf ähnlich).</div> | <div>Pflichtenheft/Lastenheft</div> <div><div>Gelenkwelle:</div><div>Drehzahl200 ... 800 1/min</div><div>Arbeitswinkel≤ 35°</div><div>WerkstoffEinsatzstahl, Edelstahl</div><div>Ausführungausziehbar</div><div>...</div></div> | <div>Schriftlich formulierte Aufgabenstellung, in der die geforderten und gewünschten Eigenschaften eines Produktes zusammengestellt sind. Anforderungen des Kunden oder des Lieferanten.</div> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <div>Entwurf</div> <div></div> | <div>Grafische Darstellung von Gestalt und Anordnung von Teilen/Baugruppen eines zu entwickelnden Produktes.</div> | <div>Anforderungsliste</div> <div><table><tr><th>Lfd. Nr.</th><th>Zu-ordnung</th><th>Anforderung</th><th>Daten</th><th>Verant-wortung</th></tr><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></table></div> | Lfd. Nr. | Zu-ordnung | Anforderung | Daten | Verant-wortung | 1 | F | Ausf. ausziehbar | | Maier | 2 | M | Ausziehlänge | ≤100mm | " | 3 | M | Arbeitswinkel | ≤ 35° | Müller | 4 | F | einfache Wartung | | " | ... | ... | ... | ... | ... | <div>Schriftlich dargestellte Sammlung aller Anforderungen an ein Produkt, ggf. mit Gewichtung. Zusammenstellung aller Daten für die Konstruktion durch den Konstrukteur.</div> | |
| Lfd. Nr. | Zu-ordnung | Anforderung | Daten | Verant-wortung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 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.

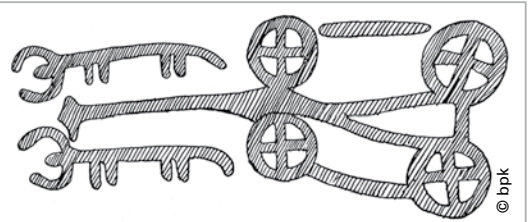


Bild 1: Felszeichnung eines steinzeitlichen Wagens (Höhlenmalerei in Schweden)



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

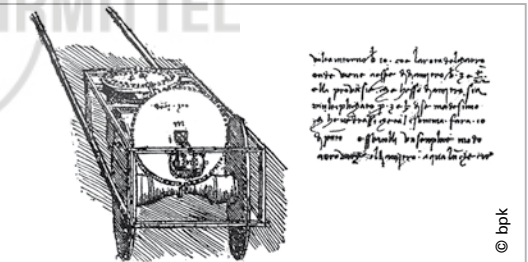
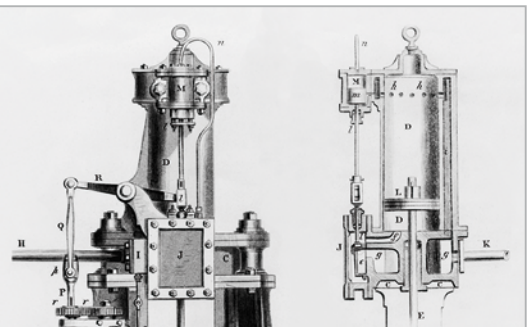


Bild 3: Messwagen von Leonardo da Vinci



© 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. Nasmyth², 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).

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 diente in dieser Zeit zuerst der Herstellung von Zeichnungen (2D-CAD) im Sinne von Computer Aided *Drafting* und löste in Verbindung mit dem Aufkommen von Tischrechnern (**Bild 2**) die Reißbretter ab.

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.

Die zu konstruierenden 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 (*smart*²) verhalten, z. B. im Störfalle Hilfe holen (**Bild 4**).



Bild 1: Reißbretter im traditionellen Konstruktionsbüro, um 1950

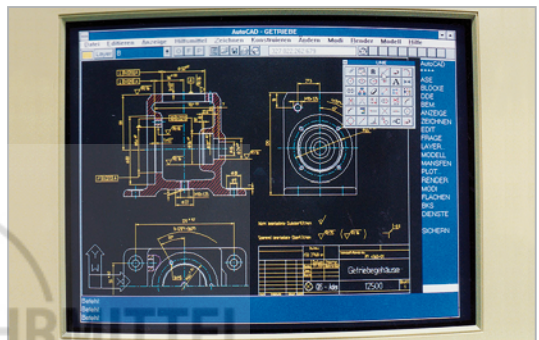


Bild 2: CAD als Hilfsmittel zum Zeichnen (2D-CAD), um 1970

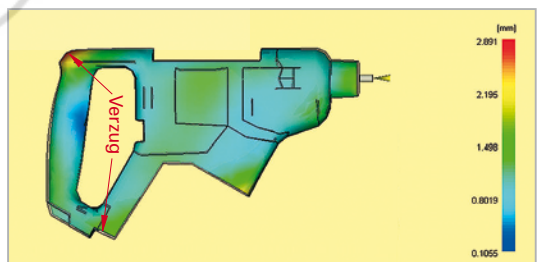


Bild 3: Simulation des Teileverzugs durch Schwindung

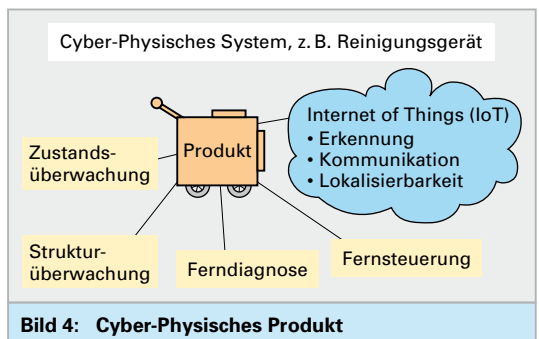


Bild 4: Cyber-Physisches Produkt

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. Aufgrund 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 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.

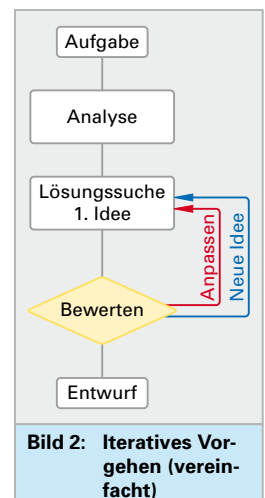
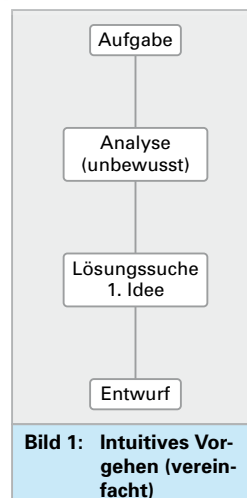
Unter **systematischem Vorgehen (Bild 1, folgende Seite)** versteht man:

- 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. *intuitio* = 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.

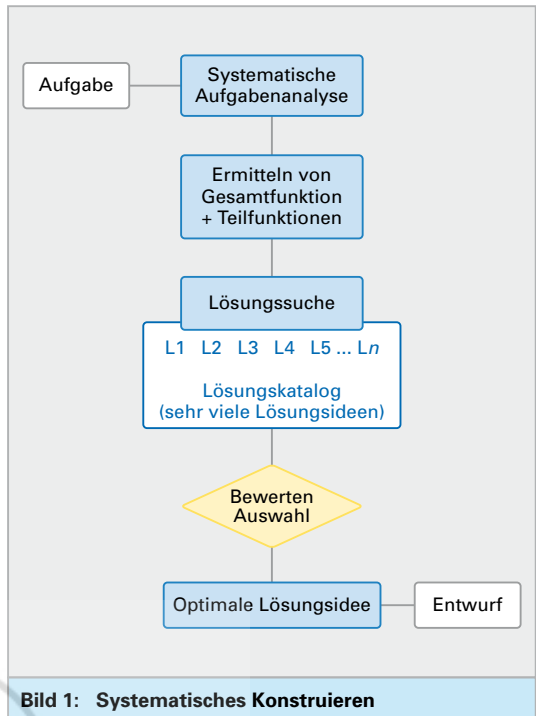
Nachteile sind:

- 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.

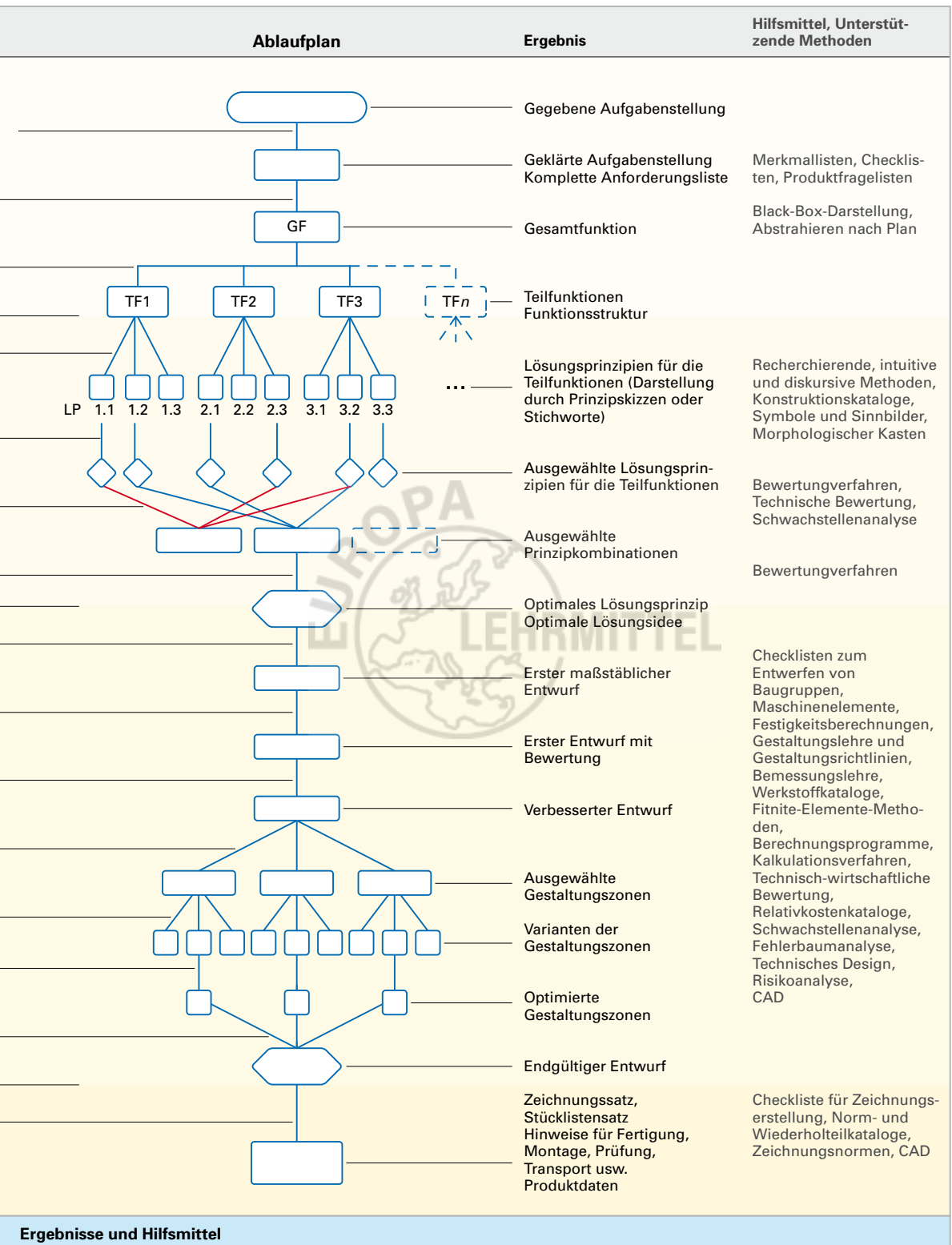
Ziel der nachfolgenden Betrachtungen ist es, die systematische, methodische Vorgehensweise vorzustellen.

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.

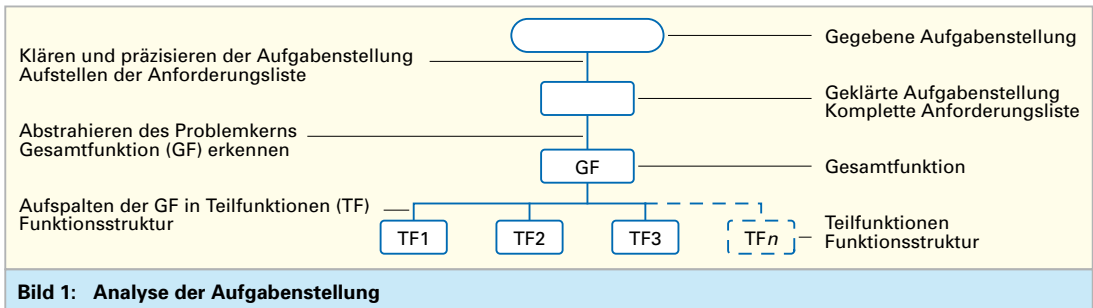
| Hauptschritte | Tätigkeiten des Konstrukteurs |
|---|--|
| Analyse der Aufgabenstellung | <p>Klären und präzisieren der Aufgabenstellung Aufstellen der Anforderungsliste</p> <p>Abstrahieren des Problemkerns Gesamtfunktion (GF) erkennen</p> <p>Aufspalten der GF in Teilfunktionen (TF) Funktionsstruktur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

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

Bild 1: Ablauf einer Konstruktion, Tätigkeiten,



1.3 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. aufgrund einer Marktanalyse.

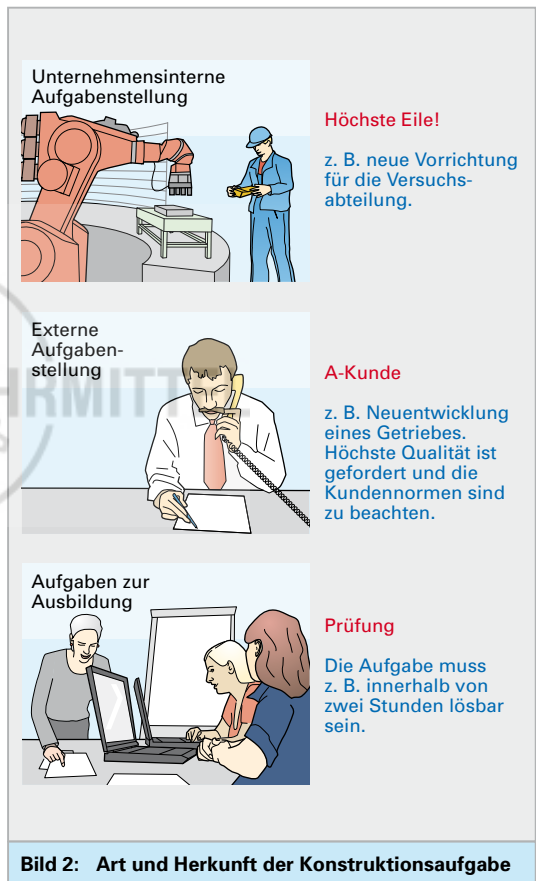
Externe Aufgabenstellung:

- 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.



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.