

# 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.

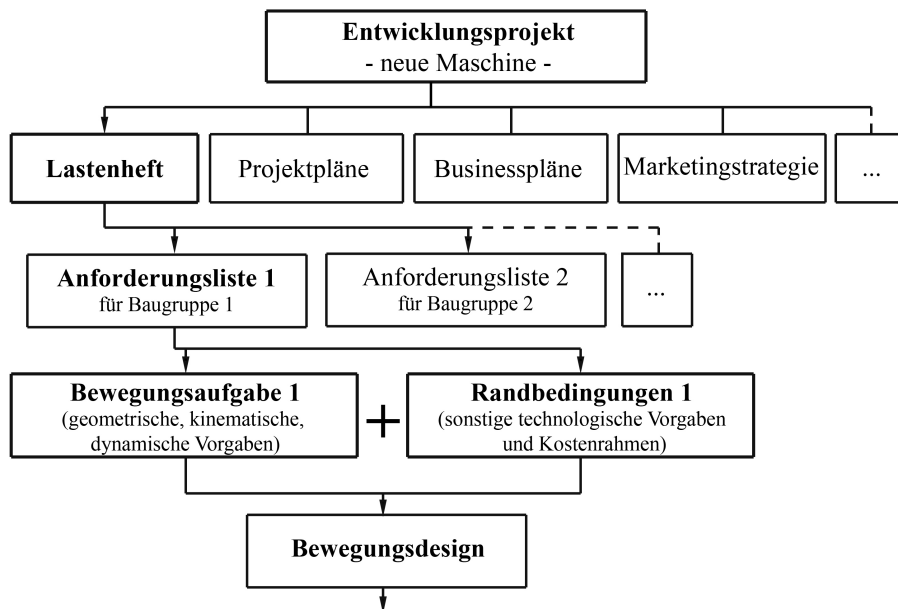
Die Bewegungstechnik umfasst somit:

- 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.

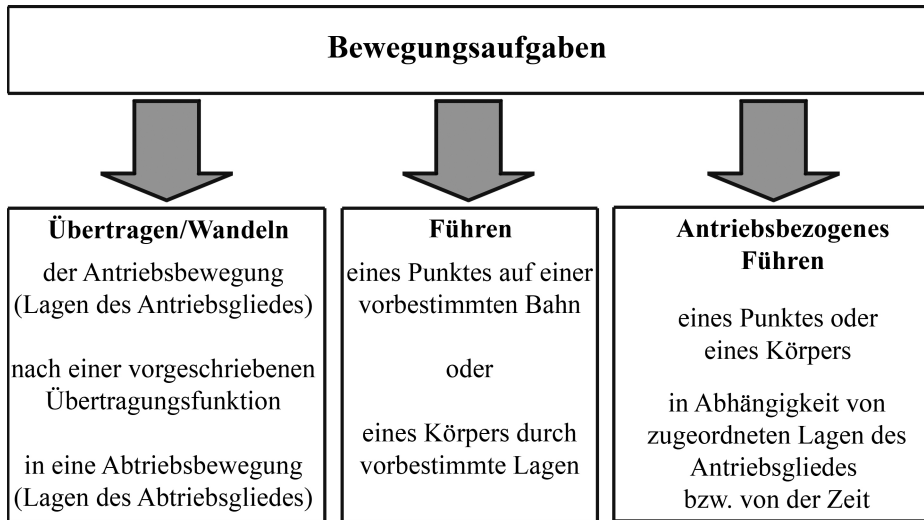
### 1.2.2 Klassifizierung von Bewegungsaufgaben

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.

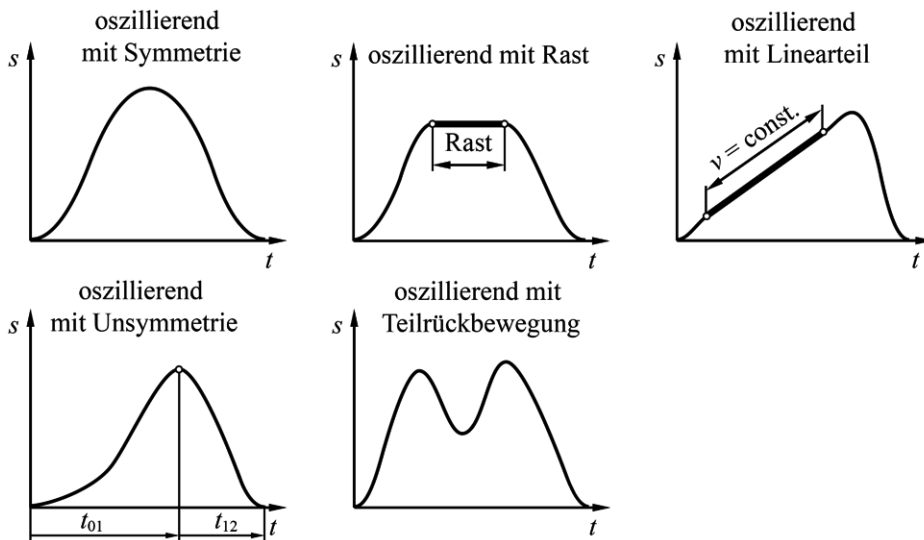
Die Führungsaufgaben können **antriebsbezogen** oder **nicht-antriebsbezogen** sein (s. Bild 1.2).

Bei **Übertragungsaufgaben** (genau genommen Übertragungs-Bewegungsaufgaben) wird die Antriebsbewegung (beschrieben durch Lagen eines Antriebsglieds, z. B. durch die Folge diskreter Antriebswinkel  $\varphi_i$ ) in eine Abtriebsbewegung (beschrieben durch Lagen eines Abtriebsglieds, z. B. durch die Folge diskreter Abtriebswinkel  $\psi_i$ ) 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**

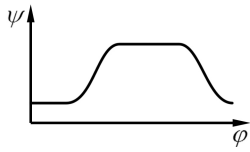
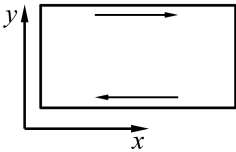
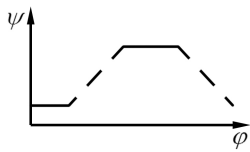
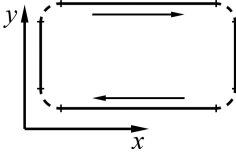
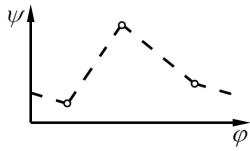
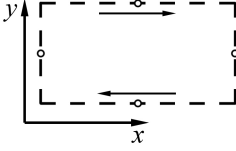
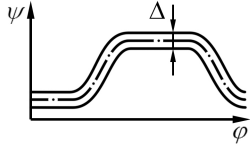
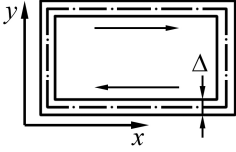
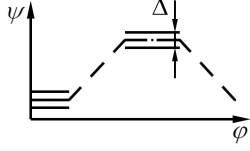
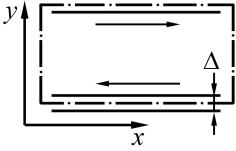
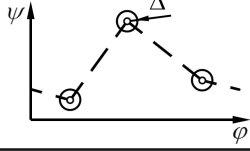
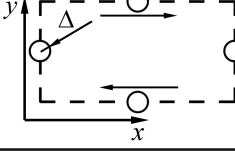
Die Anzahl und die Art der Bewegungsvorgaben bestimmen entscheidend die Menge prinzipieller Lösungsmöglichkeiten und auch die Komplexität der Lösungsfindung. Grundsätzlich gilt, dass mit zunehmender Anzahl von Vorgaben das Finden eines geeigneten (einfachen) Lösungskonzepts schwieriger wird. Für bestimmte 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 $\Delta$ ) der vorgegebenen Bewegung während der kompletten Bewegungsperiode   |
|   |   | Genäherte Erfüllung (Toleranzbereich $\Delta$ ) der vorgegebenen Bewegung während einzelner, technologisch relevanter Bewegungsabschnitte. Die übrigen Bereiche der Bewegungsaufgabe sind in Grenzen frei gestaltbar. |
|  |  | Genäherte Erfüllung (Toleranzbereich $\Delta$ ) 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

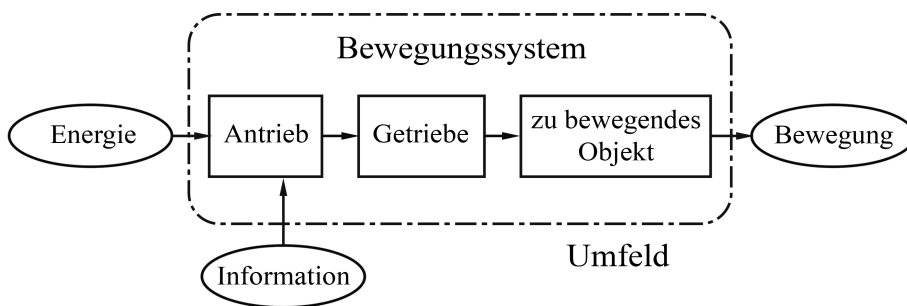
- seine Bauteile als Systemelemente und deren Verknüpfungen (Systemstruktur),
- die zu realisierenden technischen Funktionen bzw. Prozesse und deren Zusammenwirken (Funktionenstruktur),



- 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.

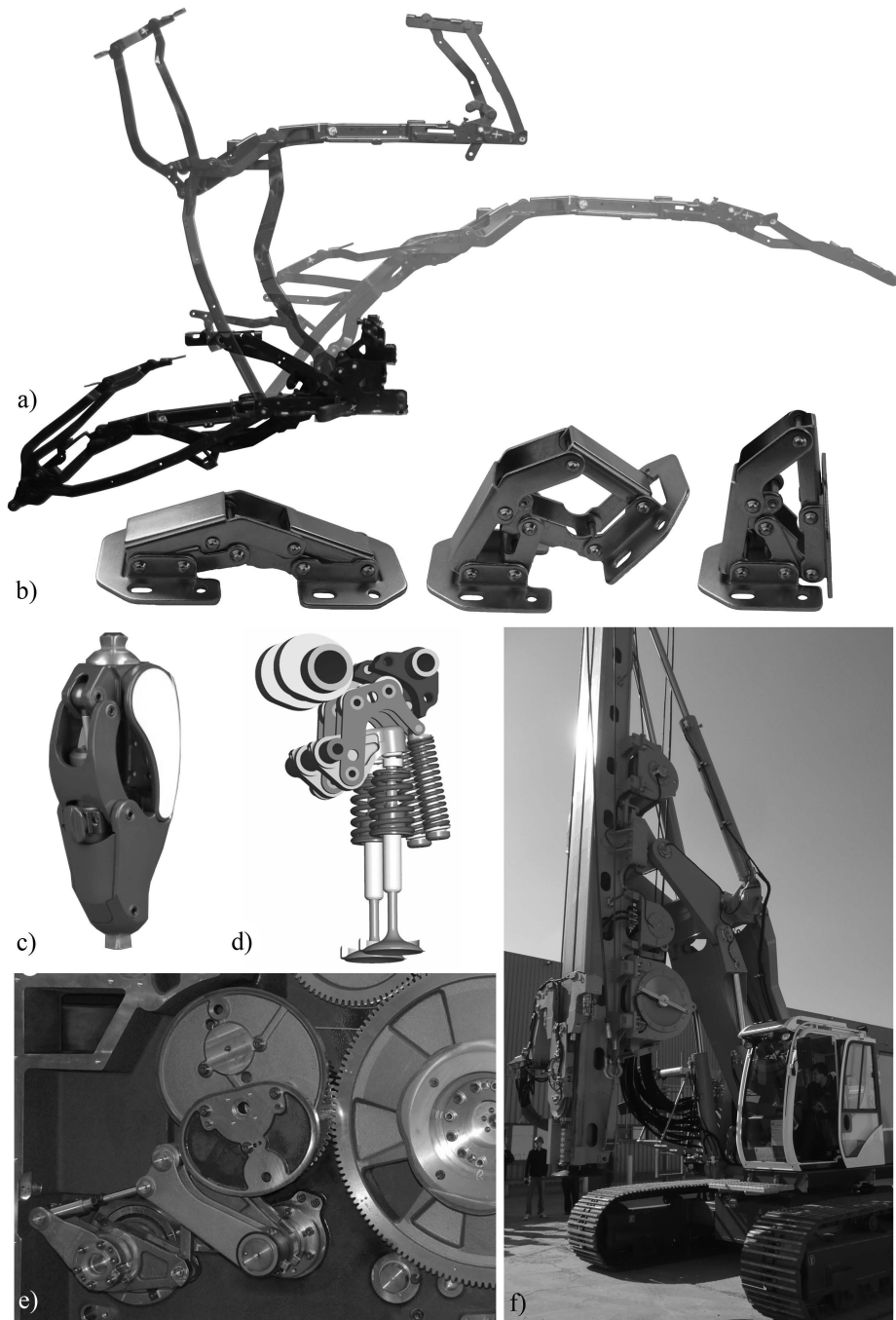
Bild 1.5 b zeigt ein Scharnier für eine Möbeltür. Der mehrgliedrige Aufbau erlaubt ein Öffnen des Türblattes ohne Kollisionen mit dem Korpus und schränkt zudem den Öffnungswinkel stabil ein.

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 Bohrgeräts 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  
 Gleitwälzelenk 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  
Umlaufgrad 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