

Vogel Fachbuch

Kamprath-Reihe

Peter Köhler

Moderne Konstruktions- methoden im Maschinenbau

Peter Köhler

Moderne Konstruktionsmethoden im Maschinenbau

Kamprath-Reihe

Prof. Dr.-Ing. Peter Köhler

Moderne
Konstruktionsmethoden
im Maschinenbau

Vogel Buchverlag

Prof. Dr.-Ing. PETER KÖHLER

Jahrgang 1951, absolvierte nach seinem Abitur 1969 ein Studium an der Technischen Universität Dresden als Diplom-Mathematiker sowie ein Maschinenbaustudium an der Ingenieurschule Berlin-Lichtenberg. Von 1973 bis 1977 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter in einer Projektierungsabteilung und von 1977 bis 1982 Leiter einer Konstruktionsgruppe. Danach übernahm er den Aufbau der CAD-Forschungsgruppe an der Technischen Hochschule Köthen, wo er 1986 zum Dr.-Ing. für Konstruktionstechnik promovierte. Seit September 1994 ist Herr Dr.-Ing. Peter Köhler Professor für den Rechnereinsatz in der Konstruktion im Fachbereich Maschinenbau der Gerhard-Mercator-Universität Gesamthochschule Duisburg.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

(Kamprath-Reihe)
ISBN 3-8023-1823-4

ISBN 3-8023-1823-4

1. Auflage. 2002

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2002 by Vogel Industrie Medien GmbH
& Co. KG, Würzburg

Herstellung: dtp-project, Rimpfing-Maidbrunn

Vorwort

Der Schwerpunkt dieses Buches liegt in der Vermittlung methodischer Arbeitsweisen bei der Nutzung moderner CAx-Systeme. Besonders Grundlagen und Problemstellungen zum geometrischen Aufbau von Produktmodellen wurden hervorgehoben, die wiederum unabdingbare Voraussetzung für weiterführende virtuelle Produktstudien sind. Im Blickpunkt stehen vor allem parametrische 3-D-Systeme, da sie neue Möglichkeiten bieten, um die vielfältigen Beziehungen zwischen Konstruktionselementen, Einzelteilen und/oder Baugruppen rechnerintern abzubilden. Sie sind Voraussetzung für die kooperativen und rechnerintegrierten Prozesse in der Produktentwicklung und Fertigungsvorbereitung.

Beispielhaft wird vermittelt, wie mit den neuen Systemen auch die Logik der Produktgestaltung erfasst werden kann. Dazu gehören auch Problemstellungen zur Wissensintegration und der Verknüpfung von Gestaltung, Berechnung und Dokumentation sowie zum virtuellen und realen Bau von Prototypen.

Die Formulierungen der Arbeitsschritte zur Modellbildung der zahlreichen Beispiele erfolgt nach methodischen Gesichtspunkten systemneutral, damit sie einem breiten Anwenderkreis zur Verfügung stehen.

Meiner Frau und meinen Mitarbeitern möchte ich sehr herzlich für das Korrekturlesen und die Unterstützung bei der Manuskripterstellung danken. Besondere Hinweise erhielt ich von Frau Dr. Martina Köhler in Kapitel 2, Herrn Ralf Hoffmann in Abschnitt 7.3.7 und 7.4.1, Herrn Oliver Strohmeier in Abschnitt 7.4.2 und Herrn Ludger Brandenburg in Abschnitt 7.5.5.

Den studentischen Mitarbeitern Stephan Danjou, Sascha Doungs, Peter Jarosch, Thomas Misiewics, Jens Neuendorf und Philippe Vogel danke ich für die Unterstützung bei der Erstellung der Bilder und Tabellen.

Dem Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Duisburg

Peter Köhler

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung	11
2 Konstruktionslehre	13
2.1 Einordnung	13
2.2 Aufgaben von Konstruktionsabteilungen	14
2.2.1 Differenzierung konstruktiver Tätigkeiten	14
2.2.2 Produktentstehungsprozess	15
2.3 Entwicklungs- und Konstruktionsmethoden	16
2.3.1 Zielsetzung	16
2.3.2 Ablaufstrategien	18
2.3.3 Einsatz bewährter Methoden	21
2.4 Unterstützung des Konstruktionsprozesses	22
2.4.1 Möglichkeiten und Grenzen	22
2.4.2 Gestaltungsregeln	24
2.4.3 Fertigungsgerechtes Konstruieren	26
2.4.4 Konstruktionskataloge	29
2.4.5 Konstruktionssysteme	30
2.4.6 Informationsmanagement	32
2.4.7 Unterstützung der Büro- und Verwaltungsarbeit	33
2.5 Normung	34
2.5.1 Normen im Zeichnungswesen	34
2.5.2 Erzeugnisgliederung	35
2.5.3 Normzahlreihen	35
2.6 Rechnerunterstütztes Konstruieren	36
2.6.1 Systemeinführung	36
2.6.2 CAD-Arbeitsplatz	37
2.6.3 Benutzerschnittstelle	38
2.6.4 Virtuelle Realitäten	39
2.6.5 Rapid Prototyping	39
3 Grundlagen der konstruktiven Geometrie	43
3.1 Einführung	43
3.2 Projektionsarten	44
3.2.1 Überblick	44
3.2.2 Tafelprojektionen	46
3.2.3 Axonometrische Projektionen	48
3.2.4 Zentralprojektion	51
3.2.5 Licht und Schatten	52
3.3 Skizziertechniken	54
3.4 Analytische Beschreibung von Punktmengen	55
3.4.1 Grundlagen	55
3.4.2 Besondere Kurven	56
3.4.2.1 Kegelschnitte	56
3.4.2.2 Spiralen	58
3.4.2.3 Rollkurven	60
3.4.3 Freiformkurven	61
3.4.3.1 Einführung	61
3.4.3.2 Hermite-Interpolation	64
3.4.3.3 Bezier-Kurven	65
3.4.3.4 B-Spline-Kurven	67
3.4.3.5 Rationale Spline-Kurven	70
3.4.4 Besondere Flächen und Körper	71

3.4.4.1	Flächen mit definierter Ordnung	71
3.4.4.2	Polyeder	75
3.4.4.3	Regelflächen	76
3.4.4.4	Rotations- und Schiebeflächen	79
3.4.4.5	Freiformflächen	80
3.4.5	Manipulierung geometrischer Objekte	80
3.4.6	Verknüpfung geometrischer Objekte	82
3.5	Rechnerinterne Darstellung	83
4	Rechnerunterstütztes Zeichnen und Skizzieren	85
4.1	Vorbemerkungen	85
4.2	Leistungsmerkmale von 2-D-CAD-Systemen	86
4.2.1	Geometrielemente	86
4.2.2	Zeichnungstechnische Funktionen	87
4.2.3	Assoziativität	89
4.2.4	Gruppieren von Elementen	90
4.2.5	Modellinformationen und Darstellungshilfen	91
4.3	Arbeitstechniken	92
4.3.1	Anpassung der Voreinstellungen	92
4.3.2	Maßgetreues Zeichnen	92
4.3.3	Musterung	93
4.3.4	Makro- und Variantentechnik	94
4.3.5	Parametrische 2-D-Konstruktion	95
5	Arbeiten mit 3-D-CAD-Systemen	97
5.1	Grundlegende Modellierungstechniken	97
5.1.1	Vorbemerkungen	97
5.1.2	Bezugselemente	98
5.1.3	Körperbasierte Modellierung	99
5.1.4	Trajektorien	101
5.1.5	Verbundelemente	102
5.1.6	Variable Trajektorien	103
5.1.7	Profilbasierter Modellaufbau	105
5.1.8	Oberflächenorientierte Modellierung	105
5.1.9	Geometriefeature	107
5.2	Modellanpassungen	109
5.2.1	Modellanalysen	109
5.2.2	Modelländerung	110
5.2.3	Modellvereinfachungen	111
5.2.4	Darstellungsparameter	112
5.3	Modellverformung	112
5.3.1	Biegen	112
5.3.2	Strecken und Formen	114
5.4	Baugruppenmodellierung	114
5.4.1	Prinzipielles Vorgehen	114
5.4.2	Baugruppenkomplettierung	115
5.4.3	Modellvereinfachung	116
5.4.4	Besonderheiten in der Modelldarstellung	116
5.4.5	Konstruktionsstücklisten	117
5.5	Zeichnungserstellung	117
5.5.1	Projektionsgerechte Ansichten	117
5.5.2	Zeichnungsbeschriftung	118
6	Parametrische Produktmodellierung	121
6.1	Vorbemerkung	121
6.2	Grundlagen zur Integration von Expertenwissen	122

6.2.1	Zielstellung	121
6.2.2	Wissensakquisition	122
6.2.3	Wissensrepräsentation	123
6.2.4	Wissensverarbeitungsstrategien	124
6.3	Abbildung der Produktlogik	125
6.3.1	Elementare Arbeitstechniken	125
6.3.2	Strukturmodelle	126
6.3.3	Geometrieoptimierung	126
6.3.4	Makroprogrammierung	127
6.3.5	Featurebasierte Modellierung	128
6.3.6	Tabellengesteuerter Modellaufbau	131
6.3.7	Application Programming Interfaces (API)	132
6.4	Virtuelle Produktstudien	133
7	Verknüpfung von Gestaltung und Berechnung	135
7.1	Grundlagen	135
7.2	Werkzeugauswahl	137
7.3	Finite-Elemente-Methode (FEM)	139
7.3.1	Anwendungsgebiete	139
7.3.2	Prinzipielle Vorgehensweise	141
7.3.3	Idealisierung der Bauteilstruktur	141
7.3.4	Vernetzung	143
7.3.4.1	Finite Elemente	143
7.3.4.2	Netzerzeugung	144
7.3.5	Modellkomplettierung	145
7.3.5.1	Materialeigenschaften	145
7.3.5.2	Lagerungen	146
7.3.5.3	Belastungen	147
7.3.6	Berechnung und Ergebnisinterpretation	147
7.3.6.1	h-Methode	148
7.3.6.2	p-Methode	149
7.3.7	Anwendungsbeispiele	149
7.3.7.1	Greiferarm	149
7.3.7.2	Träger	151
7.4	Virtuelle Bauteiloptimierung	154
7.4.1	Parameterorientierte Gestaltoptimierung	154
7.4.2	Parameterfreie Gestaltoptimierung	155
7.5	Mehrkörpersimulationen (MKS)	158
7.5.1	Anwendungsgebiete	158
7.5.2	Prinzipielle Vorgehensweisen	159
7.5.3	Modellbildung	160
7.5.4	Redundanzen	161
7.5.5	Durchführung und Bewertung der Simulation	163
8	Datenmanagement in der Konstruktion	165
8.1	Einführung	165
8.2	Datenbanksysteme	166
8.2.1	Anforderungen an die Datenspeicher	166
8.2.2	Datenstrukturen	166
8.2.3	Relationale Datenbanken	168
8.3	Softwareschnittstellen	169
8.3.1	Grundlegende Möglichkeiten zum Datenaustausch	169
8.3.2	Initial Graphics Exchange Specification (IGES)	172
8.3.3	Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)	175
8.4	Produktdatenmanagement	176
8.4.1	Einordnung	176

8.4.2	Produktbezogene Daten	178
8.4.3	Schnittstellen	179
8.4.4	Stücklistenmanagement	179
8.5	Prozessmanagement	181
8.5.1	Prozessanalyse	181
8.5.2	Prozessmodellierung	182
Literaturverzeichnis		185
Stichwortverzeichnis		187

1 Einführung

Es ist bekannt, dass in der Konstruktion maßgebend die Kosten beeinflusst werden, die für die Entwicklung, Fertigung und Nutzung eines Produktes sowie für dessen spätere Ablösung bzw. Entsorgung anfallen. Allgemein anerkannt ist, dass methodische Arbeitsweisen positive Auswirkungen auf die Qualität und Effektivität der Produkte und Prozesse haben. Dennoch wird häufig der Termindruck als Begründung für unsystematische Konstruktionsabläufe angeführt. Das rächt sich bei 3-D-Produktmodellen spätestens dann, wenn diese «schnellen» Konstruktionen in einem späteren Auftrag oder durch eine Auftragsänderung neuen Randbedingungen angepasst werden müssen. Die Einführung neuer Generationen von parametrischen CAD-Systemen verlangt daher ein konsequenteres Konstruktionsmanagement und veränderte Arbeitsweisen. Nie darf jedoch außer Acht gelassen werden, dass auch Softwaresysteme lediglich Werkzeuge sind. Entscheidend bleibt die Sachkompetenz und Kreativität des Konstrukteurs, die eben durch diese Werkzeuge mehr oder weniger gut unterstützt werden.

Aufgabe der Konstruktionsabteilungen ist es, für technische Erzeugnisse und Aufgabenstellungen möglichst optimale Lösungen zu finden, wobei außer den technischen auch wirtschaftliche, umweltpolitische, arbeitswissenschaftliche und andere Randbedingungen zu beachten sind. Erschwert wird diese Optimierungsaufgabe durch Trends wie:

- ❑ immer schnellerer Wissenszuwachs in allen Bereichen,
- ❑ zunehmende Vernetzung (auch zahlenmäßig) wachsender Wissenschaftsgebiete,
- ❑ Einbeziehung neuartiger «fremder» Wissensgebiete in den Maschinen-, Apparate- und Anlagenbau (z.B. Biologie → Bionik ...),
- ❑ ständig aktualisierte Vorschriften und Empfehlungen, die Anforderungen an technische Erzeugnisse vermehren oder verschärfen,

- ❑ extremere Verfahrensparameter,
- ❑ immer höherer Perfektionsgrad der Produkte,
- ❑ Ruf nach immer kürzeren Entwicklungszeiten.

Trotz neuer technischer Möglichkeiten und Hilfsmittel, Arbeitsbedingungen und Organisationsformen ist die konstruktive Tätigkeit damit komplizierter geworden und unterliegt einer fortwährenden immer schneller verlaufenden Veränderung.

Hier mithalten zu können und sich dieser Entwicklung erfolgreich zu stellen, erfordert vom heutigen Konstrukteur:

- ❑ ein solides Basiswissen aus naturwissenschaftlichen Grundlagenkenntnissen und technischem Fachwissen, das in immer kürzeren Abständen aktualisiert werden muss,
- ❑ subjektive Stärken wie Zielstrebigkeit, Intuition, Sachlichkeit, gutes Vorstellungsvermögen, Ausdauer und Optimismus,
- ❑ Initiative und Führungsqualitäten (Arbeit verteilen, koordinieren, überwachen),
- ❑ Teamgeist und Kooperationsbereitschaft,
- ❑ gesamtheitliche Betrachtungsweisen, und ein entsprechend flexibles Entscheidungsverhalten.

Die konstruktive Tätigkeit kann vor dem Hintergrund des wachsenden Bedarfes an Konstrukteuren jedoch nicht nur besonders begabten Personen vorbehalten sein. Es ist nicht mehr möglich vorwiegend (wie zu Zeiten Leonardo da Vincis) durch Genialität und Intuition konstruktive Lösungen zu finden. Durch das Konstruktionsmanagement sind daher die unterschiedlichen Kenntnisse und Fähigkeiten der Konstrukteure bei der Aufgabenverteilung bzw. Projektgruppenbildung zu berücksichtigen. Durch die Konstruktionswissenschaft waren und sind Wege zu finden, um:

- die zur konstruktiven Problemlösung notwendigen, immer komplexeren Denkprozesse zu vereinfachen,
- den Problemlösungsprozess überschaubarer und effektiver zu machen,
- den Konstruktions- und Entwicklungsprozess durch geeignete Hilfsmittel zu unterstützen,
- eine schnellere und bessere Ausbildung von Konstrukteuren zu sichern.

Zu diesem Zweck wird immer wieder analysiert, kreiert, kritisiert, systematisiert, gegliedert, um die Konstruktionsmethoden weiter zu qualifizieren. Seit einiger Zeit ist verstärkt zu berücksichtigen, dass Entwicklung und Konstruktion Teile eines Gesamtprozesses sind, der zukünftig nahezu vollständig auch informationstechnisch zu beherrschen ist.

«Um die Zeitspanne von der Produktplanung über die Produktentwicklung, Fertigungsplanung und -steuerung einschließlich Betriebsmittelkonstruktion und Materialwirtschaft sowie Fertigung und Montage bis zum Kunden oder zur Markteinführung zu reduzieren und eine ganzheitliche Produkt- und Prozessoptimierung einschließlich einer durchgängigen Qualitätsplanung zu erleich-

tern, führt sich zunehmend ein Simultaneous Engineering ein.» [1]

Darunter ist nicht nur die Parallelarbeit im Entwicklungs- und Konstruktionsbereich zu verstehen, sondern auch eine frühzeitige parallele Projektarbeit aller am Produktentstehungsprozess beteiligten Unternehmensbereiche. Hierfür sind rechnerunterstützte Arbeitsweisen verbunden mit einem entsprechenden Daten- und Informationsmanagement unerlässlich. Ohne leistungsfähige realitätsnahe Datenmodelle sind virtuelle Produktstudien, Funktions-, Fertigungs-, Montage- und Demontagesimulationen nicht möglich. Dem systematischen Aufbau und der Qualifizierung von 3-D-CAD-Produktenmodellen kommt daher eine Schlüsselstellung zu. Sie sind zugleich Voraussetzung um der zeitlichen Dimension (Verkürzung der Durchlaufzeiten, Beachtung des gesamten Produktlebenszyklus) im erforderlichen Maße Rechnung tragen zu können.

Zu den zu lösenden Aufgaben der Konstruktions- und Entwicklungsbereiche gehört daher neben der Produktinnovation die Beherrschung der zunehmend kooperativen Prozesse und des erforderlichen Daten- und Wissensmanagements.

2 Konstruktionslehre

2.1 Einordnung

Viele Autoren haben bereits dazu beigetragen, die anspruchsvolle Tätigkeit des Konstruierens in prägnante Worte zu fassen. Die Definitionen sind so spezifisch wie die Arbeitsgebiete der Autoren und der jeweilige aktuelle Wissensstand. Ein guter Überblick hierzu ist im Buch von Hubka enthalten, dem auch einige der folgenden Zitate entnommen wurden [2]:

BOOKER (1964): *Simulieren, was wir zu tun beabsichtigen, bevor wir es tun, so oft es notwendig sein könnte, um Vertrauen in das endgültige Resultat zu bekommen.*

HANSEN (1966): *Entwickeln ist bestimmt durch das bildhafte Vorausdenken eines technischen Gebildes.*

ALEXANDER (1979): *Konstruieren ist der Prozess, physikalische Dinge zu erfinden, welche als Antwort auf verlangte Funktionen neue physikalische Ordnung, Organisation, Form aufweisen.*

VDI 2223 (1973): *Konstruieren ist das vorwiegend schöpferische, auf Wissen und Erfahrung gegründete und optimale Lösungen anstrebende Vorausdenken technischer Erzeugnisse, Ermitteln ihres funktionellen und strukturellen Aufbaus und Schaffung fertigungsreifer Unterlagen. 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.*

KATZ (1984): *... wir betrachten normalerweise Konstruieren als die Tätigkeit, die mit dem tatsächlichen Aufbau des Systems verbunden ist; d.h., ausgehend von einer gegebenen Vorschrift (Anforderungsliste) für das System, bringen wir diese Vorschrift in Bezug zu dessen physikalischer Realisierung (zum Beispiel ein integrierter Schaltchip, ein Rechnerprogramm, eine Anlage oder ein Flugzeug). Die Konstruktionsaufgabe aber erstreckt*

sich durch den ganzen Lebenslauf des Systems, von der ursprünglichen Verpflichtung, das neue System zu erbauen, bis zur schließlich vollwertigen Herstellung.

HUBKA hat vorgeschlagen, zur Lösungsfindung technische Gebilde als **Systeme** aufzufassen, die durch Eingangsgrößen (Inputs) und Ausgangsgrößen (Outputs) mit ihrer Umgebung in Verbindung stehen. Dabei können auch Teilsysteme gebildet werden. Technische Systeme beschreiben Begriffe wie Anlage, Apparat, Maschine, Gerät, Baugruppe, Einzelteil, ...

Analysiert man technische Systeme, so wird deutlich, dass sie einem Prozess dienen, in dem **Energien, Stoffe** und/oder **Signale** umgesetzt (geleitet und/oder verändert) werden. Was zu einem System oder Teilsystem gehört, wird durch Systemgrenzen festgelegt. Ein- und Ausgangsgrößen überschreiten demzufolge die Systemgrenzen.

Für die Lösung von Entwicklungs- und Konstruktionsaufgaben sind sowohl heuristische, d.h. erfinderische bzw. entdeckende als auch algorithmische Vorgänge erforderlich. Dafür stehen auch Begriffe wie

- ❑ **Intuition:** plötzliche Eingebung, ahnendes Erkennen neuer Gedankeninhalte,
- ❑ **Heuristik:** Lehre von der Auffindung wissenschaftlicher Erkenntnisse,
- ❑ **heuristisch:** richtunggebend, erkenntnisfördernd («Heureka! Ich hab's gefunden!»: Angeblicher Ausruf des griechischen Mathematikers Archimedes),
- ❑ **Kreativität:** schöpferisches Vermögen im Handeln und Denken, das Neuartigkeit oder Originalität mit einem Bezug zur Lösung von (z.B. technischen) Problemen verbindet,
- ❑ **Brainstorming:** Technik zur Anregung kreativen Denkens in Gruppendiskussionen,
- ❑ **Synthese:** Kombinieren, Verknüpfen, Zusammensetzen,
- ❑ **Analyse:** Zerlegung, Auflösung in wesentliche Merkmale,

- **Morphologie:** Lehre vom geordneten Denken.

Die folgenden Abschnitte geben einen Einblick in die Konstruktionswissenschaft. Sie sind zugleich Anregung, sich nicht nur im Rahmen konstruktiver Arbeiten mit methodischen Arbeitsweisen zu beschäftigen.

2.2 Aufgaben von Konstruktionsabteilungen

2.2.1 Differenzierung konstruktiver Tätigkeiten

Unterschiedliche Sichten auf die konstruktive Tätigkeit ergeben sich vor allem aus

- dem Neuheitsgrad der zu lösenden Aufgaben (Neu-, Anpassungs- und Variantenkonstruktion),
- dem Anlass für den Konstruktionsauftrag (Eigenentwicklung, Auftrag, Angebot),
- der Zuordnung des Konstruktionsbereiches (z.B. Entwicklung, Instandhaltung, Werkzeug- oder Vorrichtungsbau),
- der Branchenzugehörigkeit (z.B. Maschinen-, Apparate- oder Gerätebau),
- dem Bearbeitungsstand eines Auftrages (Entwerfen, Gestalten, Ausarbeiten),
- dem Stand der rechnerintegrierten Produktentwicklung (Concurrent Engineering).

Der Neuheitsgrad kann sich entweder auf das zu entwickelnde Gesamtprodukt oder nur auf einzelne Baugruppen oder Einzelteile beziehen. Bei der Anpassungskonstruktion können daher Teile einer vorhandenen Lösung (gegebenenfalls etwas modifiziert) übernommen werden, wobei unter Umständen für bestimmte Details neue Lösungen gefunden werden müssen.

Bei der Variantenkonstruktion wird angestrebt, die entwickelten Lösungen durch Variation von Maßen, Werkstoffeigenschaften und Lösungskomponenten für ähnliche Aufgaben zu nutzen. Das setzt allerdings voraus, dass die Produkte in den entsprechenden Bereichen parametrisierbar sind.

Der Konstruktionsanlass ergibt sich entweder aus unternehmensinternen Produktplanungen einschließlich Produktpflege oder Kundenaufträgen bzw. Kundenanfragen, wobei «Kunden» auch aus dem eigenen Unternehmen kommen können (Tabelle 2.1).

Vorgehensstrategien bei der Entwicklung und Konstruktion werden weiter beeinflusst durch die zu realisierenden Stückzahlen und die damit verbundene Fertigungsart (Massen-, Serien- oder Einzelfertigung).

Aus der Branchenzugehörigkeit ergeben sich besondere Anforderungen, Randbedingungen, Wichtungen und Trends.

Dem **Maschinen- und Apparatebau** werden i.d.R. solche technischen Systeme zugeordnet, bei denen vor allem Energie und Stoffe umgesetzt werden. Bei entsprechender Baugröße und Komplexität wird allerdings

Tabelle 2.1 Unterscheidung von Konstruktionsarten nach dem Konstruktionsanlass bzw. dem Konstruktionsbereich [3]

<i>Entwicklungs-konstruktion</i>	vorwiegend bei auftragsunabhängiger Produktion, aber auch bei grundsätzlicher (prototypischer) Überarbeitung auftragsabhängig produzierter Erzeugnisse (Überarbeitung wesentlicher Konstruktionsmerkmale)
<i>Auftrags-konstruktion</i>	wird durch Kundenaufträge initiiert; begrenzte bzw. lokale Anpassung bekannter, früherer Lösungen
<i>Angebots-konstruktion</i>	erfolgt auf Kundenanfrage; hat projektierenden Charakter, baut meist auf früheren Lösungen auf und dient als Basis für Angebotskalkulation bzw. Machbarkeitsstudien
<i>Betriebsmittel-konstruktion</i>	wird durch die Arbeitsplanung initiiert (produktbezogene Entwicklung von Werkzeugen, Vorrichtungen und Sonderwerkzeugmaschinen)

vom Anlagenbau bzw. der Anlagentechnik gesprochen. Weitere Differenzierungen sind üblich, z.B. im Werkzeugmaschinenbau (bei dem Arbeitsgenauigkeit und Flexibilität eine besondere Bedeutung haben) oder Fahrzeugbau (für den Design, Sicherheit und Leistungsparameter Unterscheidungsmerkmale zur Konkurrenz sind).

Der **Feinwerktechnik** bzw. dem Gerätebau werden dagegen Produkte zugeordnet, bei denen der Signal- und Informationsumsatz und damit die Präzision bzw. Miniaturisierung eine besondere Rolle spielen.

Der heutige Maschinenbaukonstrukteur muss sich neben mechanischen Problemstellungen auch elektrotechnischen, mechatronischen und informationstechnischen Lösungsprinzipien widmen, da Produkte immer mehr auf dem koordinierten Zusammenwirken von Energie-, Stoff- und Signalumsatz angewiesen sind.

2.2.2 Produktentstehungsprozess

Der Ablauf des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses wird durch externe Zwänge und innerbetriebliche Notwendigkeiten bestimmt. Dazu gehören:

- ❑ die Wettbewerbssituation (Produktinnovation, Einsatz von CAx-Systemen),
- ❑ Kostendruck (Herstellungs- und Gebrauchskosten),
- ❑ Termindruck (Planung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses, Parallelarbeit),
- ❑ Sonderwünsche (Bedarf an flexibleren Produktprogrammen steigt),
- ❑ Vorschriftenvielfalt (z.B. durch höheren Exportanteil),
- ❑ Fremdfertigung,
- ❑ höhere Komplexität der Produkte (mehr Wissensgebiete müssen beachtet werden),
- ❑ steigender Weiterbildungsbedarf.

Entwicklung und Konstruktion haben für den gesamten Produktentstehungsprozess, die Produktnutzung sowie für das Recycling eine zentrale Bedeutung. Da hier im entscheidenden Maße Aufwand und Kosten beeinflusst werden, sollten auch alle relevanten Informationen vor- und nachgelagerter Bereiche dem Konstrukteur zur Verfügung stehen bzw. in das Produktdatenmodell integriert werden.

Bild 2.1 enthält Etappen der realen Produktentstehung und entsprechende Informationsflüsse, die stark davon abhängen, ob es sich um ein Einzel-, Kleinserien- oder Großserie-

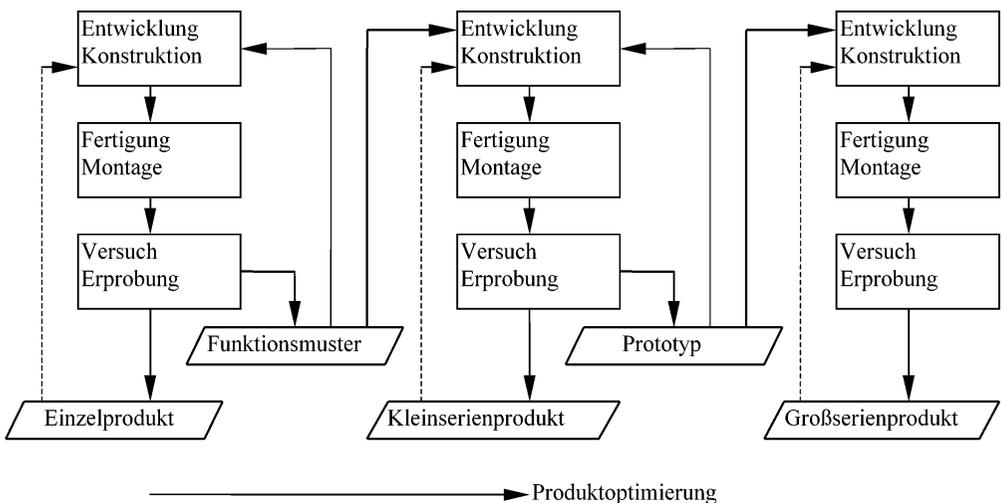


Bild 2.1 Phasen der Produktentstehung (in Anlehnung an [1.1])

rienprodukt handelt. Die gestrichelten Linien sollen andeuten, dass vor allem Informationen aus der Produktnutzung noch unzureichend «zurückfließen». Die damit verbundenen Entwicklungszyklen gelten sowohl für das Gesamtprodukt als auch für einzelne Komponenten.

Nicht in jedem Fall wird es erforderlich sein, komplette Funktionsmuster bzw. Prototypen zu bauen. Häufig wird lediglich für Teillösungen ein Musterbau durchgeführt. Das geschieht auch bei Einzelprodukten, wenn aus fertigungstechnischer Sicht Probleme zu erwarten sind. Beispiele hierzu sind komplizierte Blechabwicklungen, für die häufig aus preisgünstigeren Materialien die Qualität des Zuschnittes getestet wird.

In jedem Fall haben der Muster- und Prototypenbau einen nicht unwesentlichen Anteil an der zeitlichen Dimension des Produktentstehungsprozesses, dessen Optimierung zu den aktuellen Aufgaben gehört.

In Bild 2.2 wird bereits optisch verdeutlicht, dass mit durchgängigen rechnerintegrierten Produktentwicklungen vor allem bei Serienprodukten eine Verkürzung der Entwicklungszeiten erreicht werden kann. Das setzt natürlich voraus, dass die virtuellen Pro-

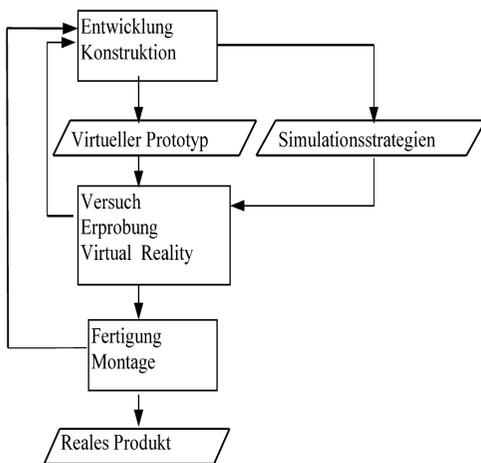


Bild 2.2 Virtuelle Produktentstehung

totypen so realitätsnah wie nötig erstellt wurden und die damit verbundenen Informations- und Produktdatenmodelle auch Gestalts- und Parameteroptimierungen zulassen. Dies können im erforderlichen Umfang nur parametrische 3-D-CAX-Systeme sichern.

2.3 Entwicklungs- und Konstruktionsmethoden

2.3.1 Zielsetzung

Not macht erfinderisch. Diese Weisheit ist ganz sicher nicht wörtlich zu nehmen, wenn es darum geht, neue innovative Verfahren und Produkte zu entwickeln. Der Spruch zeigt jedoch, dass Menschen naturgemäß dazu neigen, störende Defizite zu beseitigen bzw. durch den Einsatz von Hilfsmitteln zu kompensieren.

Zur Vereinfachung komplizierter geistiger Arbeit bildet und nutzt der Mensch bereits unbewusst Denk- und Handlungsstrategien wie z.B.:

- Abstraktion,
- Differenzierung zwischen Wesentlichem und Unwesentlichem,
- Aufgliederung eines Gesamtproblems in lösbare oder bereits gelöste Teilprobleme,
- schrittweise Entwicklung vom Vorläufigen zum Endgültigen, vom Abstrakten zum Konkreten,
- Iteration im Sinne von zu wiederholendem Bewerten und Verbessern,
- Auslagerung von Informationen (z.B. Schriften und Zeichnungen als «externes Gedächtnis»),
- Nutzung von «externem Wissen» (Diskussion, lesen ...),
- Suche nach Alternativen.

Diese von ERLENSPIEL [5] als Naturstrategien bezeichneten Fähigkeiten, bilden auch die Basis der Konstruktionsmethodik, die als Werkzeug zur Vereinfachung konstruktiver Denkprozesse anzusehen ist.

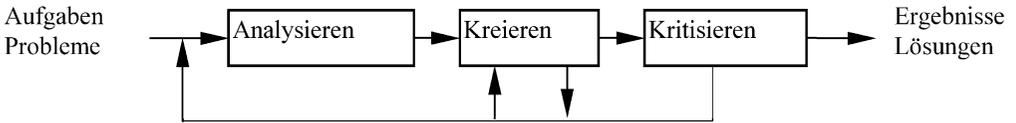


Bild 2.3 Allgemeiner Lösungsprozess

Bewusst oder unbewusst wird bei allen Denkprozessen eine Iteration (methodischer Dreischritt) durchgeführt (Bild 2.3).

Vor allem das Letztgenannte, das Kritisieren (Bewerten, Schlussfolgern ...), wird manchmal etwas stiefmütterlich behandelt, nicht nur wenn es um die Beurteilung eigener Ergebnisse geht.

Die Problemlösung kann auch als ein Prozess des Informationsumsatzes aufgefasst werden (Bild 2.4) [6].

Diese Sichtweise ist natürlich für die Rechnerintegration in den Produktentwicklungsprozess von besonderem Interesse. Sie macht aber auch deutlich, dass ohne methodische und systematische Arbeitsweisen, die sich ständig vergrößernde Menge an Informationen über Produkte, Verfahren, Methoden, Gesetze usw. und deren Vernetzung nicht im erforderlichen Maße beherrscht werden kann.

Das «Leben» eines technischen Systems kann in folgende Abschnitte unterteilt werden, wobei sich hier entsprechende Wechselwirkungen ergeben müssen [1]:

- Systemvorstudie (Marktstudien, Unternehmensziele, Erfindungen),
- Systementwicklung (Entwicklung und Konstruktion),
- Systemherstellung (Fertigung, Montage, Prüfung),

- Systemeinführung (Vertrieb, Beratung, Verkauf, Inbetriebnahme),
- Systembetrieb (Gebrauch, Verbrauch, Instandhaltung),
- Systemwechsel (Demontage, Recycling).

In jeder Etappe sind Problemlösungszyklen (Bild 2.5) zu durchlaufen, die letztendlich eine Verfeinerung der allgemeinen Lösungsiteration (s. Bild 2.3) sind.

Oft wird es zweckmäßig sein, den Lösungsprozess in parallel laufende Lösungswege aufzugliedern. Das ist möglich, wenn das Gesamtproblem zu einem frühen Zeitpunkt in Teilprobleme aufgeteilt werden kann.

Nach der Lösungsentscheidung für Teilprobleme werden diese Teillösungen zur Gesamtlösung verknüpft und bewertet. Auch Teilprobleme können in diesem Sinn zunächst als Gesamtproblem aufgefasst und weiter aufgliedert werden.

Die Strukturierung von Systemen in Einzel- bzw. Teilsysteme ist nicht unproblematisch, da die Verträglichkeit der Einzellösungen bzw. Teillösungen untereinander gesichert sein muss.

Methoden zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, wie

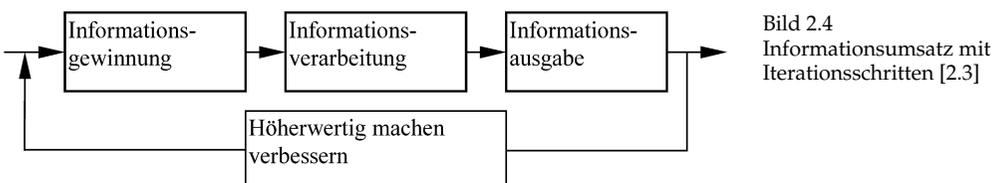


Bild 2.4 Informationsumsatz mit Iterationsschritten [2.3]

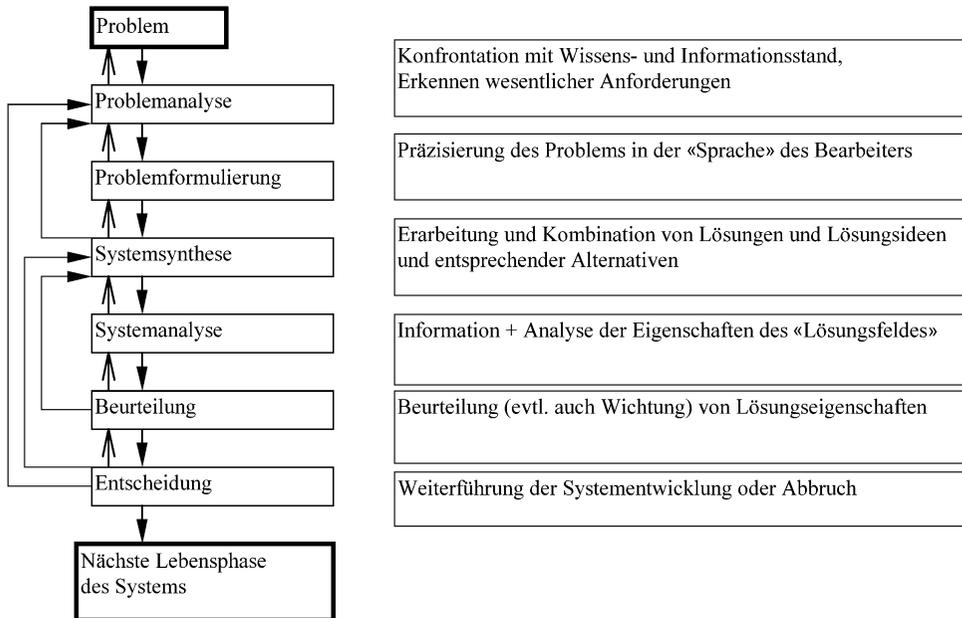


Bild 2.5 Systemtechnische Problemlösungszyklen nach [1.1]

sie in zahlreichen Publikationen behandelt werden, sind i.d.R. allgemeingültig und branchenunabhängig. Sie enthalten die Definition von logischen bzw. zweckmäßigen Arbeitsabschnitten und notwendigen Arbeitsergebnissen. Es werden Leitlinien vorgegeben, die dazu beitragen sollen, vorhandene Entwicklungs- und Konstruktionsabläufe zu überdenken bzw. wirtschaftlicher zu gestalten. Die Integration von Möglichkeiten der elektronischen Datenverarbeitung ist heute hierbei ein unverzichtbarer Gesichtspunkt.

Die von den verschiedenen Autoren entwickelten Konstruktionsmethoden und Systematiken sind nicht als starre Schemata zu verstehen. Nicht alle darin enthaltenen Arbeits- und Entwicklungsschritte sind zwingend zu durchlaufen. Die entwickelten Ablaufstrategien, Methoden und Hilfsmittel sind unter bestimmten Randbedingungen entstanden. Es sind daher vor allem Angebote mit vielen klugen Gedanken, die angenommen, aber auch ignoriert, zugeschnitten, ergänzt und verändert werden können.

2.3.2 Ablaufstrategien

Der Ablauf von Konstruktions- und Entwicklungsprozessen wird häufig in 4 Phasen gegliedert: Planen, Konzipieren, Entwerfen, Ausarbeiten. Je nach Aufgabe und Komplexität sind diese Arbeitsabschnitte weiter zu untergliedern.

Allgemein anerkannt ist das Vorgehen, das in der Richtlinie VDI 2221 enthalten ist. Dort werden 7 Arbeitsabschnitte empfohlen:

1. Klären und präzisieren der Aufgabenstellung, d.h. Informationsbeschaffung, Überprüfen und Ergänzen der externen und internen Anforderungen, Formulieren der Aufgabenstellung aus der Sicht des Bearbeiters. Ergebnis ist eine **Anforderungsliste**, die unter Umständen entwicklungsbegleitend zu präzisieren ist.
2. Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen: Ermitteln der Gesamtfunktion bzw. der zu erfüllenden Teilfunktionen und deren Verflechtungen. Arbeitsergebnis

- sind 1 oder mehrere **Funktionsstrukturen**, die als Beschreibungen oder als formale Darstellungen bzw. Schaltungen festgelegt werden.
3. Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen, d.h. Auswahl physikalischer, chemischer oder anderer Effekte und Festlegung von Wirkstrukturen (Geometrie, Bewegung, Werkstoff ...). Arbeitsergebnis sind 1 oder mehrere **prinzipielle Lösungen** (Prinzipiskizzen, Schaltungen oder auch Beschreibungen).
 4. Gliedern in realisierbare Module, z.B. nach funktionellen und fertigungs- bzw. montage-technischen Gesichtspunkten. Arbeitsergebnis sind **modulare Strukturen**, die bereits eine realisierbare Gliederung der Lösung (Teilsysteme und Systemelemente einschließlich deren Verknüpfung bzw. der Schnittstellen) erkennen lassen. Darstellungsformen können z.B. Anordnungsskizzen, Graphen, Logikpläne, Struktogramme oder Fließbilder sein.
 5. Gestalten der maßgebenden Module. Hier ist eine Parallelbearbeitung der einzelnen Module möglich. Der Konkretisierungsgrad der geometrischen, stofflichen und/oder programmtechnischen Festlegungen ist nur so weit voranzutreiben, dass ein Erkennen und Auswählen des Gestaltoptimums möglich ist. Ergebnis dieser Grobgestaltung sind **Vorentwürfe** (grobe maßstäbliche 3-D-CAD-Modelle, Zeichnungen, Stromlaufpläne u.ä.).
 6. Gestalten des gesamten Produkts durch Detaillierung der vorentworfenen Module und deren Verknüpfung. Das schließt das Gestalten und Ergänzen noch nicht bearbeiteter Elemente oder die Integration bereits vorhandener Teillösungen ein. Arbeitsergebnis dieser kompletten Feingestaltung ist ein **Gesamtentwurf**, der alle wesentlichen Angaben zur Produktrealisierung enthält (3-D-CAD-Modelle, Übersichtszeichnungen und vorläufige Stücklisten ...).
 7. Ausarbeiten der Ausführungs- und Nutzungsangaben. Arbeitsergebnis ist die **Produktdokumentation** mit Nutzungsanga-

ben (rechnerinternes Produktmodell, Einzelteil-, Gruppen- und Gesamtzeichnungen, Stücklisten, Fertigungs-, Montage-, Prüf- und Transportvorschriften, Betriebsanleitungen). Hierunter fallen auch Änderungsmitteilungen, die aus unterschiedlichen Gründen auch während der Fertigung oder Montage notwendig werden können.

Die Arbeitsschritte werden je nach Aufgabenstellung vollständig, nur teilweise oder mehrmals iterativ durchlaufen. Iteration bedeutet in diesem Fall eine korrigierende Lösungssuche. Auch eine weitere Unterteilung kann in manchen Fällen zweckmäßig sein. In allen Arbeitsabschnitten (und Iterationen) sind Auswahl-, Optimierungs- und Entscheidungsschritte ein wichtiges Merkmal für eine methodische Arbeitsweise.

Kritisch zu hinterfragen ist, ob die erläuterte Ablaufstrategie dem immer durchgängigerem Rechnereinsatz im Produktentstehungsprozess Rechnung trägt. Ebenso ist zu beachten, dass höchstens 10 % der in der Praxis zu leistenden Konstruktionsarbeit auf Neukonstruktionen bzw. auf die Konzeptphase entfällt [5].

Dem Konzipieren entsprechen die o.g. Arbeitsabschnitte 2. und 3. Da beide Teilergebnisse (Funktionsstruktur, prinzipielle Lösung) nicht streng voneinander trennbar sind, werden sie u.a. in [6] zusammengefasst. Gleiches gilt für die Arbeitsabschnitte 4. und 5., die der Grobgestaltung dienen.

Das deutliche Trennen von Grob- und Feingestalten wird an dieser Stelle besonders hervorgehoben, da dies auch eine wesentliche Arbeitsstrategie bei der Nutzung moderner CAD-Systeme sein sollte.

Mit Blick auf ein rechnerintegriertes Produktdatenmanagement, das den gesamten Produktentstehungsprozess erfasst, wird in Bild 2.6 eine entsprechend modifizierte Ablaufstrategie mit notwendigen Arbeitsergebnissen angegeben.

Durch den Begriff «Freigabe» wird verdeutlicht, dass Genehmigungs- und Abstimmungsprozesse erforderlich sind und dass

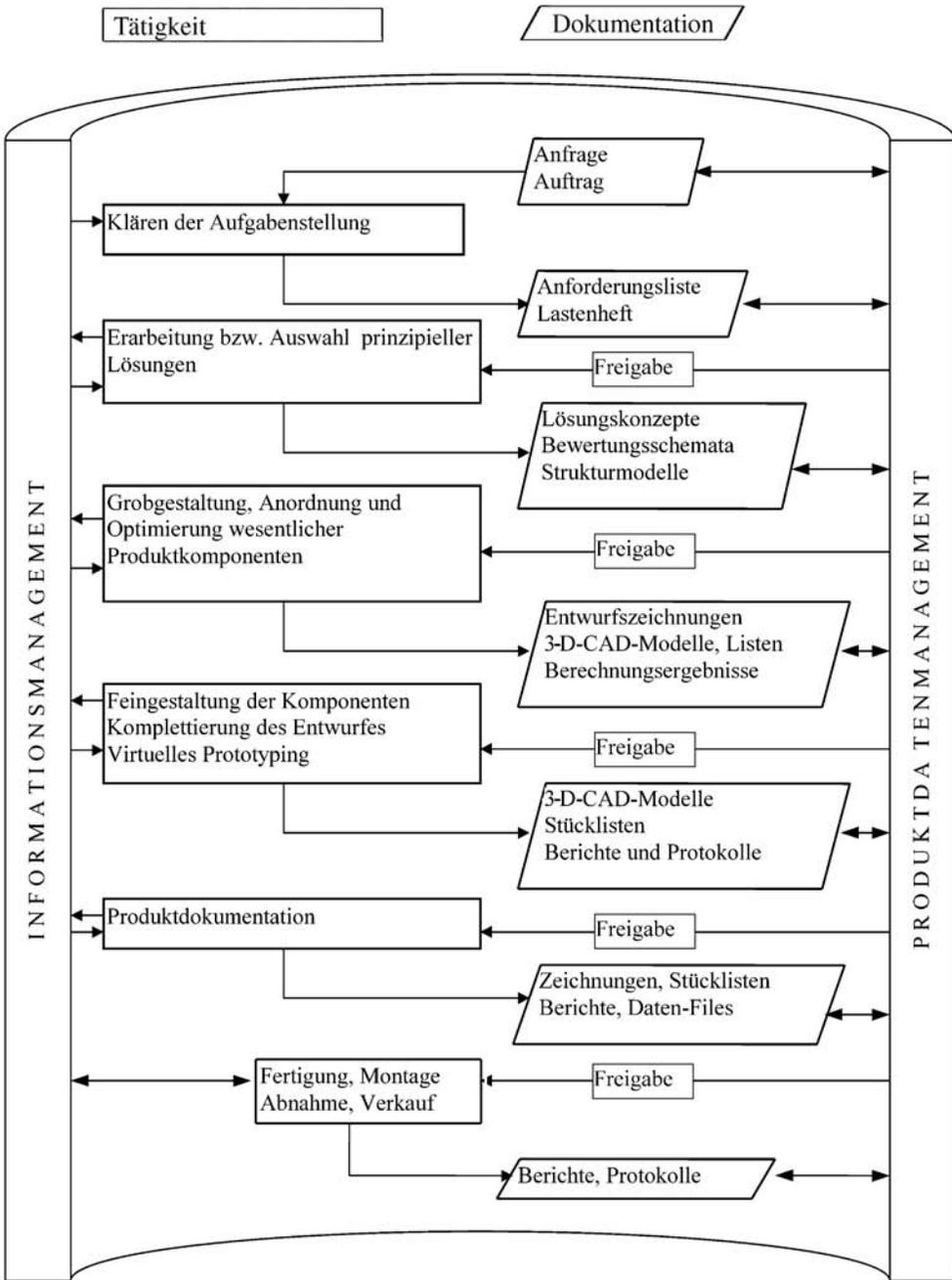


Bild 2.6 Grobe Ablaufstrategie einer rechnerintegrierten Konstruktion