



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

7., überarbeitete Auflage

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.

7. Auflage 2021

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-1400-5

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

© 2021 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
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: Plump Druck & Medien GmbH, 53619 Rheinbreitbach

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 werden Lesende und Lernende an das *methodische und systematische Konstruieren* herangeführt - 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 sein Gebrauch bereichert auf vielfältige 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 allerdings 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. Um die wichtigsten festigkeitsrelevanten Beziehungen zur Hand zu haben, ist dem Buch eine *Kleine Festigkeitslehre* angehängt.

Zielgruppen für das Buch sind Technikerinnen und Techniker sowie Studierende der Fachrichtungen Maschinenbau, Produktionstechnik und Mechatronik, und auch 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 gebührt als wichtigste Technikdisziplin die allerbeste Ausstattung, um zu kreativem Gestalten anzuregen, zu beflügeln und auch schon bekannte Lösungen und Maschinenelemente in anschaulicher Weise aufzuzeigen. So findet man in diesem Buch auch sehr viele Fotografien und mehrfarbige Zeichnungen.

Die **7. Auflage** wurde insgesamt überarbeitet. Viele Seiten sind neu oder enthalten neue Bilder. Besonders zu nennen sind die Kapitel **Geometrische Produktspezifikation GPS**, **Kunststoffgerechte Gestaltung** und **Montagegerechtes Gestalten**. Veränderungen bei normativen Benennungen und Formelzeichen wurden angepasst.

In der EUROPATHEK gibt es ergänzend kostenlose Zusatzmaterialien: Die Lösungen der Aufgaben zur Festigkeitslehre, die Übungen zur Werkstoffvorauswahl, ein Repetitorium zur Lernkontrolle sowie wichtige Gesetzesvorgaben.

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		

2.3.2.4	Polymere (Kunststoffe)	129	2.3.10.5	Geprüfte Sicherheit	252
2.3.2.5	Keramiken und Gläser	131	2.3.10.6	EU-Maschinenrichtlinie	253
2.3.2.6	Verbundwerkstoffe	132	2.3.10.7	Europäische Sicherheitsnormen	256
2.3.2.7	Werkstoffe für den Leichtbau	134	2.3.11	Umweltgerechtes Gestalten	259
2.3.2.8	Praktische Werkstoffwahl	135	2.3.11.1	Lärm	259
2.3.3	Fertigungsgerechtes Gestalten	136	2.3.11.2	Vibration	265
2.3.3.1	Gussgerechtes Gestalten	140	2.3.11.3	Recyclinggerechte Konstruktion	268
2.3.3.2	Schweißgerechtes Gestalten	152	2.3.12	Transportgerechtes und lager- gerechtes Gestalten	271
2.3.3.3	Lötgerechtes Gestalten	169	2.3.13	Formgerechtes und ästhetisches Gestalten	273
2.3.3.4	Klebegerechtes Gestalten	175			
2.3.3.5	Schmiedegerechtes Gestalten	179			
2.3.3.6	Zerspangerechtes Gestalten	186			
2.3.3.7	Vorrichtungsgerechtes Gestalten	194			
2.3.3.8	Blechgerechtes Gestalten	197			
2.3.3.9	Korrosionsschutzgerechtes Gestalten	203			
2.3.4	Kunststoffgerechte Gestaltung	205			
2.3.4.1	Allgemeines	205			
2.3.4.2	Grundregeln	207			
2.3.4.3	Belastungsgerecht und werkstoffgerecht	208			
2.3.4.4	Integralbauweise	210			
2.3.4.5	Funktionsintegration	211			
2.3.4.6	Multimaterialbauteile	214			
2.3.4.7	Werkzeuge	216			
2.3.4.8	Fügeverfahren	217			
2.3.4.9	Maßhaltigkeit	218			
2.3.4.10	Recyclinggerecht	220			
2.3.5	FVK-gerechte Gestaltung	221			
2.3.5.1	Werkstoffeigenschaften	221			
2.3.6	Kostengerechtes Gestalten	223			
2.3.6.1	Allgemeines	223			
2.3.6.2	Kostenbegriffe	224			
2.3.6.3	Relativkosten	225			
2.3.6.4	Konstruktionskosten	227			
2.3.6.5	Materialkosten	227			
2.3.6.6	Fertigungskosten	228			
2.3.7	Automatisierungsgerechtes Gestalten	229			
2.3.7.1	Allgemeines	229			
2.3.7.2	Automatisierungsgerechte Gestaltung	230			
2.3.8	Montagegerechtes und demontage- gerechtes Gestalten	232			
2.3.8.1	Allgemeines	232			
2.3.8.2	Montage	232			
2.3.8.3	Demontage	233			
2.3.8.4	Rationalisierung	233			
2.3.8.5	Gestaltung	234			
2.3.9	Ergonomiegerechtes Gestalten	237			
2.3.9.1	Der Mensch ist das Maß	237			
2.3.9.2	Methodik zur Ergonomie	241			
2.3.9.3	Gestaltung von Griffen, Stellteilen und Bediengeräten	242			
2.3.9.4	Projektbeispiel PHG	244			
2.3.10	Sicherheitsgerechtes Gestalten von Maschinen	245			
2.3.10.1	Bauteilversagen und mangelnde Stabilität	246			
2.3.10.2	Ungeschützt bewegte Maschinenteile	249			
2.3.10.3	Teile mit gefährlicher Oberfläche	252			
2.3.10.4	Transportmittel und bewegte Arbeitsmittel	252			
2.3.10.5	Geprüfte Sicherheit	252			
2.3.10.6	EU-Maschinenrichtlinie	253			
2.3.10.7	Europäische Sicherheitsnormen	256			
2.3.11	Umweltgerechtes Gestalten	259			
2.3.11.1	Lärm	259			
2.3.11.2	Vibration	265			
2.3.11.3	Recyclinggerechte Konstruktion	268			
2.3.12	Transportgerechtes und lager- gerechtes Gestalten	271			
2.3.13	Formgerechtes und ästhetisches Gestalten	273			
3	Maschinenelemente	275			
3.1	Einführung	275			
3.2	Achsen und Wellen	276			
3.2.1	Übersicht	276			
3.2.2	Formgebung	280			
3.3	Naben und Verbindungen zu Wellen	283			
3.3.1	Die Nabe	283			
3.3.2	Welle-Nabe-Verbindungen (WNV)	284			
3.3.2.1	Kraftschlüssige WNV	285			
3.3.2.2	Formschlüssige WNV	290			
3.3.2.3	Stoffschlüssige WNV	294			
3.4	Drehlager und Führungen	295			
3.4.1	Wälzlager	296			
3.4.1.1	Einführung	296			
3.4.1.2	Bezeichnungen	297			
3.4.1.3	Lagerarten (Auswahl)	299			
3.4.1.4	Einsatz	302			
3.4.1.5	Reibung und Schmierung	302			
3.4.1.6	Einbau und Ausbau	305			
3.4.1.7	Passungen beim Einsatz von Wälzlagern	306			
3.4.1.8	Gestaltung	307			
3.4.1.9	Lagerluft und Betriebsspiel	309			
3.4.1.10	Steifigkeit	310			
3.4.1.11	Lebensdauer und Tragfähigkeit	311			
3.4.1.12	Lebensdauerberechnung	312			
3.4.2	Hydrodynamische Lager	317			
3.4.2.1	Einführung	317			
3.4.2.2	Werkstoffe und Bauformen	318			
3.4.2.3	Normung, Ausführungsformen und Einbau	319			
3.4.2.4	Wartungsfreie Trockenlaufgleitlager	321			
3.4.3	Hydrostatische Gleitlager	323			
3.4.4	Aerostatische Lager (Luftlager)	324			
3.4.5	Magnetlager	325			
3.4.6	Führungen	326			
3.4.6.1	Allgemeine Anforderungen	326			
3.4.6.2	Wälzführungen	327			
3.4.6.3	Hydrodynamische Führungen	329			
3.4.6.4	Hydrostatische Führungen	331			
3.4.6.5	Aerostatische Führungen	334			
3.4.6.6	Magnetische Führungen	334			
3.5	Dichtungen	335			
3.5.1	Allgemeines	335			
3.5.2	Statische Dichtungen	336			

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

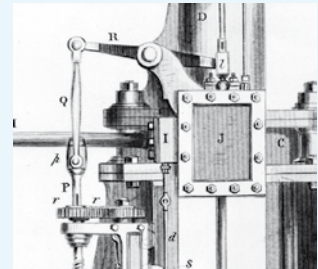
Entwicklungsphasen der Industrie

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.



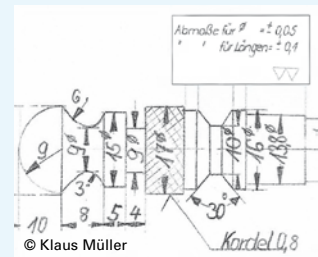
Detail einer Patentzeichnung für einen Dampfhammer, 1839

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.



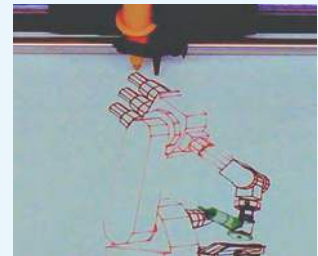
Bleistiftzeichnung aus dem Berichtsheft eines Mechaniker-Lehrlings, 1960

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).



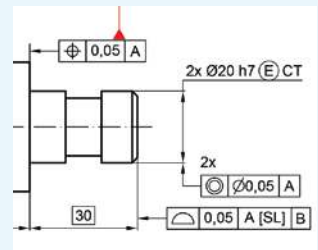
CAD mit Stiftplotter, Kurven werden mit Polygonen angenähert, 1978

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**).

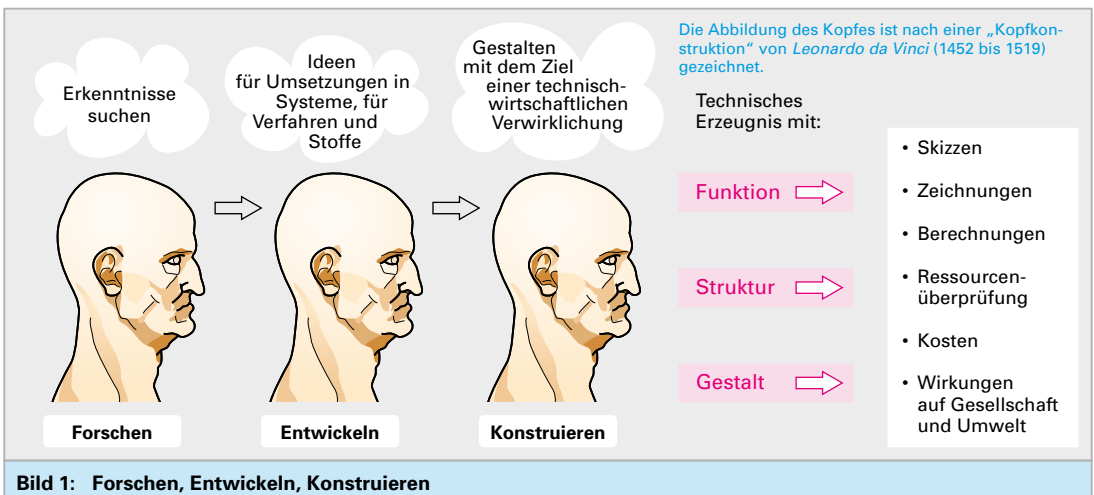
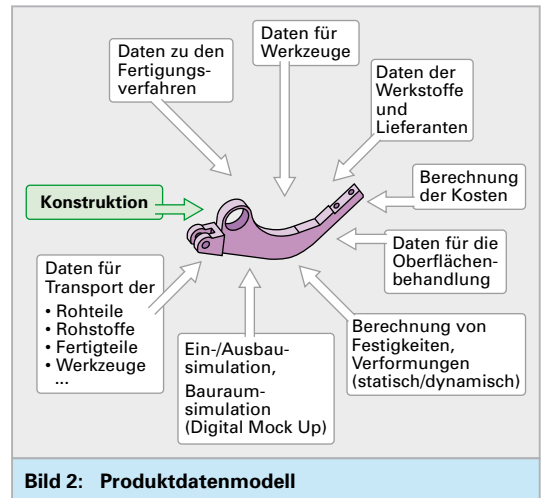
¹ Konstruieren, von lat. construere = zusammenschichten, erbauen, errichten; Konstruktion, von lat. constructio = Bauart (z. B. einer Maschine), nach Regeln vorgenommene Zusammenstellung

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 Produktersorgung 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.

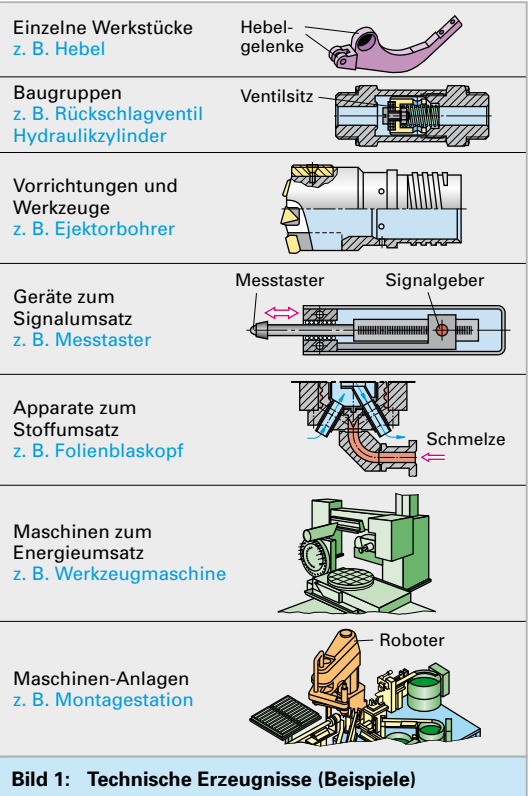
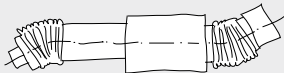
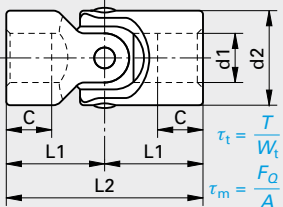
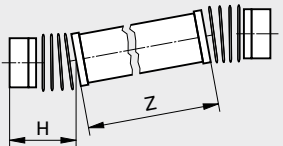
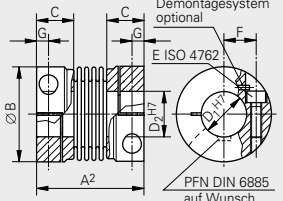
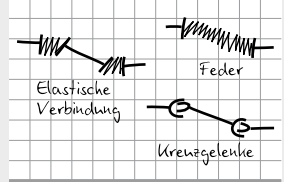
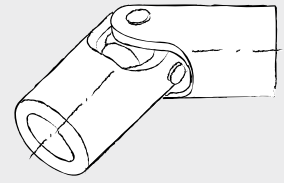
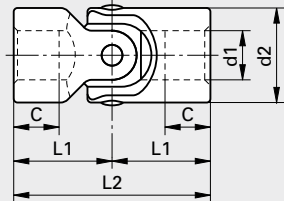


Bild 1: Technische Erzeugnisse (Beispiele)

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

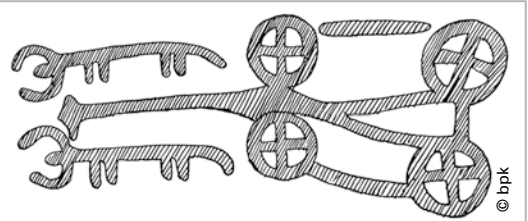


Bild 1: Felszeichnung eines steinzeitlichen Wagens (Höhlenmalerei in Schweden)



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

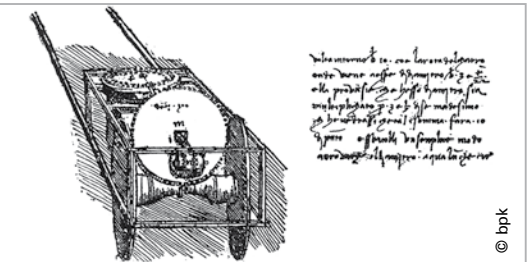
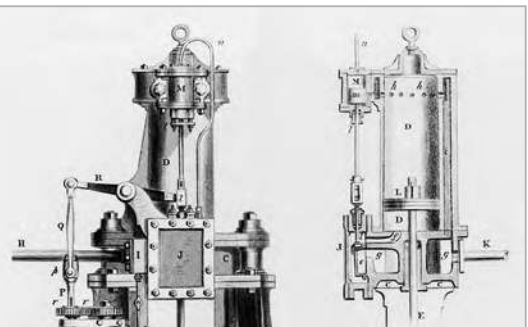


Bild 3: Messwagen von Leonardo da Vinci



© 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. 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

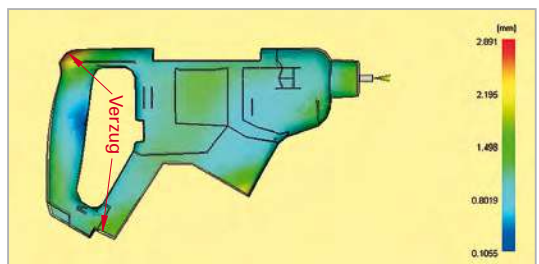


Bild 3: Simulation des Teileverzugs durch Schwindung

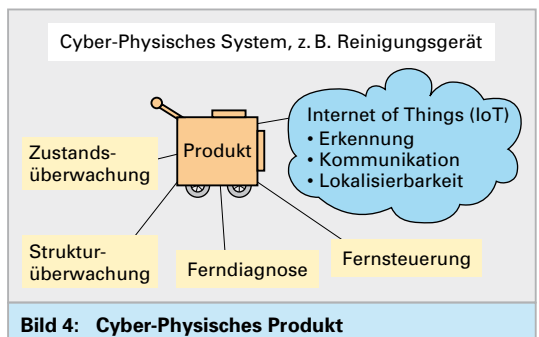


Bild 4: Cyber-Physisches Produkt

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 einfallbe-
bontes 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 Weiterbearbei-
tung wird aber immer wieder und bewusst der
Werdegang der Konstruktion mit der Aufgaben-
stellung verglichen und wo nötig angepasst. Die
Entstehung erfolgt also *in Schleifen*.

Voraussetzung ist bei beiden Vorgehensweisen ein
umfassendes Wissen auf vielen Gebieten und jahre-
lange Erfahrung in der Praxis. Aus dieser Zeit stam-
men noch Aussagen wie z. B.: „Konstruieren ist eine
Kunst“, „Zum Konstruieren braucht man schöpfe-
rische 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“ Konstruk-
tionen zu orientieren, um von dort Lösungsmöglich-
keiten für die gegebene Aufgabe abzuleiten (assozi-
atives³ 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 Konstru-
ieren zu vermitteln.

Anwendung findet dieses Vorgehen noch bei Ein-
zelfertigung, z. B. bei der Vorrichtungskonstruk-
tion, 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 Konstruktionsfor-
schung gestatten heute, den Konstruktionsprozess
systematisch bzw. methodisch anzugehen. Dabei
werden, wie noch gezeigt wird, die Bereiche der In-
tuition und/oder Assoziation nicht ausgeklammert.

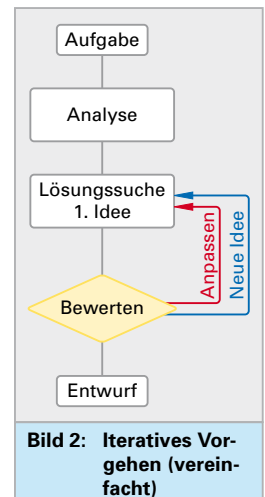
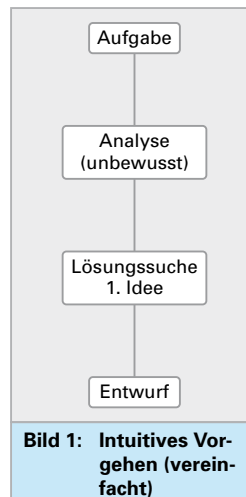
Unter **systematischem Vorgehen (Bild 1, Sei-
te 15)** versteht man:

- Systematischen *Ablauf* beim Lösen techni-
scher Probleme durch Unterteilung in zeitlich
nacheinander ablaufende Arbeitsschritte, so-
genannte Problemlösungsphasen,
- systematische *Suche* nach Lösungsmöglich-
keiten.

Ein effektives methodisches Konstruieren nutzt so-
wohl die Vorteile der *Intuition* als auch die einer *Sys-
tematik*.

Durch das bewusste Gliedern der Aufgabe in Ein-
zelschritte 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 Lösun-
gen werden zumindest nicht kritiklos übernommen.



¹ Intuition von lat. *intuitio* = unmittelbare Anschauung durch Ein-
gabung.

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.

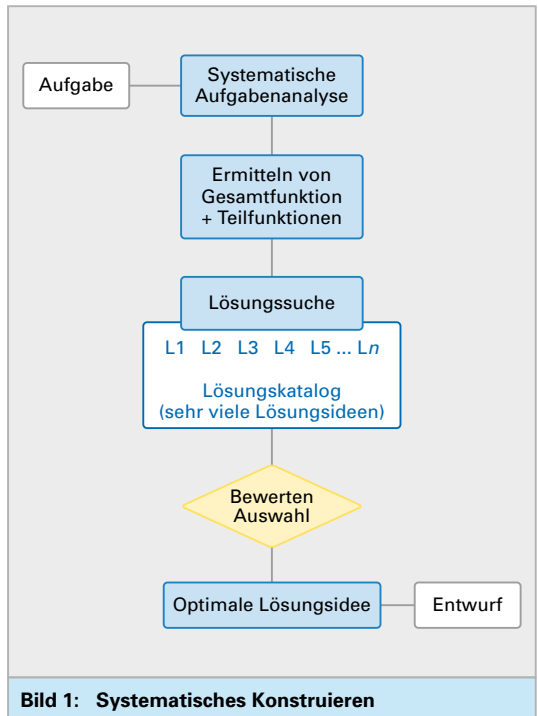
Nachteile sind:

- 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
- **Rieg F., Steinhilper R.**: Handbuch Konstruktion. Hanser Verlag
- **Conrad K. J.**: Taschenbuch der Konstruktionstechnik. Hanser Verlag
- **Conrad K. J.**: Grundlagen der Konstruktionslehre. Hanser 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.

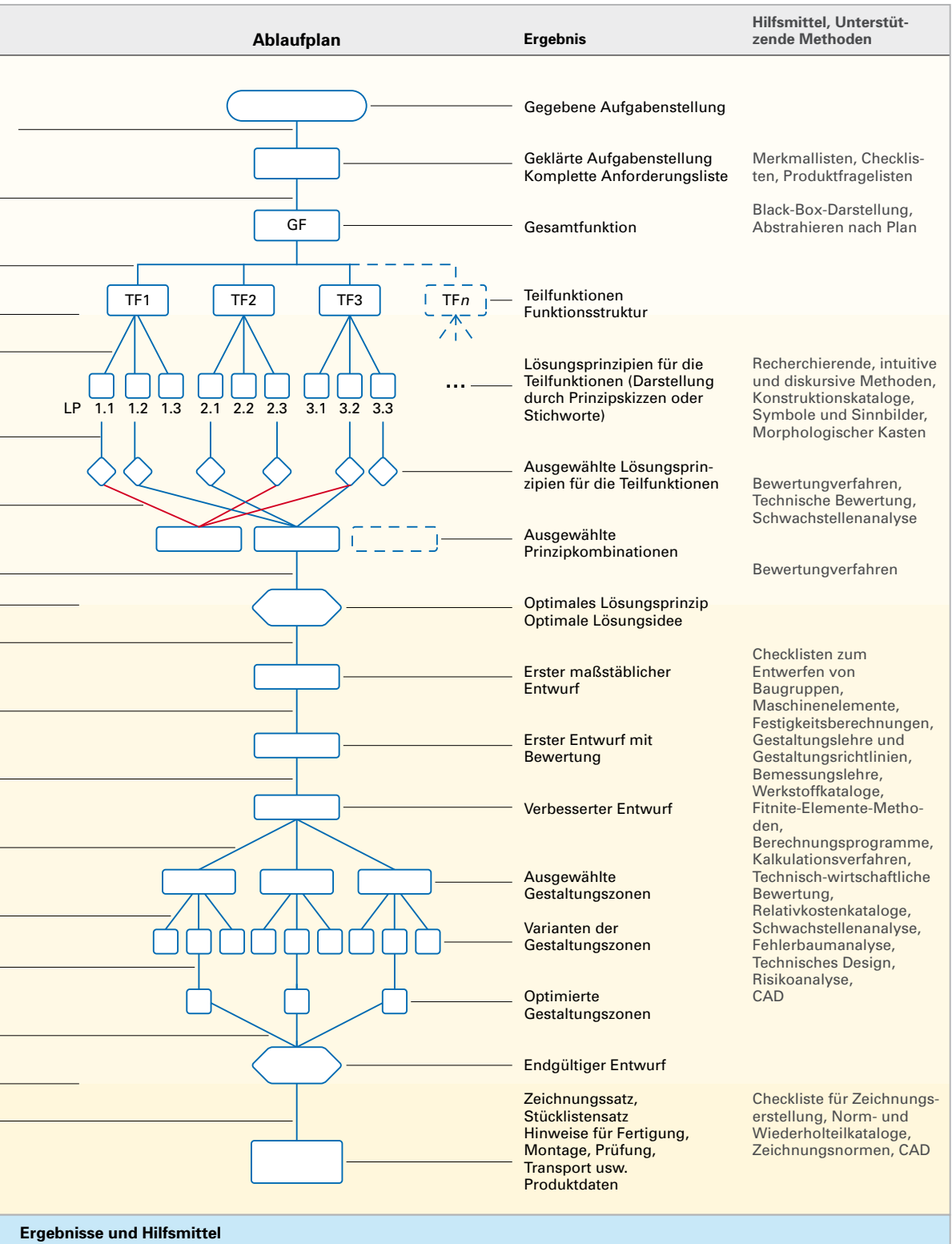
Einige wichtige Hilfsmittel sind:

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

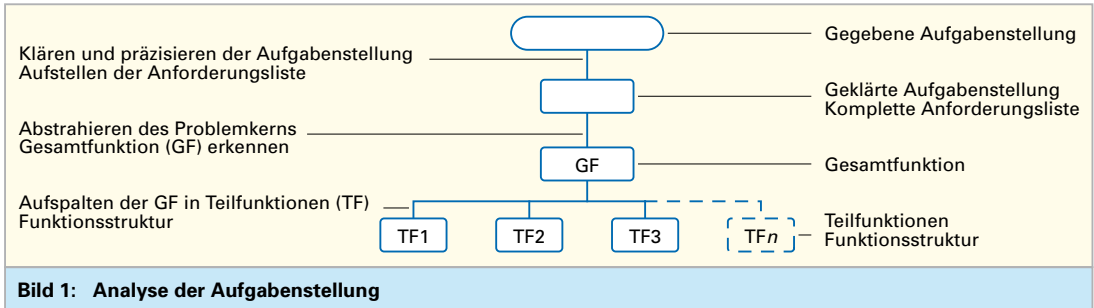
Ziel der nachfolgenden Betrachtungen ist es, die systematische, methodische Vorgehensweise vorzustellen.

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 Abstrahieren 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	Erstellen sämtlicher Zeichnungen und Stücklisten und aller erforderlichen Fertigungsunterlagen
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.

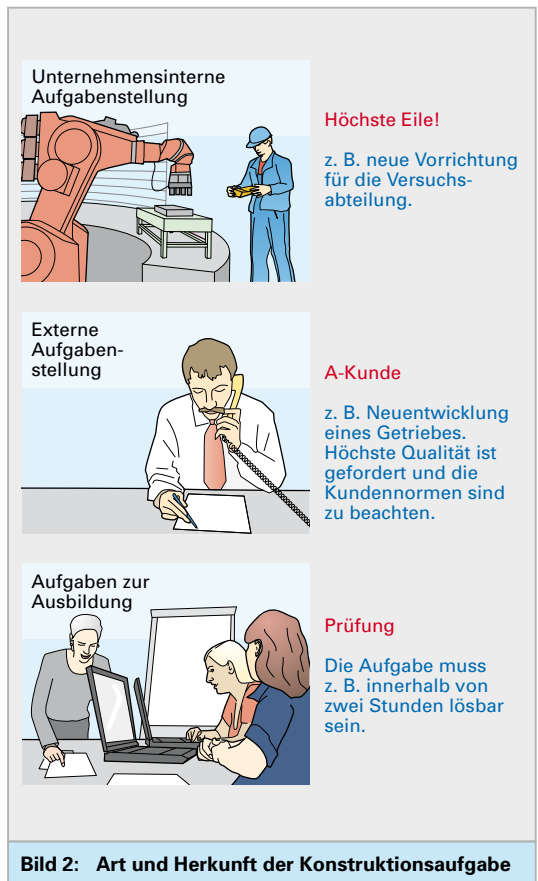
Externe Aufgabenstellung:

- 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.

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 vorhandenen Geräten, welche die Probleme schon lösen oder noch nicht befriedigend lösen.
- Normen (s. unten)
- Technische Anforderungen und Betriebsbedingungen, mit Zahlenangaben, 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!

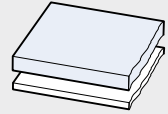
Unzureichende Aufgabenstellungen führen dazu, dass die Konstruktionstätigkeit zwecks Informationsbeschaffung unterbrochen werden muss, fertige Entwürfe oder Zeichnungen müssen oft unter großem Zeitaufwand (Konstruktionskosten) überarbeitet werden. Deshalb muss vor der Lösungssuche zum einen die Aufgabenstellung präzisiert werden, um sämtliche Anforderungen an die spätere Lösung zu kennen, zum anderen 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, Seite 18).

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**).

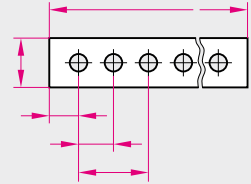
Anforderungsliste

- Art der Bleche
- Breite
- Dicke
- Werkstoff
- ... weitere

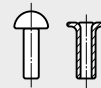


Abstand der Nietlöcher

- -
 -
- weitere



Art der Niete



...weitere

Problemkern (Gesamtfunktion)

Bleche nieten

Genietete Bleche



Gesamtfunktion und Teilfunktionen Aufstellen der Funktionsstruktur

Bleche nieten

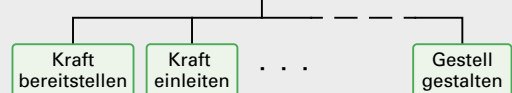


Bild 1: Teilaufgaben zur Analyse der Aufgabenstellung (Beispiel Nietvorrichtung)

Die Abbildung zeigt ein historisches Normblatt aus den Anfängen des Normungswesens: **DIN 123 – Blatt 1, September 1921.**

1917 wird der „Normenausschuß der Deutschen Industrie“ gegründet und DIN wird 1920 als Markenzeichen eingeführt.

Die aktuelle Norm für Halbrundniete ist DIN 124:2011-03.

DK 621.884

Deutsche Normen

September 1921

Halbrundniete

für den Kesselbau

von 10 bis 43 mm Durchmesser

DIN

123

Blatt 1

Maße in mm

Benennung eines Halbrundnietes von
22 mm Rohndietdurchmesser und 60 mm
Länge in Stücklisten und Bestellungen:

Halbrundniet 22×60 DIN 123

Rohndietdurchmesser	d	10	13	16	19	22	25	28	31	34	37	40	43
Nennendurchmesser für Hersteller u. Besteller													
Kopfdurchmesser	D	18	23	30	35	40	45	50	55	60	67	72	77

Copyright by Deutscher

Standardisat

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.

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.

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

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.

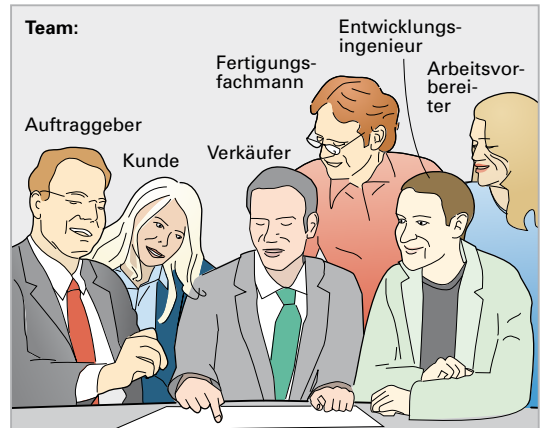


Bild 1: Erarbeiten der Anforderungsliste im Team

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:				Ersetzt Ausgabe vom:		
Blatt ... von ...						

Bild 2: Formblatt für eine Anforderungsliste (Beispiel)