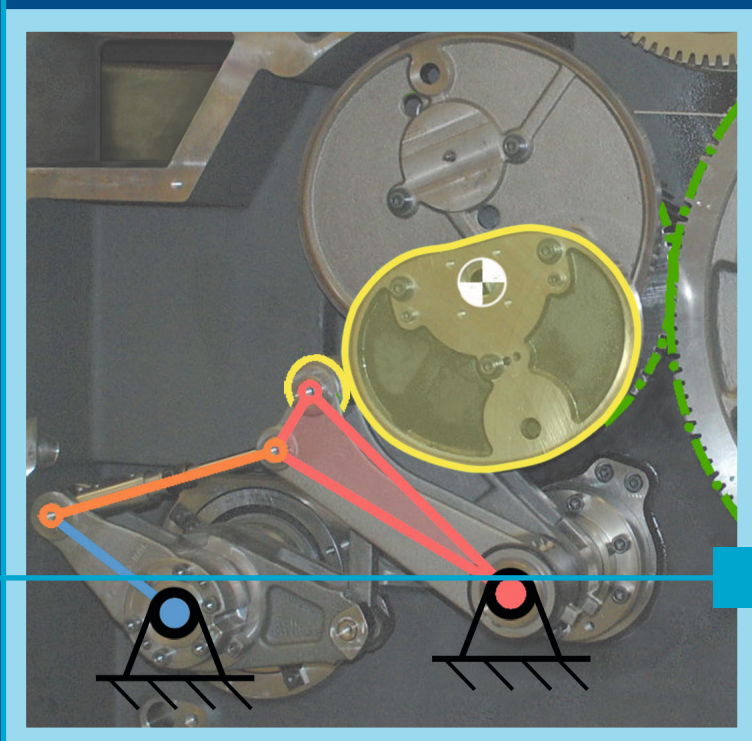


Andreas Fricke
Detlef Günzel
Thomas Schaeffer



Bewegungstechnik

Konzipieren und Auslegen
von mechanischen Getrieben



3., aktualisierte Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

`plus-gh93k-2h6fd`

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Andreas Fricke

Detlef Günzel

Thomas Schaeffer

Bewegungstechnik

Konzipieren und Auslegen von mechanischen Getrieben

3., aktualisierte Auflage

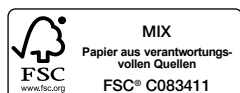
HANSER

Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Fricke, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes,
Professur Mechatronische Konstruktionen

Prof. Dr.-Ing. Detlef Günzel, Hochschule Albstadt-Sigmaringen, Lehrgebiete: Konstruktion, CAE
und Simulation

Prof. Dr.-Ing. Thomas Schaeffer, Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Labor für
Mehrkörpersimulation

Die drei Autoren sind aktive Mitglieder des VDI und wirken in verschiedenen Gremien des VDI mit.



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München, www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © Heidelberger Druckmaschinen AG (Foto: A. Fricke)

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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

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

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

Wichtige Kurzzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben

Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
a_{Aij}	Beschleunigung des Punkts A des Glieds i gegenüber Glied j	mm/s ²
a_{ij}	Abstand zwischen den Drehachsen der Glieder i und j	mm
a_k, b_k	Polynom- bzw. Fourierkoeffizienten der Soll-Bewegung	mm bzw. ° oder rad
$\langle a \rangle$	dargestellte Beschleunigung	mm
A_k, B_k, C_k	Fourierkoeffizienten der Ist-Bewegung	mm bzw. ° oder rad
A	Gelenkpunkt	
A_0	gestellfester Gelenkpunkt	
$A_{0,i}^*$	transformierter Gelenkpunkt A_0 in der Lage i	
A_∞	im Unendlichen liegender Gelenkpunkt	
b	Bewegungsgrad eines Körpers oder einer Ebene	-
b	Bogenlänge einer Bahnkurve	mm
b	Kontaktbreite	mm
c	Federsteifigkeit	N/mm
C	dynamische Tragzahl eines Wälzlagers	kN
C_a	Beschleunigungskennwert	-
C_j	Ruckkennwert	-
C_M	Momentenkennwert	-
C_v	Geschwindigkeitskennwert	-
C_0	statische Tragzahl eines Wälzlagers	kN
d	statische Versetzung oder Abstand	mm
e	kinematische Versetzung	mm
\vec{e}_n	Normaleneinheitsvektor	-
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
E_0	gestellfeste Gliedebeine	
E_i	Ebene des Glieds i	
f	Gelenkfreiheitsgrad	-
$f(z)$	normierte Übertragungsfunktion	-
f_1	erste Eigenfrequenz	Hz

Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
F	Laufgrad (Freiheitsgrad eines Getriebes)	-
F_A	äußere Kraft	N
F_F	Federkraft	N
F_{ij}	Kraft am Glied i vom Glied j ausgehend	N
F_N	Nutz- oder Arbeitskraft	N
F_R	Rollenkraft	N
F_P	Kontaktkraft im Kontaktpunkt P	N
g	Anzahl der Gelenke	-
g_1	Anzahl der Gelenke mit $f = 1$	-
g_2	Anzahl der Gelenke mit $f = 2$	-
g	Gravitationskonstante	m/s ²
g	Hilfsgerade	
H, K	Ordnung des Polynom- oder trigonometrischen Bewegungsgesetzes	-
i_{ij-kl}	Übersetzung (Verhältnis $\omega_{ij} / \omega_{kl}$)	-
$J(q)$	generalisiertes Massenträgheitsmoment	kg bzw. kgmm ²
J_i	Massenträgheitsmoment des Glieds i	kgmm ²
\bar{J}	Jacobi-Matrix	
k	Bahn	
k_{ij-kl}	Kollineationsachse	
k_{pij}	Bahnkurve des Punktes P von Glied i bezüglich Glied j	
l_i	Gliedlänge des Glieds i	mm
l_j	Länge der gespannten Feder j	mm
l_{0j}	Länge der ungespannten Feder j	mm
$\langle l \rangle$	dargestellte Länge	mm
L_{10h}	nominelle Wälzlagerlebensdauer	h
m	Anzahl der in einem Punkt gleichachsrig drehbar miteinander verbunden Getriebeglieder	-
m_i	Masse des Glieds i	kg
$m_{\Delta ij}$	Mittelsenkrechte auf die Strecke $\overline{A_i A_j}$	
M	Zeichnungsmaßstab	-
M_a	Beschleunigungsmaßstab	s ²
\tilde{M}_{an}	Antriebsmoment bei Abstimmwinkelgeschwindigkeit	Nm
M_A	äußeres Moment	Nm
M_F	Federmoment	Nm
M_{ij}	Moment am Glied i vom Glied j ausgehend	Nm
M_{kin}	Anteil des Antriebsmoments infolge der Massenträgheiten	Nm

Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
M_n	Anteil des Antriebsmoments infolge der Nutzkräfte	Nm
M_N	Arbeits- oder Nutzmoment	Nm
M_{pot}	Anteil des Antriebsmoments infolge der Feder- und Gewichtskräfte	Nm
M_r	Anteil des Antriebsmoments infolge der Reibung	Nm
M_{Ti}	Moment infolge der Massenträgheit des Glieds i	Nm
M_v	Geschwindigkeitsmaßstab	s
M_z	Zwanglaufmoment	Nm
n	Anzahl der Getriebeglieder	-
n_{ij}	Drehzahl des Glieds i relativ zu Glied j	min^{-1}
\tilde{n}_{ij}	mittlere Drehzahl des Glieds i relativ zu Glied j	min^{-1}
n_M	Anzahl der erforderlichen Maschengleichungen	-
n_A	Bahnnormale des Punkts A	
p	Lebensdauerexponent	-
p_H	Hertzsche Pressung	N/mm^2
p	Rastpolbahn	
P	Leistung	Nm/s
P	äquivalente Rollenbelastung	kN
P	Kurvenkontaktpunkt	
P_0	Krümmungsmittelpunkt der Gleitwälzkurve bezüglich des momentanen Kontaktpunkts	
\hat{q}	Schwingungsamplitude	mm bzw. ° oder rad
q	Schwingungskordinate oder generalisierte Koordinate	mm bzw. ° oder rad
q	Gangpolbahn	
r	Radius	mm
r_G	Grundkreisradius	mm
r_{ij-kl}	Drehschubstrecke (Verhältnis v_{ij} / ω_{kl})	mm
\vec{r}_P	Ortsvektor des Punkts P	
r_R	Rollenradius	mm
R	Grad der Überbestimmung eines Gelenks (Gelenk-Redundanz)	-
RMB	Rollenmittelpunktbahn	
s	Abtriebsweg	mm
s_G	Grundhub	mm
s_H	Hub	mm
s_{ij}	Weg des Glieds i gegenüber Glied j oder Differenzweg zwischen den Lagen i und j	mm
s_0	Hub zwischen den Totlagen	mm

Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
t	Zeit	s
t_i	Zeit bei Randpunkt i	s
t_{ij}	Zeitintervall für Bewegungsabschnitt ij	s
t_A	Bahntangente des Punkts A	
T	Periodendauer	s
u	Unfreiheit einer Gelenkverbindung	-
u'	Unfreiheit eines Teilgelenks	-
v_{Aij}	Geschwindigkeit des Punkts A des Glieds i gegenüber Glied j	mm/s
v_{BA}	Geschwindigkeit des Punkts B um den Punkt A	mm/s
\vec{v}_A	Vektor der Geschwindigkeit des Punkts A	
\vec{v}_A	Vektor der gedrehten Geschwindigkeit des Punkts A	
v	dargestellte Geschwindigkeit	mm
W, \bar{W}	Wendepunkt im Hubanstieg bzw. Hubabstieg	
W	Energie	Nm
W^*	Antriebsenergie infolge der Nutz- und Reibungskräfte	Nm
x	Antriebsgröße	mm bzw. ° oder rad
x_i	Antriebsgröße bei Randpunkt i	mm bzw. ° oder rad
x_{ij}	Antriebsgrößenintervall des Abschnitts ij	mm bzw. ° oder rad
y	Abtriebsgröße	mm bzw. ° oder rad
y_H	Gesamthub der Abtriebsgröße	mm bzw. ° oder rad
y_i	Abtriebsgröße bei Randpunkt i	mm bzw. ° oder rad
y_{ij}	Teilhub der Abtriebsgröße des Abschnitts ij	mm bzw. ° oder rad
y_{Si}	raumfeste Koordinate des Schwerpunkts von Getriebeglied i	mm
z	normierte Antriebsgröße	-
z_G	Anzahl der Polgeraden eines Getriebes	-
z_P	Anzahl der Momentanpole eines Getriebes	-

Griechische Buchstaben

Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
α	Kraftangriffswinkel	° oder rad
α_{ij}	Winkelbeschleunigung des Glieds i relativ zu Glied j	rad/s ²
δ	Ungleichförmigkeitsgrad	-
δ_a	Beschleunigungsgrad	-
δ_{ij}	Kreuzungswinkel (Achswinkel) zwischen den Dreh- oder Schubachsen der Glieder i und j	° oder rad

Kurzzeichen	Beschreibung	Einheit
ΔH	Hubverlust	mm
Δl_j	Federweg der Feder j	mm
ε	Ebenenwinkel	° oder rad
η	Abstimmungsverhältnis	-
κ	Bahnkrümmung	1/mm
ρ	Krümmungsradius	mm
μ	Übertragungswinkel	° oder rad
ν	Querkontraktionszahl	-
τ	Tangentenwinkel	° oder rad
φ	Antriebswinkel	° oder rad
φ_{ij}	Differenzwinkel am Antrieb zwischen den Lagen i und j oder Winkel des Glieds i bezügl. Glied j	° oder rad
φ_0	Totlagenkurbelwinkel	° oder rad
ψ	Abtriebswinkel	° oder rad
ψ_G	Grundwinkel	° oder rad
ψ_H	Gesamtabtriebswinkel	° oder rad
ψ_{ij}	Differenzwinkel am Abtrieb zwischen den Lagen i und j	° oder rad
ψ_0	Schwingwinkel zwischen den Totlagen	° oder rad
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
ω_1	erste Eigenkreisfrequenz	rad/s
ω_{ij}	Winkelgeschwindigkeit des Glieds i relativ zu Glied j	rad/s
Ω	konstante Antriebswinkelgeschwindigkeit	rad/s
$\tilde{\Omega}$	Antriebswinkelgeschwindigkeit für abgestimmten Zustand	rad/s

Indizes

Index	Beschreibung
a	absolut oder axial
a	Größe in der äußeren Totlage
c	Coriolis-
e	Größe bei Eigenbewegung
f	Führungs-
H	Hilfs-
i	Größe in der inneren Totlage

Index	Beschreibung
kom	Größe für Kompensationsgetriebe
n	normal
m	mittlere(r)
r	radial
rel	Relativ-
t	tangential
w	wirksam

1

Lösen von Bewegungs- aufgaben

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.

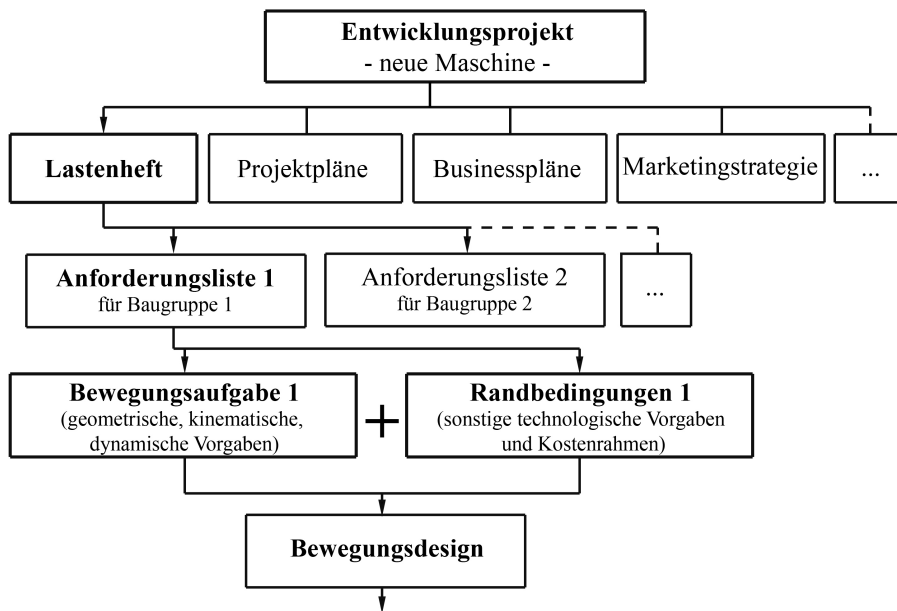


Bild 1.1 Umfeld von Bewegungsaufgaben

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.

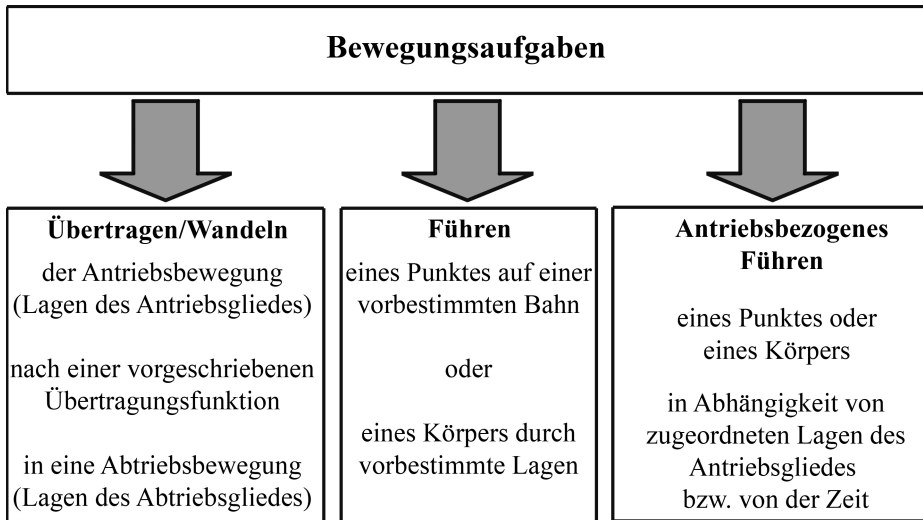


Bild 1.2 Bewegungsaufgaben

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.

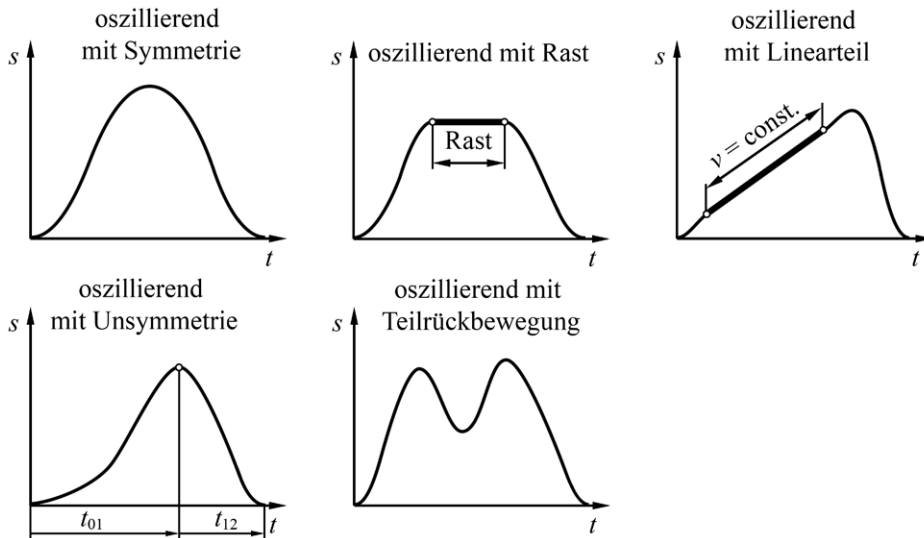


Bild 1.3 Charakteristische periodische Bewegungsverläufe

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

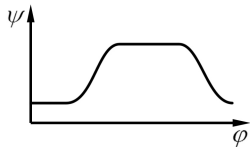
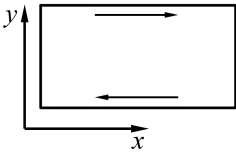
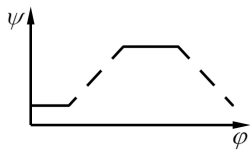
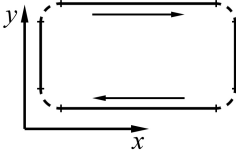
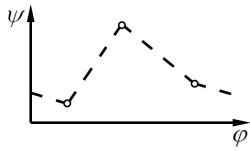
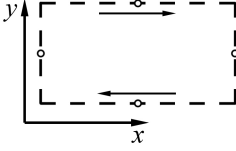
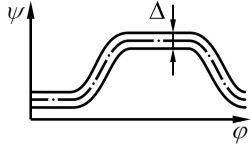
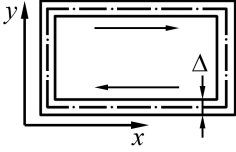
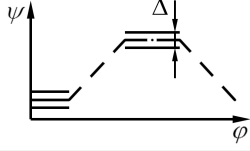
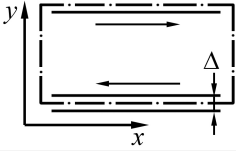
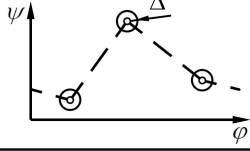
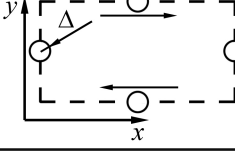
Die Anzahl und die Art der Bewegungsvorgaben bestimmen entscheidend die Menge prinzipieller Lösungsmöglichkeiten und auch die Komplexität der Lösungsfindung. Grundsätzlich gilt, dass mit zunehmender Anzahl von Vorgaben das Finden eines geeigneten (einfachen) Lösungskonzepts schwieriger wird. Für bestimmte 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.

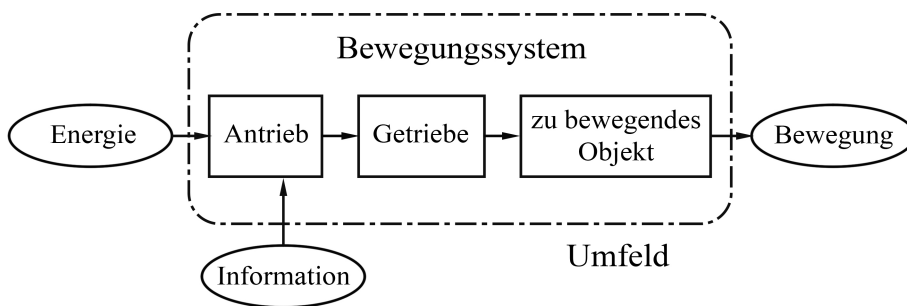


Bild 1.4 Bewegungssystem im Sinne der Systemtheorie

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 Cabrioverdeckts 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.

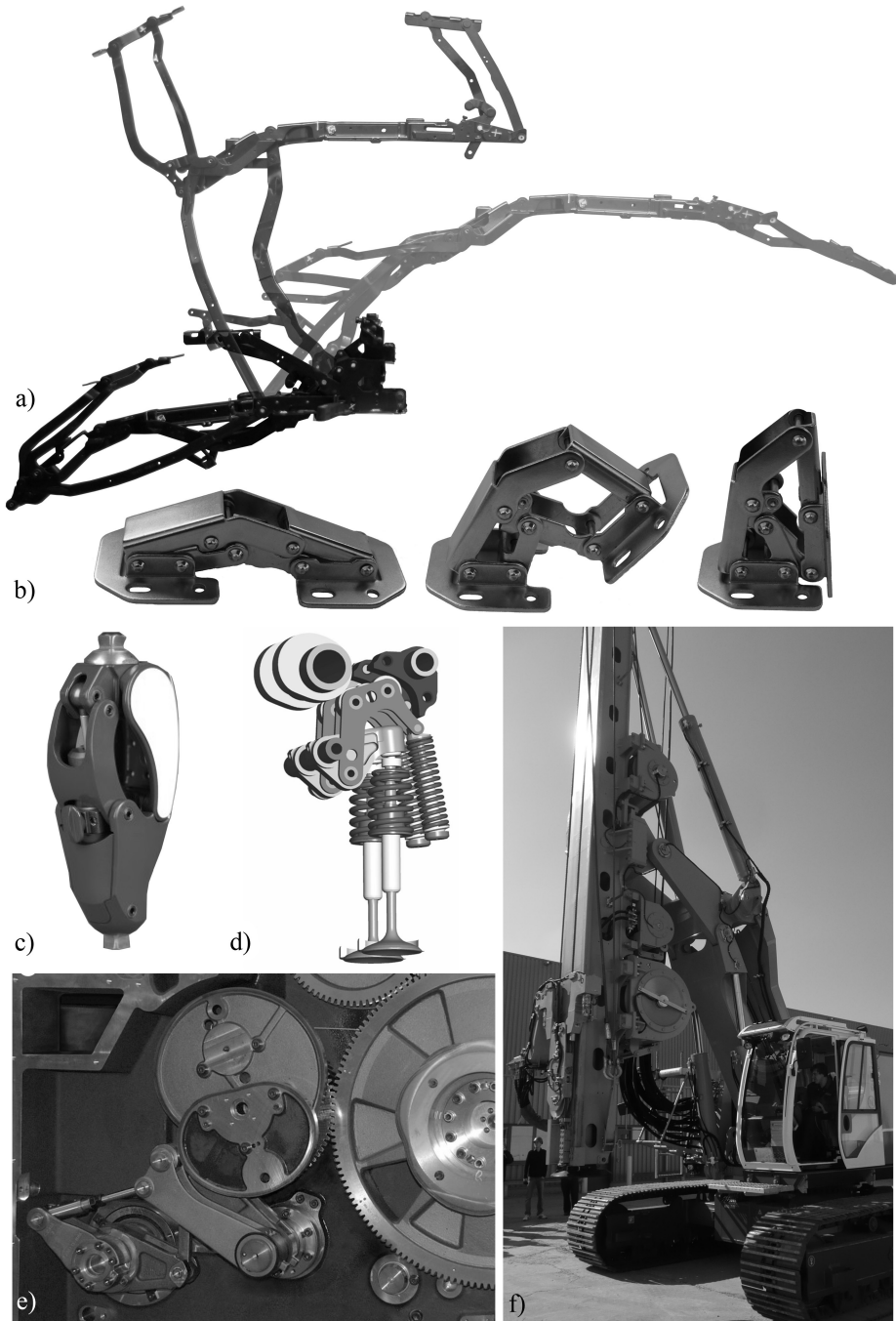


Bild 1.5 Beispiele zu Bewegungssystemen. a) Cabrioüberdeck-Unterkonstruktion, b) Schrankcharnier, c) Knieprothese [11], d) variabler Ventiltrieb [12], e) Vorgreiferantrieb einer Bogenoffsetdruckmaschine [Abbildung: Heidelberger Druckmaschinen AG], f) Turmkinematik eines Großbohrgeräts

1.3.3 Entwicklungsprozess eines Bewegungssystems

Im Folgenden wird in knapper Form die grundsätzliche Vorgehensweise beim Entwickeln eines Bewegungssystems anhand des Ablaufplans (Bild 1.6) dargestellt.

Das Auslegen eines Bewegungssystems ist ein Prozess, der nicht auf direktem Weg von der Formulierung der Aufgabenstellung bis zur Erstellung der Werkstattzeichnungen der Bauelemente einer Maschine oder eines Gerätes führt. Es erfordert vielmehr ein mehrfaches Durchlaufen (Iterieren) einzelner Konstruktionsphasen, um eine möglichst gute Lösung zu erhalten. Dabei lässt sich der Entwicklungsprozess schematisch wie folgt beschreiben:

Aus einer zu realisierenden **Bewegungsaufgabe** lassen sich zur genaueren Spezifizierung quantifizierbare Anforderungen herausarbeiten. Das **Bewegungsdesign** (s. Abschnitt 2) liefert ausgehend von den Vorgaben zu einzelnen geforderten oder gewünschten Bewegungszuständen die vollständige Beschreibung des kompletten Arbeitstaktes in Form eines Bewegungsdiagramms oder einer Bahnkurve (Bewegungsbahn). Beim Bewegungsdesign spielt es zunächst keine Rolle, ob für die Lösung z.B. ein mechanisches oder ein elektrisches oder ein hydraulisches Wirkprinzip verwendet wird. Dies wird bewusst so gehandhabt, denn bei einer gleichzeitigen Vorgabe des zu nutzenden Lösungskonzepts und des Antriebsprinzips wäre die mögliche Lösungsvielfalt bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses in unnötiger Weise eingeschränkt.

Das **Lösungskonzept** (s. Abschnitt 1.3.4) legt fest, welche grundsätzliche Antriebs- und Getriebecharakteristik zur Realisierung der Bewegungsaufgabe verwendet wird. Hierbei wird jeweils unterschieden, ob es sich um eine gleichmäßige oder ungleichmäßige Antriebsfunktion bzw. Getriebeübersetzung handelt. Das **Antriebsprinzip** (s. Abschnitt 1.3.5) gibt an, wie aus der zugeführten Antriebsenergie die für die Antriebsbewegung notwendige Kraftgröße erzeugt wird.

Da mit dem Bewegungsdesign ausgehend von der diskreten Beschreibung der Bewegungsaufgabe ein kontinuierlicher und vollständiger Verlauf der gewünschten Bewegung generiert wird, lassen sich kennzeichnende Kriterien wie max. Geschwindigkeiten oder Beschleunigungen ableiten, die bei der Entscheidung für ein bestimmtes Lösungskonzept und ein geeignetes Antriebsprinzip herangezogen werden können. Weitere Kriterien für die Auswahl liefern die sonstigen technologischen Vorgaben, die zusammen mit den Eigenschaften einzelner Antriebsprinzipie (s. Tabelle 1.3) eine detailliertere Entscheidung ermöglichen.

Die Auswahl des Lösungskonzepts und des Antriebsprinzips, das den Grundaufbau des späteren Bewegungssystems bestimmt, muss in einer frühen Phase des Entwicklungsprozesses erfolgen, wohl wissend, dass jenes maßgeblich die späteren Eigenschaften und Leistungsgrenzen des Bewegungssystems bestimmt. Deshalb sind bei der Auswahl des Lösungskonzepts häufig Entscheidungen zu treffen, bei denen aufgrund der großen Lösungsvielfalt eher die „Qual der Wahl“ besteht und sich der Entwickler häufig von seinem „Bauchgefühl“ und seinen Erfahrungen leiten lassen muss. Denn oftmals sind zu Entwicklungsbeginn Eigenschaften wie konkrete Leistungsgrenzen der Antriebe, Bau-raumgrenzen, zulässige Toleranzen der Bewegungsgrößen und Schwingungsamplituden nicht hinreichend genau definiert.

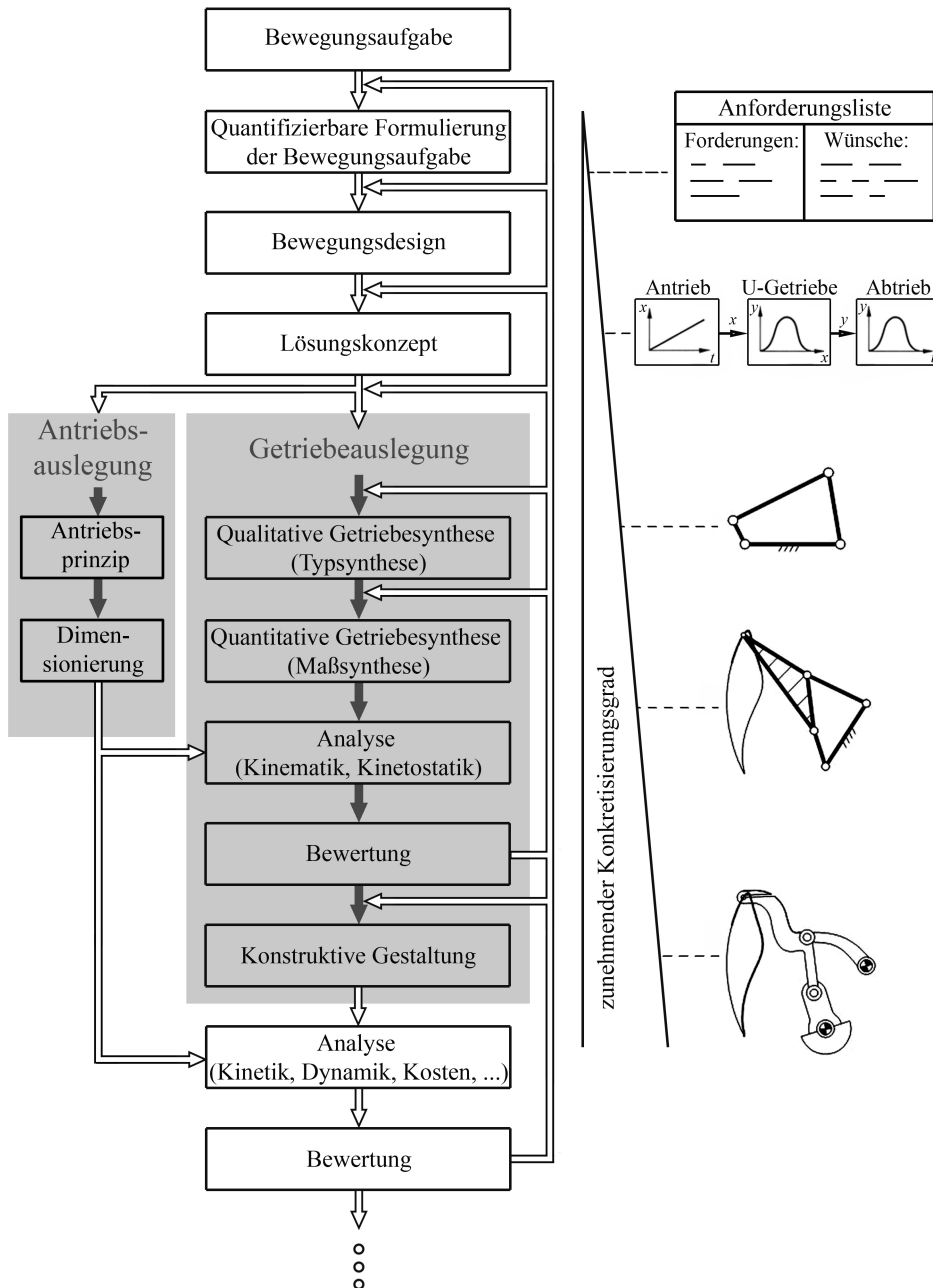


Bild 1.6 Entwicklungsprozess eines Bewegungssystems nach [13]

Das Festlegen auf ein Lösungskonzept bedingt dann das weitere Vorgehen beim Auslegen des Bewegungssystems. In jedem Fall ist eine Antriebsauslegung vorzunehmen, bei der im ersten Schritt ein passendes Antriebsprinzip festzulegen ist.

Muss eine Antriebsbewegung modifiziert werden, ist eine Getriebeauslegung durchzuführen, die mit der **qualitativen Getriebesynthese (Typsynthese)** startet. Das Ergebnis dieses Arbeitsschritts sind infrage kommende Getriebetypen. Die Anzahl der Lösungen hängt sowohl von der vorliegenden Bewegungsaufgabe und denkbaren Einschränkungen im Lastenheft als auch von der Erfahrung des Bearbeiters, der Verfügbarkeit von Lösungssammlungen und Konstruktionskatalogen (z.B. VDI-Richtlinien [14] bis [21]) oder von internetbasierten Datenbanken (z.B. Patentdatenbanken oder die Digitale Mechanismen- und Getriebebibliothek [22]) ab. Die Ergebnisse des Bewegungsdesigns und der Typsynthese fließen in den darauf folgenden Arbeitsschritt der **quantitativen Getriebesynthese (Maßsynthese)** ein. Hier führt das Anwenden von Berechnungsvorschriften, bestimmter grafischer und analytischer Verfahren oder Optimierungsrechnungen zu den konkreten kinematischen Abmessungen des gesuchten Bewegungssystems.

Kinematische Abmessungen sind die geometrischen Größen (Abstände und Winkel) an Getriebegliedern, die das Bewegungsverhalten des Getriebes bestimmen.

Nach dem Ermitteln der kinematischen Abmessungen wird das Getriebe analysiert und entsprechend der Randbedingungen der Aufgabenstellung bewertet. Erste überschlägige Kräftebetrachtungen (z.B. mithilfe des Leistungssatzes) lassen bereits auf Bauteilabmessungen schließen oder helfen bei der Bewertung von Lösungsvarianten. Erst nach erfolgreicher Auslegung der Kinematik kann i. d. R. mit der konstruktiven Gestaltung begonnen werden, der sich eine weitere, umfassendere Analyse und Bewertung des Getriebes anschließen.

Unbefriedigende Zwischenergebnisse einzelner Entwicklungsschritte machen es u. U. notwendig, in vorhergehende Schritte zurückzuspringen und getroffene Entscheidungen zu revidieren. Der Grund für diese Iterationen ist meist, dass in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses Entscheidungen getroffen werden, deren Auswirkungen auf die Güte einer Lösung aufgrund komplexer Zusammenhänge erst später erkannt werden können. Dabei kann sich herausstellen, dass die Anforderungen mit der vorgesehenen Lösung nicht erfüllbar sind. Entweder werden daraufhin bestimmte Anforderungen modifiziert, oder es muss die Realisierbarkeit der Bewegungsaufgabe durch andere Lösungskonzepte geprüft werden.

1.3.4 Lösungskonzepte für Bewegungssysteme

Um eine zeitabhängige, ungleichmäßige, periodische Bewegung eines Arbeitsorgans (Werkzeug, Werkstück, Verarbeitungsgut, ...) zu erzeugen, werden unterschiedliche konzeptionelle Ansätze (Lösungskonzepte) aufgezeigt, die beim Aufbau von Bewegungssystemen verfolgt werden können.

Ein **Lösungskonzept** legt im Allgemeinen die Charakteristiken von Antrieb und Getriebe fest. Die Charakteristik des Antriebs ist entweder gleichmäßig oder ungleichmäßig (G- bzw. U-Antrieb). Die Charakteristik des Getriebes wird durch die Getriebeübersetzung (Übertragungsfunktion) bestimmt, die gleichmäßig oder ungleichmäßig sein kann (G- bzw. U-Getriebe).

Unter der **Antriebsfunktion** wird der Verlauf der Antriebsgröße (z. B. der Antriebswinkel der Antriebswelle) über der Zeit verstanden. Die **Übertragungsfunktion** eines Getriebes beschreibt die Abhängigkeit der Abtriebsgröße eines Getriebes von der Antriebsgröße. (s. Abschnitt 2.1).

Lösungskonzept 1: Direktantrieb

Der bezüglich des mechanischen Aufbaus einfachste konzeptionelle Ansatz ist das Lösen der Bewegungsaufgabe mit einem Direktantrieb. Dies ist dann möglich, wenn eine direkte Kopplung von Antrieb und Abtrieb (Arbeitsorgan) realisierbar ist und die Bewegungs- und Kraftgrößen des Antriebs geeignet sind, die geforderte Bewegung am Arbeitsorgan zu erzeugen. Anwendung finden u. a. Servoantriebe, Hydraulikzylinder, Voice-Coil-Aktoren oder Piezoelemente. Die Antriebsfunktion $x(t)$ wird direkt auf das Arbeitsorgan übertragen, welches damit die identische Abtriebsfunktion $y(t)$ ausführt (Bild 1.7)

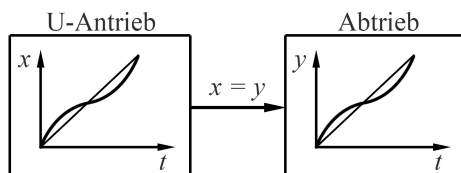


Bild 1.7 Lösungskonzept mit U-Antrieb (Direktantrieb)

Die Auswahl eines Direktantriebs richtet sich hauptsächlich nach den geforderten Bewegungsparametern am Abtrieb. Hierbei sind insbesondere die Größe des gewünschten Hubs, die Taktzeit für eine Bewegungsperiode und die damit erforderliche maximale Verfahrgeschwindigkeit und -beschleunigung zu berücksichtigen. Mit der zu bewegenden trägen Masse am Abtrieb und am Aktor selbst sowie den zu überwindenden Prozesskräften lässt sich dann die erforderliche Mindest-Antriebskraft bestimmen. Sie ist maßgeblich für den notwendigen Bauraum des Direktantriebs verantwortlich. So wird bei pneumatischen und hydraulischen Kolbenantrieben über den jeweils zur Verfügung stehenden Druck die notwendige Kolbenfläche ermittelt, die zusammen mit dem zu verwirklichenden Hub einen Mindestbauraum vorgibt. Bei elektrischen Antrieben ist für bestimmte Antriebs- oder Haltekräfte durch die begrenzten magnetischen Feldstärken ein bestimmtes Mindest-Bauvolumen notwendig.

Lösungskonzept 2: ungleichmäßiger Antrieb und gleichmäßig übersetzendes Getriebe

Ist ein direktes Anbinden des Antriebs an das Arbeitsorgan nicht möglich, weil z. B.

- die Achslagen von Antrieb zu Abtrieb gepasst werden müssen,
- größere Entfernungen zu überbrücken sind oder
- eine Bewegungs- bzw. Kraftwandlung zur Anpassung des Antriebs an die Bewegungsaufgabe des Arbeitsorgans notwendig ist,

dann bietet sich ein dazwischen geschaltetes gleichmäßig übersetzendes Getriebe, z. B. ein Zahnradgetriebe oder ein Zugmittelgetriebe, an (Bild 1.8).