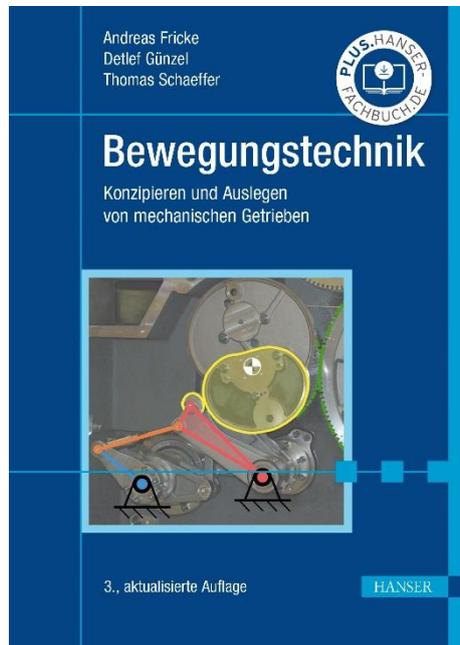


HANSER



Leseprobe

zu

Bewegungstechnik

von Andreas Fricke, Detlef Günzel und Thomas
Schaeffer

Print-ISBN: 978-3-446-46858-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-46859-7

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446468580>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Bewegungsaufgaben für Arbeitsorgane, Werkzeuge, Werkstücke und Verarbeitungsgut in Anlagen, Maschinen und Geräten zu realisieren, gehört zu einer der alltäglichen Problemstellungen eines Produktentwicklers. Das zur Lösung einer Bewegungsaufgabe gewählte *Bewegungssystem* prägt entscheidend das Gesamtverhalten der Maschine und bestimmt damit maßgeblich deren verkaufsrelevante Leistungsgrenzen.

Das Finden optimaler Bewegungssysteme ist aufgrund der Vielfalt der Bewegungsaufgaben und der Lösungsmöglichkeiten oftmals nicht leicht zu bewerkstelligen. Ziel des Lehrbuches ist es deshalb, das Lösen von technischen Bewegungsaufgaben systematisch, modern und praxisorientiert darzustellen. Es vermittelt einen umfassenden Überblick über die Arbeitsschritte, die zum Lösen von technischen Bewegungsaufgaben auszuführen sind, und stellt das dazu notwendige Wissen bereit. Hierbei werden ausgehend vom *Bewegungsdesign* über die Auswahl eines *Gesamt-Lösungskonzeptes* und der *Typsynthese* bis hin zur *Maßsynthese* und Auslegung von Getrieben alle wesentlichen Arbeitsschritte vorgestellt. Das vermittelte Grundwissen über den Aufbau und die Eigenschaften häufig eingesetzter Getriebe (*Getriebesystematik*) sowie die Methoden zur *Getriebeanalyse* unterstützen diesen Prozess.

Das vorliegende Buch richtet sich zum einen an Studierende technischer Studiengänge wie Maschinenbau, Mechatronik, Fahrzeugtechnik und Biomedizintechnik an Universitäten und (Fach)Hochschulen. Zum anderen liefert es einen kompakten, lösungsorientierten Überblick für Praktiker, Techniker und Ingenieure aus der Industrie. Der Leser des Buches soll in die Lage versetzt werden, die für die jeweilige Phase des Produktentwicklungsprozesses geeigneten Methoden und Verfahren auswählen und anwenden zu können. Das systematische Vorgehen beim Lösen von Bewegungsaufgaben bildet dabei das ordnende Grundgerüst. Ausführlich wird auf die möglichen prinzipiellen Lösungskonzepte zur Realisierung von Bewegungsaufgaben eingegangen. Dazu werden die Lösungskonzepte hinsichtlich ihrer Antriebs- und Getriebeart systematisch geordnet und anhand ihrer Merkmale vorgestellt, sodass eine gezielte und sichere Vorauswahl aufgrund der jeweiligen Anforderungen an die zu realisierende Bewegung möglich ist. Bewusst wird an vielen Stellen auf aufwendige Herleitungen verzichtet, und lediglich auf weiterführende Quellen verwiesen. Bevorzugt werden *analytische Methoden* aufgezeigt, die heute mithilfe des Computers und geeigneter Software einfach, schnell und sicher umzusetzen sind. Auf klassische *grafische Verfahren* der Getriebeanalyse und -synthese wird dann zurückgegriffen, wenn das Vorstellungsvermögen über Bewegungsabläufe geschult werden soll und mit Unterstützung der Computergrafik (z.B. CAD-Systeme) Lösungs- und Optimierungsschritte anschaulich dargestellt werden können. Integrierte Beispiele sollen die einzelnen Arbeitsschritte anhand praktischer Aufgabenstellungen verdeutlichen und einen Eindruck über

den Aufwand und die Problematik bei der Umsetzung der Verfahren und Methoden vermitteln. Am Ende der Abschnitte werden *Übungsaufgaben* zum Selbststudium bereitgestellt.

Umfassende Vorkenntnisse für die Arbeit mit diesem Lehrbuch sind nicht erforderlich, da sowohl die notwendigen Grundlagen ausreichend fundiert dargestellt als auch die verwendete Terminologie eingängig erläutert werden.

Unser Dank gilt allen, die an der Entstehung dieses Buches beteiligt waren. Besonderer Dank gilt Herrn Sebastian Fricke (Walldürn), der die Bilder und Zeichnungen zu unserer vollsten Zufriedenheit gestaltete. Für das sorgfältige und sachverständige Begutachten des Manuskripts und den wertvollen Anregungen gilt ein herzlicher Dank Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. Karl-Heinz Modler (TU Dresden). Bei den Damen und Herren des Carl Hanser Verlages, insbesondere Frau Eckardt, Frau Wulst und Herrn Horn, bedanken wir uns für die äußerst kooperative und vertrauensvolle Zusammenarbeit, die Unterstützung beim Layout sowie die redaktionellen Hinweise. Nicht zuletzt danken wir insbesondere unseren Frauen und unseren Familien für das Verständnis und die Geduld, die sie während der vielen Wochen unserer Tätigkeit am Manuskript aufgebracht haben.

Saarbrücken, Albstadt, Regensburg im April 2015

Andreas Fricke
Detlef Günzel
Thomas Schaeffer

■ Vorwort zur 3. Auflage

Die vorliegende 3. Auflage aktualisiert und erweitert das bewährte Konzept. Durch die wertvollen Kommentare und Hinweise unserer Leser angeregt, wurden kleine Ergänzungen vorgenommen sowie Fehler korrigiert. Inhaltlich ergänzt wurde der Abschnitt „Energieeffiziente Bewegungssysteme“, der Methoden zur Reduzierung der Antriebsleistung von Bewegungssystemen behandelt.

Das Spektrum der bereits in der 2. Auflage über QR-Codes abrufbaren Animationen für typische Analyse- und Syntheseverfahren wurde erweitert, wobei der QR-Code zur Homepage des Verlages (plus.hanser-fachbuch.de) führt. Von dieser Homepage können ebenfalls die ausführlichen Lösungen aller Übungsaufgaben sowie Animationen von im Buch besprochenen Getrieben abgerufen werden. Die dazugehörigen Modell-Dateien der Getriebe, die mit dem kommerziellen Getriebeanalyse-Programm SAM 8.0 erstellt wurden, lassen sich mit der unter www.artas.nl kostenlos erhältlichen Demo-Version des Programms aufrufen oder als Animation abspielen.

Wir hoffen, den Leserinnen und Lesern mit diesem Buch Wissen vermitteln und Impulse liefern zu können. Anregungen und Vorschläge zur Weiterentwicklung des Lehrbuchs nehmen wir auch weiterhin dankend an.

Saarbrücken, Albstadt, Regensburg im Oktober 2021

Andreas Fricke
Detlef Günzel
Thomas Schaeffer

Inhalt

■	Vorwort	5
■	Wichtige Kurzzeichen und Indizes	10
1	Lösen von Bewegungsaufgaben	15
1.1	Bewegungstechnik	15
1.2	Bewegungsaufgaben	17
1.2.1	Bewegungsaufgaben im Entwicklungsprozess	17
1.2.2	Klassifizierung von Bewegungsaufgaben	18
1.3	Bewegungssysteme	22
1.3.1	Definition eines Bewegungssystems	22
1.3.2	Beispiele zu Bewegungssystemen	24
1.3.3	Entwicklungsprozess eines Bewegungssystems	26
1.3.4	Lösungskonzepte für Bewegungssysteme	28
1.3.5	Antriebsprinzipie	34
2	Bewegungsdesign	36
2.1	Grundlagen	36
2.2	Bewegungsdesign für Übertragungsaufgaben	42
2.2.1	Polynom-Bewegungsgesetze	42
2.2.2	Trigonometrische Bewegungsgesetze	44
2.2.3	Normierte Übertragungsfunktionen	45
2.2.4	Bewegungsdesign als Optimierungsaufgabe	48
2.2.5	Bewegungsdesign unter schwingungstechnischen Gesichtspunkten	55
2.3	Bewegungsdesign für Führungsaufgaben	65
2.3.1	Abschnittsweise Beschreibung einer Führungsbahn	65
2.3.2	Beschreibung einer Führungsbahn durch eine endliche Fourierreihe	76
2.4	Übungsaufgaben	79

3	Aufbau von mechanischen Getrieben	82
3.1	Ordnung der Getriebe	83
3.1.1	Einteilung nach ihrer Funktion	83
3.1.2	Einteilung nach der Lage der Drehachsen	85
3.1.3	Einteilung nach charakteristischen Getriebeelementen	86
3.2	Darstellungsarten der Getriebe	87
3.3	Elemente der Getriebe	89
3.3.1	Gelenke	89
3.3.2	Getriebeglieder	94
3.3.3	Hilfsorgane	97
3.4	Möglichkeiten zur Änderung der Gelenkbauf orm	97
3.5	Gestellwechsel	101
3.6	Laufgrad und Zwanglauf von Getrieben	101
3.7	Übungsaufgaben	108
4	Kinematische und kinetostatische Grundlagen	113
4.1	Grafische Darstellung von Bewegungsgrößen	113
4.2	Bewegung einer Ebene in einer Bezugsebene	115
4.2.1	Drehung einer Ebene um einen festen Drehpunkt	115
4.2.2	Schiebung einer Ebene	117
4.2.3	Allgemeine Bewegung einer Ebene	118
4.3	Grafische Ermittlung von Geschwindigkeiten	121
4.4	Relative Bewegung von drei Ebenen	125
4.5	Polkonfiguration	129
4.6	Grafische Ermittlung von Übersetzungen	131
4.7	Analytische Methoden der kinematischen Analyse	137
4.8	Kinetostatische Analyse ebener Getriebe	143
4.8.1	Übertragungswinkel als Gütekriterium der Kraftübertragung ..	143
4.8.2	Kraftanalyse nach dem Leistungsprinzip	146
4.8.3	Kraftanalyse nach dem Prinzip der virtuellen Arbeit	148
4.9	Übungsaufgaben	150
5	Typsynthese ausgewählter Getriebe	152
5.1	Koppelgetriebe	152
5.1.1	Ebene 4-gliedrige Koppelgetriebe	154
5.1.2	Ebene 6-gliedrige Koppelgetriebe	166
5.1.3	Räumliche Koppelgetriebe	169
5.2	Kurvengetriebe	170
5.2.1	Systematik und Aufbau von Kurvengetrieben	170
5.2.2	Kurven-Koppelgetriebe	178
5.2.3	Auswahl von Kurvengetrieben	180
5.3	Zahnradgetriebe	182
5.3.1	Ordnung der Zahnradgetriebe	182
5.3.2	Verzahnungsgeometrie	187

6	Maßsynthese ausgewählter Getriebe	195
6.1	Koppelgetriebe	195
6.1.1	Synthese bei vorgegebenen Lagen der Koppel	196
6.1.2	Mehrfache Erzeugung einer Koppelkurve	203
6.1.3	Relativlagen-Synthese	208
6.1.4	Altsche Totlagenkonstruktion	215
6.2	Kurvengetriebe	227
6.2.1	Hauptabmessungen	228
6.2.2	Kurvenkontur	235
6.2.3	Kontaktkraft, Antriebsmoment und Pressung	240
6.2.4	Lebensdauer des Kurvenrollenlagers	243
6.2.5	Optimieren von Kurvengetrieben	246
6.3	Zahnradgetriebe	247
6.3.1	Standradergetriebe	247
6.3.2	Umlaufrädergetriebe	258
6.4	Übungsaufgaben	270
7	Energieeffiziente Bewegungssysteme	275
7.1	Grundlegende Betrachtungen	275
7.2	Leistungsausgleich mittels Federkompensator	277
7.3	Leistungsausgleich durch Eigenbewegung	281
8	Konzipierungsbeispiel für ein Bewegungssystem	286
8.1	Bewegungsaufgabe	286
8.2	Bewegungsdesign	287
8.3	Lösungskonzepte	288
8.4	Erforderliche Antriebsbewegungen	292
8.5	Erforderliche Antriebsmomente	293
■	Literatur und Quellen	297
■	Index	301

1

Lösen von Bewegungsaufgaben

Das Realisieren von Bewegungsaufgaben gehört zu einer der Grundaufgaben eines Produktentwicklers von Geräten, Vorrichtungen, Maschinen und Anlagen, in denen Arbeitsorgane, Werkzeuge, Werkstücke und Verarbeitungsgut bestimmte Bewegungen auszuführen haben. Das zur Lösung einer Bewegungsaufgabe gewählte Bewegungssystem prägt entscheidend das Gesamtverhalten der Maschine (z. B. Baugröße, max. Arbeitsgeschwindigkeit, Kraft- und Energiebedarf, Schwingungsempfindlichkeit) und bestimmt damit maßgeblich die verkaufsrelevanten Leistungsgrenzen der Maschine oder des Gerätes. Werden in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses suboptimale Konzepte gewählt (bedingt geeignete Konfigurationen des Bewegungssystems oder der kinematischen Struktur), lassen nachfolgende Optimierungsschritte kaum noch relevante Leistungssteigerungen zu.

Das optimale Lösen von Bewegungsaufgaben ist aufgrund derer scheinbar unendlich großen Vielfalt und der Lösungsmöglichkeiten oftmals nicht leicht zu bewerkstelligen. Die Kombination von Grundlagenwissen zur Getriebesystematik mit der Kenntnis um grafische und analytische Methoden und Verfahren der Getriebeanalyse und -synthese erlaubt, unter Berücksichtigung der Möglichkeiten moderner Antriebstechnik leistungsfähige Bewegungssysteme effizient zu entwickeln.

■ 1.1 Bewegungstechnik

Bei der Entwicklung von Maschinen wurde es bis zum flächendeckenden, industriellen Einsatz der Digitalrechner in den 90er Jahren oftmals als ausreichend angesehen, die mechanischen Komponenten, also die Getriebe, und die Antriebe weitestgehend unabhängig voneinander zu konzipieren. Steigende Anforderungen bezüglich der zu realisierenden technologischen Prozesse, der Arbeitsgeschwindigkeit, Lebensdauer und Betriebsfestigkeit sowie der Kostenminimierung etc. lassen heute ein getrenntes Entwickeln der Teilsysteme nicht mehr zu. Ein zeitgemäßes Lösen von Bewegungsaufgaben ist heute nur durch ein interdisziplinäres Zusammenspiel mehrerer Fachgebiete möglich. Die Mechatronik führt deshalb die Fachgebiete Bewegungstechnik, Antriebstechnik und Steuerungstechnik zusammen.

Der Begriff **Bewegungstechnik** kennzeichnet eine Neuorientierung der mittlerweile „klassischen“ Getriebetechnik, die sich inhaltlich aufgrund neuer, rechnergestützter Analyse- und Syntheseverfahren auf modernisierte Auslegungsmethoden für Bewegungssysteme unter Einbeziehung der Möglichkeiten der modernen Antriebs- und Steuerungstechnik stützt.

Der Antrieb in einem Bewegungssystem erfolgt heute immer häufiger durch dezentrale, gesteuerte Einzelantriebe anstelle von mechanischen Zentralwellen. Dadurch sind vielfach mechanisch einfach aufgebaute Getriebestrukturen zur Lösung von Bewegungsaufgaben möglich. Sichtbar wird dies u.a. in der stärkeren Betonung des Bewegungsdesigns, bei dem zunächst die optimale Bewegung des Arbeitsorgans gesucht wird, um nachfolgend das zur Umsetzung dieser Bewegung geeignete Bewegungssystem zu konzipieren.

Durch den Einsatz von computerunterstützten Berechnungsprogrammen und CAD-Systemen haben sich viele Arbeitsschritte vereinfacht, oder es haben sich ganz andere, neue Lösungsmöglichkeiten ergeben. So hat sich das Teilgebiet „Getriebeanalyse“ dahingehend verändert, dass hier bis auf wenige Ausnahmen grafische Lösungsansätze an Stellenwert verloren haben bzw. genauere Vorhersagen (z.B. hinsichtlich Gelenkbelastungen, Bauteilbeanspruchungen, Verformungen) möglich werden. Im Rahmen der Getriebesynthese sind aufgrund der gestiegenen Rechnerleistungen umfangreiche Optimierungen meist kein Problem mehr, sodass zum einen bestimmte Synthese-Verfahren bedeutungslos wurden und zum anderen – viel wichtiger – Bauteilbelastungen und -beanspruchungen sowie An- und Abtriebsgrößen optimiert werden können. So muss nicht ein mittelbares Gütekriterium zur Beurteilung der Laufgüte eines Bewegungssystems, wie der Übertragungswinkel, herangezogen werden. Jener berücksichtigt u.a. nicht den Einfluss von stellungsabhängigen Trägheitskräften, womit eine Umkehr des Leistungs-/Kraftflusses nicht erkannt werden kann. Auch Reibungseinflüsse, Verformungen und Spiel bleiben gänzlich unberücksichtigt. Werden dahingegen die Bauteilbewegungen eines Bewegungssystems für realitätsnahe Belastungs- und Betriebsszenarien mithilfe eines MKS-Programmes simuliert, können die Belastungsgrößen (Gelenk- und Kontaktkräfte) sowie die Beanspruchungsgrößen (z.B. Hertzsche Pressung, Bauteilspannungen) zur Optimierung eines Bewegungssystems herangezogen werden.

Genau genommen müsste das Fachgebiet als Mechanische Bewegungstechnik bezeichnet werden, da es in erster Linie um das Auslegen von Bewegungssystemen mit mechanischen Komponenten (sog. kinematischen Strukturen) geht. Ein wesentliches Ziel der Bewegungstechnik ist es deshalb, für jede Bewegungsaufgabe die optimale kinematische Struktur zu finden.

Die Bewegungstechnik umfasst somit:

- Vorgehensweisen zur optimalen Beschreibung von Bewegungsaufgaben (Bewegungsdesign)
- Kenntnisse über den Aufbau und die Merkmale von Mechanismen und Getrieben (Getriebsystematik)
- Methoden, um kinematische Strukturen zu analysieren (Getriebeanalyse)
- Hilfen bei der Auswahl geeigneter Getriebetypen (Struktursynthese) in Verbindung mit der zur Verfügung stehenden Antriebstechnik
- Verfahren zum Finden und Optimieren der kinematischen Abmessungen von Getrieben (Maßsynthese)
- Verfahren zur Optimierung von Getrieben unter Berücksichtigung wesentlicher Kraftgrößen und der modernen Antriebstechnik

■ 1.2 Bewegungsaufgaben

1.2.1 Bewegungsaufgaben im Entwicklungsprozess

Neben den grundsätzlichen Anforderungen bei der Entwicklung technischer Produkte, wie niedrige Kosten, geringer Energieverbrauch bei Herstellung und Betrieb, Funktions- und Betriebssicherheit oder Umweltverträglichkeit, ist speziell für Bewegungssysteme das Realisieren einer Bewegungsaufgabe bei großer Leistungsfähigkeit (hoher Wirkungsgrad, ausreichende Arbeitsgenauigkeit, hohe Dynamik) und genügender Variabilität in den Vordergrund zu stellen. In Bild 1.1 ist detailliert dargestellt, wie eine Bewegungsaufgabe im Rahmen eines Entwicklungsprojektes festgelegt werden kann.

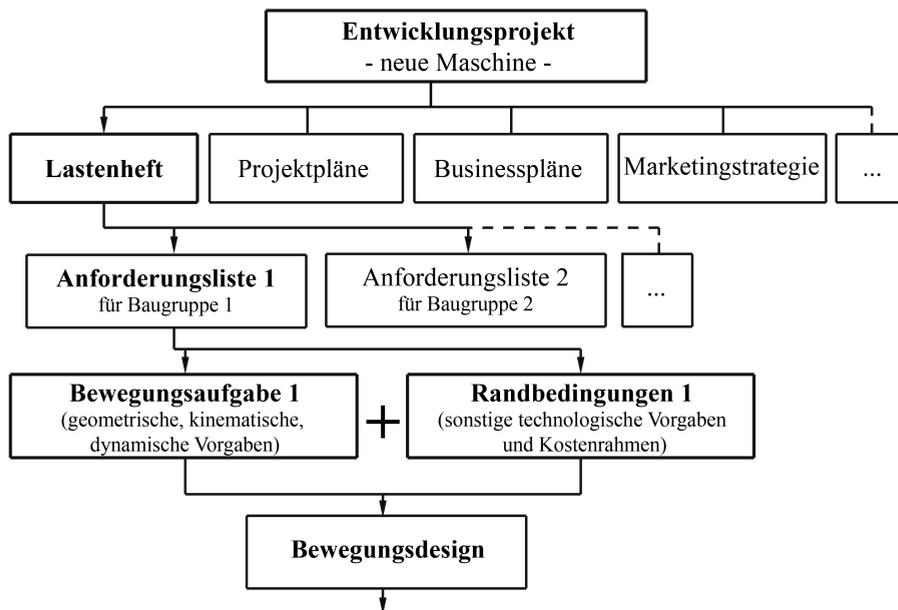


Bild 1.1 Umfeld von Bewegungsaufgaben

Zu Beginn des Entwicklungsprojektes eines technischen Produkts – beispielsweise für die Entwicklung einer neuen Maschine – sollten neben ökonomischen und ökologischen Betrachtungen (z. B. Businessplan, Marketingstrategie, ...) sowie terminlichen Arbeitsplänen (Projektplan) vor allem die technologischen Vorgaben, d. h. alle funktionalen Forderungen und Wünsche für das zu entwickelnde Produkt, in Form eines **Lastenheftes** vorliegen. Bei umfangreicheren Projekten empfiehlt es sich, die Aufgaben in Teilprojekte zu untergliedern, die sich z. B. an einer Funktionenstruktur oder einer Baugruppenstruktur orientieren. Häufig werden deshalb zur Beschreibung der zu realisierenden Funktionen einer Baugruppe **Anforderungslisten für Baugruppen** spezifiziert. Handelt es sich bei der zu entwickelnden Baugruppe im weitesten Sinne um ein Bewegungssystem, d. h., mindestens ein Bauteil soll in bestimmter Weise bewegt werden, dann lassen sich die Anforderungen grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen:

- Die Gruppe „**Bewegungsaufgabe**“ enthält alle geometrischen, kinematischen und dynamischen Vorgaben (z. B. Positionen und Geschwindigkeiten von bewegten Objekten), die für eine eindeutige Definition der geforderten **Bewegungen** der Bewegungsobjekte notwendig sind.
- Die Gruppe „**Randbedingungen**“ enthält alle Anforderungen, die beim Bewegungsdesign allenfalls nur indirekt zu berücksichtigen sind (z. B. Bauraumvorgaben), und technologische Vorgaben, wie geräuscharmer Betrieb oder schmiermittelfreier Arbeitsraum, die bei der Auswahl eines geeigneten Lösungskonzepts und eines passenden Antriebsprinzips sowie daran anschließend bei der Auswahl eines konkreten Getriebetyps (Typsynthese) eine Rolle spielen. So ist z. B. bei hohen Sicherheitsanforderungen hinsichtlich des Zwanglaufs ein einziger Maschinenantrieb mit mechanisch gekoppelten Arbeitsorganen einer Lösung mit mehreren Direktantrieben vorzuziehen.

1.2.2 Klassifizierung von Bewegungsaufgaben

In der einschlägigen Literatur zum Bereich Getriebe- bzw. Bewegungstechnik wird der Begriff „Bewegungsaufgabe“ vielfältig belegt und definiert [1] bis [6]. Andererseits gibt es einige Literaturstellen zur Getriebetechnik [7] bis [10], in denen der Begriff „Bewegungsaufgabe“ nicht explizit verwendet wird. Dies liegt zum einen an anderen Umschreibungen, wie z. B. „Syntheseaufgabe“, „Sollbewegung“ oder „Getriebeaufgabe“, und zum anderen an einer klassischen Ordnung des Fachwissens, die sich eher an Getriebebauformen orientiert und/oder die Getriebeanalyse in den Vordergrund stellt. Aufgrund der lösungsorientierten Vorgehensweise, bei der die zu erfüllende Bewegungsaufgabe den Startpunkt einer Getriebeentwicklung bildet, wird in diesem Buch auf folgender Definition aufgebaut:

Unter einer **Bewegungsaufgabe** werden die Vorgaben für die Bewegung eines Arbeitsorgans verstanden, die es in Abhängigkeit von der Zeit oder einem Bewegungsparameter – beispielsweise dem Drehwinkel der Antriebswelle – auszuführen hat. Hierbei wird zwischen Übertragungsaufgaben und Führungsaufgaben unterschieden.

Die Führungsaufgaben können **antriebsbezogen** oder **nicht-antriebsbezogen** sein (s. Bild 1.2).

Bei **Übertragungsaufgaben** (genau genommen Übertragungs-Bewegungsaufgaben) wird die Antriebsbewegung (beschrieben durch Lagen eines Antriebsglieds, z. B. durch die Folge diskreter Antriebswinkel φ_i) in eine Abtriebsbewegung (beschrieben durch Lagen eines Abtriebsglieds, z. B. durch die Folge diskreter Abtriebswinkel ψ_i) umgeformt bzw. gewandelt. Bei Übertragungsaufgaben wird nur **eine** Abtriebsbewegungsgröße betrachtet, d. h., das Abtriebsglied führt nur eine eindimensionale Bewegung (Translation oder Rotation) aus.

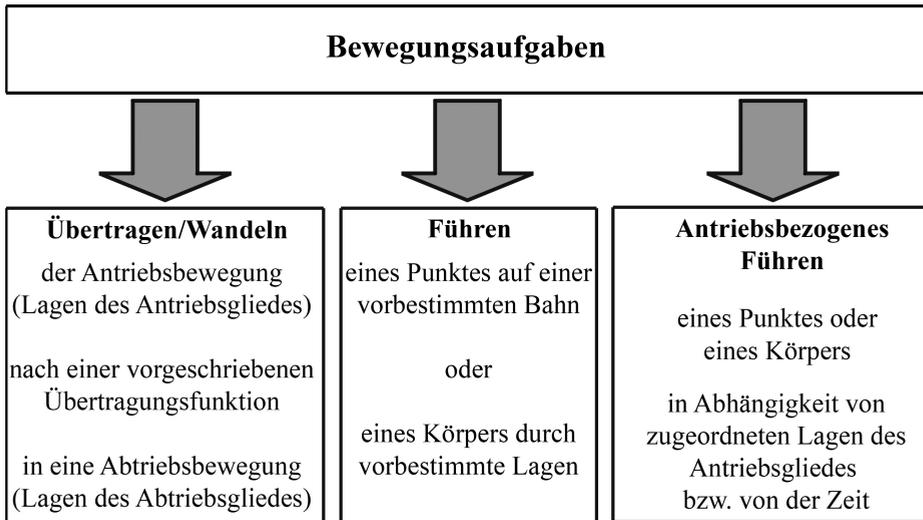


Bild 1.2 Bewegungsaufgaben

In Bild 1.3 sind einige mögliche Charakteristiken einer Schubbewegung dargestellt. Bei einer Schubbewegung wird ein Objekt zwischen zwei Umkehrpunkten auf einer Geraden hin und her bewegt. Der Abstand zwischen den Umkehrpunkten entspricht dem Hub. Von Bedeutung ist hier der zeitliche Verlauf der geradlinigen Bewegung.

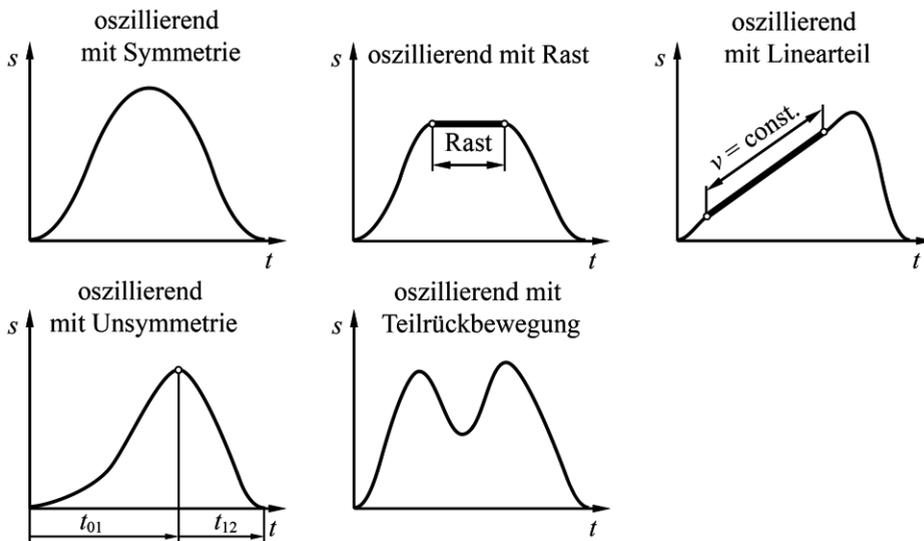


Bild 1.3 Charakteristische periodische Bewegungsverläufe

Bei **Führungsaufgaben** (genau genommen Führungs-Bewegungsaufgaben) wird ein Punkt eines Arbeitsorgans auf einer vorbestimmten Bahnkurve oder ein Körper durch vorbestimmte Lagen bewegt. Bei Führungsaufgaben werden immer mindestens **zwei** Abtriebsbewegungsgrößen (z. B. x - und y -Koordinaten bei ebener Punkt-Bewegung) betrachtet, d. h., das Abtriebsglied führt eine zwei- oder dreidimensionale Bewegung aus. Hier seien folgende Beispiele für Führungsaufgaben genannt:

- Zum Öffnen und Schließen eines Cabriooverdecks (siehe Bild 1.5 a) müssen die Dachteile durch definierte Lagen von der geschlossenen Stellung des Verdecks in die geöffnete Stellung des Verdecks bewegt werden.
- Der Bohrturm einer Großbohrmaschine (siehe Bild 1.5 f) muss aus der waagerechten Transportstellung mit minimalem Kraftaufwand und ohne gefährliche Kippsituationen in die senkrechte Arbeitsposition gebracht werden.

Dauer und Toleranz von kinematischen Vorgaben

Bewegungsvorgaben können sich entweder auf einen diskreten Zeitpunkt oder auf eine Zeitdauer beziehen. Meist ist es nachteilig, langandauernde Bewegungsvorgaben zu machen, da damit für die übrigen Bewegungsabschnitte das Gestaltungspotential stark eingeschränkt wird. Kinematische Anforderungen an die Bewegungsaufgabe eines Arbeitsorgans können je nach Anwendungsfall mit oder ohne zulässigem Toleranzbereich vorgegeben werden. Anzustreben sind möglichst große Toleranzbereiche, damit beim nachfolgenden Bewegungsdesign keine unnötig harten Einschränkungen vorliegen. Tabelle 1.1 zeigt unterschiedlich andauernde und tolerierte Bewegungsvorgaben am Beispiel einer Übertragungs- und einer Punkt-Führungsaufgabe. Um den Lösungsbereich nicht von vornherein zu stark einzuschränken, sollten nur die unbedingt notwendigen technologischen Anforderungen und diese mit möglichst großem Toleranzbereich in die Bewegungsaufgabe einfließen.

Einfache oder komplexe Bewegungsaufgaben

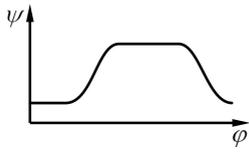
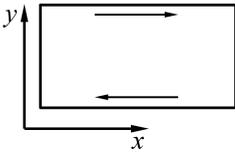
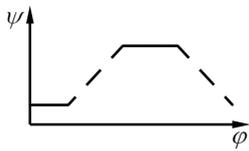
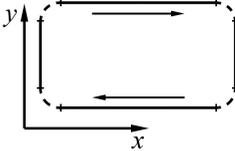
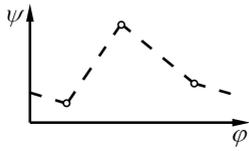
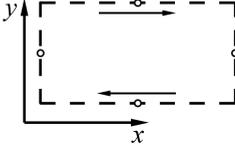
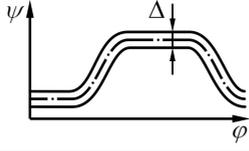
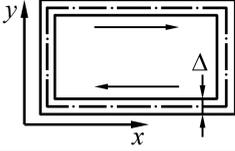
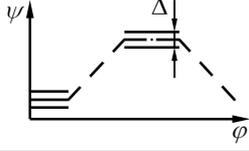
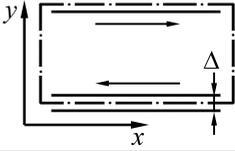
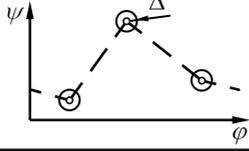
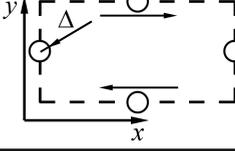
Die Anzahl und die Art der Bewegungsvorgaben bestimmen entscheidend die Menge prinzipieller Lösungsmöglichkeiten und auch die Komplexität der Lösungsfindung. Grundsätzlich gilt, dass mit zunehmender Anzahl von Vorgaben das Finden eines geeigneten (einfachen) Lösungskonzepts schwieriger wird. Für bestimmte Kombinationen von Anzahl und Art der Bewegungsvorgaben gibt es bekannte und bewährte Lösungsmethoden, die eine effiziente und zielorientierte Lösungsfindung erlauben.

Die nachfolgende grobe Unterscheidung in einfache und komplexe Bewegungsaufgaben soll helfen, bereits bei der Beschreibung der gewünschten Bewegung Hinweise zu erhalten, wie schwierig die Lösungssuche und wie breit das mögliche Lösungsspektrum sein werden. Kennzeichen von einfachen Bewegungsaufgaben sind:

1. geringe Anzahl ($i \leq 3$) von vorgegebenen Lagen bzw. Lagenzuordnungen, die oftmals nur genähert zu erfüllen sind
2. keine exakt einzuhaltenden länger andauernde Bewegungsabschnitte, sondern nur Randpunkt-Bewegungsaufgaben (vgl. Abschnitt 2.1)
3. keine konkreten Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorgaben

Alle anderen Bewegungsaufgaben sind als komplexe Bewegungsaufgaben zu betrachten.

Tabelle 1.1 Unterschiedlich andauernde und tolerierte kinematische Vorgaben

Übertragungsaufgabe	Punkt-Führungsaufgabe	Bemerkung
		Exakte Erfüllung der vorgegebenen Bewegung während der kompletten Bewegungsperiode
		Exakte Erfüllung der vorgegebenen Bewegung während einzelner, technologisch relevanter Bewegungsabschnitte. Die übrigen Bereiche der Bewegungsaufgabe sind in Grenzen frei gestaltbar.
		Exakte Erfüllung der vorgegebenen Bewegung nur in einzelnen, technologisch relevanten Punkten. Die übrigen Bereiche der Bewegungsaufgabe sind in Grenzen frei gestaltbar.
		Genäherte Erfüllung (Toleranzbereich Δ) der vorgegebenen Bewegung während der kompletten Bewegungsperiode
		Genäherte Erfüllung (Toleranzbereich Δ) der vorgegebenen Bewegung während einzelner, technologisch relevanter Bewegungsabschnitte. Die übrigen Bereiche der Bewegungsaufgabe sind in Grenzen frei gestaltbar.
		Genäherte Erfüllung (Toleranzbereich Δ) der vorgegebenen Bewegung nur in einzelnen, technologisch relevanten Punkten

Allerdings ist die Grenze zwischen einer einfachen und einer komplexen Bewegungsaufgabe fließend, so dass im Einzelfall erst die Summe aller Vorgaben und deren Art sowie die spezifischen Werte der Bewegungsaufgabe letztlich eine Zuordnung erlauben. So kann z. B. eine Punkt-Führungsaufgabe mit fünf einzuhaltenden Punktlagen (Kennzeichen 1 ist verletzt), die günstig (z. B. auf einem Kreisbogen) liegen, durchaus als einfache Führungsaufgabe eingestuft werden.

Als Beispiel für eine **einfache** Bewegungsaufgabe kann das Schwenken eines Bauteils von einer Ausgangslage in eine Endlage angesehen werden. Für das Lösen dieser Bewegungsaufgabe gibt es mehrere einfache Lösungsverfahren (z. B. Zwei-Lagen-Synthese s. Abschnitt 6.1.1), die zudem eine Auswahl aus vielen Lösungsvarianten erlauben.

Ein Beispiel für eine **komplexe** Bewegungsaufgabe ist das Öffnen und Schließen eines Cabriooverdecks (Bild 1.5 a). Dies ergibt sich u.a. aus den zahlreichen Randbedingungen bezüglich des Bauraums, da während des gesamten Bewegungsablaufs keine Insassen durch bewegte Bauteile beeinträchtigt werden dürfen und gleichzeitig ein Öffnen und Schließen während langsamer Fahrt durch geringe Luftangriffsflächen möglich sein soll. Damit sind zwar konkret nur die beiden Endlagen im geschlossenen und geöffneten Zustand des Verdecks als Lagen exakt vorgegeben, aber alle Zwischenlagen müssen in einem eng begrenzten Bauraum liegen. Zudem wird die Lösungssuche durch die Forderung erschwert, dass im zusammengeklappten Zustand möglichst wenig Stauraum im Kofferraum verlorengehen darf.

Gleichbleibende oder veränderliche Bewegungsaufgaben

Bei gleichbleibenden Vorgaben ist über einen längeren Zeitraum immer wieder die gleiche Bewegung am Arbeitsorgan auszuführen. Dadurch sind spezielle, hierfür optimierte, aufwandsminimierte Bewegungssysteme möglich, die meist kostengünstiger und leistungsfähiger als universelle Lösungen sind, die prinzipiell unterschiedliche Bewegungsaufgaben erfüllen können.

Bei veränderlichen Bedingungen muss die Bewegungsaufgabe an den Arbeitsprozess angepasst werden. So kann zum Beispiel eine permanente Lagekorrektur am Arbeitsorgan aufgrund von schwankenden Nutzkräften und von Nachgiebigkeiten notwendig sein. Die Bewegungsaufgabe kann sich auch gewünscht nach einer bestimmten Anzahl von Arbeitspielen ändern, wenn z. B. der Arbeitshub bei einer Produktumstellung angepasst werden muss. Bei veränderlichen Bewegungsaufgaben sind meist geregelte Antriebe unumgänglich, die deshalb gerade in Fertigungs- und Montageeinrichtungen vielfach eingesetzt werden. Das Umsetzen aller denkbaren Bewegungsmöglichkeiten für den Arbeitsprozess widerspricht jedoch häufig wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Der erforderliche Grad der Anpassbarkeit (Flexibilität) eines Bewegungssystems ist deshalb in Abhängigkeit von der Häufigkeit zu erwartender Umstellungen des Bewegungsablaufs und dem Aufwand einer ggf. länger dauernden Umrüstzeit festzulegen. Da in einer Maschine oder Anlage ausschließlich ähnliche Produkte bearbeitet und produziert werden (z. B. beim Etikettieren von Flaschen), sind spezielle Maschinen gegenüber universell einsetzbaren Industrierobotern oder Handhabeinrichtungen im Vorteil, z. B. wenn lediglich die jeweilige Greifeinrichtung und/oder Hub- und Verfahrestrecken modifiziert werden müssen. Hierbei ist zu entscheiden, ob die Umstellung automatisch, manuell, während des Betriebs oder nur im Stillstand erfolgen kann bzw. muss.

■ 1.3 Bewegungssysteme

1.3.1 Definition eines Bewegungssystems

Ein **technisches System** dient dazu, einen technischen Prozess zu realisieren und ist gekennzeichnet durch

- seine Bauteile als Systemelemente und deren Verknüpfungen (Systemstruktur),
- die zu realisierenden technischen Funktionen bzw. Prozesse und deren Zusammenwirken (Funktionenstruktur),

- die zur Umsetzung der Funktionen bzw. Prozesse genutzten Wirkprinzipien und deren Verknüpfungen (Wirkstruktur),
- die räumliche Anordnung der Bauteile einer Komponente, einer Baugruppe, einer Maschine, eines Gerätes oder einer Anlage (Baustuktur) und
- physikalische Größen, die den Prozesszustand vollständig beschreiben.

Steht die Funktion der Bewegungsgenerierung im Vordergrund, kann das technische System als Bewegungssystem aufgefasst werden, das sich wie folgt definieren lässt (s. Bild 1.4):

Ein **Bewegungssystem** ist ein technisches System mit der Hauptfunktion, Objekte zu bewegen. Ein Bewegungssystem erzeugt mindestens eine bestimmte Bewegung. Es umfasst im Allgemeinen einen Antrieb (Antriebsglied, Aktor), der die notwendigen Kraft- und Bewegungsgrößen liefert, ein Getriebe zum Umformen der Bewegungsgrößen und mindestens ein zu bewegendes Objekt (Abtriebsglied, Arbeitsorgan, Werkzeug, Werkstück, Verarbeitungsgut), das die gewünschte Bewegung ausführt.

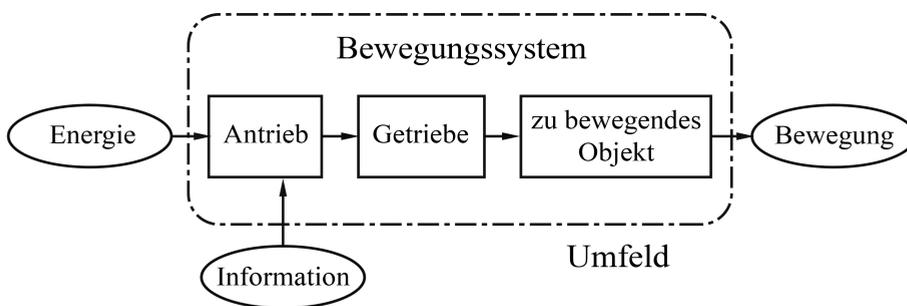


Bild 1.4 Bewegungssystem im Sinne der Systemtheorie

Die Funktion des Antriebs besteht darin, die Antriebsbewegung zu erzeugen sowie die zur Bewegung erforderliche Kraftgröße bereitzustellen, wobei beide zeitlich konstant oder veränderlich sein können. Der **Antrieb** stellt somit einen Energiewandler (z. B. Elektromotor, Hydraulikzylinder, Piezoelement) dar, der die zur Verfügung stehende Energie in eine Bewegung umformt. Bei vielen Maschinen lässt sich ein bewegtes Bauteil (z. B. eine drehende Hauptwelle) im übertragenen Sinne als Antrieb eines Bewegungssystems verstehen, von dem die Antriebsbewegung abgegriffen wird.

Die Funktion des **Getriebes** besteht darin, die vom Antrieb gelieferte Bewegungsgrößen an die Erfordernisse des Abtriebs anzupassen. Wobei nicht nur Drehzahlen und Momente linear skaliert, sondern auch gewünschte Ungleichmäßigkeiten eingebracht oder Wandlungen der Bewegungsart (z. B. Rotation in Translation) vorgenommen werden können.

Im einfachsten Fall handelt es sich bei einem Bewegungssystem um einen Antrieb (Aktor), der direkt mit dem Arbeitsorgan gekoppelt ist.

1.3.2 Beispiele zu Bewegungssystemen

Die in der Praxis zu realisierenden Bewegungsaufgaben sowie die damit verbundenen Anforderungen sind äußerst vielschichtig und damit auch die dafür entwickelten Bewegungssysteme. In Bild 1.5 sind Beispiele für Bewegungssysteme dargestellt, die im Wesentlichen die Vielfalt der Anwendungsbereiche belegen sollen.

Bild 1.5 a zeigt die Unterkonstruktion eines Cabriooverdecks in der geschlossenen und der geöffneten Position sowie in einer Zwischenstellung.

Bild 1.5 b zeigt ein Scharnier für eine Möbeltür. Der mehrgliedrige Aufbau erlaubt ein Öffnen des Türblattes ohne Kollisionen mit dem Korpus und schränkt zudem den Öffnungswinkel stabil ein.

Bild 1.5 c zeigt eine Knie-Prothese, die durch ein Koppelgetriebe sowohl die Beweglichkeit als auch die Stabilität eines menschlichen Kniegelenks möglichst realistisch nachbildet. Damit sind zum einen die Beweglichkeit beim Gehen und zum anderen die Standsicherheit beim Stehen gegenüber einer Prothese mit einem Drehgelenk erheblich verbessert.

Bild 1.5 d zeigt einen variablen Ventiltrieb eines Viertakt-Verbrennungsmotors. Durch das Anpassen der Ventilbewegung und -steuerzeiten (Ventilerhebungskurve) an den Lastzustand und die Drehzahl kann die Effizienz des Motors gesteigert und so ein Leistungs- und Drehmomentzuwachs generiert sowie eine Kraftstoffeinsparung erzielt werden.

Bild 1.5 e zeigt einen Teil des Antriebsstrangs einer Bogenoffsetdruckmaschine. Im Bild zu sehen ist das Getriebe des Vorgreifers, der die zunächst ruhenden Druckbögen aus einer definierten Lage kontrolliert in die Druckmaschine einzieht.

Bild 1.5 f zeigt ein Großbohrgerät, das u. a. für das Erstellen von tragfähigen Baugrundbefestigungen eingesetzt wird. Der Bohrturm muss im Betrieb erhebliche Momente und Kräfte aufnehmen und ausrichtbar sein, damit auch bei schrägem und schlecht positioniertem Stand des Raupenfahrzeugs die Bohrungen in gewünschter Position und Neigung eingebracht werden können. Weiterhin muss der Bohrturm für den Transport des Bohrgereäts von Baustelle zu Baustelle in eine waagrechte Position geschwenkt werden können. Um dies zu ermöglichen, wird der Bohrturm von einer speziellen Kinematik geführt und gehalten.

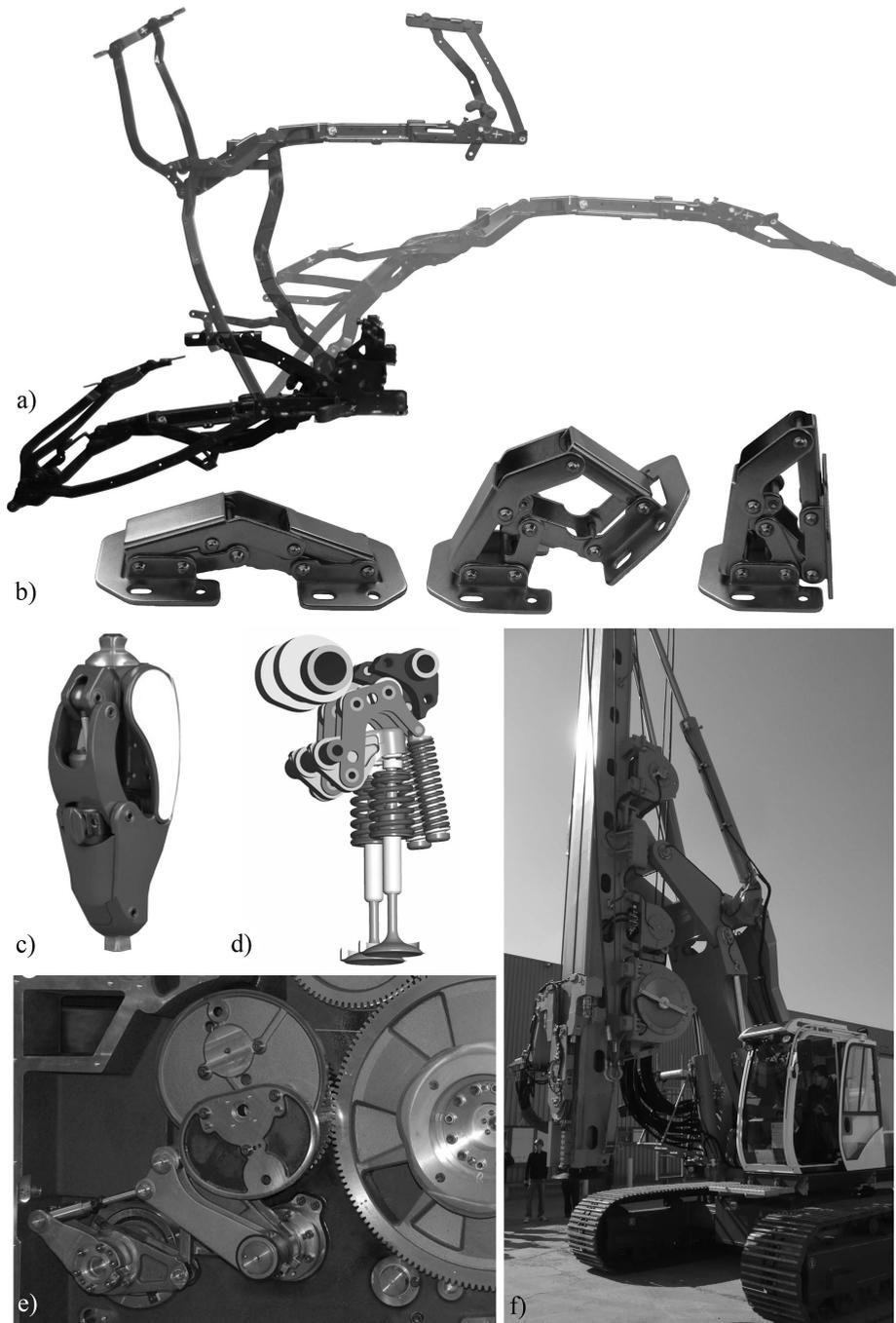


Bild 1.5 Beispiele zu Bewegungssystemen. a) Cabrioüberdeck-Unterkonstruktion, b) Schrankcharnier, c) Knieprothese [11], d) variabler Ventiltrieb [12], e) Vorgreiferantrieb einer Bogenoffsetdruckmaschine [Abbildung: Heidelberger Druckmaschinen AG], f) Turmkinematik eines Großbohrgeräts

Index

- Ablenkwinkel 237
- Absolutbahn 115
- Absolutbewegung 101, 126
- Abstimmungsverhältnis 56
- Abtastart 175
- Abtastrolle 230
- Abtriebsfunktion 29, 40
- Abtriebsleistung 256
- Achsabstand 169, 186, 190 f.
- Achswinkel 169, 186
- Altsche Totlagenkonstruktion 215
- Anlagewechsel 175
- Anschlag 97
- Antiparallelkurbel 160
- Antrieb 23
- Antriebsfunktion 26, 29, 40
- Antriebsleistung 256
- Antriebsmoment 242
- Antriebsprinzip 34
- Äquidistante 236
- Arbeitsorgan 15
- Ausfallwahrscheinlichkeit 244
- Ausgleichsmasse 97
- Auslegungskriterien
 - bei Kurvengetriebenen 246
- Außenkurve 238
- Außenkurvenkontur 176
- Außenkurvenscheibe 176
- Auswahlkriterien 34

- Bahnabschnitt 65
- Bahnbeschleunigung 65, 78
- Bahngeschwindigkeit 65, 78
- Bahnkurve 20, 26, 65, 115
- Bahnnormale 116
- Bahntangente 116
- Balligkeitsradius 243
- Beanspruchung 234
- Beschleunigungsgrad 220
- Beschleunigungskennwert 220
- Beschleunigungspolygon 128
- Bewegung
 - allgemeine Ebene 118
 - Bewegungsabschnitt 20, 38
 - Bewegungsaufgabe 15 ff., 26, 36, 286
 - einfache oder komplexe 20
 - gleichbleibende oder veränderliche 22
 - Bewegungsbereich 155
 - Bewegungsdesign 16, 26, 36, 287
 - Bewegungsdiagramm 39, 288
 - Bewegungsgesetz 39
 - harmonisches 44
 - polynomisches 42
 - trigonometrisches 44
 - Bewegungsgleichung 40, 287
 - der starren Maschine 148, 294
 - Bewegungsgrad 91
 - Bewegungsplan 37, 286
 - Bewegungsskizze 71
 - Bewegungssystem 23
 - Bewegungstabelle 71
 - Bewegungstechnik 15 f.
 - Bewegungsvorgabe 20
 - Bezugsebene 115
 - Blindleistung 276

 - CAD-Modell 87
 - Coriolisbeschleunigung 128
 - Decklage 144, 157, 215
 - Differenzwelle 264
 - Differenzwinkel 210
 - Direktantrieb 29, 292
 - Doppelaußenschwinge 159
 - Doppeldrehgelenk 104
 - Doppelinnenschwinge 159
 - Doppelkurbel 158
 - Doppelkurvenscheibe 174 ff., 229
 - Doppelrolle 175
 - Doppelschieber 163
 - Doppelschwinge 159
 - Drehgelenk 90
 - Drehgelenkkette 154
 - Drehschrittgetriebe 178
 - Drehschubgelenk 90
 - Drehschubstrecke 132
 - diagonale 132
 - einfache 132

- Drehung 115
 Drehzahlplan
 - nach Germar 253
 - nach Kutzbach 248, 260
 Drehzahlreihe
 - arithmetisch gestufte 250
 - geometrisch gestufte 251
 - progressiv gestufte 256
 Drei-Lagen-Synthese 198
 Drei-Punktlagen-Synthese 201
 Dreiwellenbetrieb 261

 Ebenenführung 65, 84
 Eigenbewegung 31, 276, 281
 Eigenkreisfrequenz 55
 Eingriffselement 173, 181
 Eingriffsglied 170, 173, 228
 Eingriffslinie 189
 Eingriffspunkt 187
 Eingriffswinkel 189
 Entwicklungsprozess 26
 Ersatzgetriebe 203
 Ersatz-Koppelgetriebe 231
 Euler-Gleichung 118
 Evolvente 189
 Evolventenverzahnung 189
 Exzentrizität 99

 Feder 97
 Federkompensator 276
 Finite-Elemente-Modell 88
 F-Kurvengetriebe 229
 Formenwechsel 98
 Formschluss 174, 181
 Fourier-Approximation 57, 63
 Fourierreihe 44, 76
 Fourierspektrum 56, 64
 Führungsaufgabe 18 ff., 31 f., 65
 Führungsbewegung 65, 126
 Führungsgetriebe 84
 Führungs-Kurvengetriebe 171

 Gangpolbahn 120
 Gegenkurve 229
 Gegenlaufphase 220
 Gehemme 97
 Gelenk 89
 Gelenkelement-Erweiterung 97
 Gelenkfreiheitsgrad 91
 Gelenkkombination 91
 Gelennkraft 143
 Gelenk-Redundanz 92
 Gelenkunfreiheit 91
 Geradschiebung 118
 Geradverzahnung 190
 Geschwindigkeitspolygon 119
 Gesperre 97
 Gestell 95
 Gestelllage 217
 - äußere 217
 - innere 217
 Gestellwechsel 101
 Getriebe 23, 82
 - ebenes 85
 - gleichmäßig übersetzendes 84
 - mechanisches 82
 - räumliches 85
 - sphärisches 85
 - übergeschlossenes 106
 - ungleichmäßig übersetzendes 84
 Getriebeanalyse 16
 Getriebefreiheitsgrad 102
 Getriebeskizze 87
 Getriebesynthese
 - qualitative 28
 - quantitative 28
 Getriebesystematik 16
 G-Getriebe 84
 Gleichdick 177
 Gleichlaufphase 215, 220
 Gleithebel 173
 Gleitwälgelenk 170, 182
 - ebenes 90
 - räumliches 90
 Glied
 - binäres 95
 - ternäres 95
 Grenzzähnezahl 190
 Grundhub 229
 Grundkreis 189
 Grundkreisradius 189, 228
 Grundwinkel 229

 Hauptabmessungen 228
 Hauptkurve 229
 Hebel 173
 Hertzsche Pressung 240 ff., 247
 - zulässiger Wert 243
 Hilfsorgan 228
 Hodograf 114
 Hodografen-Verfahren 232
 Hubverlust 239

 Innenaußenschwinge 159
 Innenkurve 238
 Innenkurvenkontur 176
 Innenkurvenscheibe 176

- Jacobi-Matrix 141
- Kantenlauf 246
- Kardangelenke 92
- Kennwerte
 - kinematische 46
- Kinematik 115
 - inverse 292
- kinematische Abmessungen 28
- kinematische Kette 87
- kinematisches Schema 87
- kinematische Umkehr 101
- Kinetostatik 143
- Kollineationsachse 130
- kombinierte Getriebe 86
- Komplementär-Kurvenscheibe 176
- Konstruktionslage 199
- Kontaktbreite 243
- Kontaktkraft 240
- Kontaktnormale 230
- Kontaktpunkt 182
- Konturpunkt 236
- Koordinate
 - generalisierte 148
- Koppel 95
- Koppelebene
 - höhere 167
- Koppelgetriebe 86
 - ebene 4-gliedrige 154
 - ebene 6-gliedrige 166
 - räumliche 169
- Koppelkurve 157
- Körperführung 65
- Kraft
 - generalisierte 149
- Kraftangriffswinkel 237
- Kraftschluss 173, 181
- Kreisexzenter 177
- Kreispunkt 198 f.
- Kreisschiebung 118
- Kreuzgelenk 92
- Kreuzschieber 95
- Kreuzschubkurbel 163, 290
- Kreuzschubkurbelkette 154, 162
- Kreuzungswinkel 162 f.
- Krümmungsradius 238
- Kugelgelenk 90
- Kugelkopfebel 173
- Kupplungsleistung 265
- Kurbel 95
- Kurbelschleife
 - schwingende 162
 - umlaufende 161
- Kurbelschwinge 157
 - räumliche 107
- Kurve mit konstantem Durchmesser 177
- Kurvenflanke 174
- Kurvengelenk 170, 230
 - ebenes 90, 104
 - räumliches 90
- Kurvengetriebe 86, 227
 - ebenes 177
 - formschlüssiges 173
 - kraftschlüssiges 173
 - räumliches 177
 - sphärisches 177
- Kurvengetriebeauswahl 180
- Kurvengetriebebauform 181
- Kurvenglied 170, 175, 231
- Kurvenkontur 228, 235 f.
- Kurven-Koppelgetriebe 178
- Kurvenkörper 176
- Kurvenprofil 228
- Kurvenrolle 175, 240, 243
- Kurvenscheibe 176, 228, 239
- Kurvenschiebung 118, 207
- Lagen-Synthese 199
- Lagerbelastung
 - dynamisch äquivalente 244
- Lastenheft 17, 28
- Laufeigenschaft
 - durchschlagfähig 156
 - totalschwingfähig 155
 - umlauffähig 154
- Laufgrad 102
- Laufgüte 143
- Laufruhe 246
- Lebensdauer 243
- Lebensdauerexponent 244
- Leistungsausgleich 276
- Leistungsprinzip 146
- Leistungssatz 168
- Lösungskonzept 28, 288
- Lösungskonzeptauswahl 33
- Maschinendiagramm 37
- Masse
 - generalisierte 148
 - reduzierte 148
- Massenträgheitsmoment 144
 - reduziertes 148, 294
- Maßstab 113
- Maßsynthese 16
- Mechatronik 15
- Mehrfachdrehgelenk 104

- Mehrkörper-Simulations-Modell 88
 Mindestrollenkraft 181
 Minimalmodell 55
 Minusgetriebe 259
 Mittelpunkt 199
 Modul 183
 Momentanpol 119, 123
 Näherungsverfahren von Flocke 232
 Nichtpotentialkraft 143
 Normalbeschleunigung 116
 Normaleneinheitsvektor 236
 Nullrad 191
 Nutkurvengloboid
 - konkaves 177
 - mit Axialkurvenkontur 177
 Nutkurvenhyperboloid 177
 Nutkurvenscheibe 174 ff.
 Nutzkraft 143 f., 242
 Nutzmoment 241
 Optimierung 246
 Parallelkurbel 106, 159
 Pilzstößel 173
 P-Kurvengetriebe 229
 Plusgetriebe 259
 Polbahn 120
 Polgerade 127
 Polkonfiguration 130
 Pollinie 130
 Polstrecke 132
 Polygonmethode 130
 Potentialkraft 143
 Pressung 242
 Pressungswinkel 237
 Prinzip der virtuellen Arbeit 148
 Prinzip von d'Alembert 143
 Profilverschiebung 190
 Punktführung 31, 65, 84
 Punktlagen 196
 Querkontraktionszahl 243
 Rädergetriebe 86
 Räderkoppelgetriebe 105
 Rast-in-Rast-Bewegung 271
 Rastpolbahn 120
 Regel von Swamp 259
 Relativbahn 115
 Relativbewegung 101, 126
 - dreier Ebenen 125
 Relativlagen-Synthese 209
 Resonanz 56
 Robertssche Konstellation 204 f.
 Rollendrehzahl 244
 - mittlere relative 244
 Rollenhebel 235
 Rollenkraft 240 f.
 - maximale 244
 Rollenmittelpunktbahn 228
 Rollenradius 228, 236, 239, 247
 Rollenstößel 236
 Ruck 41
 Rückstellkraft 174, 181, 242
 Rückstellmoment 241
 Satz von Burmester 124
 Satz von Grashof 154
 Satz von Roberts 203
 Schaltgetriebe 250
 Schieber 95
 Schiebung 117
 Schleife 95
 Schneidenhebel 173
 Schrägverzahnung 193
 Schraubgelenk 90
 Schubgelenk 90
 Schubkurbel 161
 - zentrische 161, 291
 Schubkurbelkette 154, 160
 Schubschleife 164
 Schubschleifenkette 154, 164
 Schwinge 95
 Schwingenlänge 228
 Schwingschleife 162
 Schwingung 55
 Schwingungssystem 55
 Segmentkurve 177
 Selbsthemmung 266
 Sinoide 44, 287
 Sinuslinie 271
 Spitzenbildung 239
 Spitzenhebel 173
 Standrädergetriebe 182
 Standübersetzung 185, 259, 262 ff.
 Standwirkungsgrad 256, 266
 Starrkörperbewegung 55
 Steg 170, 182
 Stephenson'sche Kette 166
 Stoß 41
 Stößel 173
 Strecklage 144, 157, 215
 Strukturkette 87
 Stufensprung 251
 Summenwelle 264
 Summiergetriebe 33, 262

- Tangentenwinkel 237
Tangentialbeschleunigung 116
Taumelscheibe 177
Teilergetriebe 262
Teilgelenk 92
Teilkreis 190
Teilkreisradius 183
Tellerstößel 173
Theorem von Aronhold/Kennedy 127
Toleranzbandmethode 195
Totlage 145, 215
- äußere 157, 215
- innere 157, 215
Totlagenkurbelwinkel 157, 215
Trägheitskraft 143
Trägheitsmoment 241
Tragzahl
- wirksame dynamische 243
- wirksame statische 243
Typsynthese 152
Überbestimmung (Gelenk) 92
Übersetzung 131, 183
- absolute 260
- diagonale 132
- einfache 131
- relative 259, 262
Übertragungsaufgabe 18, 40
Übertragungsfunktion 29, 40, 83, 164
- normierte 45
- symmetrische 161
- typische 157f., 161, 167ff.
Übertragungsgetriebe 83
Übertragungs-Kurvengetriebe 171, 290
Übertragungswinkel 16, 143ff., 234, 237
- minimaler 217
U-Getriebe 84
Umlaufrad 184
Umlaufrädergetriebe 184
- einfach rückkehrend 184, 258
Umlaufübersetzung 259
Umlaufwirkungsgrad 266
Umparametrisierung 66
Ungleichförmigkeitsgrad 275
Unrundräder 187
Unterschnitt 191, 239
Vektor-Methode 140
Verlustleistung 256, 266
Versetzung 228
- kinematische 99
- statische 99
Verzahnungsgesetz 189
Verzweigungslage 156
Viergelenk 154
Viergelenkkette 154
Vorschaltgetriebe 158
V-Rad 191
Walzenkopfhebel 173
Walzenkopfstoßel 173
Wälzgelenk 90
Wälzkreis 183, 190
Wälzkreisradius 183
Wälzleistung 265
Wälzpunkt 188
Wattsche Kette 166
Wellgetriebe 268
Wendepunkt 232f., 272
Werkzeugradius 239
Winkelbeschleunigung 117
Wulstkurvenscheibe 174ff.
Zahnkraft 257
Zeichenfolge-Rechen-Methode 139, 164
Zentralrad 184
Zielpunktmethode 195
Zugmittel 95
Zugmittelgetriebe 86
Zwanglauf 106, 173
- formschlüssiger 174
- kraftschlüssiger 173
Zwanglaufsicherung 173, 181
Zwangsbedingungen 138
Zwei-Lagen-Synthese 196
Zweiwellenbetrieb 260
Zylinder-Platten-Gelenk 94