

Torsten Erbe

**Beitrag zur systematischen Aktor- und
Aktorprinzipauswahl im Entwicklungsprozess**

Berichte aus dem
INSTITUT FÜR MASCHINEN- UND
GERÄTEKONSTRUKTION (IMGK)

Herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (Maschinenelemente),

Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska (Feinwerktechnik) und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (Konstruktionstechnik)

aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK) an
der TU Ilmenau.

Band 23

Diese Reihe setzt die „Berichte aus dem Institut für
Maschinenelemente und Konstruktion“ fort.

Beitrag zur systematischen Aktor- und Akteurprinzipauswahl im Entwicklungsprozess

Torsten Erbe



Universitätsverlag Ilmenau
2013

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 15. März 2012

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. René Theska
(Technische Universität Ilmenau)
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Weber
(Technische Universität Ilmenau)
3. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold
(Universität der Bundeswehr München)

Tag der Verteidigung: 11. Februar 2013

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISSN 2191-8082 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-060-0 (Druckausgabe)

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013000129](http://nbn:de:gbv:ilm1-2013000129)

Geleitwort der Herausgeber

Die Konstruktion von Maschinen und Geräten sowie die zugehörigen Methoden und Werkzeuge sind seit den frühen 1950er Jahren ein profilbildender Schwerpunkt an der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT ILMENAU und ihren Vorgängerinstitutionen. Es war daher ein nahe liegender Schritt, dass die drei konstruktiv orientierten Fachgebiete der FAKULTÄT FÜR MASCHINENBAU – MASCHINENELEMENTE, FEINWERKTECHNIK, KONSTRUKTIONSTECHNIK – im Mai 2008 das INSTITUT FÜR MASCHINEN- UND GERÄTEKONSTRUKTION (IMGK) neu gegründet haben. Das IMGK steht in der Tradition einer Kette ähnlicher Vorgängerinstitute, deren wechselnde Zusammensetzung hauptsächlich durch sich über der Zeit ändernde Universitätsstrukturen bedingt war.

Zweck des Institutes ist es, die Kompetenzen und Ressourcen der beteiligten Fachgebiete zu bündeln, um Forschung und Lehre zu verbessern und erzielte wissenschaftliche Ergebnisse gemeinsam in die Fachöffentlichkeit zu tragen. Ein wesentliches Instrument hierzu ist die Schriftenreihe des INSTITUTS FÜR MASCHINEN- UND GERÄTEKONSTRUKTION. Sie führt eine erfolgreiche Schriftenreihe des im Jahr 1991 gegründeten unmittelbaren Vorgängerinstitutes IMK (INSTITUT FÜR MASCHINENELEMENTE UND KONSTRUKTION) fort.

In der Schriftenreihe erscheinen in erster Linie die am Institut entstandenen Dissertationen, daneben werden aber auch andere Forschungsberichte, die in den thematischen Rahmen passen und von allgemeinem Interesse sind, in die Schriftenreihe aufgenommen.

Der vorliegende Band 23 ist als Dissertation am Fachgebiet FEINWERKTECHNIK entstanden. Die Herausgeber wünschen sich reges Interesse an der Schriftenreihe und würden sich freuen, wenn sie zum fruchtbaren Dialog in Wissenschaft und Praxis beitragen würde.

Ilmenau, im Februar 2013

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (MASCHINENELEMENTE)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. René Theska (FEINWERKTECHNIK)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (KONSTRUKTIONSTECHNIK)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Fachgebieten FEINWERKTECHNIK und KONSTRUKTIONSTECHNIK des INSTITUTES FÜR MASCHINEN- UND GERÄTEKONSTRUKTION der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT ILMENAU.

Für die Betreuung und wohlwollende Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. René Theska, Leiter des Fachgebietes FEINWERKTECHNIK und Doktorvater besonderer Dank.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Weber, Leiter des Fachgebietes KONSTRUKTIONSTECHNIK möchte ich für die vielfältigen, nachhaltigen Diskussionen, Hinweise und die konstruktive Kritik zu den verschiedenen Aspekten meiner Arbeit danken.

Mein spezieller Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold für ihr Interesse und die bereitwillige Übernahme des Gutachtens, insbesondere jedoch auch für die inhaltlichen Anregungen zur vorliegenden Arbeit.

Wesentliche Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des VERDIAN Projektes (2006-2009) und während meiner Tätigkeit am SONDERFORSCHUNGSBEREICH 622 (2009-2012) erarbeitet. Die intensive Unterstützung der Partner und Kollegen in diesen Projekten machte diese Arbeit erst möglich. Danken möchte ich besonders Herrn Dr.-Ing. Tom Ströhla für die substantiellen Anregungen, Hinweise und Diskussionen zur mathematischen Beschreibung der im Rahmen der Arbeit betrachteten Aktoren.

Den Mitarbeitern der Fachgebiete FEINWERKTECHNIK und KONSTRUKTIONSTECHNIK danke ich für die vielfältige Unterstützung während der

Erstellung dieser Arbeit. Dipl.-Ing. Marko Heyne, Dipl.-Ing. Stephan Hunsung, Barbara Tillack, Margrit Elßmann, Nicole Tänzler seien an dieser Stelle stellvertretend genannt.

Hervorheben möchte ich zudem die sehr gute Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Sebastian Linß und Dipl.-Ing. Stefan Griebel des FACHGEBIETES MECHANISMENTECHNIK sowie MSc Maik Holle, die durch ihr Engagement, kritische Fragen, sowie Reflexion und Hinweise zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt weiterhin den zahlreichen Studenten die durch Ihre Unterstützung einen Beitrag zu meiner Arbeit geleistet haben. Von diesen möchte ich insbesondere die Herren Fabian Beutel, Frank Bunge sowie Sherief Ahmed Hassan Emam und Guofeng Yu an dieser Stelle hervorheben.

Wesentlichen Anteil am Gelingen der Arbeit hatte meine Frau Sabine, der ich an dieser Stelle herzlich für das mir entgegengebrachte Verständnis, die Geduld und die langjährige Unterstützung danken möchte.

Torsten Erbe

Kurzzusammenfassung

Das Erzeugen von Bewegungen ist eine wesentliche Aufgabe technischer Produkte. Insbesondere der Trend zur Automatisierung führt dabei zu einer Vielzahl anwendungsspezifisch entwickelter Bewegungssysteme und Aktoren.

Wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung vieler technischer Produkte ist daher die Auswahl geeigneter Aktoren anhand der jeweiligen Anforderungen. Je nach Anwendung können diese aus einer Vielzahl verschiedener und schwer vergleichbarer Kriterien bestehen. Für den Fall, dass kein geeigneter Aktor gefunden werden kann, stellt sich insbesondere in Grenzbereichen der Technik wie z. B. der Präzisionstechnik die Frage nach einer Neuentwicklung und der Wahl eines geeigneten Aktorprinzips. Insbesondere für die zunehmend verwendeten Direktantriebe ist die Aktorprinzipauswahl von hervorgehobener Bedeutung.

Aktuelle Hilfsmittel für die Auswahl von Aktoren und Aktorprinzipen beschränken sich im Wesentlichen auf das individuelle Wissen des jeweiligen Entwicklers und Produkt- bzw. Konstruktionskataloge. Insbesondere Produktkataloge sind auf ausgewählte Aktorprinzipie beschränkt und untereinander meist nur schwer vergleichbar.

Für die Bewertung von Aktorprinzipen bei Neuentwicklungen ist wiederum oft vertieftes Fachwissen zu verschiedenen Aktorprinzipen erforderlich, welches dem Systementwickler nicht gegeben ist. Ein Vergleich verschiedener Aktorprinzipie ist dem Entwickler somit nicht möglich und viele Iterationsschritte und die Betrachtung unterschiedlichster, potenziell nicht zielführender Lösungsalternativen das Ergebnis.

Die vorliegende Arbeit stellt zwei Ansätze zum Vergleich von Aktorprinzipen auf Basis bekannter Aktoren vor. Dem Entwickler bietet ein solcher Vergleich die Möglichkeit, schon früh im Entwicklungsprozess im Hinblick auf die gegebenen Anforderungen geeignete Aktorprinzipie zu wählen. Abhängig von dieser Abschätzung ist es dem Entwickler wiederum möglich, grundlegende Entscheidungen zum Aufbau des Bewegungssystems als Ganzes zu treffen.

Die Schritte der Aktorauswahl werden hierzu in den Entwicklungsprozess eingeordnet. Dem Entwickler soll die Möglichkeit gegeben werden, geeignete Aktorprinzipie anhand von Möglichkeitsbereichen zu identifizieren bzw. – in einem zweiten Schritt, wenn keines möglich erscheint – naheliegende Aktorprinzipie zu betrachten und die Zielkonflikte zwischen den Anforderungen in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses zu erkennen.

Die hierfür vorgestellten Ansätze und Modelle sind am Beispiel der Aktoren ausgeführt, die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsgebiete und Bauelemente wird diskutiert.

Abstract

The generation of motions is a crucial task of technical products. In particular, the trend toward automation is leading to a variety of customized application-motion systems and actuators.

A key aspect in the development of many technical products therefore is the selection of appropriate actuators based on the respective requirements. Depending on the application, these can consist of a large variety of hardly comparable criteria. In the case that no suitable actuator can be found the question of a new development of an actuator and therefore the choice of a suitable actuator principle arises. This becomes even more exigent if the design task is dealing with the cutting edge of present technology like precision engineering. Notably, with respect to the more prevalent use of gearless-drive systems the actuator principle selection is of particular importance.

Current tools for the selection of actuators and actuator principles are essentially limited to the individual knowledge of the designer and product- and design catalogues. Of those the product catalogues are limited to several actuator principles and usually very difficult to compare mutually.

In turn, the evaluation of actuator principles during the design of new products often requires consolidated knowledge of various actuator principles that is not given to the system designer. A comparison of different actuator principles is therefore not possible. Many iterations and the consideration of various potential alternative solutions are the result.

This thesis presents two different approaches for comparison of actuator principles on the basis of known actuators. Such a comparison provides the

designer the opportunity to choose an appropriate actuator principle during the early phases of the development process with regard to the requirements given. Depending on this assessment, the designer is able to decide on the basic structure of the drive system as a whole.

The steps of the actuator principle selection are therefore assigned to the phases of the design process. The system designer is given the opportunity to identify appropriate actuator principles on the basis of suitability-areas and – in a second step if none seems suitable – to recognize the conflicts between the requirements during early phases of the design process.

The presented approaches and models for this purpose are pointed out using the example of actuators. The transferability to other applications and components is discussed.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	25
1.1	Zielstellung dieser Arbeit	28
1.2	Aufbau der Arbeit	30
2	Begriffe und deren Abgrenzung	33
2.1	Aktor und Akteurprinzip	35
2.2	Besondere Aktoren und Akteurprinzipie	36
3	Einordnung in den Entwicklungsprozess	41
3.1	Unterscheidung zwischen Akteur- und Akteurprinzipauswahl .	41
3.2	Einordnung in die Vorgehensmodelle für die Entwicklung . .	43
3.3	Vorgehen bei der Akteur- und Akteurprinzipauswahl	44
3.4	Einordnung anhand der Entwicklungsaufgabe	49
4	Kriterien für die Akteur- und Akteurprinzipauswahl	51
4.1	Parameter für die Akteur- und Akteurprinzipauswahl	51
4.2	Zusammengefasste Parameter – Kennzahlen	56
5	Bestehende Hilfsmittel der Akteur- und Akteurprinzipauswahl	63
5.1	Einteilung von Konstruktionskatalogen	65
5.2	Kataloge zur Aktorauswahl	67
5.3	Für die Akteurprinzipauswahl nutzbare Konstruktionskataloge	70
5.4	Grenzen von Konstruktionskatalogen	71
5.5	Alternative Ansätze	73
5.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	87

6	Konzept zur Aktorsuche und Auswahlunterstützung	91
6.1	Bekannte Suchansätze und -algorithmen	95
6.2	Der <i>Skyline</i> -Algorithmus	99
6.2.1	Varianten des <i>Skyline</i> -Algorithmus	106
6.2.2	Anpassung des <i>Skyline</i> -Algorithmus	116
6.2.3	Sortierung der Suchergebnisse	129
6.3	Implementierung des <i>Skyline</i> -Algorithmus – Prototyp	130
6.3.1	Datenbasis des Prototyps – die Aktordatenbank	132
6.3.2	<i>Skyline</i> -Algorithmen – softwaretechnische Umsetzung	134
6.3.3	Graphische Benutzeroberfläche – GUI	142
6.4	Fazit und Schlussfolgerung aus der prototypischen Umsetzung	151
7	Konzept zur Unterstützung bei der Akteurprinzipauswahl	155
7.1	Unterscheidung von Parametern anhand der Beeinflussbarkeit	158
7.1.1	Merkmale und Eigenschaften von Akteurprinzipen	163
7.1.2	Ziel der Unterstützung bei der Akteurprinzipauswahl	164
7.2	Darstellung von Akteurprinzipen	167
7.2.1	Beispiel für einen Elektromagneten	170
7.2.2	Beispiel für einen Piezoaktor	174
7.3	Modell der Merkmale–Eigenschaften–Zusammenhänge	182
7.3.1	Vorgehen bei der Bestimmung von Parameteränderung	188
7.3.2	Nutzung der Akteurprinzipmodelle am Beispiel	188
7.4	Fazit und Bewertung der gewählten Akteurprinzipdarstellung	192
8	Zusammenfassung und Ausblick	197
	Literaturverzeichnis	201
	Anhang	
A	Effekteliste	221
B	Auswahl möglicher Akteurbauformen	233

C Einflussgraphen

Verzeichnis der Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Beschreibung	Einheit
ΔL	allgemeine Längenänderung (des Piezos)	mm
ΔL_{frei}	Längenänderung des Piezos ohne externe Last	mm
$\Delta L_{t=0,1}$	Längenänderung des Piezos nach 0,1 Sekunden nach Änderung der angelegten elektrischen Spannung	
$\Delta T = \Delta \vartheta_U$	Temperaturänderung	K
$\Delta \vartheta_{\ddot{U},zul}$	zulässige Übertemperatur	K
Δs	Wegdifferenz, allgemein	m
Θ_{max}	maximale Durchflutung	A
Θ_{min}	minimale Durchflutung	A
Ψ	verketteter Fluss	Wb
α	Wärmeausdehnungskoeffizient	$10^{-6} \frac{1}{K}$
γ	Kriechfaktor des Piezos (meist 0,01 bis 0,02)	–
δ	Luftspalt	mm
ε_{Piezo}	Piezodehnung; relative Längenänderung	–
ε_{ij}	Dielektrizitätskonstante	$\frac{As}{Vm}$
ε	Emissionsgrad	–
ε	Toleranz eines Parameters	
η_i	indizierter Wirkungsgrad	–
$\eta_{\ddot{U}G}$	Wirkungsgrad des Übertragungsgetriebes	–
η	Wirkungsgrad, allgemein	–
ϑ_{Motor}	Motortemperatur, allgemein	°C
ϑ_U	Umgebungstemperatur	K
ϑ	Temperatur, allgemein	°C
κ_M	magnetischer Wirkungsgrad	%
κ	elektrische Leitfähigkeit	$\frac{1}{\Omega m}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{mK}$
μ_0	magnetische Feldkonstante	$\frac{Vs}{Am}$
μ_{Fe}	magnetische Feldkonstante des Eisens	$\frac{Vs}{Am}$
ρ_{Cu}	spezifischer Widerstand des Kupfers	Ωm
ρ_{warm}	spezifischer Widerstand (der Spule) im warmen Zustand	Ωm
ρ	Dichte	$\frac{kg}{cm^3}$
$\dot{\varphi}$	Winkelgeschwindigkeit	$\frac{1}{s}$
φ	Drehwinkel, allgemein	rad oder $^\circ$
ω	Winkelgeschwindigkeit, allgemein	$\frac{1}{s}$
A	Fläche (Hüllfläche des Aktors)	mm^2
a	Beschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
A_C	Elektrodenfläche eines Kondensators (bei Piezo: einer Lage)	mm^2
A_i	Abhängigkeiten zwischen Merkmalen gemäß CPM-Ansatz; $A_i = (A_1, \dots, A_x); x \in \mathbb{N}$	
A_P	Polfläche	mm^2
A_W	Wickelfensterfläche	mm^2
A_x	indizierte Abhängigkeit zwischen Merkmalen	–
B	magnetische Flussdichte	T
b	Breite, allgemein	m
B_s	Sättigungsinduktion	T
C	Kapazität	$\frac{As}{V}$
c	Federrate, allgemein	$\frac{kg}{s}$
c_{therm}	spezifische Wärmekapazität	$\frac{J}{kg \cdot K}$
\mathcal{D}	Menge der Dimensionen des <i>Skyline</i> -Ansatzes	
d_e	euklidischer Abstand zwischen dem Punkt einer Suchanfrage und dem nächstliegenden Datensatz	–
d_{eg}	mit \vec{G} gewichteter Abstand zwischen dem Punkt einer Suchanfrage und – dem nächstliegenden – Datensatz	–
d_{ij}	Piezomodul	$\frac{m}{V}$
d_s	Abstand zwischen Elektroden (am Piezoaktor)	mm

Symbol	Beschreibung	Einheit
E	elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
ED	relative Einschaltdauer	%
E_i	Eigenschaften gemäß CPM-Ansatz; $E_i = (E_1, \dots, E_m); m \in \mathbb{N}$	
E_k	indizierte Eigenschaft	—
F	Kraft, allgemein	N
f	Frequenz	$\frac{1}{s}$
F_{Aktor}	Kraft des Aktors, allgemein	N
F_{gegen}	der Bewegung des Aktors von außen entgegenwirkende Kräfte	N
$F_L(t)$	zeitlich veränderliche Last	N
F_{mag}	Magnetkraft - hier nur Reluktanzkraft	N
F_{max}	maximale Kraft (des Piezos)	N
$F_M(t)$	zeitlich veränderliche Motorkraft	N
\mathbf{g}	Gewichtsvektor	—
g_i	indizierte Elemente des Gewichtsvektors	—
GM_i	Gestaltmerkmale gemäß CPM-Ansatz	
H	magnetische Feldstärke	$\frac{A}{m}$
h	Höhe, allgemein	m
H_C	Koerzitivfeldstärke	$\frac{A}{m}$
H_D	Durchtrittsfeldstärke (etwa Koerzitivfeldstärke)	$\frac{A}{m}$
I_0	Nennstrom	A
I_{Aktor}	Information über den Zustand des Aktors	div.
$I_{Bewegung}$	Information über den Zustand des Übertragungsgetriebes	div.
$I_{Bewegung/Lage}$	Information über den Zustand des Führungsgetriebes	div.
$I_{IST-Zustand}$	Information über den Zustand des Bewegungssystems an das Stellglied	div.
$I_{Lage/Bewegung}$	Information über Lage und/oder Impuls des Endeffektors	div.
I_M	Motorstrom	A
I_{min}	minimale Stromaufnahme	A

Symbol	Beschreibung	Einheit
$I_{SOLL-Zustand}$	Information über den Soll-Zustand an das Stellglied	div.
J	Trägheitsmoment	Nm
k	vorgegebener Sortierparameter, $k \in \mathbb{N}$	
k_A	Federrate des Aktors	$\frac{N}{m}$
k_{Cu}	Kupferfüllfaktor	%
k_S	Federrate der Last	$\frac{N}{m}$
L	Drehimpuls, allgemein	Nms
l	Länge, allgemein	m
L_0	Ausgangslänge der Keramik des Piezos	mm
$L_{Ausgang}$	Ausgangslänge des Piezos unter Einwirkung einer äußeren Last	mm
L_{eff}	effektive Länge des Piezoaktors	mm
l_{Fe}	mittlere Eisenweglänge	mm
l_m	mittlere Windungslänge	mm
\mathfrak{M}	Teilmenge der in einer Skyline enthaltenen Datensätze	
m	Anzahl der Aktoren in einer Datenbank; $m \in \mathbb{N}$	
M	Drehmoment, allgemein	Nm
m	Masse	kg
$m_{effektiv}$	effektive träge Masse	kg
m_{ext}	externe Last/Masse	kg
M_i	Merkmale gemäß CPM-Ansatz; $M_i = (M_1, \dots, M_n); n \in \mathbb{N}$	
$M_L(t)$	zeitlich veränderliches Lastmoment	Nm
$M_M(t)$	zeitlich veränderliches Motormoment	Nm
N	Windungszahl	
n	Anzahl der Parameter der Aktoren in einer Datenbank; $n \in \mathbb{N}$	
N_{dom}	Anzahl der durch einen Datensatz der Skyline dominierten Datensätze	
\mathfrak{P}	Punktmenge/Menge von Datensätzen	
p	Impuls, allgemein	$\frac{kg \cdot m}{s}$

Symbol	Beschreibung	Einheit
P_{Aktor}	Nennleistung des Aktors	W
$P_{Antrieb}$	Nennleistung des Antriebssystems	W
\mathbf{p}_i	Datensatz in einer Datenbank	
p_i	einzelner Parameter einer Suchanfrage	div.
$p_{i,j}$	Parameter j des i -ten Datensatzes in einer Datenbank	
P_m	mittlere Leistung eines Aktors (für dynamischen Betrieb)	W
P_{max}	maximale Akteurleistung	W
P_{mech}	mechanische Leistung	W
P_{therm}	thermische Verlustleistung, allgemein	W
$P_{Verlust}$	Verlustleistung, allgemein	W
$P_{V,zul}$	zulässige Verlustleistung	W
P_x	indizierte nicht mechanische Leistung	W
R_G	Rang der Punkte einer Skyline	
R_i	Relation zwischen Merkmalen und Eigenschaften gemäß CPM -Ansatz; $R_i = (R_1, \dots, R_m); m \in \mathbb{N}$	
R_i^{-1}	Relation zwischen Eigenschaften und Merkmalen gemäß CPM -Ansatz; $R_i = (R_1, \dots, R_m); m \in \mathbb{N}$	
R_i	indizierte Relationen zwischen Merkmalen und Eigenschaften	–
R_{mag}	magnetischer Widerstand	$\frac{A}{Wb}$
R_{therm}	absoluter thermischer Widerstand, allgemein	$\frac{K}{W}$
s	Weg, allgemein	m
$\mathfrak{S}_{\mathcal{E}P}$	elastische Skyline mit einem Toleranzbereich um die Datensätze	
$\mathfrak{S}_{\mathcal{E}S}$	elastische Skyline mit einem Toleranzbereich um die Parameter	
\mathfrak{S}_k	k -Band Skyline	
$\mathfrak{S}(P)$	allgemeine Skyline	
\dot{s}	Änderung des Weges nach der Zeit – Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
\mathfrak{S}_{Rk}	ranked Skyline – mit k Ausgabedatensätze mit dem höchsten Rang	
\mathfrak{S}_{RW}	ranked Skyline – Ausgabedatensätze mit bestimmtem Rangwert	
\mathfrak{S}_{Tk}	Top k Skyline	
t	Zeit	s

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\tan \delta_e$	dielektrischer Verlustfaktor	–
$\pm U$	Spannungsänderung	V
UE_{elektr}	elektrische Umwelteinflüsse gemäß CPM-Ansatz	
UE_i	Umwelteinflüsse gemäß CPM-Ansatz; $UE_i = (UE_1, \dots, UE_m); m \in \mathbb{N}$	
UE_{mech}	mechanische Umwelteinflüsse gemäß CPM-Ansatz	
UE_{therm}	thermische Umwelteinflüsse gemäß CPM-Ansatz	
U_{max}	maximale Spannung	V
U_{min}	minimale Spannung	V
U_P	Spannung am Piezo (Spitze zu Spitze)	V
U_q	Spannung an der Spannungsquelle	V
U_{vorh}	vorliegende/anliegende Versorgungsspannung	V
V	Volumen (des Aktors)	mm^3
V	Volumen, allgemein	m^3
v	Geschwindigkeit, allgemein	$\frac{m}{s}$
$\dot{V}_{K\ddot{u}hlmedium}$	Volumenstrom eines Kühlmediums	$\frac{m^3}{s}$
w	Windungszahl	–
$W'_{Abtrieb}$	Arbeit des Wirkelementes/Abtriebs	J
W_{Aktor}	Arbeit des Aktors, allgemein	J
$W_{Ausgang}$	Ausgangsenergie, allgemein	J
$W_{Eingang}$	Eingangsenergie, allgemein	J
W_{Hub}	Hubarbeit	J
W_{kin}	kinetische Ausgangsarbeit des Aktors	J
W'_{kin}	kinetische Ausgangsarbeit des Übertragungsgetriebes	J
W''_{kin}	kinetische Ausgangsarbeit des Führungsgetriebes	J
W_{max}	maximale vom Motor verrichtete Arbeit	Nm
$W_{nichtkin}$	nicht kinetische (Aktoreingangs-)Arbeit, allgemein	J
$W'_{nichtkin}$	vom Stellglied übertragene nicht kinetische Arbeit, allgemein	J
CPM	Characteristics-Properties Modelling	

Symbol	Beschreibung	Einheit
DfX	<i>Design-for-X</i> ; Sammelbegriff für verschiedene Aspekte und Regeln der Gestaltungslehre	
DoX	Design-of-X; Aspekte und Regeln zur Definition, Beschreibung und Herausarbeitung von Anforderungen an die Umgebung eines technischen Produktes im Entwicklungsprozess; Erweiterung der DfX-Betrachtungen	
F-S-S	Funktion-Struktur-Speicher	
GUI	„Graphic User Interface“ – graphische Benutzeroberfläche einer Software	
KEP	Konstruktiver Entwicklungsprozess	
PDD	Property-Driven Development	
SQL	„Structured Query Language“ – Datenbanksprache	
TP	Technisches Prinzip	

1 Einführung

Die Synthese von Bewegungssystemen ist ein wesentlicher Schwerpunkt bei der Entwicklung technischer Produkte. Zum Erzeugen einer Bewegung ist ein Aktor nötig, der nicht kinetische Energie in kinetische Energie wandelt. Weiterhin sind oft zusätzliche Elemente zur Übertragung (z. B. Wellen, Kupplungen), Speicherung (z. B. Federn) und weiteren Umformung der Bewegungsenergie (z. B. durch Getriebe) Bestandteil von Bewegungssystemen.

Die Bewegungsaufgaben moderner technischer Produkte erfordern oft Verstellwege, Stellzeiten, Kräfte, Leistungen usw., die per Hand nicht möglich sind, und arbeiten in einem für den Menschen ungeeigneten Umfeld. Neben der sich aus Umwelt und Größenordnung der geforderten Bewegung ergebenden Notwendigkeit, führen die steigenden Kosten menschlicher Arbeitskraft zu einer zunehmenden Automatisierung. Dadurch steigt die Zahl aufgabenspezifisch ausgelegter Bewegungssysteme stetig an. Diese bestehen meist aus Aktoren, Getriebe-, Mess- und Steuerungs- bzw. Regelungssystemen.

Die Auswahl eines geeigneten Aktors ist als stets vorhandenes Element eines jeden Bewegungssystems für dessen Entwicklung von besonderer Bedeutung. Das Problem der Auswahl eines Aktors ist nicht neu und es existiert eine Vielzahl von Regelwerken, Vorschriften oder Richtlinien für die einzelnen Elemente der Bewegungssysteme (z. B. Aktoren, Getriebe, Regelungssysteme, Führungen, Lagerungen). All diese vielfältigen Hilfsmittel befassen sich nur mit der Dimensionierung/Auslegung dieser Elemente – z. B. der Aktoren eines bestimmten Aktorprinzips. Die Aktorauswahl erfolgt dabei anhand

des Wissens/der Erfahrung des Entwicklers und wird ggf. durch verfügbare Konstruktions- und Produktkataloge erweitert.

Die Erfahrung des Entwicklers wie auch die Kataloge sind zumeist auf ein Markt-, Produkt- oder technisches Umfeld beschränkt. Erschwerend wirkt weiter, dass den Katalogen und Wissensspeichern oft, je nach Element des Bewegungssystems und zugehörigem Wirkprinzip sowie Zulieferer usw., andere Ordnungskriterien zugrunde liegen. Zudem beinhalten die Erfahrungen des Entwicklers zusätzlich zu den technischen Eigenschaften oft kaum generalisierbare, für die Auswahl aber häufig wesentliche Eigenschaften (z. B. Zuverlässigkeit von Zulieferern, Kosten, Verfügbarkeit von Einzelkomponenten usw.) einzelner Aktoren und Aktorprinzipie aus vorangegangenen Entwicklungsaufgaben. Durch die Auswahl der betrachteten Kataloge und die Beschränkungen der Vergleichbarkeit der Angaben innerhalb dieser ergeben sich somit Einschränkungen des betrachteten Lösungsraumes und Schwierigkeiten bei der Auswahl von Aktoren. Damit ergibt sich die Lösung für eine Entwicklungsaufgabe meist aus dem Bekannten, nicht aus dem Möglichen.

Die beschriebenen Einschränkungen für die Vergleichbarkeit wirken sich insbesondere bei Entwicklungsaufgaben im Grenzbereich bekannter technischer Möglichkeiten (z. B. in der Präzisionstechnik oder aber im *low-cost* Bereich) aus. Von diesen bildeten verschiedene Entwicklungsaufgaben von Bewegungssystemen der Präzisionstechnik die Motivation und den Ausgangspunkt der Arbeit. Vor diesem Hintergrund sind Betrachtungen auf Aktorprinzipie kleiner Aktoren mit elektrischer Versorgungsenergie beschränkt. Der Begriff *klein* bezeichnet Aktoren mit einer Anschlussleistung $\leq 1\text{ kW}$ [HZ07, SK06, ZVE12].

Bei der Entwicklung präzisionstechnischer Bewegungssysteme steht das Erreichen von Positionierauflösung und -wiederholgenauigkeit im Mikrometer- oder Nanometerbereich im Vergleich zur Reduktion der Kosten im Vordergrund. Zudem wird in der Präzisionstechnik vielfach eine flexible Manipulier-

barkeit des Bewegungsablaufs sowie eine gegenüber dem Bewegungsbereich um zum Teil mehrere Größenordnungen kleinere Positionierauflösung gefordert. Hierfür ist es oft unvermeidlich, alle Elemente des Bewegungssystems zu betrachten und ggf. zweckbestimmt neu zu entwickeln. Die Wahl eines geeigneten Aktorprinzips besitzt somit in der Präzisionstechnik besondere Bedeutung.

Im besonderen Maße gilt dies für *Direktantriebe*, die zunehmend Verbreitung in der Präzisionstechnik finden. Diese erlauben durch den Einsatz einer geeigneten Steuerung oder Regelung in vielen Bereichen, nahezu beliebige Bewegungsabläufe ohne weitere Umformung der mechanischen Energie – bspw. durch Mechanismen oder Getriebe – *direkt* mit Hilfe des Aktors zu realisieren. Der Vorteil dieser meist auf elektrischen und elektromagnetischen Aktorprinzipien basierenden Bewegungssysteme liegt in der Verringerung der Zahl der an der Energiewandlung und -umsetzung beteiligten mechanischen Baugruppen und -teile. Störungen (z. B.: Reibung, Spiel) sowie die sich aus diesen ergebenden Folgen (z. B.: Verschleiß, Schwingungen, Totzeiten) der mechanischen Übertragung können vermieden und die Zuverlässigkeit erhöht werden. Diese Vorteile lassen *Direktantriebe* für präzisionstechnische Anwendungen besonders geeignet erscheinen.

Auch für andere (z. B. *low-cost*) Anwendungen interessant werden *Direktantriebe* dadurch, dass die stückbezogenen Kosten der mechanischen Übertragungselemente dabei durch i. d. R. geringere stückbezogene Kosten für die Steuerelektronik ersetzt werden können. Dafür werden höhere stückzahlunabhängige Kosten für die Entwicklung und die softwaretechnische Umsetzung der Regelalgorithmen der Antriebe in Kauf genommen.

Ist bei der Entwicklung eines Bewegungssystems kein den Anforderungen entsprechender Aktor bekannt und ergibt die Suche in Aktorkatalogen ebenfalls kein Ergebnis, stellt sich – für *Direktantriebe* meist unerlässlich – die Frage einer Sonderentwicklung eines Aktors. Die Wahl eines dem neu zu entwickelnden Aktor zugrundeliegenden Aktorprinzips wird dabei durch die verfügbaren

Konstruktions- und Produktkataloge nicht unterstützt. Sind zudem keine Bewegungssysteme mit ähnlichen oder vergleichbaren Aktoren bekannt, bleibt dem Entwickler nur die freie Suche (Abbildung 1.1).

Insbesondere in den genannten Grenzbereichen der Technik macht dies eine ausführliche Betrachtung und Detaillierung verschiedener Aktoren unterschiedlicher Aktorprinzipie notwendig. Einzelne Anforderungen an das Bewegungssystem oder den Aktor können dabei durch die Notwendigkeit einander entgegenlaufender Anpassungen zu Zielkonflikten führen und letztlich Änderungen der gesamten Bewegungssystemstruktur erfordern. Die sich daraus potenziell ergebende Zahl an Iterationszyklen sowie die Betrachtung nicht zweckmäßiger Aktorprinzipie und Bewegungssystemstrukturen kann durch einen Vergleich bekannter Aktorprinzipie in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses reduziert werden.

Die vorliegende Arbeit stellt hierfür zwei Ansätze zum Vergleich von Aktorprinzipien auf Basis bekannter Aktoren vor. Dem Entwickler bietet ein solcher Vergleich die Möglichkeit, schon früh im Entwicklungsprozess im Hinblick auf die gegebenen Anforderungen geeignete Aktorprinzipie zu wählen. Weiterhin wird eine Möglichkeit zum Abschätzen der zum Erreichen bestimmter Aktoreigenschaften notwendigen Anpassungen für den Fall aufgezeigt, dass für den gesuchten Eigenschaftsbereich kein bekannter Aktor vorhanden ist. Abhängig von dieser Abschätzung ist es dem Entwickler wiederum möglich, grundlegende Entscheidungen zum Aufbau des Bewegungssystems als Ganzes zu treffen.

1.1 Zielstellung dieser Arbeit

Während der Synthese eines Bewegungssystems ist es stets das Ziel, dessen Elemente „optimal“ auszuwählen bzw. auszulegen. Was „optimal“ bedeutet, wird definiert durch die verschiedenen anwendungsspezifischen und mitunter schwer vergleichbaren Anforderungen an die Bewegungssysteme. Diese

Abhandlung wird daher keine allgemeine Vorgabe für einen oder einzelne „optimale“ Aktoren oder Aktorprinzipie liefern. Fokus der Arbeit ist vielmehr, die Zielkonflikte, die sich aus den Anforderungen an das Bewegungssystem ergeben, zu identifizieren und anwendungsspezifisch die Bewertung zu unterstützen.

Diese Zielkonflikte können sich aus grundsätzlich unvereinbaren Anforderungen an das Bewegungssystem ergeben. Häufiger ergeben sich Zielkonflikte jedoch aus einander gegenseitig beeinflussenden, beschränkenden oder ausschließenden Eigenschaften der einzelnen Elemente des Bewegungssystems. Die Kombination der Elemente vergrößert dabei die Zahl der möglichen Lösungsvarianten bei der Entwicklung von Bewegungssystemen. Damit steigt auch der Aufwand für die Betrachtung von möglichen Zielkonflikten, die durch die Kombination der Elemente entstehen können. Diese Abhandlung ist daher auf die Betrachtung des Aktors und des diesem zugrundeliegenden Prinzips beschränkt. Zielstellung dieser Arbeit soll es somit sein, zu klären:

- welche Kriterien zur Bewertung von Aktorprinzipien herangezogen werden können,
- wie der Aktorauswahlprozess mittels eines rechentechnischen Werkzeuges unterstützt werden kann,
- wie Aktorprinzipie in den (frühen) Phasen des Entwicklungsprozesses verglichen werden können,
- wie mögliche Zielkonflikte bei der Wahl eines Aktorprinzips erkannt und die Möglichkeiten zur Anpassung von Aktorprinzipien abgeschätzt werden können.

Anhand einer Einteilung von Bewegungssystemen sollen Lösungs- bzw. Wissensspeicher sowie Alternativen für die Aktorprinzipauswahl analysiert und zwei neuartige Ansätze für die Unterstützung bei der Auswahl vorgestellt werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Kernaspekte der Arbeit sind die Vorstellung eines rechnergestützten Ansatzes zur Aktorauswahl und die Vorstellung eines Modells zur Zielkonfliktbeurteilung bei der Aktorprinzipauswahl. Der Aufbau der Abhandlung orientiert sich dabei am intuitiven Vorgehen für ein Auswahlproblem während des Entwicklungsprozesses – der Suche nach Verfügbarem und Bekanntem und anschließender Anpassung des Gefundenen (Abbildung 1.1). Es wird daher zunächst ein Ansatz zur rechnergestützten Auswahl von Aktoren vorgestellt und anschließend auf Aktorprinzipie eingegangen.

Ausgehend von einer kurzen Einordnung und Abgrenzung der Arbeit sowie einer Übersicht über bekannte Hilfsmittel zur Aktorauswahl wird im 6. *Kapitel* der *Skyline-Algorithmus* als Grundlage des Ansatzes zur Aktorauswahl vorgestellt. Anschließend wird ein Modell für Aktorprinzipie auf Basis des *Characteristics-Properties-Modelling* (CPM-Ansatz) vorgestellt, welcher die Abhängigkeiten zwischen Merkmalen und Eigenschaften eines Aktorprinzips verdeutlicht.

Die wesentlichen Begrifflichkeiten werden – sofern nicht schon für die Einordnung und Abgrenzung erforderlich – bei erstmaligem Gebrauch in den einzelnen Kapiteln definiert. Die beigefügten Anhänge sollen einzelne Aspekte untersetzen und ggf. bei der Umsetzung der in den *Kapiteln 6 & 7* vorgestellten Ansätze im Anschluss an diese Arbeit helfen.

Diese Arbeit entstand am *Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion* der *Technischen Universität Ilmenau* und zu großen Teilen im Rahmen des *Verdian-Projektes*¹. Viele Beispiele beziehen sich daher auf den Bereich der Präzisionstechnik.

Unabhängig davon sind aber, zweckmäßig modifiziert, sowohl der im Weiteren vorgestellte *Skyline-Algorithmus* als auch die Modelle zur Darstellung

¹ Förderkennzeichen 03WKY01L; vom *Bundesministerium für Bildung und Forschung* gefördert

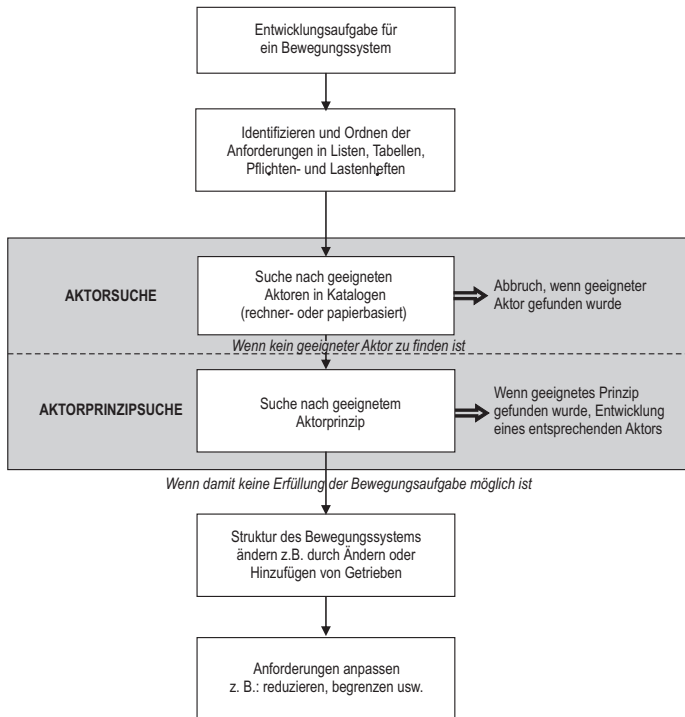


Abbildung 1.1: Vorgehen bei der Aktorauswahl während der Entwicklung eines Bewegungssystems

der Actorprinzipie auf andere Auswahlprobleme bzw. Anwendungsfelder übertragbar. Die Möglichkeiten hierzu werden in den zugehörigen Kapiteln diskutiert.

2 Begriffe und deren Abgrenzung

Der Begriff des *Bewegungssystems* wird in der Literatur oft mehrdeutig oder unbestimmt genutzt. In der Literatur sind weitere alternative Begriffe wie *Positioniersystem*, *Antriebssystem*, *Antrieb* oder im Englischen *drive*, *drive system* und *actuator* usw. gebräuchlich (siehe u. a. [Ise05, SK06, KEQ08, BV99, Jan99]). Diese Begriffe werden vielfach uneinheitlich sowie unabgegrenzt verwendet oder besitzen zum Teil überlappende Bedeutungen und erfordern eine handhabbare Abgrenzung. Die Unterschiede im Gebrauch der genannten Begriffe liegen in der Einbeziehung, Aufspaltung, Abgrenzung oder Zusammenfassung von Steuerung, Stellgliedern, Messsystemen und Getrieben.

Gemein ist allen Begriffen, dass sie ein technisches Produkt beschreiben, welches eine Bewegung zwischen einem als fest angenommenen und einem beweglichen Teil des Bewegungssystems erzeugt. Zweck eines Bewegungssystems ist somit das Erzeugen von Kräften und/oder Momenten, um die Lage oder den (Dreh-)Impuls eines bewegten Objektes zielgerichtet zu ändern oder entgegen äußeren Störungen zu erhalten.

Den Kern eines jeden Bewegungssystems bildet ein Energiewandler, der *nicht-kinetische* Energie in *kinetische* Energie (ggf. mehrstufig) wandelt und als *Aktor* bezeichnet wird. Weitere, allerdings nicht für jede Anwendung erforderliche Bestandteile sind Getriebe sowie z. B. Mess- und Steuerelemente. Die für diese Arbeit vorgenommene Begriffsunterscheidung sowie der Versuch, die unterschiedlichen Begriffe zu ordnen, ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

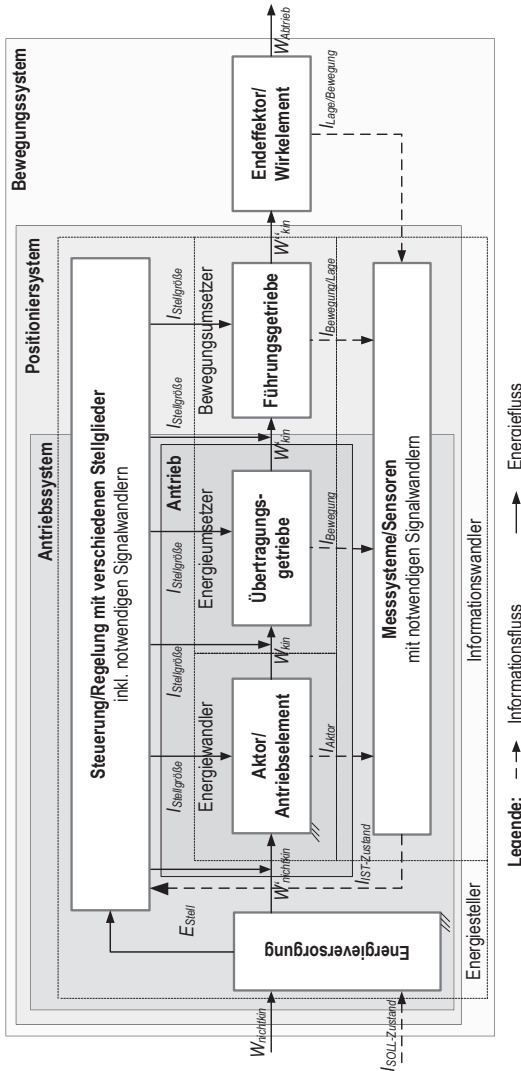


Abbildung 2.1: Grundelemente eines Bewegungssystems (in Anlehnung an [KB91]). In einem Bewegungssystem müssen nicht alle abgebildeten Systeme oder Flussgrößen vorhanden sein. Bei einem Direktantrieb entfällt das Übertragungsgetriebe und es gilt $W_{mech} = W_{Abtrieb}$.

Die Einordnung ist an KALLENBACH [KB91], ISERMANN [Ise07] und JANOSCHA [Jan04] angelehnt, jedoch hinsichtlich einzelner Begriffsabgrenzungen verschieden.

Die dargestellte Begriffsabgrenzung orientiert sich an der qualitativen Energie- bzw. Leistungswandlung der Teilsysteme. Es wird davon ausgegangen, dass das Bewegungssystem kinetische Energie bereitstellen soll, die einem Endeffektor/Wirkelement zugeführt wird. Durch verschiedene Stellglieder kann Einfluss auf die Energiewandlung durch die einzelnen Elemente wie auch die Übertragung zwischen den Elementen genommen werden.

2.1 Aktor und Aktorprinzip

Der Begriff *Aktorprinzip* ist mit verschiedenen Bedeutungen belegt. Synonym verwendet werden u. a. *Wirkprinzip*, *krafterzeugendes Prinzip*, *Grundprinzip* oder der (zugrundeliegende) *physikalische Effekt*. Häufig werden mehrere dieser Begriffe auch mit unterschiedlichen Bedeutungen verwendet. Für diese Arbeit soll daher folgende Begriffskonvention gelten:

Der physikalische Effekt eines Aktors bezeichnet eine bekannte nicht zweckbezogene und – zumindest im Modell – beschreibbare Ursache-Wirkungsbeziehung zwischen physikalischen Größen. Für die Energiewandlung in einem Aktor sind meist mehrere physikalische Effekte von Bedeutung.

Das Aktorprinzip beschreibt die Art und Kopplung physikalischer Effekte zum Zweck der Energiewandlung.

Der Aktor bezeichnet die technische Umsetzung eines Aktorprinzipes. Er besitzt stets einen als Stator bezeichneten unbewegten und einen als Läufer bezeichneten bewegten Teil. Der Aktor wird auch als Antriebs-element bezeichnet.

Anhand dieser Definitionen ergeben sich:

Die Aktorauswahl als Auswahl eines Aktors anhand gewünschter Eigenschaften, basierend auf einem gewählten oder vorgegebenen Aktorprinzip.

Die Aktorprinzipauswahl als Auswahl einer bestimmten Abfolge physikalischer Effekte und ggf. einer bestimmten Bauform, anhand derer ein Aktor mit den gewünschten Eigenschaften entwickelt werden kann.

Die Bewegungssystemsynthese als Festlegung des Bewegungssystemaufbaus sowie die Auswahl bzw. Bestimmung der Prinzipie und Bauformen der zugehörigen Elemente.

Die Unterscheidung zwischen physikalischem Effekt und Aktorprinzip von Aktoren soll Tabelle 2.1 verdeutlichen.

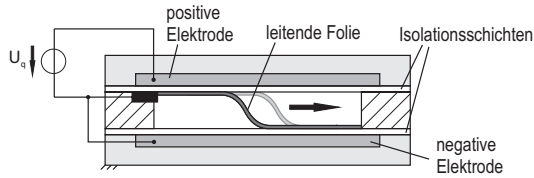
Umfangreiche Übersichten zu physikalischen Effekten lieferten u. a. KOLLER und ARDENNE [KK97, vMR97]. Anhang A zeigt eine zusammengefasste Übersicht möglicher aktorisch nutzbarer physikalischer Effekte. Übersichten zu den Aktorprinzipen lieferten z. B. KALLENBACH und KAHLERT [KAT92, Kah05]. Aktoren selbst werden vielfach anhand verschiedener *übergeordneter Kriterien/Ordnungskriterien* klassifiziert, gebräuchlich ist u. a. die Einteilung nach dem Aktorprinzip.

2.2 Besondere Aktoren und Aktorprinzipie

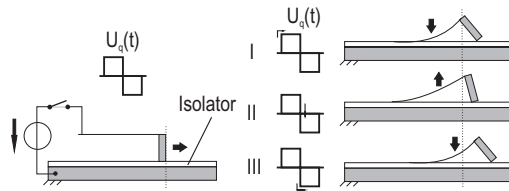
Bei einigen Antrieben ist eine genaue Unterscheidung von Aktor und Getriebe nicht möglich. Durch Beachtung der technologischen Möglichkeiten und Beschränkungen integrieren insbesondere Bewegungssysteme in der Mikrotechnik Aktor- und Getriebefunktionen². Es handelt sich somit um *funktionsintegrierte Antriebe*³ (Abbildung 2.2).

² makroskopische Beispiele: Wankel- oder Ottomotor

³ Die Begriffe *funktionsintegriert* und *strukturintegriert* sind SCHILLING [Sch82] entnommen und wurden auf Antriebe übertragen.



(a) Elektrostatischer Membrantrieb; durch Anlegen einer Spannung „schmiegt“ sich die leitende Folie an verschiedenen Seiten des Antriebs an.



(b) Elektrostatischer Scratchdrive; durch periodisches Anlegen einer Spannung biegt sich ein Balken und schiebt über einen „Reibfuß“ den beweglichen Teil gegenüber der Grundplatte voran.

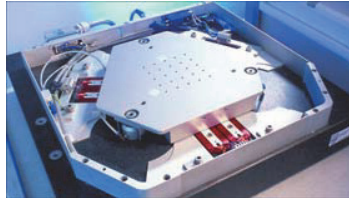
Abbildung 2.2: Beispiele für „integrierte“ Antriebe (Darstellung angelehnt an [ACF97, TO00, KP06, SS92]).

Da sich Getriebe und Aktor bei diesen Antrieben nicht sinnvoll abgrenzen lassen, werden sie im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls als Direktantriebe aufgefasst.

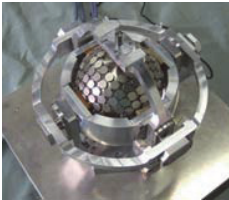
Ähnliches ist bei sogenannten Mehrkoordinatenantrieben festzustellen (Abbildung 2.3). Bei diesen sind stets mehrere Aktoren meist über ein Getriebe an einen gemeinsamen Abtrieb gekoppelt. Es handelt sich somit um *strukturintegrierte Antriebe*. Häufig werden diese Antriebsstrukturen als Parallelkinematiken bezeichnet, wobei der getriebetechnische Aspekt im Vordergrund steht. Bei diesen Antrieben sind die verschiedenen Aktoren und Getriebe nicht abgrenzbar.



(a) Hexapod M-850 der Physik Instrumente (PI) GmbH & Co. KG



(b) Planares Positioniersystem PPS 100-3 der IMMS gGmbH



(c) Kugel-Synchronmotor des NIST



(d) Parallelroboter *Adept Quattro s800H* der ADEPT TECHNOLOGY INC.

Abbildung 2.3: Beispiele für „Mehrkordinatenantriebe“; von (a) nach (d) entnommen aus [Phy11b, IMM11, AIS11, ADE11].

Die Bewegung des Endeffektors/Wirkelementes ergibt sich jedoch ggf. nur aus der Zusammenwirkung aller Aktoren und der zugehörigen Getriebe. Der diesen Antrieben oft zugeschriebene Freiheitsgrad > 1 ergibt sich bei genauer Betrachtung aus der Überlagerung mehrerer Antriebe mit dem Freiheitsgrad 1. *Strukturintegrierte Antriebe* werden daher nicht als Aktoren aufgefasst. Darüberhinaus gibt es als *unkonventionell* oder *neu* bezeichnete Aktoren, für die eine Unterscheidung von Aktor(-Bauform) und Aktorprinzip nicht eindeutig möglich ist.

Als *neu* oder *unkonventionell* werden meist Aktoren bezeichnet, die elektronisch regel- und miniaturisierbar sind aber nicht auf elektro-magneto-mechanischer Energiewandlung basieren (Abgrenzung basiert auf [Ju95, Jan09]). Ähnliche Aktorbauformen werden trotz unterschiedlicher zugrunde-

Tabelle 2.1: Unterscheidung von physikalischem Effekt und Aktorprinzip anhand ausgewählter Beispiele; ähnliche Darstellungen und Abgrenzungen zeigen u. a. [ZJZ04, Ju95, LGE96b, SH97, SSR98b]

Eingangsennergie	physikalischer Effekt	Aktorprinzip
elektrische Energie	äußere elektrische Feldkräfte	elektrostatische Aktoren
	innere molekulare Kräfte	Piezoaktoren
		elektrostriktive Aktoren
(elektro-) magnetische Energie	Reluktanzkräfte	magnetostriktive Aktoren
		Elektromagnet
	„Lorenzkräfte“	Gleichstrommotoren
fluidische Energie	Druck auf eine oder mehrere Flächen	Hydraulik
		Pneumatik
	Viskositätsänderungen	elektrorheologische Aktoren
magnetorheologische Aktoren		
thermische Energie	Wärmedehnung	(thermo-)Bimetall
		Phasenwandlungsaktoren, Dehnelemente
	Formgedächtniseffekte	Shape-Memory-Aktoren (SMA)
chemische Energie	Elektrolysedruck	elektrochemischer Aktor
	Explosionsdruck	pyrotechnische Aktoren
	Strukturänderung	Muskel

liegender physikalischer Effekte mit gleicher oder ähnlicher Aktorprinzipbezeichnung versehen (z. B. elektrostatischer und piezoelektrischer Steppermotor). Daher ist die Angabe des zugrundeliegenden physikalischen Effektes für die Unterscheidung notwendig.

3 Einordnung in den Entwicklungsprozess

Für die Bearbeitung von Entwicklungsaufgaben sind historisch verschiedene Ansätze und Methoden entstanden, die dem Ingenieur als Richtlinie bei der Entwicklung dienen sollen. Die Aktor-/Aktorprinzipauswahl ist *ein* Teilaspekt der Entwicklung und ordnet sich demnach in diese Vorgehensmodelle ein. Aus der Einordnung in den Entwicklungsprozess ergeben sich für den Aktor und dessen Prinzip, als Teil des Bewegungssystems, Auswahlkriterien, die im darauffolgenden *Kapitel 4* diskutiert werden.

3.1 Unterscheidung zwischen Aktor- und Aktorprinzipauswahl

Abhängig davon, ob der Aktor Mittel zum Zweck bei der Konfiguration eines Bewegungssystems oder eigentliches Ziel der Entwicklungsbemühungen ist, kann zwischen Aktorauswahl bei der Entwicklung von Bewegungssystemen und der Aktorprinzipauswahl bei der Entwicklung von Aktoren unterschieden werden. Generell gilt, dass eine Aktorprinzipauswahl nur dann nötig wird, wenn kein geeigneter Aktor verfügbar ist. Daher erfordert:

Aktorauswahl eine Übersicht möglichst vieler verschiedener Aktoren, welche mittels zahlreicher, vom auswählenden Entwickler definierbarer Eigenschaften/Auswahlkriterien eine Suche und Klassifikation sowie für die Auswahl einen Vergleich von maßgeblichen Eigenschaften gestattet.

Aktorprinzipauswahl eine Übersicht über die Abhängigkeiten der Eigenschaften verschiedener Aktorprinzipie, die eine zielgerichtete Anpassung von einzelnen Merkmalen zum Erreichen der geforderten Eigenschaften erlaubt.

Für die Akteur-/Aktorprinzipauswahl lassen sich in diesem Zusammenhang zwei Grenzfälle unterscheiden:

- I. Der Akteur ist als Teil des Bewegungssystems innerhalb eines technischen Produktes gegenüber anderen Elementen von untergeordneter Bedeutung.
- II. Der Akteur ist innerhalb eines Bewegungssystems von zentraler Bedeutung und die Erzeugung der Bewegung/Energiewandlung ist wesentlicher Zweck des technischen Produktes.

Im ersten Fall wird durch Festlegungen anderer (relevanter) Teile des Bewegungssystems die Peripherie des Akteurs vorgegeben. Wesentliche Leistungs- und Gestaltparameter können quantifiziert werden und sind ggf. streng begrenzt. Im Regelfall ist die Eigen- oder Sonderentwicklung des Akteurs nicht beabsichtigt. Vielmehr ist ein verfügbarer Akteur oder ein bekanntes Akteurprinzip an die gegebene Aufgabe anzupassen. Wenngleich der Akteur im eigentlichen Sinne eine Baugruppe darstellt, wird er häufig als ein Zukauf-(Einzel-)teil angesehen.

Die Hauptaufgabe des Entwicklers des Bewegungssystems für den ersten Fall ist die Auswahl eines verfügbaren Akteurs bekannten Akteurprinzips anhand der gegebenen bzw. von ihm ggf. zuvor bestimmten veränderten Parameter.

Im zweiten Fall bestimmt der Akteur die Anforderungen an andere Baugruppen und Elemente des Bewegungssystems. Sofern kein passender Akteur bekannt oder verfügbar ist, erfolgt zumeist eine Sonderentwicklung mit dem Ziel, bestimmte Eigenschaften/Parameter zu erreichen. Es gibt hierbei oft spezielle, auf den Einsatzzweck bezogene Anforderungen und damit entsprechende

Kriterien für die Entwicklung des Aktors und die Auswahl eines geeigneten Aktorprinzips.

3.2 Einordnung in die Vorgehensmodelle für die Entwicklung

Durch die Unbestimmtheit des Entwicklungsprozesses wird die Lösung/das technische Produkt bei der Entwicklung meist auf verschiedenen Abstraktionsebenen betrachtet und im Rahmen des Entwicklungsprozesses iterativ konkretisiert und detailliert. Die jeweiligen Abstraktionsstufen – auch als Phasen bezeichnet – sind bei vielen Vorgehensmodellen zur Entwicklung technischer Produkte ähnlich.

Zweck dieser Vorgehensmodelle ist es, einen systematischen Ansatz für ein zielgerichtetes Vorgehen bei der Entwicklung technischer Produkte zu liefern. Ziel des systematischen Vorgehens ist es die meist auftretende Vielzahl der ggf. konträren Anforderungen zu beherrschen. Viele Vorgehensmodelle und Ansätze entstanden aus konkreten, meist branchenspezifischen Entwicklungsaufgaben und sind im Anschluss vielfach erweitert, konkretisiert oder abstrahiert worden.

Bekannte und im Kontext dieser Abhandlung relevante Ansätze zur systematischen Bearbeitung von Entwicklungsvorhaben sind diejenigen nach HANSEN, PAHL/BEITZ sowie die nach den VDI-Richtlinien VDI 2221 und VDI 2206 ([Han68, PBF07, VDI 2221, VDI 2206]; Abbildung 3.1). In diesen Vorgehensmodellen lassen sich drei wesentliche Phasen der Konkretisierung des technischen Produktes erkennen:

Aufbereitungsphase zum Zweck der Abgrenzung des technischen Produktes vom umgebenden Umfeld sowie der Konkretisierung und, sofern möglich, Quantifizierung der an das technische Produkt gestellten Forderungen.

Konzeptphase mit dem Ziel, den als „Gesamtfunktion“ bezeichneten Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des technischen Produktes in unterschiedliche Teilfunktionen und deren Verknüpfungen zu zerlegen. In dieser Phase werden weitere Prinziplösungen und zugehörige Kopplungen für die gewählten Teilfunktionen gesucht, ausgewählt und einzeln und/oder miteinander zu einer Lösung kombiniert.

Gestaltungsphase, in der alle Angaben zur Gestalt des technischen Produktes, d. h. einschließlich die der Einzelteile und deren Zusammenwirken festgelegt werden. Die Gestalt bezeichnet die Summe der geometrischen und stofflichen Eigenschaften sowie deren Zustände (z. B. Härte, Magnetisierung usw.) eines technischen Produktes [Spe83].

Diese sind auch bei der Entwicklung von Bewegungssystemen zu durchlaufen. Im Weiteren wird das Vorgehen bei der Aktor- und Aktorprinzipauswahl beschrieben und in den Entwicklungsprozess eingeordnet. Aus dieser Einordnung ergeben sich Beschränkungen/Annahmen zu den für die Aktor- und Aktorprinzipen geeigneten Auswahlkriterien.

3.3 Vorgehen bei der Aktor- und Aktorprinzipauswahl

Konkrete Schritte für die Aktor- oder Aktorprinzipauswahl werden in der Literatur meist für die Dimensionierung („Auslegung“ und „Bemessung“ sind synonyme Begriffe) des Aktors vorgegeben. Insbesondere für Aktoren mit elektro-mechanischer oder elektro-magneto-mechanischer Energiewandlung sind Schritte und Größen zu deren Berechnung umfassend dokumentiert.

Die bekannten Empfehlungen zum Vorgehen bei der Aktorentwicklung beziehen sich maßgeblich auf die Dimensionierung für eine bestimmte Bewegungsaufgabe. Wesentliche, nicht mit der Bewegungsfunktion zusammenhängende Forderungen (Kosten, Verfügbarkeit aber auch Bauraum, Geometrie usw.)

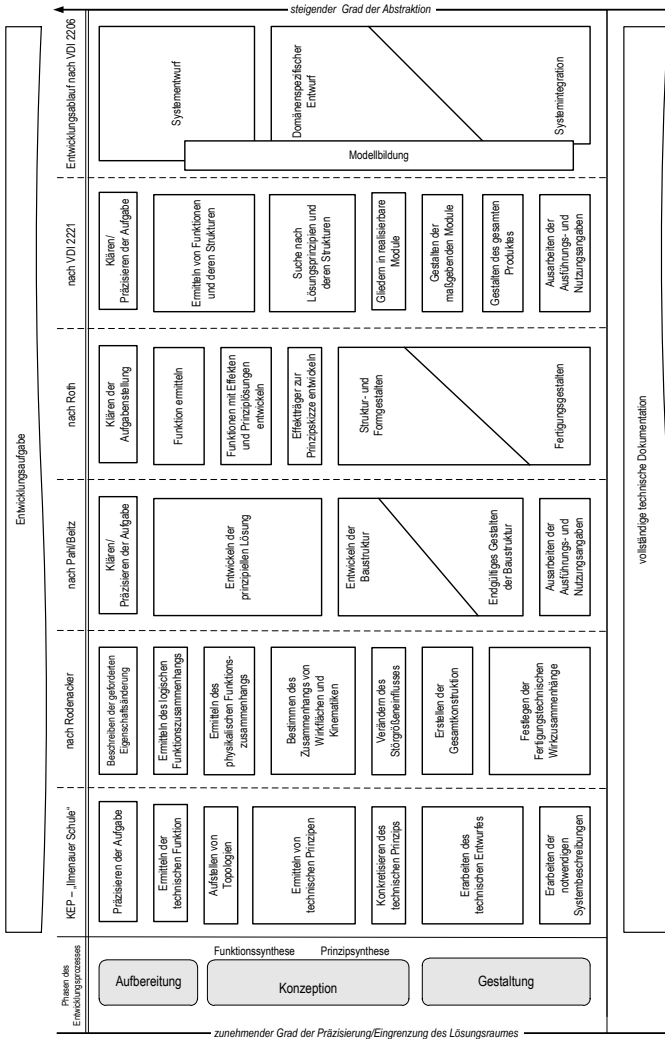


Abbildung 3.1: Übersicht verschiedener Ansätze zum Entwicklungsprozess [AFH69, PBF07, VDI 2221, VDI 2206, Han74, Rod84, Rot00]. Zum Zweck der Übersichtlichkeit sind die Iterationsschleifen nicht dargestellt. Vergleichbare Darstellungen finden sich u. a. in [AFH69] und [Rot00].

werden nicht berücksichtigt. Bei der Entwicklung können diese Berechnungsschritte daher der Vordimensionierung eines Aktors eines zuvor gewählten Aktorprinzips dienen und keinen Beitrag zur Auswahl eines geeigneten Aktorprinzips liefern.

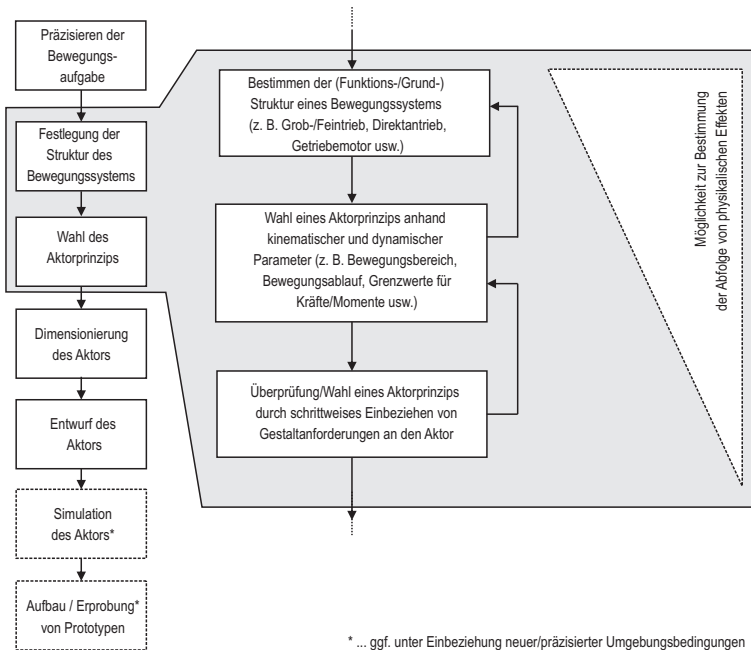


Abbildung 3.2: Schritte bei der Aktorentwicklung: Auswahlsschritte hervorgehoben und untersetzt, optionale Schritte gestrichelt. Zwischen den einzelnen Schritten sind Iterationen möglich aber zum Zwecke der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. (an [KAT92] angelehnt und unter Berücksichtigung von [Ju95], S.103 angepasst)

Die einzige Darstellung für die Aktorprinzipauswahl bei der Aktorentwicklung findet sich bei KALLENBACH [KAT92] (Abbildung 3.2). Die beschriebene

ne Aktorprinzipauswahl lässt sich der Konzeptphase der zuvor vorgestellten Vorgehensmodelle zuordnen⁴ (siehe Abbildungen 3.1).

Das Vorgehen bei der Aktorauswahl besteht wiederum darin, zunächst ein zweckmäßig erscheinendes Aktorprinzip auszuwählen und anschließend, in einem zweiten Schritt, einen geeigneten Hersteller für den Aktor, der nach diesem Prinzip arbeitet, zu bestimmen. Zur Auswahl eines Aktors aus dem Produktportfolio eines Herstellers dienen zu den in Abbildung 3.3 dargestellten vergleichbare Vorgaben und Abfolgen von Rechen- und Auswahlritten.

Die Berechnungsschritte dienen ausschließlich zur Bestimmung der wesentlichen Parameter für die Auswahl (nicht Auslegung) eines Aktors aus einem Katalog und sind für Aktoren gleichen Aktorprinzips verschiedener Hersteller ähnlich. Die Auswahl des Aktors, die genaue Abfolge wie auch des Herstellers ist von der durchführenden Person abhängig und kann unter Berücksichtigung der Erfahrungen des Entwicklers daher individuell verschieden sein.

Das Vorgehen bei der Aktorprinzipauswahl besteht darin, für verschiedene Aktorprinzipie die Umsetzbarkeit der geforderten Bewegungsfunktion durchzuführen. Anschließend wird geprüft, ob die berechneten Aktoren unter Berücksichtigung weiterer Forderungen entwickelt werden können. Beide Schritte werden ggf. solange wiederholt bis ein Entwurf geeignet erscheint und ggf. eine Simulation oder ein Prototyp ausgewählte Eigenschaften mit hinreichender Genauigkeit bestätigt.

Viele Eigenschaften des neu entwickelten Aktors (insbesondere die mit den Kosten in Zusammenhang stehenden) werden wiederum erst anschließend betrachtet, wenn die Überführung des Aktorentwurfes in ein verkaufsfähiges Produkt erfolgt. Ein erfahrener Entwickler wird versuchen, möglichst viele

⁴ Auch KALLENBACH verortet die Aktor- und Aktorprinzipauswahl in der Prinzipphase und bezieht sich auf den Entwicklungsprozess wie er u. a. in [Kra00] und [Han74] ausgeführt ist.

Kriterien gleichzeitig zu betrachten und anhand seiner Erfahrung zu bewerten, sodass sich „Abkürzungen“ ergeben können.

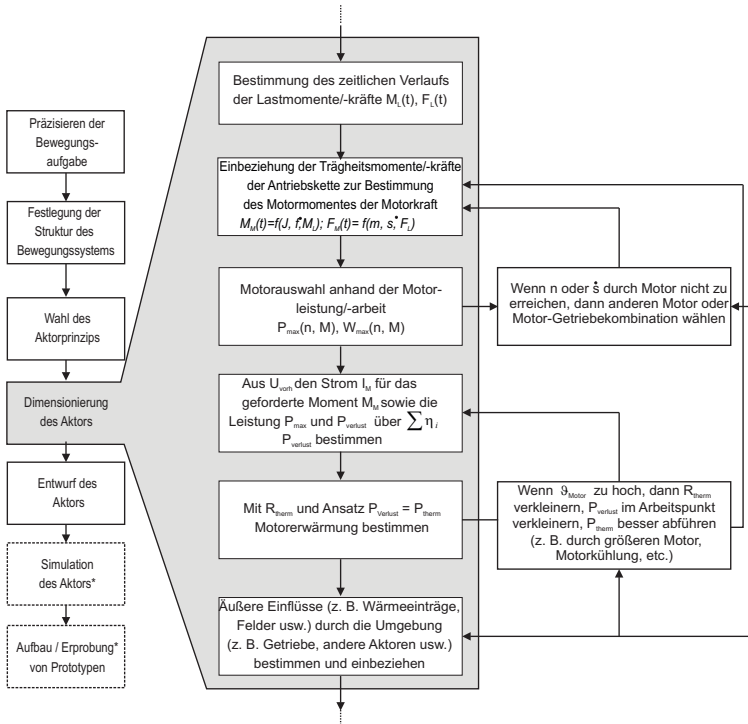


Abbildung 3.3: Schritte bei der Dimensionierung von Aktoren (optionale Schritte gestrichelt). Ausgeführt am Beispiel elektrischer Kleinmaschinen; für andere Aktorprinzipie aber vergleichbar. Zwischen den einzelnen Schritten sind Iterationen möglich aber nicht dargestellt. (mit Änderungen [HZ07] entnommen)

Die Schritte Aktorauswahl und Aktorprinzipauswahl gehen vom Vorhandensein eines Aktors bzw. Aktorprinzips aus. Eine weitere Option ist die Entwicklung eines neuen Aktorprinzips. Hierfür wäre die Entwicklung ei-

ner neuartigen physikalischen Effektkette notwendig, was nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

3.4 Einordnung anhand der Entwicklungsaufgabe

Je nach Aufgabenstellung und Arbeitsfortschritt sind die bekannten Anforderungen, Parameter, Eigenschaften, Merkmale, Attribute usw.⁵ verschieden bzw. verschieden genau bekannt. Daher werden neben den Phasen der Vorgehensmodelle häufig auch die Entwicklungsaufgaben selbst unterschieden.

Die Unterscheidung erfolgt anhand des Änderungsumfangs und der bekannten Angaben zum gesuchten technischen Produkt in folgende Gruppen (in Anlehnung an [PBF07] und konkret auf Bewegungssysteme bezogen):

Neuentwicklungen, durch Kombination bekannter oder neuer (Aktor-)Prinzipie entsteht eine neuartige Lösung. Ein Rückgriff auf vorhandene Vorbilder oder Vorgänger ist nicht möglich, oder

Anpassungsentwicklungen, unter Beibehaltung des (Aktor-)Prinzips wird die Gestalt im Hinblick auf geänderte, erweiterter oder neuartiger Anforderungen angepasst. Vorgänger oder Vorbilder sind dabei bekannt.

Variantenentwicklungen, die Gestalt sowie die Relationen von Elementen einer bekannten Prinziplösungen wird in Größe, Form, Zahl oder Lage, Art/Betriebsweise (z. B. Wechsel von Zweiphasen- auf Dreiphasenwechselstrom) in einem vorgegebenen Variationsbereich geändert.

Durch den Erkenntnis-/Informationsgewinn bei der Bearbeitung einer Entwicklungsaufgabe ist es möglich, dass sich Prioritäten – ggf. auch die zu Anfang beschriebenen Grenzfälle – erst während der Entwicklung ergeben.

⁵ vgl. *Kapitel 4*

Das ist der Fall, wenn durch Änderungen der Gestalt (z. B. Größenskalierung, Änderung von Aspektverhältnissen aber bspw. auch von Wärmewiderständen usw.) bestimmte Aktoren oder auch Aktorprinzipale die geforderte Funktion nicht mehr erfüllen. Eine Variantenentwicklung eines Bewegungssystems kann so eine Anpassungs- oder sogar eine Neuentwicklung eines Aktors und damit eine Aktor- oder Aktorprinzipalauswahl erforderlich machen.

Die Aktorprinzipalauswahl ist somit vorrangig für die Neu- sowie ggf. für Anpassungsentwicklungen und die Aktorauswahl für die Anpassungs- und Variantenentwicklung während der Konzeptphase bei der Entwicklung von Bewegungssystemen von Bedeutung. Die in dieser Arbeit vorgestellten Unterstützungsansätze beziehen sich daher auf diese frühe Entwicklungsphase.

4 Kriterien für die Aktor- und Aktorprinzipauswahl

Für die Unterstützung bei der Aktor- und Aktorprinzipauswahl ist eine Betrachtung der dafür verfügbaren und geeigneten Informationen sinnvoll. Aus diesen ergeben sich verschiedene Anforderungen an Informationsspeicher und Entscheidungshilfen. Diese betreffen insbesondere den Aspekt der Ordnung von Daten und damit die Suche in Wissensspeichern (z. B. Aktordatenbanken).

Ausgangspunkt sind dabei stets die *Anforderungen*, die das technische Produkt erfüllen soll. Aus diesen Anforderungen leiten sich alle *Kriterien* zur Auswahl und Gestaltung des technischen Produktes, wie auch für dessen Elemente – so auch der Aktoren – ab. Der Begriff der *Anforderung* impliziert dabei die „Übersetzung“ der für ein zukünftiges Produkt (bzgl. Zweck, Gestaltung, Umwelt, Betriebsweise, Fertigung usw.) gegebenen Informationen, in eine für die Entwicklung nutzbare Form – in *Parameter*.

4.1 Parameter für die Aktor- und Aktorprinzipauswahl

Ein *Parameter* beschreibt die Ausprägung einer das Produkt und seine Lebensphasen kennzeichnende *Eigenschaft*. Das „Übersetzen“ geschieht über den gesamten Entwicklungszeitraum hinweg, beginnend in der Phase der Aufbereitung. Die *Informationen* selbst sind u. a. von Art und Anzahl der Vorgaben zum technischen Produkt, dem Kontext der Produktentwicklung

sowie der Erfahrung des Ingenieurs abhängig und deshalb für jede Aufgabe verschieden.

Die Parameter zur Beschreibung technischer Produkte können nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden. Abbildung 4.1 zeigt eine im Hinblick auf Aktoren mögliche Übersicht.

Für eine Auswahl sind die *Art der Vorgabe* und die *Art der Ausprägung* der Parameter von besonderer Bedeutung. Die *Art der Vorgabe* kann weiter unterschieden werden in:

vorgegebene Parameter, die durch Forderungen im Pflichten- oder Lastenheft bzw. in Forderungslisten zu Beginn der Entwicklung festgelegt wurden bzw. werden (z. B. Bauraumbegrenzungen durch die technische Peripherie, Lebensdauer),

festgelegte Parameter, die im Laufe der Entwicklung durch den Ingenieur aufgrund von Erfahrungen oder Vorwissen unbedingt zu erreichen oder zusätzlich zu den vorgegebenen zweckmäßig sind; dies beinhaltet auch die daraus abgeleiteten Parameter (z. B. Aspektverhältnisse, Sicherheit gegen bestimmte Beanspruchungen),

abgeleitete Parameter, die durch mathematisch-physikalische Zusammenhänge eindeutig anhand der Forderungen bestimmt werden können (z. B. Volumen aus Geometrie und Abmessungen) und

ergänzende Kriterien die schlecht oder nicht zu quantifizieren sind und nur eingeschränkt oder mittelbar durch Festlegungen des Entwicklers beeinflusst werden können (z. B. „robustes Äußeres“, „ansprechendes Design“ usw.) und ggf. Rückmeldung von Dritten erfordern.

Die vorgegebenen Parameter bilden die Basis für alle anderen festgelegten und abgeleiteten Parameter. Ziel der Festlegung von Parametern ist stets eine Minimierung der Anzahl an Unbekannten und meist eine genauere Beschreibung/Eingrenzung der verbliebenen unbekannt Parameter. Durch

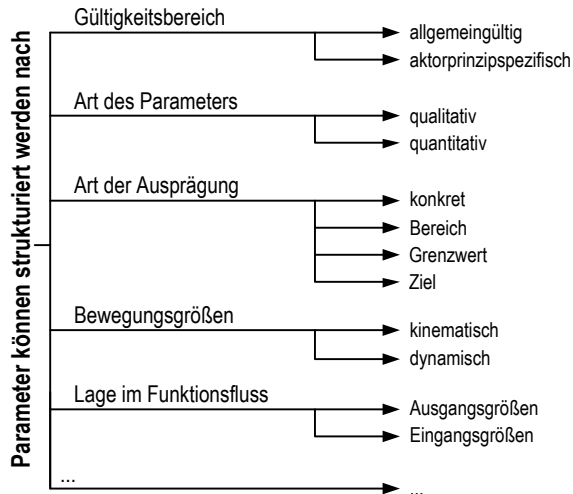


Abbildung 4.1: Möglichkeiten zur Einteilung und Ordnung der Anforderungen im Hinblick auf die Aktorprinzipauswahl (gleichzeitige Zugehörigkeit zu mehreren Gruppen ist möglich).

Festlegungen während der Entwicklung ergeben sich jedoch wiederum neue oder in der *Art der Ausprägung* geänderte Parameter, die weitere Festlegungen erforderlich machen können. Hinsichtlich der *Art der Ausprägung* lassen sich im Wesentlichen folgende unterscheiden:

- *konkrete* Vorgaben (ein genauer Wert für jeden Parameter),
- *Bereichsvorgaben* (meist „von/bis“ Angaben),
- *Grenzwerte* (bspw. maximale und minimale Werte) und
- *Ziele* beziehungsweise Zielgrößen.

Für eine (Aktor-)Auswahl können dabei ausschließlich die Parameter in der Beschreibung genutzt werden, die zum Zeitpunkt der Auswahl durch Vorgabe oder Festlegung bekannt sind. Für alle Bewegungssysteme müssen dies von Beginn an die Parameter der Bewegung sein. Diese können wiederum

in *qualitative* und *quantitative* Parameter der Bewegung unterschieden werden.

Qualitative Parameter gelten für die Beschreibung von Bewegungssystemen allgemein [KB91, EST10] und können zu Beginn jeder Entwicklung angegeben werden. Sie legen die im Weiteren betrachteten kinematischen und dynamischen *quantitativen* Parameter (vereinfacht: Kräfte oder Momente, Wege oder Winkel und abgeleitete Größen) fest und ergeben sich aus [KB91, KAT92, EB09, EST10]:

der Bewegungsform, als räumliche Anordnung aufeinander folgender Lagen eines Punktes oder Körpers bzw. allgemein des Endeffektors/Wirkelementes sowie

dem Bewegungsablauf, als Zusammenhang zwischen Weg und Zeit.

Im Hinblick auf die Auswahl lassen sich aus Bewegungsform und -ablauf Kriterien zur Klassifikation von Aktoren und Aktorprinzipen ableiten (vgl. Tabelle 4.1). Diese Kriterien sind voneinander unabhängige Parameter, jedoch für jedes Aktorprinzip und für jeden Aktor kennzeichnend. Die *Klassifikationskriterien* können somit die Zahl der für eine Auswahl oder Suche von Aktoren/Aktorprinzipen geeigneten quantitativen Parameter einschränken.

Tabelle 4.1: Qualitative Parameter der Bewegung (nach [KB91, EST10])

Parameter zur Klassifikation von Antriebssystemen	
Freiheitsgrad	1 bis n
Haltemoment/-kraft	mit oder ohne Haltemoment/-kraft (ohne externe Energiezufuhr)
Bewegungsart	translatorisch oder rotatorisch, ggf. frei
Bewegungssinn	ein- oder wechelsinnig
Bewegungsablauf	schrittweise, periodisch, kontinuierlich, schrittweise-periodisch
Begrenzung	begrenzt, umlaufend oder unbegrenzt

Weiterhin sind für die Charakterisierung der Bewegungsaufgabe Angaben zur Arbeit- bzw. Leistungswandlung des Bewegungssystems zwingend erforderlich, welche im Weiteren als quantitative dynamische Parameter bezeichnet werden. Die Arbeit/Leistung am Eingang und am Ausgang des Bewegungssystems und damit auch des Aktors müssen durch Vorgaben bestimmbar sein (Abbildung 4.2). Ohne die Vorgabe dieser Parameter zur Energiewandlung ist keine Aktor- oder Aktorprinzipauswahl möglich.

Hierfür ist am Eingang und am Ausgang wenigstens ein Parameter (z. B. am Ausgang die Beschleunigung α_{Aktor} und am Eingang die Spannung $U_{Betrieb}$) vorzugeben, während sich der andere (quasi aus der Rückmeldung der nachgelagerten Elemente des Systems) ergibt bzw. berechnet werden kann (siehe hierzu 4-Poltheorie nach [Web05b]). In frühen Phasen des Entwicklungsprozesses wird dies eine Abschätzung (meist „von unten“) unter Vernachlässigung des Wirkungsgrades sein. Als betrachtete Größe bietet sich für begrenzte Bewegungen die Energie und für unbegrenzte oder umlaufende die Leistung an.

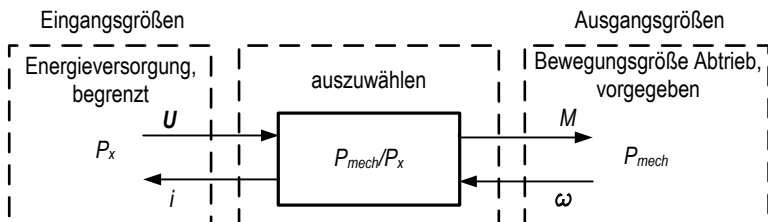


Abbildung 4.2: Beispiel für die notwendige Vorgabe von quantitativen Parametern für die Leistungswandlung (hier angenommen eine umlaufende Bewegung) des Bewegungssystems. Die Vorgabegrößen sind fett dargestellt.

Einige Parameter können sowohl qualitativen als auch quantitativen Charakter haben und sich in Folge der Konkretisierung während der Entwicklung ändern. So kann bspw. das Haltemoment eines Aktors für eine bestimmte Anwendung oder auf einem bestimmten Abstraktionsniveau unwesentlich oder notwendig und dann ggf. mit einem bestimmten Betrag gefordert sein. Durch Festlegung

gen während des Entwicklungsprozesses können so ggf. qualitative Parameter „quantifiziert“ werden. Wie die qualitativen kinematischen müssen auch die quantitativen dynamischen Parameter für alle Bewegungssysteme – z. B. Antriebe mit weiteren Getrieben – zu Beginn der Entwicklung angegeben oder aus den Lastkollektiven und vorhandenen Trägheiten/Reibungen während der Entwicklung ermittelt werden können.

Neben den genannten qualitativen und quantitativen Parametern der Bewegung sind alle anderen Parameter aufgabenspezifisch und nicht bei jeder Entwicklungsaufgabe vorgegeben oder gefordert. Meist handelt es sich dabei um Beschränkungen des Bauraums und applikationsspezifische Vorgaben, z. B. in der Präzisionstechnik zur minimalen Schrittweite des Antriebs.

4.2 Zusammengefasste Parameter – Kennzahlen

Zusammengefasste Parameter sind aus verschiedenen Bereichen der Physik und der Technik bekannt. Insbesondere in der Thermodynamik werden verschiedene *dimensionslose* Kennzahlen genutzt.

Zur Verringerung der freien Parameterzahl in Auswahlproblemen wird oft versucht, verschiedene Parameter zueinander in Bezug zu setzen, um bspw. Aktorbauform- und -prinzip-spezifische *Kennzahlen* zu erhalten. Ziel ist dabei, den Lösungsraum einzugrenzen oder aus den betreffenden Kennzahlen die Parameter abzuleiten, die es zwingend festzulegen gilt. Bekannte und häufig verwendete Beispiele für – nicht dimensionslose – Kennzahlen von Aktoren sind die *Leistungsdichte* und die *Steifigkeit* (z. B. eines Antriebes). Die Bezeichnung dieser Kennzahlen ist mitunter bei physikalischer Betrachtung unsauber. Die Bezeichnung der für Aktoren gebräuchlichen Kennzahlen (Bsp.: Leistungsdichte $\frac{P}{V}$ oder Aktorsteifigkeit $\frac{F}{\lambda}$) ist dabei mitunter irreführend, da sie entweder auf die physikalische Äquivalenzgröße (z. B. Steifigkeit c) oder auf die Bezugsgröße (z. B. V) hinweisen soll. Tabelle 4.2 zeigt eine Auswahl

an möglichen Kennzahlen für Aktoren am Beispiel der Aktorkraft und der vom Aktor verrichteten Arbeit.

Zweckmäßig ist eine Kennzahl für die Auswahl, wenn sie Relationen zwischen bekannten und gewünschten Parametern eines Aktors/Aktorprinzips einbezieht. Dies ist für Aktoren insbesondere bei Beziehungen zwischen Gestaltparametern und Ein- bzw. Ausgangsgrößen gegeben (z. B. Aspektverhältnis, Leistungsdichte oder Wirkungsgrad).

Der Vor- und Nachteil von Kennzahlen liegt in der Einfachheit der Abbildung. Vielfach werden Kennzahlen als fixe oder als zumindest lineare Zusammenhänge verstanden, was aber nicht der Fall sein muss. Bestimmte Kennzahlen z. B. bei der Auswahl von Zugmittelantrieben oder Wälzlagern sind daher in Nomogrammen oder Kennfeldern abgelegt, die diese nichtlinearen Zusammenhänge abbilden. Zudem bilden die Kennzahlen meist Verhältnisse von Grenzwerten (z. B. maximale Leistung, Kraft, Weg usw. bezogen aufeinander) oder verallgemeinerten Parametern ab, denen bestimmte Annahmen (z. B. zu Durchmesser, Breite, Höhe bzw. ob bei der Bestimmung der Außenabmessungen Kühlrippen und Anschraubflächen zum Aktor gehören) zugrunde liegen. Diese mitunter unbekanntes Annahmen erschweren den Vergleich von Kennzahlen insbesondere für aufeinander bezogene Gestaltparameter.

Weiterhin bilden sich Kennzahlen i. d. R. aus Werten bekannter Aktoren. Sie sind somit auf den Stand der Technik bezogen, was insbesondere bei der Skalierung von Lösungen besondere Beachtung erfordert. Für einen Vergleich verschiedener Aktorprinzipie können zudem nur Kennzahlen genutzt werden, die aus Parametern gebildet wurden, die für alle verglichenen Prinzipie Gültigkeit besitzen. Dies reduziert die Zahl der Kennzahlen für alle Aktoren auf die aus Beziehungen zwischen Gestalt-, Ein- und Ausgangsparametern gebildeten.

Aus der vorgestellten Einteilung der Parameter in quantitative, qualitative und zusammengefasste lässt sich bei fehlender Kenntnis oder Erfahrung zu

Tabelle 4.2: Auswahl und Einteilung von möglichen Kennzahlen am Beispiel eines translatorischen Aktors; Werte zu $b, l, h, m, V, \Delta s, F_{\text{Aktor}}, W_{\text{Aktor}}, W_{\text{Eingang}}$ und W_{Ausgang} können Extrem-, Durchschnitts-, Nennwerte oder verallgemeinerte Werte usw. sein. In den mit „-“ gekennzeichneten Feldern sind Kennzahlen möglich, aber nicht sinnvoll.

Kennzahl	Einheit/ Zusammenhang	F_{Aktor}	W_{Aktor}
Steifigkeits- kennzahlen	$\left[\frac{N}{mm} \right]$	$\frac{F_{\text{Aktor}}}{l}; \frac{F_{\text{Aktor}} \cdot F_{\text{Aktor}}}{b}; \frac{F_{\text{Aktor}}}{h}$	$\frac{W_{\text{Aktor}}}{b \cdot h}; \frac{W_{\text{Aktor}}}{b \cdot l}; \frac{W_{\text{Aktor}}}{l \cdot h}; \frac{W_{\text{Aktor}}}{\Delta s \cdot l}$
	$\frac{\text{Größe } X}{\Delta s}$	-	$\frac{W_{\text{Aktor}}}{\Delta s}$
Spannungs- kennzahlen	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\frac{F_{\text{Aktor}} \cdot \Delta s}{V}$	$\frac{W_{\text{Aktor}}}{V}$
	$\frac{\text{Größe } X}{A}$	$\frac{F_{\text{Aktor}}}{b \cdot h}; \frac{F_{\text{Aktor}}}{b \cdot l}; \frac{F_{\text{Aktor}}}{h \cdot l}$	$\frac{W_{\text{Aktor}}}{b \cdot h}; \frac{W_{\text{Aktor}}}{b \cdot l}; \frac{W_{\text{Aktor}}}{l \cdot h}$
Dichte- kennzahlen	$\left[\frac{kg}{mm^3} \right]$	-	-
	$\frac{\text{Größe } X}{V}$	$\frac{F_{\text{Aktor}}}{V}$	$\frac{W_{\text{Aktor}}}{V}$
spezifische Kennzahlen	$\frac{\text{Größe } X}{kg}$	$\frac{F_{\text{Aktor}}}{m}$	$\frac{W_{\text{Aktor}}}{V}$
dimensionslose Kennzahlen	-	-	$\frac{W_{\text{Ausgang}}}{W_{\text{Eingang}}} = \eta$

möglichen Lösungen eine Empfehlung für das Vorgehen bei der Aktor- und Aktorprinzipauswahl ableiten. Um die Suche schnellstmöglich zu begrenzen, werden die möglichen Aktoren und Aktorprinzip durch eine Klassifikation anhand weiterer qualitativer Parameter (z. B. Forderungen durch das Umfeld wie Lebensmitteltauglichkeit, EMV-Verträglichkeit usw.) eingeschränkt. Anschließend können die Ein- und Ausgangsgrößen genutzt werden, um die Suche weiter zu verfeinern und – ggf. unter Nutzung von Kennzahlen – solange weitere Parameter zu suchen, bis eine hinreichend kleine Zahl an möglichen Aktoren oder Aktorprinzipen verbleibt (Abbildung 4.3).

Die Suche von Aktoren orientiert sich dabei stets an bekannten Parametern und Größenordnungen (z. B. an bekannten Aktoren oder geforderten Bauräumen). Für die Auswahl eines Aktorprinzips wird daher zunächst nach Aktoren gesucht, die eine „möglichst ähnliche“ Parameterkonfiguration besitzen. Es werden so auf Basis der Vorgaben und der ggf. aus bekannten Vorgängern oder Lösungen durch den Entwickler für jede Auswahl anhand der bekannten Parameter spezifische Verhältnisgrößen/Kennzahlen gebildet. Für die Suche selbst sind dabei drei Ergebnisse denkbar:

- I. Die Anforderungen werden von mehreren Aktoren verschiedener Aktorprinzip erfüllt oder
- II. Die Anforderungen werden von Aktoren genau eines Aktorprinzips erfüllt oder
- III. Die Anforderungen werden von keinem Aktor erfüllt.

Gesucht wird dabei stets in Datenbanken und Katalogen, ggf. mit in diesen integrierten Auswahl- oder Suchhilfen. Diese Datenbasen werden im Weiteren zusammenfassend als *Konstruktionskataloge* bezeichnet.

Für den ersten Fall können weitere Parameter zur Auswahl herangezogen werden oder es wird durch Wichtung der erfüllten Parameter eine Auswahl



Abbildung 4.3: Nutzung und Konkretisierung verschiedener Parameter bei der Aktor- und Aktorprinzipauswahl. Iterationsschleifen zwischen den einzelnen Schritten sind möglich.

getroffen. Im zweiten Fall ist die Suche beendet und ein Aktorprinzip gefunden. Für dieses kann – ggf. unter Berücksichtigung weiterer Eigenschaften – ein Aktor gesucht und ausgewählt werden.

Findet sich keine Lösung (dritter Fall), die den Anforderungen entspricht, ist eine Auswahl nicht möglich. Die Abweichungen zwischen den gesuchten und in Konstruktionskatalogen gefundenen Parametern liefern keine Aussage darüber, welches der Aktorprinzipie die geforderten Parameter erfüllen könnte und zur Weiterentwicklung lohnt. Eine Suche nach den den Anforderungen am nächsten kommenden Aktorprinzipien ist hierfür notwendig doch in aktuellen Konstruktionskatalogen nicht bekannt.

Im folgenden Kapitel werden der Aufbau der Konstruktionskataloge sowie die Ordnung der Daten in diesen betrachtet. Weiterhin sollen auf Konstruktionskatalogen basierende Ansätze für eine Unterstützung bei der Aktorprinzipauswahl vorgestellt werden.

5 Bestehende Hilfsmittel für die Aktor- und Aktorprinzipauswahl

Grundlage für die Auswahl von Aktoren bei der Entwicklung von Bewegungssystemen sind gegenwärtig die Kenntnisse des Ingenieurs. Diese bilden sich aus der Gesamtheit seines konkreten und impliziten Wissens, Erfahrungen sowie Vorlieben und sind begrenzt.

Als Hilfswerkzeuge zur Erweiterung des Wissens des Entwicklers bei der Auswahl von Aktoren bzw. der Bestimmung von Aktorprinzipen dienen derzeit allein Konstruktionskataloge. Von diesen sind Produkt- bzw. Herstellerkataloge für die Aktor- und auch Aktorprinzipauswahl von besonderer Bedeutung.

Üblicherweise sind diese Konstruktionskataloge „Papierdokumente“. Das heißt, wenngleich in digitalisierter Form (CD, DVD oder online) per Rechner verfügbar, sind sie für den Nutzer abgeschlossene Dokumente mit vorgeschriebenen Ordnungskriterien und unveränderlichem Inhalt. Dies gilt auch für vermeintlich *interaktive* Kataloge, die eine Parametereingabe ermöglichen und intern einige der in Abbildung 3.3 dargestellten Berechnungsschritte durchführen. Folglich bilden die im Katalog zusammengefassten Daten – bestenfalls – den Stand der Information zum Zeitpunkt der Katalogerstellung ab. Insbesondere gedruckte Kataloge „altern“ daher schnell.

Konstruktionskataloge und -katalogsysteme sind beständiger Gegenstand konstruktionswissenschaftlicher Betrachtung. Ihre Grenzen wurden in verschiedenen Abhandlungen vielfach diskutiert (beispielhaft seien hier als sehr umfangreiche Beiträge nur [Rot00] und [VDI 2222] genannt). Daraus ergaben

sich vielfältige Kriterien und Sichtweisen zur Einteilung von Konstruktionskatalogen, die im Folgenden bezogen auf die Akteurauswahl diskutiert werden sollen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es über die genannten Konstruktionskataloge hinaus verschiedene Ansätze digitaler Datenbanken/-sammlungen gibt, die von verschiedenen Nutzern, ggf. mit beschränkten Rechten erstellt, gepflegt und auch erweitert werden können. Diese meist als *Content-Management-Systeme* oder *Wikis* bezeichneten Datenverwaltungssysteme erlauben das Sammeln und Editieren von Informationen in verschiedenen Datenformaten.

Neben firmeninternen Systemen (*Enterprise-Wikis* bzw. *Firmenwikis*) wurden solche Systeme auch für die Unterstützung des Entwicklungsprozesses untersucht. Beispiele hierfür sind *thekey* [BLA01] und dessen Weiterentwicklung *pinngate* [KKB11]. Deren Ziel ist das Sammeln und Verfügbarmachen von Methoden, Prozessen, Lösungen für Lehr-, Lern- und vereinzelte Anwendungsaufgaben der Produktentwicklung.

Diese Systeme unterscheiden sich von Konstruktionskatalogen im Wesentlichen dadurch, dass sie primär zur Verknüpfung/Verlinkung von verschiedenen Informationen (z. B. Methoden, Lösungen, Prozessen usw.) gedacht sind. Wenngleich diese um Suchfunktionalitäten erweiterten Datenbanken/*Content-Management-Systeme* vereinzelt Daten zu Akteuren enthalten, unterstützt, soweit dem Autor bekannt, keines dieser Systeme die Akteur- oder Akteurprinzipauswahl im Entwicklungsprozess oder den Vergleich einzelner Akteure. Diese Systeme werden daher im Zusammenhang mit der Akteurauswahl und der Darstellung der dazu aktuell verfügbaren Hilfsmittel nicht weiter betrachtet.

5.1 Einteilung von Konstruktionskatalogen

Allgemein handelt es sich bei einem Konstruktionskatalog um eine zwei-dimensionale Darstellung von Daten, wobei die Inhalte im Sinne einer Matrix bzw. Tabelle nach bestimmten Gesichtspunkten geordnet und gegliedert sind. Ein Konstruktionskatalog ist daher als ein anhand zweckbestimmter Kriterien strukturierter Speicher von Lösungselementen anzusehen [GFS94, Wan10]. Art und Aufbau von Konstruktionskatalogen werden ausführlich in [VDI 2222] beschrieben.

Die Kataloge selbst können nach verschiedenen Ordnungskriterien eingeteilt werden. Bekannt sind Einteilungen anhand der Phasen des Entwicklungsprozesses, in Beziehungs-, Lösungs- und Herstellerkataloge usw. (Tabelle 5.1).

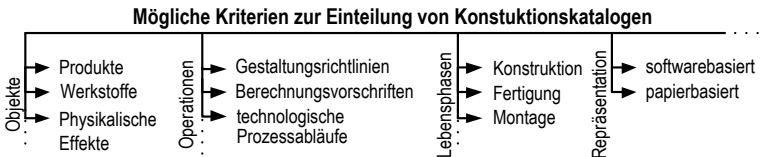


Abbildung 5.1: Auswahl von möglichen Ordnungskriterien von Konstruktionskatalogen (eine ähnliche Einteilung findet sich in [GB05]).

Für die Domäne des Maschinenbaus bedeutende Katalogsammlungen lieferten KOLLER [Kol98], EHRENSPIEL [Ehr03] und ROTH [Rot00] zu:

- Lösungen und Herangehensweisen [Rot00],
- physikalischen Effekten⁶ [VDI 2222, Kol98, Ehr03] sowie
- Operationen [Kol98].

⁶ Einen Ansatz der Effekte, Lösungen und Herangehensweisen gleichermaßen beinhaltet, zeigt [Kah05] auf.

Für die Aktor- und Aktorprinzipauswahl ist eine Unterscheidung der Konstruktionskataloge anhand der Art der Daten und der *Zugriffsmerkmale* zweckmäßig. *Zugriffsmerkmale* sind ausgewählte und – aus Sicht des Katalogerstellenden – maßgebliche *Eigenschaften* des technischen Produktes und werden im Zugriffsteil zusammengefasst [Rot00]. Sie dienen zur Suche innerhalb eines Konstruktionskataloges, dessen Beschreibungsteil die maßgeblichen *Merkmale*⁷ des technischen Produktes enthält. Hinsichtlich der Zugriffsmerkmale werden hierbei *Operations-*, *Objekt-* und *Lösungskataloge* unterschieden [Rot00, VDI 2222].

Aufgrund der Zugriffsmerkmale sind Konstruktionskataloge wiederum für verschiedene Phasen des Entwicklungsprozesses bzw. Stadien der Konkretisierung des technischen Produktes während der Entwicklung unterschiedlich gut nutzbar. ROTH folgend steigt der Informationsgehalt der Angaben in einem Konstruktionskatalog proportional zur Konkretisierung und umgekehrt proportional zur Komplexität der im Katalog enthaltenen Lösungen-/Lösungselemente [Rot00]. Eine Einteilung in Anlehnung an ROTH zeigt Tabelle 5.1.

Mit der Konkretisierung muss die Zahl der Angaben zur Gestalt eines Systems steigen, während mit der Komplexität eines Systems die Zahl der Angaben zu dessen Funktion zunehmen (Tabelle 5.2). Eine entsprechende Einteilung empfehlen [VDI 2222, Rot00]. Konstruktionskataloge enthalten somit abstrakte Lösungen für komplexe oder konkrete Lösungen elementarer Probleme.

Für die Aktor- und Aktorprinzipauswahl sind den in den Tabellen und gezeigten Einteilungen folgend:

Lösungskataloge für Informationen, bezogen auf konkrete Restriktionen (Hersteller, Bauform, Baureihe, Effektketten, ...) und

⁷ Die an dieser Stelle getroffene Unterscheidung in Merkmale und Eigenschaften wird in Kapitel 7 erläutert.

Tabelle 5.1: Zuordnung der Katalogarten zu den verschiedenen Phasen des Entwicklungsprozesses (in Anlehnung an [Rot00]). Hervorgehoben sind die für die Suche von Aktoren und die Auswahl von Aktorprinzipien nutzbaren Arten von Konstruktionskatalogen.

		PHASEN DES ENTWICKLUNGSPROZESSES		
		Konzipieren	Entwerfen	Detaillieren
Katalogarten	Operationskataloge	Regeln / Richtlinien zum Vorgehen in einzelnen Phasen des Entwicklungsprozesses (z. B. zur Kombination phys. Effekte)	Konstruktionsprinzipie	Regeln / Richtlinien (z. B. Tolerierung, DfX)
	Objektkataloge	Physikalische Effekte	Aktorprinzipie	grundlegende Bauformen
	Lösungskataloge	Phys. Effekte zur Realisierung definierter Funktionen	Aktorbaureihen	Produktkataloge von Herstellern

Entwicklungsfortschritt

Gegenständlichkeit

Objektkataloge für allgemeingültige Informationen (physikalische Effekte, Wirkprinzipie, Bauformen)

von Bedeutung. Dies sind im Wesentlichen Hersteller- bzw. Produktkataloge (Lösungskataloge) sowie Sammlungen grundlegender Effektketten (Objektkataloge). Von diesen können erste als *Kataloge zur Aktorauswahl* und letztere als für die *Aktorprinzipiauswahl* nutzbar aufgefasst werden. Im Weiteren sollen die *Kataloge zur Aktorauswahl* sowie die für die *Aktorprinzipiauswahl* nutzbaren Effektketten kurz erläutert werden.

5.2 Kataloge zur Aktorauswahl

Grundlage für die Auswahl von Aktoren bilden die Produktkataloge verschiedener Hersteller/Zulieferer. Bei diesen handelt es sich fast ausschließlich um Papier- und web-basierte Produktkataloge. Produktkataloge bilden – ggf. nur teilweise – den Lieferumfang eines bestimmten Herstellers ab. Ziel eines solchen Kataloges ist es, das Produktportfolio eines Herstellers zum

Tabelle 5.2: Einordnung der Konstruktionskataloge in Abhängigkeit von den Phasen des Entwicklungsprozesses und der Komplexität der Entwicklungsaufgabe. (in Anlehnung an [VDI 2222])

Aufgabe		Zunehmende Komplexität				z. B. Leistung von 20 W bei hohem Wirkungsgrad über einen Weg von 20 µm übertragen	...	z. B. Linearbewegung zwischen bewegten Baugruppen übertragen P<20 W	...	z. B. Leistung von 20 W bei hohem Wirkungsgrad über einen Weg von 20 µm übertragen
Konstruktionsgegenstand	Verbale oder formale Darstellung	z. B. Linearbewegung direkt übertragen P<20 W		z. B. Linearbewegung zwischen bewegten Baugruppen übertragen P<20 W		...	z. B. mechanische, hydraulische und elektromechanische Schaltungen zur Übertragung von Schubbewegungen	...	z. B. Katalog: allgemeine Funktionsstruktur	
	Funktionsstrukturen	z. B. Katalog: elektromagnetische Aktorprinzipie		z. B. Katalog: Antriebsprinzipie		...	z. B. Katalog: Leistungsendstufen für Piezoantriebe	...	z. B. Katalog: Leistungsendstufen für Piezoantriebe	
	Prinzipischnen	z. B. Katalog: Stapelpiezoaktoren		z. B. Katalog: Bauformen von Piezoaktoren		...	Kataloge nur für Teile/Elemente sinnvoll z. B. Katalog für Prinzipie von Leistungsendstufen für Stapelpiezos	...	Kataloge nur für Teile/Elemente sinnvoll z. B. Katalog für Prinzipie von Leistungsendstufen für Stapelpiezos	
	Technische Entwürfe	z. B. Katalog: übliche Leistungsbereiche von Stapelpiezoaktoren		z. B. Katalog: Herstellerkatalog: Piezomaterialien			
	Stücklisten, Zeichnungen						
Aufbereiten	Konzipieren	Entwerfen	Gestalten		In den leeren Feldern erscheinen Kataloge nicht sinnvoll					
Zunehmende Konkretisierung										

Zweck des Verkaufs zu präsentieren. Die Ordnung der Informationen in einem solchen Katalog wird daher auch aus Marketingaspekten erfolgen. Die Ordnungskriterien dienen im übertragenen Sinne der Produkt- und nicht der Lösungsauswahl und behindern den Vergleich mit Aktoren anderer Hersteller häufig.

Grundsätzlich können Produktkataloge nicht alle Informationen des Herstellers zu den einzelnen Aktoren wiedergeben. Die Kontaktaufnahme mit dem jeweiligen Hersteller, zum Zweck der Abstimmung oder Gewinnung ergänzender Informationen zum Produkt, kann als Marketinginstrument angesehen werden [RB93, BR94, Con10].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Menge der betrachteten und verglichenen Aktoren durch:

- die verfügbaren und zu Rate gezogenen Kataloge,
- die Abbildung der als Anforderungen formulierten Parameter im Zugriffsteil der Kataloge,
- die Aktualität des Kataloges und
- der Vergleichbarkeit der in verschiedenen Katalogen enthaltenen Parameter

beschränkt wird.

Weiterhin ist hervorzuheben, dass diese Informationen in Konstruktionskatalogen häufig nicht auf die Aktoren begrenzt sind. Vielmehr verstehen sich viele Aktorhersteller als „Systemlieferanten“ und bieten meist vielfältige weitere Elemente bis hin zu „Komplettlösungen“ (für die der Entwickler idealerweise „nur“ die Anforderungen formulieren muss) für Bewegungssysteme an. Für die betreffenden Produktkataloge gilt der Aspekt der Vergleichbarkeit und Übersichtlichkeit verschärft.

Für den Entwickler selbst erscheint es zudem kaum zweckmäßig Produktkataloge möglichst vieler verschiedener Hersteller mit Aktoren ähnlichem Leistungsspektrums zu durchsuchen. Ausgangspunkt einer Suche werden

die Kataloge der Aktorhersteller sein, die bereits als Zulieferer bekannt sind. Auch bieten die Komplettlösungen Vorteile hinsichtlich Verträglichkeit der Elemente des Bewegungssystems und ggf. auch der Kosten. Die Auswahl oder zumindest die Eingrenzung auf geeignet erscheinende Aktorprinzipie sowie die Unterstützung bei der Aktorprinzipauswahl gewinnt hierbei jedoch an Bedeutung.

5.3 Für die Aktorprinzipauswahl nutzbare Konstruktionskataloge

Kataloge für Aktorprinzipie allgemein sind nicht bekannt. Gleichwohl gibt es Konstruktionskataloge und Literatur, die einzelne Wirkprinzipie und deren Bauformen systematisieren (z. B. [SK06, KEQ08, Giß05]).

Zur Bestimmung eines neuen Aktorprinzips können jedoch Effektketten gebildet werden, die die Ein- und Ausgangsgrößen verschiedener physikalischer Effekte in einer geeigneten Abfolge übertragen, bis die gegebene Eingangsgröße innerhalb der Grenzen physikalischer Machbarkeit (bzw. der Grenzen der Anforderungen) in die gewünschte Ausgangsgröße gewandelt ist [VDI 2222, Ehr03].

Die Katalogsysteme von ROTH [Rot00] und KOLLER [Kol98] sind auf das Ableiten von Effektzusammenhängen beziehungsweise auf das Bilden von Effektketten ausgelegt. Diese unterscheiden sich durch die zugrunde gelegten Ordnungsgesichtspunkte, sowohl voneinander als auch von den Produktkatalogen zu Aktoren. Sie erlauben bei Anwendung auf Aktorprinzipie eine Auslegung von einzelnen Gestaltparametern anhand einer Energie- bzw. Leistungsbeschreibung.

Diese Auslegung ist auf die in den physikalischen Effekten enthaltenen Parameter beschränkt und berücksichtigt darüberhinaus keine weiteren Beschränkungen (wie sie sich z. B. aus Rückwirkungen der Gestalt mit der Umgebung

oder auch aus Forderungen z. B. an die Fertigung ergeben können). Die Gestaltmerkmale können somit anhand der physikalischen Effekte weder hinreichend genau noch vollständig festgelegt/bestimmt werden.

Durch die Betrachtung von Effekten und Effektketten ist eine Entwicklung von Aktorprinzipien möglich, jedoch aufwändig und von äußerst grundsätzlichem/physikalischem Charakter. Komplizierte Effektketten ergeben eine Vielzahl an unbekanntem bzw. störenden Einflussgrößen, daher sind die Effektketten stets kritisch zu betrachten und so einfach wie möglich zu gestalten [Ehr03].

Was „einfach“ bedeutet ist dabei von der Effektkette selbst und den geforderten Parametern sowie Randbedingungen abhängig und kann meist nicht scharf abgegrenzt werden (i. d. R. wird jedoch eine kurze Effektkette mit einer geringen Anzahl an „Wandlungen“ angestrebt).

Die genannten Katalogsysteme wie auch die Herangehensweise bei der Nutzung von Effektketten adressieren physikalische Zusammenhänge. Informationen zur Gestaltung oder die Grenzen bei der Festlegung von Gestaltmerkmalen möglicher Aktorprinzipie gehen aus diesen Katalogsystemen nicht hervor.

5.4 Grenzen von Konstruktionskatalogen

Aufbau von und Suche in Konstruktionskatalogen sind und waren Gegenstand vieler Forschungsarbeiten. Die Grenzen von Konstruktionskatalogen werden im Wesentlichen in (z. B. [FLD04, GB05, KDF09]):

- der begrenzten und ggf. veralteten/alternden Datenbasis und
- dem starren Ordnungssystem der Daten in den Katalogen

gesehen.

Beides gilt für Konstruktionskataloge allgemein und ist auch auf die zur Aktor-/Aktorprinzipauswahl relevanten Kataloge übertragbar. Um einen Aktor schnell und zielgerichtet auswählen zu können, ist eine zweckmäßige Ordnung der Parameter im Katalog von Bedeutung.

Web-basierte Kataloge bieten hinsichtlich der Zugänglichkeit, Aktualisierbarkeit und möglichen Verbreitung sowie der meist möglichen Textsuche im Dokument gegenüber papiergebundenen Katalogen Vorteile. Gleichwohl sind auch web-basierte Kataloge zweidimensionale Abbildungen und hinsichtlich der ihnen zugrundeliegenden Ordnungsgesichtspunkte festgelegt.

Die Suche in verschiedenen (bspw. web-basierte) Katalogen erweitert die Zahl der betrachteten Aktoren und Aktorprinzipie zwar, als Problem erweist sich hierbei jedoch vielfach sowohl die Ordnung als auch die Filterung der Informationen/Daten in Herstellerkatalogen. Diese erfolgt meist nach Gesichtspunkten des Herstellers, die nicht denen des Nutzers entsprechen müssen. Grundsätzlich enthalten die Kataloge eine Auswahl an Parametern die sich je nach Hersteller und Katalog unterscheiden kann und meist nicht alle der gesuchten Parameter enthält. Ein Vergleich von Aktoren, selbst gleichen Aktorprinzipis, verschiedener Hersteller ist aufgrund der verschiedenen Parameter und Ordnungskriterien oft nur schwer, ein Vergleich verschiedener Aktorprinzipie meist gar nicht möglich.

Ein herstellerübergreifender und -unabhängiger Katalog wäre mit erheblichem Erstellungs- und Wartungsaufwand verbunden. Dieser Aufwand ist aus Sicht des (Aktor-) Herstellers nur für das eigene Produktportfolio und auf die Aktorprinzipie des Herstellers begrenzt tragbar. Weiterhin ist fraglich, ob eine Unterstützung beim Erstellen des Kataloges sowie bei der Vereinheitlichung der zum Teil bewusst verschiedenen Parameter durch die einzelnen Hersteller zu erreichen ist.

Für einen konventionellen Konstruktionskatalog, der Aktoren verschiedener Hersteller enthält, ergibt sich infolge der großen Datenmengen sowie

der Aktorprinzip- und Hersteller-spezifischen Parameter ein erheblicher Erstellungs- und Pflegeaufwand. Die Erstellung und der Erhalt erscheint nur bei wirtschaftlichem Interesse an einem solchen Katalog realistisch. Ein Ordnungssystem, welches die Auswahl von Aktoren aus einem solchen fiktiven Katalog unterstützen soll, muss zwingend die Zahl der in Betracht kommenden Aktoren/Aktorprinzipie und deren zugehörige Parameter reduzieren helfen.

5.5 Alternative Ansätze

Zur Überwindung der beschriebenen Grenzen von Konstruktionskatalogen sind einige Ansätze zur Auswahlunterstützung – wenn auch nicht in jedem Fall primär als Alternative zu Konstruktionskatalogen gedacht – bekannt. Von diesen adressieren Folgende die Problemstellung der Aktorauswahl bzw. sind hierfür besonders interessant:

- der *Funktion-Struktur-Speicher* [Han74, AFH69, GT78, Kal01], als sehr frühe und grundsätzliche Beschreibung eines softwarebasierten Katalogsystems zur Auswahl von *Strukturen*
- der *Actuator-Selector* [HFA97, ZAF02, BLF05], als Ansatz, verschiedenste Parameter für verschiedene Aktorprinzipie vergleichbar zu machen
- das *Web-based actuator selection tool* [MF05, Uni11], als Ansatz zum Vergleich und zur Auswahl verschiedener Aktorprinzipie⁸
- die *Electric Actuation Selection Aid* [Egb08, EB09], als umfassenden Ansatz zur direkten Unterstützung bei der Aktorauswahl.

Die verschiedenen Produktkataloge und Aktorauswahlhilfen diverser Hersteller sollen an dieser Stelle nicht näher betrachtet werden. Sie beziehen sich, wie zuvor beschrieben, auf das Portfolio der Hersteller und sind darüber

⁸ Das *Web-based actuator selection tool* trägt zwar den Aktor im Namen, die wenigen zugrundeliegenden Beispielaktoren beruhen jedoch auf sogenannten unkonventionellen Aktorprinzipien und haben sehr grundsätzlichen Charakter.

hinaus nicht für den Vergleich verschiedener Aktoren oder die Auswahl von Aktorprinzipien gedacht.

Im Folgenden sollen die genannten vier alternativen Ansätze kurz vor- und ihre Besonderheiten herausgestellt und anhand der wesentlichen Aspekte aller Datenbanken/Katalogsysteme (GUI/Nutzerführung, Such-/Auswahlalgorithmen, Datenbasis) verglichen werden.

Funktion-Struktur-Speicher F-S-S

Der Begriff des *Funktion-Struktur-Speichers (F-S-S)* wird bei HANSEN [AFH69, Han74] erwähnt. HANSEN beschreibt explizit ein rechnergestütztes Unterstützungswerkzeug und geht dabei umfassend – und im Hinblick auf die Entwicklung der Rechnertechnik früh – auf die Unterstützung des Konstrukteurs im Entwicklungsprozess durch Speichersysteme ein.

Nach HANSEN soll der *F-S-S* dem Ingenieur die Auswahl und Bewertung geeigneter Lösungen ermöglichen und ihn auf diese Weise im Entwicklungsprozess unterstützen. Der *F-S-S* beinhaltet dazu ein Speichersystem, welches dem Entwickler allgemein *Strukturen* zur Erfüllung gewünschter *Funktionen* bereitstellt. Dies entspricht den Anforderungen an ein Werkzeug zur Aktor/Aktorprinzipauswahl.

Als *Struktur* bezeichnet HANSEN in diesem Zusammenhang den durch Elemente und deren Relationen bestimmten inneren Aufbau eines technischen Produktes. Die *Struktur* beschreibt und betrachtet HANSEN ET AL. im Wesentlichen nach Gesichtspunkten der Gestalt oder Funktion. Diesen Gesichtspunkten liegen unterschiedliche Annahmen zugrunde und die Strukturen werden zu verschiedenen Zwecken erstellt. Für eine Unterstützung durch den *F-S-S* sind folglich verschiedene Abstraktionsgrade von Strukturen erforderlich [Han74, AFH69, Spe83, Sch82].

Der *F-S-S* ordnete sich bei HANSEN in ein Speichersystem zur Begleitung des gesamten Entwicklungsprozesses ein, welches auch *technische Verfahren*

und *Programme* zur Analyse und Synthese technischer Produkte umfasste⁹.

Der *F-S-S* stellt somit ein Konzept für einen rechnerbasierten Katalog mit angekoppelter Auswahlunterstützung dar. Die Einteilung des theoretisch betrachteten Speichersystems enthält (Abbildung 5.2):

- Operationen im Programmspeicher sowie
- Objekte und Lösungen im Funktion-Struktur-Speicher.

Als Besonderheit findet sich eine weitere Kategorie von:

- technischen Verfahren,

die sowohl Operationen als auch Lösungen sein können und Vorgänge oder bestimmte Abfolgen einzelner Vorgängen sowie ggf. Informationen über konkrete zur Realisierung der Verfahren geeignete technische Gebilde enthält [Han68]. Aus dieser Unterteilung ergibt sich, zusammen mit dem von HANSEN grob beschriebenen allgemeinen Wissensspeicher und der Eingabe-/Ausgabemöglichkeit, der in Abbildung 5.2 dargestellte Aufbau des *F-S-S*.

Die Grenzen bei der Schaffung eines *F-S-S* sah HANSEN im erheblichen Speicherbedarf und in den unterschiedlichen Abstraktionsgraden der Strukturbeschreibung. Diese stellen hohe Anforderungen an ein geeignetes Abfrage- und Ordnungssystem.

Ordnungssystem und Aufbau eines *F-S-S* wurden in weiteren Arbeiten näher untersucht [Pre76, GT78]. Diese grundlegenden Arbeiten waren aufgrund des damaligen Standes der Technik auf karteikartenähnliche Ordnungssysteme mit starkem Bezug auf das verwendete Beispiel, das Relais, begrenzt. Sie sind nur eingeschränkt auf die Aktorauswahl übertragbar, liefern aber Ansatzpunkte zu Aufbau und Einordnung der speicher-/katalogbasierten Unterstützung des Entwicklers.

⁹ Die Begrifflichkeiten *technische Verfahren* und *Programme* werden in [Han74] erläutert und sind mit einer zum Teil gegenüber anderen Quellen abweichenden Bedeutung belegt.

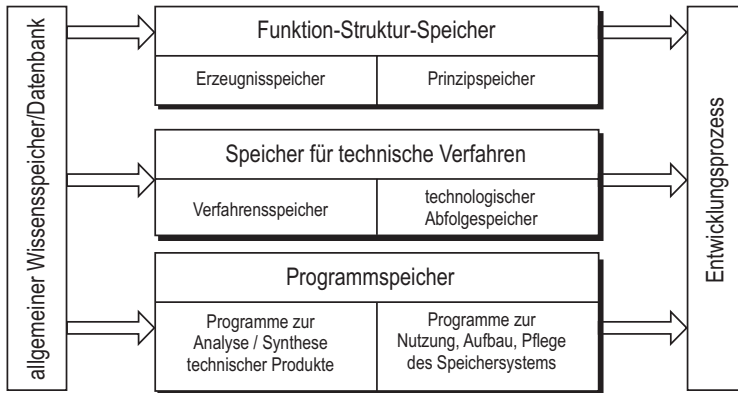


Abbildung 5.2: Grundaufbau des *Funktion-Struktur-Speichers* nach HANSEN (in Anlehnung an [AFH69, Han74, Pre76, GT78])

Der Ansatz des *F-S-S* wurde von KALLENBACH für die Synthese heterogener Systeme aufgegriffen [Kal01, KBS97]. Er schlägt die Verwendung eines *F-S-S* in der Phase des Übergangs von der Funktion zur Struktur¹⁰ für Antriebssysteme vor. Für die Synthese eines heterogenen Systems soll dieser, anhand der für Funktion und Struktur geforderten Parameter, zunächst die möglichen Datensätze von Strukturen vorauswählen. Anschließend soll durch den Rechner der zutreffende oder bestmögliche Datensatz – also die zutreffende/bestmögliche (Teil-)Struktur – vorgeschlagen werden. Eine Grundvoraussetzung für eine solche Auswahlunterstützung ist ein Datenspeicher mit einer umfassenden Anzahl von Funktion-Struktur-Beziehungen.

Obgleich sich KALLENBACH auf den *F-S-S* bezieht, legt die von ihm beschriebene rechnergestützte Auswahl, im Vergleich zu HANSEN eine andere Interpretation des *F-S-S* Aufbaus nahe (Abbildung 5.3).

Durch die Beschränkung auf Antriebssysteme sowie den erheblichen technischen Fortschritt der Informationsverarbeitung traten die Anforderungen

¹⁰ Es wird derselbe Strukturbegriff wie bei Hansen verwendet, jedoch mit Betonung der Heterogenität.

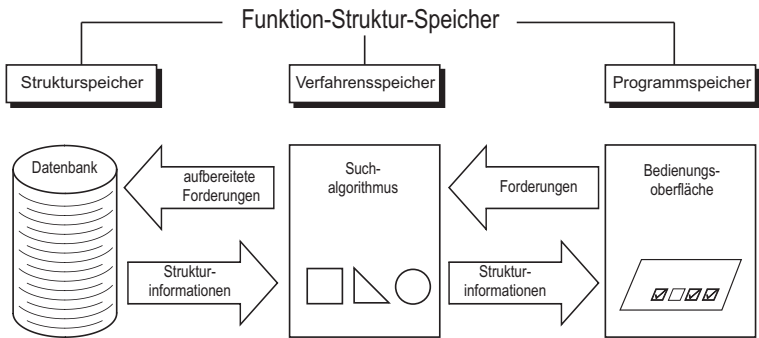


Abbildung 5.3: Aufbau des *Funktion-Struktur-Speichers* für die Aktorauswahl anhand der von KALLENBACH [Kal01] beschriebenen Funktionsweise.

an Speicher- und Berechnungsbedarf bei KALLENBACH in den Hintergrund [Kal01]. Durch die beabsichtigte Auswahl und die Heterogenität der Systeme ist die Ordnung der möglichen Datensätze nach – einer überschaubaren Anzahl an – allgemeingültigen Kriterien jedoch eine wesentliche Herausforderung. Wenngleich diese Kriterien nicht angegeben werden, ist jedoch hinsichtlich der Aktoren eine ähnliche Einteilung wie in Abbildung 4.1 dargestellt (die wiederum an [KB91] angelehnt ist) nahe. Das Auswahlverfahren unter Berücksichtigung der Vernetzung der Teilsysteme lässt KALLENBACH ebenso offen wie Hinweise zu Aufbau und Gestaltung von Datenbasis und GUI.

Der *F-S-S* stellt ein Konzept für einen rechnergestützten Konstruktionskatalog mit der Besonderheit dar, alle Entwicklungsphasen und dies domänenübergreifend mit einem Werkzeug unterstützen zu wollen.

Ihm sind somit die Eigenschaften der Konstruktionskataloge sowie insbesondere die mit der Pflege und dem Aufbau der Datenbasis verbundenen Schwierigkeiten gemein. Wie bei jedem rechnergestützten Katalogsystem besteht jedoch die grundsätzliche Möglichkeit zu einer schnellen Aktualisierung der gespeicherten Daten wie auch des Zugriffsteils. Weiterhin bietet er im

Gegensatz zu papiergebundenen Katalogen die Möglichkeit der algorithmenunterstützten Auswahl. Historisch sehr früh und über einen Konstruktionskatalog hinausgehend wird auch der Aspekt der „Verlinkung“ von Daten über die Abstraktionsebenen der „Strukturen“ hinweg betont (was sich auch heute bspw. in [Con10] wiederfindet).

Von HANSEN und KALLENBACH wurde die Umsetzung des *F-S-S* theoretisch behandelt, exemplarische Umsetzungen [Pre76, GT78] waren ebenfalls papiergebunden. Hinweise oder Vorgaben zur algorithmischen Umsetzung, Nutzerführung oder zur Gestaltung der GUI sind für den *F-S-S* nicht verfügbar.

Actuator selector

Der *Actuator-Selector* überträgt den Ansatz des *Material-Selectors* [Ash00, AWF06] auf die Aktorauswahl. Hierbei werden verschiedene Aktoren anhand von Kennzahlen (wie beim *Material-Selector* im Original als *performance indices* bezeichnet) verglichen. Die von HUBER/ZUPAN/ASHBY gewählten Kennzahlen¹¹ lassen den Ausgangspunkt der Werkstoffauswahl deutlich erkennen [HFA97]:

- Verhältnis von Aktorkraft zu Aktorquerschnittsfläche (*actuation stress*),
- maximale (mechanische) Aktorspannung (*maximum actuation stress*),
- maximale Aktordehnung (*actuation strain*),
- Verhältnis von Aktormasse zu Aktorvolumen (*actuator density*),
- Verhältnis von Aktorleistung zu Aktorvolumen (*volumetric power*),
- Wirkungsgrad (*efficiency*),
- Aktorsteifigkeit (*actuator modulus*),
- Verhältnis von Aktorleistung zur Ausgangslänge des Aktors (*stroke work coefficient*) und

¹¹ Die ZUPAN [ZAF02] entnommen Originalbegriffe sind kursiv und in Klammern aufgeführt. Die Beschreibung folgt den Ausführungen aus [ZAF02]. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Abgrenzung des Begriffs *Aktor/actuators* bei ZUPAN nicht exakt nachvollzogen werden kann und daher von der in *Kapitel 2* dargestellten abweichen kann.

- kleinstmögliche Schrittweite (*strain resolution*).

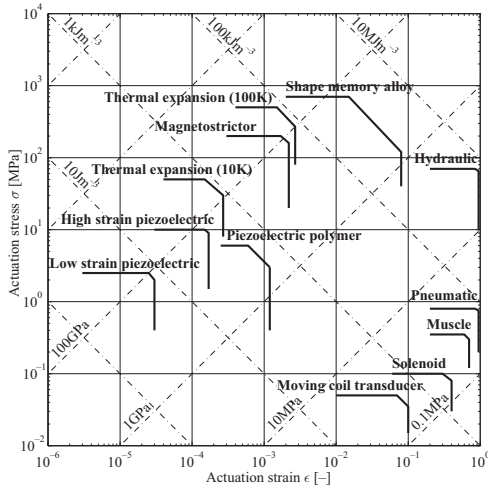
Eine Kennzahl fasst mehrere Eigenschaften zusammen. Von ZUPAN wurde die Auswahl der Größen dadurch erweitert, dass auch die „elementaren“ Eigenschaften (z. B. Masse oder Verfahrensweg) mit betrachtet werden können [ZAF02].

Die Besonderheit des *Actuator-Selectors* ist die Darstellung der *Möglichkeitsbereiche* der Aktorprinzipie in Form vereinfachter „Blasen¹²“/elliptischen Punkten. Diese ergeben sich aus einzelnen bekannten Aktoren, die jedoch nicht mehr einzeln ermittel- bzw. in der Abbildung erkennbar sind. ZUPAN nutzte hierfür nach eigenen Angaben insgesamt 220 Aktoren 18 verschiedener Aktorprinzipie. Dem Ansatz und damit den *Möglichkeitsbereichen* liegt die Annahme zugrunde, dass in dem durch einzelne Aktoren begrenzten Bereich Aktoren desselben Aktorprinzips grundsätzlich technisch realisierbar sind.

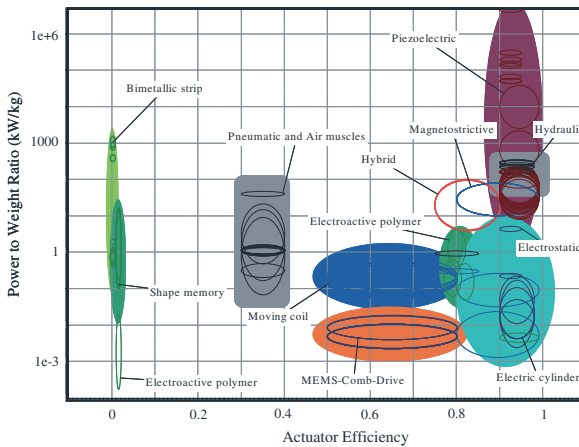
Die Ausgabe der Suchergebnisse soll über eine graphische Nutzeroberfläche (im Kontext einer Rechneranwendung auch GUI, *Graphic-User-Interface* oder *Frontend* genannt), basierend auf den vom Nutzer gewählten Kennzahlen erfolgen (Abbildung 5.4). Soweit dem Autor dieser Arbeit bekannt, sind für alle Aktoren die genannten Kennzahlen hinterlegt, das sich daraus ergebende mehr als zweidimensionale Parameterfeld wird jedoch auf zweidimensionale Darstellungen heruntergebrochen (diese repräsentiert wiederum ggf. je Koordinatenachse zwei zu einer Kennzahl zusammengefasste Parameter). Über die dargestellten Bilder hinaus ist zu der genannten Software oder GUI jedoch nichts bekannt. Aufgrund der Entstehung in Anlehnung an und durch Mithilfe ASHBYS sind jedoch Ähnlichkeiten zu vermuten.

Der Ansatz des *Actuator-Selectors* bietet drei interessante Vorteile gegenüber den beschriebenen Konstruktionskatalogen:

¹² *Bubbles* in einem *Bubblechart*



(a) Darstellung der *Möglichkeitsbereiche* von Aktoren zum Zweck der Auswahl nach HUBER, (entnommen aus [HFA97])



(b) Darstellung der *Möglichkeitsbereiche* von Aktoren zum Zweck der Auswahl nach ZUPAN, (entnommen aus [ZAF02])

Abbildung 5.4: Gegenüberstellung verschiedener Repräsentationsformen der Arbeitsbereiche von Aktoren nach dem Ansatz des *Actuator-Selectors*

- durch die graphische Darstellung ist ein Vergleich der aus jeweils einzelnen bekannten Aktoren abgeleiteten *Möglichkeitsbereiche* verschiedener Aktorprinzipie möglich,
- die *Möglichkeitsbereiche* der Aktorprinzipie können durch eine kleine Anzahl von geeignet verteilten Aktoren der verschiedenen Aktorprinzipie dargestellt werden und
- durch die Verwendung von Kennzahlen ist die Darstellung von mehr als zwei Parametern und deren Abhängigkeiten in einem zweidimensionalen Plot möglich.

Inwieweit die dem *Actuator-Selector* zugrundeliegende Datenbank über ein eigenständiges Ordnungssystem verfügt, ist nicht bekannt. Die Aktoren wie auch die *Möglichkeitsbereiche* der Aktorprinzipie können damit nicht geprüft und nur schwer zielgerichtet erweitert werden.

Problematisch ist weiterhin, dass die „Entfernungen“ zu den *Möglichkeitsbereichen* der einzelnen Aktorprinzipie nicht abgeschätzt werden können. Ursache hierfür ist zum einen, dass aus einer geringen Anzahl bekannter Aktoren unbekannter Hersteller auf nicht nachvollziehbare Weise ein genereller *Möglichkeitsbereich* für ein Aktorprinzip abgeleitet wird.

Weiterhin kann bei einem Suchparametersatz, der sich (unter Berücksichtigung der logarithmischen Darstellung) auf einem Diagramm gleich weit von den *Möglichkeitsbereichen* zweier Aktorprinzipie befindet, nicht geschlossen werden, dass dieser Parametersatz mit jedem Aktorprinzip gleich „schwer“ erreicht werden kann. Bei Suchparametersätzen außerhalb oder „in der Nähe“ der *Möglichkeitsbereiche* stellt sich somit die Frage, welches Aktorprinzip zweckmäßigerweise weiterentwickelt werden kann. Hierfür wäre ein verbesserte GUI und die Kenntnis der Bildungsvorschrift für die *Möglichkeitsbereiche* erforderlich.

Actuator Selection Tool

Eine web-basierte Umsetzung eines Aktorauswahlkonzeptes des *Actuator-Selector* findet sich beim *actuator selection tool*. Die Besonderheit stellen die betrachteten Aktoren dar. Durch die Betrachtung von prototypischen wissenschaftlichen Anwendungen ist die Zahl der betrachteten Aktoren begrenzt und die anhand der meist elliptischen Punkte dargestellten *Möglichkeitsbereiche* ggf. als unsicher anzusehen [Uni11, MVA04]. Es lassen sich jedoch einzelne Eigenschaften der jeweiligen Aktorprinzipie ableiten, die beim *actuator selection tool* in ähnlicher Weise wie beim *Actuator-Selector* dargestellt werden.

Es werden ausschließlich so genannte unkonventionelle translatorische Aktoren betrachtet. Die hinterlegten Parameter entstammen eigenen oder durch entsprechende Veröffentlichungen bekannten Untersuchungen (Tabelle 5.3, eine ähnliche nicht web-basierte Übersicht liefert KURIBAYASHI [Kur93]).

Electric Actuation Selection Aid

Einen weiteren Ansatz zur Aktorauswahl und deren Unterstützung ist die *Electric Actuation Selection Aid* nach EGBUNA [Egb08, EB09]. Ziel EGBUNAS war die Unterstützung der Aktorauswahl für die Automatisierung im Bereich der *Low-Cost-Automation*.

Unter *Low-Cost-Automation* wird die Verwendung bekannter, wenn möglich standardisierter Elemente, Programme und Verfahren zum Zweck der Erleichterung, Unterstützung oder zum Zweck des Ersatzes menschlicher Arbeit verstanden [Egb08, Ram11]. Hervorzuheben ist die Betrachtung der Relativkosten der Aktoren als Parameter für die Auswahl.

Aufgebaut ist das *Electric Actuation Selection Aid* ähnlich dem *F-S-S*. Es besitzt eine Datenbank, eine Nutzeroberfläche (für die *Electric Actuation Selection Aid* eine GUI, *Graphic-User-Interface*) und zugehörige Algorithmen zur Auswahl.

Die Besonderheit des Ansatzes besteht in der regelbasierten Auswahlunterstützung. Hierbei werden die Anforderungen an das Bewegungssystem mit bekannten Aktoreigenschaften und Anwendungsszenarien verglichen. Als Anwendungsszenario kann eine bekannte Musteranwendung verstanden werden.

Tabelle 5.3: Übersicht der im *actuator-selection-tool* betrachteten Aktoren (Aufteilung und Angaben nach [Uni11, MVA04], Eigenschaften orientieren sich an denen des *Actuator-Selectors*).

Aktorprinzip	Eigenschaften	weiterführende Quellen
Skelettmuskeln	<ul style="list-style-type: none"> ▪ bis zu 20 % Dehnung ▪ mech. Spannungen bis zu 350 kPa möglich ▪ variables Dehnungs-/ Spannungsverhältnis ▪ Wirkungsgrad bis zu 40 % ▪ enger Arbeitstemperaturbereich 	[Bar04, MVA04, HL92]
Dielektrische Elastomere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ große Dehnungen möglich (bis zu 300 %) ▪ mech. Spannungen im niedrigen MPa-Bereich möglich ▪ arbeiten mit kleinen elektrischen Strömen, aber hohen elektrischen Spannungen (> 1kV) 	[LKW07, Kof08, PKP02, CRK08]
elektroaktive Polymere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dehnung < 7% ▪ mech. Spannungen bis zu 45 MPa ▪ arbeiten mit kleinen elektrischen Strömen, aber hohen elektrischen Spannungen (> 1kV) 	[Bar04, Sme03, HAS06]
Flüssigkristall Elastomere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dehnungen von 2 % (bei feldgesteuerten) und bis zu 45 % bei (thermisch gesteuerten) möglich ▪ zeigen Kriecherscheinungen ▪ geringer Wirkungsgrad bei thermisch gesteuerten 	[Cla99, YYS03, LK06]
Leitfähige Polymere	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dehnungen von rund 2 % möglich ▪ mech. Spannungen bis 34 MPa möglich (5 MPa typisch) ▪ niedrige Betriebsspannung ~ 2 V 	[OS95, PVT10, SIL93]
thermisch gesteuerte Formgedächtnismetalle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dehnungen von 1 bis 8 % möglich ▪ mech. Spannungen bis 200 MPa möglich ▪ spezifische Leistung von bis zu 100 kW/kg 	[Ja95, LR97]
magnetisch gesteuerte Formgedächtnismetalle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dehnungen bis zu 10 % möglich ▪ mech. Spannungen < 9 MPa ▪ Arbeitsfrequenzen > 100 Hz möglich 	[TSJ02, UII96, GHU06]

Für diese werden bekannte und erprobte Lösungsmuster hinterlegt. Für die Auswahlunterstützung werden die Anforderungen an das Antriebssystem in der GUI eingegeben. Die Parameter, anhand derer die Auswahl vorgenommen werden kann, sind für die verschiedenen Anwendungsszenarien als Aktoreigenschaften hinterlegt.

Bei der Aktorauswahl erfolgt ein dualer Abgleich zwischen Anforderungen und bekannten Eigenschaften in Form einer unscharfen Suche. Die Anforderungen werden dabei nacheinander abgearbeitet, wodurch dem Anwender die Möglichkeit gegeben ist, eine Rangfolge der Anforderungen zu definieren. Weiter werden von EGBUNA Ausgabe- und Eingaberegeln definiert, die eine Anpassung der Eingabeparameter, anhand bereits getätigter Eingaben ermöglichen. Ausgegeben werden die „Lösungen“, die sowohl den Aktoranforderungen, als auch dem Anwendungsszenario am nächsten kommen (Tabellen 5.4 und 5.5).

Tabelle 5.4: Regelbasierte Auswahl nach *Electric Actuation Selection Aid*; Beispiel für die duale Auswahl von Aktoren anhand von Anforderungen der Anwendung. (Tabelle ist [Egb08] entnommen; Inhalte wurden vom Autor übersetzt)

Anforderungen der Anwendung		Eigenschaften der ausgeschlossenen Aktoren			
		keine Positionsregelung	Positionsregelung auf $\leq \pm 360^\circ$	Positionsregelung auf $< 5^\circ$ bis 45°	Positionsregelung auf $< \pm 1^\circ$
1	keine Positionsregelung				
2	Positionsregelung auf $\leq \pm 360^\circ$	X			
3	Positionsregelung auf $< 5^\circ$ bis 45°	X	X		
4	Positionsregelung auf $< \pm 1^\circ$	X	X	X	

Die „Lösungen“ bestehen dabei aus Aktoren eines entsprechenden Aktorprinzips sowie ggf. Empfehlungen zu Steuer-/Regelsystemen und notwendigen Sensoren (passend zu den Aktoren und Aufgaben). Es können auch Lösungen ausgegeben werden, die, bezogen auf die Übereinstimmung mit den in

den Tabellen vorgegebenen Werten, in weniger als hundert Prozent mit den gespeicherten Werten und Szenarien übereinstimmen.

Die Datenbank enthält eine Vielzahl verschiedener Aktoren, wobei sich EGBUNA explizit auf solche aus dem Produktumfang der SEW-EURODRIVE LIMITED (SA) bezieht, die in Südafrika als kommerziell verfügbar sind. Es muss angenommen werden, dass sich sowohl die Angaben über die Notwendigkeit von Sensoren und Steuer-/Regelelektronik als auch die zu den Kosten auf die Erfahrungen von SEW-EURODRIVE LIMITED (SA) beziehen, die in die Entstehung des *Electric Actuation Selection Aid* einbezogen waren.

Da die Aussagen des *Electric Actuation Selection Aid* auf dualen Vergleichen von Aktoren basieren, muss dies nicht als Nachteil gewertet werden. Die qualitativen Zusammenhänge, die den hinterlegten Aktoreigenschaften und Antriebsszenarien zugrunde liegen, können über das Portfolio von SEW-EURODRIVE LIMITED (SA) hinaus als gültig angesehen werden. Für Angaben zur Gestalt der Aktoren kann auf die Internetpräsentation von SEW-EURODRIVE LIMITED (SA) zugegriffen werden, auf die verwiesen wird. Ein direkter Vergleich dieser Daten ist jedoch im Software-Tool nicht implementiert.

EGBUNAs Ansatz erlaubt die Auswahl von Aktoren samt der für die Regelung/Steuerung notwendigen Elektronik und Sensoren anhand von Anforderungen an den Aktor sowie der Bewegungsaufgabe. Der Ansatz bietet die Möglichkeit zur Wichtung der Kriterien und zur unscharfen Suche. Weiterhin existieren sogenannte *Eingaberegeln*, die eine schnelle Suche in der vorhandenen Datenbank ermöglichen sollen. Diese Regeln empfehlen durch Vorgabe in der GUI Parameter, die den Lösungsraum potenziell schnell einschränken. Der verwendete Ansatz erlaubt einen Vergleich von Aktorprinzipen anhand der in der zugehörigen Datenbank enthaltenen Aktoren, wenngleich wenige und zum Teil verallgemeinerte Parameter in der Datenbank enthalten sind. Die Generalisierbarkeit der Kosteninformation ist aufgrund des von

EGBUNA gewählten Umfeldes und der Datenbasis nur eines Herstellers nicht möglich.

Die Antriebsszenarien wie auch die Antriebsanforderungen, die EGBUNA definiert, lassen sich ebenso als „Blasen“/abgegrenzte Punkte auffassen, aufgrund der diskreten Beschreibung der Aktoreigenschaften aber weniger gut darstellen. EGBUNAS Ansatz liefert als einziger eine rechnerbasierte Auswahlunterstützung, ist aber hinsichtlich der genutzten Aktorprinzipie, der betrachteten Hersteller und Arbeitsbereiche aufgrund des gewählten Anwendungsgebietes beschränkt.

Die Einbeziehung von Antriebsszenarien im *Electric Actuation Selection Aid* ist ein interessanter Ansatz, der die Einbeziehung von Erfahrungswissen mithilfe von Szenarien oder „Mustern“ bei der Aktorauswahl erlaubt. Derartige Szenarien scheinen geeignet, auch Kriterien zu berücksichtigen, die schwer oder nicht allgemeingültig zu formulieren sind. Denkbar sind hierbei z. B. Liefertreue, Lieferzeit, Qualität, Support usw. eines Lieferanten, die sich aus der Erfahrung des auswählenden Entwicklers, Einkäufers usw. ergeben. Die angesprochenen „schwer verallgemeinerbaren“ Kriterien sind für einen allgemeinen Ansatz zwar nicht verfügbar, bieten aber ggf. Erweiterungspotenzial für eine firmenspezifische Umsetzung.

5.6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Hilfsmittel zur Aktor- und Aktorprinzipauswahl lassen sich anhand der Datenbasis, der Aufbereitung für die Suche bzw. die Such-/Auswertelgorithmen und die Nutzerführung durch den Zugriffsteil/GUI miteinander vergleichen.

Hierbei geben die klassischen Konstruktionskataloge dem Ingenieur die Möglichkeit zur Erweiterung der ihm bekannten Lösungsmenge anhand einer festgelegten Datenbasis mit festgelegten Zugriffsmerkmalen. Die Erweiterung der

betrachteten Lösungsmenge hängt von Umfang und Aktualität der in den Konstruktionskatalogen zusammengetragenen Daten ab. Von den konventionellen, papier- und web-basierten Konstruktionskatalogen sind im Wesentlichen die Herstellerkataloge von Bedeutung. Bei papiergebundenen Katalogen wird die Suche dabei nicht durch Algorithmen unterstützt, web-basierte Kataloge bieten grundlegende meist exakte Suchfunktionen.

Die Besonderheit der vorgestellten alternativen Ansätze liegt in der (zumindest vorgesehenen) Suchunterstützung sowie der Präsentation der Daten gegenüber dem Anwender sowie der auf der Erweiterung oder Verbesserung der Darstellung beruhenden bzw. für den *F-S-S* theoretischen Auswahlunterstützung.

Durch die gewählte Darstellung der Ergebnisse im *Actuator-Selector* und *Web-based actuator selection tool* kann mit wenigen Datensätzen unterschiedlicher Aktoren verschiedener Hersteller der *Möglichkeitsbereich* eines Aktorprinzips abgegrenzt werden. Dadurch werden die Hauptprobleme der Kataloge erheblich verringert und eine zweckmäßige Möglichkeit zum Aktorprinzipvergleich geschaffen.

Durch zusätzliche und neue Aktoren können die Möglichkeitsbereiche leicht erweitert werden, während die alten Angaben weiter Bestand haben. Auf diese Weise wird die Menge der erforderlichen Datensätze reduziert und die Pflege des „Kataloges“ vereinfacht [KES08, EST10]. Grundlage hierfür ist die Annahme, dass in dem von den wenigen Aktoren eines Aktorprinzips aufgespannten Lösungsraum („Blase“) grundsätzlich weitere Aktoren dieses Aktorprinzips möglich sind.

Nachteilig ist, dass die durch die elliptischen Punkte gekennzeichneten *Möglichkeitsbereiche* der verschiedenen Aktorprinzipie einfache geometrische Abgrenzungen sind. Ihre Bildungsvorschrift ist unbekannt und es ist anzunehmen, dass die Abgrenzung willkürlich oder vom Erstellenden „per Hand“ für die verwendeten Daten vorgenommen wurde. Damit sind die markierten

Bereiche nur beschränkt aussagekräftig, die Schlussfolgerung über eine mögliche Umsetzung eines Aktorprinzips ist insbesondere für den Randbereich der elliptischen Punkte/“Blasen“ unsicher [EST10].

Der Entwickler erhält bei Nutzung eines Produktkataloges nach eigener oder durch trennscharfe Algorithmen unterstützte Suche im Idealfall einen oder wenige passende Aktoren – ggf. findet er keine passende Lösung. Wesentliches Kriterium für die Qualität derartiger Kataloge ist der Umfang der Datenbasis und die Zweckmäßigkeit der Zugriffskriterien [KES08].

Die in den vorgestellten alternativen Ansätzen umgesetzten unscharfen Suchmöglichkeiten wiederum erlauben dem Entwickler eine Orientierung im Bereich möglicher Lösungen/Aktoren. Ein passenden Akteur zu finden ist nicht Intention der Ansätze (ggf. mit Einschränkung des *Electric Actuation Selection Aid*). Nach der Orientierung ist die zielgerichtete Lösungssuche in einem trennscharfen Lösungskatalog für Aktoren des oder der naheliegenden Akteurprinzips möglich/zweckmäßig. Wesentliches Kriterium für die Zweckmäßigkeit der unscharfen Suchansätze ist dabei die Abbildung – durch den Algorithmus wie auch in der GUI – der genannten Möglichkeitsbereiche.

6 Konzept zur Aktorsuche und Auswahlunterstützung

Aktoren können bisher anhand konkreter Parameter aus Produktkatalogen einzelner Hersteller ausgewählt werden. Die Kataloge der Hersteller beinhalten dabei meist Aktoren eines einzelnen Aktorprinzips. Die Suche in verschiedenen Aktorkatalogen verschiedener Aktorprinzipie ist durch deren Vergleich möglich. Für eine parallele Betrachtung verschiedene Parameter ergeben sich dabei je nach Sortierung/Ranking der Parameter andere „optimale“ Aktoren und somit ggf. auch Aktorprinzipie (Tabelle 6.1).

Aktorprinzipie können darüberhinaus durch Nutzung der genannten alternativen Ansätze anhand der *Möglichkeitsbereiche* ausgewählt werden. Die *Möglichkeitsbereiche* sind jedoch stets vom Erstellenden festgelegte Begrenzungen (z. B. elliptische Punkte beim *Actuator-Selector*) und abhängig von den zugrundegelegten Datensätzen. Wie scharf diese Begrenzungen sind, ist aufgrund der meist unbekanntenen Bildungsvorschriften und Datenbasis für den Auswählenden nicht ersichtlich. Eine Auswahl mit geforderten Parametern außerhalb der durch die Begrenzung der Punkte/“Blasen“ vorgegebenen *Möglichkeitsbereiche* ist somit nicht möglich. Diese erfordert Vorüberlegungen bezüglich der Auswirkungen einer Entscheidung für ein bestimmtes Aktorprinzip.

Im Folgenden sollen zwei alternative Ansätze zur Aktorprinzipauswahl vorgestellt werden. Der erste Ansatz (*Kapitel 6*) beruht auf bekannten Aktoren, ist wie der von KALLENBACH beschriebene *F-S-S* aufgebaut und basiert auf dem Konzept der *Möglichkeitsbereiche* des *Actuator-Selectors*. Er beinhaltet im Unterschied zum Stand der Technik eine Möglichkeit algorithmenbasierte

Tabelle 6.1: Beispieltabelle mit fiktiven Aktoren und Parametern mit Darstellung der Sortierergebnisse nach verschiedenen Parametern (grau hinterlegt sind die zum Ordnen herangezogenen Parameter).

The diagram illustrates sorting results for six actors (Nr. 1-6) based on three different parameters. The parameters being sorted are: **Leistung [W]** (top table), **Leistung [W]** (middle table), and **Leistung [W]** (bottom table). The other parameters (Aktor, Masse, Länge, generalisierte Breite) are shown in their original order. Grey shading indicates the parameter used for sorting.

Nr.	Aktor	Leistung [W]	Masse [g]	Länge [mm]	generalisierte Breite [mm]
1	Aktor U	200	500	300	55
2	Aktor V	180	450	250	75
3	Aktor W	170	750	400	115
4	Aktor X	150	700	450	120
5	Aktor Y	185	400	280	60
6	Aktor Z	120	250	250	85

Nr.	Aktor	Leistung [W]	Masse [g]	Länge [mm]	generalisierte Breite [mm]
1	Aktor U	200	500	300	55
2	Aktor Y	185	400	280	60
3	Aktor V	180	450	250	75
4	Aktor W	170	750	400	115
5	Aktor X	150	700	450	120
6	Aktor Z	120	250	250	85

Nr.	Aktor	Leistung [W]	Masse [g]	Länge [mm]	generalisierte Breite [mm]
1	Aktor Z	120	250	250	85
2	Aktor Y	185	400	280	60
3	Aktor V	180	450	250	75
4	Aktor U	200	500	300	55
5	Aktor X	150	700	450	120
6	Aktor W	170	750	400	115

Bestimmung der Möglichkeitsbereiche sowie eine Vorschrift zur Abschätzung der „Nähe“ der Suchparameter zu den Möglichkeitsbereichen bekannter Aktoren.

Der zweite Ansatz (*Kapitel 7*) soll die Auswirkungen konstruktiver Änderungen bei Aktorprinzipien verdeutlichen und damit bei der Abschätzung der Anpassbarkeit eines Aktorprinzips an gegebene Forderungen helfen. Er dient dazu bei Anfragen die außerhalb der bekannten Möglichkeitsbereiche liegen, den Entwickler bei der Wahl eines geeigneten Aktorprinzips zu unterstützen. Dies erfolgt durch das Aufzweigen der Änderungen der Merkmale des Aktorprinzips, die für das Erreichen der gewünschten Parameter nötig sind.

Ansatz zur Unterstützung der Aktorprinzipauswahl

Im Folgenden soll ein Konzept für die rechnergestützte Auswahl von Aktorprinzipien sowie dessen prototypische Umsetzung vorgestellt werden. Das vorgestellte Konzept beruht auf dem *Skyline*-Algorithmus und hat zum Ziel:

- anhand einer beschränkten Anzahl an Aktoren verschiedener Aktorprinzipie in einer Datenbank die Möglichkeitsbereiche abzugrenzen, in denen die Aktorprinzipie als realisierbar sind,
- bei Anforderungen, deren Parameter nicht durch bekannte Aktoren erfüllt werden, die den Suchparametern möglichst nahe kommenden Aktoren und Aktorprinzipie auszugeben sowie
- flexible und soweit möglich durch den Nutzer frei wählbare Suchparameter zu gewährleisten, wobei
- der Suchalgorithmus unabhängig von einer Erweiterung der Datenbank sein soll.

Der Ansatz basiert dabei wie der *Actuator-Selector* auf bekannten Aktoren und der Annahme, dass diese Aktoren Parameterbereiche abgrenzen, in denen die Realisierung des Aktorprinzips möglich ist. Dadurch ist die

Wahl eines passenden Aktorprinzips möglich, ohne dass ein zu den geforderten Parametern exakt passender Akteur in einer Datenbank enthalten sein muss.

Aus dem Wunsch, sowohl die Suchparameter frei wählen zu können und eine spätere Erweiterung der Auswahlunterstützung wie auch der Datenbasis zu ermöglichen, leitet sich die Notwendigkeit einer rechnergestützten Umsetzung ab. Diese erfordert:

- I. eine hinreichend große und erweiterbare Datenbasis (beschrieben in Abschnitt 6.3.1) sowie
- II. einen Algorithmus für die Suche innerhalb dieser Datenbasis (beschrieben in Abschnitt 6.3.2) und
- III. eine GUI zur Darstellung der Suchergebnisse (beschrieben in Abschnitt 6.3.3).

Diese wesentlichen Elemente und die prototypische Umsetzung des Konzeptes sollen im Weiteren erläutert werden. Den Schwerpunkt der Betrachtungen bilden dabei der Algorithmus zur Suche sowie die Vorstellung der prototypischen Umsetzung der Auswahlhilfe als Ganzes.

Die Gestaltung und Optimierung der Datenbasis, realisiert durch eine relationale Datenbank sowie die GUI sind nicht Intention dieser Abhandlung. Sie wurden zur Verdeutlichung und Überprüfung des Konzeptes erstellt, insbesondere die GUI erfuhr daher keine Optimierung hinsichtlich Ergonomie, Rechenzeit usw. und werden nur in einem für das grundlegende Verständnis notwendigen Maße betrachtet.

Der Neuheitswert des in dieser Arbeit vorgestellten *Skyline*-Ansatzes ergibt sich aus:

- der Anpassung des für Datenbanksuchen bekannten *Skyline*-Algorithmus zum Zwecke
- der nachvollziehbaren Bestimmung der Möglichkeitsbereiche für

- eine Datenbasis, die dem *Actuator-Selector* ähnliche wenn auch größer ist.

Der *Skyline*-Ansatz kann zur Auswahl von Baugruppen, Bauteilen, usw. anhand von qualitativen wie quantitativen Parametern genutzt werden und soll am Beispiel der Aktoren vorgestellt werden. Die Übertragung auf andere Elemente des Bewegungssystems (z. B. Getriebe oder Messsysteme) ist denkbar.

Eine notwendige Voraussetzung für die Nutzung des *Skyline*-Ansatzes ist das Vorhandensein vergleichbarer quantitativer Parameter. Diese auf den ersten Blick triviale Forderung kann sich für einzelne Bau-/Funktionsgruppen oder -elemente als schwer erfüllbar erweisen, wenn wesentliche Parameter unscharf oder anwendungsfallspezifisch definiert sind (z. B. Regelgüte) oder von weiteren Systemen der technischen Peripherie abhängen (so hängt z. B. die „Systemsteifigkeit“ von der Steifigkeit der Führung, des Gestells und auch der Regelung ab [Hac10]).

6.1 Bekannte Suchansätze und -algorithmen

Unter einem Suchalgorithmus wird eine Handlungsvorschrift für die Suche nach Objekten mit bestimmten Eigenschaften innerhalb eines Suchraums (der Datenbank) verstanden. Wesentliche Suchalgorithmen sind:

- I. Die *exakte* Suche, bei der die ausgegebene Ergebnismenge eine exakte Übereinstimmung mit den gesuchten Parametern $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_k)^T$ aufweist. Bei fehlender Übereinstimmung wird kein Datensatz ausgegeben.
- II. Die *Nearest-Neighbour*-Suche, bei der über die Ergebnisse mit exakter Übereinstimmung hinaus alle Datensätze¹³ $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)^T$ innerhalb

¹³ Zur Nomenklatur: Datensätze und Anfragen werden als Vektoren (\mathbf{x} , \mathbf{p}_i) fett markiert und bestehen aus Parametern ($p_{i,j}$); vgl. Tabelle 6.3.

eines vom Suchenden vorgegebenen, euklidischen Abstandes ε zu den gesuchten Parametern ausgegeben werden [FBS75, NN97].

$$d_e(\mathbf{p}, \mathbf{x}) := \|\mathbf{p} - \mathbf{x}\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^k (p_i - x_i)^2}, \quad (6.1)$$

für $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)^T$ und $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ sowie $k \leq n$

Für die ausgegebenen Werte muss die Bedingung:

$$d_e(\mathbf{p}, \mathbf{x}) := \|\mathbf{p} - \mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon \quad (6.2)$$

erfüllt sein.

III. Die *Abstand-Suche*, bei der die einzelnen Parameter für die Abstandsbestimmung unterschiedlich gewichtet werden. Die Wichtung wird durch einen Gewichtsvektor $\mathbf{g} = (g_1, \dots, g_n)^T$ realisiert, der durch den Anwender bestimmt wird. Die Wichtungen g_i sind willkürlich. Es ergibt sich der Zusammenhang:

$$d_{eg}(\mathbf{g}, \mathbf{p}, \mathbf{x}) := \|\mathbf{g}^T \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{x})\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (g_i \cdot |p_i - x_i|)^2} \leq \varepsilon \quad (6.3)$$

für $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_n)^T$ und $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ und Gewichtsvektor \mathbf{g} mit den Elementen $\mathbf{g} = (g_1, \dots, g_n) \in \mathbb{R}_+^n$

Die Wichtungsfaktoren des Gewichtsvektors können Absolutwerte oder Relativwerte sein. Die Relativwerte können sich auf die Werte der Suchparameter (z. B. 10 % von x) oder auf die Werte innerhalb der Datenbank beziehen (z. B. 10 % von $(\max(p_i) - \min(p_i))$).

Von diesen Algorithmen erscheint die *exakte* Suche nicht geeignet, da bereits Abweichungen der Dezimalstelle zwischen Suchwerten und in der Datenbank enthaltenen Parametern dazu führen, dass kein Ergebnis ausgegeben wird.

Eine sinnvolle Suche ist nur durch die Vorgabe einer ε -Umgebung wie bei der *Nearest-Neighbour*- bzw. *Abstand*-Suche möglich.

Die *Abstand*-Suche und *Nearest-Neighbour*-Suche geben Ergebnisse innerhalb eines vorgegebenen Abstandes zum gewünschten Zielwert aus. Dabei sind relative, auf den Wertebereich des Parameters bezogene Abstandsangaben absoluten Abständen vorzuziehen. Unterschiedliche Größenordnungen einzelner Parameter (z. B. μm -Verfahrbereich und mm -Abmessungen eines Aktors) und Wichtungsfaktoren können jedoch das Ergebnis verzerren. Dies gilt insbesondere bei der „Verrechnung“ einzelner Werte (in Tabelle 6.2 die *Abstand*-Suche „3-2-0-0-2“, die das berechnete Volumen berücksichtigt).

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Suche mit unterschiedlichen Suchansätzen. Die nach verschiedenen Suchansätzen ausgegebenen Datensätze aus Tabelle 6.1 sind durch ein *X* markiert. Im Tabellenkopf sind die (z. T. gewichteten) Anforderungen aufgeführt. Die Zahlen bezeichnen die Wichtungsfaktoren der einzelnen Anforderungen von links nach rechts. Das Volumen wird nur bei der Auswahl in der letzten Spalte betrachtet.

Leistung: 250 W		Masse: 400 g		Länge: 200 mm		Breite: 60 mm		Volumen (berechnet): 12 cm ³	
Nr.	Aktor	Exakte Suche	Nearest-Neighbor-Suche	Abstandssuche 2-1-2-2	Abstandssuche 3-1-2-2	Abstandssuche 3-2-0-0-2			
1	Aktor U	-	-	-	-	X			
2	Aktor V	-	X	X	-	-			
3	Aktor W	-	-	-	-	-			
4	Aktor X	-	-	-	-	-			
5	Aktor Y	-	-	-	X	-			
6	Aktor Z	-	-	-	-	-			

Weitere Suchalgorithmen für Datenbanken, bspw. solche zur unscharfen Suche, basieren auf der Betrachtung ähnlicher Zeichenketten. Da die Ähnlichkeits- oder Distanzmaße für quantitative Parameter jedoch kaum generell bestimmbar sind und für qualitative – abgesehen von möglichen

Eingabefehlern – ggf. nicht existieren, sind derartige Algorithmen für die Aktorprinzipauswahl nicht nutzbar.

Als Alternative zu den genannten Algorithmen ist der *Skyline*-Algorithmus bekannt. Als *Skyline*-Algorithmus stellt die Übertragung des *Maximalvektorproblems* auf die Suche in Datenbanken dar. Gegenstand des *Maximalvektorproblems* ist es, aus einer Menge von Vektoren die Untermenge zu identifizieren, deren einzelne *Dimensionen* von keinem anderen Vektor *dominiert* werden. Die Vektoren, die in allen Dimensionen gleiche oder größere Werte als alle anderen Vektoren der betrachteten Menge besitzen, sind die gesuchten *dominierenden Maximalvektoren* (u. a. [KLP75, BKS78, PS85, SM88, Buc89]). Das Ergebnis ist dabei von der Größenordnung wie auch von der Wichtung der Parameter/Dimensionen unabhängig (u. a. [BKS01, PTF05]).

Der *Skyline*-Algorithmus überträgt diesen Ansatz auf die Suche in relationalen Datenbanken, wobei statt dominierenden Vektoren Datensätze mit *dominierenden Paramertupeln* gesucht werden. Beim *Skyline*-Algorithmus wird dabei meist von einer Minimierungsaufgabe ausgegangen. Durch Negation ist ggf. die Suche nach Maximalwerten in ein Minimierungsproblem umzuwandeln. Auch bei den weiteren Betrachtungen wird daher stets von der Suche nach Minimalwerten ausgegangen.

Die Ergebnismenge dieses Algorithmus bilden die den Anforderungen am nächsten kommenden Datensätze. Miteinander verbunden, bilden sie eine Kontur – die *Skyline* (Abbildung 6.1). Ein bekanntes und häufig zitiertes Beispiel des *Skyline*-Algorithmus ist die Auswahl von Hotels anhand der Parameter *Preis* und *Entfernung zum Strand* [BKS01]. Der Begriff *Skyline* wird dabei als Synonym für die als Ergebnis der Suchanfrage ausgegebenen Datensätze verwendet.

Im Folgenden soll der *Skyline*-Algorithmus als Kern einer rechnerbasierten Aktorauswahlhilfe vorgestellt werden. Hierzu wird zunächst die allgemeine Bildungsvorschrift erläutert und verschiedene Variationen/Abwandlungen zur Beeinflussung der ausgegebenen Lösungsmenge vorgestellt. Anschließend

wird auf die für die Aktor- und Aktorprinzipauswahl notwendigen Anpassungen eingegangen.

6.2 Der *Skyline*-Algorithmus

Der *Skyline*-Algorithmus basiert auf Paarvergleichen, d. h. dem Vergleich einzelner Datensätze nacheinander und miteinander. Die *Skyline* baut sich dadurch Schritt für Schritt auf und bildet eine Art „Rand“ um das gesuchte Parametertupel, von dem der *Skyline*-Algorithmus seinen Namen hat (siehe Abbildung 6.1; für den Aufbau der *Skyline* insbesondere 6.1(b) bis 6.1(d)).

Grundsätzlich beschreibt der *Skyline*-Algorithmus eine Suche nach Datensätzen im Sinne des *Maximalvektorproblems*, bezogen auf den Koordinatenursprung, welcher den optimalen Datensatz – genaue Erfüllung aller Anforderungen – repräsentiert. Dies ist für eine Aktorsuche nur in Ausnahmefällen der Fall. Für die Aktorsuche ist davon auszugehen, dass Suchanfragen meist vom Koordinatenursprung verschiedene Anfragepunkte (z. B. Nennleistung, maximales Drehmoment) und -intervalle (z. B. Drehzahlbereich, ein Volumen welches kleiner als ein Grenzwert ist) beinhalten.

Weiterhin erfolgt durch den *Skyline*-Algorithmus keine Ordnung der abgegebenen Datensätze. Es handelt sich beim Suchergebnis somit um eine ungeordnete Ergebnismenge. Ziel ist es jedoch, nicht nur potenziell passende Suchergebnisse anzuzeigen, sondern diese auch beginnend mit der höchsten Relevanz auszugeben. Der *Skyline*-Algorithmus muss daher abgewandelt und für die Aktorauswahl angepasst werden.

Die verschiedenen Ansätze zur softwaretechnischen Umsetzung des Algorithmus sind meist als Pseudocode¹⁴ frei verfügbar und im Hinblick auf die Minimierung der Rechenzeit optimiert.

Erreicht wird die Optimierung meist durch die zielgerichtete Minimierung der Zahl der Paarvergleiche (z. B. werden „neue“ Datensätze nur mit denen der *Skyline* verglichen – dies wird im Abschnitt 6.3.2 näher erläutert) und der notwendigen Speicherschritte. Das Verständnis der dem allgemeinen *Skyline*-Algorithmus und seinen Varianten zugrunde liegenden Zusammenhänge sowie die Vorstellung des Ergebnisses wird dadurch erschwert.

Daher sollen im Weiteren kurz die notwendigen mathematischen Zusammenhänge des *Skyline*-Algorithmus beschrieben werden. Um die Verständlichkeit zu erhöhen, wird die Bestimmung der *Skyline* im Weiteren durch zweidimensionale Abbildungen und zugehörige Bildunterschriften an gegebener Stelle verdeutlicht.

Die Möglichkeiten zur Anpassung des *Skyline*-Algorithmus, um die Zahl der ausgegebenen Datensätzen zu vergrößern oder zu verringern, werden aufgezeigt. Anschließend werden die für die Aktorauswahl notwendigen Anpassungen des *Skyline*-Algorithmus beschrieben.

Mathematische Beschreibung des allgemeinen *Skyline*-Algorithmus

Zum Zweck des besseren Verständnisses wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit für alle betrachteten *Skyline*-Algorithmen die in Tabelle 6.3 verdeutlichte Parameterkonvention verwendet.

Die Parameter der Datensätze, die in einer Datenbank enthalten sind und nach denen gesucht werden kann, werden als Dimensionen d_1, \dots, d_n bezeichnet [PTF05, LYZ07, CJT06, Ple09]. Die Datenbank enthält eine Menge \mathfrak{A} von

¹⁴ Als Programmcode, der zur Veranschaulichung des Programmablaufs und nicht der rechner-technischen Umsetzung dient. Er ist meist in einer Programmiersprachen ähnlichen Syntax abgefasst.

m Datensätzen:

$$\mathfrak{P} = \{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_m\}, m \in \mathbb{N}. \quad (6.4)$$

Jeder Datensatz $\mathbf{p}_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,j}, \dots, p_{i,n})^T$ besteht aus n Parametern.

Tabelle 6.3: Übersicht zur Parameterkonvention für die Betrachtungen zum *Skyline*-Algorithmus

		Dimensionen \mathfrak{D}			
		Parameter d_1	Parameter d_2	...	Parameter d_n
Datensätze \mathfrak{P}	Aktor \mathbf{p}_1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	$p_{1,j}$	$p_{1,n}$
	Aktor \mathbf{p}_2	$p_{2,1}$	$p_{2,2}$	$p_{2,j}$	$p_{2,n}$
	...	$p_{i,1}$	$p_{i,2}$	$p_{i,j}$...
	Aktor \mathbf{p}_m	$p_{m,1}$	$p_{m,2}$...	$p_{m,n}$

Der *Skyline*-Algorithmus gibt die Menge von n -dimensionalen Datensätzen als Ergebnis aus, die von keinem der anderen in der Datenbasis enthaltenen Datensätze *dominiert* werden. Beim Vergleich zweier Datensätzen $\mathbf{p}_x, \mathbf{p}_y \in \mathfrak{P}$ *dominiert* \mathbf{p}_x den Datensatz \mathbf{p}_y :

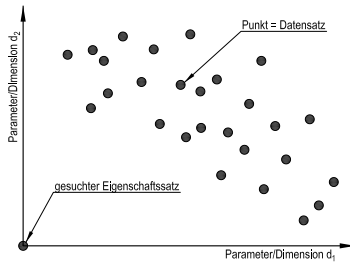
$$\mathbf{p}_y \succ \mathbf{p}_x \quad (6.5)$$

genau dann, wenn für jedes $j \in \{1, \dots, n\}$ gilt:

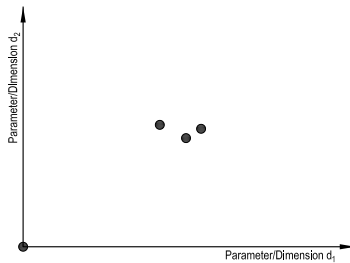
$$p_{y,j} \succcurlyeq p_{x,j} \quad (6.6)$$

und für mindestens ein j gilt:

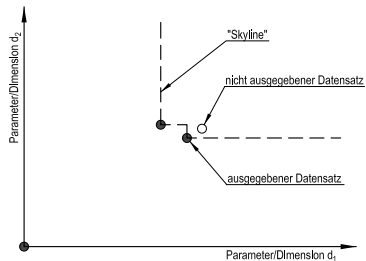
$$p_{x,j} \neq p_{y,j}. \quad (6.7)$$



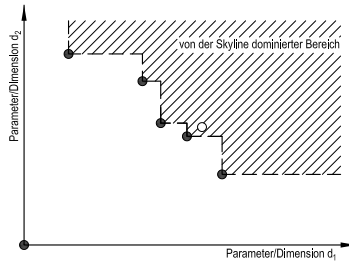
- (a) Beispielhafte Verteilung von Datensätzen für ein zweidimensionales Parameterfeld. Abgebildet ist nur der 1. Quadrant, welcher - nach der Überführung in ein Minimierungsproblem - alle Datensätze enthält.



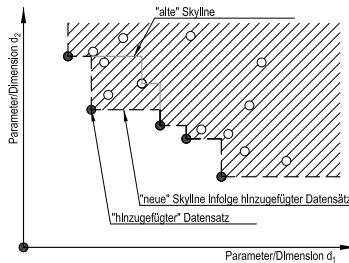
- (b) Aus den verfügbaren Datensätzen wird bezogen auf einen gesuchten Parametersatz die *Skyline* ermittelt. Hierzu werden drei Datensätze paarweise miteinander verglichen.



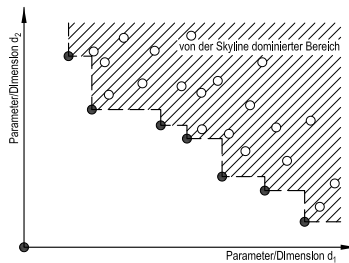
- (c) *Skyline* und dominierte Datensätze werden bestimmt. Die *Skyline* beschreibt die Grenze des dominierten Bereiches. Dominierende (= ausgegebene) Datensätze sind „voll“, dominierte Datensätze „leer“ dargestellt.



(d) Durch weitere Datensätze wird die *Skyline* sukzessive erweitert. Der „rechteckig-gezackte“ Verlauf entsteht durch die Dominanzbeziehung.



(e) Durch die „neuen“ Datensätze kann sich die *Skyline* verändern. Durch die Dominanzbeziehung darf es keinen Punkt „links unterhalb“ eines Punktes der *Skyline* geben.



(f) Es entsteht nach Vergleich aller Datensätze ein durch die *Skyline* dominierter Bereich. Alle Punkte der *Skyline* werden als Lösungen ausgegeben.

Abbildung 6.1: Allgemeiner Ablauf der *Skyline*-Bestimmung. Das Optimum, auf das sich die Suche bezieht, ist der Nullpunkt des Koordinatensystems. Die 2D-Abbildung verdeutlicht den Ansatz, welcher für n-dimensionale Parameterfelder funktioniert. Die *Skyline* selbst wird nicht ausgegeben.

Die Dominanzrelation $\mathbf{p}_y \succ \mathbf{p}_x$ bedeutet, dass \mathbf{p}_x für alle betrachteten Parameter p_j keinen größeren und mindestens einen kleineren Wert als \mathbf{p}_y aufweist. Vereinfacht ausgedrückt besitzt somit jeder *dominierende Datensatz* \mathbf{p}_i mindestens einen *dominierenden Parameter* $p_{i,j}$.

Auf die Auswahl von Aktoren übertragen, bedeutet dies, dass der Aktor „ \mathbf{p}_x “ mindestens einem der geforderten Parametern besser entspricht als der Aktor „ \mathbf{p}_y “. Da „besser“ je nach Suchziel „ \leq “ oder „ \geq “ bedeuten kann, werden diese Operatoren durch die Dominanzbeziehung ausgedrückt. Bei der Umsetzung des *Skyline*-Algorithmus in ein Softwarewerkzeug (siehe Abschnitt 6.3) wird die Festlegung bei welchem Parameter „ \leq “ oder „ \geq “ gilt, vom Anwender (z. B. durch Eingabe in das Suchmaskenfeld; vgl. Abbildung 6.19 Leistung $> 1 W$, siehe Abschnitt 6.3.3) ausgewählt.

Aus dieser Festlegung folgt unmittelbar, dass all die Datensätze Element der *Skyline* sind, die in wenigstens einem gesuchten Parameter „besser“ sind als alle anderen Datensätze. Einzelne Parameter der Elemente der *Skyline* können dabei schlechter als die von dominierten Datensätzen sein (Abbildung 6.2).

Die *allgemeine Skyline* wird durch alle ausgegebenen Datensätze definiert und ergibt sich somit wie folgt:

$$\mathfrak{S}(\mathfrak{P}) = \{ \mathbf{p}_x \in \mathfrak{P} \mid \nexists \mathbf{p}_y \in \mathfrak{P} : \mathbf{p}_y \succ \mathbf{p}_x \}. \quad (6.8)$$

Daraus ergibt sich, dass bei Verwendung vieler verschiedener Suchparameter die Zahl der ausgegebenen Lösungen, d. h. der Elemente der *Skyline*, steigt (siehe Abbildung 6.2).

Aus der Definition folgt ebenso, dass jeder Datensatz mit minimalem Abstand zu den gesuchten Parametern immer Bestandteil der *Skyline* sein muss (siehe *Abstand*-Suche). Die Dominanzbeziehung führt dazu, dass einzelne Datensätze, die nur unbedeutend von den gesuchten Parametern oder denen der *Skyline* abweichen, nicht ausgegeben werden. Diese Reduzierung der ausgegebenen

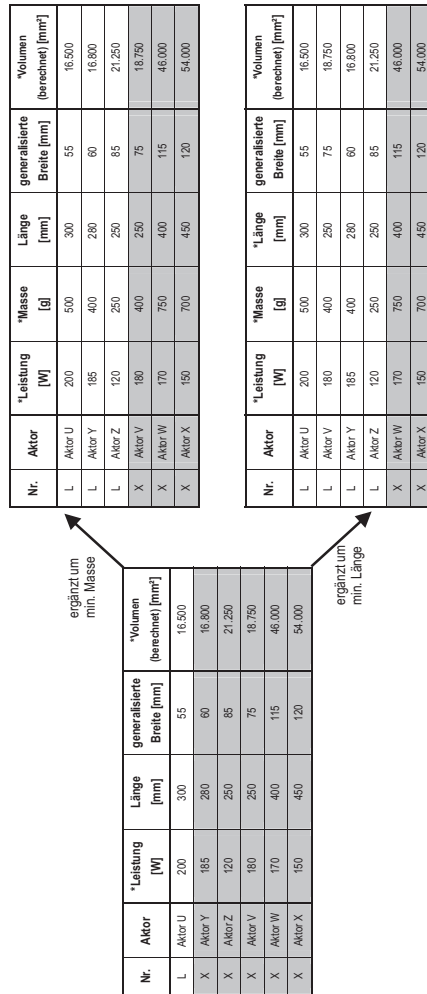


Abbildung 6.2: Wirkungsweise des Skyline-Algorithmus am Beispiel der Datensätze aus Tabelle 6.1. Die Vergrößerung der ausgegebenen Lösungsmenge durch weitere Auswahlparameter (markiert im Tabellenkopf durch “**”) wird deutlich (grau hinterlegt: die dominierten Datensätze). Links unten: Suche nach maximaler Leistung und minimalem Volumen; Rechts unten: Suche nach maximaler Leistung, minimalem Volumen, kleinster Masse und kleinster Aktorlänge

Lösungsmenge aufgrund marginaler, nicht technisch begründeter Unterschiede, ist für die Suche nach Aktoren unterschiedlicher Aktorprinzipie nicht wünschenswert. Andererseits werden auch die Datensätze als Suchergebnis ausgegeben, bei denen nur einer oder ggf. wenige Parameter dominieren (z. B. der Datensatz mit der größten Leistung, dessen Abmessungen aber größer als die geforderten sind) und somit nur mit geringer Wahrscheinlichkeit relevant sind.

Varianten des *Skyline*-Algorithmus um die Zahl der ausgegebenen Datensätze:

- zu minimieren (z. B. bei Vorgabe vieler Suchparameter),
- zu maximieren (z. B. bei Vorgabe weniger Suchparameter) sowie
- um die Datensätze zu reduzieren, die nur in wenigen Parametern dominieren,

sollen im Folgenden vorgestellt werden.

6.2.1 Varianten des *Skyline*-Algorithmus zur Beeinflussung der Lösungsmenge

Der dargestellte allgemeine *Skyline*-Algorithmus kann, um die Zahl der ausgegebenen Lösungen zu erhöhen oder zu verringern, abgewandelt werden. Diese Varianten geben, verglichen mit der vorgestellten, *allgemeinen Skyline*, entweder mehr oder weniger Datensätze aus, werden jedoch in dieser Abhandlung in Anlehnung an die Literatur als *Skylines* bezeichnet.

Tabelle 6.4: Übersicht der *Skyline*-Varianten zur Vergrößerung und Verringerung der Zahl ausgegebenen Lösungen

Varianten zur Vergrößerung der Zahl der ausgegebenen Lösungen	Varianten zur Verringerung der Zahl der ausgegebenen Lösungen
<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>elastische-Skylines</i> $\mathfrak{S}_{\varepsilon S}$ und $\mathfrak{S}_{\varepsilon P}$ ▪ <i>k-Band-Skyline</i> \mathfrak{S}_k 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Top-k-Skylines</i> \mathfrak{S}_T ▪ <i>ranked-Skyline</i> \mathfrak{S}_{Rk} ▪ <i>d-reduzierte-Skyline</i> \mathfrak{S}_{dI}

Im Folgenden werden einige im Hinblick auf die Aktorauswahl interessant erscheinende Varianten des *Skyline*-Algorithmus vorgestellt.

Vergrößerung der Zahl ausgegebener Datensätze durch Vorgabe einer ε -Umgebung

Eine einfache Möglichkeit, die Zahl der ausgegebenen Datensätze zu erweitern, ist deren Erweiterung um eine ε -Umgebung. Diese kann um die *Skyline* oder die dominierenden Punkte definiert werden. Die in dieser ε -Umgebung enthaltenen Datensätze werden zusätzlich zu denen der *allgemeinen Skyline* als Ergebnis der Suche ausgegeben (Abbildung 6.3(a)). Dies ist auf zwei verschiedene Arten möglich.

Im ersten Fall wird als *elastische Skyline* $\mathfrak{S}_{\varepsilon S}$ bezeichnet. Die ausgegebenen Datensätze ergeben sich somit zu:

$$\mathfrak{S}_{\varepsilon S}(\varepsilon, \mathfrak{P}) = \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) \cup \{ \mathbf{p}_x \in \mathfrak{P} \setminus \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) \mid \exists \mathbf{p}_y \in \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) : \|\mathbf{p} - \mathbf{x}\|_{\infty} \leq \varepsilon \}. \quad (6.9)$$

Im zweiten Fall wird die ε -Umgebung um jeden dominierenden Punkt definiert. Abbildung 6.3(b) zeigt dies exemplarisch für zwei Dimensionen. Es ergeben sich (für zwei Dimensionen) Kreisabschnitte um die Punkte, die die *Skyline* $\mathfrak{S}_{\varepsilon P}$ bilden.

Der Nachteil aller *elastischen Skylines* besteht darin, dass die Vorgabe einer ε -Umgebung ähnlich dem Gewichtsvektor der *Abstand*-Suche subjektiv und damit die Suche von der Erfahrung des Suchenden abhängig ist.

Weiter ist fraglich, ob für alle denkbaren Parameter p_j das gleiche ε als Absolutbetrag gelten sollte. Sinnvoll erscheint ein relatives ε bezogen auf den gesuchten Wert und ggf. verschiedene ε_j für verschiedene p_j . Hierzu müssen die Abstände für jeden Datensatz einer jeden Suche neu berechnet werden, was erheblichen Rechenaufwand bedeuten kann.

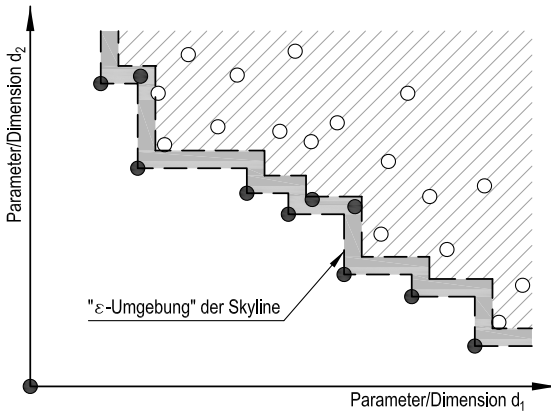
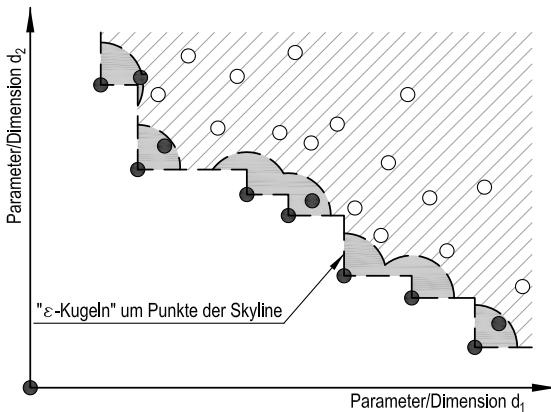
(a) Beispiel einer Skyline $\mathfrak{S}_{\epsilon S}$ mit ϵ -Umgebung(b) Beispiel einer Skyline $\mathfrak{S}_{\epsilon P}$ mit ϵ -Umgebung um die Skyline bildenden Punkte

Abbildung 6.3: Ansätze zur Vergrößerung der Zahl der ausgegebenen Datensätze durch Vorgabe einer ϵ -Umgebung; ausgegebene Datensätze sind „voll“, dominierte Datensätze „leer“ dargestellt.

Vergrößerung der Zahl ausgegebener Datensätze durch mehrfache Berechnung der *Skyline*

Ein weiterer Ansatz, nur marginal abweichende Datensätze zum Zweck der Ausgaben erfassen zu können, besteht darin, die *Skyline* mehrfach zu berechnen. Dabei werden die Datensätze der zuvor berechneten *allgemeinen Skyline* für die folgende Berechnung entfernt (Abbildung 6.4). Ausgegeben werden in diesem Fall die Datensätze aller berechneten *Skylines*.

Dieser Ansatz wird *k-Band-Skyline* genannt, wobei das $k \in \mathbb{N}$ die Zahl der Berechnungsdurchläufe markiert. Die Datensätze der ersten und der k -ten *Skyline* sowie alle Datensätze zwischen diesen (im sogenannten *k- oder Sky-Band*) werden als Ergebnisse der Suche ausgegeben.

Die *Skyline* für $k = 1$ definiert sich wie bei der *allgemeinen Skyline*. Für $k > 1$ ergibt sich die *k-Band-Skyline* rekursiv nach folgender Beziehung:

$$\mathfrak{S}_k(k, \mathfrak{P}) = \mathfrak{S}(\mathfrak{P} \setminus \mathfrak{S}_{k-1}) \cup \mathfrak{S}_{k-1}. \quad (6.10)$$

Gegenüber der ε -Umgebung besitzt die *k-Band Skyline* den Vorteil, dass die ausgegebenen Datensätze „in der Nähe“ der *Skyline* $\mathfrak{S}_{k=1}$ nicht von einer subjektiven Vorgabe – ausgenommen von k –, sondern von der Verteilung der Datensätze abhängen.

Ansätze zur Verringerung der Zahl ausgegebener Datensätze

Neben Ansätzen mit dem Ziel, die Zahl der ausgegebenen Datensätze zu erhöhen, gibt es auch solche, die die Zahl der ausgegebenen Datensätze reduzieren. Interessant erscheinen hierbei die Ansätze der *k-dominierenden*¹⁵ und der *d-reduzierten Skyline*, bei denen die Definition und Wirkung des Dominierens verschärft wird. Varianten der *k-dominierenden Skyline* sind:

¹⁵ In [PTF05] findet sich für den Ansatz der *Top-k Skyline* auch die Bezeichnung *k-dominierende* oder *ranked Skyline*, wobei das Ziel stets die Auswahl weniger dominierender Datensätze $\mathfrak{p}_q \in \mathfrak{M}$ für $\mathfrak{M} \subseteq \mathfrak{P}$ der *Skyline* ist.

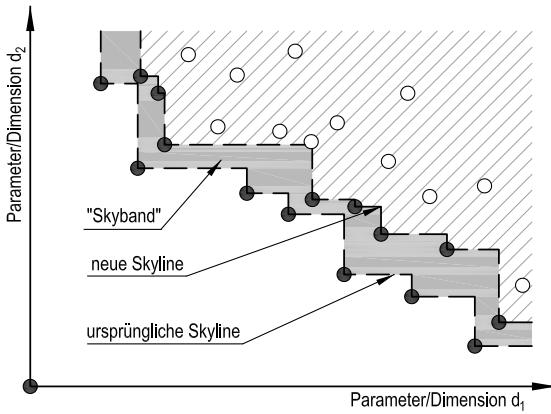
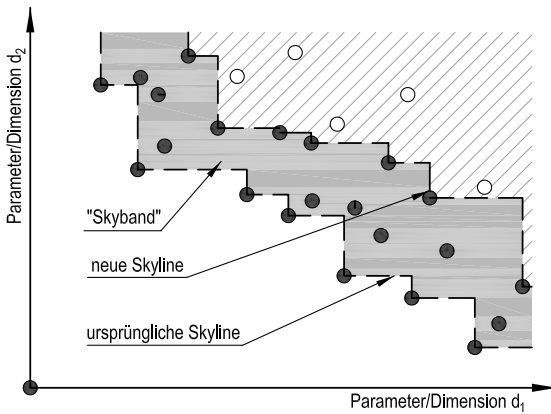
(a) Beispiel einer k -Band Skyline (hier: $k = 2$)(b) Beispiel einer k -Band Skyline (hier: $k = 3$)

Abbildung 6.4: Beispiele für k -Band Skylines; die jeweils „voll“ dargestellten Datensätze werden in diesem Beispiel ausgegeben.

- I. die Reduzierung auf die k Datensätze einer *Skyline*, die entweder eine bestimmte Mindestanzahl $N_{dom}(\mathbf{p})$ an anderen Datensätzen dominieren (Fall (a)) oder auf die k Datensätze, die die meisten Datensätze dominieren $\rightarrow k$ -dominierende *Skyline* [PTF05, LYZ07]¹⁶,
- II. die Vergabe eines *Ranges* R_G für die Punkte der *Skyline* und die Ausgabe einer auf die Anzahl k beschränkten Menge von Datensätzen mit einem bestimmten Rang \rightarrow ranked *Skyline* [PTF05] sowie
- III. die Reduzierung auf die k Datensätze, die in den meisten Parametern dominieren $\rightarrow d$ -reduzierte *Skyline* [CJT06].

Im Fall I(a) kann entweder die Teilmenge $\mathfrak{S}_{Tk1} \subseteq \mathfrak{S}$ der Datensätze der allgemeinen *Skyline*, die mindestens k Datensätze dominieren (Beziehung (6.11)) oder es können die k Datensätze (Fall I(b)) ausgegeben werden, die die meisten anderen Datensätze dominieren (Beziehung (6.12)).

$$\mathfrak{S}_{Tk1} = \{\mathbf{p} \in \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) \mid N_{dom}(\mathbf{p}) \geq k\} \quad (6.11)$$

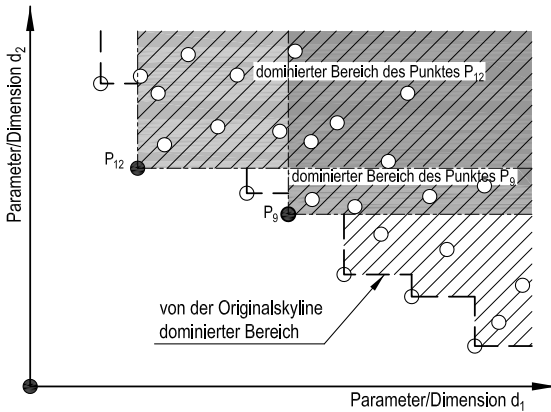
$$\mathfrak{S}_{Tk2}(\mathfrak{P}) = \left\{ \mathbf{p} \in \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) : \left| \{\mathbf{p}_i \in \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) \mid N_{dom}(\mathbf{p}_i) \geq N_{dom}(\mathbf{p})\} \right| \leq k \right\}. \quad (6.12)$$

Abbildung 6.5 verdeutlicht den Ablauf bei der Bestimmung der k -dominierenden *Skyline* entsprechend Fall I(b).

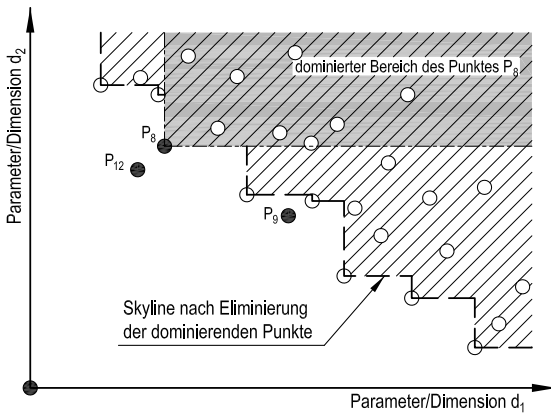
Der Unterschied zwischen der \mathfrak{S}_{Tk1} - und der \mathfrak{S}_{Tk2} -*Skyline* liegt darin, dass in der erstgenannten die Datensätze ausgegeben werden, die eine bestimmte (k) Anzahl an anderen Datensätzen dominieren, während bei der zweiten die maximale Anzahl der ausgegebenen Datensätze begrenzt wird.

Im Fall II wird den Datensätzen der *Skyline* ein Rang R_G zugeordnet. Der Rang ist dabei eine beliebige Funktion $f(p_{i,1}, \dots, p_{i,j}) : \mathfrak{M} \leq \mathfrak{P} \Rightarrow \mathbb{R}$, die

¹⁶ In der Literatur wird für die beiden, hinsichtlich der ausgegebenen Lösungen verschiedenen, Fälle die gleiche Bezeichnung verwendet, weshalb sie hier gemeinsam betrachtet werden.



- (a) Aus den verfügbaren Datensätzen wird bezogen auf einen Anfragepunkt die *Skyline* ermittelt. Von dieser werden die „dominantesten“ Datensätze bestimmt. Die Indizes an den Punkten entsprechen der Anzahl N_{dom} der dominierten Datensätze.



- (b) Anschließend werden diese nacheinander für die Berechnung der folgenden *Skyline* „ausgeblendet“. Aus den verbleibenden werden wiederum *Skylines* berechnet. Die dabei entstehenden „neuen Dominantesten“ können zuvor dominierte Datensätze sein.

Abbildung 6.5: Prinzipdarstellung der Reduzierung der dargestellten Datensätze auf die k dominierenden, hier für $k = 3$; Datensätze der *Skyline* \mathcal{S}_{TK_2} sind „voll“, dominierte Datensätze „leer“ dargestellt.

auf die in der *Skyline* enthaltenen Datensätze $\mathbf{p}_i \in \mathfrak{S}; \mathfrak{S} \subseteq \mathfrak{P}$ zum Zweck der Wichtung der einzelnen Parameter angewendet werden kann.

Je nach Vorgabe werden die Datensätze ab einem bestimmten Rangwert k_{Wert} :

$$\mathfrak{S}_{RW}(\mathfrak{P}) = \{\mathbf{p}_q \in \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) \mid R_G(\mathbf{p}_q) \geq k_{Wert}\} \quad (6.13)$$

oder die k Datensätze mit den höchsten Rangwerten ausgegeben (Gleichung 6.14).

$$\mathfrak{S}_{Rk}(\mathfrak{P}) = \left\{ \mathbf{p}_q \in \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) : \left| \{ \mathbf{p}_R \in \mathfrak{S}(\mathfrak{P}) \mid R_G(\mathbf{p}_R) \geq R_G(\mathbf{p}_q) \} \right| \leq k \right\} \quad (6.14)$$

Der Fall III bietet eine weitere Möglichkeit zur Eingrenzung der Lösungsmenge. Bei der als *d-reduzierte Skyline* bezeichneten Variante werden die Datensätze ausgegeben, die in den meisten Parameter dominieren, [PTF05]. Ein Datensatz $\mathbf{p}_x \in \mathfrak{P}$ dominiert einen Datensatz $\mathbf{p}_y \in \mathfrak{P}$ bei dieser Variante genau dann, wenn gilt:

$$\exists \mathfrak{R} \subseteq \{1, \dots, m\} \mid k = |\mathfrak{R}|, \forall i \in \mathfrak{R} : p_{y,j} \succ_i p_{x,j}, \exists i \in \mathfrak{R} : p_{y,j} \neq p_{x,j}. \quad (6.15)$$

Die Beschränkung auf \mathfrak{R} Dimensionen bewirkt eine Reduktion der Lösungsmenge durch Ausschluss von Lösungen, die in wenigen Dimensionen bessere Werte haben und dadurch in der *allgemeinen Skyline* als dominierende Datensätze auftreten.

Zusammenfassung zu den Varianten zur Beeinflussung der Lösungsmenge

Die vorgestellten Varianten des *Skyline*-Algorithmus basieren entweder auf der Vorgabe einer ε -Umgebung oder einer k -fachen Berechnung der *Skyline*. Die ausgegebenen Datensätze sind daher von der Vorgabe der Werte ε und

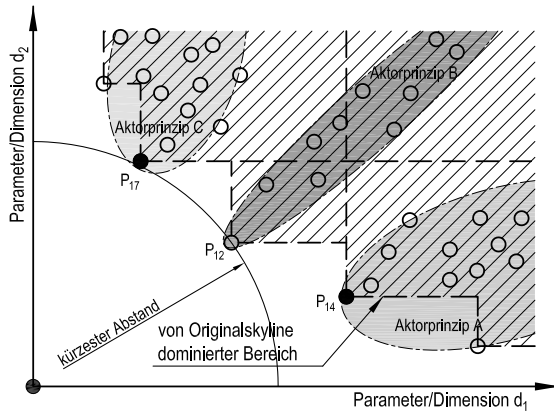
k sowie der Verteilung der Datensätze in der Datenbank auf die der Algorithmus angewendet wird abhängig. Die Vorgabe der ε -Umgebung bzw. der Ordnungsgröße k ist dabei willkürlich und kann z. B. durch den Anwender vorgenommen werden.

Für die Aktorauswahl sind insbesondere die letzten beiden dargestellten *Skyline*-Varianten zur Reduktion der ausgegebenen Lösungsmenge interessant. Durch diese lassen sich Lösungen, die durch eine oder wenige herausragende Parameter Teil der *Skyline* sind, eliminieren. Dies lässt sich im zweidimensionalen Fall als „Beschneiden des Randes der *Skyline*“ verstehen.

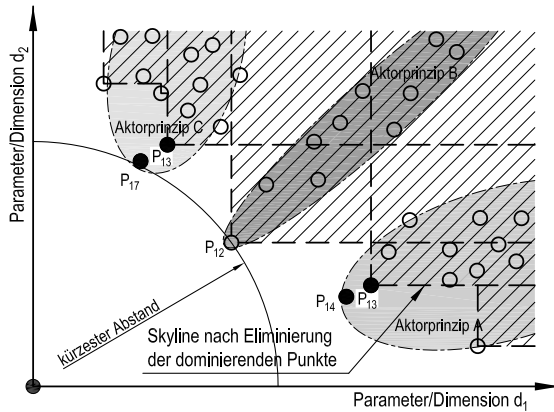
Die Varianten zur Reduzierung der Anzahl ausgegebener Datensätze wirken somit als Filter und sortieren bei einer günstigen Datensatzverteilung die Datensätze aus der Datenbank heraus, die den geforderten Parametern am nächsten kommen. Selbst wenn die geforderten Parameter nicht genau erfüllt werden, können die Aktorprinzipie der ausgewählten Datensätze hinsichtlich einer Umsetzung in einer Sonderentwicklung weiterverfolgt werden.

Nachteilig ist jedoch insbesondere hierbei, dass ggf. naheliegende Aktorprinzipie aufgrund einer ungünstigen Datensatzverteilung nicht ausgegeben werden. Dadurch wird die Diversität des Ergebnisses reduziert. Die reduzierend wirkenden *Skyline*-Varianten können sich somit abhängig von der Datenbank und der jeweiligen Parameterauswahl negativ auf den Vergleich von Aktorprinzipien auswirken (Abbildung 6.6). Inwieweit die vorgestellten Varianten zur Erhöhung oder Reduzierung der Zahl der ausgegebenen Datensätze geeignet sind, das Suchergebnis zu verbessern, ist nur für eine spezifische Suchanfrage zu bewerten.

Alle bisher vorgestellten *Skyline*-Varianten sind aufgrund ihrer „Abstammung“ vom *Maximalvektorproblem* auf den Koordinatenursprung (entspricht dem Optimum/dem gesuchten Parameter) bezogen. Dieser für die Aktorauswahl



(a) Anzahl und Verteilung der Datensätze führt zur Benachteiligung des Aktorprinzips B. Nur die durch die vollen Punkte repräsentierten Datensätze werden ausgegeben.



(b) Obgleich eher den Anforderungen entsprechend, wird der Datensatz p_{12} des Prinzips B bei der k -dominierenden Skyline für $k = 4$ nicht ausgegeben

Abbildung 6.6: Verdeutlichung des Einflusses von Verteilung und Anzahl bei der Reduktion der ausgegebenen Datensätze nach dem Ansatz der k -dominierenden Skyline \mathcal{S}_T ; die einzelnen Aktorprinzipie sind durch Graustufen und durch die Ellipsen abgegrenzt.

untypische Fall erfordert Änderungen am Algorithmus, die im Folgenden beschrieben werden.

6.2.2 Anpassung des *Skyline*-Algorithmus für die Aktorauswahl

Bei der Suche nach Aktoren/Aktorprinzipien können bezüglich der Anzahl und Kombination beliebige Parameter abgefragt werden. Für quantitative Eigenschaften ergeben sich vier Arten möglicher Anfragen:

- Entsprechen die Parameter des Datensatzes den Geforderten?
- Sind die Parameter des Datensatzes größer als die Geforderten (z. B. Leistung)?
- Sind die Parameter des Datensatzes kleiner als die Geforderten (z. B. Masse)?
- Liegen die Parameter des Datensatzes im geforderten Intervall (z. B. Drehzahlbereich)?

Diese möglichen Anfragen erfordern die Berücksichtigung von beliebigen Anfragepunkten und damit die Bestimmung der Abstände im Sinne des *Skyline*-Algorithmus „um diese Punkte herum“. Weiterhin besteht durch die Vorgabe von Intervallgrenzen die Möglichkeit, dass einzelne Datensätze innerhalb des Suchbereiches einzelner oder mehrerer Parameter liegen. Derartige Datensätze erschweren die Bildung der *Skyline* anhand der bisherigen Definition, da ein solcher Datensatz alle anderen Datensätze automatisch dominiert.

Im Folgenden sollen daher Abwandlungen des *Skyline*-Algorithmus für die Bestimmung der *Skyline* bezogen auf beliebige Anfragepunkte und die Erweiterung auf beliebige Anfragebereiche kurz vorgestellt werden.

Realisierung beliebiger Anfragepunkte – *dynamische Skyline*

Um den *Skyline*-Algorithmus auf beliebige Anfragepunkte \mathbf{p}_A , verschieden vom Koordinatenursprung, anwenden zu können, ist eine Transformation der

den Anfragepunkt „umgebenden“ (Abbildung 6.7(a)) Datensätze notwendig, [PTF05, DS07].

Es ergibt sich eine Menge $\mathfrak{P}^* = \{\mathbf{p}_1^*, \dots, \mathbf{p}_m^*\}$ transformierter Datensätze $\mathbf{p}_i^* = (p_{i,1}^*, \dots, p_{i,n}^*)$, die wie folgt bestimmt werden¹⁷:

$$p_{i,j}^* = \{p_{A,j} + |p_{A,j} - p_{i,j}|\}. \quad (6.16)$$

Die *Skyline* wird anschließend aus der Menge der transformierten Datensätze \mathfrak{P}^* gebildet. Die in Abbildung 6.7(b) gezeigte Transformation verdeutlicht die Überführung einer Anfrage bzgl. eines beliebigen Anfragepunktes in eine auf den Koordinatenursprung bezogene Anfrage/Suche.

Berücksichtigung von Bereichsanfragen – *Bereichs-Skyline*

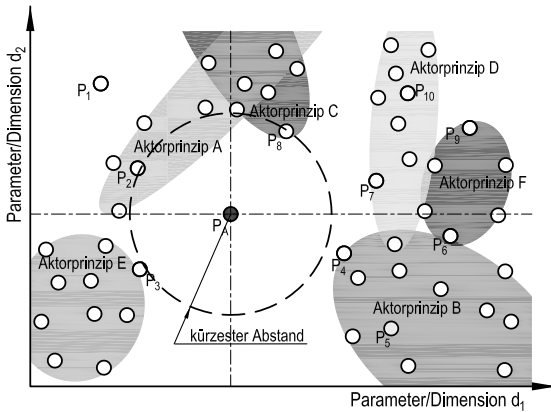
Bei der Suche nach Aktoren sind Bereichsanfragen besonders häufig. Bereiche können durch Schranken (z. B. Leistung $> 100W$, Breite $< 10mm$) oder durch ein Intervall (z. B. Drehzahl von 1000 bis 1500 $1/min$) beschrieben sein. Es sind hierbei zwei Fälle zu unterscheiden:

- I. Die Beschränkungen des Suchraumes, innerhalb derer nach Datensätzen gesucht wird, die weitere Kriterien erfüllen müssen oder
- II. Angabe eines gewünschten Wertebereiches (z. B. Aktorkraft $> 10N$ oder Aktormasse 100 bis 150g), in dem oder in dessen Nähe nach Datensätzen gesucht wird.

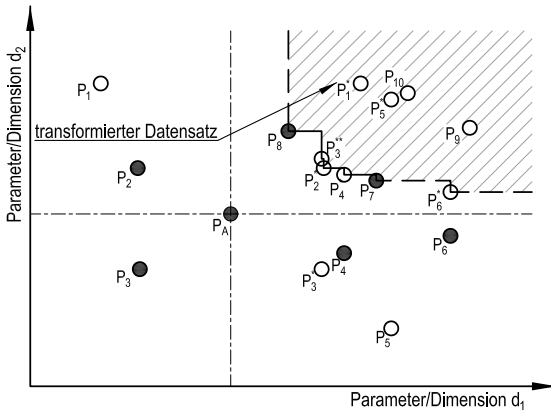
Der erste Fall entspricht einem Filter B_{SR} für die Datensätze und ist durch eine Vorsortierung der Datensätze softwaretechnisch leicht umzusetzen. Die *Skyline* \mathfrak{S}_B ergibt sich für diesen Fall aus den Datensätzen innerhalb der Schranken gemäß der Beziehung:

$$\mathfrak{S}_B(\mathfrak{P}) = \mathfrak{S}(B_{SR}(\mathfrak{P})). \quad (6.17)$$

¹⁷ Dies lässt sich für zwei Dimensionen vereinfacht als Transformation aller Datensätze in den ersten Quadranten bezogen auf p_A als Koordinatenursprung verstehen.



(a) Beispiel für einen beliebigen Anfragepunkt p_A ; der Kreis markiert die für die ausgewählten zwei Dimensionen kleinste Entfernung zum nächstliegenden Datensatz.



(b) Die bezogen auf den Anfragepunkt transformierten Datensätze p_i^* . Zur Verdeutlichung sind die Original-Datensätze p_i ebenfalls dargestellt; ausgegeben (voll) werden die Original-Datensätze.

Abbildung 6.7: Prinzipdarstellung der Transformation der Datensätze und Bestimmung der *dynamischen Skyline*.

Der zweite Fall ist der *dynamischen Skyline* ähnlich, erfordert jedoch eine Anpassung der Transformation für den Anfragebereich $B_{Ab} = ([b_{1,1}, b_{1,2}], \dots, [b_{q,1}, b_{q,2}])$:

$$p'_{i,j} := \begin{cases} b_{j,2} + |b_{j,1} - p_{i,j}|, & p_{i,j} < b_{j,1} \\ b_{j,2}, & b_{j,1} \leq p_{i,j} \leq b_{j,2} \\ p_{i,j}, & p_{i,j} > b_{j,2} \end{cases} \quad (6.18)$$

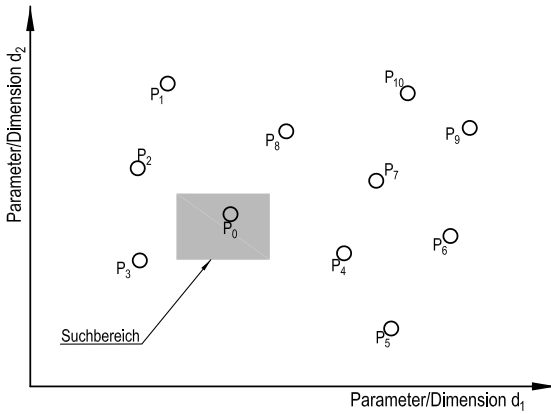
Die Abbildung 6.8 stellt die Bestimmung der *dynamischen Bereichs-Skyline* exemplarisch für zwei Dimensionen dar. Alle Datensätze, die im Suchbereich liegen, sowie die der zugehörigen *Skyline* werden ausgegeben.

Eine mögliche Alternative wäre die Berechnung der *Skyline* bezogen auf den Mittelpunkt des Anfragebereiches. Eine derartige Rückführung der *dynamischen Bereichs-Skyline* auf eine *Bereichs-Skyline* z. B. bezogen auf den Mittelpunkt des Suchbereiches andere – potenziell schlechtere – Ergebnisse liefert (siehe die Punkte \mathbf{p}_1 und \mathbf{p}_3 in den Abbildungen 6.8(c) und 6.8(d)). Es würden durch eine solche Vereinfachung nicht die nächstliegenden Datensätze um den Anfragebereich ausgegeben.

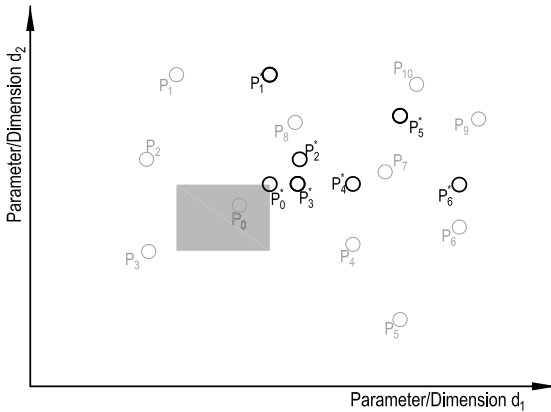
Nach Anwendung der Beziehung (6.18) besteht für alle *dynamischen Skylines* die Gefahr, dass transformierte Werte auf verschiedenen Seiten des Abfrageintervalls einer Dimension einander dominieren. Dies ist ungünstig, da bei einem gesuchten Wert $P_{Aktor} = 100W$ bei in den anderen Dimensionen gleichen Werten z. B. ein Akteur X mit $P = 50W$ als Element der *Skyline* einen Akteur Y mit $P = 175W$, dominiert.

Um zu verhindern, dass die transformierten Datensätze einander dominieren, wird ergänzend definiert, dass \mathbf{p}'_x den Punkt \mathbf{p}'_y im Parameter $p_{i,j}$ nicht dominieren kann, wenn gilt:

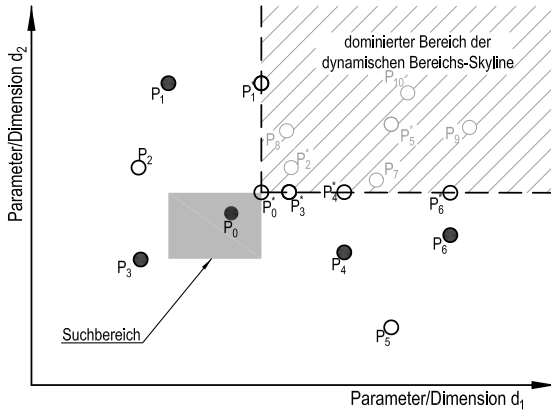
$$p_{x,j} < b_{j,1} < b_{j,2} < p_{y,j} \quad (6.19)$$



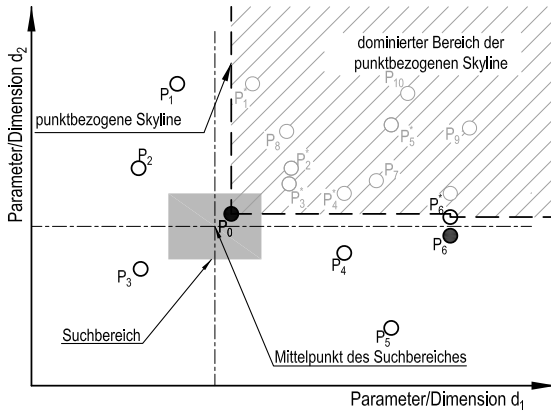
- (a) Beispiel für einen beliebigen Anfrage-/Suchbereich. Der Datensatz p_0 ist innerhalb dieses Bereiches und damit gültige Lösung.



- (b) Die bezogen auf den Anfragebereich transformierten Datensätze p_i^* sind zum Zweck der Verdeutlichung hervorgehoben und mit den Original-Datensätzen p_i dargestellt.



(c) Aus den Original- und den transformierten Datensätzen p_i^* wird die *Skyline* gebildet; ausgegeben (voll) werden nur die Original-Datensätze.



(d) Ausgegebene Datensätze bei der Bestimmung der *Skyline* bezogen auf den Mittelpunkt des Anfragebereiches; ausgegeben (voll) werden nur die Original-Datensätze.

Abbildung 6.8: Prinzipdarstellung der Transformation der Datensätze und Bestimmung der *dynamischen Bereichs-Skyline*. Die transformierten Datenpunkte sind in Originallage sowie mit „*“ markiert in transformierter Lage dargestellt. Die Abbildungen 6.8(c) und 6.8(d) verdeutlichen den Unterschied zwischen einer dynamischen Bereichs-Skyline und einer auf den Mittelpunkt des Anfragebereichs bezogenen Bereichs-Skyline.

$$p_{x,j} > b_{j,1} < b_{j,2} > p_{y,j}. \quad (6.20)$$

Dies lässt sich für zwei Dimensionen als eine den Suchbereich *umschließende Skyline* verstehen (Abbildung 6.9). Es entstehen „lange Ränder“ mit den nächstliegenden Aktoren als „Ecken“.

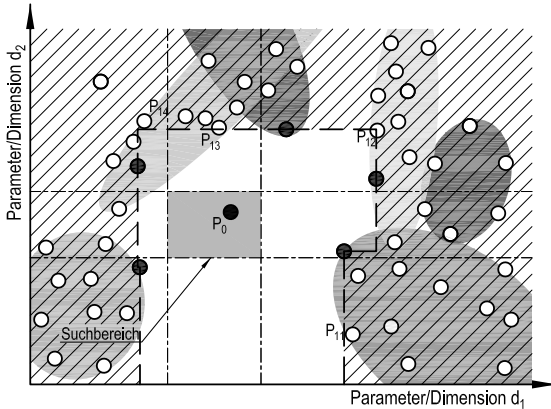


Abbildung 6.9: Veranschaulichung der umschließenden *Skyline* für zwei Dimensionen. Die in Graustufen dargestellten elliptischen Punkte sollen exemplarisch die Möglichkeitsbereiche verschiedener Akteurprinzipie repräsentieren.

Das Dominieren von Datensätzen anderer Akteurprinzipie mit nur marginal schlechteren, aber ggf. einfacher an die geforderten Werte anzupassenden Parametern ist für die Akteurprinzipauswahl nicht zweckmäßig. Der *Skyline*-Algorithmus muss daher weiter angepasst werden, um eine möglichst hohe Vielfalt naheliegender Akteurprinzipie auszugeben.

Vergrößerung des *Spektrums* der ausgegebenen Datensätze – *Dominanzwinkel*

Zum Zweck der Akteurprinzipauswahl ist es wünschenswert, wenige den Suchkriterien nahe kommende Datensätze vieler verschiedener Akteurprinzipie

auszugeben. Ähnliche Datensätze des gleichen Aktorprinzips sollen, wenn möglich, ausgeblendet und solche mit möglichst verschiedenen Parameterkonfigurationen dargestellt werden.

Praktisch bedeutet das, die Dominanzbedingung mit zunehmender Entfernung von einem dominierenden Datensatz in der *Skyline* aufzuweichen. Dies ist mit der *elastischen* und der *k-Band-Skyline* nicht umsetzbar, da beide Ansätze zur Erweiterung der Anzahl der ausgegebenen Datensätze die Vorgabe einer „Entfernung“ erfordern.

Möglich ist eine solche künstliche „Aufweichung“ durch den Ansatz der *Winkeldominanz* [Ple09]. Dieser „weicht“ durch Vorgabe eines *Dominanzwinkels* die *Skyline* auf. Dies erfolgt durch drei grundlegende Schritte:

- I. Zunächst wird die *dynamische Bereichs-Skyline* wie zuvor beschrieben bestimmt.
- II. Anschließend werden alle Datensätze der *Skyline*, die die Suchkriterien in wenigstens einer Dimension erfüllen, ausgewählt.
- III. Für die ausgewählten Datensätze wird in allen Dimensionen, in denen sie nicht im Suchbereich liegen, ein variabler Bereich „hinter“ der *Skyline* bestimmt und die darin liegenden Datensätze werden zu den Ausgabedatensätzen hinzugefügt.

Der variable Bereich wird über eine Tangensbeziehung (Gleichung (6.21)) dabei nur für die Datensätze bestimmt, die in wenigstens einer Dimension (für einen Parameter) im Suchbereich liegen.

$$A_{D_v} \cdot \tan(\alpha) = A_{D_u} \quad (6.21)$$

Datensätze außerhalb des Suchbereiches tragen nicht zur Dominanzwinkelberechnung bei. Die Festlegung eines Dominanzwinkels außerhalb des Suchbereiches ergäbe weitere Lösungen, die in jeder Dimension weiter vom Suchbereich entfernt liegen.

Durch den Abstand A_{D_v} eines Datensatzes \mathbf{p}_y zu einem dominierenden Datensatz \mathbf{p}_x und die Vorgabe von α ergibt sich ein Abstand A_{D_u} (Abbildung 6.10). Befindet sich der Datensatz \mathbf{p}_y innerhalb dieses Abstandes A_{D_u} „hinter“ der *Skyline* so wird auch er als Ergebnis der Suche ausgegeben.

Es ist dabei zu beachten, dass der Abstand A_{D_u} abhängig ist von einem willkürlich (durch den Nutzer oder den Programmierer) festgelegten α und dem sich aus den jeweiligen Parametern der Datensätze ergebenden Abständen A_{D_v} .

Ein Datensatz \mathbf{p}_y wird von \mathbf{p}_x somit im Sinne des Winkeldominanzansatzes dominiert, wenn gilt:

$$\mathbf{p}_y \succ^{WD} \mathbf{p}_x; \quad (6.22)$$

\mathbf{p}_y mit

$$\left(|\mathcal{D}_u| = 0 \vee |\mathcal{D}_v| = 0 \vee \tan(\alpha) \geq \frac{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_u} (p_{y,j} - p_{x,j})^2}}{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_v} (p_{y,j} - p_{x,j})^2}} \right) \succ^{WD} \mathbf{p}_x. \quad (6.23)$$

Die Abbildung 6.10 verdeutlicht die Bildung der Dominanzwinkel für den zweidimensionalen Fall. Der Ablauf der Abstandsbestimmung für den dreidimensionalen Fall zeigt Abbildung 6.11.

Eine Kombination des Winkeldominanzansatzes mit den beschriebenen Varianten zur Reduzierung bzw. Vergrößerung der Zahl ausgegebener Datensätze ist möglich. Zweckmäßig erscheint die Einführung einer auf den Dominanzwinkel bezogen, kleinen ε -Umgebung, um beispielsweise Parameter, die mit weniger Nachkommastellen in die Datenbank eingegeben wurden, ebenfalls zu erfassen. Weiterhin ist eine Normierung des Abstandes auf den Wertebereich für alle zur Berechnung herangezogenen Dimensionen notwen-

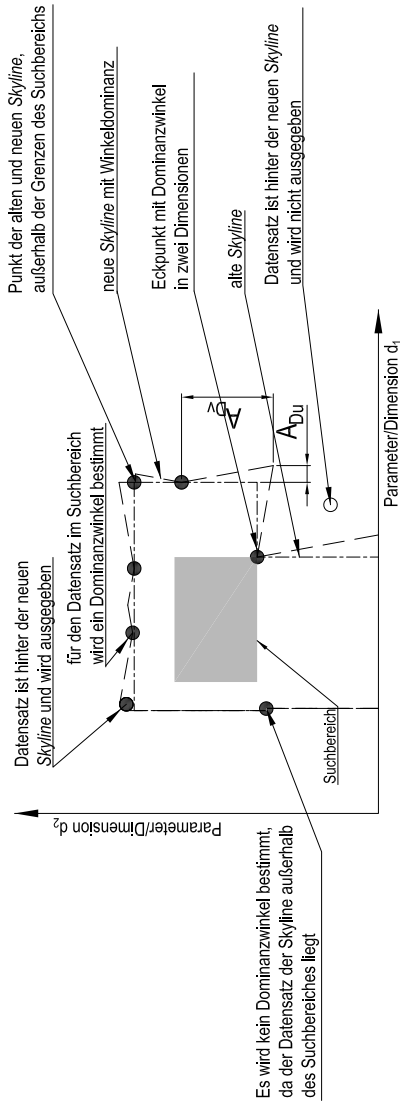


Abbildung 6.10: Zweidimensionales Beispiel für den Bildung des Dominanzwinkels gemäß Bedingung 6.23 anhand ausgewählter Punkte.

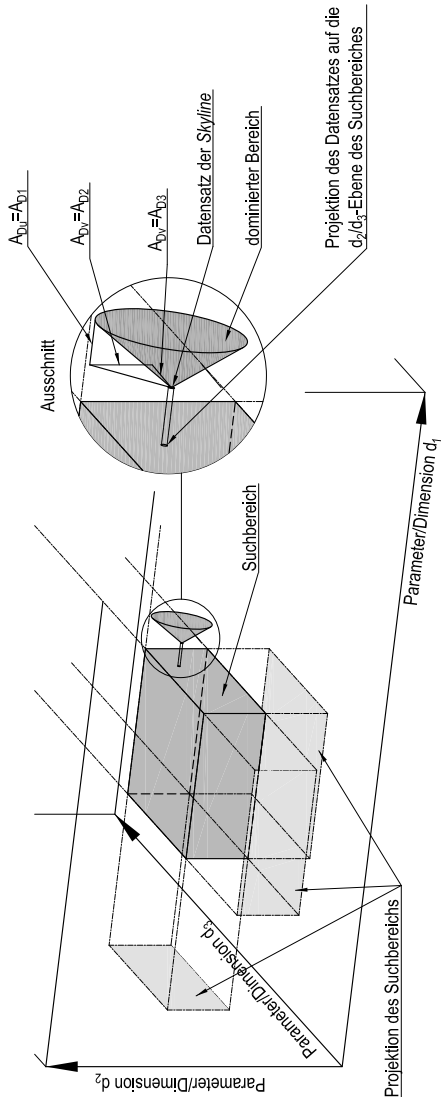


Abbildung 6.11: Prinzipdarstellung der Dominanzwinkelbestimmung für den dreidimensionalen Fall.

dig. Der Winkeldominanzansatz erweitert sich damit zu:

\mathbf{p}_y mit

$$\left(\begin{array}{l} |\mathcal{D}_u| = 0 \vee |\mathcal{D}_v| = 0 \vee \tan(\alpha) \geq \frac{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_u} (p_{y,j} - p_{x,j})^2} - \varepsilon}{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_v} (p_{y,j} - p_{x,j})^2}} \end{array} \right) \succ^{WDE} \mathbf{p}_x \quad (6.24)$$

beziehungsweise bezogen auf die Maximal- d_{jmax} und Minimalwerte d_{jmin} der jeweiligen Dimensionen:

\mathbf{p}_y mit

$$\left(\begin{array}{l} |\mathcal{D}_u| = 0 \vee |\mathcal{D}_v| = 0 \vee \tan(\alpha) \geq \frac{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_u} \left(\frac{p_{y,j} - p_{x,j}}{d_{jmax} - d_{jmin}} \right)^2} - \varepsilon}{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_v} \left(\frac{p_{y,j} - p_{x,j}}{d_{jmax} - d_{jmin}} \right)^2}} \end{array} \right) \succ^{WDE} \mathbf{p}_x. \quad (6.25)$$

Der in Beziehung (6.25) dargestellte Zusammenhang ergibt eine relative Abstandsbestimmung und vermeidet die unterschiedlich starke Ausprägung der Winkeldominanz infolge unterschiedlicher Größenordnungen der betrachteten Parameter/Dimensionen.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, abhängig vom Aktorprinzip verschiedene Dominanzwinkel einzuführen. Dazu wird ein Dominanzwinkel α_{AP} definiert, der auf Datensätze des selben Aktorprinzips wie das des dominierenden Datensatzes angewendet wird. Für andere Aktorprinzipie gilt bei der Dominanzwinkelbestimmung ein weiterer Winkel α_k . Wird $\alpha_{AP} < \alpha_k$ gewählt, wird die Dominanz des dominierenden Datensatzes (Aktors) gegenüber Datensätzen mit anderen Aktorprinzipien weiter abgeschwächt und es gilt:

$$\alpha_i := \begin{cases} \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_x) = \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_y) \rightarrow \alpha_{AP} \\ \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_x) \neq \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_y) \rightarrow \alpha_k \end{cases}. \quad (6.26)$$

Gleiches ist für die ε -Umgebung möglich, so dass gilt:

$$\varepsilon_i := \begin{cases} \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_x) = \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_y) \rightarrow \varepsilon_{AP} \\ \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_x) \neq \text{Aktorprinzip}(\mathbf{p}_y) \rightarrow \varepsilon_k \end{cases} \quad (6.27)$$

Mit unterschiedlichen aktorprinzipabhängigen α_i und ε_i ergibt sich die Beziehung:

$$\mathbf{p}_y \text{ mit } \left(|\mathcal{D}_u| = 0 \vee |\mathcal{D}_v| = 0 \vee \tan(\alpha_i) \geq \frac{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_u} (p_{y,j} - p_{x,j})^2 - \varepsilon_i}}{\sqrt{\sum_{j \in \mathcal{D}_v} (p_{y,j} - p_{x,j})^2}} \right) \succ^{WDE} \mathbf{p}_x \quad (6.28)$$

als *doppelte Winkeldominanz*.

Durch die Nutzung der *doppelten Winkeldominanz* in einem Suchalgorithmus bleibt die Reduktion der ausgegebenen Datensätze auf die hinsichtlich der Suchparameter naheliegenden als Vorteil des *Skyline*-Algorithmus erhalten. Gleichzeitig ist es jedoch möglich die Dominanz durch α_i und ε_i anhand des Aktorprinzips abzuschwächen bzw. zu „steuern“. Statt des Aktorprinzips können grundsätzlich andere bzw. durch Erweiterung auch zusätzliche qualitative Parameter (z. B.: Parameter der Bewegungsform bzw. für andere Beispiele – statt Aktoren – entsprechend zweckmäßige) für die Abschwächung Berücksichtigung finden.

Zusammenfassung

Durch den *Skyline*-Algorithmus werden die den Suchparametern entsprechenden oder am nächsten kommenden Datensätze einer Datenbank ausgegeben. Der Neuheitswert liegt in der Anwendung des *Skyline*-Algorithmus auf eine Aktordatenbank, verbunden mit der Möglichkeit, die Dominanz zwischen den verschiedenen Aktorprinzipen abzuschwächen.

Der Ansatz ähnelt damit stark dem des *Actuator-Selectors*, bietet aber den Vorteil, viele verschiedene Parameter(-kombinationen) berücksichtigen zu können. Aus den einzelnen Datensätzen definieren sich somit die *Möglichkeitsbereiche* der einzelnen Aktorprinzipale. Die willkürliche Bildung von elliptischen Begrenzungen/„Blasen“ zum Beschreiben dieser Gültigkeitsbereiche entfällt. Bei Erweiterungen der Datenbasis bleibt der Algorithmus unverändert. Durch Vorgabe von Dominanzwinkeln α_i kann auf die Diversität der ausgegebenen Datensätze/Aktoren gezielt Einfluss genommen werden.

Es ist zu beachten, dass die vorgegebenen Dominanzwinkel α_i und die ε_i -Umgebung(en) willkürlich und letztlich Ergebnis subjektiver Entscheidungen/Vorgabe des Suchenden/Einstellenden sind. Der Suchende/Nutzer der Aktorauswahlhilfe kann durch Variation der Parameter α_i und ε_i gezielt Einfluss auf die ausgegebene Lösungsmenge nehmen. Der *Skyline*-Algorithmus ordnet die in einer Datenbank enthaltenen Datensätze nur anhand dieser, durch Nutzer und Programmierer erstellten Vorgaben. Die „Auswahl“ (hier: eines Aktors, eines Aktorprinzips) wird somit nicht vom Algorithmus, sondern durch Entwickler vorgenommen.

6.2.3 Sortierung der Suchergebnisse – Zuweisung einer Relevanz

Die Zuweisung einer Relevanz und die Ordnung der Suchergebnisse anhand dieser sind grundlegendes Merkmal aller Suchalgorithmen. Ziel ist es dabei, nicht nur potenziell passende Suchergebnisse anzuzeigen, sondern diese auch beginnend mit der höchsten Relevanz auszugeben.

Durch den *Skyline*-Algorithmus erfolgt keine Ordnung der ausgegebenen Datensätze. Es handelt sich beim Suchergebnis somit um eine ungeordnete Ergebnismenge, die eine zusätzliche Ordnung erfordert. Hierfür werden alle Datensätze in drei Kategorien eingeteilt:

- I. Datensätze, deren Parameter die Suchanforderungen erfüllen bzw. im gesuchten Parameterintervall liegen,

II. Datensätze, die in der *Skyline* enthalten sind und

III. Datensätze, auf die die ersten beiden Kriterien nicht zutreffen.

Von diesen Kategorien werden die Datensätze der ersten beiden anhand ihrer *Entfernung* zum Anfragebereich sortiert [Ple09]. Die *Entfernung* eines Datensatzes zum Anfragebereich entspricht dabei dem Mittelwert der jeweiligen Abstände bzgl. Werte/Intervallgrenzen der einzelnen Anfrageparameter/Dimensionen und wird nach folgendem Schema in Form von Prozentzahlen angegeben:

- Wird ein Anfrageparameter/-intervall durch einen Datensatz erfüllt, beträgt der betreffende Abstand 0 %.

Wird der Anfrageparameter nicht erfüllt, werden folgende Fälle unterschieden:

- Für qualitative Parameter wird der Abstand auf 100 % gesetzt.
- Für quantitative Parameter wird der Abstand des Datensatzes mit maximalem Abstand zum gesuchten Parameterwert/-intervall mit 100 % festgelegt, allen anderen Datensätzen werden entsprechend anteilige Abstandswerte zugewiesen.

Anschließend wird das arithmetische Mittel der jeweiligen Abstände und damit der Gesamtabstand bestimmt. Die Relevanz ist dabei umgekehrt proportional zum Abstand eines Datensatzes von den gesuchten Parametern/-Parameterintervallen. Ausgegeben werden die Datensätze mit abnehmender Relevanz.

6.3 Implementierung des *Skyline*-Algorithmus – Prototyp

Der *Skyline*-Algorithmus wurde in einen Programmprototyp umgesetzt, der im Wesentlichen aus drei Elementen besteht:

- einer Datenbank für Aktoren auf *SQL*-Basis,
- dem *Skyline*-Algorithmus unter Nutzung der Programmierumgebung MICROSOFT VISUAL STUDIO 2008 [Ple09] und
- einer GUI und Umsetzung zweier Varianten zur Repräsentation der Ergebnisse [Mes09].

Die Abbildung 6.12 zeigt das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des im Rahmen der Arbeit entwickelten Prototyps.

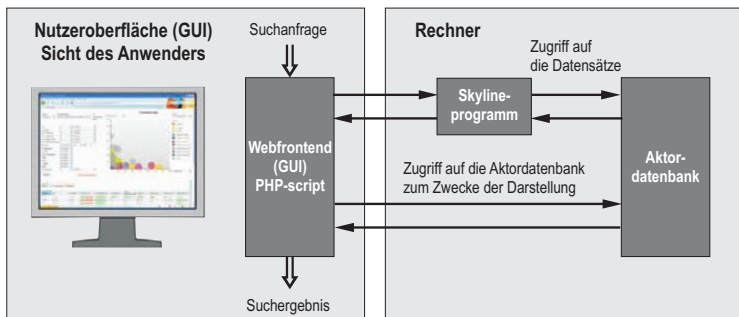


Abbildung 6.12: Interaktion der Teilsysteme im Prototyp [Ple09, EST10].

Die genannten Arbeiten dokumentieren umfassend die Konzeption [Ple09, EST10] und Aufbau [Ple09, Mes09] des Prototyps sowie die an diesem durchgeführten Untersuchungen. In den Untersuchungen wurden folgende Aspekte betrachtet:

- die Untersuchung verschiedener Algorithmen (*Block Nested Loop* und *Divide & Conquer*),
- die Rechenzeiten bei der *Skyline*-Bestimmung (geprüft wurden die *dynamische Bereich-Skyline* sowie die *Skyline* mit einfacher und die mit doppelter *Winkeldominanz*) sowie
- die Ergebnisvisualisierung und Bewertung verschiedener Repräsentationsformen.

Mit dem Ziel, die sich aus der softwaretechnischen Umsetzung des *Skyline*-Algorithmus ergebenden Potentiale und ggf. auch Schwierigkeiten herauszustellen.

Im Weiteren sollen Datenbank, *Skyline*-Algorithmen und die GUI kurz vorgestellt und die wesentlichen Teilergebnisse unter den genannten Aspekten diskutiert werden.

6.3.1 Datenbasis des Prototyps – die Aktordatenbank

Die Datenbasis für die Aktorsuche enthält verschiedene Aktoren unterschiedlicher Typen und eine Auswahl der jeweils zugeordneten Eigenschaften. Die Aktordatenbank ist als Tabelle mit einem Aktor pro Zeile und den Eigenschaften in den Spalten (Abbildung 6.13) als *relationale Datenbank* aufgebaut.

typ	herst	bew_fg	bew_form	bew_rast	bew_sinn	bew_verlauf	bew_begr	drehz	wg	p_ab	l_gen	laenge	masse
DC-Motor	Maxon	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	118	66	0.75	0.013	0.0205	0.015
DC-Motor	Maxon	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	190	74	1.2	0.013	0.0205	0.015
DC-Motor	Maxon	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	129	79	2.5	0.017	0.0254	0.027
DC-Motor	Faulhaber	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	168	72	4.5	0.017	0.0254	0.028
DC-Motor	Faulhaber	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	213	58	0.54	0.015	0.0158	0.013
DC-Motor	Faulhaber	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	133	86	3.85	0.022	0.0326	0.061
DC-Motor	Faulhaber	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	90	73	27.3	0.032	0.042	0.175
DC-Motor	Crouzet	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	62	48	3	0.0322	0.0446	0.096
DC-Motor	Crouzet	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	33	52	15	0.042	0.0844	0.4
DC-Motor	Crouzet	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	25	63	27	0.063	0.2	0.84
DC-Motor	Faulhaber	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	112	85	228	0.038	0.064	0.4
EC-Motor	Maxon	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	602	39	1.2	0.006	0.021	0.0028
EC-Motor	Maxon	1 Freiheitsgrad	rotatorisch	ohne & mit Rast	Wechselsinnig	kontinuierlich & diskontinuierlich	unbegrenzt	467	73	12	0.022	0.032	0.067

Abbildung 6.13: Auszug der SQL-Datenbank (am Rand beschnitten).

Die Datenbank enthält sowohl quantitative (u. a. Leistung, Masse, generalisierte Länge und Breite) als auch qualitative Parameter (z. B. die genannten Klassifikationskriterien und das Aktorprinzip). Sie wurde für die Erstellung dieser Abhandlung anhand von Produktkatalogen gefüllt.

Zum Zweck der Übersichtlichkeit bei der Eingabe und Pflege der Daten wurden die Aktoren anhand der Bewegungsform in *translatorische* und *rotatorische* unterschieden und verschieden abgelegt. Es entstanden so zwei

hinsichtlich des Aufbaus gleiche, bezogen auf die aufgenommenen Eigenschaften aber zum Teil verschiedene Datenbanken, wobei jede wiederum für jeden Aktor weitere Klassifikationskriterien (u. a. auch *Aktortyp*, *Hersteller* usw.) enthält. Die zwei im Rahmen der Arbeit erstellten und für die Untersuchung genutzten Aktordatenbanken enthalten 1376 translatorische und 1946 rotatorische Aktoren verschiedener Aktorprinzipie. Die beiden für den Prototyp erstellten Datenbanken sind hinsichtlich ihres Aufbaus nahezu identisch und wurden nur zum Zweck der einfacheren Befüllung und Pflege getrennt. Die Trennung ist für den Nutzer des Prototypen nicht zu erkennen, daher werden im Weiteren die beiden Datenbanken als „Aktordatenbank“ zusammengefasst.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Datenbanken repräsentieren die Grundlage des vorgestellten Auswahlkonzeptes. Zu Vergleichszwecken wurden deshalb für die translatorischen Antriebe sowohl die elektrisch als auch die nicht-elektrisch betriebenen Aktoren zusammengetragen und gelistet.

Die Angaben der Aktoren wurden Katalogen verschiedener Hersteller entnommen, wobei die Hersteller selbst zunächst willkürlich ausgewählt wurden. Anschließend wurde gezielt über eine Internet- und Herstellerrecherche nach einzelnen Aktoren am Rande des bisher erfassten Spektrums der Eigenschaften gesucht (z. B. besonders kleine, dünne, kurze und solche Aktoren, die eine hohe Leistungsdichte erwarten lassen). Ziel war dabei nicht die Erweiterung der Anzahl der Aktoren, sondern Aktoren mit besonders „grenzwertigen“ Parametern zu erfassen. Auch war eine Diversität der gelisteten Hersteller gewünscht. Bei einer großen Anzahl von Aktoren eines Herstellers wurde daher nur ein Teil des Portfolios in die Datenbank aufgenommen.

Die Datenbanken wurden über einen längeren Zeitraum anhand verschiedener Kataloge (sowohl Papier- als auch Onlinekataloge) erstellt. Dabei verschwanden einzelne in eine Datenbank bereits aufgenommene Aktoren bei neueren Ausgaben der Kataloge aufgrund der Anpassungen des Portfolios der betrach-

teten Hersteller. Vereinzelt verschwanden auch Hersteller oder firmierten unter anderem Namen, was beides die Nachvollziehbarkeit der Angaben erschwert. Diese Änderungen sind aber durch Nutzung des *Actuator-Selector* Ansatzes unproblematisch, da auch nicht mehr verfügbare aber bekannte Aktoren zum Umreißen der *Möglichkeitsbereiche* geeignet sind.

Die in den Katalogen für die Aktoren gelisteten Parameter waren zum Teil unterschiedlich benannt oder enthielten einige in der Datenbank erfasste Parameter nicht. In Einzelfällen wurden daher äquivalent erscheinende Angaben trotz abweichender Benennung übernommen. War kein passender Parameter vorhanden, wurde das Feld „leer“ gelassen.

In der Datenbank führen diese „leeren“ Felder, insbesondere bei den Vergleichsoperationen des *Skyline*-Algorithmus, zu Problemen bei der Bewertung der betreffenden Datensätze. Bei fehlenden Angaben wurden die entsprechenden Felder in der Datenbank daher mit dem Wert „NULL“ (Datentyp *Charakter*) gefüllt. Weiterhin wurde als Regel definiert, dass Datensätze mit „NULL“ nicht dominiert werden können.

6.3.2 Skyline-Algorithmen – softwaretechnische Umsetzung

Die algorithmische Umsetzung des *Skyline*-Ansatzes wurde umfassend in der Literatur betrachtet (u. a. [BKS01, PTF05, PTF03, SM88]). Verschiedene der meist im Hinblick auf eine geringe Rechenzeit hin optimierten Ansätze sind als Pseudocode veröffentlicht. Die vorgestellte Aktordatenbank unterscheidet sich von den in der Literatur betrachteten Datenbanken durch die geringe Anzahl an Datensätzen (Aktoren)¹⁸ sowie der vorgeschalteten Unterscheidung in rotatorische und translatorische Aktoren und dem Auftreten von „NULL“ Feldern in der Aktordatenbank.

¹⁸ Ziel war es, eine kleine Datenbank nutzen zu können. Gleichwohl ist die entstandene Datenbank größer als die von ZUPAN [ZAF02] zugrundegelegte.

Als wesentliche Algorithmen zur Bestimmung von *Skylines* sind der *Block Nested Loop* (BNL)-Algorithmus und der *Divide and Conquer* (D&C)-Algorithmus anzusehen. Beide Algorithmen sind für relationale Datenbanken mit sehr vielen Datensätzen entwickelt und optimiert und nutzen für die Berechnung der *Skyline* sogenannte *Hilfs-Skylines*, um die Berechnungszeit für große Datenbanken und Datensätze zu minimieren. Im Folgenden sollen beide Algorithmen und die verwendeten *Hilfs-Skylines* sowie die notwendigen Anpassungen für die Aktorauswahl vorgestellt werden.

Divide and Conquer-Algorithmus

Das Prinzip des D&C-Algorithmus beruht auf der Unterteilung des Suchraumes in Untermengen¹⁹. Für diese werden *Hilfs-Skylines* berechnet, welche wiederum durch den Vergleich untereinander zu einer *Skyline* führen. Durch dieses Vorgehen bleiben die Berechnungen auf wenige Datensätze der Untermengen beschränkt.

Die *Skyline* berechnet sich nach folgendem Schema (Abbildung 6.14):

- I. Für eine Dimension d_i wird aus den Datensätzen der Mittelwert MW_{d_i} bestimmt und in Teilmengen \mathfrak{T}_1 und \mathfrak{T}_2 geteilt. Die Datensätze der Teilmenge \mathfrak{T}_1 sind dabei für die betreffende Dimension kleiner oder gleich und die der Teilmenge \mathfrak{T}_2 größer als MW_{d_1} . Für die Dimension $d_2 \in d_i, d_2 \neq d_1$ werden die Teilmengen wiederum anhand des Mittelwerts MW_{d_2} in die Teilmengen $\mathfrak{T}_{1,1}$ und $\mathfrak{T}_{1,2}$ bzw. $\mathfrak{T}_{2,1}$ und $\mathfrak{T}_{2,2}$ geteilt. Es gilt wiederum, dass die Datensätze der Teilmenge $\mathfrak{T}_{x,1}$ kleiner gleich und die der Teilmenge $\mathfrak{T}_{x,2}$ größer MW_{d_2} sind. Dies wird für alle $d_x \in D_{A_s}$ wiederholt.
- II. Durch rekursive Anwendung des D&C-Algorithmus wird die Unterteilung solange fortgesetzt, bis jede Teilmenge nur noch eine kleine Menge an Datensätzen (theoretisch bis hin zu nur einem einzigen) enthält.

¹⁹ auch Partitionen genannt

III. Für alle Teilmengen werden anschließend einzeln *Hilfs-Skylines* berechnet.

IV. Abschließend wird die ausgegebene *Skyline* aus den Datensätzen der *Hilfs-Skylines* berechnet.

Durch die Teilung anhand des Mittelwertes müssen nicht alle *Skylines* miteinander verglichen werden, da sich z. B. die *Hilfs-Skylines* der Teilmengen $\mathfrak{T}_{1,2}$ und $\mathfrak{T}_{2,1}$ nicht gegenseitig dominieren können.

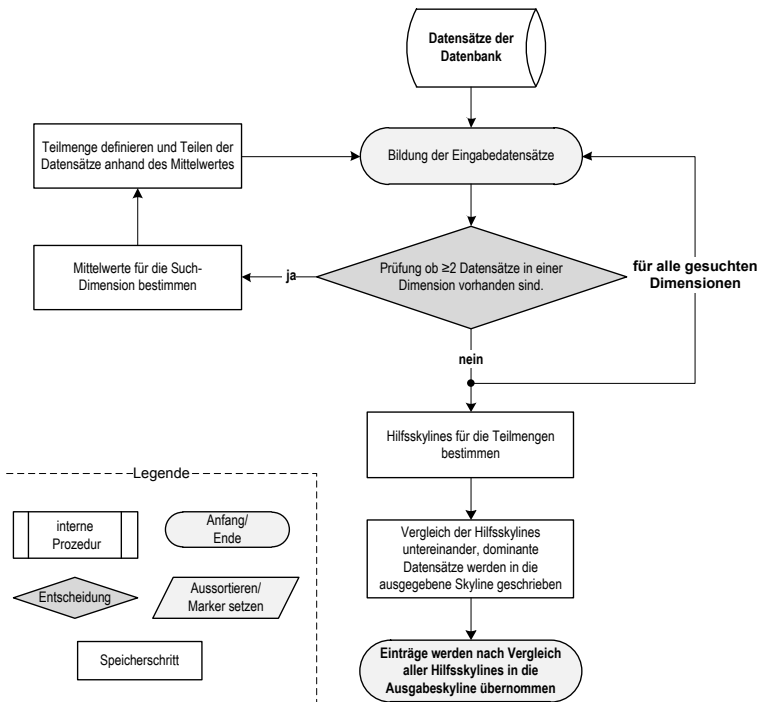


Abbildung 6.14: Ablaufschema des D&C-Algorithmus

Die Zeitersparnis bei der Berechnung der *Skyline* gegenüber dem paarweisen Vergleichen aller Datensätze ergibt sich aus der geringeren Anzahl an notwendigen Vergleichen zwischen den Werten der verschiedenen *Hilfs-Skylines*. Die

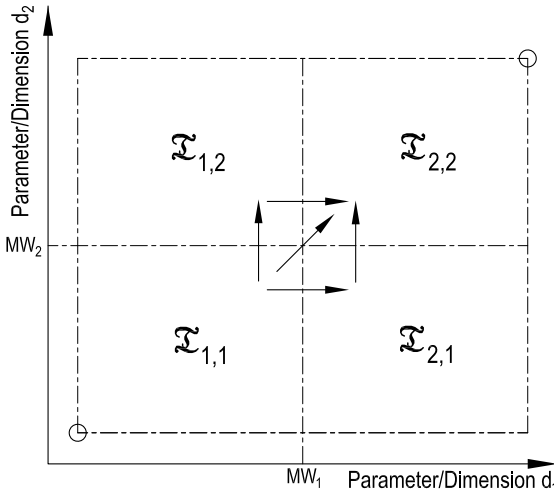
beschriebene Reduktion der Zahl der Paarvergleiche ist bei Bereichsanfragen jedoch nicht gegeben (Abbildung 6.15).

Block Nested Loop-Algorithmus

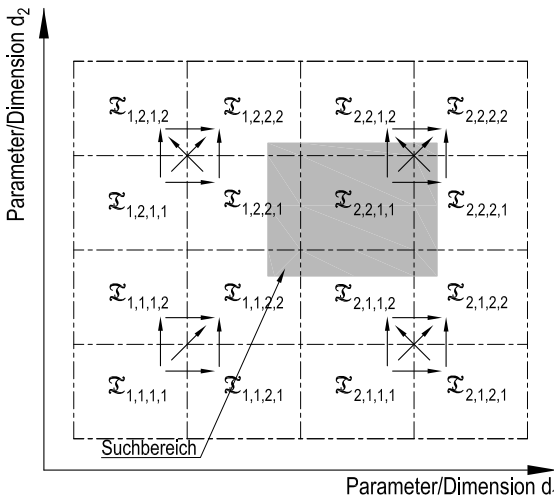
Der BNL-Algorithmus vergleicht einen Datensatz mit den Elementen einer *Hilfs-Skyline*. Die Besonderheit des Algorithmus liegt in der Beschränkung der Berechnung der *Hilfs-Skyline* auf eine kleine Anzahl an Datensätzen (zulässige Anzahl an Elementen der *Hilfs-Skyline*) und der Verwendung einer Zwischenspeicherdatei (*temporäre Datei*).

Die Datensätze der *Hilfs-Skyline* werden, ausgehend von einem leeren oder willkürlich gefüllten Feld, während des Programmdurchlaufs nach folgender Fallunterscheidung variiert (Abbildung 6.16):

- I. Werden Elemente (Datensätze) der *Hilfs-Skyline* durch einen Datensatz dominiert, wird der Datensatz als Element der *Skyline* aufgenommen und die dominierten Datensätze werden aus der *Hilfs-Skyline* entfernt.
- II. Wird ein Datensatz durch ein Element der *Hilfs-Skyline* dominiert, wird er nicht weiter betrachtet und nicht mit weiteren Datensätzen verglichen
- III. Trifft weder I. noch II. zu, wird der Datensatz in die *Hilfs-Skyline* aufgenommen.
- IV. Wird im Fall III. die Größe der *Hilfs-Skyline* überschritten, wird der betreffende Datensatz in eine temporäre Datei geschrieben und bildet den Datensatz für den nächsten Durchlauf.
- V. Wird ein Datensatz in die *Hilfs-Skyline* übernommen, bekommt dieser einen *Marker*, der die aktuellen Datensätze der *temporären Datei* kennzeichnet. Mit diesen muss der neu eingefügte Datensatz im nächsten Durchlauf verglichen werden.



(a) Teilung des Wertebereichs und Vergleich der *Hilfs-Skylines* der Untermengen. Die Pfeile markieren die notwendigen Vergleiche.



(b) Unterschied beim Vergleich der *Hilfs-Skylines* infolge der Anwendung auf eine Bereichsanfrage. (Datensätze nicht dargestellt)

Abbildung 6.15: Prinzipdarstellung des D&C-Algorithmus für eine zweidimensionale Abfrage

Sämtliche Datensätze, die nach der Betrachtung aller Datensätze noch Element der *Hilfs-Skyline* sind, werden anschließend in die ausgegebene *Skyline* übernommen und aus der *Hilfs-Skyline* entfernt. Sollten nach einem Vergleich aller Datensätze miteinander entsprechend der obigen Regeln keine Datensätze mehr in die temporäre Datei übernommen werden, werden alle Elemente der temporären Datei in die ausgegebene *Skyline* übernommen.

Die Begrenzung der Anzahl der Datensätze der *Hilfs-Skyline* beeinflusst die Rechenzeit maßgeblich. Eine geringe Anzahl an Datensätzen erfordert eine hohe Anzahl an Dateizugriffen, bietet aber wiederum die Möglichkeit, durch wenige Vergleichsoperationen schnell viele Datensätze zu vergleichen. Letzteres erscheint insbesondere zu Beginn der Vergleichsoperationen zweckmäßig.

Ein möglicher Mittelweg ist die Erhöhung der Zahl der Datensätze bei jedem Durchlauf (z. B. empfiehlt PLENTZ die Verdopplung der Anzahl mit der Zahl der Durchläufe [Ple09]; denkbar ist auch eine Multiplikation der Ausgangsanzahl mit der Zahl der Durchläufe).

Ein weiterer Ansatz, die Datensätze möglichst früh auszusortieren, ist, den dominierenden Datensatz der *Hilfs-Skyline* an den Anfang der *Skyline* zu verschieben.

Beim folgenden Durchlauf wird der Datensatz somit zunächst mit dem zuletzt Dominierenden verglichen. Für die Auswahl von Aktoren wären hierfür insbesondere die Randwerte von Bereichsanfragen interessant.

Besonders bei großen Datenbanken mit ähnlichen Datensätzen ergibt sich durch den selbstorganisierenden BNL-Algorithmus eine Verringerung der Rechenzeit. Bei kleinen Datenbanken oder solchen mit stark verschiedenen Datensätzen ist jedoch ein geringerer Effekt oder durch die Verschiebung der Datensätze sogar eine Verlangsamung zu erwarten.

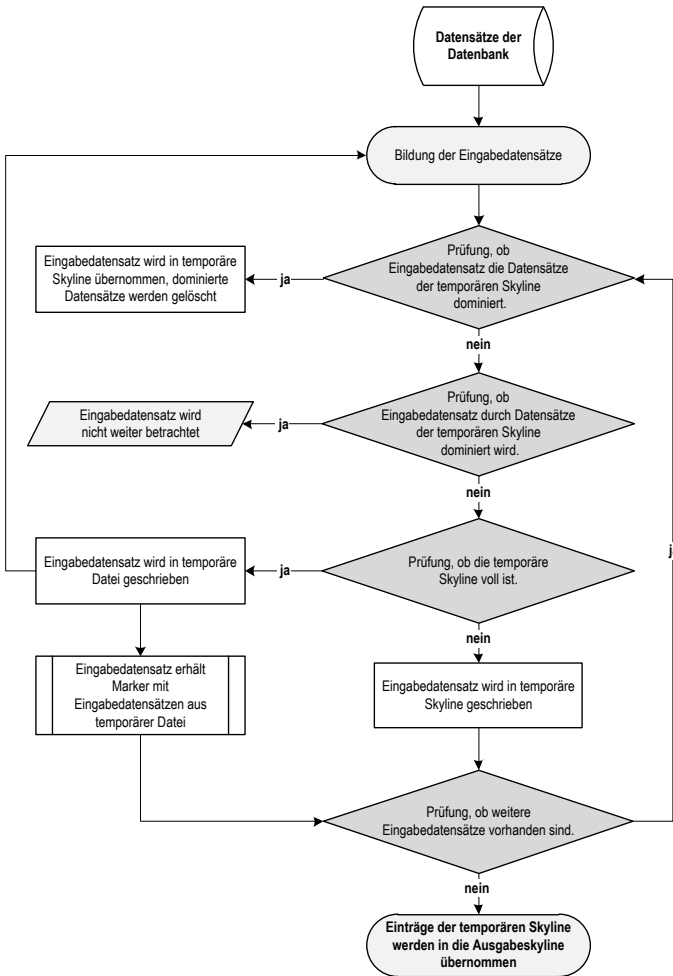


Abbildung 6.16: Ablaufschema des BNL-Algorithmus

Erkenntnisse und Bemerkungen zur algorithmischen Umsetzung

Der Algorithmus der *dynamischen Bereichs*-Skyline sowie der der *Skyline* mit einfacher und doppelter Winkeldominanz wurden mit dem D&C-Algorithmus und BNL-Algorithmus umgesetzt und hinsichtlich der bei einer Anfrage benötigten Rechenzeit verglichen. Hierbei wurde auch der Einfluss von *Index*-Dateien untersucht, die im Hauptspeicher geladen werden können und während der Suche Datenbankzugriffe vermeiden helfen. Grund für die Untersuchung der Rechenzeit war neben der Prüfung der allgemeinen Machbarkeit die Auswahl eines geeigneten Softwareansatzes für die algorithmische Umsetzung. Für die Untersuchungen galten stets folgende Annahmen/Festlegungen²⁰. Bei der Untersuchung der Rechenzeit konnte nur beschränkt auf die

Tabelle 6.5: Festlegungen für die *Skyline*-Algorithmen der prototypischen Umsetzung

Parameter	festgelegter Wert
kleinster Relevanzwert für ausgegebene Skylineelemente	60 %
Winkel der Winkeldominanz	15°
Epsilon der Winkeldominanz	1 %
Winkel der doppelten Winkeldominanz	15°
Epsilon der doppelten Winkeldominanz	5 %

Aktordatenbank zurückgegriffen werden, da diese beständig erweitert wurde und die Zahl der Datensätze zum Zeitpunkt der Untersuchung noch keine aussagekräftigen Ergebnisse hinsichtlich der Performanz erlaubten. Es wurde daher neben der Aktordatenbank auf verschiedene *Dummy*-Datenbanken mit 10000 bis 100000 Datensätzen zurückgegriffen.

PLENTZ konnte für das Kriterium der Rechenzeit aufzeigen, dass der BNL-Algorithmus eine deutlich geringere Laufzeit ergibt und für die Suche nach

²⁰ Die Rechenzeiten wurden mit einem „AMD Athlon 64 X2-Dualprozessor“ (2x2,3 GHz) bestimmt und können je nach verwendeter Hardware variieren. Ziel der Untersuchungen war die Verdeutlichung von Unterschieden zwischen den verschiedenen Algorithmen für die *Skyline*-Bestimmung nicht die Ermittlung absoluter Rechenzeiten.

Aktoren in der Aktordatenbank besser geeignet erscheint als der D&C-Algorithmus (Abbildung 6.17; [Ple09]). Bezogen auf die verschiedenen *Skyline*-Ansätze zeigt der Algorithmus der *dynamischen Bereichs-Skyline* erwartungsgemäß die geringste Laufzeit.

Weiterhin zeigten die *Winkeldominanz-Skylines* insbesondere bei zwei bis vier Anfragedimensionen eine um 50 bis 100 % höhere Zahl an ausgegebenen Datensätzen. Bei einer höheren Zahl an Anfragedimensionen war der Unterschied zwischen der Zahl der durch den BNL-Algorithmus für die normale und die beiden *Winkeldominanz-Skylines* gelieferten Datensätze nur noch sehr klein [Ple09].

Die Untersuchungen liefern keine Aussage über die „Verwendbarkeit“ der Ergebnisse. Dies ist nur zum Teil in den verwendeten *Dummy*-Datenbanken begründet. Eine Beurteilung der Verwertbarkeit der Ergebnisse – für die Suche in einer realen Aktordatenbank – ist von der konkreten Suchanfrage, den in der Datenbank enthaltenen Datensätzen und der Absicht des Suchenden selbst abhängig und somit nicht objektiv verifizierbar.

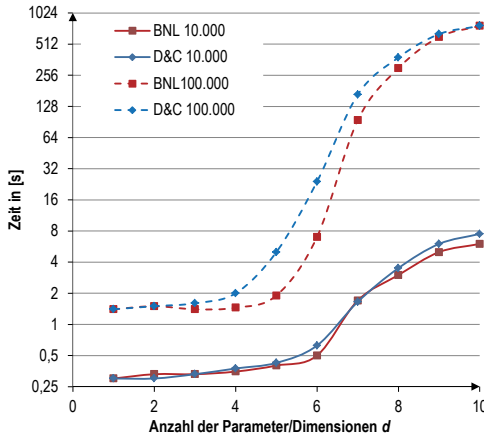
6.3.3 Graphische Benutzeroberfläche – GUI

Im Hinblick auf eine schnelle Eingrenzung des Suchraumes kommt der GUI für rechnerbasierte Hilfssysteme große Bedeutung zu. Die GUI dient zur Eingabe der Suchparameter sowie zur Ausgabe der Ergebnisse.

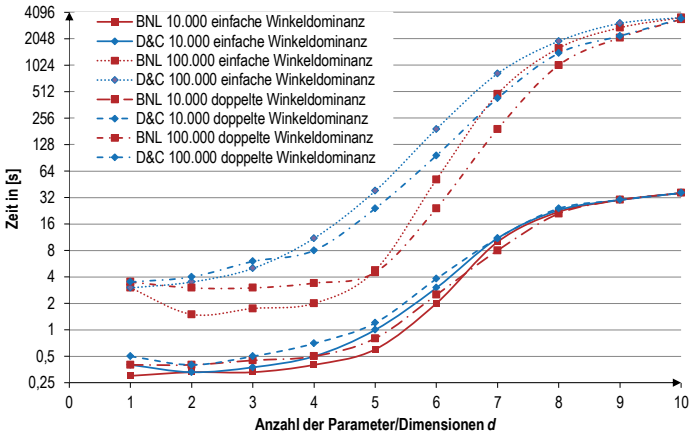
Für die Bestimmung einer geeigneten Repräsentationsform wurde eine Befragung von potenziellen Anwendern²¹ durchgeführt. Hierbei ergaben sich verschiedene Anforderungen an die Darstellung der Ergebnisse.

Die gewählte Umsetzung diente zur Untersuchung der zum Teil weit auseinander gehenden Wünsche an die Repräsentation der Suchergebnisse. We-

²¹ Die Befragung ist in [Mes09] dokumentiert. Die Auswahl von Befragten ergab sich dabei aus den Projektpartnern des *VERDIAN*-Projektes, in dessen Rahmen die softwaretechnische Umsetzung erstellt wurde (siehe hierzu [VK10]).

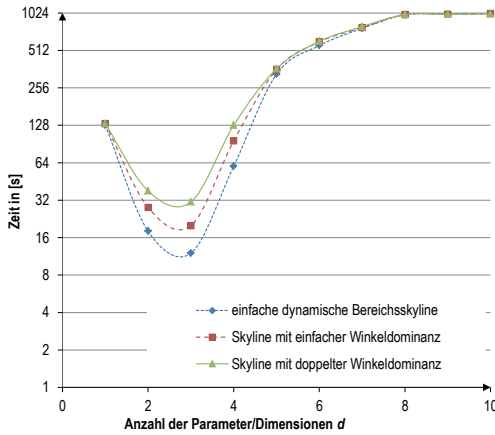


(a) Laufzeiten für den Ansatz der dynamischen Bereichsskyline für verschiedene Datenbankgrößen und mit verschiedenen Algorithmen.

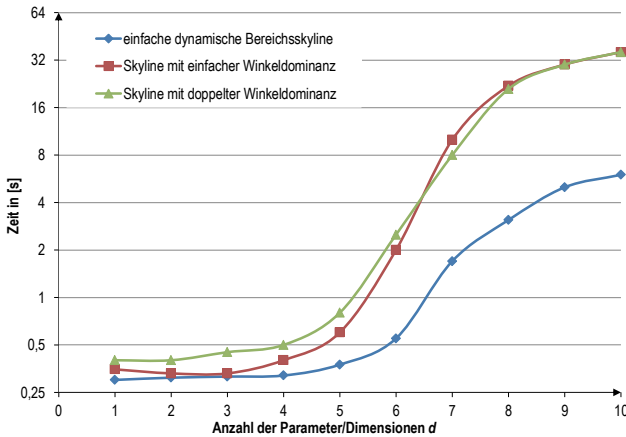


(b) Laufzeiten für den Ansatz der einfachen und der doppelten Winkeldominanz für verschiedene Datenbankgrößen und mit verschiedenen Algorithmen.

Abbildung 6.17: Ergebnisse der Laufzeituntersuchungen anhand von *Dummy*-Datenbanken. (zusammengefasst nach [Ple09])



(a) Ergebnisanzahl der verschiedenen *Skyline*-Algorithmen in Abhängigkeit von der Zahl der Suchparameter/Dimensionen.



(b) Laufzeit der Suche der verschiedenen *Skyline*-Algorithmen in Abhängigkeit von der Zahl der Suchparameter/Dimensionen.

Abbildung 6.18: Ergebnisanzahl und Laufzeiten der verschiedenen *Skyline*-Algorithmen unter Nutzung des BNL-Algorithmus (zusammengefasst nach [Ple09]). Die „Linien“, die die einzelnen Messpunkte verbinden, sollen den Verlauf verdeutlichen und repräsentieren keine Messkurve.

sentlicher Schwerpunkt war dabei die Ausgabe der Ergebnisse bei Anfragen mit mehr als drei quantitativen Parametern. Die zwei Bildschirmdimensionen beschränken hierbei die Möglichkeiten zur Repräsentation weiterer Parameter/Dimensionen. Eine Darstellung wie bspw. in Abbildung 6.6, ist für solche Anfragen nicht möglich. Für die Visualisierung der Ergebnisse der Aktorsuche wurden daher ein *Bubble Chart* und eine tabellarische Darstellung gewählt (Abbildung 6.19²²).

Der *Bubble Chart* soll eine Übersichtsfunktion bieten, um dem Nutzer eine Orientierung zu erlauben (Übersicht über z. B. Anzahl der Datensätze, Häufungen bei bestimmten Parameterwerten, dominante Aktorprinzipie usw.). Es werden hierzu nur die Ergebnisse dargestellt, die Element der durch den *Skyline*-Algorithmus bestimmten Menge von ausgegebenen Datensätzen sind.

Durch Wahl der Achsen des Koordinatensystems sowie durch Größe, Form und Farbe der Datenpunkte (*Bubbles*) können mit dem *Bubble Chart* bis zu fünf verschiedene Parameter wiedergegeben werden. Von diesen sind Form und Farbe für qualitative und die verbleibenden für quantitative Parameter geeignet.

Umgesetzt wurde die Darstellung von vier Dimensionen (in Abbildung 6.20: Drehzahl, Wirkungsgrad, Masse, Aktorprinzip). Auf die Variation der Form wurde verzichtet, da sich durch Überlappungen der einzelnen *Bubbles* eine Identifizierung der Form als schwierig erwies. Die Farbe verdeutlicht als qualitativer Parameter die Zugehörigkeit eines Datensatzes zu einem bestimmten Aktorprinzip.

Die gewählte Darstellung erlaubt eine Anpassung der durch die Koordinatenachsen sowie durch die von der Bubblegröße repräsentierten Parameter durch

²² Abbildung 6.19 und die folgenden Abbildungen, die die Visualisierung zeigen, wurden unter Nutzung eines *Server2Go* Webservers für die *MySQL* basierte Datenbank und mit dem *Firefox 6.0.2* Webbrowser auf einem *Windows 7* Betriebssystem erstellt. Da die prototypische GUI nicht auf die öffentliche, webbasierte Nutzung hin angelegt war, sind Abweichungen im Erscheinungsbild bei der Nutzung anderer Softwarekonfigurationen möglich.

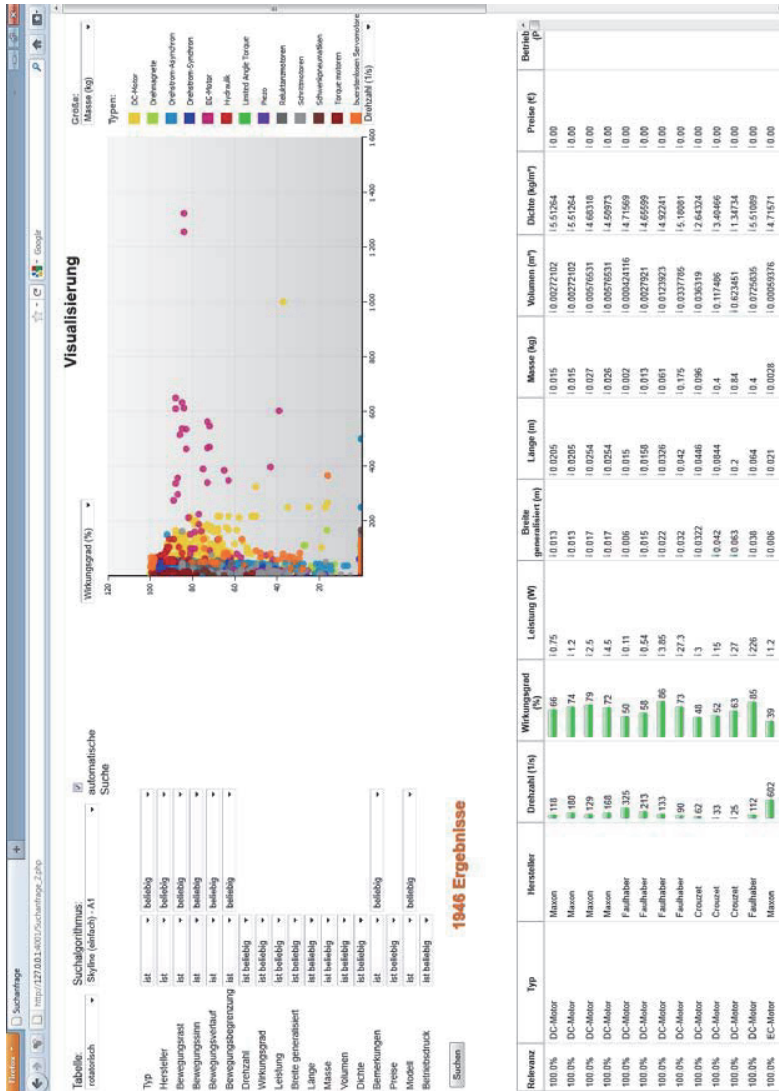


Abbildung 6.19: Gesamtansicht der Benutzeroberfläche (GUI) der Aktorauswahlhilfe (Bildschirmausschnitt)

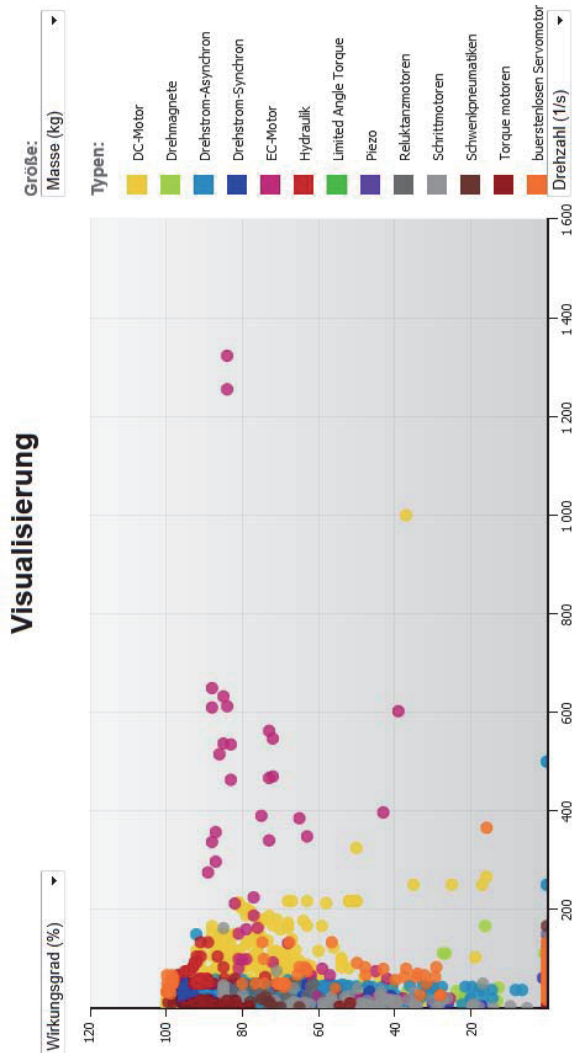


Abbildung 6.20: Benutzeroberfläche (GUI) in Form eines *Bubble Chart* (vergrößerter Ausschnitt). Die Farben markieren die verschiedenen Aktorprinzipie, die Größe der Kreise kann durch das oben rechts befindliche Abrollmenü einem Parameter zugewiesen werden.

den Nutzer. Weiterhin ist die Möglichkeit des „Hineinzoomens“ gegeben, um Überlappungen und Überdeckungen von einzelnen Bubbles zu minimieren. Durch Bewegen des Mauszeigers über einzelne Bubbles werden automatisch die Relevanz und der exakte Wert des durch die Größe repräsentierten Parameters ausgegeben (Abbildung 6.21).

Als zusätzliche Darstellungsform wird eine Ergebnistabelle ausgegeben. Diese liefert eine detaillierte Übersicht der relevanten Ergebnisse mit allen Parametern und ermöglicht das direkte Vergleichen und Sortieren.

Die tabellarische Darstellung der einzelnen Parameter relevanter Aktoren wurde zum Zweck der Übersichtlichkeit um eine Balkendarstellung erweitert. Hierbei wurden zwei verschiedene Varianten umgesetzt:

- I. Balken, die konkrete Zahlenwerte repräsentieren und
- II. Balken, die bei der Einordnung der konkreten Parameter eines Datensatzes bzgl. des Suchbereiches helfen sollen.

Den Aufbau und die genannten Balkenformen zeigt Abbildung 6.22 (siehe für Balkentyp I. „Wirkungsgrad“ und für Balkentyp II. „Breite generalisiert“).

In der Tabelle wurden zudem implementiert:

- eine Sortier- und Filterfunktion bspw. nach Aktortyp, Hersteller oder einzelnen Zahlenwerten
- Verlinkung zu einer *Google*-Suche nach dem konkreten Hersteller und Aktortyp durch Klicken auf einen konkreten Datensatz in der Tabelle.

Die Relevanz der Treffer wird in der ersten Spalte der Tabelle angegeben. Angezeigt werden alle Treffer mit einer Relevanz²³ $\geq 60\%$. Die genannten Sortier- und Filterfunktionen wirken sich nicht auf den *Bubble Chart* aus.

²³ willkürliche Festlegung für die Erprobung des Prototypen

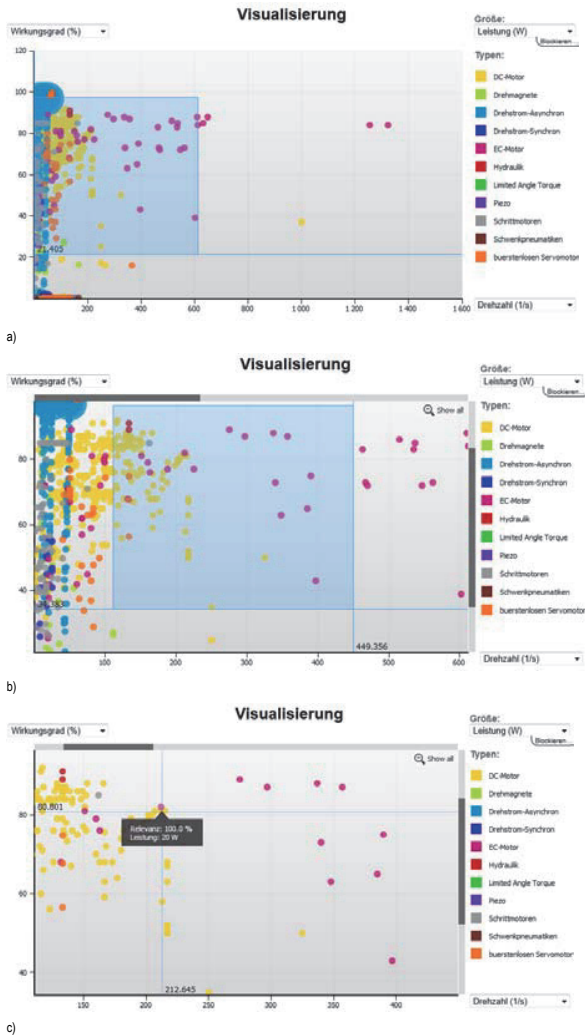


Abbildung 6.21: „Zoom“ und Anzeigemöglichkeiten im *Bubble Chart*, (vergrößerte Bildschirmausschnitte, Zoomfenster in blau); von a) nach c) wird der betrachtete Ausschnitt zunehmend verkleinert, die Werte in der Tabelle bleiben vom Zoom unberührt.

1100 Ergebnisse

Relevanz	Typ	Hersteller	Deutzzahl (Tn)	Wirkungsgrad (%)	Leistung (kW)	Breite generalisiert (m)	Länge (m)	Masse (kg)	Volumen (m³)	Dichte (kg/m³)	Preise (€)	Betriebsbereich (Pa)
100.0%	DC-Motor	Mason	116	66	10.75	0.115	0.0272102	5.51764	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Mason	112	74	11.2	0.015	0.0272102	5.51764	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Mason	120	79	12.5	0.027	0.0576531	4.6310	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Mason	108	72	4.5	0.026	0.00516531	4.50973	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Faehuber	325	50	0.11	0.002	0.00042416	4.71569	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Faehuber	213	58	15.54	0.013	0.0027921	4.65599	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Faehuber	133	66	13.85	0.061	0.0123923	4.92241	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Faehuber	90	73	12.7	0.175	0.0337766	5.10981	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Crossart	162	48	1.3	0.096	0.036319	2.64324	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Crossart	133	52	15	0.4	0.117486	1.34046	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Crossart	25	63	127	0.84	0.624651	1.34734	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	DC-Motor	Faehuber	112	65	126	0.4	0.072635	5.51099	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Mason	622	39	11.2	0.028	0.0063976	4.71571	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Mason	467	73	12	0.067	0.0161643	5.50792	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Mason	160	79	20	0.105	0.0189159	5.32406	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Mason	100	77	19	0.27	0.046255	5.59527	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Mason	297	87	100	0.165	0.0332224	4.96653	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Mason	275	69	200	0.271	0.045239	5.99941	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Mason	152	69	400	12.45	0.363205	6.70972	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Nanotec	80	59	13.8	0.07	0.017106	4.99213	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Nanotec	67	62	16.5	0.45	0.107044	4.142	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Nanotec	147	71	100	1.5	0.20841	4.62009	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Nanotec	150	67	200	1.85	0.63955	2.90655	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	Nanotec	910	81	600	1.8	1.0384	1.38309	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	stern-papst	175	45	12.7	0.12	0.040208	2.66643	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	stern-papst	167	57	17.5	0.24	0.17236	1.39227	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	stern-papst	167	62	26	0.52	0.29149	1.79693	0.00	0.00	0.00	-
100.0%	EC-Motor	stern-papst	132	65	14	0.24	0.17236	1.39227	0.00	0.00	0.00	-

Abbildung 6.22: Ergebnistabelle, nach Relevanz geordnet (Bildschirmausschnitt). Die schwarzen Striche in den Spalten „generalisierte Breite“ und „Länge“ kennzeichnen den Wert des Aktors im vorgegebenen – grün hinterlegten – Suchbereich; die restlichen Balken dienen zur Visualisierung der Ergebnisse.

Tabelle und *Bubble Chart* erlauben eine Orientierung hinsichtlich der *Möglichkeitsbereiche* der verschiedenen (durch die Farben im *Bubble Chart* oder den Namen in der Tabelle gekennzeichneten) Aktorprinzipie.

6.4 Fazit und Schlussfolgerung aus der prototypischen Umsetzung

Die vorgestellte Auswahlhilfe vereint die als vorteilhaft identifizierten Merkmale der einzelnen Auswahlhilfen für Aktoren des Standes der Technik. Die rechnerbasierte Lösung erlaubt die einfache Pflege und Erweiterung der Daten sowie die Anpassung der Zugriffsmöglichkeiten. Die Verwendung einer dem *Actuator-Selector* ähnlichen Darstellungsform ermöglicht es, mit wenigen Datensätzen die Gültigkeitsbereiche der einzelnen Aktorprinzipie abzugrenzen.

Die Möglichkeit zur Umsetzung des *Skyline*-Algorithmus für die Aktorauswahl konnte in einem Prototyp bestätigt werden. Genutzt werden konnten hierfür zwei bekannte Algorithmen, die hinsichtlich der benötigten Rechenzeit mithilfe von *Dummy*-Datenbanken mit einer großen Anzahl an Datensätzen konfrontiert und dann verglichen wurden. Dabei zeigte der BNL-Algorithmus gegenüber dem D&C-Algorithmus eine geringere Rechenzeit für die Suche.

Die neu entwickelte Erweiterung um die Winkeldominanz zeigte die gewünschte Erhöhung der ausgegebenen Datensätze für eine kleine Zahl an Suchparametern. Bei einer großen Anzahl an Suchparametern wich die Zahl der ausgegebenen Ergebnisse, wie erwartet, zunehmend geringer von den Ergebnissen des konventionellen *Skyline*-Algorithmus ab. Eine qualitative Bewertung der Suche/Auswahlhilfe anhand der Suchergebnisse war nicht Ziel der Untersuchungen am Prototyp. Es ist jedoch anzunehmen, dass diese durch die jeweilige Suchanfrage und die Zusammensetzung der Daten in der Aktordatenbank bestimmt werden.

Die getrennte Umsetzung von GUI, Datenbank und *Skyline*-Algorithmus in drei verschiedenen Programmen erlaubt die unabhängige Anpassung und Optimierung der Einzelaspekte des Auswahlwerkzeuges in einer spezifischen Umsetzung bzw. in weiterführenden Arbeiten. Mögliche Ansatzpunkte für Erweiterungen/Verbesserungen sind:

Hinsichtlich der Benutzeroberfläche (GUI): Bei der Erstellung des Prototyps hat sich gezeigt, dass insbesondere die Repräsentation der Ergebnisse in der GUI die Akzeptanz und Nutzbarkeit der Ergebnisse bestimmt. Die im Prototyp umgesetzte zweidimensionale Darstellung ist dabei nur begrenzt geeignet, die *Skyline* als „Rand des Lösungsraumes“ abzubilden. Gleichzeitig wurde von allen – wenngleich nicht repräsentativen – Nutzern die tabellarische Darstellung als zweckmäßig und hilfreich empfunden. Die Untersuchung einer geeigneten Repräsentationsform auch durch Betrachtung einer breiteren Nutzerbasis ergibt sich als Schwerpunkt weiterer Betrachtungen.

Hinsichtlich der Datenbasis: Die dem Prototypen zugrundeliegende Datenbank enthält eine ausreichende Anzahl an Datensätzen für viele Aktortypen. Sie erlaubt die zielgerichtete Erweiterung der Anzahl der Datensätze und die Diversifizierung der zugrundegelegten Hersteller für die Aktoren, die jeweils nur eine geringe Diversität aufweisen. Eine erhebliche Verbesserung der Nutzbarkeit der Daten lässt sich zudem durch das Füllen der „NULL-Felder“ erreichen, da diese im Prototypen dazu führen, dass ein Eintrag als passend angenommen und ausgegeben wird, ohne den *Skyline*-Algorithmus zu durchlaufen. Als Ansatz zur Verbesserung der Datenbank ist somit die Erhöhung der Zahl der Parameter pro Datensatz vorrangiges Ziel – noch vor der Erhöhung der Zahl der Datenbankeinträge.

Hinsichtlich der Algorithmen: Mögliche Ansätze zur Erweiterung der softwaretechnischen Umsetzungen sind in der Verwendung von durch den Nutzer wählbaren Dominanzwinkeln und Epsilonwerten sowie

in einer ggf. damit verbundenen Umsetzung einer Wichtungsfunktion zusehen. Die Zweckmäßigkeit der Implementierung zusätzlicher *Skyline*-Varianten zur Verringerung oder Vergrößerung der Zahl an ausgegebenen Datensätzen kann ggf. geprüft werden.

Erweiterungen sind für alle drei Elemente des Prototyps denkbar, erscheinen jedoch für die Datenbasis und die GUI als besonders interessant. Grundsätzlich sollte – bei Wunsch der Erweiterung oder Nutzung – der vorhandene Prototyp überarbeitet werden, da das Programm selbst durch die verschiedenen Erweiterungen während der Erprobung an einigen Stellen unübersichtlich geworden ist.

Abweichend von der Intention des Prototyps – Unterstützung des Entwicklers bei der Auswahl von Aktoren – ergeben sich weitere, in der Form zunächst nicht beabsichtigte Anwendungsmöglichkeiten für ein Aktorauswahlwerkzeug. So erlaubt die Datenbasis, durch Anpassung der GUI, die Aktoren auch anhand anderer qualitativer Kriterien farblich abzugrenzen. Dies ist zum Beispiel anhand des Herstellers möglich, sodass sich die Portfolios vergleichen lassen. Im Marketing oder Vertrieb eines Aktorherstellers bspw. kann das eigene Portfolio gegenüber einer ggf. anonymisierten Vergleichsmenge etwaigen Kunden flexibel, anhand der für diesen maßgeblichen, Parameter dargestellt werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit, herausragende eigene oder fremde Parametersätze zu visualisieren und damit eigene oder fremde „Vorsprünge“ bei der Produkt- und Entwicklungsplanung zu verdeutlichen.

Neben der allgemeinen „Verschiebung“ der *Skyline* durch neue Entwicklungen (hin zum Koordinatenursprung) kann so gezielt nach Alleinstellungsmerkmalen eigener und fremder Produkte gesucht werden. Für einen Aktorhersteller ist dabei die Abbildung wirtschaftlicher Eigenschaften (z. B. Gewinn pro Akteur, Verkaufszahlen) gemeinsam mit oder gar in Abhängigkeit von technischen Eigenschaften denkbar.

7 Konzept zur Unterstützung bei der Aktorprinzipauswahl

Sollte die Aktorsuche (z. B. in einem oder mehreren Produktkatalogen) ergeben, dass die geforderten Parameter(-bereiche) durch keinen bekannten Aktor erfüllt werden, ergeben sich folgende Optionen:

Eine tiefgehende Aktorsuche: z. B. in Form einer weiterführenden und freien Suche nach möglichen Aktoren (z. B. in weiteren Katalogen von weiteren Herstellern sowie weiteren Aktorprinzipen).

Eine applikationsspezifische Aktorentwicklung: z. B. durch eine direkte Anfrage bei konkreten Aktorherstellern nach einer möglichen Sonderanfertigung des Aktors eines gewählten Aktorprinzips mit den geforderten Parametern.

Eine Anpassung der Anforderungen: durch Veränderung (Abschwächung hinsichtlich ausgewählter Parameter) der Anforderungen an den Aktor hin zu bekannten und damit möglichen Parametern.

Für die zielführende Weiterverfolgung ist für alle drei Optionen die Kenntnis über die den geforderten Parametern nächstliegenden Aktorprinzipie erforderlich. Die Frage nach der Zweckmäßigkeit der Weiterverfolgung der einzelnen Optionen ist dabei nur zu beantworten, wenn eine ausreichende Kenntnis des „Abstandes“ der möglichen Aktorprinzipie gegeben ist.

Erkennt der Entwickler bspw. durch Nutzung des in *Kapitel 6* beschriebenen Ansatzes, dass der von ihm gesuchte Parametersatz im Möglichkeitsbereich eines oder sogar mehrerer Aktorprinzipie liegt, wird er weitersuchen oder

gezielt eine Sonderentwicklung eines Aktors bei einem passenden Hersteller anfragen. Die Bewertung der möglichen Aktorprinzipale erfolgt dann anhand der genannten schwer abbildbaren Eigenschaften (Kosten, Verfügbarkeit usw.) und nicht anhand der auf die Bewegungsfunktion und Gestalt bezogenen Parameter.

Ergibt die Suche nach einem Aktor, dass der gewünschte Parametersatz außerhalb der bekannten Möglichkeitsbereiche liegt, ist für eine Sonderentwicklung eine Aktorprinzipauswahl nötig. Der *Skyline*-Ansatz z. B. liefert hierfür einen Wert für den Abstand der nächstliegenden bekannten Aktoren zum gesuchten Parametersatz in Form von Prozentzahlen. Dieser Wert kann als Orientierung dienen, ist jedoch nicht für Schlussfolgerungen über die Realisierbarkeit des Parametersatzes mit einem bestimmten (bspw. dem anhand der Prozentwerte nächstliegenden) Aktorprinzip geeignet. Hierfür ist es nötig, die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen gesuchten Parametern abschätzen zu können und die sich bei der Verbesserung einzelner ergebende Verschlechterung anderer gesuchter Parameter zu erkennen.

Die dritte Option erfordert entweder eine Anpassung der Anforderungen an das Bewegungssystem als Ganzes oder eine Anpassung der Struktur²⁴ des Bewegungssystems. Derartige Anpassungen sind bspw. erforderlich, wenn sich zeigt, dass die Verbesserung einer Eigenschaft nur durch die unzulässig starke Verschlechterung einer oder mehrerer anderer Eigenschaften möglich ist (z. B. Vergrößerung der Anzugkraft eines Hubmagneten bei gleichzeitig gewünschter Vergrößerung des Bewegungsbereiches und gleichbleibenden Abmessungen).

Eine Änderung der Struktur des Bewegungssystems – z. B. durch die Verwendung eines Getriebes und damit die Abkehr vom Direktantrieb – erfordert in der Folge stets eine Anpassung der Forderungen an die einzelnen Elemente des Bewegungssystems. Eine Änderung der Bewegungssystemstruktur beinhaltet daher stets Änderungen an Funktions-, Prinzip- und Bauteilstruktur

²⁴ Zum Begriff der Bewegungssystemstruktur siehe Abbildung 2.1

sowie damit einhergehend auch der Struktur der Anforderungen – und damit auch neue Anforderungen an den Aktor. Für diese „neuen“ Anforderungen kann wiederum mit einer Aktorsuche z. B. durch Nutzung des in *Kapitel 6* vorgestellten *Skyline*-Algorithmus begonnen werden.

Ziel einer Unterstützung bei der Aktorprinzipauswahl für den nichtspezialisierten Entwickler muss es somit sein, Hilfestellung bei der Wahl der zuvor genannten Optionen zu leisten und mögliche und nötige Änderungen der Merkmale eines Aktors bewerten zu helfen. Hierfür ist es nötig, den Entwickler in die Lage zu versetzen, den Lösungsraum möglicher Aktorprinzipie auf die potenziell möglichen einzugrenzen. Hierzu müssen die aktorprinzipspezifischen Abhängigkeiten zwischen den vom Entwickler gewünschten Parametern und den durch ihn bestimmaren Parametern des gesuchten Aktors durch ein geeignetes Modell verdeutlicht werden. Zweck des im Folgenden ausgeführten Ansatzes ist daher die Darstellung von Aktorprinzipien für eine schnelle und einfache Bewertung in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses durch den unerfahrenen oder nicht spezialisierten Entwickler.

Gegenstand der folgenden Abschnitte soll es sein, eine Möglichkeit zur Verdeutlichung der Abhängigkeiten aufzuzeigen, und zwar als Grundlage für die frühe und schnelle Abschätzungen, inwieweit sich ein bestimmtes Aktorprinzip an neue Anforderungen anpassen lässt. Hierzu wird ein Modell zur Darstellung auf Basis des *Characteristic-Properties Modelling*-Ansatzes (*CPM*-Ansatz) vorgestellt. Der *CPM*-Ansatz basiert auf der Unterscheidung von durch den Entwickler *direkt* und *indirekt bestimmaren* (unabhängigen bzw. abhängigen) Eigenschaften [Web05a]. Der Ansatz ist Gegenstand aktueller Forschung und wird u. a. in der Konstruktionstechnik für verschiedene Problemstellungen genutzt und abgewandelt.

Im Folgenden wird daher der *CPM*-Ansatz und die für dessen Anwendung auf die Aktorprinzipauswahl getroffenen Annahmen kurz vorgestellt.

7.1 Unterscheidung von Parametern anhand der Beeinflussbarkeit

Die Unterscheidung in durch den Entwickler *indirekt* beeinflussbare Eigenschaften und solche, die durch den Entwickler *direkt* beeinflusst werden können, ist Prämisse vieler entwicklungsmethodischer Ansätze und Modelle. Die Bezeichnung dieser Eigenschaften und – mitunter – deren Einordnung in den Entwicklungsprozess ist jedoch verschieden (vgl. Tabelle 7.1).

Kernpunkt der Betrachtungen ist der Unterschied zwischen direkt und indirekt bestimmbar Eigenschaften im Ansatz des *Characteristic - Properties Modelling/Property - Driven Development (CPM/PDD)*. Der von WEBER entwickelte *CPM/PDD*-Ansatz beinhaltet zwei grundsätzliche Aspekte der Theorie technischer Systeme (u. a. [WW00, WW01, Web05a]):

Characteristics - Properties Modelling (CPM) als die Modellierung eines technischen Produktes mithilfe seiner Eigenschaften und Merkmale und

Property - Driven Development (PDD) als Prozessmodell für die Entwicklung technischer Produkte anhand seiner Eigenschaften und Merkmale.

Vereinfacht ausgedrückt bezeichnet *CPM* die Produktbeschreibung und *PDD* die Produktentwicklung eines technischen Produktes unter dem Fokus der Eigenschaften.

Beide Teile des *CPM/PDD*-Ansatzes bedingen einander und basieren auf der Unterscheidung von [WW00]²⁵:

²⁵ Die Definition der Begrifflichkeiten dieser und der folgenden zwei Anstriche ist WEBER [WW00] entnommen und soweit möglich wörtlich aus dem Englischen übersetzt. WEBER bezieht sich bei dieser Definition wiederum auf [And95], da letztere als schwer nachprüfbar Quelle betrachtet wird, wird hier [WW00] referenziert.

Tabelle 7.1: Übersicht verschiedener Abgrenzungen der Begriffe *Eigenschaft*, *Merkmal* und *Verhalten* unter dem Gesichtspunkt der Unterscheidung von vom Entwickler beeinflussbaren und abgeleiteten, nicht beeinflussbaren Eigenschaften (in Anlehnung an [EPW11]).

Quelle	vom Entwickler		Verhalten	Bemerkungen zur jeweiligen Begriffsabgrenzung
	beeinflussbar	nicht beeinflussbar		
WEBER [Web05a, WW00]	Merkmale	Eigenschaften	Verhalten gleich Summe der Eigenschaften	Merkmale wie Eigenschaften sind allgemein und nicht auf gegenständliche Produkte begrenzt definiert
HUBKA [Hub73, Hub84]	elementare Konstruktionseigenschaften	äußere Eigenschaften	Verhalten ist eine Folge von Systemzuständen und eine Eigenschaft	Struktur wird ebenfalls als Eigenschaft angesehen
ECKEL/ROZENBURG [RE95, Cha02]	intensive Eigenschaften als Summe aus physio-chemischer Form und geometrischer Form	extensive Eigenschaften	Verhalten wird durch extensive Eigenschaften und Umgebungs-/Nutzungsbedingungen beschrieben	Die extensiven Eigenschaften werden einem „property pattern“ zugeordnet. Dieses „Muster“ beinhaltet sowohl die Eigenschaften als auch deren Abhängigkeiten (vgl. auch [RP10]).
EHRLENSPIEL/PONNILINGJANN [PL08]	direkte/unmittelbare Eigenschaften, Beschaffenheitsmerkmale	indirekte/unmittelbare Eigenschaften, Relationsmerkmale	nicht explizit definiert	kennzeichnende Eigenschaften werden Merkmale genannt, sie besitzen eine Bedeutung (Qualität) und eine Ausprägung (Quantität; (Zahlen-)Wert des Merkmals)
GERO/KANNENGIESSER [GK06]	Elemente, aus denen ein Objekt besteht, und deren Beziehungen; als „ <i>structure</i> “ bezeichnet (meist begrenzt auf Material, Geometrie und Topologie)	Attribute die sich aus der „ <i>structure</i> “ ergeben oder von dieser erwartet werden	Summe der Attribute	Abgrenzung dieses Ansatzes zielt auf den Entwicklungsprozess, nicht primär auf das technische Objekt als solches ab (vgl. [Pae06]).
SUH [Suh01]	Werte aus der physikalischen Domäne, „ <i>design parameters</i> “ aber auch die Struktur im Sinne der Abhängigkeiten in der „ <i>design matrix</i> “	funktionale Anforderungen („ <i>functional requirements</i> “) ggf. auch konkrete Beschränkungen/Wertvorgaben („ <i>restrictions</i> “)	nicht definiert, doch kommt die „ <i>design matrix</i> “ als Gesamtbeschreibung der Eigenschaften dem Verhalten am nächsten	Der von SUH vorgeschlagene „ <i>axiomatic design</i> “ Entwicklungsansatz beschränkt sich nicht auf die Domäne des Maschinenbaus (vgl. bspw. [FS06]).
BIRKHÖFER/WALDELE [BW09]	unabhängige Eigenschaften	abhängige Eigenschaften	nicht explizit spezifiziert, sinngemäß die Zustände oder Zustandsänderungen, die infolge der Verknüpfung der Eigenschaften aus äußeren Einwirkungen entstehen	Geometrie- und Materialeigenschaften werden unterschieden; Eigenschaften besitzen wiederum Ausprägung und Bedeutung; abhängige und unabhängige Eigenschaften sind „mit Wissen um die Zusammenhänge“ (Anm. d. Verf.) verknüpft

Eigenschaften, die das Verhalten eines technischen Produktes beschreiben und nur indirekt vom Entwickler bestimmt werden können, und

Merkmale, die das technische Produkt beschreiben und direkt durch den Entwickler bestimmt werden.

Merkmale (M) und Eigenschaften (E) sind dabei über Relationen (R) verbunden. Anzumerken ist, dass durch diese Unterscheidung die Begriffe *Merkmale* und *Eigenschaften* auf ein technisches Produkt bezogen enger gefasst werden.

Aus der Unterscheidung in Merkmale, Eigenschaften und Relationen (R) ergibt sich anhand des *CPM/PDD*-Ansatzes, unter Berücksichtigung eines definierten Umfeldes (UE) weiterhin die Unterscheidung von *Analyse* und *Synthese* des technischen Produktes:

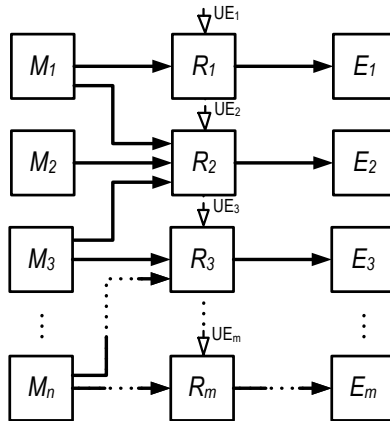
Analyse als die Bestimmung der Eigenschaften eines technischen Produktes aus den gegebenen Merkmalen und Relationen des technischen Produktes, und

Synthese als Bestimmung der Merkmale und Relationen für die Erreichung gewünschter Eigenschaften.

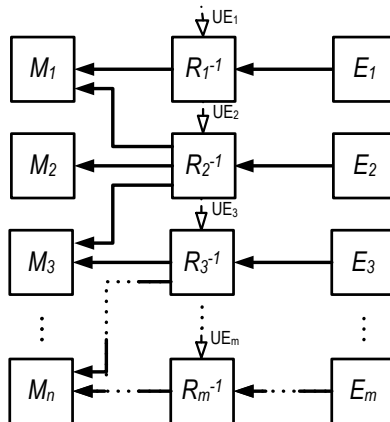
Die *Bestimmung* entspricht dabei einer oder mehreren Relationen (R_1 bis R_n) zwischen den Merkmalen (M_1 bis M_m) und Eigenschaften (E_1 bis E_n) und wird im Modell durch die Pfeilrichtung verdeutlicht (Abbildung 7.1).

Der kritische Punkt bei der Nutzung des *CPM/PDD*-Ansatzes liegt sowohl für die Analyse als auch die Synthese in der Modellierung der Relationen zwischen Merkmalen und Eigenschaften (R bzw. R^{-1}) [Web05a].

Während der Produktentwicklung (Synthese) sind keine oder nur wenige Relationen zwischen Merkmalen und Eigenschaften bekannt. Die Aufgabe bei der Produktentwicklung besteht somit in der Festlegung der Merkmale



(a) Analyse als Bestimmung der Eigenschaften aus den Merkmalen



(b) Synthese als Bestimmung der Merkmale für bestimmte Eigenschaften

Abbildung 7.1: Analyse und Synthese nach dem *CPM/PDD*-Ansatz [Web05a] (mit Relationen R , Merkmalen M , Eigenschaften E und Umgebungseinflüssen UE). Nicht dargestellt sind mögliche Abhängigkeiten A zwischen den einzelnen Merkmalen.

und der Relationen, um die geforderten Eigenschaften unter den – mitunter nur eingeschränkt bekannten – Umgebungsbedingungen zu erfüllen. Aus den Festlegungen zur Konkretisierung des Produktes ergeben sich während der Synthese wiederum neue geforderte Eigenschaften und damit weitere (neue) Relationen. Daraus folgt für die Synthese (anhand des *PDD*-Ansatzes) die Notwendigkeit zu wiederholten Soll-Ist-Vergleichen, da die (erweiterten) Eigenschaften eines technischen Produktes stets Wirkung der (von Schritt zu Schritt ggf. neu) festgelegten Merkmale sind.

Bei der Analyse eines technischen Produktes wiederum sind die Merkmale bekannt und die Eigenschaften unter bekannten Umgebungsbedingungen bestimmbar (z. B. messtechnisch oder durch Simulation). Die Aufgabe bei der Produktanalyse besteht somit in der Erklärung des Zusammenhangs zwischen den bekannten Merkmalen und den Eigenschaften eines technischen Produktes unter den – meist gut bekannten – Umgebungsbedingungen und somit in der Detaillierung der Relationen. Die Relationen zwischen Merkmalen und Eigenschaften entstehen dabei aus z. T. verschiedenen ggf. abstrakten Beschreibungsmodellen. Daraus ergibt sich für die Analyse die Frage nach einem geeigneten Modell, welches den Einfluss der Merkmale auf die Eigenschaften beschreibt.

Durch die Beschränkung auf Aktorprinzip und die gewünschte Unterstützung derer Auswahl in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses werden die Begriffe *Merkmal* und *Eigenschaft* noch einmal in ihrer Bedeutung enger gefasst. In enger Anlehnung an WEBER [Web05a] sollen Merkmale, Eigenschaften und Relationen wie folgt definiert und verstanden werden:

Die Eigenschaften eines technischen Produktes, die durch den Entwickler direkt beeinflusst werden können, werden Merkmale genannt. Die Merkmale bestimmen alle Eigenschaften des technischen Produktes. Jede Eigenschaft ist über eine Relation mit mindestens einem Merkmal verknüpft. Eigenschaften sind somit die Wirkung der Merkmale des technischen Produktes.

Diese Einschränkung sowie deren Bedeutung für die Auswahl von Aktorprinzipien soll im Weiteren diskutiert werden.

7.1.1 Merkmale, Eigenschaften und Relationen für die Auswahl von Aktorprinzipien

Die vom Entwickler bestimmbaren Eigenschaften/Merkmale eines jeden technischen Produktes – und damit auch für Aktoren – sind zunächst die Parameter der Gestalt (d. h. Geometrie, Material, deren Zustände (vgl. [Spe83]). Durch die Beschränkung der Aktorprinzipauswahl auf die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses lassen sich die wesentlichen Eigenschaften der Aktorprinzipie auf die qualitativen und quantitativen kinematischen Parameter reduzieren, weil weitere Eigenschaften erst in späteren Phasen des Entwicklungsprozesses betrachtet werden. Diese bilden nur einen kleinen Teil der denkbaren Eigenschaften eines technischen Produktes und können als funktionsbezogene Eigenschaften aufgefasst werden. Bezogen auf die Aktorprinzipie sind die Relationen dieser Eigenschaften und Merkmale meist gut bekannt und umfassend beschrieben (z. B. durch Gleichungen, Berechnungsmodelle und auch -algorithmen).

Die Herausforderung für einen schnellen Vergleich verschiedener Aktorprinzipie durch den Entwickler ist jedoch, diese umfassenden und teilweise komplexen Beschreibungen/Relationen auf wenige wesentliche den Vergleich ermöglichende Relationen, Merkmale und funktionsbezogenen Eigenschaften zu reduzieren.

Die funktionsbezogenen Eigenschaften des physisch gegebenen bzw. durch die Gestalt beschriebenen Aktors werden weiterhin durch äußere Einflüsse (UE) (z. B. Strom und Spannung, aber auch Temperatur, Luftfeuchte usw.) bestimmt. Einige dieser Einwirkungen legt wiederum der Entwickler bei der Wahl des Aktors bzw. Aktorprinzips für weitere Elemente des Bewegungssystems (z. B. Entwicklung der Energieversorgungs-, Regelungs- oder Messsysteme) oder Lebensphasen (z. B. Betrieb, Wartung) fest. Während

dabei für die Umgebungsbedingungen meist grobe Annahmen genügen, sind für den Aktor Vorgaben zu den Eingangsgrößen (z. B. Spannungs- oder Stromverläufe, Tastverhältnisse) von maßgeblicher Bedeutung. Diese bilden dann für andere Elemente *Eigenschaften*, die es bei deren Entwicklung zu erreichen gilt (z. B. Spannungs- oder Stromverläufe bei der Elektronikentwicklung) [Web07].

Das im Folgenden entwickelte Konzept soll in frühen Phasen der Entwicklung der qualitativen Abschätzung der im Hinblick auf die gewünschten funktionsbezogenen Eigenschaften notwendigen Merkmalsänderungen dienen. Da sowohl die funktionsbezogenen Eigenschaften, die Merkmale der Gestalt als auch die vorzugebenden äußeren Einflüsse bei der Auswahl von Aktorprinzipen gefordert oder anpassbar sein können, werden alle diese Größen auch im Hinblick auf die Aktorauswahlkriterien²⁶ im Weiteren als *Parameter* aufgefasst.

7.1.2 Ziel der Unterstützung bei der Aktorprinzipauswahl

Viele Aktorprinzipie sind in der einschlägigen Literatur umfassend, z. B. über diverse Gleichungssysteme, beschrieben. Von einem bekannten Aktor ausgehend, kann für jedes Aktorprinzip aus den bekannten Abhängigkeiten auf die für das Erreichen einzelner geforderter funktionsbezogener Eigenschaften notwendigen Änderungen der Merkmale geschlossen werden. Die Möglichkeit zur Nutzung eines Aktorprinzips ist dann gegeben, wenn aus der Anpassung der Merkmale das Erreichen der geforderten Parametergrenzen folgt, ohne dass dies mit einer unzulässigen Verschlechterung einer oder mehrerer geforderter Eigenschaften einhergeht.

Um Aktorprinzipie zu vergleichen, ist dabei die Kenntnis umfangreicher (Gleichungs-) Zusammenhänge für verschiedene Aktorprinzipie nötig. Diese Zusammenhänge können prinzipiell in einem Rechner abgelegt sein, die

²⁶ siehe Kapitel 4

Berechnungen nach Eingabe der entsprechenden Anforderungen automatisch erfolgen. Eine solche mögliche Berechnung ist nicht mit einer automatisierten Auslegung oder gar Entwicklung eines Aktors zu verwechseln, da:

- Die Problemstellung der Aktorprinzipauswahl insbesondere für Aufgaben an den Grenzen des technisch Machbaren von Bedeutung ist, ist eine Auslegung nur mit sehr detaillierten Modellen durch einen spezialisierten Entwickler möglich.
- Die Bewertung der Realisierbarkeit eines Aktorprinzips selbst, von der Kenntnis der Grenzen der beeinflussbaren Parameter und damit i. d. R. von nicht verallgemeinerbaren und schwer in einem Rechner abzubildenden Kriterien (z. B. Kosten, verfügbare Fertigungstechnologien, erreichbare Toleranzen) abhängig ist.

Für das Erkennen des ggf. ungünstigen Einflusses von Parameteränderungen auf einzelne Eigenschaften der Bewegungsfunktion reicht jedoch in frühen Phasen oft ein qualitatives Modell, welches Aufschluss über die Änderungstendenzen gibt. Der Entwickler kann anhand dieser je nach Gegebenheiten und Anwendungsfall eine Auswahl der nötigen Parameteränderungen auch anhand von Eigenschaften treffen, die in den oben genannten Rechnermodellen nicht enthalten sind.

Zielstellung des in dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes ist es somit nicht, die generellen Beschränkungen zu quantifizieren. Vielmehr soll dem Entwickler ein Modell an die Hand gegeben werden, welches bei der Identifizierung der relevanten Merkmale hilft. Die Bewertung ist ihm weiter selbst überlassen. Dies soll nicht in Form von Rechnermodellen erfolgen, obgleich eine Softwareumsetzung möglich ist.

Anhand der qualitativen Modelle kann so schon in frühen Phasen die für das Erreichen der gewünschten Eigenschaften notwendigen Anpassungen geprüft und die geeignet erscheinenden Aktorprinzipie bzw. die im weiteren notwen-

digen Entwicklungsschritte abgeschätzt werden. Folgende Schritte sind dabei fallabhängig denkbar (angelehnt an [EPW11] und erweitert):

Erweiterung der Grenzen der Merkmale: Dies ist beispielsweise durch neue Materialien oder Technologien möglich (z. B. andere Materialien – statt Ferrit-, Neodym-Magnete). Diese Option unterliegt technologischen und physikalischen Beschränkungen, die durch Betrachtung der Größenordnungen abgeschätzt werden können. So kann z. B. die Dichte ρ oder die elektrische Leitfähigkeit κ nicht beliebig halbiert oder verdoppelt werden.

Änderung der Anforderungen an die Elemente: Z. B. durch Änderung der Struktur des Bewegungssystems (z. B. Grob-Feintrieb-Aufteilung oder Verwendung eines Getriebes statt eines Direktantriebes). Ob diese Möglichkeit besteht, ist vom konkreten Anwendungsfall abhängig. Wesentlich für die Bewertung sind hierbei die Begrenzungen der Energiewandlung (z. B. EMV) und die Abhängigkeiten der Eigenschaften untereinander (z. B. Aspektverhältnisse, Masse, Aktorsteifigkeit).

Änderungen der Relationen: Ergibt ein neues Aktorprinzip (z. B. *piezo*, *piezo-stack*, *inch-worm drive*) oder eine neue Aktorbauform (z. B. Kennlinienbeeinflussung bei Hubmagneten). Aufgrund der Komplexität und des notwendigen Spezialwissens ist dieses Vorgehen keine Option für den unspezialisierten Entwickler.

Ändern der vom Aktor geforderten Eigenschaften: Wenn auch der einfachste Weg, bildet dies meist die letzte Wahlmöglichkeit.

Die dargestellte Reihenfolge der möglichen Schritte ist dabei nur eine der Möglichen. Denkbar ist es auch, zuerst über die Änderung der Bewegungssystemstruktur nachzudenken. Anhand der jeweils geltenden physikalischen, technologischen (und damit finanziellen) Gesetzmäßigkeiten/Beschränkungen sind die möglichen Maßnahmen in jedem Einzelfall neu zu bewerten. Das qualitative Modell kann dabei ggf. für jedes Aktorprinzip unter Verwendung

von Gleichungszusammenhängen aus der Literatur für eine quantitative Abschätzung der Größenordnung der notwendigen Änderungen konkretisiert werden.

7.2 Darstellung von Aktorprinzipen

Aktoren und Aktorprinzipie werden meist anhand des *Übertragungsverhaltens* bzw. der *Übertragungsfunktion*, d. h. des Zusammenhangs zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen, beschrieben und bewertet. Diese Zusammenhänge sind für viele Aktorprinzipie gut bekannt und in der jeweils einschlägigen Literatur dokumentiert.

Die *Übertragungsfunktion* bezeichnet ein auf einzelne funktionsrelevante Eigenschaften (Ausgangsgrößen) und einzelne Umgebungseinflüsse (Eingangsgrößen) reduziertes Abbild – und somit Modell – des realen Verhaltens eines Aktors. Die Merkmale der Gestalt werden in diesem Modell als konstruktive Nebengrößen angesehen.

Der *CPM*-Ansatz erlaubt die Modellierung der *Übertragungsfunktion* in Form von Relationen, geordnet nach Merkmalen und Eigenschaften. Die Modellierung der Relationen kann dabei grundsätzlich durch verschiedene Beschreibungsformen (z. B. Gleichungen, Graphen, *Design-Structure-Matrizen*) geschehen. Im *CPM*-Ansatz wiederum werden die Umgebungseinflüsse (Eingangsgrößen) als Nebenbedingungen aufgefasst. Der *CPM*-Ansatz wie auch die Betrachtung der *Übertragungsfunktion* rücken verschiedene Abhängigkeiten in den Mittelpunkt. Abbildung 7.2 verdeutlicht die unterschiedlichen Betrachtungsweisen.

Für die Aktorprinzipauswahl sind jedoch Eigenschaften, Eingangsgrößen und Merkmale zu betrachten. Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Konzept soll daher einen Ansatz für die Verbindung beider Betrachtungsweisen am Beispiel der Aktoren aufzeigen. Hierzu ist es naheliegend, die Relationen des *CPM*-Ansatzes und die bekannten Übertragungsgleichungen zu verbinden.

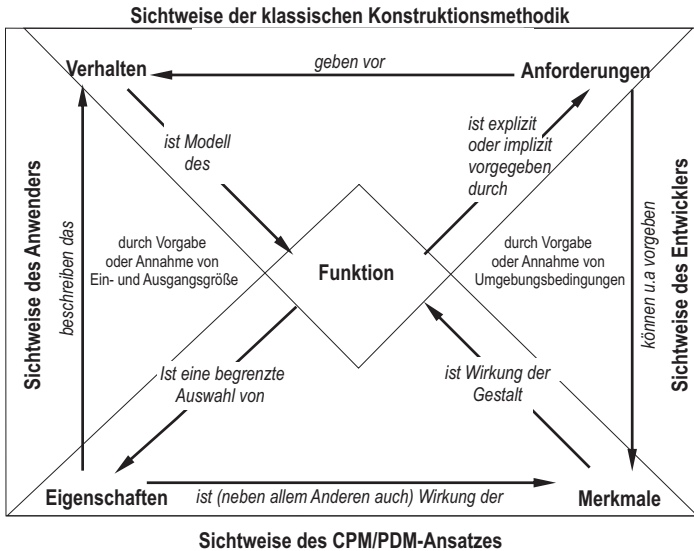


Abbildung 7.2: Darstellung der verschiedenen Sichtweisen auf die Eigenschaften, Merkmale und die Funktion eines technischen Produktes gemäß der gewählten Begriffsabgrenzung.

Die für die Betrachtung von Akteuren und Aktorprinzipen übliche Darstellung der *Übertragungsfunktion* als Beziehung zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen kann durch Umordnung des CPM-Ansatzes erhalten bleiben. Es ergibt sich die in Abbildung 7.3 verdeutlichte Anordnung.

Durch Beschränkung auf die frühen Phasen des Entwicklungsprozesses werden die Eigenschaften auf die funktionsbezogenen Ausgangsgrößen beschränkt. Für deren Beschreibungen sind für Akteuren wiederum Gleichungszusammenhänge gegeben. Dies ergibt eine weitere Einschränkung des Eigenschaftsbegriffes gegenüber dem ursprünglichen CPM-Ansatz, bei dem durchaus auch der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen als Eigenschaft aufgefasst werden kann.

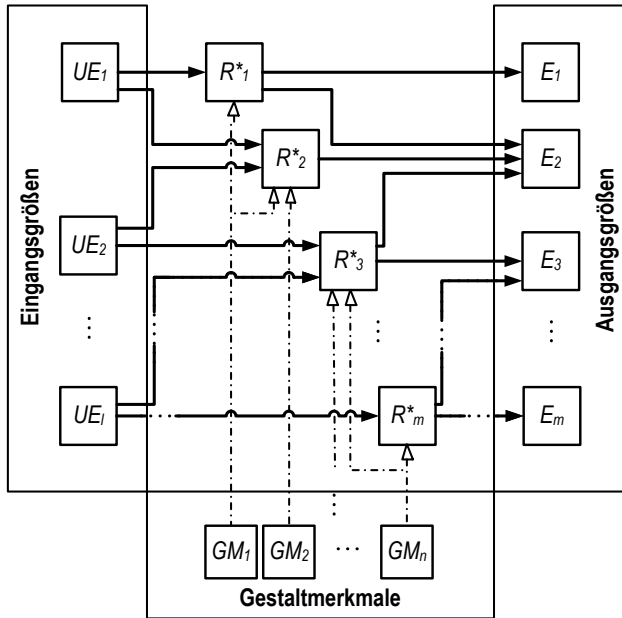


Abbildung 7.3: Im Hinblick auf die Darstellung der *Übertragungsfunktion* umgeordnete Darstellung des *CPM*-Ansatzes. Die Umwelteinflüsse bilden dabei nur die notwendigen Merkmale ab und sind von den Gestaltmerkmalen getrennt. Die Relationen R_i^* sind denen R_i aus Abbildung 7.1 ähnlich, der „*“ soll jedoch auf die durch die Betrachtung von nur ausgewählten Eingangsgrößen entstandene reduzierte Relation im umgeordneten Modell hinweisen.

Das in Abbildung 7.3 dargestellte Modell ist dabei mehr als eine reine Umordnung des *CPM*-Ansatzes (siehe Abbildung 7.1). Dieser erlaubt keine Schleifen oder Rückkopplungen von Eigenschaften. Diese Rückkopplungen sind jedoch für Aktoren im Hinblick auf die Veränderung der Relationen durch bspw. thermische Effekte von Bedeutung. Gegenüber der Darstellung einer Übertragungsfunktion zeigt das Modell den Einfluss eines Gestaltparameters auf verschiedene Relationen und damit auf die Ausgangsgrößen auf. Dies erlaubt

die Bewertung des Einflusses einzelner Gestaltparameter auf verschiedene Ausgangsgrößen.

Die Erstellung des Modells für konkrete Aktoren wird im Folgenden für den Elektromagnet- und den Piezoaktor beispielhaft erläutert. Hierfür werden zunächst die aus der Literatur bekannten Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen kurz zusammen- und die bestimmenden Gestaltmerkmale herausgestellt. Anschließend werden für beide die Aktorprinzipmodelle abgeleitet und deren Nutzung wird exemplarisch erläutert.

7.2.1 Grundlagen zum Aktorprinzipmodell am Beispiel eines Elektromagneten

Anhand der Gleichungen und Berechnungsvorschriften aus der Literatur (siehe hierzu z. B. [KEQ08, Lun88, SK06]) können die Zusammenhänge eines Aktorprinzips beschrieben werden. Diese Zusammenhänge sind für viele Aktorprinzipie gut bekannt und Stand der Technik. Am Beispiel des Elektromagneten (Abbildung 7.4) soll dies ausgehend von der Betrachtung der Aktorkraft und Aktorarbeit, als den hier funktionsrelevanten Eigenschaften, dargestellt werden. Die Kraft F_{mag} und die Hubarbeit W_{Hub} des Elektroma-

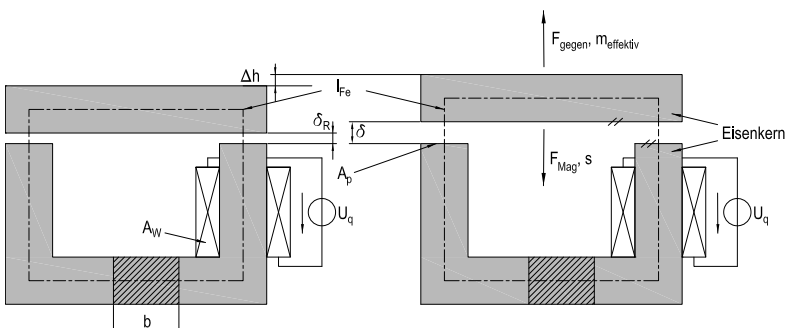


Abbildung 7.4: Prinzipskizze eines Elektromagnetaktors mit dessen wesentlichen Parametern.

neten ergeben sich dabei aus folgenden Beziehungen (für einen nicht kennlinienbeeinflussten Hubmagneten):

$$F_{mag} = \frac{\Theta_{min}^2}{R_{mag}^2 \cdot 2 \cdot A_P \cdot \mu_0}, \quad (7.1)$$

$$W_{Hub} = \kappa_m \cdot k \cdot \Psi_0 \cdot I_{min} = \kappa_m \cdot k \cdot \frac{\Theta_{min}^2}{R_{mag}}. \quad (7.2)$$

Beide Gleichungen enthalten sowohl Merkmale (μ_0 , A_P , κ_m , k) als auch *Zwischengrößen* (z. B. die minimale Durchflutung Θ_{min} , den verketteten magnetischen Fluss Ψ_0 sowie den magnetischen Widerstand R_{mag}), die für die Berechnung des Magnetkreises von Bedeutung sind.

Die minimale Durchflutung ist dabei proportional zum Strom und lässt sich nach Gleichung (7.3) über die Windungszahl oder über das Spannungsverhältnis $\frac{U_{min}}{U_{max}}$ und die maximale Durchflutung bestimmen. Die Größe I_{min} ergibt sich hierbei aus der vorgegebenen Spannung.

$$\Theta_{min} = w \cdot I_{min} = \frac{U_{min}}{U_{max}} \cdot \Theta_{max} \quad (7.3)$$

Die maximale Durchflutung ergibt sich wiederum aus der Größe des Wickelfensters, der mittleren Windungslänge, dem Füllfaktor als Merkmale, der zulässigen Verlustleistung und dem spezifischen Warmwiderstand der Wicklungen (Gleichung (7.4)).

$$\Theta_{max} = \sqrt{\frac{P_{V,zul} \cdot k_{Cu} \cdot A_W}{\rho_{warm} \cdot l_m}} \quad (7.4)$$

Durch Einsetzen dieser Gleichungen sowie der Beziehungen für den magnetischen Widerstand (Gleichungen (7.5) und ergänzend (7.6)):

$$R_{mag} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot 2 \cdot A_P} + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} \cdot 2 \cdot A_P} \quad (7.5)$$

$$\mu_{Fe} = \frac{B}{H} = \mu_0 + \frac{B_S}{H + H_D} \quad (7.6)$$

und des spezifischen Warmwiderstands (Gleichung (7.7) bezogen auf 20°C)

$$\rho_{warm} = \rho_{Cu} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta \vartheta_{\dot{U},zul} + \vartheta_U - 20^\circ\text{C})) \quad (7.7)$$

ergibt sich die Kraft F_{mag} bzw. der Hub als Eigenschaft und Ausgangsgröße eines Hubmagneten als Funktion:

- der Gestaltmerkmale (k_{Cu} , A_W , ρ_{Cu} , $\vartheta_{\dot{U},zul}$, α , l_m , $\delta (= \delta_0 + \Delta h)$, A_P , l_{Fe} , μ_{Fe} , der Sättigungsinduktion B_S sowie der Durchtrittsfeldstärke H_D , die etwa der Koerzitivfeldstärke H_C entspricht),
- der elektrischen Eingangsgrößen (U_{min} und U_{max}) und
- der äußeren Einflüsse (ϑ_U) sowie
- der zulässigen Verlustleistung $P_{V,zul}$ und
- der magnetischen Feldkonstante μ_0

entsprechend Gleichung (7.8). Die Hubarbeit des Elektromagneten ergibt sich in ähnlicher Weise (Gleichung (7.9)) in Abhängigkeit von denselben Parametern, ergänzt um den magnetischen Wirkungsgrad κ_M .

$$F_{mag} = \frac{U_{min}^2}{U_{max}^2} \cdot \frac{P_{V,zul} \cdot k_{Cu} \cdot A_W}{\rho_{Cu} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta \vartheta_{\dot{U},zul} + \vartheta_U - 20^\circ\text{C}))} \cdot \frac{1}{l_m \cdot \left(\frac{\delta}{\mu_0 \cdot A_P} + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} \cdot A_P} \right)^2 \cdot 2 \cdot A_P \cdot \mu_0} \quad (7.8)$$

$$W_{Hub} = \frac{U_{min}^2}{U_{max}^2} \cdot \frac{\kappa_M \cdot k \cdot P_{V,zul} \cdot k_{Cu} \cdot A_W}{\rho_{Cu} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta \vartheta_{\dot{U},zul} + \vartheta_U - 20^\circ\text{C}))} \cdot \frac{1}{l_m \cdot \left(\frac{\delta}{\mu_0 \cdot A_P} + \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe} \cdot A_P} \right)} \quad (7.9)$$

Der magnetische Wirkungsgrad κ_M in Gleichung (7.9) ist dabei anhand der gemessenen Kennlinien des Magneten zu bestimmen (Abbildung 7.5) und nach KALLENBACH eine Kennzahl für die Bewertung der konstruktiven Gestaltung eines Elektromagneten [KEQ08]. Er bezeichnet das Verhältnis zwischen abgegebener Hubarbeit und der im Idealfall abzugebenden magnetischen Energie (Gleichung (7.10)) und hängt maßgeblich von der konstruktiven Gestaltung (Nenn-, Rest- und parasitäre Luftspalte sowie dem gewählten Magnetmaterial) ab [KEQ08].

$$\kappa_M = \frac{W_{Hub}}{\Psi_0 \cdot I_0} \quad (7.10)$$

Die zulässige Verlustleistung $P_{V,zul}$ (bezogen auf 20 °C) ergibt sich anhand Gleichung (7.11) ebenfalls aus Gestaltmerkmalen (z. B. $\vartheta_{\dot{U},zul}$, α) und äußeren Einflüssen (z. B. ϑ_U) sowie dem thermischen Widerstand R_{th} .

$$P_{V,zul} = \frac{\vartheta_{\dot{U},zul} \cdot (1 + \alpha \cdot (\Delta \vartheta_{\dot{U},zul} + \vartheta_U - 20^\circ\text{C}))}{R_{th}} \quad (7.11)$$

Der thermische Widerstand hängt seinerseits von der Wärmekapazität, der Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung und damit wiederum von den Gestaltparametern des Aktors (z. B. c , ρ , V , A_W , A_{Fe} , l_{Fe} , λ , ε usw.) und Betriebsgrößen (z. B. Einschaltdauer ED , Volumenstrom des Kühlmediums $\dot{V}_{Kühlmedium}$ usw.) ab. Von diesen bedingen die Gestaltgrößen V , A_W , A_{Fe} und l_{Fe} einander gegenseitig.

Um mit diesen Parametern über die magnetische Kraft F_{mag} bspw. die Beschleunigung a des Abtriebes bestimmen zu können, müssen weiterhin die entgegenwirkenden äußeren Kräfte und die Trägheit der nachfolgenden Elemente des Bewegungssystems (F_{gegen} sowie $m_{effektiv}$) bekannt sein (Gleichung (7.12)).

$$a = \frac{F_{mag} - F_{gegen}(h)}{m_{effektiv}} \quad (7.12)$$

Weiterhin wird deutlich, dass die Ausgangsgrößen (z. B. Wärmeverluste, Positionsänderung des Ankers) auf Zwischengrößen des Elektromagnetaktors zurückwirken (z. B. Änderung des Luftspaltes infolge der gewünschten Verschiebung oder Änderung der Spulentemperatur). Die in den Gleichungen (7.1) bis (7.12) dargestellten Zusammenhänge berücksichtigen keine magnetische Hysterese oder mechanische Reibung und sind daher als Vereinfachungen zu sehen. Gleichwohl lässt sich erkennen, dass neben den mechanischen auch die thermischen Ausgangsgrößen und neben den elektrischen auch mechanische sowie thermische Eingangsgrößen für die Bestimmung der Aktorkraft notwendig sind.

7.2.2 Grundlagen zum Aktorprinzipmodell am Beispiel eines Piezoaktors

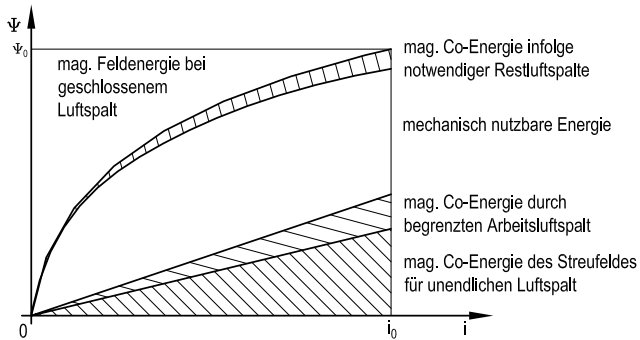
In vergleichbarer Weise können in Anlehnung an [Phyl 1a] die Zusammenhänge für den Piezoaktor beschrieben werden. Unter Piezoaktoren werden keramische Elemente verstanden, die sich unter Ausnutzung des inversen piezoelektrischen Effektes beim Anlegen einer Spannung verformen (Abbildung 7.6).

Der Piezoaktor kann dabei als Kondensator betrachtet werden (Abbildung 7.6a). Aus der angelegten Spannung ergibt sich somit der Stromfluss (Gleichung (7.13)) und damit die elektrische Leistung am Piezoaktor.

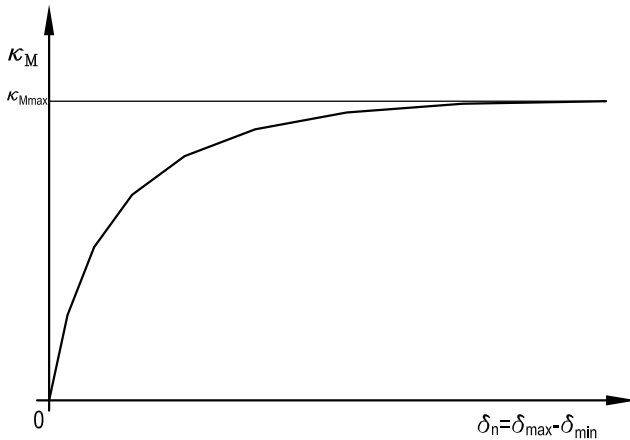
$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \cdot \frac{dU(t)}{dt}$$

(und für den dynamischen Fall im Sinus-Betrieb) (7.13)

$$I(t) = \frac{U \cdot C \cdot \omega}{2} \cdot \sin(\omega t)$$



(a) Prinzipdarstellung zur Verdeutlichung der Energieverhältnisse im $\Psi - i$ -Kennlinienfeld



(b) Abhängigkeit des magnetischen Wirkungsgrades κ_M von der Nennluftspallänge δ_N

Abbildung 7.5: Prinzipdarstellung zur Verdeutlichung des magnetischen Wirkungsgrades κ_M in Anlehnung an [KEQ08]. Es ist zu erkennen, dass der Wirkungsgrad mit der Luftspallänge abnimmt, sodass insbesondere schnellschaltende Elektromagnete mit geringem Luftspalt einen geringen Wirkungsgrad κ_M erwarten lassen.

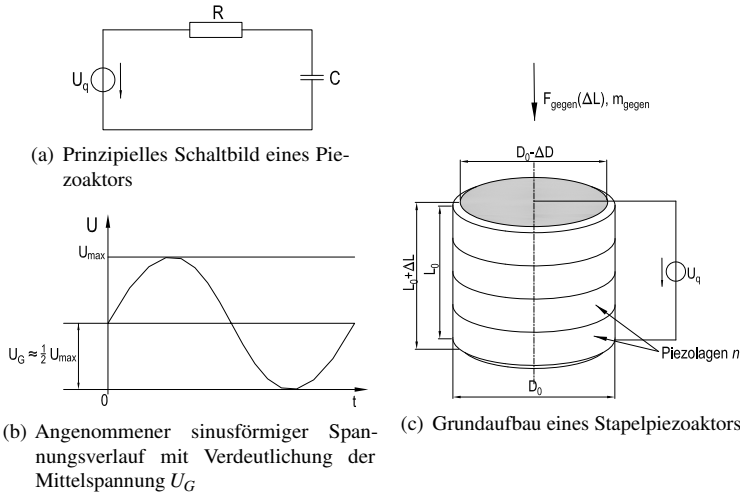


Abbildung 7.6: Prinzipskizze eines (Stapel-) Piezoaktors mit dessen wesentlichen Parametern.

Für die Berechnung eines Piezoaktors ist zwischen statischem und dynamischem Betrieb sowie mit und ohne Last zu unterscheiden. Für den statischen Betrieb sind die Drift über die Zeit und für den dynamischen Betrieb die thermischen Verluste zu berücksichtigen. Die elektrische Momentanleistung des Piezoaktors ergibt sich hierfür allgemein nach Gleichung (7.14)²⁷.

$$P(t) = I(t) \cdot U(t) \quad (7.14)$$

Die funktionellen Eigenschaften des Piezoaktors sind die Aktorkraft F sowie die dem Aktor mögliche Längenänderung ΔL_0 , die sich für den unbelasteten

²⁷ Die im Weiteren dargestellten Gleichungsbeziehungen sind an [Phy11a] angelehnt und betrachten nur den *Längseffekt*. Da die Eigenschaften der Piezoaktoren u. a. fertigungsbedingten Streuungen unterliegen und meist nichtlinear sind, wird statt „=“ in den Gleichungen „ \approx “ verwendet.

Fall wie folgt beschreiben lässt:

$$\begin{aligned}\Delta L_{frei} &= \varepsilon_{Piezo} \cdot L_0 \approx \pm E \cdot d_{ij} \cdot L_0 \\ &\approx \frac{\pm U}{d_s} \cdot d_{ij} \cdot L_0.\end{aligned}\quad (7.15)$$

Innerhalb eines Bewegungssystems wird der Piezoaktor (unter Vernachlässigung dynamischer Effekte) gegen eine konstante Last (z. B. Masse) oder eine mit dem Hub veränderliche Last (z. B. Feder) arbeiten.

Bei einer konstanten äußeren Kraft ergibt sich dabei eine Verringerung der Ausgangslänge²⁸ des Piezoaktors bei unverändertem Hub. Die Beziehung (7.15) erweitert sich so entsprechend Gleichung (7.16).

$$L_{Ausgang} \approx \Delta L(t)_{frei} - \frac{F_{gegen}}{k_A} \quad (7.16)$$

Um aus der Längenänderungen des Piezoaktors die Kraft zu bestimmen, wird dieser als Feder betrachtet. Abhängig von der Aktorsteifigkeit k_A ergibt sich die Kraft des Piezoaktors damit wie folgt (für $U = konst.$):

$$F_{max} \approx k_A \cdot \Delta L_{frei} \quad (7.17)$$

Beim Betrieb des Piezoaktors kommt es beim Anlegen einer Spannung zur Änderung der remanenten Polarisation des Piezomaterials und infolge dessen zu Hysterese- und Kriecherscheinungen, denen ggf. durch den geregelten Betrieb der Piezoaktoren begegnet werden kann.

Die Längenänderung des Piezoaktors ist somit abhängig von der Zeit und ergibt sich für das Kriechen²⁹ bezogen auf eine Längenänderung 0,1 Sekunde

²⁸ Dies wird in [Phy11a] *Nullpunktverschiebung* genannt; da dieser *Nullpunkt* jedoch abhängig davon ist, ob die Koppelstellen mit zur Last gerechnet oder Alterung und Hysterese des Piezoaktors mitbetrachtet, wird dieser Begriff im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet.

²⁹ Hysterese wird wie in Abschnitt 7.2.1 vernachlässigt.

nach Änderung der Spannung gemäß Gleichung (7.18):

$$\Delta L(t)_{frei} \approx \Delta L_{t=0,1} \left[1 + \gamma \cdot l g \left(\frac{t}{0,1} \right) \right]. \quad (7.18)$$

Die Längenänderung des Piezoaktors wird im Hinblick auf die ohnehin geringen relativen Auslenkungen ([Phy11a] gibt als Orientierungsgröße 0,2% bezogen auf die Ausgangslänge an) zudem von der thermischen Dehnung (Gleichung (7.19)) und damit insbesondere im dynamischen Betrieb durch die Verlustleistung beeinflusst. Diese ergibt sich im Wesentlichen aus den in der Piezokeramik auftretenden dielektrischen Verlusten im dynamischen Betrieb.

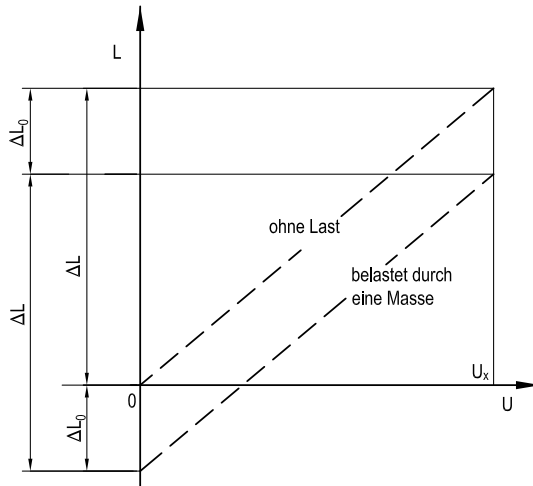
$$\Delta L_{therm} = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \vartheta \quad (7.19)$$

Für den dynamischen Betrieb unter Annahme einer sinusförmigen Spannungseinprägung (Sinusbetrieb) und einer durch den Verstärker vorgegebenen Grundspannung U_G (Abbildung 7.6 b) ergibt sich die Momentanleistung des Piezoaktors gemäß der Gleichung (7.20) für den verlustfreien und gemäß Gleichung (7.21) bei Betrachtung der Verluste im dynamischen Betrieb. Die Grundspannung ist erforderlich, um die durch negative Spannungswerte entstehenden Zugspannungen in der Piezokeramik zu vermeiden.

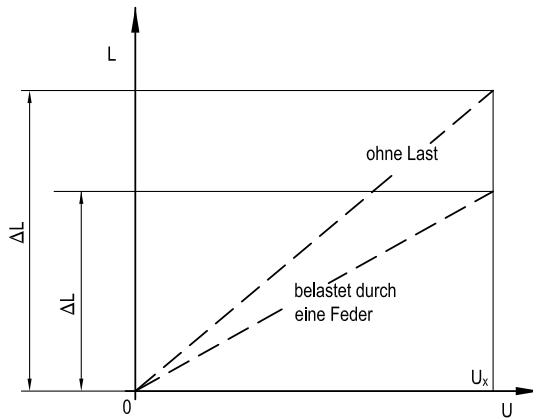
$$P(t) \approx \frac{C \cdot U \cdot \omega \cdot \sin(\omega t)}{2} \cdot \left(U_G - \frac{U}{2} \cdot \cos(\omega t) \right) \quad (7.20)$$

Von Gleichung (7.20) ausgehend, ergibt sich aus der Phasenverschiebung im verlustbehafteten Fall die Leistung gemäß Beziehung 7.21.

$$P(t) \approx \frac{C \cdot U \cdot \omega \cdot \sin(\omega t - \delta_e)}{2 \cdot \cos \delta_e} \cdot \left(U_G - \frac{U}{2} \cdot \cos(\omega t) \right) \quad (7.21)$$



(a) „Nullpunktverschiebung“ des Piezoaktors infolge einer konstanten Belastung



(b) Veränderung der Kennlinie des Piezoaktors infolge einer Federlast

Abbildung 7.7: Prinzipdarstellung der Veränderung der Kennlinie eines Piezoaktors infolge äußerer Belastung (in Anlehnung an [Phy11a]).

Von Gleichung (7.20) ausgehend, ergibt sich die mittlere vom Aktor aufgenommene elektrische Leistung für eine Halbperiode zu:

$$P_m \approx \frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} P_\delta(t) dt \quad (7.22)$$

$$P_m \approx \frac{C \cdot U \cdot \omega^2}{2\pi \cdot \cos \delta_e} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{\omega}} \sin(\omega t - \delta_e) \left(U_G - \frac{U}{2} \cdot \cos(\omega t) \right) dt$$

bzw. nach Integration:

$$P_m \approx \underbrace{\left[2 \cdot f \cdot C \cdot U_G \cdot U \right]}_{P_{m,Wirk}} + \underbrace{\left[\frac{\pi}{4} \cdot f \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta_e \right]}_{P_{m,Verlust}}, \quad (7.23)$$

sodaß die Verlustwärmeleistung für eine volle Schwingungsperiode von 2π gemäß Gleichung (7.24) abgeschätzt werden kann.

$$P_{therm} \approx \frac{\pi}{2} \cdot \tan \delta_e \cdot f \cdot C \cdot U^2 \quad (7.24)$$

Werden unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Piezoaktors die Gleichungen (7.24), (7.19), (7.18) in Gleichung (7.15) eingesetzt, ergibt sich für die Längenänderung des Piezoaktors im unregelmäßigen Betrieb somit näherungsweise folgender Zusammenhang (unter Annahme einer Bezugslänge $L_{t=0,1}$ bei 20°C) für den statischen Fall zu:

$$\Delta L_{eff} \approx \frac{\pm U}{d_0} \cdot d_{ij} \cdot L_{20^\circ,0,1} \cdot \left[1 + \gamma \cdot \lg \left(\frac{t}{0,1} \right) \right] + \left[L_{20^\circ} \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta \vartheta_U \cdot m_{Aktor}}{c_{therm}} \right] - \frac{F_{extern}}{k_A} \quad (7.25)$$

bzw. für den dynamischen Fall zu

$$\Delta L_{eff} \approx \frac{\pm U}{d_0} \cdot d_{ij} \cdot L_{20^\circ_{t=0,1}} + \left[L_{20^\circ} \cdot \alpha \cdot \frac{\left(\left(\frac{\pi}{2} \cdot \tan \delta \cdot f \cdot \epsilon_{ij} \cdot \frac{A_C}{d_s} \cdot U^2 \cdot ED \right) + \Delta \vartheta_U \right) \cdot m_{Aktor}}{c_{therm}} \right] - \frac{F_{extern}}{k_A}. \quad (7.26)$$

Bei einer äußeren veränderlichen Last ergibt sich infolge der Änderung des Anstieges der Federkennlinie daraus die Aktorkraft für den statischen Fall gemäß Gleichung (7.27).

$$F_{eff} \approx k_A \cdot \Delta L_{eff} \cdot \left(1 - \frac{k_A}{k_A + k_s} \right) \quad (7.27)$$

bzw. Gleichung (7.28) für den dynamischen Fall (Annahme: Sinusbetrieb):

$$F_{dyn} \approx 4\pi^2 \cdot m_{eff} \left(\frac{\Delta L_{eff}}{2} \right) \cdot f^2 \quad (7.28)$$

Die Kraft bzw. die Längenänderung als Eigenschaft und Ausgangsgröße des Aktors ergeben sich somit wiederum aus:

- den Gestaltmerkmalen (d_0 , d_{ij} , L_{20} , γ , δ , ϵ_{ij} , A_C , d_s , c_{therm} , k_A sowie³⁰ m_{eff})
- den elektrischen Eingangsgrößen (U bzw. U_p sowie f und t bzw. ED) sowie
- äußeren Einflüssen (F_{extern} , k_s und ΔT_U).

Im regelten Betrieb können in den Gleichungen (7.25) bzw. (7.26) die Terme in den eckigen Klammern ggf. entfallen. Dies wird meist dadurch

³⁰ m_{eff} ergibt sich jedoch auch aus äußeren Einflüssen.

erreicht, dass die Kapazität direkt am Piezoaktor ausgewertet wird, um die thermische Drift oder das Kriechen durch entsprechende Nachregelung der Spannung zu kompensieren. Hierbei wirken die mögliche Leistungsabgabe der Ansteuerungselektronik (im Wesentlichen durch den Verstärker), die von der äußeren Last gemäß Gleichung (7.29) abhängige Arbeitsfrequenz und die von dieser abhängige Wärmeentwicklung begrenzend.

$$f_{Res} = \sqrt{\frac{k_A}{m_{ext} + \frac{m_{Aktor}}{3}}} \quad (7.29)$$

(Unter der Annahme, dass die Federraten externer Lasten größer sind als k_A .)

Die in den Gleichungen 7.13 bis 7.29 dargestellten Zusammenhänge enthalten wiederum Annahmen und Vereinfachungen. So wurde bspw. die Abhängigkeit der Kapazität C und damit der thermischen Verlustleistung P_{therm} des Piezoaktors von der Belastung und der Temperatur nicht berücksichtigt. Auch wurde im Gegensatz zu Abschnitt 7.2.1 der Aspekt der Kühlung nicht betrachtet. Es lässt sich jedoch erkennen, dass wiederum mechanische und thermische Ausgangsgrößen sowie elektrische, mechanische und thermische Eingangsgrößen für die Bestimmung der Aktorkraft notwendig sind und auch für den Piezoaktor die Rückwirkung der Ausgangsgrößen zu betrachten ist.

7.3 Modell der Zusammenhänge zwischen Merkmalen, Eigenschaften und Eingangsgrößen am Beispiel von Aktorprinzipen

Ziel der Modellierung der Zusammenhänge einzelner Aktorprinzipie ist es, dem Entwickler die Möglichkeit zu geben, ein z. B. mithilfe des in *Kapitel 6* vorgestellten Ansatzes als „naheliegend“ identifiziertes Aktorprinzip hinsichtlich einer möglichen Umsetzung zu bewerten. Hierzu soll dem Entwickler die Möglichkeit gegeben werden zu prüfen, ob die erforderliche Annäherung

durch die Änderung von Merkmalen oder Eingangsgrößen an die geforderten Parameter – soweit durch das jeweilige Modell erfasst – zu einer Verschlechterung anderer geforderter Parameter führt. Zeigt sich, dass die erforderlichen Anpassungen bei einem Aktorprinzip nur bei gleichzeitiger Verschlechterung anderer geforderter Parameter möglich sind, ergibt sich ein Zielkonflikt und die in Abschnitt 7.1.2 genannten Schritte sind zu prüfen. Durch Nutzung der auf Basis des *CPM*-Ansatzes erarbeiteten Modelle ergibt sich somit im Entwicklungsprozess direkt der Fokus auf die Eigenschaften und damit ein dem *PDD*-Prozessmodell entsprechendes Vorgehen.

Erscheinen die erforderlichen Anpassungen ohne eine Verschlechterung anderer geforderter Parameter möglich, liegt kein Zielkonflikt vor und es ist zu prüfen ob sich die notwendige Änderung der Merkmale oder Eingangsgrößen realisieren lässt. Hierfür sind konkrete Berechnungen nötig, die nicht Intention des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Modells sind. Die quantitative Bewertung ist in den hier betrachteten frühen Phasen nur eingeschränkt (bspw. für einzelne Grenzfälle und Arbeitspunkte) und unter weiteren Annahmen – insbesondere technologischer Randbedingungen – möglich. Nachdem qualitativ die Möglichkeit zur Anpassung festgestellt wurde, ist daher die quantitative Prüfung in Abstimmung mit einem spezialisierten Aktorentwickler durchzuführen. Diese stufenweise Konkretisierung und Detailierung der Lösung entspricht dem im *PDD*-Prozessmodell beschriebenen Vorgehen.

Grundsätzlich kann die Betrachtung der Parameteränderungen für jedes Aktorprinzip (qualitativ) allgemein erfolgen. Bspw. indem grundsätzlich geprüft wird, durch welche Merkmalsänderungen sich die Leistung für Aktoren eines Aktorprinzips erhöhen lässt. Zweckmäßig ist es jedoch, von einem den geforderten Parametern nahekommenden Aktor ausgehend, die Betrachtung der möglichen Merkmalsänderungen zu führen. Für diesen sind die notwendigen Eigenschaftsänderungen bekannt und Zielkonflikte bei möglichen Anpassungen leicht zu identifizieren.

Für die qualitative Bewertung werden die Zusammenhänge zwischen Ausgangsgrößen/Eigenschaften, Eingangsgrößen und Merkmalen, ausgehend von den bekannten Gleichungszusammenhängen, entsprechend dem in Abbildung 7.3 dargestellten Muster abgebildet. Hierfür werden die Gleichungszusammenhänge zu qualitativen Beziehungen abstrahiert.

Neben der Umordnung des *CPM*-Ansatzes werden zur Verbesserung der Übersichtlichkeit die Ein- und Ausgangsgrößen weiterhin anhand der Energiedomänen gegliedert (Abbildung 7.8). Um die aus der Literatur bekannten „Zwischengrößen“ beizubehalten, werden die Relationen nicht zusammengefasst.

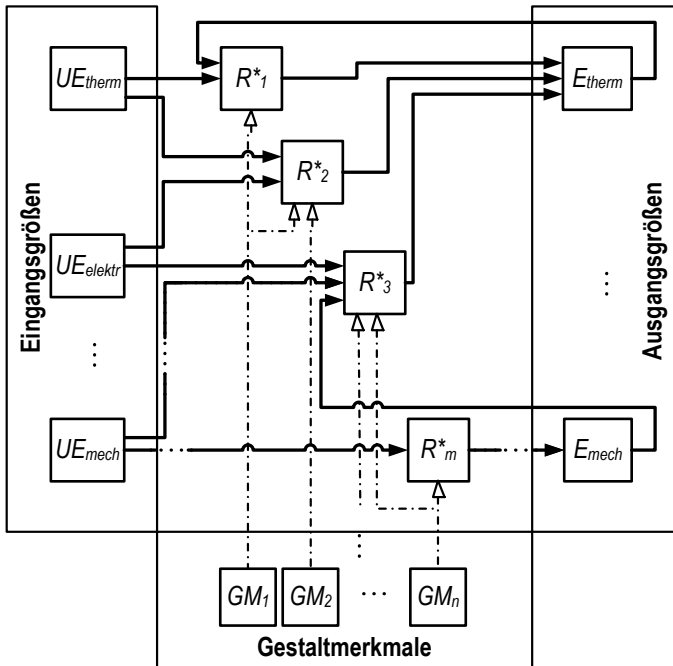


Abbildung 7.8: Anhand der Energiedomänen geordnete Darstellung des *CPM*-Ansatzes unter Berücksichtigung der Rückwirkung einzelner Ausgangsgrößen (auf die Zwischengrößen).

Die Wirkung der Merkmale und Eingangsgrößen auf Zwischengrößen und Eigenschaften wird durch Pfeile dargestellt. Durch „+“ und „-“ an den Pfeilen wird die Wirkung einer möglichen Änderung verdeutlicht:

- „+“ \curvearrowright „+“ verdeutlicht, dass die Vergrößerung der Eingangsgröße zu einer Vergrößerung der Ausgangsgröße führt
- „+“ \curvearrowright „-“ verdeutlicht, dass die Vergrößerung der Eingangsgröße zu einer Verkleinerung der Ausgangsgröße führt

Diese „Pfeile“ sind hinsichtlich ihrer Aussage für die qualitative Betrachtung auch umkehrbar (von „+“ \curvearrowright „+“ über „-“ \curvearrowright „-“ zu „-“ \curvearrowright „-“).

Ausgehend von den in den Abschnitten 7.2.1 und 7.2.2 dargestellten Gleichungszusammenhängen, ergeben sich für den Hubmagnet und den Piezoaktor die in Abbildung 7.9 und 7.10 dargestellten Modelle. Modelle für weitere Aktorprinzipie sind in Anhang C dokumentiert. Ziel der Aktorprinzipmodelle ist, eine Möglichkeit vorzustellen, sowohl die Merkmal-Eigenschaft- als auch die Eingangsgrößen-Ausgangsgrößen-Dualität gemeinsam darzustellen.

Einen ähnlichen Ansatz zur Abbildung der qualitativen Zusammenhänge zwischen Merkmalen und Eigenschaften wählt WÄLDELE [Wäl11] für eine „Theorie der Eigenschaften technischer Produkte“ und demonstriert dies am Beispiel der Auswahl und Optimierung von Blech-/Profilelementen in Abhängigkeit von verschiedenen „Prozesseigenschaften“.

Auch er nutzt, wenn auch andersartig angeordnet die durch Gleichungen bekannten Zusammenhänge zwischen Eigenschaften und Merkmalen zu deren Verknüpfung in Graphen. Der Unterschied zum hier vorgestellten Ansatz liegt neben Anwendungsbeispiel und der Anordnung der Merkmale und Eigenschaften im Graphen vor allem darin, dass WÄLDELE keine gerichteten Graphen nutzt und die Wirkung der einzelnen Merkmals-/Eigenschaftsänderungen im Graphen nicht spezifiziert.

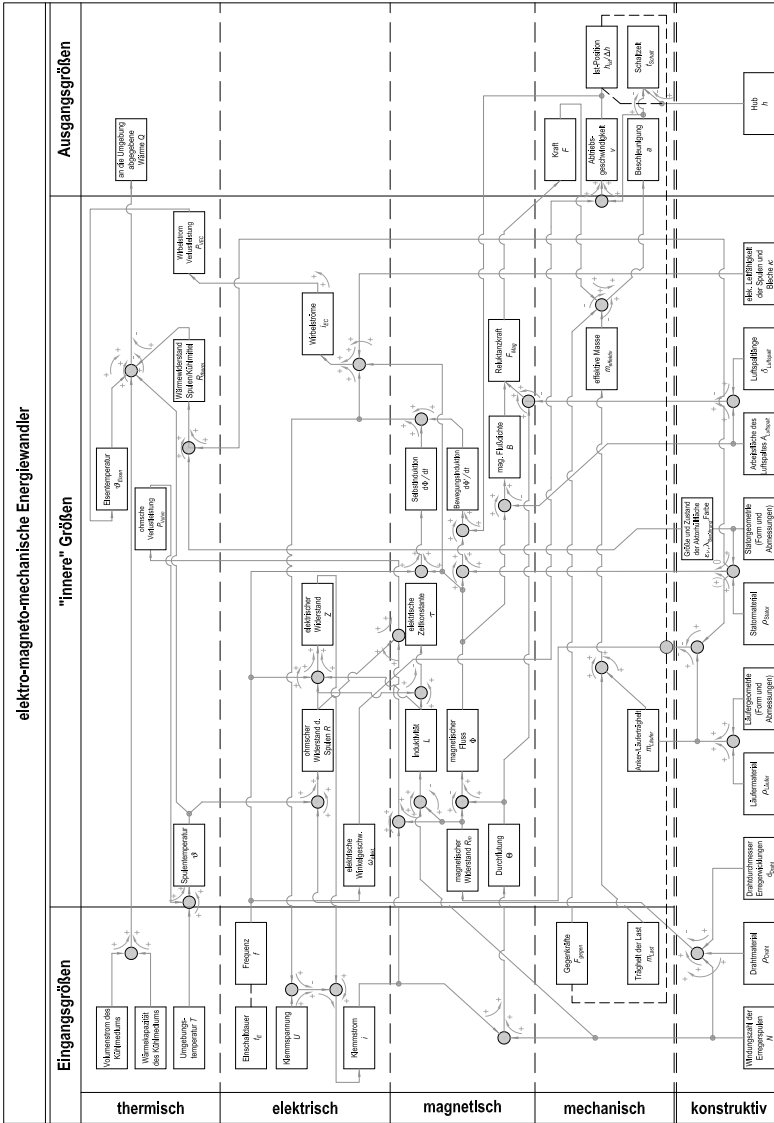


Abbildung 7.9: Gesamtmodell des Elektromagnetaktors

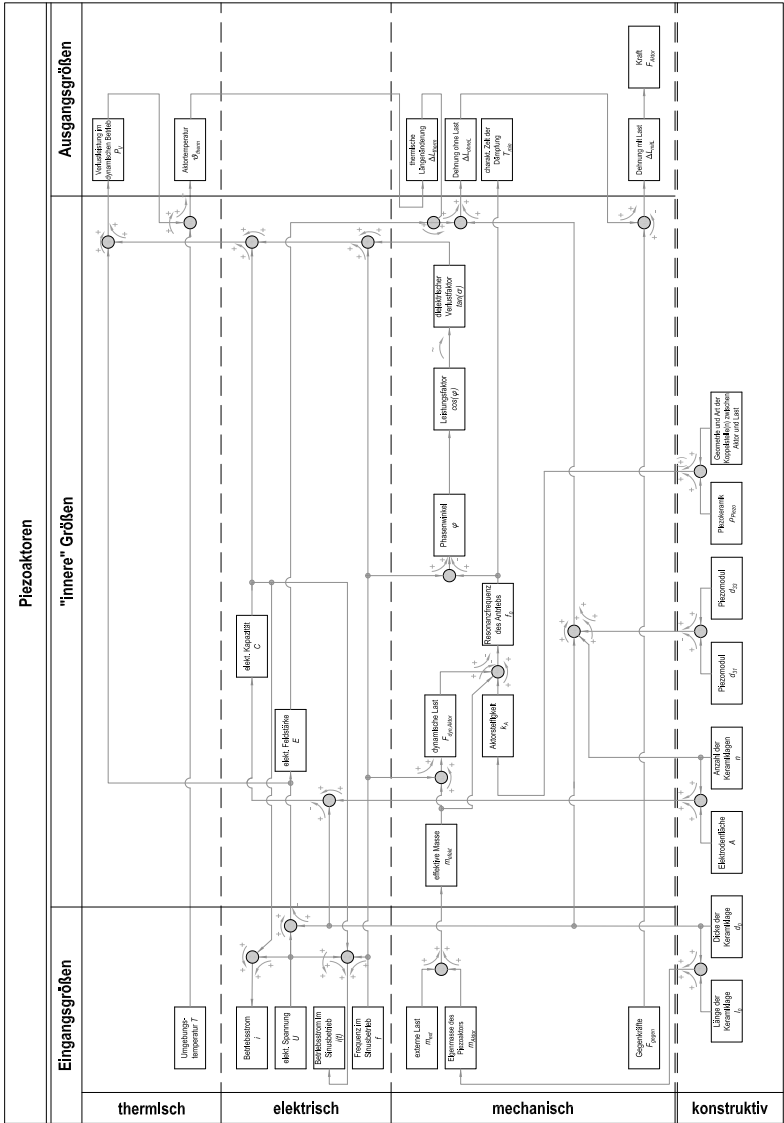


Abbildung 7.10: Gesamtmodell des Piezoaktors

7.3.1 Vorgehen bei der Bestimmung von Parameteränderung

Im Weiteren werden die Aktorprinzipmodelle nur „papiergebunden“ betrachtet. Eine rechnerische Umsetzung der Modelle ist grundsätzlich möglich, aber nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Für die Betrachtung von Aktorprinzipen ergeben sich hierfür drei grundsätzliche Anwendungsfälle:

- Die Bestimmung der zum Erreichen einer geforderten Eigenschaft (z. B. einer höheren Leistung) notwendigen Änderungen der Merkmale und Eingangsgrößen.
- Die Bestimmung der Auswirkung der Änderungen von Merkmalen (z. B. um das Aspektverhältnis zu ändern) auf die (bestehenden) Eigenschaften oder
- die Kombination aus beidem.

Anhand der Aktorprinzipmodelle ist dies durch Verfolgung der Pfeile zu den Eigenschaften oder von den Merkmalen möglich. Dabei wird das Modell Stück für Stück aufgebaut. Am Beispiel der Aktorkraft für den Piezoaktor und den Elektromagnetaktor (vgl. Abbildung 7.9 und 7.10) soll dies im Folgenden exemplarisch gezeigt werden.

7.3.2 Nutzung der Aktorprinzipmodelle am Beispiel der Maximierung der Aktorkraft

Zur Verdeutlichung der Anwendung der Aktorprinzipmodelle soll angenommen werden, dass für ein Aktorprinzip geprüft werden soll, wie durch die Veränderung der Merkmale bei gleichbleibenden Eingangsgrößen die Aktorkraft erhöht werden kann. Hierzu werden, ausgehend von der Aktorkraft, alle im Modell durch Pfeile mit jener verbundenen Größen nacheinander in einem

Graphen entwickelt (mit den Pfeilen als gerichteten Kanten und den Einflussgrößen als Knoten). Dies lässt sich vereinfacht als ein „Aufhängen“ des jeweiligen Aktormodells an der betrachteten Größe verstehen.

Für den Piezo- und Elektromagnetaktor ergeben sich die in den Abbildungen 7.11 und 7.12 dargestellten Zusammenhänge. Die Endknoten dieser Graphen bezeichnen dabei die Parameter, mit denen Einfluss auf die Aktorkraft genommen werden kann. In vergleichbarer Weise lassen sich Graphen für einzelne Merkmale für den Fall aufbauen, dass beispielsweise die Auswirkungen einer Änderung eines Aspektverhältnisses oder einzelner Materialparameter aufgezeigt werden sollen.

Für eine geforderte Bewegungsaufgabe oder aufgrund einer geforderten Betriebsweise (z. B. geregelter Betrieb) können einzelne Parameter nicht verändert werden. Weitere Beschränkungen ergeben sich aufgrund physikalischer (z. B. Piezomodul) oder – beurteilt anhand eines den geforderten Parametern nahekommenden Aktors des betreffenden Aktorprinzips – technologischer Grenzen (z. B. minimaler Luftspalt). Abbildung 7.13 zeigt diese Beschränkung beispielhaft jeweils für den Piezo- und den Elektromagnetaktor.

Für die gewählten Beispiele ist durch die Vergrößerung der Dicke und Anzahl der Piezolagen bzw. durch die Vergrößerung der Windungszahl und Arbeitsfläche des Luftspaltes oder die Verringerung der wirksamen Polfläche eine Beeinflussung der Aktorkraft möglich. Die Beeinflussung weiterer Eigenschaften durch Änderungen dieser Parameter ist im Gesamtmodell anhand der Pfeile nachvollziehbar. Der Anwender der Modelle kann, ausgehend von jedem geeignet erscheinendem Parameter, mögliche unerwünschte Beeinflussungen prüfen und so lange weitere Parameter suchen, bis die Suche:

- einen Parameter ergibt, für den eine weitere quantitative Betrachtung zielführend erscheint oder

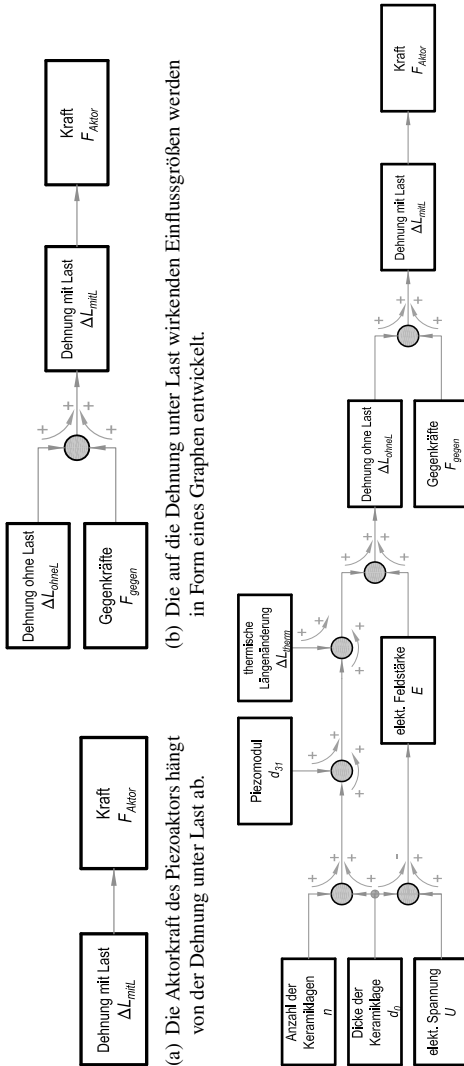


Abbildung 7.11: Entwicklung des Aktormodells für den Piezoaktor ausgehend von der Aktorkraft F_{Aktor} zur Bestimmung der Einflussgrößen. Die Orientierung der Darstellung des Gesamtmodells in Abbildung 7.10 wurde beibehalten, die Entwicklung ist daher von rechts nach links zu lesen.

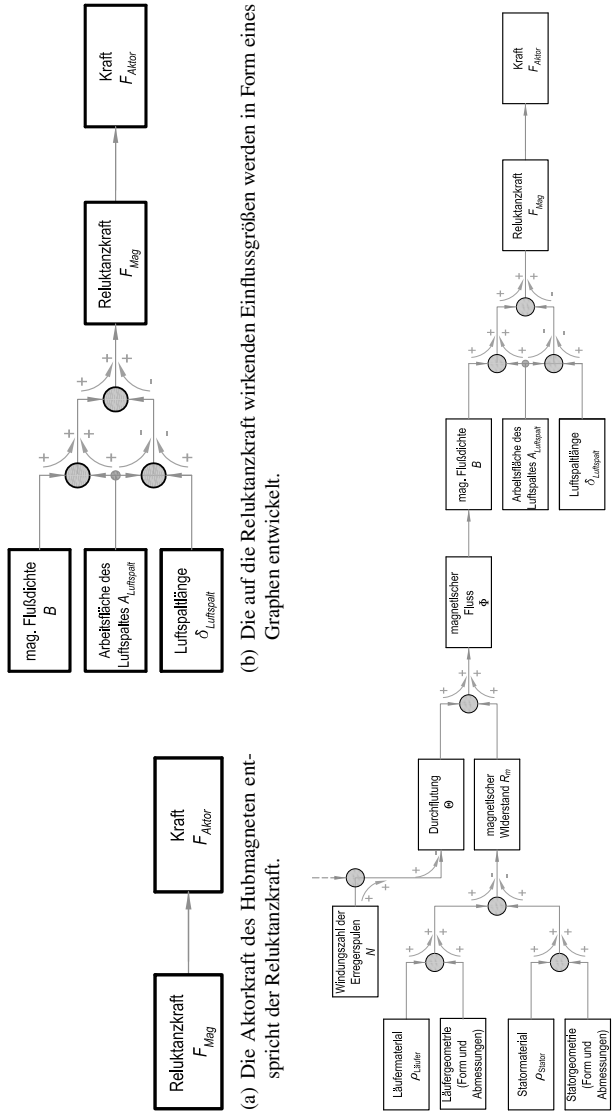


Abbildung 7.12: Entwicklung des Aktormodells für den Hubmagneten ausgehend von der Aktorkraft F_{Aktor} zur Bestimmung der Einflussgrößen. Die Orientierung der Darstellung des Gesamtmodells wurde beibehalten, die Entwicklung ist daher von rechts nach links zu lesen.

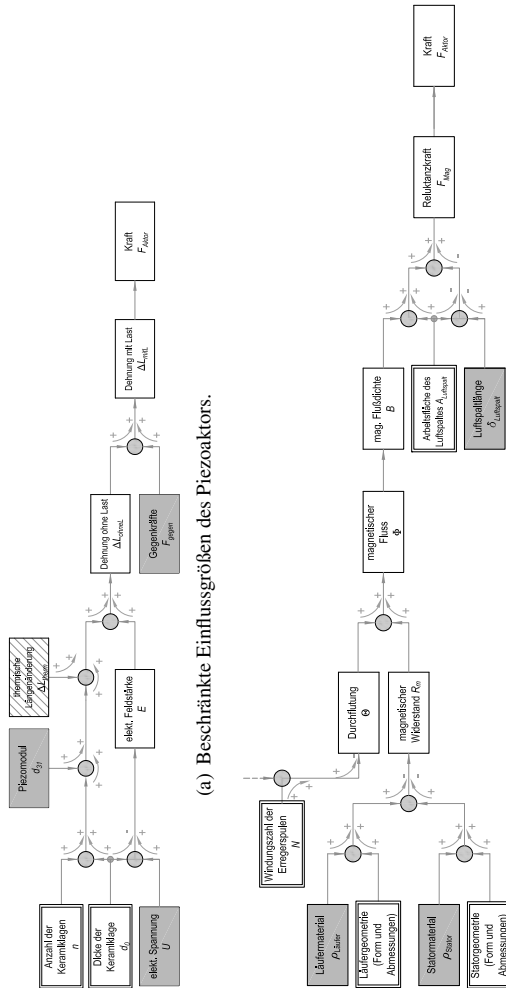
- mehrere Parameter ergibt, die die gewünschte Eigenschaftsänderung und eine Kompensation der auftretenden Verschlechterung weiterer Parameter erwarten lässt oder
- ersichtlich wird, dass die Anforderungen so viele Beschränkungen beeinhaltend, dass eine Anpassung des Aktorprinzips nicht zielführend erscheint.

Anhand der Modelle können dabei unterschiedliche Varianten für mögliche Änderungen für verschiedene Aktorprinzip geprüft werden. In frühen Phasen des Entwicklungsprozesses sind dabei mögliche Zielkonflikte oder kritische Anforderungen/Parameter zu identifizieren.

Erweist sich kein Aktorprinzip als geeignet, ist eine Änderung der Struktur des Bewegungssystems oder die Abschwächung/Änderung der vom Aktor geforderten Eigenschaften zu prüfen (vgl. Abschnitt 7.1.2). Für das oder die geeignet erscheinenden Aktorprinzip ist eine weitere Prüfung ggf. in Abstimmung mit für die in Frage kommenden Aktorprinzip spezialisierten Aktorentwicklern für eine quantitative Abschätzung zweckmäßig. Diese kann auf eines oder wenige Aktorprinzip beschränkt zielführend geschehen. Anpassungen an der Bewegungssystemstruktur sind so in der Konzeptphase mit geringerer Unsicherheit möglich. Bei Variantenentwicklungen können auf diese Weise die ggf. notwendigen Änderungen des Aktorprinzips geprüft und erkannt werden. Die in einem solchen Fall notwendigen Änderungen an Betriebsweise, technischer Peripherie bzw. der Struktur des Bewegungssystems und damit weitere Schwerpunkte bei der Entwicklung können identifiziert werden.

7.4 Fazit und Bewertung der gewählten Aktorprinzipdarstellung

Das vorgestellte Modell veranschaulicht sowohl den aus der klassischen Konstruktionswissenschaft bekannten Eingang-Ausgang-Zusammenhang als auch



(a) Beschränkte Einflussgrößen des Piezoaktors.

(b) Beschränkte Einflussgrößen des Elektromagnetaktors.

Abbildung 7.13: Physikalische und technologische Beschränkungen der Einflussgrößen. Die grau hinterlegten Parameter werden als nicht-variabel angenommen. Die verbleibenden Merkmale, die die Aktorkraft beeinflussen, sind doppelt umrandet. Die schraffierten Parameter können ggf. durch die Betriebsweise kompensiert werden und entfallen.

den Zusammenhang zwischen Merkmalen und Eigenschaften. Aufgrund der Beschränkung auf die frühen Phasen und das Beispiel Aktorprinzip sind die betrachteten Ausgangsgrößen und Eigenschaften identisch.

Für das gewählte Beispiel der Aktoren wurde eine an den *CPM*-Ansatz angelehnte dreiseitige Darstellung sowie eine weitere Unterteilung anhand der Energiedomänen gewählt. Ziel der gewählten Darstellung war eine vereinheitlichte Anordnung der jeweiligen Eingangs-, Ausgangsgrößen und Merkmalen für verschiedene Aktorprinzipie, die einen schnellen Vergleich verschiedener Aktorprinzipie anhand eines papiergebundenen Modells erlaubt. Eine mögliche rechnerische Umsetzung wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht geprüft.

Eine Erweiterung auf spätere Phasen des Entwicklungsprozesses erfordert die Berücksichtigung weiterer (über die funktionsbezogenen hinausgehender) Eigenschaften und somit eine Detaillierung des Modells. Inwieweit die Betrachtung ausgewählter weiterer Eigenschaften die Betrachtung weiterer Merkmale bzw. Eingangsgrößen erfordert, ist nicht allgemein zu beantworten. Für die Nutzbarkeit des vorgestellten Modells ist es jedoch erforderlich, dass zumindest qualitative Relationen zwischen den ergänzten (und ggf. den vorhandenen) Parametern angegeben werden können. Denkbar ist jedoch, anhand von bekannten (meist nicht allgemeingültigen) Erfahrungs- und Kennwerten bspw. aus den notwendigen Merkmalsänderungen (z. B. Werkstoffänderung, Änderungen des Drahtdurchmessers, Änderung des Querschnitts und damit ggf. des Halbzeuges) die Herstellbarkeit zu betrachten und Herstellkosten abzuschätzen.

Über die Aktorprinzipie hinaus ist auch eine Übertragung auf andere Beispiele und Anwendungsgebiete möglich. Insbesondere durch die im Aktorprinzipmodell nur implizit durch den Nutzer berücksichtigten technologischen Begrenzungen können Veränderung der Merkmale, Ein- und Ausgangsgrößen Berücksichtigung finden. Wird bspw. die Geometrie als Ausgangsgröße eines Fertigungsprozesses betrachtet, sind für verschiedene Technologien (z. B.

Fräsen, Drehen, Beschichten) die beeinflussbaren Parameter (z. B. Vorschubgeschwindigkeit, Auftragszeiten) und die Eingangsgrößen (z. B. Halbzeuge, Materialien, Zustände der Materialien) vergleichbare Darstellungen möglich.

Die in [Web07] beschriebene Betrachtung von *DfX* (*Design-for-X*) und *DoX* (*Design-of-X*)-Aspekten mithilfe des *CPM*-Ansatzes ist dadurch abbildbar. Für einen bekannten Maschinenpark können so z. B. die nötigen und möglichen Anpassungen der Fertigungs(-prozess)-parameter dargestellt und ebenfalls qualitativ bewertet werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit behandelt die Auswahl von Aktoren und deren Aktorprinzipien bei der Entwicklung von Bewegungssystemen. Zielstellung ist es, Möglichkeiten und – modellbasiert – Wege zur Auswahl von Aktorprinzipien in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses aufzuzeigen. Hierfür wurde eine rechnerbasierte Auswahlunterstützung für Aktorprinzipie, basierend auf bekannten Aktoren, und ein Modell zur Abschätzung des Einflusses von Änderungen an den Merkmalen von Aktorprinzipien vorgestellt. Die vorgeschlagene Auswahlunterstützung und die Aktorprinzipmodelle sind für die Festlegung der weiteren Schritte bei der Entwicklung von Bewegungssystemen komplementär nutzbar.

Die rechnerbasierte Auswahlunterstützung erlaubt aufgrund der Anwendung des *Skyline*-Algorithmus unabhängig von der notwendigen Datenbasis, die Möglichkeitsbereiche für Aktorprinzipie abzugrenzen. Die bei bekannten Ansätzen willkürliche Abgrenzung der Möglichkeitsbereiche der Aktorprinzipie [ZAF02] wird so vermieden und für Erweiterungen der Datenbasis infolge der technischen Entwicklung zugänglich gemacht. Die für die Anwendung auf die Aktorauswahl nötigen Grundlagen und Änderungen des *Skyline*-Algorithmus sowie ein Ansatz zur Darstellung möglichst vieler verschiedener Aktorprinzipie werden im Rahmen der Arbeit entwickelt. Der *Skyline*-Algorithmus, eine Aktordatenbank sowie eine GUI wurden im Rahmen dieser Arbeit prototypisch umgesetzt und beschrieben.

Das vorgestellte Modell zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen Eingangs-, Ausgangsgrößen und Merkmalen einzelner Aktorprinzipie ergänzt die rechnerbasierte Auswahlunterstützung. Es bietet einen Ansatz für den Fall,

dass die Anforderungen nicht in dem durch bekannte Aktoren abgegrenzten Möglichkeitsbereich liegen. Auf Basis der aus der Literatur bekannten Zusammenhänge erlaubt das vorgeschlagene Modell, mögliche Zielkonflikte bei der Realisierung geforderter Parameter mit einem Aktorprinzip zu erkennen. Die geforderten wie auch die geänderten Parameter können sich dabei aus funktionalen Eigenschaften, Gestaltmerkmalen und Eingangsgrößen ergeben. Das vorgestellte Modell vereint hierfür die Aspekte des zugrundegelegten *CPM*-Ansatzes wie auch der Übertragungsfunktionen klassischer entwicklungsmethodischer Ansätze.

Mithilfe der vorgestellten Ansätze ist dem nichtspezialisierten Entwickler von Bewegungssystemen die Möglichkeit gegeben, mögliche Aktorprinzipie bzw. Zielkonflikte bei der Realisierung gewünschter Parameter zu identifizieren. Die zweiten Fall nötigen Schritte zur Anpassung der Struktur des Bewegungssystems oder der geforderten Parameter werden im Rahmen der Arbeit vorgestellt.

Ausblick

Der *Skyline*-Ansatz wie auch das vorgeschlagene Modell zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen Eingangs-, Ausgangsgrößen und Merkmalen bieten Potenzial zur Erweiterung und Verbesserung. Auf Aktoren bezogen ist dies, neben der grundlegenden Option der Erweiterung der Datenbasis um weitere Aktoren und ggf. weitere Aktorprinzipie, insbesondere in der firmeninternen Anwendung zu sehen. Der Vergleich und die Darstellung des eigenen Portfolios mit anderen Aktorherstellern sowie die Berücksichtigung von nicht allgemeingültigen Angaben zu Kosten, Verfügbarkeit, Lebensdauer usw. bieten für Produktplanung, Marketing und Vertrieb interessante Möglichkeiten.

Das Bilden von *Skylines* für unterschiedliche Parameterkombinationen ist selbstverständlich auch für Anwender insbesondere bei – firmenspezifischen – Kosten- oder Preisdaten interessant. Das Potenzial hierzu konnte im Rahmen

der Arbeit aufgrund fehlender Angaben und der grundsätzlich nicht gegebenen Allgemeingültigkeit solcher Angaben nicht evaluiert werden. Darüber hinaus ist die Anwendung für weitere Auswahlprobleme im Maschinenbau denkbar, sofern allgemeingültige quantitative Parameter vorliegen.

Die im Rahmen der Arbeit ausschließlich in Papierform betrachteten Akteurprinzipmodelle bieten die Möglichkeit zur weiteren Detaillierung und Konkretisierung sowie zur rechnerischen Umsetzung. Weiterhin bietet es einen Ansatz zur Modellierung verschiedener Zusammenhänge über die Akteurprinzipmodelle hinaus. Die in Anlehnung an [Web07] diskutierte Darstellung von *DfX*- und *DoX*-Aspekten erscheint dabei möglich und birgt großes Potenzial bei der Planung von Produktfamilien aber bspw. auch für die Bewertung und Beschaffung von Produktionsmitteln.

Bei einer rechnerischen Umsetzung der Akteurprinzipmodelle bilden die Implementation der Gleichungszusammenhänge sowie eine mögliche Automatisierung der Bestimmung der geeigneten Parameteränderungen zweckmäßige Ansatzpunkte. Die Einbindung impliziten Wissens (z. B. zu Grenzen und Kosten einzelner Parameteränderungen) bspw. durch Eingabe des Nutzers können daran geprüft werden. Im Rahmen einer erweiterten Betrachtung kann untersucht werden, ob sich verschiedene Modelle kombinieren lassen. Dies kann hinsichtlich der Struktur des Bewegungssystems z. B. durch Erweiterung des Modells ("nach rechts") durch verschiedene Getriebemodelle erfolgen.

Denkbar ist aber eine Erweiterung auch im Hinblick auf die Merkmalsänderungen („nach unten“) z. B. durch Verbindung des Akteurprinzipmodells mit einem firmenspezifischen *DfX*-Modell. Derartige Erweiterungen könnten bspw. Grenzen für Varianten und Baukastensysteme liefern und wiederum Werkzeuge für zuvor angesprochene Marketing- oder Produktplanungsprozesse bilden.

Literaturverzeichnis

- [ACF97] AKIYAMA, T. ; COLLARD, D. ; FUJITA, H.: Scratch drive actuator with mechanical links for self - assembly of three - dimensional MEMS. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 6 (1997), Nr. 1, S. 10 – 17. <http://dx.doi.org/10.1109/84.557525>. – DOI 10.1109/84.557525
- [ADE11] Adept Technology, Inc., USA: *Produktpräsentation: Adept Quattro s650H*. Version: 2011. <http://www.adept.com/products/industrial-automation>, Abruf: 26.06.2011
- [AFH69] ANSCHÜTZ, F. ; FRITSCH, M. ; HÖHNE, G. ; LANGBEIN, P. ; MEHLBERG, H. ; OTTE, V.: *Beiträge zum konstruktiven Entwicklungsprozess*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, Diss., 1969. – Zusammengefasste Dissertationsschriften, der jeweils einzelnen Werke, Zitationen zu den Einzelwerken werden extra geführt
- [AIS11] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Japan: *Spherical Motor*. Version: 2011. <http://staff.aist.go.jp/t.yano/data/english/research-e.htm>, Abruf: 20.06.2011
- [AMK99] AZZAM YASSEEN, A. ; MITCHELL, J. N. ; KLEMIC, J. F. ; SMITH, D. A. ; MEHREGANY, M.: A rotary electrostatic micromotor 1 x 8 optical switch. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 5 (1999), Nr. 1, S. 26 – 32. <http://dx.doi.org/10.1109/2944.748101>. – DOI 10.1109/2944.748101
- [And95] ANDREASEN, M. M.: System Modelling. PhD - Course on Design Theory and Research. In: *Technical University of Denmark, Lyngby*. (Anm. d. Verf.: Ebenso in den PhD - Kursen der Folgejahre sowie in zahlreichen Präsentationen und persönlichen Diskussionen mit Weber.) (1995)

- [Ash00] ASHBY, M. F.: Multi - objective optimization in material design and selection. In: *Acta Materialia* 48, S. 359 - 369 (2000)
- [AWF06] ASHBY, M. F. ; WANNER, A. ; FLECK, C.: *Materials Selection in Mechanical Design*. 3. Aufl. Spektrum Akademischer Verlag, 2006
- [Bar04] BAR-COHEN, Y.: *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential, and challenges*. SPIE Press, 2004 (SPIE Press monograph)
- [Beh11] BEHR THERMOT-TRONIK GMBH: *Produktpräsentation*. Version: 2011. <http://www.btt-thermostate.de/produkte/automobil/dehnstoffarbeitselement.pdf>, Abruf: 27.03.2011
- [BKO97] BALTZER, M. ; KRAUS, T. ; OBERMEIER, E.: A linear stepping actuator in surface micromachining technology for low voltages and large displacements. 2 (1997), S. 781 – 784. <http://dx.doi.org/10.1109/SENSOR.1997.635216>. – DOI 10.1109/SENSOR.1997.635216
- [BKS78] BENTLEY, J. L. ; KUNG, H. T. ; SCHKOLNICK, M. ; THOMPSON, C. D.: On the Average Number of Maxima in a Set of Vectors and Applications. In: *Journal ACM* 25 (1978), October, S. 536 – 543
- [BKS01] BÖRZSÖNYI, St. ; KOSSMANN, D. ; STOCKER, K.: The Skyline Operator. (2001), S. 421 – 430
- [BLA01] BIRKHOFFER, H. ; LINDEMANN, U. ; ALBERS, A. ; MEIER, M.: Product Development as a structured and interactive network of Knowledge – a revolutionary approach. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Engineering Design (ICED'01)* (2001)
- [BLF05] BELL, D. J. ; LU, T. J. ; FLECK, N. A. ; SPEARING, S. M.: MEMS actuators and sensors: observations on their performance and selection for purpose. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 15 (2005), S. 153–164
- [BR94] BIRKHOFFER, H. ; REINEMUTH, J.: *Lean Design mit Zulieferkomponenten*. VDI Verlag, Düsseldorf : in VDI Berichte, Nr. 1120, 1994

- [Buc89] BUCHTA, Chr.: On the average number of maxima in a set of vectors. In: *Information Processing Letters* 33 (1989), Nr. 2, S. 63 – 65
- [BV99] BUSCH-VISHNIAC, I. J.: *Electromechanical sensors and actuators*. Springer, 1999 (Mechanical engineering series)
- [BW09] BIRKHOFFER, H. ; WÄLDELE, M.: The Concept of Product Properties and its Value for Research and Practice in Design. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09)* (2009)
- [Cha02] CHAKRABARTI, A.: *Engineering design synthesis*. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 2002
- [CJT06] CHAN, C. Y. ; JAGADISH, H. V. ; TAN, K. L. ; TUNG, A. K. H. ; ZHANG, Z.: *On High Dimensional Skylines*. <http://www.comp.nus.edu.sg/~zhangzh2/papers/edbt06.pdf>. Version: 2006
- [Cla99] CLADIS, P. E.: Liquid Crystalline Elastomers as Artificial Muscles. In: *Dynamic Control System Conference, Ottawa, Kanada* (1999)
- [CNT96] CHU, P. B. ; NELSON, Ph. R. ; TACHIKI, M. L. ; PISTER, K. S. J.: Dynamics of polysilicon parallel - plate electrostatic actuators. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 52 (1996), Nr. 1 - 3, S. 216 – 220. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247\(96\)80152-X](http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247(96)80152-X). – DOI 10.1016/0924-4247(96)80152-X
- [Con10] CONRAD, J.: *Semantische Netze zur Erfassung und Verarbeitung von Informationen und Wissen in der Produktentwicklung*. Saarbrücken, 2010
- [CRK08] CARPI, F. ; ROSSI, D. D. ; KORNBLUH, R.: *Dielectric elastomers as electromechanical transducers: fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology*. 2008
- [DRB07] DRIESEN, W. ; RIDA, A. ; BREGUET, J. M. ; CLAVEL, R.: Friction based locomotion module for mobile MEMS robots. (2007), S. 3815 – 3820. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2007.4399321>. – DOI 10.1109/IROS.2007.4399321
- [DS07] DELLIS, E. ; SEEGER, B.: Efficient computation of reverse skyline queries. (2007), S. 291 – 302

- [EB09] EGBUNA, C. C. ; BASSON, A. H.: Electric Actuator Selection Design Aid for Low Cost Automation. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering Design (ICED'09)* (2009)
- [Egb08] EGBUNA, C. C.: *An Electric Actuator Selection Aid for Low Cost Automation*, Stellenbosch University, South Africa, Diplomarbeit, 2008
- [Ehr03] EHRENSPIEL, K.: *Integrierte Produktentwicklung*. 2. Aufl. München, Wien : Carl - Hanser - Verlag, 2003
- [ENH91] EGAWA, S. ; NIINO, T. ; HIGUCHI, T.: Film actuators: Planar, electrostatic surface - drive actuators. (1991), S. 9 – 14. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1991.114761>. – DOI 10.1109/MEMSYS.1991.114761
- [EPW11] ERBE, T. ; PAETZOLD, K. ; WEBER, Chr.: Actuation principle selection - an example of trade-off assessment by CPM-approach. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED'11)* (2011)
- [EST10] ERBE, T. ; STRÖHLA, T. ; THESKA, R. ; WEBER, Chr.: Decision - aid for actuator selection. In: *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2010* (17. bis 20. Mai 2010)
- [FBS75] FRIEDMAN, J. H. ; BASKETT, F. ; SHUSTEK, L. J.: An Algorithm for Finding Nearest Neighbors. In: *IEEE Trans. Comput.* 24 (1975), October, S. 1000 – 1006
- [FLD04] FRANKE, H. J. ; LÖFFLER, S. ; DEIMEL, M.: Increasing the Efficiency of Design Catalogues by using modern Data Processing Technologies. In: *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2004* (18. bis 21. Mai 2004)
- [FS06] FIEGE, R. ; STELZER, D.: Analyse des Beitrages von Axiomatic Design zum Entwurf Serviceorientierter Architekturen / Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Institut für Wirtschaftsinformatik. 2006. – Arbeitsbericht Nr. 2006 - 06
- [FTM89] FAN, L. S. ; TAI, Y. C. ; MULLER, R. S.: IC - processed electrostatic micromotors. In: *Sensors and Actuators* 20 (1989), Nr. 1 - 2, S. 41 –

47. [http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874\(89\)87100-8](http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874(89)87100-8). – DOI 10.1016/0250-6874(89)87100-8
- [GB05] GARIBAY, J. A. L. ; BINZ, H.: Design Catalogues as Knowledge Management and Educational Tools in Mikrosystem Engineering Design. In: *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED'05)* (2005)
- [GFS94] GAUSEMEIER, J. ; FRANK, T. ; SABIN, A.: Lösungskataloge als Grundlage des zukünftigen CAE - Prozesses, Carl Hanser Verlag München, 1994 (CAD 94)
- [GHU06] GATZEN, H.H. ; HAHN, M. ; ULLAKKO, K.: Characterization of Magnetic Shape Memory (MSM) Material and its Application in a Hybrid Micro Actuator. In: *Proceedings of the ACTUATOR 2006* (2006)
- [Giß05] GISSLER, Jörg: *Elektrische Direktantriebe : Vorteile der Direktantriebstechnik praktisch nutzen*. München : Franzis, 2005 (Elektronik)
- [GK06] GERO, J. S. ; KANNENGIESSER, U.: A Function - Behaviour - Structure ontology of processes. In: *Design Computing and Cognition'06* (2006)
- [Güm04] GÜMPEL, P.: *Formgedächtnislegierungen: Einsatzmöglichkeiten in Maschinenbau, Medizintechnik und Aktuatorik*. expert - Verl., 2004
- [GT78] GUNDERMANN, B. ; TÜRPE, D.: *Ein Beitrag zum Aufbau funktionsorientierter Informationsspeicher für technische Prinzipie und Erzeugnisse*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, Diss., 1978
- [Hac10] HACKEL, T.: *Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für Nanopräzisionsmaschinen*. Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2010
- [Han68] HANSEN, F.: *Konstruktionssystematik*. 3. Aufl. Berlin : VEB - Verlag Technik, 1968. – online verfügbar unter www.tu-ilmenau.de/konstruktionstechnik/tradition/
- [Han74] HANSEN, F.: *Konstruktionswissenschaft*. 1. Aufl. Berlin : VEB - Verlag Technik, 1974

- [HAS06] HUYNH, N. N. ; ALICI, G. ; SPINKS, G. M.: Force Analysis and Characterization of Polymer Actuators. (2006), S. 5465 – 5470. <http://dx.doi.org/10.1109/IROS.2006.282179>. – DOI 10.1109/IROS.2006.282179
- [HFA97] HUBER, J. E. ; FLECK, N. A. ; ASHBY, M. F.: The selection of mechanical actuators based on performance indices. In: *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical and Physical Sciences* 453, (1965), S. 2185 - 2205 (1997)
- [HL92] HUNTER, I. W. ; LAFONTAINE, S.: A comparison of muscle with artificial actuators. (1992), S. 178 – 185. <http://dx.doi.org/10.1109/SOLSEN.1992.228297>. – DOI 10.1109/SOLSEN.1992.228297
- [HML90] HUFF, M. A. ; METTNER, M. S. ; LOBER, T. A. ; A.SCHMIDT, M.: A pressure-balanced electrostatically-actuated microvalve. (1990), jun, S. 123 –127. <http://dx.doi.org/10.1109/SOLSEN.1990.109835>. – DOI 10.1109/SOLSEN.1990.109835
- [Hub73] HUBKA, V.: *Theorie der Maschinensysteme*. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 1973
- [Hub84] HUBKA, V.: *Theorie der technischer Systeme*. 2. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 1984
- [HZ07] HOMBURG (HRSG.), D. ; ZEIFF, A.: *Kleinst - und Mikroantriebe - Technik und Anwendung*. Stutensee : PKS - Verlag, 2007
- [IMM11] *Bildmaterial IMMS gGmbH*. <http://www.imms.de/typo3temp/pics/8471e46572.jpg>. Version: 2011, Abruf: 16.04.2011
- [Ise05] ISERMANN, R.: *Mechatronic systems: fundamentals*. Springer, 2005
- [Ise07] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme*. 2. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 2007
- [Jan92] JANOCHA, H.: *Aktoren: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin [u. a.] : Springer, 1992. – Literaturangaben
- [Jan99] JANOCHA, H.: *Adaptronics and smart structures: basics, materials, design, and applications*. Springer, 1999

- [Jan04] JANOCHA, H.: *Actuators: Basics and Applications*. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 2004
- [Jan07] JANOCHA, H.: *Shape Memory Actuators*. 2., rev. ed. Berlin, Heidelberg : Springer, 2007
- [Jan09] JANOCHA, H.: *Unkonventionelle Aktoren*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009
- [JPW89] JACOBSEN, S. C. ; PRICE, R. H. ; WOOD, J. E. ; RYTTING, T. H. ; RAFAELOF, M.: The wobble motor: an electrostatic, planetary - armature, microactuator. (1989), S. 17 – 24. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1989.77953>. – DOI 10.1109/MEMSYS.1989.77953
- [JTW89] JEBENS, R. ; TRIMMER, W. ; WALKER, J.: Microactuators for aligning optical fibers. In: *Sensors and Actuators 20* (1989), Nr. 1-2, S. 65 – 73. [http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874\(89\)87103-3](http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874(89)87103-3). – DOI 10.1016/0250-6874(89)87103-3
- [Ju95] JENDRITZA, D. J. ; U. A.: *Technischer Einsatz neuer Aktoren*. Renningen - Malsheim : expert - Verlag, 1995
- [Kah05] KAHLERT, M.: *Entwurf eines Prinzipienkatalogs für multidisziplinäre Lösungsansätze*. VDI, Düsseldorf : Fortschr. - Ber., Reihe 1, Nr. 384, VDI - Verlag, 2005
- [Kal01] KALLENBACH, E.: *Systementwurf - Methoden zum systematischen Entwurf mechatronischer Produkte des Maschinenbaus*. VDI Verlag, Düsseldorf : Mechatronik - Workshop, VDI/VDE Handbuch Mechatronik - Workshop, 2001
- [KAT92] KALLENBACH, E. ; ALBRECHT, A. ; TUAN, H. A.: *Zur Auswahl optimaler Energiewandlungsprinzipien für Mikroaktoren*. Kongreßbericht Gerätetechnik und Mikrosystemtechnik. VDI Verlag, Düsseldorf : VDI Berichte, Nr. 960, 1992
- [KB91] KALLENBACH, E. ; BÖGELSACK, G.: *Gerätetechnische Antriebe*. 1. Aufl. Berlin : Verlag Technik, 1991

- [KBS97] KALLENBACH, E. ; BIRLI, O. ; SAFFERT, E. ; SCHÄFFEL, Chr.: *Zur Gestaltung integrierter mechatronischer Produkte*. VDI Verlag, Düsseldorf : in VDI - Berichte, Nr. 1315, 1997
- [KDF09] KIRCHNER, K. ; DREBING, U. ; FRANKE, H. J.: Konstruktionskataloge für den effizienten Einsatz physischer Modelle im Produktentwicklungsprozess. In: *KONSTRUKTION (Zeitschrift) - - Sonderdruck Ausgabe 10* (2009)
- [KEQ08] KALLENBACH, E. ; EICK, R. ; QUENDT, P. ; STRÖHLA, T. ; FEINDT, K. ; KALLENBACH, M.: *Elektromagnete: Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung*. 3., bearb. und erg. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2008
- [KES08] KRÓL, J. ; ERBE, T. ; STRÖHLA, T. ; THESKA, R.: A novel Function-Structure-approach exemplified by Selection of Gearless Drives. In: *Proceedings 53. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium* (2008)
- [KK97] KOLLER, R. ; KASTRUP, N.: *Prinziplösungen zur Konstruktion technischer Produkte*. 2. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 1997
- [KKB11] KREBBER, S. ; KLOBERDANZ, H. ; BIRKHOFFER, H. ; BOHN, A.: Software supported knowledge transfer for product development. In: *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED'11)* (2011)
- [KLP75] KUNG, H. T. ; LUCCIO, F. ; PREPARATA, F. P.: On finding the maxima of a set of vectors. In: *Journal of the ACM* 22 (1975), S. 469 – 476
- [Kof08] KOFOD, G.: The static actuation of dielectric elastomer actuators: how does pre - stretch improve actuation? In: *Journal of Physics D: Applied Physics* 41 (2008), Nr. 21, S. 1 – 11. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/41/21/215405>. – DOI 10.1088/0022 – 3727/41/21/215405
- [Kol98] KOLLER, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau*. 4. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 1998
- [KP06] KORVINK, J. G. ; PAUL, O.: *MEMS: a practical guide to design, analysis, and applications*. W. Andrew Pub., 2006

- [Kra00] KRAUSE, W.: *Gerätekonstruktion in Feinwerktechnik und Elektronik*. 10. Aufl. Hanser, 2000
- [Kur93] KURIBAYASHI, K.: Criteria for the evaluation of new actuators as energy converters. In: *Advanced Robotics* Vol. 7, No. 4, S. 289 - 307 (1993)
- [Lag08] LAGOUDAS, D. C.: *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer, 2008
- [LGE96a] LEGTENBERG, R. ; GROENEVELD, A. W. ; ELWENSPOEK, M.: Comb-drive actuators for large displacements. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 6 (1996), Nr. 3, S. 320 – 329
- [LGE96b] LEGTENBERG, R. ; GROENEVELD, A. W. ; ELWENSPOEK, M.: Comb-drive actuators for large displacements. In: *Institute of Physics Publishing - J. Micromech. Microeng.* (1996)
- [LGS97] LEGTENBERG, R. ; GILBERT, J. ; SENTURIA, S. D. ; ELWENSPOEK, M.: Electrostatic curved electrode actuators. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 6 (1997), Nr. 3, S. 257 – 265. <http://dx.doi.org/10.1109/84.623115>. – DOI 10.1109/84.623115
- [LK06] LI, M. H. ; KELLER, P.: Artificial muscles based on liquid crystal elastomers. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society* 364 (2006), S. 2763 – 2777. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2006.1853>. – DOI 10.1098/rsta.2006.1853
- [LKW07] LOCHMATTER, P. ; KOVACS, G. ; WISSLER, M.: Characterization of dielectric elastomer actuators based on a visco - hyperelastic film model. In: *Smart Materials and Structures* 16 (2007), Nr. 2, S. 477. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/16/2/028>. – DOI 10.1088/0964-1726/16/2/028
- [LLP92a] LEE, A. P. ; LJUNG, P. B. ; PISANO, A. P.: Polysilicon angular microvibromotors. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 1 (1992), Nr. 2, S. 70 – 76. <http://dx.doi.org/10.1109/84.157360>. – DOI 10.1109/84.157360

- [LLP92b] LEE, A. P. ; LJUNG, P. B. ; PISANO, A. P.: Polysilicon micro vibromotors. (1992), S. 177 – 182. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1992.187714>. – DOI 10.1109/MEMSYS.1992.187714
- [LMK97] LEE, A. P. ; MCCONAGHY, C. F. ; KRULEVITCH, P. A. ; CAMPBELL, E. W. ; SOMMAGREN, G. E. ; TREVINO, J. C.: *Electrostatic Comb Drive for Vertical Actuation*. 1997. – Preprint of a paper for „The International Society for Optical Engineers Micromachining and Microfabrication Conference“, Austin, Texas
- [LR97] LIANG, C. ; ROGERS, C. A.: Design of Shape Memory Alloy Actuators. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 8 (1997), Nr. 4, S. 303 – 313. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X9700800403>. – DOI 10.1177/1045389X9700800403
- [Lun88] LUNZE, K.: *Einführung in die Elektrotechnik*. 12., bearb. Aufl. Berlin : Verl. Technik, 1988
- [LX09] LI, Y. ; XU, L.: Out - plane dynamics analysis for the electromechanical integrated electrostatic harmonic motor. (2009), S. 4672 – 4676. <http://dx.doi.org/10.1109/ICMA.2009.5244775>. – DOI 10.1109/ICMA.2009.5244775
- [LYZ07] LIN, X. ; YUAN, Y. ; ZHANG, Q. ; Y.ZHANG: Selecting Stars: The k Most Representative Skyline Operator. (2007)
- [Mar04] MARTIN, R. M.: *Electronic structure: basic theory and practical methods*. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2004
- [MAT03] MITA, M. ; ARAI, M. ; TENSAKA, S. ; KOBAYASHI, D. ; FUJITA, H.: A micromachined impact microactuator driven by electrostatic force. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 12 (2003), Nr. 1, S. 37 – 41. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2002.802906>. – DOI 10.1109/JMEMS.2002.802906
- [Mav02] MAVROIDIS, C.: Development of Advanced Actuators Using Shape Memory Alloys and Electrorheological Fluids. In: *Research in Nondestructive Evaluation* 14 (2002), S. 1 – 32

- [Mes09] MESS, T.: *Entwicklung und Implementation einer unscharfen Auswahl von Direktantrieben*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, Diplomarbeit, 2009
- [MF05] MADDEN, J. D. ; FILIPOZZI, L.: Web - based actuator selection tool. In: *Proc. SPIE 5759* 9; DOI:10.1117/12.600728 (2005)
- [Mot05] MOTAMEDI, M.E.: *MOEMS: micro - opto - electro - mechanical systems*. SPIE Press, 2005
- [MS06] MORAN, M. J. ; SHAPIRO, H. N.: *Fundamentals of engineering thermodynamics*. Wiley, 2006
- [MVA04] MADDEN, J. D. W. ; VANDESTEEG, N. A. ; ANQUETIL, P. A. ; MADDEN, P. G. A. ; TAKSHI, A. ; PYTEL, R. Z. ; LAFONTAINE, S. R. ; WIERINGA, P. A. ; HUNTER, I. W.: Artificial Muscle Technology: Physical Principles and Naval Prospects. In: *Journal of Oceanic Engineering* 29, Nr. 3 (July 2004)
- [NB06] NIELSON, G. N. ; BARBASTATHIS, G.: Dynamic pull - in of parallel - plate and torsional electrostatic MEMS actuators. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 15 (2006), Nr. 4, S. 811 – 821. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.2006.879121>. – DOI 10.1109/JMEMS.2006.879121
- [NN97] NENE, S. A. ; NAYAR, S. K.: A Simple Algorithm for Nearest Neighbor Search in High Dimensions. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (1997)
- [OS95] OTERO, T. F. ; SANSIÑENA, J. M.: Artificial muscles based on conducting polymers. In: *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 38 (1995), Nr. 2, S. 411 – 414. [http://dx.doi.org/10.1016/0302-4598\(95\)01802-L](http://dx.doi.org/10.1016/0302-4598(95)01802-L). – DOI 10.1016/0302 – 4598(95)01802 – L
- [Pae06] PAETZOLD, K.: Ansätze für eine funktionale Repräsentation multidisziplinärer Produkte. In: *17. Symposium Design for X* (2006)
- [PBF07] PAHL, G. ; BEITZ, W. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K. H. ; HANSEN, F.: *Konstruktionslehre*. 7. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 2007

- [Phi00] PHILIPPOW, E.: *Grundlagen der Elektrotechnik*. 10., durchgeseh. und erg. Aufl. Berlin : Verl. Technik, 2000
- [Phy11a] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG.: *Piezo - Technik Tutorium*. Version: 2011. http://www.piezo.de/pdf/PI_Tutorium_Piezoaktuatoren_in_der_Nanopositionierung_c.pdf, Abruf: 08.04.2011
- [Phy11b] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG.: *Produktpräsentation*. Version: 2011. <http://www.physikinstrumente.de/de/produkte/primageS.php?sortnr=700800&picview=1#gallery>, Abruf: 27.03.2011
- [PKP02] PELRINE, R. ; KORNBLUH, R. ; PEI, Q. ; STANFORD, S. ; OH, S. ; ECKERLE, J.: Dielectric elastomer artificial muscle actuators: Toward biomimetic motion. In: *Proc. SPIE Smart Structures and Materials, Electroactive Polymer Actuators and Devices* 4695 (2002), S. 126 – 137
- [PL08] PONN, J. ; LINDEMANN, U.: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte*. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 2008
- [Ple09] PLENTZ, S.: *Skyline-Anfragen für die multidimensionale Suche in einer Aktordatenbank*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, Diplomarbeit, 2009
- [PPH05] PIYAWATTANAMETHA, W. ; PATTERSON, P. R. ; HAH, D. ; WU, H. Toshiyoshi M. C.: Surface - and bulk - micromachined two - dimensional scanner driven by angular vertical comb actuators. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 14 (2005), Nr. 6, S. 1329 – 1338
- [PR96] PALMER, S. B. ; ROGALSKI, M. S.: *Advanced university physics*. South Yarra, Victoria : Gordon & Breach, 1996
- [PRd91] PARATTE, L. ; RACINE, G. A. ; DE ROOIJ, N. F. ; BORNAND, F.: A rigid ring electrostatic harmonic wobble motor with axial field. (1991), S. 890 – 893. <http://dx.doi.org/10.1109/SENSOR.1991.149029>. – DOI 10.1109/SENSOR.1991.149029

- [Pre76] PRESCHER, E.: *Der Übergang von der Funktion zur Struktur technischer Gebilde bei Verwendung eines funktionsorientierten KonstruktionsunterlagenSpeichers*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, Diss., 1976
- [PS85] PREPARATA, F. P. ; SHAMOS, M. I.: *Computational geometry: an introduction*. Springer - Verlag, 1985
- [PTF03] PAPADIAS, D. ; TAO, Y. ; FU, G. ; SEEGER, B.: An Optimal and Progressive Algorithm for Skyline Queries. (2003), S. 467 – 478
- [PTF05] PAPADIAS, D. ; TAO, Y. ; FU, G. ; SEEGER, B.: Progressive Skyline Computation in Database Systems. In: *ACM Trans. Database Syst* 30 (2005), S. 41 – 85
- [PVT10] PLESSE, C. ; VIDAL, F. ; TEYSSIE, D. ; CHEVROT, C.: Conducting polymer artificial muscle fibres: toward an open air linear actuation. In: *Chem. Commun.* 46 (2010), S. 2910 – 2912. <http://dx.doi.org/10.1039/C001289K>. – DOI 10.1039/C001289K
- [Ram11] RAMAKRISHNAN, N.: *Focus on Low Cost Automation*. Version: Newsletter of Industrial Research & Consultancy Centre, Indian Institute of Technology Bombay, 2nd Edition, 2011. http://www.ircc.iitb.ac.in/~webadm/update/archives/sept_2002/focus-ramkri.html, Abruf: 23.03.2011
- [RB93] REINEMUTH, J. ; BIRKHOFER, H.: *Elektronische Katalogsysteme für Zulieferkomponenten*. VDI Verlag, Düsseldorf : VDI Berichte,Nr. 1098, 1993
- [RE95] ROOZENBURG, N. F. M. ; EEKELS, J.: *Product design: fundamentals and methods*. Wiley, 1995
- [Riz00] RIZZONI, G.: *Principles and applications of electrical engineering*. 3. ed. Boston [u. a.] : McGraw Hill, 2000
- [Rod84] RODENACKER, W. G.: *Methodisches Konstruieren*. 3. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 1984
- [Rot00] ROTH, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*. 3. Aufl. Berlin - Heidelberg : Springer - Verlag, 2000. – 2 Bände

- [RP10] REITMEIER, J ; PAETZOLD, K.: Property and behavior based product description - component for a holistic and sustainable development process. In: *Proceedings of the International Design Conference - DESIGN 2010* (17. bis 20. Mai 2010)
- [SAS99] SAIF, M. T. A. ; ALACA, B. E. ; SEHITOGLU, H.: Analytical modeling of electrostatic membrane actuator for micro pumps. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 8 (1999), Nr. 3, S. 335 – 345. <http://dx.doi.org/10.1109/84.788638>. – DOI 10.1109/84.788638
- [Sch82] SCHILLING, M.: *Konstruktionsprinzipien der Gerätetechnik*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, Diss., 1982. – Habilitationsschrift
- [Sch84] SCHUBERT, J.: *Physikalische Effekte: Anwendungen, Beschreibungen, Tabellen*. 2., überarb. Aufl. Weinheim : Physik - Verl., 1984
- [Sch93] *IEEE 11th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids*. Piscataway, NJ : Inst. of Electrical and Electronic Engineers, 1993 . – IEEE catalog number 93CH3204 - 5
- [SH97] SUZUMORI, K. ; HORI, K.: Micro electrostatic wobble motor with toothed electrodes, 1997 (IEEE 10th International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems), S. 227 – 232
- [SHO90] SAKATA, M. ; HATAZAWA, Y. ; OMODAKA, A. ; KUDOH, T. ; FUJITA, H.: An electrostatic top motor and its characteristics. 21 (1990), Nr. 1-3, S. 168 – 172. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247\(90\)85032-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247(90)85032-Y). – DOI 10.1016/0924-4247(90)85032-Y
- [SIL93] SMELA, E. ; INGANAS, O. ; LUNDSTROM, I.: Conducting polymers as artificial muscles: challenges and possibilities. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 3 (1993), Nr. 4, S. 203
- [SK06] STÖLTING, H. D. ; KALLENBACH, E.: *Handbuch elektrische Kleinantriebe*. Hanser, 2006. – siehe auch das englische Derivat: „Handbook of Fractional - Horsepower Drives“; ISBN: 3540731288, Spinger, 2008
- [SM88] STOJMENOVIC, I. ; MIYAKAWA, M.: An optimal parallel algorithm for solving the maximal elements problem in the plane. In: *Parallel*

- Computing* 7 (1988), Nr. 2, S. 249 – 251. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-8191\(88\)90042-7](http://dx.doi.org/10.1016/0167-8191(88)90042-7). – DOI 10.1016/0167-8191(88)90042-7
- [Sme03] SMELA, E.: Conjugated Polymer Actuators for Biomedical Applications. In: *Advanced Materials* 15 (2003), Nr. 6, S. 481 – 494. <http://dx.doi.org/10.1002/adma.200390113>. – DOI 10.1002/adma.200390113
- [Spe83] SPERLICH, H.: *Das Gestalten im Konstruktionsprozess*. Ilmenau, Technische Hochschule Ilmenau, Diss., 1983. – Habilitationsschrift
- [SS92] SATO, K. ; SHIKIDA, M.: Electrostatic film actuator with a large vertical displacement. (1992), S. 1 – 5. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1992.187681>. – DOI 10.1109/MEMSYS.1992.187681
- [SSR98a] SAMPER, V. D. ; SANGSTER, A. J. ; REUBEN, R. L. ; WALLRABE, U.: Multistator LIGA - fabricated electrostatic wobble motors with integrated synchronous control. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 7 (1998), Nr. 2, S. 214 – 223. <http://dx.doi.org/10.1109/84.679384>. – DOI 10.1109/84.679384
- [SSR98b] SAMPER, V.D. ; SANGSTER, A. J. ; REUBEN, R. L. ; WALLRABE, U.: Multistator LIGA - fabricated electrostatic wobble motors with integrated synchronous control. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 7 (1998), Nr. 2, S. 214 – 223. <http://dx.doi.org/10.1109/84.679384>. – DOI 10.1109/84.679384
- [SSW98] SAMPER, V. D. ; SANGSTER, A. J. ; WALLRABE, U. ; REUBEN, R. L. ; GRUND, J. K.: Advanced LIGA technology for the integration of an electrostatically controlled bearing in a wobble micromotor. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 7 (1998), Nr. 4, S. 423 – 427. <http://dx.doi.org/10.1109/84.735351>. – DOI 10.1109/84.735351
- [Suh01] SUH, N. P.: *Axiomatic Design*. Oxford University Press, 2001
- [TDS94] TIEN, N. C. ; DANEMAN, M. ; SOLGAARD, O. ; LAU, K.Y. ; MULLER, R. S.: Impact - actuated linear microvibromotor for micro - optical systems on silicon. (1994), S. 924 – 926. <http://dx.doi.org/10.1109/IEDM.1994.383262>. – DOI 10.1109/IEDM.1994.383262

- [TG87] TRIMMER, W. S. N. ; GABRIEL, K. J.: Design considerations for a practical electrostatic micro-motor. In: *Sensors and Actuators* 11 (1987), Nr. 2, S. 189 – 206. [http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874\(87\)80016-1](http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874(87)80016-1). – DOI 10.1016/0250-6874(87)80016-1
- [Tip00] TIPLER, P. A.: *Physik*. 3., korrigierter Nachdr. der 1. Aufl. 1994. Heidelberg [u. a.] : Spektrum Akad. Verl., 2000 (Spektrum Lehrbuch)
- [TJ89a] TRIMMER, W. ; JEBENS, R.: Actuators for micro robots. 3 (1989), S. 1547 – 1552. <http://dx.doi.org/10.1109/ROBOT.1989.100198>. – DOI 10.1109/ROBOT.1989.100198
- [TJ89b] TRIMMER, W. ; JEBENS, R.: Harmonic electrostatic motors. In: *Sensors and Actuators* 20 (1989), Nr. 1 - 2, S. 17 – 24. [http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874\(89\)87097-0](http://dx.doi.org/10.1016/0250-6874(89)87097-0). – DOI 10.1016/0250-6874(89)87097-0
- [TJ89c] TRIMMER, W. ; JEBENS, R.: An operational harmonic electrostatic motor. (1989), S. 13 – 16. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1989.77952>. – DOI 10.1109/MEMSYS.1989.77952
- [TLH92] TANG, W. C. ; LIM, M. G. ; HOWE, R. T.: Electrostatic Comb Drive Levitation And Control Method. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 1 (1992), Nr. 4, S. 170 – 178. <http://dx.doi.org/10.1109/JMEMS.1992.752508>. – DOI 10.1109/JMEMS.1992.752508
- [TNJ90] TANG, W. C. ; NGUYEN, T. C. H. ; JUDY, M. W. ; HOWE, R. T.: Electrostatic - comb drive of lateral polysilicon resonators. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 21 (1990), Nr. 1 - 3, S. 328 – 331. [http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247\(90\)85065-C](http://dx.doi.org/10.1016/0924-4247(90)85065-C). – DOI 10.1016/0924-4247(90)85065-C
- [TO00] THIELICKE, E. ; OBERMEIER, E.: Microactuators and their technologies. In: *Mechatronics* 10 (2000), S. 431 – 455
- [TO03] THIELICKE, E. ; OBERMEIER, E.: 1 (2003), 899 – 902 S. <http://dx.doi.org/10.1109/SENSOR.2003.1215620>. – DOI 10.1109/SENSOR.2003.1215620

- [TSJ02] TELLINEN, J. ; SUORSA, I. ; JÄÄSKELÄINEN, A. ; AALTIO, I. ; ULLAKKO, K.: Basic Properties of magnetic shape memory actuators. In: *Proceedings of the ACTUATOR 2002* (2002)
- [TWS98] TAS, N. ; WISSINK, J. ; SANDER, L. ; LAMMERINK, T. ; ELWENSPOEK, M.: Modeling, design and testing of the electrostatic shuffle motor. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 70 (1998), Nr. 1 - 2, S. 171 – 178. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247\(98\)00129-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00129-0). – DOI 10.1016/S0924 – 4247(98)00129 – 0
- [Uch97] UCHINO, Kenji: New applications of photostrictive ferroics. In: *Materials Research Innovations* 1 (1997)
- [UII96] ULLAKKO, K.: Magnetically controlled shape memory alloys: A new class of actuator materials. In: *Journal of Materials Engineering and Performance* 5 (1996), S. 405 – 409. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02649344>. – DOI 10.1007/BF02649344
- [Uni11] UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA - DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING: Version: 2011. <http://www.actuatorweb.org/index.php?page=main>, Abruf: 10.03.2011
- [VDD98] VAN DE STRAETE, H. J. ; DEGEZELLE, P. ; DE SCHUTTER, J. ; BELMANS, R.: Servo Motor Selection Criterion for Mechatronic Applications. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* Vol. 3, No. 1, 1998, S. 43 - 50 (1998). – Teil von Hesselbach, J.; S. 143 - 160
- [VDI 2206] Norm VDI 2206 (2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme / Design Methodology for Mechatronic Systems*. – VDI, Düsseldorf
- [VDI 2221] Norm VDI 2221 (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. – VDI, Düsseldorf
- [VDI 2222] Norm VDI 2222 (1982). *Erstellung und Anwendung von Konstruktionskatalogen*. – VDI, Düsseldorf
- [VK10] VERDIAN-KONSORTIUM: Abschlussbericht zum VERDIAN Projekt / Abschlussbericht der TU Ilmenau. Version: 2010.

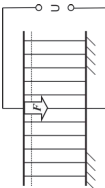
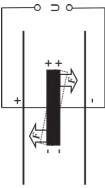
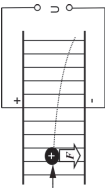
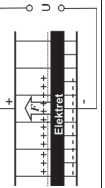
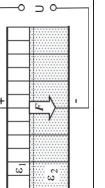
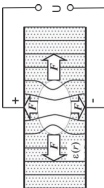
- <http://dx.doi.org/http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/633975176.pdf>. 2010. – Forschungsbericht
- [vMR97] VON ARDENNE, M. ; MUSIOL, G. ; REBALL, S.: *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*. 2., Aufl. Thun [u. a.] : Deutsch - Verlag, 1997
- [Wan10] WANKE, S.: *Neue Konzepte zur Verwaltung und Bereitstellung von Lösungen im Produktentwicklungsprozess - CPM/PDD - Lösungsmuster als Grundlage eines verhaltensbeschreibenden Lösungskataloges*. Saarbrücken, Universität des Saarlandes, Diss., 2010. – Dissertation
- [Web05a] WEBER, Chr.: CPM/PDD - An Extended Theoretical Approach to Modeling Products and Product Development Processes. In: *Proceedings of the 2nd German - Israeli Symposium on Advances in Methods and Systems for Development of Products and Processes, TU Berlin / Fraunhofer - Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK)* p. 159 - 179. Fraunhofer - IRB - Verlag, Stuttgart 2005 (07. - 08.07.2005)
- [Web05b] WEBER, Chr.: Simulationsmodelle für Maschinenelemente als Komponenten mechatronischer Systeme. In: *Proceedings 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (2005)*
- [Web07] WEBER, Chr.: Looking at „DfX“ and „Product Maturity“ from the Perspective of a New Approach to Modelling Product an Product Development Processes. In: *Proceedings of the 17th CIRP Design Conference (2007)*
- [Wen05] WENTWORTH, S. M.: *Fundamentals of electromagnetics with engineering applications*. Hoboken, NJ : John Wiley, 2005
- [Wäl11] WÄLDELE, M.: *Erarbeitung einer Theorie der Eigenschaften technischer Produkte*. Darmstadt, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2011. – Zum Zeitpunkt der Einreichung dieser Arbeit noch im Druck. Die Arbeit wurde dem Autor durch Prof. Dr.-Ing. Chr. Weber zugänglich gemacht.
- [WS89] WUNSCH, G. ; SCHULZ, H. G.: *Elektromagnetische Felder*. 1. Aufl. Berlin : Verl. Technik, 1989

- [WW00] WEBER, Chr. ; WERNER, H.: Klassifizierung von CAX - Werkzeugen für die Produktentwicklung auf Basis eines neuartigen Produkt - und Prozessmodells. In: *11. Symposium „Design for X“*. Schnaitach (2000)
- [WW01] WEBER, Chr. ; WERNER, H.: Schlussfolgerungen für „Design for X“ (DFX) aus der Perspektive eines neuen Ansatzes zur Modellierung von Produkten und Produktentwicklungsprozessen. In: *12. Symposium „Design for X“*. Neukirchen (11. und 12. Oktober 2001)
- [YHP01] YEH, R. ; HOLLAR, S. ; PISTER, K. S: J.: Single mask, large force, and large displacement electrostatic linear inchworm motors. (2001), S. 260 – 264. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.2001.906528>. – DOI 10.1109/MEMSYS.2001.906528
- [YKM93] YAMAGUCHI, M. ; KAWAMURA, S. ; MINAMI, K. ; ESASHI, M.: Distributed electrostatic micro actuator. (1993), S. 18 – 23. <http://dx.doi.org/10.1109/MEMSYS.1993.296944>. – DOI 10.1109/MEMSYS.1993.296944
- [YYS03] Y.YUSUF ; Y.ONO ; SUMISAKI, Y. ; KAI, S.: Swelling behaviour of liquid crystal elastomers in low molecular weight liquid crystals. In: *Proc. Rims Symp. on Mathematical Aspects of Complex Fluids III* (2003), S. 1 – 10
- [ZAF02] ZUPAN, M. ; ASHBY, M. F. ; FLECK, N. A.: Actuator Classification and Selection - - The Development of a Database. In: *Advanced Engineering Materials* 4 (2002), Nr. 12, S. 933 – 939
- [ZCM01] ZENG, S. ; CHEN, C. H. ; MIKKELSEN, J. C. ; SANTIAGO, J. G.: Fabrication and characterization of electroosmotic micropumps. In: *Sensors and Actuators B: Chemical* 79 (2001), Nr. 2 - 3, S. 107 – 114. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00855-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00855-3). – DOI 10.1016/S0925 – 4005(01)00855 – 3
- [ZJZ04] ZHANG, T. ; JIANG, C. ; ZHANG, H. ; XU, H.: Giant magnetostrictive actuators for vibration control. In: *Institute of Physics Publishing - - Smart Materials and Structures* (2004)

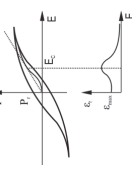
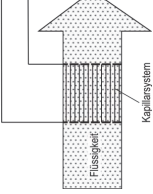
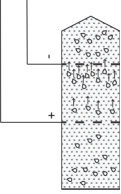
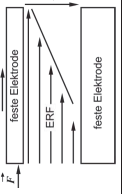
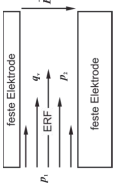
- [ZRN05] ZHAO, X. ; REDDY, C. K. ; NAYFEH, A. H.: Nonlinear Dynamics of an Electrically Driven Impact Microactuator. In: *Nonlinear Dynamics* (2005), S. 227 – 239. <http://dx.doi.org/10.1007/s11071-005-6467-8>. – DOI 10.1007/s11071 – 005 – 6467 – 8
- [ZVE12] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: *Fachverband Elektrische Antriebe - Lieferantenverzeichnis Kleinmotoren*. Version: 2012. http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Automation_Antriebe/lieferantenverzeichnis/kleinmortoren.pdf, Abruf: 07.03.2012

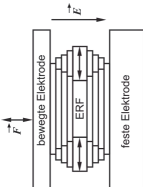
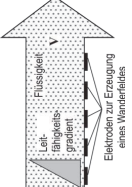
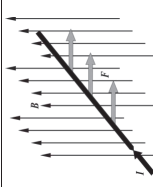
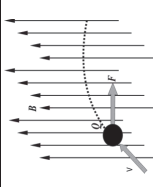
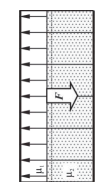
Anhang A – Effekteliste

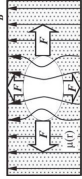
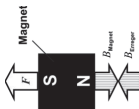
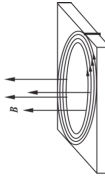
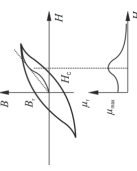
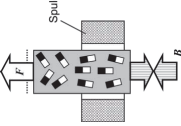
Diese ist eine ergänzte und erweiterte Fassung einer interne Übersicht der TU ILMENAU. Die Autoren dieser, nur auf Papier vorliegenden, Übersicht sind nicht bekannt (vermutlich von A. ALBRECHT und O. BIRLI im Rahmen des BMFT-Projektes „Untersuchungen zum Entwurf von Mikrosystemen“ (1992-1994) erstellt aber nicht veröffentlicht); die Übersicht selbst scheint Grundlage für [KAT92] gewesen zu sein.

Feldenergieform	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
dielektrisch	Kraftwirkung auf leitende Oberflächen (Elektronen)	Kondensatoreffekt	$F = F(U, x, \epsilon)$ Bei konstanter Spannung: $F(x) = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC(x, \epsilon)}{dx}$	Spannung U , Permittivität ϵ , Verschiebung x		[Ph00], S.181; [Lun88], S.186
dielektrisch	Kraftwirkung auf Ladungen nichtleitender Oberflächen (Induktionsprinzip)	Coulombsches Gesetz der Elektrostatik, dielektrische Induktion	$F = \int_O EdQ \text{ mit } Q = Q(t)$ Für ein induziertes Erregfeld $E_{(t)}$ gilt: $F = F(t)$	Ladung: $Q = Q(t)$ Flächenladungsdichte $\sigma = \sigma(t)$, spezifischer Widerstand der Oberfläche ρ_s , Permittivität ϵ		[Ph00], S.41, u.a.
dielektrisch	Kraftwirkung auf freie Ladungen	Coulombsches Gesetz der Elektrostatik	$F = FQ$ Für zwei Punktladungen gilt $F = \frac{1}{4\pi\epsilon^2} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$	Permittivität des umgebenden Mediums ϵ , Dielektrische Feldstärke E , Ladungen Q_1 und Q_2 .		[Lun88], S.184; [Ph00], S.27; [Wen05], S.18; [PR96], S.163
dielektrisch	Kraftwirkung auf Elektret	Coulombsches Gesetz der Elektrostatik, Elektrizität	$F = \int_A \sigma EdA$	wirksame Oberflächendichtedichte σ , dielektrische Erregungsfeldstärke E .		[WIR97], S.28-4; [Wen05], S.76
dielektrisch	Kraftwirkung auf Grenzflächen zw. Materialien unterschiedlicher Permittivität	dielektrische Polarisation, Permittivität	$dF = \int \frac{D_n^2}{2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - \frac{1}{\epsilon_1} \right) - E_n^2 (\epsilon_2 - \epsilon_1) dA$ D _n - Normalkomponente des Verschiebungsfusses E _n - Tangentialkomponente der dielektrischen Feldstärke	Dielektrische Feldstärke E , Permittivität der anisotropen Grenzflächen Dielektrika ϵ_1 und ϵ_2		[Mar04]; [MS89], S.220; [Ph00], S.183; [Wen05], S.77
dielektrisch	Kraftwirkung auf Dielektrika in homogener Permittivität	dielektrische Polarisation, Permittivität	$dF = -\frac{1}{2} E^2 \cdot \nabla dV$	ortsabhängige Permittivität $\epsilon(r)$, Dielektrische Feldstärke E		[Mar04]; [MS89], S.220; [Lun88], S.189

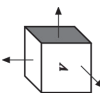
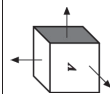
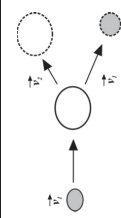
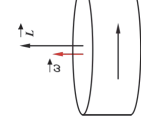
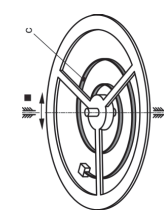
Feldengform	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
dielektrisch	Kraftwirkung in piezoelektrischen Materialien	reziproker piezoelektrischer Effizient	$S = s^E T + d_j \cdot E$ $D = d \cdot T + \epsilon_T \cdot E$ <p>T - mechanische Spannung D - dielektrische Verschiebungsdichte S - mechanische Dehnung E - Feldstärke</p>	piezoelektrisches Ladungsmodul d_j , Permittivitätszahl ϵ_T bei $T = \text{konst.}$, Elektrizitätskonstante ϵ^E bei $E = \text{konst.}$ (Größen sind Tensoren)		[WBR37], S. 477; [Jan92] [Sch84], S. 64
dielektrisch	Kraftwirkung in piezoelektrischen Materialien	Längseffekt	$F = T_x A = b \frac{h}{l} c_{11} d_{31} U$	Spannung U Elastizitätsmodul C_{ij} Ladungsmodul d_{ij}		[Ju95], S. 156; [Phys11b]
dielektrisch	Kraftwirkung in piezoelektrischen Materialien	Quereffekt	$F = T_x A = b \frac{h}{l} c_{11} d_{31} U$	Spannung U Elastizitätsmodul C_{ij} Ladungsmodul d_{ij}		[Ju95], S. 156; [Phys11b]
dielektrisch	Kraftwirkung in piezoelektrischen Materialien	Schereffekt	$F = T_x A = b \frac{h}{l} c_{11} d_{15} U$	Spannung U Elastizitätsmodul C_{ij} Ladungsmodul d_{ij}		[Ju95], S. 156; [Phys11b]

Feldengröße	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
dielektrisch	Kraftwirkung durch gedehnte Teilchen in Flüssigkeiten	Hysterese, Coulombsches Gesetz der Elektrostatik	$P = P(E)$ und $e = e(E)$ siehe Skizze $V'_{E,0} = \frac{Dn_{E,0}}{dt} = \xi \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\pi l} = \xi \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\pi k} i$	Sättigungsdensitation P_s Remanenzpolarisation P_r dielektrische Koerzitivfeldstärke E_C		[WMR97], S. 305; [Mandj], [Lundb], S.186
dielektrisch	Kraftwirkung auf Flüssigkeiten in Kapillaren	Elektrosmose, elektrokinesischer Effekt, elektrische Doppelschicht	$V_{E,0} = \xi \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\pi l} = \xi \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\pi k} i$	elektrosmotische Flüssigkeitsleitfähigkeit $\nu_{0,0}$, Zeta-Potential ζ Kapillarschnitt A Kapillarlänge l dielektrische Feldstärke E dynamische Zähigkeit η		[WMR97], S. 287; [Sch84], S. 21
dielektrisch	Kraftwirkung auf geadene Teilchen in Flüssigkeiten	Elektrophorese, elektrokinesischer Effekt, Doppelschicht	$V_{E,p} = \xi \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\pi} \frac{E}{r}$	elektrophoretische Wanderungsgeschwindigkeit $\nu_{0,p}$, Zeta-Potential ζ dynamische Viskosität η dielektrische Erregungsfeldstärke E		[WMR97], S. 287; [Sch84], S. 22
dielektrisch	Steuerung des übertragbaren Moments zwischen relativ zueinander bewegten und entgegengesetzt gepolten Elektroden durch elektrisches Feld	Elektromechanischer Effekt Scherungsprinzip	$\tau(E, D) = \tau_{,1}(E) + \eta D$ $V_{0,1} = \frac{\eta}{\epsilon_r} \sqrt{\frac{F_x}{F_y}} \frac{F_x}{\theta}$	Minimale Fluidvolumen $V_{0,1}$ Viskosität η Grenzschernspannung $\tau_{,1}$ Schubkraft F_x Viskositätskraft F_y		[Jue5], S.54; [Mei02]; [Bar04]
dielektrisch	Steuerung des Fließwiderstandes zwischen zueinander stehenden Elektroden durch elektrisches Feld	Elektromechanischer Effekt Strömungsprinzip	$\tau(E, D) = \tau_{,1}(E) + \eta D$ $V_{0,1} = \frac{12}{k} \frac{\eta}{\epsilon_r} \sqrt{\frac{\Delta p_x}{\Delta p_y}} \frac{p_x \Delta p_x}{\Delta p_y}$ $k = k_f \frac{\Delta p_x}{\Delta p_y}$	Minimale Flüssigkeitsvolumen $V_{0,1}$ Viskosität η Grenzschernspannung $\tau_{,1}$ Schubdruck Δp_x Viskositätsdruck Δp_y		[Jue5], S.54; [Bar04]

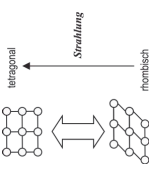
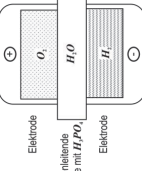
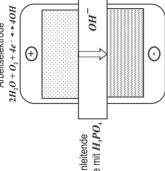
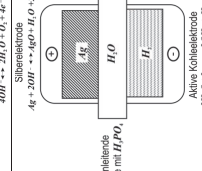
Feldenergieform	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
dielektrisch	Steuerung des Abstandes zwischen Elektroden durch Ausbau eines Druckpolsters	Elektromechanischer Quetschprinzip	$\tau(E, D) = \tau_e(E) + \eta D$	Fließgrenze τ Scherarbeit D		[Jü65], S.54; [Bis04]
dielektrisch (thermisch)		elektro-hydro-dynamischer Effekt	$V = V(k, \eta, \epsilon, \text{overst. } L, \text{ Geometrie})$ $k = k(T)$ v - Strömungsgeschwindigkeit	Leitfähigkeit k dynamische Viskosität η Permittivität ϵ Spannung U		[Sch88], S.51
magnetisch	Kraftwirkung auf freistromdurchflossene Leiter	Lorentzkräfte, elektrodynamischer Effekt	$dF = (dl \times B)$	magnetische Flussdichte B Strom I Strompfad l		[Lun88], S.299; [Ph00], S.268 [Wen05], S.127; [Rz00], S.609; [PR96], S.207
magnetisch	Kraftwirkung auf frei bewegliche Ladungen	Lorentzkraft, elektrodynamischer Effekt	$F = Q(v \times B)$	Ladung Q Geschwindigkeit v Magnetische Flussdichte B		[Lun88], S.294; [Ph00], S.261; [Wen05], S.126; [Rz00], S.169; [PR96], S.207
magnetisch	Kraftwirkung auf Grenzflächen zw. Medien mit unterschiedlicher Permeabilität	Reizkranzeffekt, Permeabilität, Dipol-Para- und Ferromagnetismus	$dF = \frac{1}{2} \left[B_1^2 \left(\frac{1}{\mu_2} - \frac{1}{\mu_1} \right) - H^2 (\mu_2 - \mu_1) \right] dA$	Permeabilität der aneinander-grenzenden Materialien μ_1 und μ_2 H - magnetische Feldstärke		[W599], S.279; [Lun03], S.230 [Wen05], S.142

Feldgröße/-form	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
magnetisch	Krafthwirkung auf Materialien in homogener Permeabilität	magnetische Polarisation, Permeabilität	$dF = -\frac{1}{2} H^2 \nabla(\mu dV)$	ortsabhängige Permeabilität $\mu(r)$ magnetische Feldstärke H		[PH00], S.270; [Lun88], S.290
magnetisch	Krafthwirkung auf Permanentmagnete	permanente Magnetisierung, Coulombsches Gesetz der Magnetoostatik	$F = \frac{I}{4\pi r^2} \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2$	Permeabilität μ Abstand r Magnetfluss der Pole Φ_1 und Φ_2		[WIR97]; [PH00]; [Raz00], S.802
magnetisch	Krafthwirkung auf induzierte Wirbelströme	elektromagnetische Induktion, Wiederaufstrom (Strome), Lorentzkraft	$rot E_{ind} = -\frac{\partial B}{\partial t} + rot(\gamma \times B)$ $U_{ind} = \oint \Phi E_{ind} ds$ $dF = I(dl \times B)$	Magnetische Flussdichte $B = B(r)$ Elektrische Leitfähigkeit des Materials $\kappa = \kappa(T)$		[WIR97], S.326; [PH00], S.270
magnetisch	Krafthwirkung durch magnetische Hysterese	Magnetische Hysterese, Coulombsches Gesetz der Magnetoostatik	$B = B(H) \text{ und } \mu = \mu(H)$ $F = \frac{1}{4\pi \mu r^2} \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2$	Remanenzflussdichte B_r Koerzitivfeldstärke H_c wirksame magnetische Flüsse Φ_1, Φ_2		[WIR97], S.313; [PH00], S.266; [Wer05], S.140; [Raz00], S.793
magnetisch	Krafthwirkung in magnetostriktiven Materialien	Magnetostriktion, Joule-Effekt	$S = s^H \cdot T + d \cdot H$ $B = d \cdot T + \mu^T H$ <p>T - mechanische Spannung B - magnetische Flussdichte S - mechanische Dehnung H - magnetische Feldstärke</p>	magnetostriktive Konstante d absolute Permeabilität μ^T bei $T = konst.$ Elastizitätskonstante s^H bei $H = konst.$ (Gößen sind Tensoren)		[Jan04]; [Sch84], S.53

Feldangabeform	Bezeichnung	Effekt	Funktionale Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
magnetisch	Änderung der geometrischen Abmessung eines Körpers unter dem Einfluss eines Magnetfeldes	magnetoaktiver Effekt (Joule-Effekt)	$S = \frac{\Delta l}{l} = d \cdot H + s \cdot H^2 \cdot T$	Dehnung S Magnetostriktive Modul d Magnetische Feldstärke H Mechanische Spannung T Mechanische Nachgiebigkeit s, H'		[Jue9], S.286
magnetisch	Kerfaltung durch Vertiefen des Magnetfeldes auf supraleitenden Materialien	Messener-Effekt	$F = F(H, T)$	Temperatur T Magnetische Flussdichte B		[WRS97], S. 738; [Sch84], S.55 [Tep00], S. 1367; [PK96], S. 5192
mechanisch	Kraftwirkung eines Memorymetalls auf Temperaturänderung	Formgedächtniseffekt (Einweg-Effekt)	Zugkraft: $F_Z = A \cdot \sigma(N)$ Weg: $S = L \cdot \epsilon_{el}$ Torsionsdraht: Moment: $M_T = \pi \cdot d^3 \cdot \tau / 16$ Drehwinkel: $\varphi = 2L \cdot \tau / d$ Schraubfeder: Federkraft: $F_S = \pi \cdot d^3 \cdot \tau / 8 D_m$ Federweg: $f = \frac{d F_S r_m^2 \cdot i \cdot 3,14}{d}$	Maximale zulässige Zugspannung σ Länge des Drahtes L Größe des Memory Effekts Zugbeanspruchung 3,5% ϵ_{el} Durchmesser des Drahtes d Maximal zulässige Torsionsspannung τ Größe des Memory Effekts Torsionsbeanspruchung (1,2-3,5%) γ_m mittlere Windungsdurchmesser D_m Mittlere Windungsradius r_m Anzahl der Windungen i		[Jue9], S. 110; [Lag08]; [Gom04]
mechanisch	Kraftwirkung eines Memorymetalls auf Temperaturänderung	Formgedächtniseffekt (Zweweg-Effekt)	$\sqrt{\frac{L \cdot F_{max}}{11 \cdot \epsilon_{el}^2}} = d_{min} < d < d_{max} = \sqrt{\frac{L \cdot F_{max}}{11 \cdot \epsilon_{el}^2}}$ $l_{min} = \frac{s_{max}}{\epsilon_{rel}}$ $l_{max} = \frac{s_{min}}{\epsilon_{rel}}$	d s_{max} ϵ_{rel} l_{min}		[WRS97], S. 461; [VD099]; [Lag08]; [Gom04]
mechanisch	Kerfaltung von Verbundwerkstoffen auf Temperaturänderung	Bimetalleffekt	$s = 3 \cdot E \cdot f^3$	Kraft senkrecht zur Angriffsstelle F Länge des Bimetalls L Elastizitätsmodul E aquatoriales Flächenträgheitsmoment I		[WRS97], S. 715; [Tep00], S.514

Feldenergieform	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
mechanisch	Kraftwirkung durch Volumenausdehnung des Arbeitsmediums auf Arbeitsfläche	Volumenänderungseffekt	$n \cdot R \cdot T = p \cdot V$ $E = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$	molare Masse n universelle Gaskonstante R Temperatur T Druck p Volumen V		[IMR97], S. 755; [TP00], S. 438; [PR96], S. 101; [Beh11]
	Kraftwirkung durch Phasenänderung und dem folgend Volumenänderung des Arbeitsmediums auf Arbeitsfläche	Phasenänderungseffekt (Dehnstoffeffekt)	$\Delta h = h_g - h_f \quad h = u + pv$	stoffspezifisch spezifische innere Enthalpie h spezifische innere Energie u Druck p spezifisches Volumen v		[MS06]; [Beh11]
mechanisch	Kraftwirkung durch Übertragung von kinetischer Energie auf einen anderen Körper	Impulsehaltung	$E = \frac{1}{2} \cdot p \cdot v = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ $F = \frac{dI_p}{dt} = m \cdot a$	Impuls p Masse m Beschleunigung a		[TP00], S. 166; [PR96], S. 26
mechanisch	Kraftwirkung durch Übertragung von Rotationsenergie auf einen anderen Körper	Drehimpulserhaltungssatz	$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \omega = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$ $\dot{M} = \frac{dL}{dt} = J \cdot \dot{\alpha} = \dot{F} \times r$	Drehimpuls L Trägheitsmoment J Winkelbeschleunigung α		[TP00], S. 242; [PR96], S. 30
mechanisch	Kraftübertragung von einem Feder auf einen anderen Körper	Federenergie	$E = \int c \cdot s \cdot ds$ $c = \frac{F}{s}$	Federkonstante c Federweg s		[IMR97], S. 49; [TP00], S. 134

Feldangeform	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
mechanisch		hydrodynamische Palaudon	$P_0 + \frac{\delta \cdot v^2}{2} + \delta \cdot g \cdot h = \text{const}$ $P_0 + P_a + p = \text{const}$	statischer Druck P_0 Staudruck P_a Schweredruck p		[MIR97], S. 463
mechanisch		Auftrieb	$F_A = \delta \cdot V \cdot g$	Dichte δ Volumen der verdrängten Flüssigkeit V Fallbeschleunigung g		[MIR97], S. 483; [PR96], S. 283
Strahlung	Kerfwekung durch Übertragung kinetischer thermischer Mole- kularebewegung an einen Körper	Radometereffekt Druck	$U = N \cdot E_A$ $E_A = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$ $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$ $p = \frac{F}{A}$	Innere Energie U Anzahl der Gasleichen N mittlere kinetische Energie eines Teilchens E_A		[Tid00], S. 1204; [PR96], S. 94
Strahlung	Übertragung kineti- scher Energie der Photonen auf Körper	Strahlungsdruck	$\frac{dp}{dt} = \frac{v \cdot h \cdot dN}{c \cdot dt}$	Geschwindigkeit v Planckmann Konstante h Lichtgeschwindigkeit c		[Tid00], S. 1102

Feldangabeform	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
Strahlung	Reaktion der Atomstruktur eines Mediums auf Anlegen mit Strahlung	Photoelektrischer Effekt Photoemissiver Effekt	$h\nu = E_{\text{ion}} + H_e$	Boltzmann Konstante k Frequenz f Kinetische Energie des Elektrons E_{kin} Ausfrittsarbeit W_0		[Loh97]
elektrochemisch	Gasentwicklung durch das Anlegen einer Gleichspannung	Brennstoffzellenreaktion Faradaysches Gesetz	$n(H_2) = \frac{I \cdot \Delta t}{z \cdot F}$ $2H_2O \leftrightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ $4H^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2$	Stoffmenge Wasserstoff $n(H_2)$ Strom I Zeitdifferenz Δt Anzahl der Elektronenübergänge z Faraday-Konstante F		[Jue9], S.369
elektrochemisch	Druckaufbau auf Grund des Transports der Hydroxidions durch Membran	Gaspumpenreaktion Faradaysches Gesetz	$n(O_2) = \frac{I \cdot \Delta t}{z \cdot F}$ $2H_2O + O_2 + 4e^- \leftrightarrow 4OH^-$ $4OH^- \leftrightarrow 2H_2O + O_2 + 4e^-$	Stoffmenge Sauerstoff $n(O_2)$ Strom I Zeitdifferenz Δt Anzahl der Elektronenübergänge z Faraday-Konstante F		[Jue9], S.371
elektrochemisch	Druckaufbau durch Oxidation einer Metallelektrode	Festkörper- / Gasreaktion Faradaysches Gesetz	$n(H_2) = \frac{I \cdot \Delta t}{z \cdot F}$ $Ag + 2OH^- \leftrightarrow Ag_2O + H_2O + 2e^-$ $2H_2O + 2e^- \leftrightarrow 2OH^- + H_2$	Stoffmenge Wasserstoff $n(H_2)$ Strom I Zeitdifferenz Δt Anzahl der Elektronenübergänge z Faraday-Konstante F		[Jue9], S.372

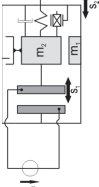
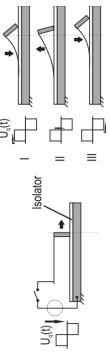
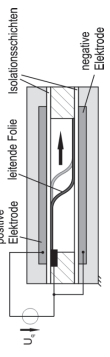
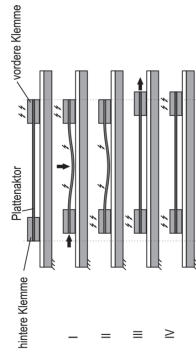
Feldangeform	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
chemo-mechanisch	Anziehungskraft zwischen Polymeren führt zur Kontraktion oder Expansion der Polymerkette	Expansion vernetzter Polymere in Lösungsmitteln	$W = W_{mix} + W_e$ $W_{mix} = RT(n_1 \ln(v_1) + n_2 \ln(v_2) + \chi v_1 v_2)$ $W_e = C_1(\lambda^2 - 1 + \lambda^{-2} + \lambda^2 - 3)$ $+ C_2[(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^{\alpha} (\lambda^{-2} + \lambda^{-2} + \lambda^{-2} - 3)]$ $- \left(\frac{C_2}{2}\right) \ln(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)$	Ausdehnungszahlen λ_i Anzahl Lösungsmittel- und Polymermoleküle n_i Volumenanteil der Komponenten v_i Wechselsparparameter χ Elastizitätsparameter C_1, C_2, α		[Jue9], S.382
chemo-mechanisch	Kontraktion und Elongation auf Grund der Reaktion in Formalddehyd-Lösung vernetzten Collagene mit Salzlösung	Kontraktion und Elongation von Collagenfasern	$\sigma = \frac{NkT}{3\beta} \left[\lambda^{-1} (\alpha \beta) - \alpha^{-2} \lambda^{-1} (\alpha^{-1} \beta) \right]$	Spannung σ Anzahl der Kettenmoleküle pro Volumenelement N Beschreibung der Ausdehnung der Faser α Verhältnis zwischen maximaler Kontraktion und maximaler Elongation β Langevin-Funktion Λ		[Jue9], S.383
elektro-chemo-mechanisch	Kontraktion und Expansion leitfähiger Polymere durch Wechselwirkung mit Lösungsmittel und Anlegen eines elektrischen Feldes	Konstitutive Gleichung	$\sigma_j^e = K_{(j)} dv_j(t) \delta_j^e$ $+ 2A_{(j)} (n_j - \frac{1}{3} dv_j(t) \delta_j^e)$ $- (\beta_{(j)} + P) \delta_j^e$	Mechanische Spannung σ_j^e Volumenelastizitätsmodul des vernetzten Polymeren $K_{(j)}$ Schubelastizitätsmodul $A_{(j)}$ Chemische Spannung $\beta_{(j)}$ Verschiebungsvektor des Polymeren u Kontraktionsindex δ_j^e relativer hydrostatischer Druck P		[Jue9], S.384
elektro-chemo-mechanisch	Kontraktion und Expansion leitfähiger Polymere durch Wechselwirkung mit Lösungsmittel und Anlegen eines elektrischen Feldes	Konstitutive Gleichung	$\sigma = E\epsilon + \sigma_e$ $\sigma_e^j = (2m_j v_j^e + 2c_j \delta_j^e + Q_j^e \delta_j^e) - \beta_j \delta_j^e$ $i, j = 1, 2, 3$ $s = (Q_e^s + R_e^s)$	Tensor der Deformation (Fluid) e_e Tensor der Deformation (Polymer) e_s Elastizitätsmodell E Poroselastische Koeffizienten QR Tensor des hydro. Druckes s Chemische Spannung β_e, β_s Kontraktionsindex δ_e, δ_s		[Jue9], S.388

Feldengröße	Bezeichnung	Effekt	Funktionelle Abhängigkeiten	Kenngrößen für den Entwurf	Prinzipskizze	Quellen
magnetisch	Steuerung des überlagerten Magnetfeldes durch relative Bewegung und entgegengesetzt magnetischen Polen durch ein magnetisches Feld	Magnetotheologischer Effekt Scherungsprinzip	$\tau(B, D) = \tau_y(B) + \eta D$ $V_{rel} = \left(\frac{D}{2}\right) \left(\frac{F_y}{F_x}\right) V_r$ $\tau_y = \tau_y(V_r, d, \vec{B}, T)$	Überlagbare Schutzspannung F_p Volumenanteil der Teilchen V_r Teilchendurchmesser d Verlauf und Orientierung des Magnetfeldes \vec{B} Temperatur T Fließeigenschaft τ Scherrate D		[Jue9], S.110
magnetisch	Steuerung des Fließwiderstandes zwischen zueinander stehenden magnetischen Polen durch ein magnetisches Feld	Magnetotheologischer Effekt Strömungsprinzip	$\tau(B, D) = \tau_y(B) + \eta D$ $V_{rel} = \frac{12}{K} \left(\frac{\Delta p}{\tau_y}\right) P \Delta p_y$ $k = k_0 \left(\frac{\Delta p_y}{\Delta p}\right)$ $\Delta p = \Delta p(V_r, d, \vec{B}, T)$	Erreichbare Druckdifferenz Δp Volumenanteil der Teilchen V_r Teilchendurchmesser d Verlauf und Orientierung des Magnetfeldes \vec{B} Temperatur T Fließeigenschaft τ Scherrate D		[Jue9], S.110
magnetisch	Steuerung des Abstands zwischen zwei parallelen magnetischen Polen durch den Aufbau eines Druckkopfers	Magnetotheologischer Effekt Quetschprinzip	$\tau(B, D) = \tau_y(B) + \eta D$ $\sigma_y = \sigma_y(V_r, d, \vec{B}, T)$	Erreichbare Normalspannung σ_y Volumenanteil der Teilchen V_r Teilchendurchmesser d Verlauf und Orientierung des Magnetfeldes \vec{B} Temperatur T Fließeigenschaft τ Scherrate D		[Jue9], S.110

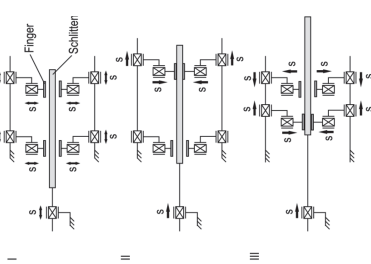
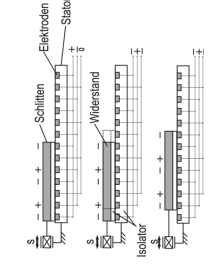
Anhang B – Auswahl möglicher Aktorbauformen

Elektrostatische Antriebe

Obergruppe	Name (Quellen entnehmen)	Prinzipdarstellung	Größenordnung bekanntester Umsetzung	Beschreibung/Besonderheit	Quellen
Elementare Bauformen	Elektrostatisches Relais		<p>Größe: 350 x 400 μm^2 Spannung: 35 V Kraft: 250 μN</p>	<p>Anziehung zwischen parallelen unterschiedlich geladenen Elektroden; entspricht einem Relay bestehend aus elektrostatischem Aktor und Rückstellfeder</p>	<p>u. a. [T003] [CN05]; [T003]; [NB05]</p>
	Parallele Platte		<p>Sehr variabel</p>	<p>Anziehung zwischen parallelen unterschiedlich geladenen Elektroden; Relay bestehend aus elektrostatischem Aktor, Rückstellfeder und Dämpfer</p>	<p>[TN100]; [TLH92]; [LGE98]; [LMK97]; [T000]; [PFH05]</p>
Comdrive	„Combo Drive“ (laterell, vertikal, horizontal)		<p>Größe: Finger: 500 x 4,8 x 2 μm^2 Spannung: 15 V Frequenz: 1,6 kHz</p>	<p>Häufigster Prinzipaufbau in der Mikroelektronik. Ansteuerung über Differentialformel ohne „pull-in“-Effekt zur realisieren, werden in Tangential- und Vertikalaktoren unterschieden</p>	<p>[M005]</p>
	Kippantrieb (DMO Mirrow)		<p>Winkel: +/- 10° Spannung: 10 V Frequenz: 4,7 kHz</p>	<p>Krafteinbringung durch asymmetrisch aufgebauten Comb Drive</p>	<p>[M005]</p>

Obergruppe	Name (Quellen entnommen)	Prinzipdarstellung	Größenordnung bekanntester Umsetzung	Beschreibung/Besonderheit	Quellen
Impulsantriebe	„Impactmotor“		<p>Größe: $3 \times 3 \times 0,6 \text{ mm}^3$ Spannung: 100 V Hub: 10-20 mm Geschwindigkeit: 2,7 $\mu\text{m/s}$ bei 200 Hz</p>	<p>Durch eine Elektrode zum Schwingen angeregter Anker erzeugt Stöße, die der Fortbewegung dienen</p>	<p>[MAN 03]; [P659]; [P660/1]</p>
	„Scratch drive“		<p>Größe: $500 \times 50 \mu\text{m}$ Spannung: 112 V Kraft: $F_1=10 \mu\text{N}$ (Hub $100 \mu\text{m}$) $F_2=22 \mu\text{N}$ (Hub $75 \mu\text{m}$)</p>	<p>Translatorische Bewegung durch Änderung der Geometrie auf Grund elektrostatischer Anziehung</p>	<p>[ACF97]; [TC00]; [K906]</p>
Verformungsbasierte Antriebe	Membranantrieb		<p>Größe: $76 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ Spannung: 200 V Hub: 2,5 mm Geschwindigkeit: 4 m/s</p>	<p>Translatorische Bewegung der Membran durch Anlegen einer Spannung</p>	<p>[SS92]; [K906]</p>
	„Linear shuffler motor“		<p>Größe: $100 \times 200 \times 2 \mu\text{m}$ Spannung: 200 V Hub: 200 μm Geschwindigkeit: $100 \mu\text{m/s}$ Kraft: 43 μN Frequenz: 1160 Hz</p>	<p>Translatorische Bewegung durch zeitliche Kombination aus Halten und Schieben</p>	<p>[TW698]; [Mo105]</p>

Obergruppe	Name (Quellen entnehmen)	Prinzipdarstellung	Größenordnung bekannter Umsetzung	Beschreibung/Besonderheit	Quellen
Verformungsbasierte Antriebe	Elektrodenmembran		<p>Spannung: 500 V Hub: 2,2 mm Kraft: 5 mN</p>	<p>Verformung wellenförmiger Elektroden führt zu einer vgw. hohen Verformung; Prinzip ähnelt der „Nümburger Schere“</p>	[YK063]
Gekrümmte Elektroden (auch verformungsbasiert denkbar)	gekrümmte Elektroden		<p>Spannung: 200V Vorschub_{max}: 30 µm Kraft: 25 µN</p>	<p>Bewegung wird durch Abrollen erzeugt; besondere Elektrodenform führt zu nicht linearer Kraft</p>	[LGS97]; [T000]
Faserröhre	Faserröhre		<p>Größe: verschieden, ca. 18 mm Spannung: 60 - 200 V Aufsicht: 0,05 µm Bewegungsbereich: 5 - 10 µm</p>	<p>Ansatz ähnlich den gekrümmten Elektroden, Bewegung longitudinal zum elektrischen Feld, Applikation Faserröhre, Applikation Faserröhre</p>	[LGS97]; [JTW05]

Obergruppe	Name (Quellen entnommen)	Prinzipdarstellung	Größenordnung bekanntester Umsetzung	Beschreibung/Besonderheit	Quellen
	"Stepper" Motor	 <p>Diagram I: Motor with a finger and switches. Labels: Finger, Schaltern, s, S.</p> <p>Diagram II: Motor with a rotor and switches. Labels: s, S.</p> <p>Diagram III: Motor with a rotor and switches. Labels: s, S.</p>	<p>Größe: 900-630 x 1,8 μm Spannung: 30 V Vorschub: 3 μm Radial: 1 μm</p>	<p>Translatorische Bewegung durch zeitliche Kombination aus Halten und Schalten verschiedener Aktoren; -vgl. Linear-stufiger motor</p>	<p>[BKO97]; [TC00]</p>
Stepper	lineare elektrostatische Schrittmotore	 <p>Diagram I: Stator with electrodes and switches. Labels: Elektroden, Stator, Schaltern, s, S.</p> <p>Diagram II: Stator with electrodes, switches, and a resistor. Labels: Elektroden, Stator, Schaltern, Widerstand, s, S.</p> <p>Diagram III: Stator with electrodes and switches. Labels: Elektroden, Stator, Schaltern, s, S.</p>	<p>Fläche des Stators 50 x 100 mm² Spannung: 750 V Geschwindigkeit: 420 min/s Frequenz: 1000 Hz</p>	<p>Translatorische Bewegung durch Wechsel der Polarisation im Stator</p>	<p>[ENH91]; [YHP01]</p>

Obergruppe	Name (Quellen entnehmen)	Prinzipdarstellung	Größenordnung bekannter Umsetzung	Beschreibung/Besonderheit	Quellen
	rotatorische elektrostatische Schrittmotore	<p>Stator-Elektrode Rotor Instabil Radiale Bewegung Axiale Bewegung Instabil Stator Rotor Parallelschwingenenergiequelle Anlagefläche</p>	<p>Größe: $D = 139 \mu\text{m}$ Spannung: 37 V Drehzahl: 15000 U/min</p>	<p>Rotatorische Bewegung auf Grund von langwieriger Anziehung zwischen Stator und Rotor</p>	<p>[TC87]; [FTM08]; [AMK99]; [Ma05]</p>
Stepper	Transistorischer Mikrobromotor	<p>Resonator Schlitzen Anlagefläche $U(t)$</p>	<p>Vorschub= $0,27 \mu\text{m}$ Vorschub_{max}= $350 \mu\text{m}$ Kraft_{max}= $2,5 \mu\text{N}$ Geschwindigkeit_{max}= $1000 \mu\text{m/s}$</p>	<p>Transistorische Bewegung durch Relativschub mit elektrostatischen Antrieben; dieser kann bspw. ein Comb Drive sein.</p>	<p>[TD594]; [Ma05]</p>
	Rotatorischer Microbromotor	<p>I II</p>	<p>Größe: $R_{\text{res}} = 60 \mu\text{m}$ Comb-Abstand: $10 \mu\text{m}$ Frequenz: 200kHz Drehzahl: 60000 U/min</p>	<p>Rotatorische Bewegung durch Relativschub mit elektrostatischen Antrieben; dieser kann bspw. ein Comb Drive sein.</p>	<p>[LFP26]; [LFP26]</p>
Harmonic Motoren	"Wobler" Motor	<p>Lager Stator-Elektrode Rotor Lagerspiel effektive Spaltbreite Antriebsrichtung</p>	<p>Größe: $h = 200 \mu\text{m}$ $d = 2,5 \text{ mm}$ Spannung: 120V Moment: $0,6 \mu\text{Nm}$ Drehzahl: 1000 U/min</p>	<p>Rotatorische Bewegung durch Abrollen voneinander elektrostatisch anziehenden Zylinderflächen; vgl. Planetenradgetriebe</p>	<p>[PM08]; [W97]; [B97]; [SS98]; [SS98]; [Ma05]; [Ma05]; [LX08]</p>

Obergruppe	Name (Quellen entnommen)	Prinzipdarstellung	Größenordnung bekanntester Umsetzung	Beschreibung/Besonderheit	Quellen
Harmonic Motor	Konscher "Wobble" Motor		NA	Wobblenmotor mit besonderer Antriebsfläche	[JÜ89b]; [SPD90]
fluidisch	Pumpen		Spannung: 260 V Durchmesser: 35 µPa (bei D=2 µm und $\beta=0,2$ µm)	Kontaktion der Elektrodenanordnung führt zu Flüssigkeitsstrom. Die Antriebsfläche bewegt die Flüssigkeit kann Abtrieb sein.	[HML90]; [SAS99]
fluidisch	Elektroosmotische Antriebe		Größe: $r=3,5$ µm $f_w=500$ Hz Spannung: 2000 V Druck: 20 atm $dV/dt = 3,6$ µl/min	Transport von Elektrolyten durch die Anode von E-Feldern	[ZCM01]

Anhang C – Einflussgraphen

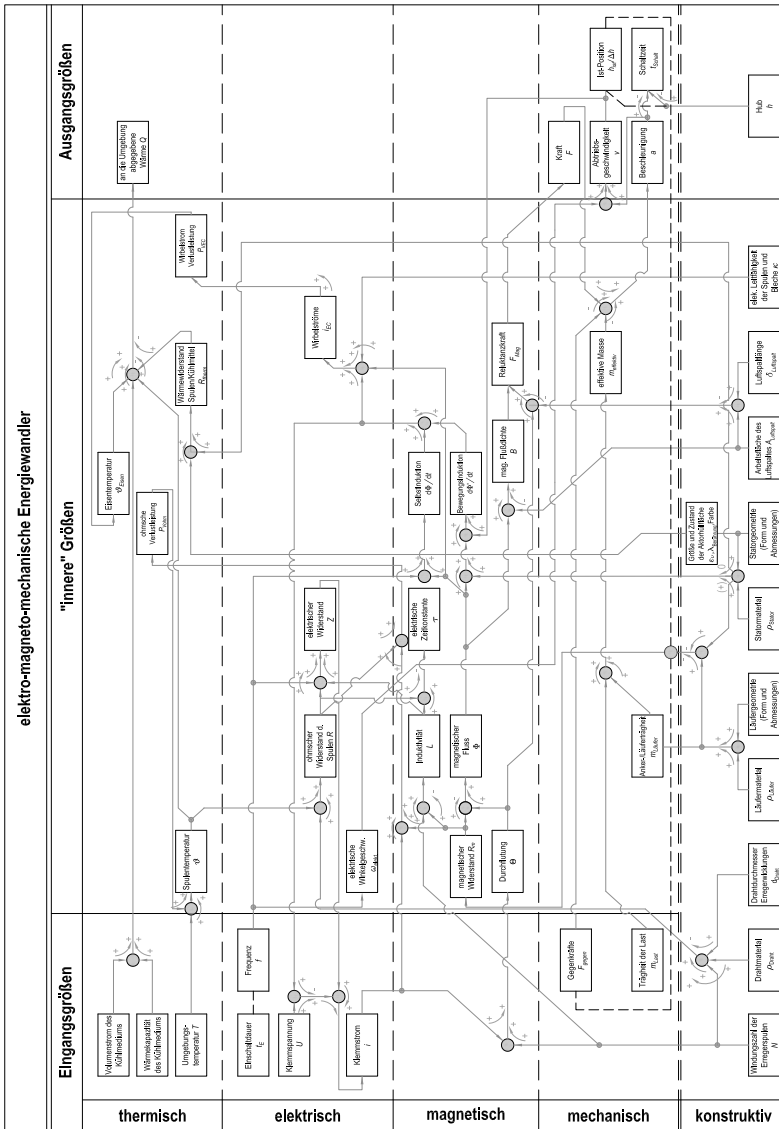


Abbildung C.1: Gesamtmodell eines Elektromagnetaktors

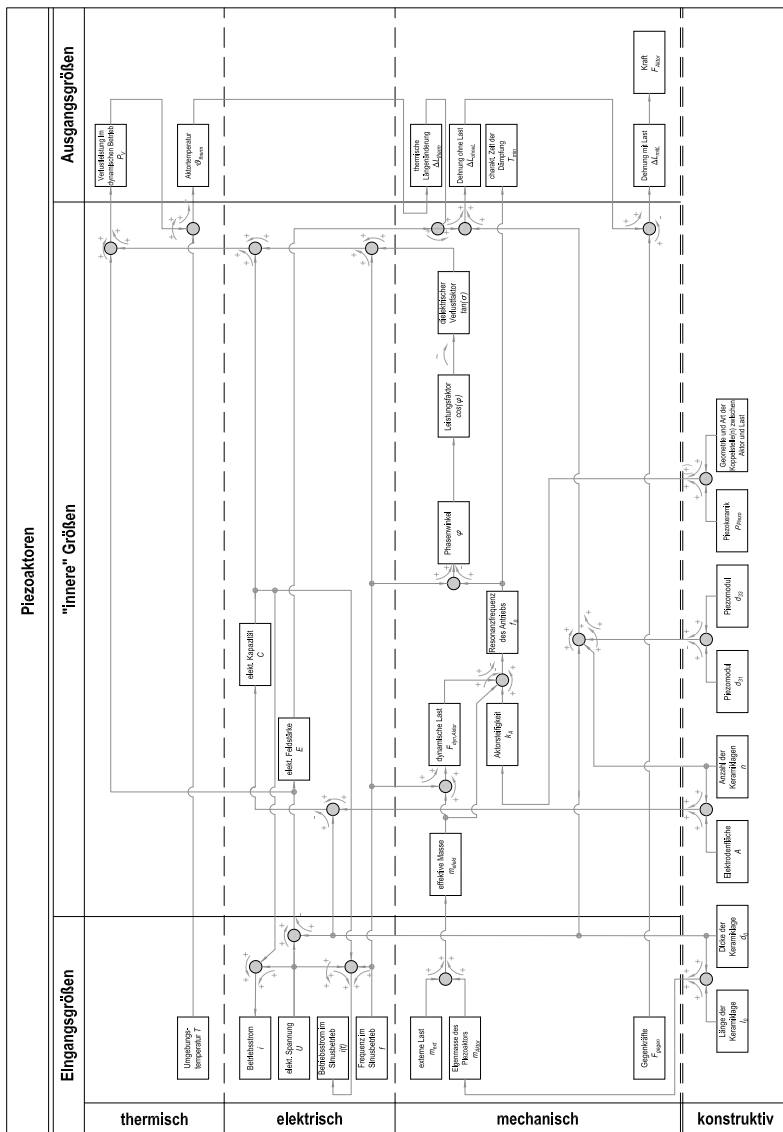


Abbildung C.2: Gesamtmodell eines Piezoaktors

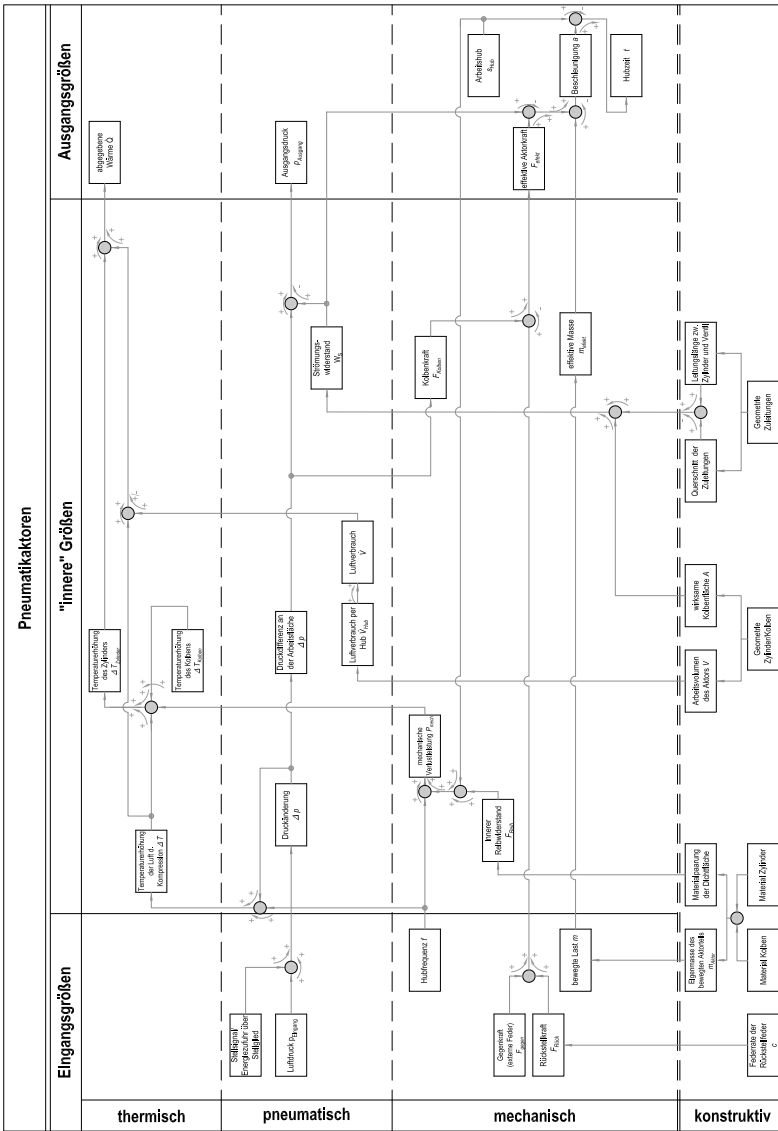


Abbildung C.3: Gesamtmodell eines Pneumatikaktors

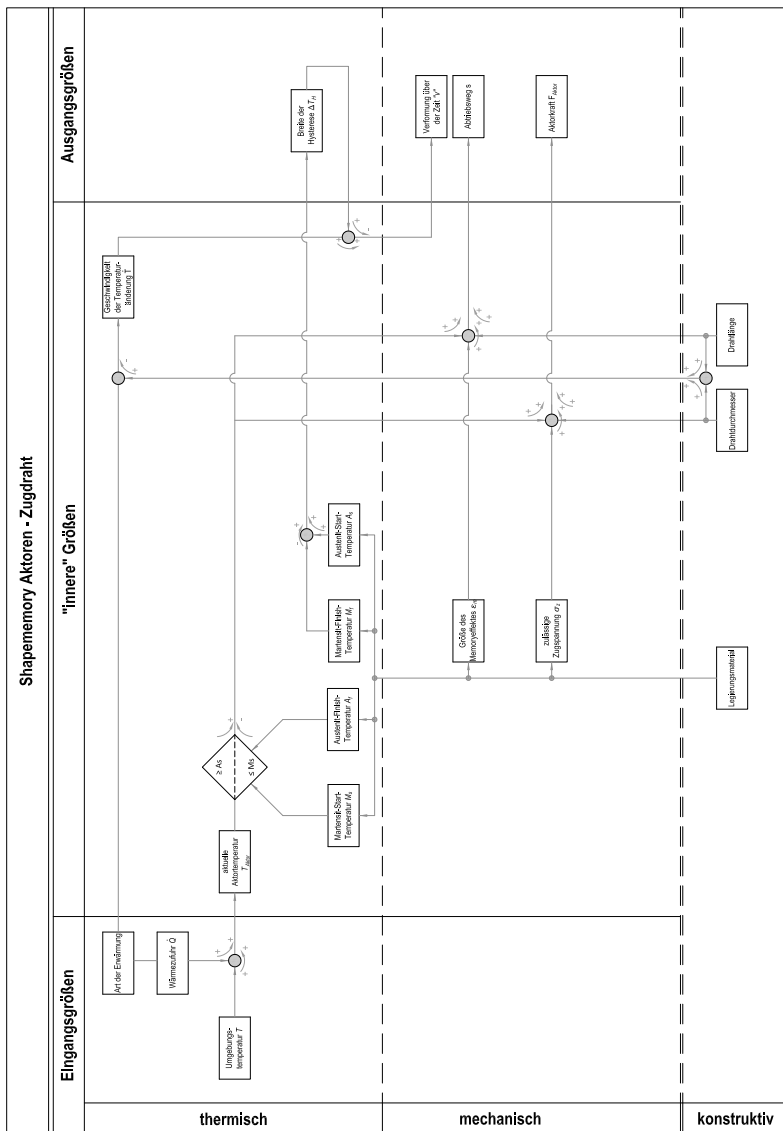


Abbildung C.4: Modell eines Zugdraht-Formgedächtnismetallaktors (angelehnt an [Ju95]).

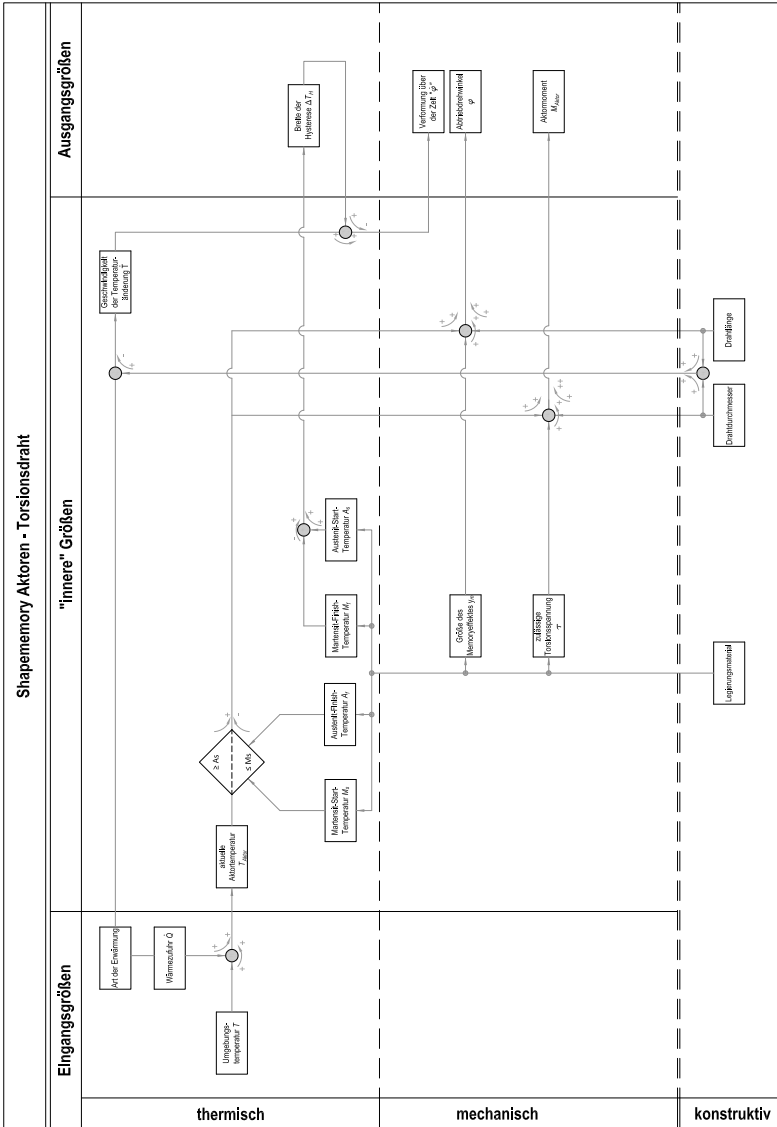


Abbildung C.5: Modell eines Torsionsdraht-Formgedächtnismetallaktors (angelehnt an [Ju95]).

Liste der bisher erschienenen Bände, Stand 27.03.2013

Bericht aus dem Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (IMK), 1990 – 2010

- Band 1** **Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.):**
Forschung und Lehre im Institut für Maschinenelemente und Konstruktion
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 1999. - ISBN 3-932633-37-7
- Band 2** **Spiller, Frank:**
Möglichkeiten der rechen-technischen Umsetzung von Erkenntnissen aus der Konstruktions-systematik unter Nutzung der Featuretechnologie
(Dissertation TU Ilmenau 1998)
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-932633-20-2
- Band 3** **Leibl, Peter:**
Entwicklung eines featureorientierten Hilfsmittels für die Konstruktion kostengünstiger Produkte
(Dissertation TU Ilmenau 1998)
Ilmenau : ISLE, 1998. - ISBN 3-00-003695-4
- Band 4** **Lutz, Steffen:**
Kennlinie und Eigenfrequenzen von Schraubenfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2000)
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-47-4
- Band 5** **Kletzin, Ulf:**
Finite-Elemente-basiertes Entwurfssystem für Federn und Federanforderungen
(Dissertation TU Ilmenau 2000)
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-48-2
- Band 6** **Volz, Andreas K.:**
Systemorientierter Karosserie-Konzeptentwurf am Beispiel der Crashsimulation
(Dissertation TU Ilmenau 1998)
Ilmenau : ISLE, 2000. - ISBN 3-932633-52-0
- Band 7** **Brix, Torsten:**
Feature- und constraint-basierter Entwurf technischer Prinzipie
(Dissertation TU Ilmenau 2001)
Ilmenau : ISLE, 2001. - ISBN 3-932633-67-9

- Band 8** **Rektor der TU Ilmenau und Institut für Maschinenelemente und Konstruktion der TU Ilmenau (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit Carl Zeiss Jena GmbH**
Vom Arbeitsblatt zum virtuellen Prototyp – 50 Jahre
Konstruktionssystematik
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 2002. - ISBN 3-932633-68-7
- Band 9** **Liebermann, Kersten:**
Rechnergestütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für
Schraubendruckfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2003)
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-74-1
- Band 10** **Meissner, Manfred; Denecke, Klaus:**
Die Geschichte der Maschinenelemente als Fachgebiet und Institut an der
Technischen Universität Ilmenau von 1953 bis 2003
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 2003. - ISBN 3-932633-82-2
- Band 11** **Geinitz, Veronika:**
Genauigkeits- und auslastungsoptimierte Schraubendruckfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2006)
Ilmenau : ISLE, 2006. - ISBN 3-938843-11-X
- Band 12** **Institut für Maschinenelemente und Konstruktion (Hrsg.):**
Festschrift zum Ehrenkolloquium anlässlich der Emeritierungen von
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Günter Höhne und Univ.-Prof. Dr.-Ing.
habil. Hans-Jürgen Schorcht
(Institutsbericht)
Ilmenau : ISLE, 2005. -ISBN 3-932633-97-0
- Band 13** **Wittkopp, Tobias:**
Mehrkörpersimulation von Schraubendruckfedern
(Dissertation TU Ilmenau 2005)
Ilmenau : ISLE, 2005. - ISBN 3-938843-07-1
- Band 14** **Frank, Stefan:**
Justierdrehen – eine Technologie für Hochleistungsoptik
(Dissertation TU Ilmenau 2007)
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-35-4
- Band 15** **Schilling, Thomas:**
Augmented Reality in der Produktentstehung
(Dissertation TU Ilmenau 2008)
Ilmenau : ISLE, 2008. - ISBN 978-3-938843-42-0

- Band 16 Lotz, Markus:**
Konstruktion von Messspiegeln hochgenauer Mess- und
Positioniermaschinen
(Dissertation TU Ilmenau 2009)
Ilmenau : ISLE, 2009. - ISBN 978-3-938843-46-8
- [Band 17] Hackel, Tobias:**
Grundlegende Untersuchungen zu vertikalen Positioniersystemen für
Nanopräzisionsmaschinen
(Dissertation TU Ilmenau 2010)
Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-86991-
111-3
- [Band 18] Frank, Thomas:**
Konzeption und konstruktive Gestaltung der Messkreise von
Nanomessmaschinen
(Dissertation TU Ilmenau 2010)
Münster, Westf : Monsenstein und Vannerdat, 2010. - ISBN 978-3-86991-
194-6

Berichte aus dem Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion (IMGK), 2010 - ...

- Band 19 Sondermann, Mario:**
Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hochleistungssysteme
(Dissertation TU Ilmenau 2010)
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2011. - ISBN 978-3-939473-94-7
- Band 20 Stephan Husung:**
Simulation akustischer Produkteigenschaften unter Nutzung von Virtual
Reality während der Produktentwicklung
(Dissertation TU Ilmenau 2011)
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2012. - ISBN 978-3-86360-026-6
- Band 21 Dobermann, Dirk:**
Stabilisierung der Bildlage abbildender optischer Systeme
(Dissertation TU Ilmenau 2012)
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-056-3
- Band 22 Taubmann, Peter:**
Analyse der Ventildfederbewegung als Beitrag zur Beeinflussung der
Verschleißursachen an den Auflageflächen
(Dissertation TU Ilmenau 2013)
Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-059-4

Band 23 Erbe, Torsten:

Beitrag zur systematischen Aktor- und Aktorprinzipauswahl im
Entwicklungsprozess

(Dissertation TU Ilmenau 2013)

Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - ISBN 978-3-86360-060-0

