



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Vorgehensmodell zur wirtschaftlichen und ökologischen Auswahl der Antriebe für Industriekrananlagen

Matthias Amberger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner
2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
3. Prof. Dr.-Ing. Markus Golder

Die Dissertation wurde am 01.04.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.08.2019 angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität, 2019

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Layout und Satz: Matthias Amberger

Copyright @ Matthias Amberger

ISBN: 978-3-948514-05-1

Printed in Germany. 2020

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Willibald A. Günthner für die Möglichkeit während meiner Zeit am Lehrstuhl Verantwortung bei der Bearbeitung von Forschungs- und Lehraufgaben zu übernehmen. Insbesondere möchte ich mich für die Möglichkeit bedanken, diese Arbeit anfertigen zu können.

Weiterhin gilt ein sehr großer Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Johannes Fottner für die Übernahme des Koreferats und Herrn Professor Dr.-Ing. Karsten Stahl für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Ganz herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Golder für das Koreferat dieser Arbeit und für die Diskussionen während der Entstehungsphase und während der Durchführung des IGF-Forschungsvorhabens „Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik“, welches den Grundstein für die vorliegende Arbeit darstellt. In diesem Zug möchte ich mich auch bei allen Projektpartnern und insbesondere bei Herrn Müller von der Fa. Stahl CraneSystems für die Unterstützung bei der Zusammenstellung der Basisdaten für das Fallbeispiel herzlich bedanken.

Einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit ist auch der kollegialen Arbeitsatmosphäre am Lehrstuhl und der guten Zusammenarbeit zuzuschreiben. Insbesondere möchte ich mich zudem bei Herrn Dr.-Ing. Sebastian Habenicht, bei Herrn Dr.-Ing. Johannes Graf und bei Herrn Dr.-Ing. Michael Kleeberger für das Korrekturlesen und die wertvollen Hinweise bedanken, die für die Finalisierung dieser Arbeit wesentlich waren. Ein besonderer Dank für die hervorragende Zusammenarbeit gilt auch allen Kollegen aus der CAD- und Maschinenzeichnen-Mannschaft, mit denen ich diese Veranstaltung während meiner Zeit am Lehrstuhl betreuen durfte.

Der größte Dank gilt aber meiner Familie und insbesondere meinen Eltern, die mich auf jedem Schritt meines Lebenswegs stets unterstützt und mir meine Ausbildung und damit auch die Anfertigung dieser Arbeit überhaupt erst ermöglicht haben. Ohne euch wäre das nicht möglich gewesen!

Kurzzusammenfassung

Krane und Hebezeuge sind im industriellen Umfeld in vielfältigen Ausprägungen als Handhabungshilfe und innerbetriebliches Transportmittel anzutreffen. In den letzten Jahren haben sich neben polumschaltbaren Antrieben zur Steuerung der Arbeitsgeschwindigkeiten auch Umrichter-gespeiste Antriebe etablieren können, die eine Vielzahl an Vorteilen gegenüber konventionellen Systemen aufweisen [Mie-1995]. Eine systematische Methodik zur Antriebsauswahl, die auch ökologische Aspekte berücksichtigt, existiert aber bis heute nicht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll diese Lücke geschlossen werden. Ziel ist die Entwicklung eines durchgängigen und modular aufgebauten Vorgehensmodelles, mit dem Antriebe in Krananlagen sowohl nach wirtschaftlichen als auch nach ökologischen Belangen bemessen werden können. In den einzelnen Modulen werden die Lebenszykluskosten sowie die externen Umweltkosten als Maßstab für eine ökologische Bewertung nach der Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes [Sch-2012c] berechnet. Basis für die Berechnung der Lebenszykluskosten ist die Aufstellung der Kostenaufbruch-Struktur für Krananlagen gemäß [VDMA 34160]. Für die Berechnung der Energiekosten wird ein Energiebedarfsmodell entwickelt. Auf Basis dessen kann der Energiebedarf der einzelnen Aufgaben des Krans abgeschätzt werden. In gleicher Weise wird mithilfe eines Mehrkörpermodells die Spielzeit der einzelnen Kranaufgaben ermittelt, die als Basis für die Berechnung der Arbeitskosten herangezogen wird.

Auf ökologischer Seite erfolgt zunächst die Ermittlung der Höhe der Umweltwirkungen mithilfe einer Ökobilanzierung nach [DIN EN ISO 14040]. Auch hierfür dient das Energiebedarfsmodell als Basis für die Ermittlung der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase. Die Berechnung der externen Umweltkosten als Grundlage der Gesamtbewertung erfolgt für das Treibhausgaspotenzial als ein maßgeblicher Wirkungsindikator.

Somit wird ein umfassender Vergleich zwischen unterschiedlichen Antriebsvarianten ermöglicht. Dies geschieht durch Integration externer Umweltkosten als Maßstab für das ökologische Profil des gewählten Antriebes in die die Gesamtkostenbetrachtung. Anhand eines Fallbeispiels wird die Funktionsweise des Verfahrens vorgestellt.

Abstract

In the industrial field, cranes and other lifting equipment are used for different materials handling and transport operations. In recent years inverter fed drives have been developed and established besides pole changing drives in order to provide different operational speeds. Although the advantages of these inverter fed drives are known, there is no systematic approach for the selection of the drives until today, which also takes ecological aspects into account.

With the present work this academic void should be closed. The aim is the development of an integrated and modular built procedure model in order to enable the selection of the drives of cranes with respect to economic and ecological requirements as well. Both, the total costs of ownership and external environmental costs according to the „Methodenkonvention 2.0“ of the Umweltbundesamt as a measure for the environmental assessment are calculated in different modules [Sch-2012c]. The basis for the calculation of the total costs of ownership is the establishment of the cost structure for cranes according to the guidelines in [VDMA 34160]. In order to calculate the energy costs a model for the estimation of the demand for energy (energymodel) has been developed. With this model, the energy demand of a crane can be calculated for different operations. In a similar way a multi body model has been developed in order to predict the cycle time for the different crane operations.

From the ecological point of view the environmental aspects are calculated in a life cycle assessment according to [DIN EN ISO 14040]. In the use phase within the life cycle assessment the energymodel is again used for the calculation of the environmental aspects. The external environmental costs are calculated for the global warming potential as one indicator for the whole investigation.

Hence, an extensive possibility for the comparison of different alternatives for the drives used in crane applications is provided. This is obtained by combining the total costs of ownership and the external environmental costs as one measure for the ecological profile of the selected drive. In the end, the functionality of the developed procedure model is shown in a case study.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Formelzeichenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Entwicklungen in der Intralogistik und im Kranbau	1
1.2 Krane und deren Antriebe sinnvoll wählen	4
2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit	7
2.1 Forschungslücke	7
2.2 Ableitung der Forschungsfragen	10
2.3 Vorgehensweise	12
2.4 Aufbau der Arbeit	13
3 Stand des Wissens	17
3.1 Industriekrananlagen	17
3.1.1 Klassifizierung und Begriffsdefinition	18
3.1.2 Aufbau und technische Ausrüstung	20
3.2 Stand der eingesetzten Antriebstechnik	21
3.2.1 Eingesetzte Technologien	22
3.2.2 Bemessung der Triebwerke in Industriekrananlagen	25
3.2.3 Anregung durch die Antriebe	30
3.2.4 Eingrenzung im Sinne der Arbeit	33
3.3 Bewertungsansätze für ökonomische und ökologische Leistung	34
3.3.1 Verfahren zur ökonomischen Bewertung	34
3.3.2 Verfahren zur ökologischen Bewertung	48
3.3.3 Stand der Technik für die Schaffung einer Vergleichsbasis	62
4 Entwicklung des Vorgehensmodells	77
4.1 Strukturierung des Produktlebenszyklus und Aufbruch-Strukturen	79
	VII

4.1.1	Projektmanagement, Planung und Konstruktion	80
4.1.2	Materialauswahl und -bereitstellung	81
4.1.3	Fertigung	82
4.1.4	Transport, Aufbau und Installation	83
4.1.5	Nutzungsphase	85
4.1.6	Lebensende	90
4.2	Auswahl geeigneter Verfahren	92
4.2.1	Anforderungen	92
4.2.2	Lösungsauswahl für Forschungsfrage	93
4.2.3	Lösungsauswahl für Teilmodule	95
4.3	Entwurf des Gesamtkonzepts	101
5	Dynamische Simulation von Krananlagen	103
5.1	Einführung in die Mehrkörperdynamik	103
5.1.1	Aufbau eines Mehrkörpersystems und Grundgleichungen	103
5.1.2	Modellbildung im Rahmen der Mehrkörpersimulation	105
5.1.3	Stand der Anwendung in der Intralogistik	106
5.2	Modellbildungsansätze am Beispiel Brückenkran	108
5.2.1	Modellbildung der Kranbrücke	108
5.2.2	Abbildung des Seiltriebs	109
5.2.3	Modellierung der Rad-Schiene-Kontakte	110
5.2.4	Bewegungssteuerung des Krans	112
5.3	Modellvalidierung und Simulationsdurchführung	113
5.3.1	Parametrierung und Validierung des Simulationsmodells	113
5.3.2	Durchführung der Simulationen	120
6	Ökobilanzierung	123
6.1	Ziel und Untersuchungsrahmen: Industriekrananlagen	123
6.1.1	Ziel der Ökobilanz	123
6.1.2	Definition des Untersuchungsrahmen	123
6.2	Sachbilanz	133
6.2.1	Materialauswahl und -bereitstellung	133
6.2.2	Fertigung	137
6.2.3	Transport, Montage und Aufbau	140
6.2.4	Nutzung	145
6.2.5	Instandhaltung und Wartung	152

6.2.6 Entsorgung	153
6.3 Wirkungsabschätzung	153
7 Kostenmodellierung	155
7.1 Investitionsgütereinkauf	155
7.1.1 Statische Verfahren	155
7.1.2 Dynamische Verfahren	156
7.2 Lebenszykluskosten von Krananlagen	157
7.2.1 Vor der Nutzung	158
7.2.2 Nutzung	159
7.2.3 Nach der Nutzung	162
7.3 Betrachtung von Umweltfolgekosten	163
7.4 Gesamtkostenbetrachtung	164
8 Anwendung des Verfahrens	167
8.1 Definition Fallbeispiel	167
8.1.1 Basisdaten	168
8.1.2 Betrachtete Antriebssysteme	168
8.1.3 Definition der Kranaufgaben	173
8.1.4 Basisdaten für die Kostenbetrachtung	174
8.1.5 Basisdaten für die Ökobilanzierung	176
8.2 Ergebnisse aus dem Fallbeispiel	177
8.2.1 Ergebnisse für die Variante A	178
8.2.2 Ergebnisse für die Variante B	181
8.2.3 Variantenvergleich	184
8.3 Fazit aus dem Fallbeispiel	186
9 Zusammenfassung und Ausblick	189
9.1 Zusammenfassung	189
9.2 Kritische Würdigung und Ausblick	191
Literaturverzeichnis	193
Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	213
Abbildungsverzeichnis	215
Tabellenverzeichnis	219

Anhang A Kranaufgaben	A-1
Anhang B Basisdaten	B-1
Anhang C Validierung Energiemodell	C-1
Anhang D Validierung Mehrkörpermodell	D-I

Formelzeichenverzeichnis

Folgende Formelzeichen und Indizes werden im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Für alle Formeln und Gleichungen in dieser Arbeit sind die angegebenen Einheiten gültig

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A_{Profil}	[m ²]	Querschnittsfläche des Profils für den Kranträger
AK_t	[€/h]	Arbeitskosten je Stunde im Jahr t
A_{Kt}	[m ²]	Oberfläche des Kopfträgers
B_{Profil}	[m]	Breite des Profils für den Kranträger
b_{Kt}	[m]	Breite des Kopfträgers
c	[kg/s ²] / [kgm ² /s ²]	Federkonstante
$c_{\text{S(t)}}$	[N/m]	Seilsteifigkeit
D_{min}	[m]	Minstdurchmesser für Seil und Ausgleichsrollen
D_{Tr}	[m]	Durchmesser der Seiltrommel
d	[kg/s] / [kgm ² /s]	Dämpfung
d_{act}	[kg/s]	Dämpfungskoeffizient im Kontaktmodell nach Hertz
d_{KT}	[m]	Blechstärke für den Kopfträger
d_L	[m]	Dicke der Lackschicht
$d_{\text{S(t)}}$	[Ns/m]	Seildämpfung
d_{Seil}	[mm]	Dicke des Hubseils
E_t	[kWh]	Gesamtenergiebedarf im Jahr t
$E_{\text{Brücke},i}$	[kWh]	Energiebedarf Kranbrücke für Aufgabe i
E_{HB}	[kWh]	Energiebedarf für die Hebebühne
EM_{MK}	[kg]	Gesamtemission Mobilkran
$E_{\text{FZG},i}$	[kg]	Emission Fahrzeug Kategorie i
E_{GL}	[kWh]	Energiebedarf aus der Grundlast
$E_{\text{HW},A}$	[kWh]	Energiebedarf Hubwerk für das Anfahren
E_{HW}	[kWh]	Energiebedarf Hubwerk
$E_{\text{HW},i}$	[kWh]	Energiebedarf Hubwerk für Aufgabe i
E_i	[N/mm ²]	E-Modul des Körpers i

E_j	[N/mm ²]	E-Modul des Körpers j
$E_{\text{Katze},i}$	[kWh]	Energiebedarf Katze für Aufgabe i
E_{Kran}	[kWh]	Energiebedarf Kran
E^*	[N/mm ²]	Mittlerer E-Modul der Körper i und j
EE_i	[kWh]	Endenergie
EF_{FFZf}	[kg/kWh]	Emissionsfaktor Flurförderzeug Fahrbetrieb
EF_{FFZh}	[kg/kWh]	Emissionsfaktor Flurförderzeug Hubbetrieb
EF_{FW}	[kg/kWh]	Emissionsfaktor Mobilkran Fahrbetrieb
$EF_{\text{FZG},i}$	[kg/km]	Emissionsfaktor Fahrzeug Kategorie i
EF_{OW}	[kg/kWh]	Emissionsfaktor Mobilkran Kranbetrieb
EM_{FFZ}	[kg]	Emission Flurförderzeug verbrennungsmotorisch
$EM_{\text{FZG},i}$	[kg]	Emission des Fahrzeugs in der Kategorie i
$E_{\text{RS},i}$	[kWh]	Rückgespeiste Energie in Aufgabe i
F_e^i	[N]	Eingeprägte Kraft auf den Körper i
F_D	[N]	Dämpfungskraft
F_{kontakt}	[N]	Kontaktkraft
F_R	[N]	Reibungskraft
F_N	[N]	Normalkraft
F_S	[N]	Seilkraft
g_i	[-]	Bereitstellungsnutzungsgrad
H_{Profil}	[m]	Höhe des Profils für den Kranträger
h_1	[-]	Beiwert nach DIN 15020
h_2	[-]	Beiwert nach DIN 15020
$h_{\text{hub,max}}$	[m]	Maximale Hubhöhe des Krans
h_{Kt}	[m]	Höhe des Kopfträgers
l_0	[€]	Anfangsauszahlung
J	[kgm ²]	Massenträgheit
J_{Ti}^T	[-]	Transponierte Jakobi-Matrix der Translation
J_{Ri}^T	[-]	Transponierte Jakobi-Matrix der Rotation
$K_{\text{ges},a}$	[€]	Gesamtkosten für Alternative a
$K_{\text{E},t}$	[€/kWh]	Strompreis im Jahr t
KEA	[kWh]	Kumulierter Energieaufwand
KEA_H	[kWh]	Kumulierter Energieaufwand für Herstellung

KEA_N	[kWh]	Kumulierter Energieaufwand für Nutzung
KEA_E	[kWh]	Kumulierter Energieaufwand für Entsorgung
$KU_{K,a}$	[€]	Externe Umweltkosten nach K Perioden für Alternative a
$KU_{w,k,a}$	[€]	Externe Umweltkosten in Wirkungskategorie w für Alternative a in der Periode k
KW_K	[€]	Kapitalwert nach K Perioden
L	[m]	Länge des Linienkontakts beim Kontaktmodell nach Hertz
\dot{L}_i	[Nm]	Impulsänderung auf den Körper i
l_{Br}	[m]	Länge des Brückenträgers
I_3^i	[-]	Kennzahl für ökologische Effizienz
l_{Kt}	[m]	Länge des Kopfträgers
l_{LS}	[m]	Länge des Laserschneidprozesses für den Kranträger
$l_{Ls,Kt}$	[m]	Länge des Laserschneidprozesses für den Kopfträger
l_{res}	[m]	Seilreserve
LF_{FW}	[-]	Lastfaktor Fahrbetrieb Mobilkran
LF_{OW}	[-]	Lastfaktor Oberwagen Mobilkran
LF_{FFZf}	[-]	Lastfaktor Fahrbetrieb Flurförderzeug
LF_{FFZh}	[-]	Lastfaktor Hubbetrieb Flurförderzeug
M	[Nm]	Drehmoment
M_A	[Nm]	Anlaufmoment
M_b	[Nm]	Beschleunigungsmoment
M_C	[Nm]	Moment aus der Steifigkeit der Lagerung
M_D	[Nm]	Dämpfungsmoment
M_e^i	[Nm]	Eingeprägtes Moment auf den Körper i
M_K	[Nm]	Kippmoment
M_L	[Nm]	Lastmoment
M_M	[Nm]	Motordrehmoment
M_n	[Nm]	Anlaufdrehmoment
M_S	[Nm]	Sattelmoment
M_T	[Nm]	Moment aus der Trägheitswirkung der Last
m	[m]	Masse
m_{Br}	[kg]	Masse der Kranbrücke
m_{Hub}	[kg]	Hublast

Formelzeichenverzeichnis

m_{KT}	[kg]	Masse des Kopfträgers
m_L	[kg]	Masse des verwendeten Lacks
m_{LR}	[kg]	Masse der Laufräder
$m_{L,Kt}$	[kg]	Masse des Lacks für den Kopfträger
$m_{LR,Brücke}$	[kg]	Masse eines Laufrades für die Kranbrücke
$m_{LR,Katze}$	[kg]	Masse eines Laufrades für die Katze
m'_{Profil}	[kg/m]	Längenbezogene Masse des Stahlprofils für den Kranträger
m_s	[kg]	Masse des Hubseils
m'_{Seil}	[kg/m]	Längenbezogene Masse des Hubseils
m_{Deckel}	[kg]	Masse der Endscheibe der Seiltrommel
m_{Tr}	[kg]	Masse der Seiltrommel
$m_{\text{Versteifungen}}$	[kg]	Masse der Versteifungen in der Seiltrommel
m_{Trm}	[kg]	Masse des Trommelmantels
n	[1/min]	Drehzahl
NE_t	[€]	Zahlungsüberschuss
NEV_j	[kWh]	nicht energetischer Verbrauch
$n_{LR,Brücke}$	[-]	Anzahl der Laufräder für die Kranbrücke
n_s	[1/min]	Synchrondrehzahl
$n_{s,tot}$	[-]	Anzahl der Seilstränge im Flaschenzug
n_{Tr}	[1/s]	Drehzahl der Seiltrommel
n_0	[1/min]	Leerlaufdrehzahl
P_{FW}	[kW]	Nennleistung Mobilkran Fahrgestell
P_{OW}	[kW]	Nennleistung Mobilkran Oberwagen
P_{FFZf}	[kW]	Nennleistung Flurförderzeug Fahrbetrieb
P_{FFZh}	[kW]	Nennleistung Flurförderzeug Hubbetrieb
P_{HB}	[kW]	Leistungsaufnahme der Hebebühne im Hubbetrieb
P_{HW}	[kW]	Leistungsaufnahme des Hubwerks
P_{Tr}	[kW]	Benötigte Leistung an der Seiltrommel
R_K	[€]	Einzahlung nach der Nutzungsdauer
\dot{p}_i	[N]	Impulsänderung auf den Körper i
SEI	[kWh]	stoffgebundener Energieinhalt
s	[-]	Schlupf
s_K	[-]	Kippschlupf

T_d	[s]	Schwingungsdauer
t_{FFZf}	[h]	Flurförderzeug Zeit im Fahrbetrieb
t_{FFZh}	[h]	Flurförderzeug Zeit im Hubbetrieb
t_{FW}	[h]	Einsatzzeit Mobilkran Fahrbetrieb
t_{HB}	[h]	Zeit der Hebebühne im Hubbetrieb
t_{OW}	[h]	Einsatzzeit Mobilkran Kranbetrieb
$t_{SP,t}$	[h]	Gesamte Arbeitszeit des Krans im Jahr t
T_{Tr}	[Nm]	Drehmoment an der Seiltrommel
$vdn.i$	[€]	Kosten der Kategorie i vor der Nutzung
v_{Norm}	[m/s]	Normalgeschwindigkeit im Kontaktmodell nach Hertz
$x(t)$	[m]	Seillänge
y	[m]	Gegenseitige Durchbiegung der Körper i und j
\hat{y}	[m]	Schwindungsamplitude

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	[1/s]	Winkel
$\dot{\alpha}$	[1/s ²]	Winkelgeschwindigkeit
$\ddot{\alpha}$	[1/s ²]	Winkelgeschwindigkeit
γ	[1/s]	Dämpfungskoeffizient
δ	[1/s]	Abklingkoeffizient
ν_i	[-]	Querdehnzahl des Körpers i
ν_j	[-]	Querdehnzahl des Körpers j
μ	[-]	Reibungsbeiwert
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ρ_L	[kg/m ³]	Dichte des verwendeten Lacks
η_F	[-]	Wirkungsgrad Flaschenzug
η_G	[-]	Wirkungsgrad Getriebe
η_{Mot}	[-]	Wirkungsgrad Motor
η_{Um}	[-]	Wirkungsgrad Umrichter
η_R	[-]	Wirkungsgrad Seilrolle
η_{Tr}	[-]	Wirkungsgrad Seiltrommel

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A	Motorarbeitspunkt
A _n	Nennarbeitspunkt Motor
AfA	Absetzung für Abnutzung
ADP – Elemente	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für Elemente
ADP - Brennstoffe	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für fossile Brennstoffe
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EP	Eutrophication potential (Eutrophierungspotenzial)
EVR	Eco-Costs/Value-ratio
FEM	European materials handling federation
GWP	Global Warming Potential
ISO	International Organization for Standardization
LCC	Life Cycle Costing
LKW	Lastkraftwagen
MKS	Mehrkörpersystem bzw. Mehrkörpersimulation
MTBF	Mean Time Between Failure
MTM	Methods Time Measurement
MTTR	Mean Time to Repair
NO _x	Stickoxide
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonabbaupotenzial)
Pkm	Personenkilometer
PM	Particulate Matter
POCP	Potenzial zur Bildung von bodennahem Ozon
ROE	Return on Environment
SO ₂	Schwefeldioxid
SWP	Safe Working Period

TCO	Total Cost of Ownership
tkm	Tonnenkilometer
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau

1 Einleitung

„Ein Kran ist ein Fördermittel für unterbrochene Förderung, bei dem die Last an einem Tragmittel (z. B. Seil oder Kette) hängt, gehoben, gesenkt und in einer oder mehreren waagerechten Richtungen bewegt werden kann. Der Kran kann ortsfest, auf Schienen oder frei verfahrbar oder auf einem Schwimmkörper angeordnet sein“ [DIN 15001-1]. Mit dieser Definition aus der, seit dem Jahr 1973 gültigen Norm DIN 15001-1 werden die Hauptaufgabengebiete eines Krans bereits allgemein gültig dargestellt. Krane zählen in der Industrie und im Bauwesen in den unterschiedlichsten Bauformen zu den wichtigsten innerbetrieblichen Fördermitteln mit aussetzender Betriebsweise. Die Anzahl der in der europäischen Union eingesetzten Industriekrananlagen wird in *Bruns et al.* [Bru-2013] mit insgesamt 800.000 Einheiten angegeben. Hierzu zählen insbesondere die Bauarten Brücken- und Portalkrane bzw. Konsol- und Wandlaufkrane, welche die Lasten in einem quaderförmigen Arbeitsraum bewegen. In den letzten Jahren waren neben dem Stahlbau vor allem die eingesetzte Antriebstechnik und die Steuerungstechnik einem starken Wandel unterzogen. Dieser wird im Folgenden kurz skizziert. Darauf aufbauend werden die Schlüsselaspekte bei der Auswahl und Konfiguration von Krananlagen dargestellt.

1.1 Aktuelle Entwicklungen in der Intralogistik und im Kranbau

Die Klassifizierung von Industriekranen richtet sich in erster Linie nach der maximalen Traglast des Hubwerks. Zudem sind die notwendigen Arbeitsgeschwindigkeiten in den einzelnen Bewegungsrichtungen als Betreibervorgabe eine maßgebliche Eigenschaft eines Krans. Weitere Faktoren, die bei der Investition eine Rolle spielen, sind geometrische Spezifikationen wie Katzanfahrmaße oder die nutzbare Hakenhöhe des Krans. Die Anschaffung einer Krananlage ist als langfristige Investition ausgelegt. So geht die AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter von einer Nutzungszeit von ortsfesten Kranen von 21 Jahren aus [Bun-2015]. In der Praxis können durch Modernisierungs- und Retrofit-Maßnahmen erheblich längere Einsatzzeiten erreicht werden [Weh-2005, Weh-2006]. Bei diesen Maßnahmen werden in den meisten Fällen die Antriebssysteme des Krans überholt oder getauscht, wobei das Tragwerk unangetastet bleibt oder nur geringe Modifikationen erfährt [o.V-2010a]. Dabei ist es enorm wichtig, alle Faktoren hinsichtlich der Antriebe, die beim Einsatz des Krans und den zugehörigen Investitionen eine Rolle spielen, mit in den Entscheidungsprozess einzubeziehen.

Zentrale Anforderung an einen Kran ist seit jeher neben der Erfüllung der Kundenforderungen die Sicherheit bei der Bedienung des Krans [Kiv-2015]. Diesem Aspekt wird Rechnung getragen zum einen durch gesetzliche Vorgaben, wie etwa die Maschinenrichtlinie [Eur-2006], zum anderen als Kundenanforderung durch die Hersteller. Jüngere Entwicklungen und Trends im Kranbau beziehen sich vor allem auf die Bedienung des Krans und die Steuerungstechnik. So werden in einer Umfrage unter Kranherstellern zusammenfassend die (Teil-)Automatisierung und damit die Verbesserung der Produktivität und die Einbindung in das Materialflusskonzept eines Unternehmens als zentrale Aspekte hervorgehoben [o.V-2011a]. Einhergeht damit eine Verbesserung der Sicherheit, die durch Umfahr-Steuerungen oder Positionierhilfen erreicht werden kann. Auch die Einbindung von Überwachungs- und Diagnosewerkzeugen, die das Monitoring von Betriebsdaten des Krans übernehmen [Vog-2016], hat an Bedeutung gewonnen. Bei manuell bedienten Kranen zeigt sich eine deutlich erkennbare Entwicklung hin zu Funk-ferngesteuerten Anlagen [o.V-2010b]. Bei Automatikkränen können durch die moderne Steuerungstechnik auch der Tandembetrieb mehrerer Krananlagen oder das Zusammenspiel zweier Katzen an einer Kranbrücke als Funktion angeboten werden [o.V-2010b]. Das Thema Energieeffizienz wird bei Kranen und Hebezeugen erst seit kurzem mit steigender Sensibilität wahrgenommen [o.V-2011a, Vog-2016]. Zudem steigt weiter der Anteil an Kranen, die mit Frequenzumrichter-Antrieben ausgerüstet werden [o.V-2010b]. Hinsichtlich Wartung und Service bei Krananlagen finden sich Leistungen wie ein 24h-Notdienst oder die Möglichkeit einer Fernwartung im Angebot von Unternehmen [o.V-2011a].

Ein genereller Trend in der Intralogistik zeigt sich in der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten. Dies wird vor allem durch zahlreiche Forschungsaktivitäten untermauert, insbesondere im deutschsprachigen Raum an Universitäten und weiteren Forschungseinrichtungen. Zahlreiche dieser Aktivitäten konzentrieren sich auf Unstetigförderer und dabei insbesondere auf Regalbediengeräte [Gün-2011b, Gün-2011c, Bra-2012, Sch-2012b, Hab-2013a, Sch-2014, Hah-2018]. Flurförderzeuge und Krane als weitere bedeutende Vertreter der Gruppe Unstetigförderer fanden in dieser Hinsicht bisher nur vereinzelt Beachtung [Bru-2010, Amb-2012, Bru-2013, Sch-2015b, Bru-2016]. Auch das Gesamtsystem Distributionszentrum wurde von *Freis* in [Fre-2017] hinsichtlich der Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Treibhausgasemissionen untersucht. Den Schwerpunkt des Vergleichs unterschiedlicher Planungsalternativen für die Ausrüstung von Logistiksystemen mit Stetigfördertechnik verfolgt auch *Habenicht* in seiner Arbeit [Hab-2018]. Weitere Aktivitäten in der Forschung zielen auf die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Geräte und Technologien in der Intralogistik, insbesondere der Lagertechnik [Rüc-2017, Rüc-2018a, Rüc-2018b]. Die Treiber für diese Untersuchungen können generell vier unterschiedlichen Kategorien zugewiesen werden.

– **Politische Rahmenbedingungen:**

Getrieben durch den Klimawandel hat sich vor allem die Europäische Union (EU) ambitionierte Ziele für den Klimaschutz gesetzt. Darunter fällt auch das Ziel 20-20-20, was für eine Reduktion des Treibhausgasausstoßes um 20 % gegenüber dem Basisjahr 1990, eine Verringerung des Energiebedarfs um 20 % und eine Erhöhung der Energieeffizienz um 20 % bis zum Jahr 2020 steht [Eur-2017]. Zentrales Element zur Verbesserung der Energieeffizienz ist die umgangssprachlich als „Ökodesignrichtlinie“ bezeichnete EU-Richtlinie 2009/125/EG, die als Rahmenrichtlinie für Durchführungsverordnungen zur Verbesserung der Energieeffizienz dient [Eur-2009]. Betroffen hiervon waren zunächst nur alltägliche Gegenstände wie Glühlampen oder Fernseher. Es ist aber weiterhin nicht auszuschließen, dass neben Werkzeugmaschinen auch andere Investitionsgüter in den Kreis der regulierten Produktgruppen aufgenommen werden.

– **Steigende Kosten für Energie:**

Bedingt durch die in den letzten Jahren stark angestiegenen Energiepreise [sta-2016] rückt das Thema Energieeffizienz immer weiter in den Fokus der Betreiber von Intralogistiksystemen. Hierzu ist in Abbildung 1-1 die Entwicklung der Strompreise für Unternehmen inklusive Steuern seit dem Jahr 1998 in Deutschland dargestellt.

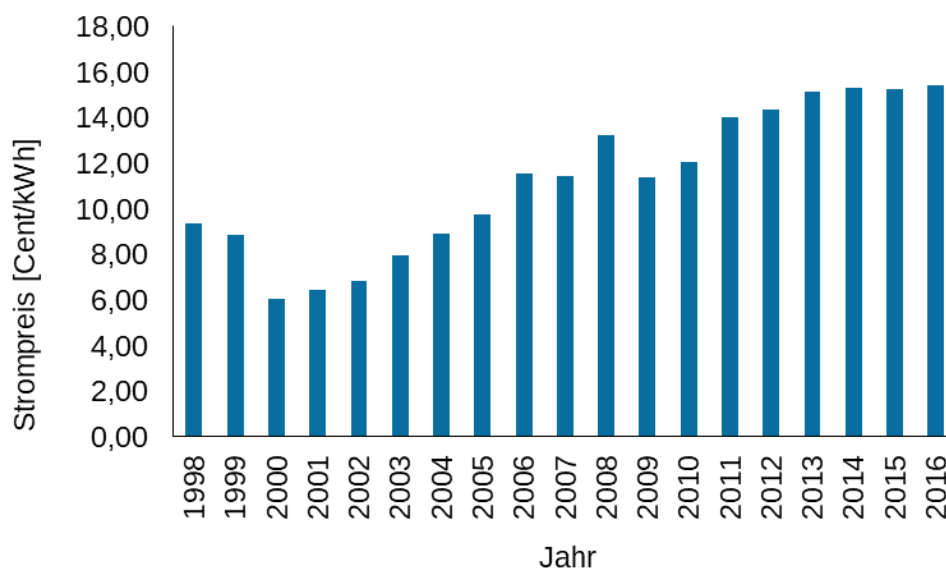


Abbildung 1-1: Industriestrompreise in Deutschland [sta-2016]

Vor diesem Hintergrund sind auch die Betreiber von Intralogistiksystemen bestrebt, den Energiebedarf weiter zu senken und die Energieeffizienz zu erhöhen.

– **Kunden- und Verbrauchieranforderungen**

Neben dem direkt monetär quantifizierbaren Kostenaspekt tritt auch ein generell erhöhtes Umwelt- und Nachhaltigkeitsbewusstsein bei den Betreibern von Logistiksystemen in den Vordergrund [Gün-2009]. Damit einhergehend verbessern sich die Kundenwahrnehmung und die Außendarstellung von Unternehmen, was im Rahmen von Marketingzwecken genutzt werden kann.

Somit steht die Kranbaubranche vor großen Herausforderungen, die sich sowohl aus den Aspekten Sicherheit sowie Bedienung und Steuerung maßgeblich ableiten. Aber auch das Thema Energieeffizienz ist nicht zu vernachlässigen [DEM-2017b], so dass alle diese Kundenanforderungen bei der Konzeption und beim Bau von Kranen berücksichtigt werden müssen. Insbesondere die Antriebe von Krananlagen sind von einer Vielzahl dieser neuen Herausforderungen betroffen, da diese einen direkten Einfluss auf Bedienung bzw. Automatisierung, Energieeffizienz und auch die Sicherheit beim Einsatz haben. Damit ist auch eine fokussierte Auswahl der Antriebstechnik für Krananlagen unerlässlich.

1.2 Krane und deren Antriebe sinnvoll wählen

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Vorgehensmodells, mit dem die Auswahl der Antriebe von Industriekrananlagen unter gleichermaßen ökonomischen wie ökologischen Gesichtspunkten bereits bei der Projektierung von Krananlagen vollzogen werden kann. Innerhalb des zu entwickelnden Vorgehensmodells erfolgt zum einen die Bewertung der Kosten- und Leistungsaspekte von Krananlagen und zum anderen die Bewertung des ökologischen Profils unter Berücksichtigung unterschiedlicher Antriebssysteme. Der Fokus wird dabei auf elektrische Antriebe gelegt. Zwar kommen auch pneumatische Antriebe in Kranen zum Einsatz, hier allerdings nur für das Hubwerk, wobei der Anteil elektrischer Antriebe insgesamt bei weitem überwiegt [Pfe-1998].

Wichtige Planungsgrundlagen für Krane innerhalb von Gebäuden werden in der VDI-Richtlinie 2388 [VDI 2388] dargelegt. Darin werden Normwerte für wesentliche Merkmale eines Krans für den innerbetrieblichen Transport hinsichtlich Tragfähigkeit, Hubhöhen und Arbeitsgeschwindigkeiten (siehe hierzu auch detaillierte Darstellungen in [VDI 3573]) vorgeschlagen, wobei auf die gebräuchlichsten Bauarten für das Tragwerk und die Katze eingegangen wird. Zudem werden Hinweise zur elektrischen Ausrüstung des Krans hinsichtlich Versorgung mit elektrischer Leistung und Sicherheitseinrichtungen gegeben. [VDI 2388]

In [DEM-2016b] wird eine allgemeine Vorgehensweise vorgestellt, wie die Integration von Brückenkrananlagen bei der Planung und beim Bau neuer Bauwerke berücksichtigt werden kann. Hierbei stehen insbesondere die frühzeitige Berücksichtigung der zentralen Aspekte wie Hublast und geometrische Spezifikationen im Rahmen eines Lastenhefts im Vordergrund. Neben diesen offensichtlichen Anforderungen muss zudem frühzeitig die zukünftige Entwicklung des Aufgabenspektrums eines Krans, die Anpassungen an der Steuerung oder an der Tragfähigkeit erfordert, berücksichtigt werden. Weitere Planungsaspekte umfassen die Anbindung des Krans an die Stromversorgung und eine hinreichende Berücksichtigung der Aufbaumöglichkeiten der Krananlage, da bereits einzelne Baugruppen sehr große Abmessungen erreichen können. Eine frühzeitige Berücksichtigung sollten auch die Betriebskosten und die Servicequalität erfahren. Am Ende des Beschaffungsprozesses erfolgt die vorgeschriebene Sicherheitsprüfung des Krans durch einen Sachverständigen. [DEM-2016b]

Die Bauform des Krans richtet sich nach den Gegebenheiten des Einsatzortes, an dem der Kran aufgebaut werden soll, und nach dem benötigten Arbeitsraum. So weisen Wand- oder Säulenschwenkkrane einen zylindrischen Arbeitsraum auf, wohingegen (Halb-) Portal- und Brückenkrane einen quaderförmigen Arbeitsraum besitzen. Eine Übersicht über die unterschiedlichen, in der industriellen Produktion verbauten Kranbauarten kann [DIN 15001-1] entnommen werden. Der Aufbau des Tragwerks richtet sich im Wesentlichen nach den statischen Anforderungen und der Spannweite. Bei kleinen Kranen kommen Walzprofilträger zum Einsatz, wohingegen bei größeren Traglasten und Spannweiten auf geschweißte Kastenträger zurückgegriffen wird [Pfe-1998].

Die Wahl des Antriebs richtet sich nach den Anforderungen des Kunden und ist Bestandteil der detaillierten Planung, nachdem die Entscheidung für einen Neuerwerb getroffen und die maßgeblichen Parameter festgelegt wurden. Obwohl die Vorteile frequenz geregelter Antriebe seit längerem bekannt sind [Mie-1995], werden auch weiterhin direkt am Netz betriebene Motoren oder polumschaltbare Asynchronmotoren eingesetzt [Bra-2016a]. Dies ist vor allem den höheren Anschaffungskosten für die Umrichtertechnik geschuldet. Hinsichtlich der Energieeffizienz unterscheiden sich die beiden Konzepte, da ein frequenz geregelter Antrieb im Vergleich zu einem direkt am Stromnetz betriebenen Motor zunächst nicht rückspeisefähig ist, sondern die beim Lastsenken zurückgewonnene Energie in einem Bremswiderstand in Wärme umsetzt [Bra-2016a]. Erst mithilfe einer Rückspeiseeinrichtung sind die Übertragung von Energie zurück ins Stromnetz oder die Verwendung an anderer Stelle möglich. Die Untersuchung dieses Verhaltens und eine erste Quantifizierung der Energiekosten unterschiedlicher Antriebe werden erstmals in [Bra-2016a] vorgestellt.

Zur Auswahl der geeigneten Antriebe für eine Krananlage liefert die Richtlinie 3652 des Vereins Deutscher Ingenieure eine erste Hilfestellung, indem maßgebliche Auswahlkriterien definiert und erläutert werden [VDI 3652]. Diese Kriterien betreffen in erster Linie die Gesamtfunktion des Kranes:

- Geschwindigkeitsbereich
- Lasteinfluss auf die Geschwindigkeit
- Geschwindigkeitserhöhung bei kleinen Lasten
- Sanft-Anlauf, ruckbegrenztes Anfahren
- Stufenlose Momenten-Änderung
- Beschleunigung / Verzögerung steuerbar
- Positionierfähigkeit, Positioniergenauigkeit

Für die genannten Kriterien wird ein Auswahl- bzw. ein Bewertungsverfahren vorgestellt und damit der Anwender bei der Auswahl der besten Antriebskonfiguration für den betreffenden Kran unterstützt. [VDI 3652]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass generelle Ansätze bei der Investition in eine neue Brückenkrananlage und deren Antriebe bereits definiert [VDI 2388, VDI 3652, DEM-2016b] sind. Allerdings ist eine ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte, die neben den betriebswirtschaftlich relevanten Gesichtspunkten auch ökologische Inhalte umfassen sollte, noch nicht vorhanden. Erste Ansätze in diese Richtung existieren zwar, umfassen aber meist nur isoliert das übergeordnete Thema Energiebedarf [Bra-2016a], ohne eine ganzheitliche, auch weitere wesentliche ökologische Faktoren betreffende Herangehensweise zu liefern. Daher wird im Vorgriff auf das Kapitel 2.2 an dieser Stelle die Hauptforschungsfrage für die vorliegende Arbeit dargestellt:

„Wie kann eine gleichermaßen ökonomisch als auch ökologisch sinnvolle Auswahl der Antriebstechnik in Industriekrananlagen gewährleistet werden?“

Im Rahmen dieser Arbeit wird angestrebt, diese Frage unter Berücksichtigung des gesamten Lebenswegs des Krans zu beantworten. Die großen Herausforderungen hierbei stellen die Vielzahl an sich wechselseitig beeinflussenden Parametern dar, die berücksichtigt werden müssen und das Ziel, ökologische und ökonomische Aspekte auf eine äquivalente Hierarchiestufe zu stellen.

2 Aufgabenstellung und Aufbau der Arbeit

Zur Ausarbeitung und Beantwortung der Forschungsfragen wird auf ein anerkanntes Designmodell aus der Produktentwicklung zurückgegriffen. Dieses Modell wird in Kapitel 2.3 vorgestellt, die Inhalte der vorliegenden Arbeit an den einzelnen Modellschritten gespiegelt. In Kapitel 2.1 wird als erster Schritt des Modells die Forschungslücke aufgezeigt und in Abschnitt 2.2 die sich daraus ergebenden Forschungsfragen abgeleitet. Das Konzept zur Beantwortung der Forschungsfragen und die gewählten Verfahren für die einzelnen Teilaspekte werden in Abschnitt 2.3 detailliert ausgearbeitet und vorgestellt. Die Zuordnung der Bearbeitungsschritte zu den einzelnen Kapiteln der Ausarbeitung wird in Kapitel 2.4 dargelegt.

2.1 Forschungslücke

Insbesondere bis in die 1980er Jahre standen bei Industriekrananlagen vor allem die Bemessung des Tragwerks und der Antriebe im Fokus der Wissenschaft [Kör-1965, Kör-1965, Hei-1976, Köp-1980, Kos-1980, Kos-1988], genauso wie in jüngerer Vergangenheit die Herstellungskosten für Krananlagen [Gol-2004]. Im Vordergrund beim Bau einer neuen Krananlage stehen heute vor allem bauliche Aspekte, Belange der Bedienung und Automatisierung. Ökologische Belange wie Energieeffizienz werden zwar als wichtiger werdend angesehen [o.V-2010b, Rep-2014], sind allerdings im Augenblick noch nicht integraler Bestandteil in der Planung bei einer Krananlage. In dieser Hinsicht erfolgt die Formulierung der Forschungslücke, die im Rahmen dieser Arbeit geschlossen werden soll.

„Bisher existiert kein allgemein anerkanntes Vorgehensmodell, mit dem sowohl ökologische als auch ökonomische Aspekte hinsichtlich der Auswahl der Antriebstechnik bei der Investition in eine neue Industriekrananlage gleichermaßen berücksichtigt werden können.“

Um die Komplexität dieser Fragestellung zu verdeutlichen, werden in Abbildung 2-1 die Wechselwirkungen zwischen den vom Antrieb beeinflussten Größen und den daraus resultierenden Auswirkungen auf den Kran dargestellt.

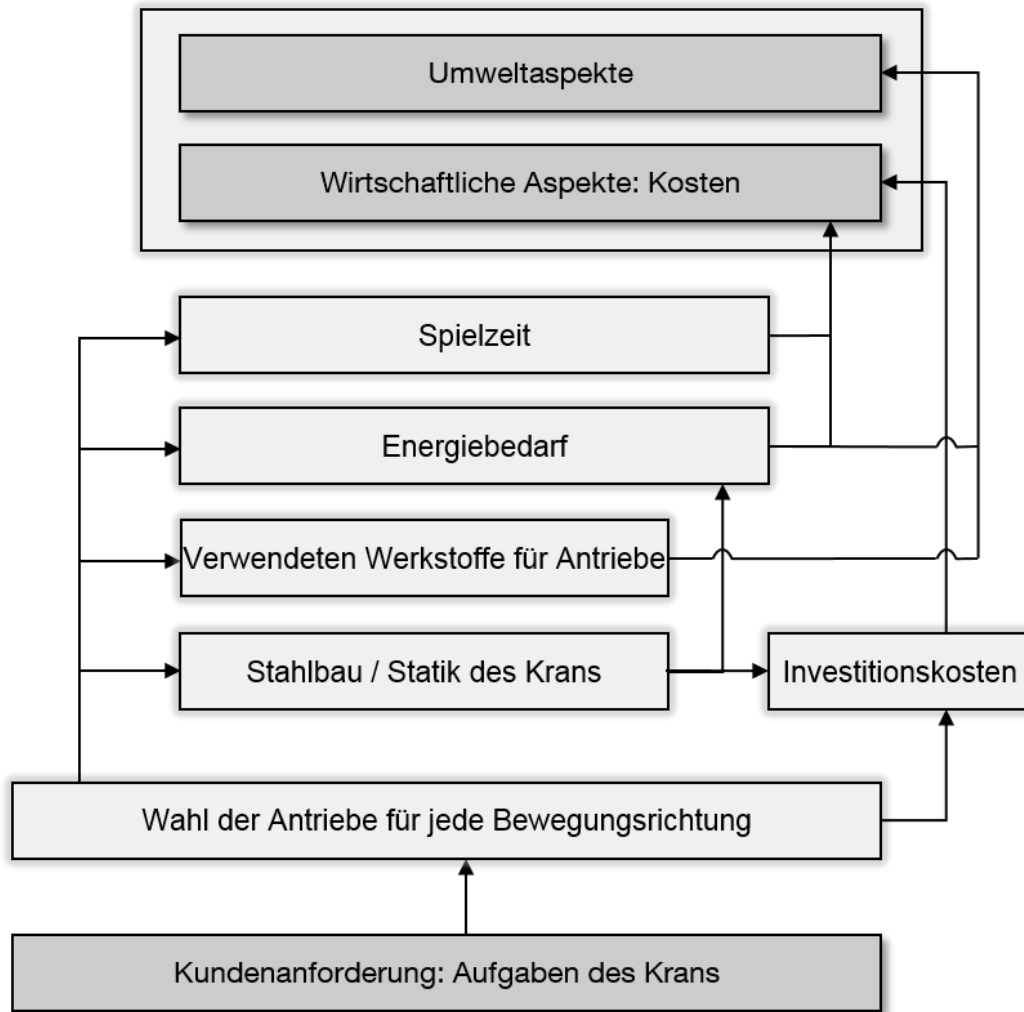


Abbildung 2-1: Wechselwirkungen und Einflussfaktoren durch Kranantriebe

Die maßgebliche Einflussgröße auf die Wahl der Antriebstechnik für eine Industriekrananlage stellen die Anforderungen des Kunden bzw. des Anwenders dar. Hier werden neben den Abmessungen des Krans auch die Aufgaben festgelegt, für die der Kran während seiner Nutzungsdauer verwendet wird. Als Aufgabe wird die Definition aus [DIN EN 13001-1] zu Grunde gelegt. Demnach ist eine Aufgabe „eine spezielle Kombination von Krankonfiguration und Abfolge von beabsichtigten Bewegungen“ [DIN EN 13001-1]. Charakterisiert werden die Aufgaben durch die Wege bzw. Drehwege entlang der einzelnen Bewegungsrichtungen und die entsprechende Last, die zusammengefasst über alle Kranaufgaben das Lastkollektiv ergibt. Mithilfe dieser Daten und der erforderlichen Arbeitsgeschwindigkeiten erfolgt die Auslegung des Antriebs sowohl nach mechanischen als auch thermischen Gesichtspunkten [DIN EN 14492-2].

Die Ausführung der Antriebe in technischer Hinsicht unterscheidet sich in mehreren Aspekten, was sowohl die anfallenden Kosten für Anschaffung und Betrieb, als auch

die ökologischen Auswirkungen betreffend anbelangt. In aller Regel sind Umrichter-Antriebe in der Anschaffung teurer als direkt am Netz betriebene Maschinen, was zunächst für ein größeres Investitionsvolumen sorgt [Gol-2012]. Dabei ist die Mehr-Investition auch davon abhängig, welche Umrichtertechnik installiert wird. Soll beispielsweise eine zusätzliche Rückspeiseeinrichtung vorgesehen werden, erhöht dies die Anschaffungskosten nochmals [Bra-2016a]. Zum anderen hängt der Anschaffungspreis von der Baugröße des Motors ab. Durch neue Entwicklungen wie die Nutzung des Feldschwächebereichs ergeben sich geringere Mehrpreise gegenüber den am Netz betriebenen Maschinen [Gol-2012].

Mannigfache Antriebskonzepte, die in Industriekrananlagen eingesetzt werden, beeinflussen den Kran in dessen Leistungsfähigkeit maßgeblich. Die unterschiedlichen Charakteristika bezüglich des Anlaufverhaltens der eingesetzten Antriebssysteme beeinflussen die Einwirkungen auf das Tragwerk und damit dessen Statik. Ein sehr dynamisch anlaufender Antrieb beansprucht das Tragwerk mehr, als es mit einem sanft anlaufenden Antrieb der Fall ist. Dies wurde in den einschlägigen Regelwerken zur Dimensionierung bereits berücksichtigt [DIN EN 15011].

Hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen bei der Produktion unterscheiden sich die Antriebe auch hinsichtlich der eingesetzten Materialien. Umrichter-Antriebe weisen aufgrund der verbauten Elektronikkomponenten einen diversifizierteren Materialmix auf, als Motoren, die direkt am Netz betrieben werden. Dadurch werden zum einen die ökologischen Auswirkungen bei der Produktion maßgeblich beeinflusst, aber auch der Energiebedarf während der Nutzung des Krans. Umrichtergespeiste Antriebe unterscheiden sich sowohl im Energiebedarf als auch in der Rückspeisefähigkeit von direkt am Netz betriebenen Antrieben [Bra-2016a]. Ähnliche Auswirkungen ergeben sich auch am Ende der Lebensdauer bei der Entsorgung bzw. beim Recycling der Komponenten, da auch hier Unterschiede zwischen den einzelnen Materialien zu erwarten sind.

Während der Nutzung ergeben sich durch die Wahl unterschiedlicher Antriebskonzepte Differenzen in der Leistungsfähigkeit, die sich vor allem in der Spielzeit jeder Aufgabe äußert. Ein erster Vergleich hierzu wurde in [Gol-2012] bei Hubwerken vorgestellt. Bei den Fahrtrieben für die Katze oder die Kranbrücke kann bei Umrichter-Antrieben zusätzlich eine Lastpendeldämpfung installiert werden, die sich günstig auf die Spielzeit auswirkt [VDI 4468]. Mit einer Verbesserung der Spielzeit einhergehend sinken die Kosten für den Personaleinsatz für jedes Arbeitsspiel mit dem Kran, sodass sich hier Investitionsmehrkosten beim Antrieb auf längere Sicht hin amortisieren können.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass sich die denkbaren Antriebe für das Kranhubwerk bzw. die Fahrtriebe hinsichtlich der technischen Ausführung deutlich unterscheiden. Dies bedingt folglich Unterschiede bei den Kostentreibern entlang des gesamten Lebenszyklus eines Krans. Im Rahmen dieser Arbeit gilt es ein Vorgehensmodell zu entwickeln, das diese Unterschiede aufgreift und zu einer optimalen Wahl der Antriebstechnik für die individuellen Kundenbelange beiträgt.

2.2 Ableitung der Forschungsfragen

Auf Basis der in Kapitel 2.1 ausgearbeiteten Forschungslücke werden in diesem Abschnitt die übergeordnete Forschungsfrage und die untergeordneten Fragestellungen für die einzelnen Teilaspekte abgeleitet. Um der Komplexität der Fragestellung angemessen begegnen zu können, erfolgt eine Aufteilung der übergeordneten Forschungsfrage in Teilfragestellungen, für deren Beantwortung jeweils die entsprechenden Berechnungsverfahren und Werkzeuge systematisch ausgewählt werden. Die Ableitung konkreter Forschungsfragen leistet einen ersten Beitrag zur Strukturierung der Aufgabenstellung und definiert eine Hierarchisierung der Teilprobleme. Aufbauend auf der in Abschnitt 2.1 aufgezeigten Forschungslücke kann die Hauptfragestellung der Arbeit folgendermaßen formuliert werden:

„Wie kann eine gleichermaßen ökonomisch als auch ökologisch sinnvolle Auswahl der Antriebstechnik in Industriekrananlagen gewährleistet werden?“

Die Hauptfragestellung richtet sich damit zunächst an zwei Aspekte, die in aller Regel auf Basis unterschiedlicher Einheiten gemessen werden. Um die Komplexität der Fragestellung greifbarer und beherrschbarer zu gestalten, erfolgt die Aufteilung in Teilfragestellungen. Dieses Prinzip erlaubt zunächst eine gesonderte und jeweils umfassende Betrachtung ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte, die schlussendlich auf eine gemeinsame Basis gestellt werden müssen. In dieser Hinsicht erfolgt die Formulierung der ersten Teilfragestellung nach der rein (betriebs-) wirtschaftlichen Bewertung wie folgt:

„Wie kann die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Antriebstechniken für Industriekrananlagen in einem ökonomischen Blickwinkel charakterisiert und quantifiziert werden?“

Diese Teilfragestellung richtet sich im Speziellen an die ökonomischen Aspekte aus Sicht des Kranbetreibers. Neben der Anschaffung des Krans und den damit auftretenden Investitionskosten müssen weitere Kosten im Laufe des Lebenswegs einer

Krananlage berücksichtigt werden. So spielen neben der Investition auch die Kosten bei der Nutzung der Anlage oder für Wartung und Instandhaltung eine zentrale Rolle. Bei der Nutzung des Krans unterscheiden sich die unterschiedlichen Antriebe zum einen im Energiebedarf und zum anderen maßgeblich in der Zeit, die für ein Arbeitspiel benötigt wird. Daraus werden Unterschiede in den Personalkosten für den Kraneinsatz und den Energiekosten sichtbar. Da sich die Antriebe aber auch in Ihrem Anlaufverhalten unterscheiden, unterziehen sie das Tragwerk des Krans unterschiedlich großen Belastungen, sodass sich hier Auswirkungen auf den Anschaffungskosten des Krans ergeben können.

Neben den wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollen mithilfe des entwickelten Vorgehensmodells auch die ökologischen Aspekte hinreichend adressiert werden. Dieser Anforderung wird mit der zweiten Teilfragestellung Rechnung getragen, die sich folgend formulieren lässt.

„Wie unterscheiden sich verschiedene Antriebe in Industriekranen hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen und mit welchen Verfahren ist eine Quantifizierung erreichbar?“

Die zweite Teilfragestellung adressiert das ökologische Profil einer Krananlage mit dem Fokus unterschiedlicher Antriebstechnik. Wie in Kapitel 3 ausführlicher erläutert wird, unterscheidet sich die verbaute Antriebstechnik von Kranen mitunter sehr deutlich zum einen hinsichtlich der verwendeten Materialien und zum anderen bei der Benutzung. Folglich muss an dieser Stelle ein Verfahren zur Quantifizierung ausgewählt werden, die sämtliche Lebenswegabschnitte in Betracht zieht. Ziel dabei ist es, sämtliche Umweltwirkungen zu quantifizieren. Hinsichtlich der Nutzungsphase sind vor allem in [Bru-2010, Bru-2013] bereits erste Ansätze und Ergebnisse zu finden. Diesen Ansätzen ist gemein, dass sie auf numerischen Simulations- und Berechnungsmodellen basieren und so eine Vorhersage des Energiebedarfs auf Basis unterschiedlicher Eingangsparameter ermöglichen.

Da ökonomische Belange in aller Regel in Geldeinheiten bewertet werden, ökologische Aspekte wie Treibhausgasausstoß aber auf einer SI-Einheiten-konformen Basis, muss in der letzten Teilforschungsfrage eine einheitliche Basis erarbeitet werden, mit der diese beiden – zunächst unvereinbar scheinenden Größen – zusammen betrachtet werden können. Hierauf zielt in letzter Konsequenz die letzte Teilfragestellung ab, die folgendermaßen formuliert wird.

„Wie muss eine Basis gestaltet sein, mit der sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte unterschiedlicher Antriebe in Industriekranen einheitlich miteinander verglichen werden können?“

Hierzu bietet es sich an, Verfahren zu untersuchen, die entweder die ökologischen Aspekte, (z.B. Treibhausgas-Austoß, der damit verbundenen Klimaerwärmung und der daraus resultierenden Konsequenzen) in Geldeinheiten und damit in ein Schadensäquivalent überführen oder beide Aspekte (ökonomische und ökologische auf eine neutrale Einheit stellt. Die Resultate der ökonomischen Betrachtung auf eine SI-Einheiten-konforme Basis zu bringen scheint wenig sinnvoll, zumal die Ergebnisse dadurch weniger anschaulich und damit auch weniger praxisrelevant werden. Zur Bearbeitung der Forschungsfragen wird in Abschnitt 2.3 ein allgemein anerkanntes Vorgehensmodell vorgestellt, mit dessen Hilfe sich das Gesamtkonzept entwickeln lässt.

2.3 Vorgehensweise

Um eine zielgerichtete und konsequente Beantwortung der Forschungsfragen zu gewährleisten, ist es sinnvoll, auf eine bewährte und anerkannte Vorgehensweise zurückzugreifen. Im Rahmen dieser Arbeit orientiert sich das Vorgehen an einem Modell aus der Produktentwicklung nach [Fre-1998], das eine Einteilung in Teilfragestellungen und so die Beantwortung aller Teilfragestellungen in aufeinander folgenden Schritten ermöglicht. In Abbildung 2-2 ist das Schema des Design-Prozess nach [Fre-1998] in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt.

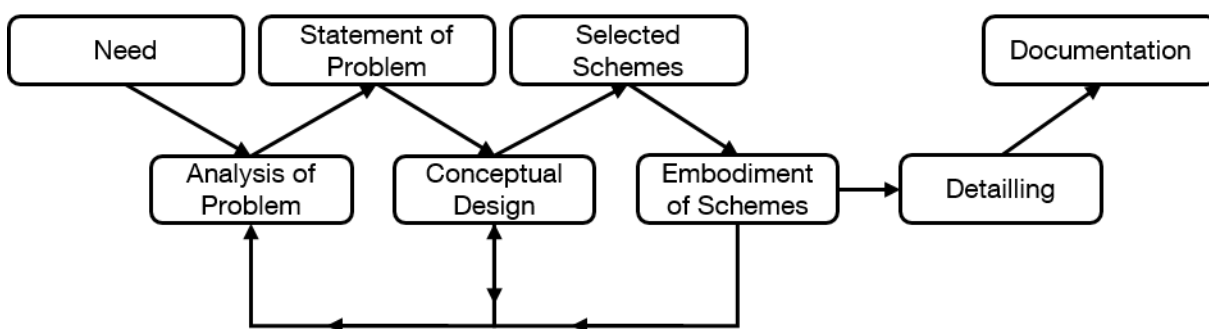


Abbildung 2-2: Design Prozess in Anlehnung an [Fre-1998]

In diesem Modell gilt es im ersten Schritt „Need“, den Bedarf für eine Entwicklung oder im vorliegenden Fall für die Aufnahme einer Forschungsarbeit zu identifizieren. Basis hierfür ist die Ausarbeitung einer Forschungslücke, für die bisher noch keine allgemein anerkannte Lösung existiert. Im Schritt „Analysis of Problem“ sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Bestandteile der Forschungslücke analysiert

und am Ende dieses Schritts im Zustand „Statement of Problem“ die Forschungsfragen in allen Details aufgestellt werden. Auf Basis dieser Forschungsfragen wird während des „Conceptual Design“ der Lösungsraum für die Beantwortung aller Teilfragestellungen und damit der Forschungsfrage selbst aufgespannt. Die Auswahl der geeigneten Verfahren für jeden Teilaspekt geschieht im Rahmen der Bewertung des Erfüllungsgrades anhand vorher definierter Kriterien. Am Ende dieses Arbeitsschritts stehen die ausgewählten Lösungen für die Forschungsfragen fest, womit der Zustand „Selected Schemes“ hergestellt ist. Darauf aufbauend erfolgt die Ausarbeitung der einzelnen Lösungsansätze, wobei im Fall der vorliegenden Arbeit vor allem auf numerische Modellierungs- und Simulationswerkzeuge zurückgegriffen wird. Die aufgestellten Lösungsansätze bzw. Modelle werden detailliert im nächsten Schritt aufgearbeitet und die Modelle validiert (Schritt „Detailling“). Die Auswertungen und Ergebnisse der Modelle werden im Rahmen des Schritts „Documentation“ dargestellt und abgefasst. In den einzelnen Arbeitsschritten sind immer Rücksprünge und damit eine Prüfung der Arbeiten des vorherigen Schrittes möglich, sodass eine bedarfsgerechte Detaillierung der Ansätze und Modelle an die Forschungsfragen gewährleistet wird.

2.4 Aufbau der Arbeit

Auf Basis des in Abschnitt 2.3 vorgestellten Designprozesses nach French folgt in diesem Kapitel die Ableitung der Struktur und des Aufbaus der Arbeit. Abbildung 2-3 zeigt die Gliederung in die einzelnen Kapitel.

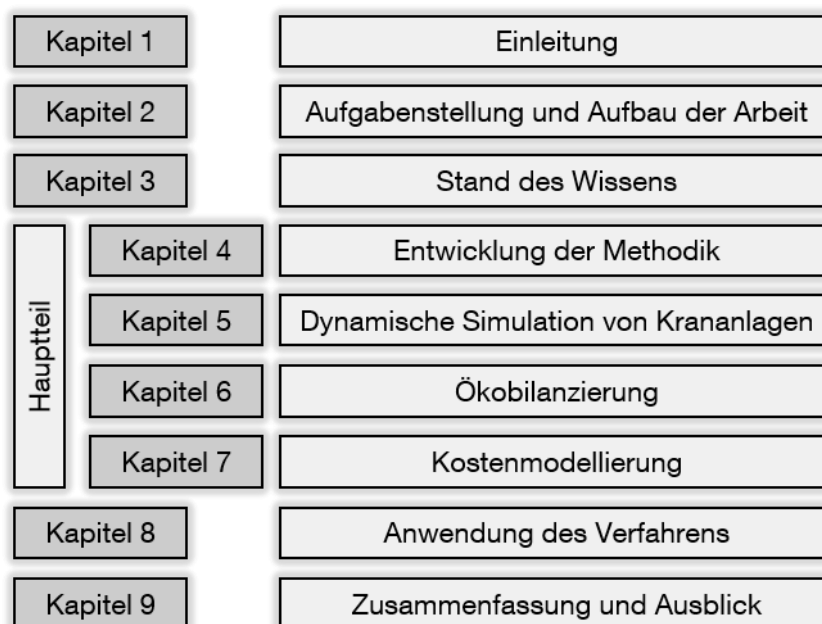


Abbildung 2-3: Aufbau der Arbeit

In der Einleitung in Kapitel 1 werden die Problemstellung und die Zielsetzung der Arbeit vorgestellt. Dabei wird auf Ansätze zur Planung und Ausrüstung von Krananlagen und generell auf die allgemeinen Trends und Entwicklungen in der Intralogistik eingegangen, insofern sie das Thema der vorliegenden Arbeit betreffen.

In Kapitel 2 werden zunächst die Forschungslücke aufgezeigt und darauf aufbauend, die Forschungsfrage abgeleitet. Diese Forschungsfrage wird in weitere Teilfragestellungen untergliedert, um eine zielgerichtete Beantwortung zu ermöglichen. Das Konzept, welches zur strukturierten Beantwortung der Teilfragestellungen innerhalb der vorliegenden Arbeit zu Grunde liegt, basiert auf dem Design-Prozess nach French [Fre-1998], der in diesem Abschnitt vorgestellt wird. Darauf basierend werden die einzelnen Bausteine bzw. Module, die der ökonomischen und ökologischen Bewertung von Kranantrieben dienen, entwickelt. Zudem erfolgt durch das Aufzeigen der Forschungslücke und das Aufstellen der Forschungsfragen die Bearbeitung des Schrittes „Analysis of Problem“.

Kapitel 3 gibt eine Übersicht zum Stand der Technik und der Wissenschaft, der als Basis für die darauf aufbauenden Module verwendet wird. Im Wesentlichen wird in diesem Kapitel auf die Themen Industriekrananlagen und deren Verwendung und die eingesetzte Antriebstechnik eingegangen. Um die Umweltwirkungen, die auf dem gesamten Lebenszyklus von Krananlagen entstehen, bewerten zu können, werden entsprechende Verfahren vorgestellt. Zudem wird auf unterschiedliche Herangehensweisen zur ökonomischen Bewertung von Investitionsgütern eingegangen, deren Grundlagen ebenso einen Teil dieses Abschnitts darstellen. Das Kapitel zum Stand des Wissens schließt mit einem Überblick über die für die Gesamtbewertung denkbaren Ansätze.

In Kapitel 4 werden die Strukturierung des gesamten Produktlebenszyklus und die in jeder Lebensphase anfallenden ökonomisch und ökologisch relevanten Aspekte vorgestellt. Darauf aufbauend werden mithilfe einer vereinfachten Nutzwertanalyse die Verfahren zur Beantwortung der Teilfragestellungen und damit auch der Gesamtforschungsfrage ausgewählt und abschließend in eine durchgängige Vorgehensweise integriert. Im Design-Process nach French spiegelt dieses Kapitel den Schritt „Conceptual Design“ wider.

In den Kapiteln 5 bis 7 wird der Aufbau der einzelnen Module zum Vergleich unterschiedlicher Antriebe in Industriekrananlagen beschrieben. In Kapitel 5 wird die Modellierung einer Brückenkrananlage als Mehrkörpermodell dargestellt und auf die Abbildungsansätze der wesentlichen Komponenten des Krans eingegangen. Mit diesem Mehrkörpermodell sollen vor allem Studien zu Spiel- und Umschlagzeiten unter

dem Aspekt unterschiedlicher Antriebssysteme durchgeführt werden. In Kapitel 6 werden die wichtigsten Aspekte der Ökobilanzierung von Brückenkrananlagen erläutert und der Einfluss unterschiedlicher Antriebe untersucht. Im letzten Teilmodul – der Kostenmodellierung in Kapitel 7 – wird das Modell zur Bewertung des ökologischen und ökonomischen Profils für unterschiedliche Antriebsvarianten einer Krananlage vorgestellt. Mit dem Aufstellen der Modelle und der Ausarbeitung der notwendigen Berechnungsansätze wird im Design-Modell nach French der Schritt Embodiment of Schemes aus- und gleichzeitig die Detaillierung (Detailing) durchgeführt.

In Kapitel 8 wird das entwickelte Modell und dessen Funktionsweise anhand eines Fallbeispiels vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert. Basierend darauf ist es möglich, eine gleichermaßen ökonomische wie auch ökologische Bewertung und damit Auswahl von Antrieben für Industriekrananlagen durchzuführen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung, einer kritischen Würdigung der erzielten Ergebnisse sowie einem Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten in Kapitel 9. Diese letzten beiden Abschnitte stellen die Dokumentation der Ergebnisse dar und entsprechen damit dem Schritt Documentation im Design-Process nach French.

3 Stand des Wissens

Ausgehend von den in Kapitel 2 entwickelten Forschungsfragen werden in diesem Abschnitt die Grundlagen für die Entwicklung des Gesamtkonzepts und der Teilmodule gelegt. Hierzu zählen insbesondere eine Begriffsdefinition von Industriekrananlagen, die den Betrachtungsrahmen für die vorliegende Arbeit aufzeigen soll. Dies umfasst zum einen die betrachteten Kranbauarten, zum anderen die eingesetzte Antriebstechnik sowie deren maßgebliche Unterschiede. Weitere Aspekte im Stand der Technik und der Wissenschaft adressieren Ansätze und Modelle einerseits für die ökologische und andererseits für die ökonomische Bewertung unterschiedlicher Antriebe in Industriekrananlagen. Die Auswahl der geeigneten Ansätze erfolgt an späterer Stelle in Kapitel 4.2.

3.1 Industriekrananlagen

Krane bzw. Hebezeuge zählen gemäß ihrer Arbeitsweise zu den Unstetigförderern, die Lasten in mehreren Richtungen translatorisch in einem begrenzten Raum bewegen [Sch-1994, Pfe-1998]. Häufig anzutreffen sind die Bauarten Brückenkrane, Portalcrane, Wandlaufkrane und Wand- bzw. Säulenschwenkkrane. Sonderbauformen wie der Kabelkran sind hingegen im innerbetrieblichen Umfeld nur sehr selten vorzufinden und nicht Gegenstand dieser Arbeit. Im Kapitel 3.1.2 werden Aufbau und Anwendungsgebiete im Sinne dieser Arbeit dargelegt; in Abschnitt 3.2 wird auf den aktuellen Stand der Antriebstechnik eingegangen.

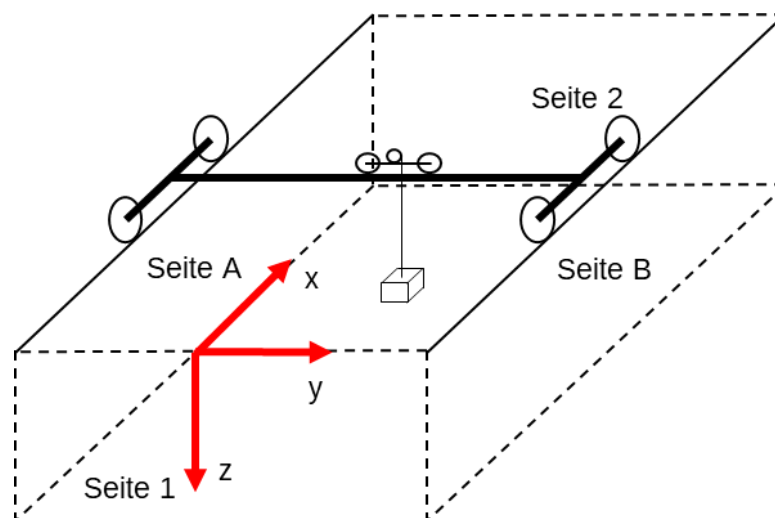


Abbildung 3-1: Festlegung der Basisgeometrie

Der Ursprung des Koordinatensystems wird in die Mitte des Arbeitsraums gelegt, in dem der Kran arbeitet. Die x-Achse zeigt in die Richtung des Kranfahrens, die y-Achse in Richtung des Katzfahrens und die z-Achse kennzeichnet die Hub- und Senkbewegungen des Lasthakens. Die Bezeichnungen der einzelnen Seiten des Arbeitsraums (Seite A und B bzw. Seite 1 und 2) werden ebenso in Abbildung 3-1 dargestellt.

3.1.1 Klassifizierung und Begriffsdefinition

Im Rahmen dieser Arbeit werden als Industriekrananlagen alle elektrisch betriebenen, ortsfesten Krane bezeichnet, die über einen zylindrischen oder quaderförmigen Arbeitsraum verfügen und für Montage- und Logistikprozesse im industriellen Umfeld eingesetzt werden. Turmdrehkrane oder Fahrzeugkrane, deren Haupteinsatzgebiete auf Baustellen zu finden ist und die den Arbeitsort häufig wechseln [Sch-1998], zählen nicht zu den Industriekranen. Die Klassifizierung kann zum einen bauartbezogen und zum anderen anwendungsbezogen durchgeführt werden. Hinsichtlich der Bauart und der daraus resultierenden Arbeitsräume wird im Wesentlichen zwischen Brückenkran, Portalkran, Kabelkran und Ausleger-(Dreh-)Kran unterschieden [Sch-1998]. In Abbildung 3-2 ist eine schematische Übersicht über die einzelnen Kranbauarten mit quaderförmigen Arbeitsräumen dargestellt.

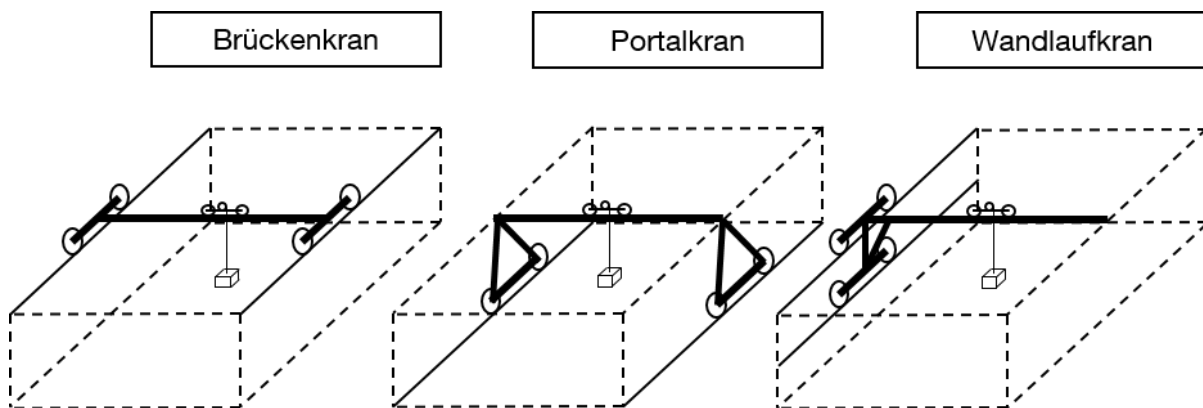


Abbildung 3-2: Krane mit quaderförmigem Arbeitsraum in Anlehnung an [Sch-1998]

Die am weitesten verbreitete Bauart von Kranen mit quaderförmigem Arbeitsraum ist der Brückenkran, bei dem die Kranbahn aufgeständert ist. Der Kran läuft auf der Kranbahn, die üblicherweise als Walzprofilträger ausgeführt ist und den Träger für die eigentliche Kranschiene darstellt. Die Bemessung der Kranbahn und der Kranschiene-Laufrad-Kombination erfolgen nach den Regelwerken des Eurocode 3, insbesondere nach [DIN EN 1993-6] bzw. nach [DIN EN 13001-3-3]. Beim Portalkran wird die Schiene am Boden befestigt und nur die Kranbrücke aufgeständert. Dabei lässt sich eine Fest-Los-Lagerung realisieren, indem eine Stütze als Feststütze und

die zweite Stütze als Pendelstütze ausgeführt wird. Eine Mischform aus beiden Bauweisen stellt der Halbportalkran dar, bei dem nur eine Seite mit einer Stütze versehen und die Kranbahn an der zweiten Seite des Krans aufgeständert ist. Der Konsol- oder Wandlaufkran ist als Kragträger ausgeführt und verfährt auf zwei Kranbahnen, die an einer Seite des Gebäudes befestigt sind. Neben diesen Kranbauarten, die einen quaderförmigen Arbeitsraum aufweisen, existieren im industriellen Umfeld weitere Bauformen mit zylindrischem Arbeitsraum, in Abbildung 3-5 schematisch dargestellt.

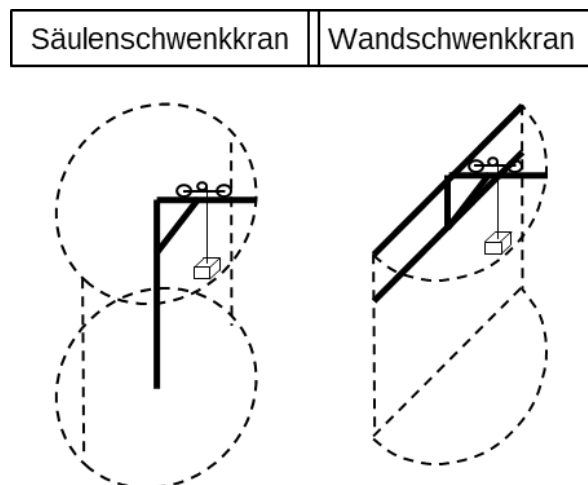


Abbildung 3-3: Krane mit zylindrischem Arbeitsraum in Anlehnung an [Sch-1998]

Zu den Vertretern dieser Kategorie zählen insbesondere die Säulen- und Wandschwenkkrane, wobei einschränkend bei den Wandschwenkkranen nur der halbe Arbeitsraum zur Verfügung steht. Aufgebaut ist ein Säulenschwenkkran aus einer stehenden Säule und einem daran befestigten Kragträger, an dem eine Laufkatze verfährt. Bei kleinen Kranen ist dieses Verfahren meist manuell durchzuführen, bei größeren Varianten ist die Laufkatze elektrisch betrieben. Der Träger ist i.d.R. als Walzprofilträger ausgeführt. Neben den genannten Bauarten existieren weitere Konzepte in der Industrie, die an dieser Stelle lediglich ergänzend nach [DIN 15001-1] aufgeführt sind:

- Auslegerdrehkrane
- Brückenkrane oder Halb- bzw. Vollportalkran mit Drehlaufkatze
- Halb- bzw. Vollportalauslegerkran
- Kabelkrane
- Derrickkrane

Die Anwendungsgebiete der hier betrachteten Kranbauarten sind äußerst vielfältig. Eine erste Einteilung liefert die Norm DIN 15001-2 aus dem Jahr 1975. Neben der

allgemeinen Anwendung als Fördermittel in der Intralogistik werden dort die Einsatzgebiete Werkstätten und übergeordnet die Schwerindustrie mit den entsprechenden Anwendungen Hüttenwerkskran, Walzwerkskran oder Schmiedekran genannt [DIN 15001-2]. Eine vollständige Auflistung der Anwendungsgebiete von Kranen kann [Rei-1979] entnommen werden.

3.1.2 Aufbau und technische Ausrüstung

In der Vergangenheit konnten sich unterschiedliche Konzepte für das Tragwerk, die Antriebe und die Steuerung von Industriekrananlagen etablieren. Die Aufgaben der einzelnen Baugruppen sind aber unabhängig von der technischen Realisierung äquivalent zu sehen, sodass die folgenden Erläuterungen am Beispiel des Einträger-Laufkrans vorgenommen und in dieser Form auch auf andere Bauarten von Industriekrananlagen zutreffen und direkt übertragen werden können. Die Klassifizierung erfolgt in erster Linie nach der maximalen Tragfähigkeit, die in den meisten Fällen auf Normzahlreihen (vgl. [DIN 323, VDI 2388]) basiert. In Abbildung 3-4 ist der Aufbau einer Brückenkrananlage zur Erläuterung der wesentlichen Baugruppen dargestellt.

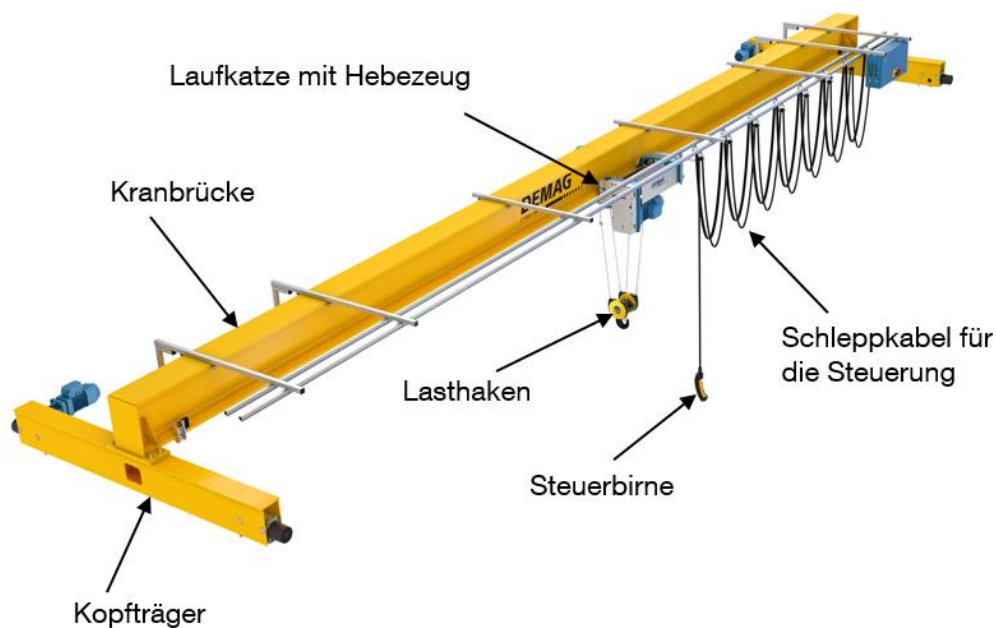


Abbildung 3-4: Aufbau Einträger-Laufkran (Bildquelle [DEM-2013])

Hauptbestandteil einer Brückenkrananlage ist die Kranbrücke als tragendes Bauelement. Zum Einsatz kommen in Abhängigkeit von der Spannweite und der maximalen Traglast Ein- oder Zweiträgerkonstruktionen, die als Walzprofilträger oder ge-

20

schweißte Kästen ausgeführt sind. Neuere Konstruktionsansätze für Kranbrücken setzen das Tragwerk aus einzelnen V-förmigen Profilen zusammen und erreichen dadurch günstige Kosten bei verringertem Konstruktionseigengewicht [DEM-2016a]. Einen weiteren Ansatz, der den Aufbau der Kranbrücke als modulare Fachwerkstruktur verfolgt, stellt [Bol-2017] vor. Entlang der Kranbrücke verfährt die Laufkatze mit dem Hebezeug. Als Hebezeuge kommen in den meisten Fällen elektrisch betriebene Seil- bzw. Kettenzüge oder bei größeren Hublasten offene Windwerke zum Einsatz. Mithilfe eines Stirnrad- oder eines Planetengetriebes wird das Moment vom Hubwerksmotor auf die Seiltrommel übertragen. Der Aufbau des Seiltriebs richtet sich in erster Linie nach der Hublast und der zugelassenen Lastwanderung in Trommelrichtung. Als Aufnahme für Anschlagmittel kommen in den meisten Fällen Lasthaken oder Greifer zum Einsatz. An beiden Enden der Kranbrücke werden die Kopfträger montiert, welche die Antriebselemente für das Verfahren der Kranbrücke aufnehmen. Neben der hier gezeigten Möglichkeit, den Träger auf den Kopfträgern zu montieren, kann die Kranbrücke auch seitlich an den Stegblechen verschraubt werden. Während für die Kranbrücke im unteren Traglastbereich vornehmlich Walzprofile zum Einsatz kommen, bestehen die Kopfträger aus verschweißten und verschraubten Blechen bzw. sind als Biegeteile ausgeführt. Die Bedienung des Krans erfolgt in den meisten Fällen rein manuell durch einen Mitarbeiter mithilfe einer Steuerbirne, die direkt über eine Verkabelung mit der Steuerung des Krans verbunden, oder als kabellose Fernbedienung ausgeführt ist. Bei größeren Kranen beispielsweise im Hüttenwerkseinsatz, ist auch die Bedienung aus einer Kranführerkabine heraus im Einsatz [Sch-1998]. Für detaillierte Beschreibungen der einzelnen Baugruppen wird an dieser Stelle auf eine umfangreiche Grundlagenliteratur zum Thema Fördertechnik und Kranbau verwiesen [Sch-1994, Pfe-1998, Sch-1998].

3.2 Stand der eingesetzten Antriebstechnik

Die Antriebstechnik in Industriekrananlagen hat sich in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt. Neben einer überschaubaren Anzahl an druckluftbetriebenen Hebezeugen werden die Mehrzahl der Krane mit elektrischen Antriebssystemen ausgerüstet [Rei-1979, Gol-2012]. Der Aufbau und die wesentlichen Komponenten eines Seilzugs werden diesbezüglich in Abbildung 3-5 dargestellt.

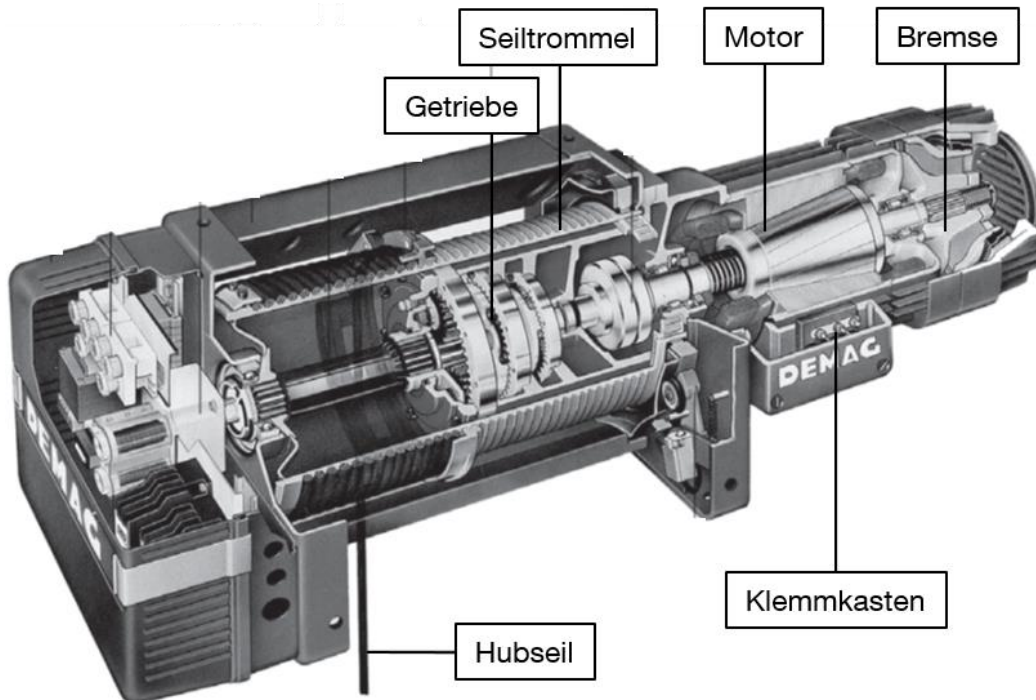


Abbildung 3-5: Aufbau eines Hubwerks, (Bildquelle: [Man-1999])

Neben der in diesem Fall dargestellten Ausführung des Läufers als Kegelläufer sind vor allem zylinderförmige Läufer im Einsatz. Direkt auf der Motorwelle sind die Bremse und der Lüfter angebracht. An den Motor schließt das Getriebe – in diesem Fall ein dreistufiges Planetengetriebe – an. Neben dieser Ausführung, in der Motor, Getriebe und Seiltrommel in einer Reihe angeordnet sind, gibt es auch eine C-förmige Bauweise, mit der günstigere Katzanfahrmaße realisiert werden können und die mit einem Stirnradgetriebe ausgerüstet ist. An das Getriebe schließt die einlagig bewickelte Seiltrommel mit den entsprechenden Rillen zur Aufnahme des Hubseils an. Die Energieversorgung des Motors erfolgt direkt am Klemmkasten, von dem aus die Leistung an die Statorwicklung weitergegeben wird. Die eingesetzten Technologien hinsichtlich der Motoren unterscheiden sich allerdings in ihren Eigenschaften sehr deutlich voneinander.

3.2.1 Eingesetzte Technologien

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die wichtigsten Technologien gegeben, die auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtet werden. Die dabei adressierten Aspekte gehen auf die Richtlinie [VDI 3652] des Vereins Deutscher Ingenieure zurück, wobei an dieser Stelle nur Drehstromasynchronmotoren mit Käfigläufer analysiert werden, die nach [Gol-2012] den größten Anteil an den elektrischen Antriebssystemen für Krane ausmachen. In Abbildung 3-6 sind entsprechend der Aufbau ei-

nes Drehstromasynchronmotors und die entsprechenden qualitativen Kennlinien abgebildet.

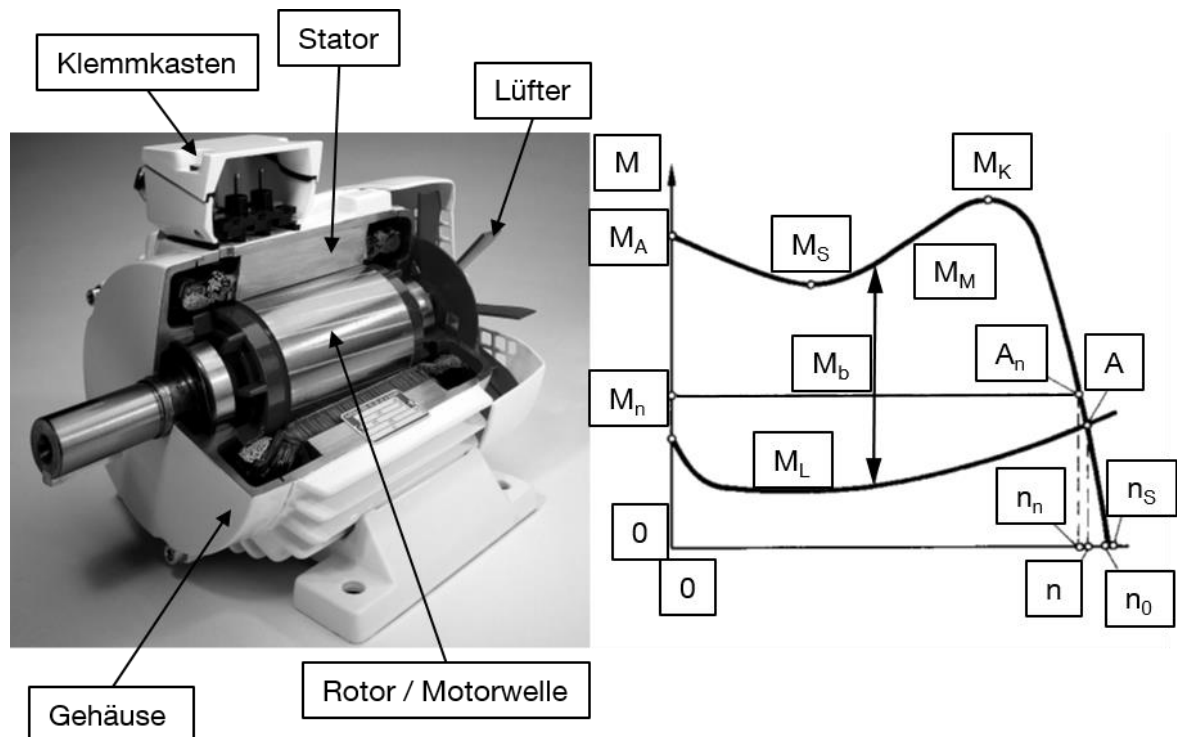


Abbildung 3-6: Aufbau eines Drehstromasynchronmotors und qualitative Kennlinien [Roc-1996]

Zentrales Element des Motors ist der Stator, der in das Gehäuse integriert ist und über die Anschlüsse am Klemmkasten mit Drehstrom versorgt wird. Die Polpaarzahl des Stators bestimmt zusammen mit der anliegenden Frequenz die Synchrondrehzahl n_S des Motors. Für einen zweipoligen Motor ergibt sich damit beispielsweise bei einer Netzfrequenz von 50 Hz eine Synchrondrehzahl von $n_S = 3000$ 1/min. Im Gehäuse ist die Welle / der Rotor des Motors gelagert. Bei dem hier dargestellten Kurzschlussläufer sind die Läuferstäbe an den Enden mithilfe zweier Ringe kurzgeschlossen. Neben dem Standardwerkstoff Aluminium kann aus Gründen der Energieeffizienz auch Kupfer für den Rotor verwendet werden. Auf der Motorwelle sitzt ebenfalls der Lüfter, der für die Abfuhr der Wärme aus dem Gehäuse notwendig ist. Der Drehstromasynchronmotor ist eine sehr bewährte Technik, so dass es diese Motoren in Normbaugrößen zu kaufen gibt (vgl. bspw. [Len-2015]). Die Drehmomentkennlinie dieser Motorbauart ist charakterisiert durch das Anlaufmoment M_A im Stillstand, das bis zum Sattelmoment M_S abfällt und ihr Maximum im Kippmoment M_K erreicht. Das Nennmoment M_n wird bei Nenndrehzahl n_n erreicht. Infolge des bei diesen Motoren zum Drehmomentaufbau notwendigen Schlupfes kann die Synchrondrehzahl in der Praxis nicht erreicht werden [Fis-2016]. Die Beschleunigung des Antriebs wird durch die Differenz aus dem Motormoment und dem Lastmoment M_L erreicht. Im Folgen-

den wird auf die für den Kranbau maßgeblichen Motorbauarten und deren wesentliche Eigenschaften eingegangen.

– **Eintouriger Käfigläufermotor**

Bei diesem Motor wird die Drehzahl durch die Polpaarzahl und die Anschlussfrequenz festgelegt, wobei sich die Drehzahl nur schwach mit der Last ändert. Beim Senken ausreichend großer Lasten läuft der Motor im übersynchronen Bereich und speist die Leistung direkt in das Stromnetz zurück. Eine Anpassung der Drehzahl ist bei diesem Antrieb nicht möglich, was das Positionieren von Lasten im Vergleich zu anderen Antrieben erschwert. Rückwirkungen auf das Stromnetz ergeben sich aufgrund der hohen Anlaufströme. Eintourige Käfigläufermotoren gelten als äußerst robust und wartungsarm und zeichnen sich durch geringe Anschaffungskosten aus [Sch-1994].

– **Polumschaltbarer Käfigläufermotor / Käfigläufermotor mit Feingangmotor**

Polumschaltbare Motoren entsprechen in ihrer Funktionsweise normalen Käfigläufermotoren. Der wesentliche Unterschied im Aufbau besteht darin, dass im Stator zwei unterschiedliche Wicklungen verbaut sind und damit zwei unterschiedliche Drehzahlen realisierbar sind. Übliche Abstufungen dabei sind 2/12-polig für Hubwerke und 2/8-polig für Fahrwerke [DEM-2017a]. Damit lassen sich zwei unterschiedliche Arbeitsgeschwindigkeiten abbilden. Nachteilig wirkt sich der in der hochpoligen Wicklung ungünstige Wirkungsgrad auf den Energiebedarf des Motors aus [Fis-2016].

Beim Käfigläufermotor mit zusätzlichem Feingangmotor werden im Unterschied zum polumschaltbaren Antrieb zwei separate Motoren verbaut, die je nach Anforderung geschaltet werden. Dabei wirkt der Feingangmotor über ein mechanisches Feinganggetriebe auf die Welle des Hauptantriebs, der während dieser Zeit nicht bestromt wird. Durch diese Anordnung lassen sich wesentliche größere Unterschiede in den Arbeitsgeschwindigkeiten von Hauptgang und Feingang realisieren (Stellbereich bis 1:500 [DEM-2017a]) als es mit polumschaltbaren Motoren möglich wäre. Durch die Kombination der beiden Technologien sind insgesamt vier unterschiedliche Arbeitsgeschwindigkeiten realisierbar.

– **Geregelter Drehstromasynchronmotor**

Beim geregelten Drehstromantrieb wird dem Motor ein Frequenzumrichter vorgeschaltet. Dieser wandelt den Strom aus dem Netz zunächst mithilfe eines Gleichrichters in Gleichstrom um und anknüpfend mit einem Wechselrichter wieder in Drehstrom mit der gewünschten Frequenz. Hierdurch ist es mög-

lich eine stufenlose Anpassung der Arbeitsgeschwindigkeit an den Bedarf zu gewährleisten. Weitere zentrale Vorteile beim Einsatz von frequenzgeregelten Antrieben sieht *Mierke* [Mie-1995] vor allem in der besseren Positionierbarkeit von Lasten, geringen Anlaufverlusten, verminderten dynamischen Belastungen auf das Tragwerk und die Komponenten des Krans sowie in der Realisierbarkeit eines Schnellgangs. Allerdings geht der Einsatz der Umrichtertechnik auch immer mit höheren Investitionskosten einher, die durch den Verzicht auf eine polumschaltbare Maschine mit zwei Geschwindigkeiten nicht gänzlich kompensiert werden können. Zudem ist ein Umrichter nicht per se fähig, die beim Lastsenken anfallende Energie in das Stromnetz zurück zu speisen. Hierfür muss eine zusätzliche Rückspeiseeinrichtung integriert werden. Alternativ muss die Energie mithilfe eines Bremswiderstands in Wärme umgewandelt werden [Mie-1995]. Eine erste Kostenbilanz hinsichtlich der Energie- und der Anschaffungskosten für Rückspeiseeinheiten wird in [Bra-2016a] gezeigt. Zudem ist durch die Nutzung des sog. Feldschwächebereichs bei einem Umrichter-gespeisten Antrieb auch die Abbildung eines Schnellgangs für den Leerhakenbetrieb oder geringe Lasten realisierbar. Hierzu wird der Motor oberhalb der Nennfrequenz bei Nennleistung betrieben, so dass sich ein geringeres Drehmoment einstellt, das aber für kleine Lasten ausreicht. Die Grenze für diesen Betrieb bildet die Frequenz, bei der das Kippmoment unter das vom Motor lieferbare Drehmoment abfällt und der Motor damit kippen würde [SEW-2001]. Zentraler Vorteil dieses Konzeptes besteht darin, dass kleine Lasten deutlich schneller bewegt werden können und damit die Kosten für den Kranbediener geringer ausfallen, als mit einem Antrieb, der nur bis zur Nenngeschwindigkeit betrieben werden kann [Gol-2012].

3.2.2 Bemessung der Triebwerke in Industriekrananlagen

Bei der Mehrzahl der in Serienhebezeugen eingesetzten Motoren handelt es sich um Drehstromasynchronmotoren mit Käfigläufer. Andere Bauarten wie Synchronmotoren spielen nur eine untergeordnete Rolle [Gol-2012]. Zur Bemessung der Triebwerke – insbesondere der Motoren – sind zahlreiche technische Regelwerke verfügbar.

Zur Einstufung der Triebwerke von Serienhebezeugen und Kranen mit Serienhebezeugen wird in erster Linie die FEM-Richtlinie 9.511 [FEM- 9.511] herangezogen. Die Einstufung richtet sich nach den beiden Faktoren Laufzeitklasse und Lastkollektiv. Die Laufzeitklasse dient der Einordnung des Triebwerks in Abhängigkeit der mittleren täglichen Laufzeit. Das Lastkollektiv eines Triebwerks kennzeichnet, zu welchen Zeiteinheiten ein Triebwerk seiner höchsten oder geringeren Beanspruchungen ausgesetzt ist. In Abbildung 3-7 sind die in [FEM- 9.511] definierten Lastkollektive L1 bis L4

mit den entsprechenden relativen Lasten und den zugehörigen Zeitanteilen dargestellt. Mit diesen vordefinierten Lastkollektiven erfolgt eine Klassifizierung der Beanspruchung des Hubwerks eines Krans. Dabei nimmt die Beanspruchung mit größer werdenden Kollektiven zu. So wird im Kollektiv L1 lediglich in 10 % der Laufzeit die größte Tragfähigkeit verlangt, während im Kollektiv L4 diese Tragfähigkeit in 90 % der Zeit gefordert wird.

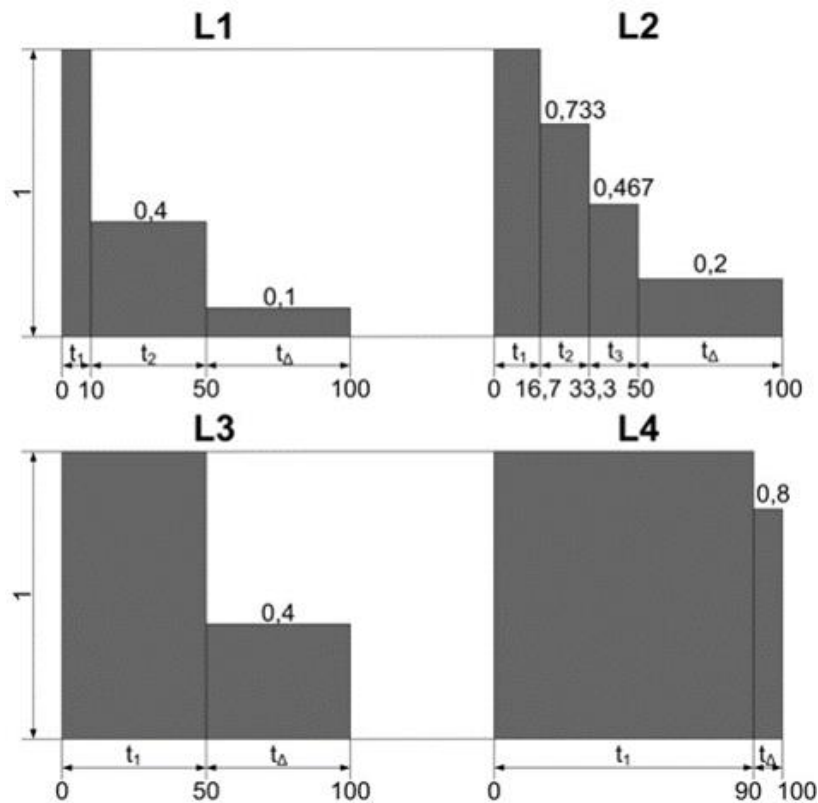


Abbildung 3-7 standardisierte Lastkollektive nach [FEM- 9.511]

Bei den meisten Kranen wird ein eher leichtes Lastkollektiv für die Auslegung zu Grunde (L1 oder L2) gelegt [Gol-2012]. Bei Prozesskranen wie sie beispielsweise in der Papier- oder Stahlindustrie eingesetzt werden, ist vom Lastkollektiv L3 auszugehen. Die Lastaufnahmemittel weisen bereits eine größere Masse aufweisen und so wird selbst ohne Nutzlast ein hoher Anteil der maximalen Traglast ausgeschöpft [FEM- 9.511].

Golder leitet in seiner Arbeit [Gol-2004] ein Verfahren ab, mit dem er auf Basis der Volllaststunden, des Lastkollektivs und der Schaltungen gemäß [FEM- 9.511] die Anzahl der Arbeitsspiele eines Hubwerks berechnet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass in jedem Arbeitsspiel sechs Schaltungen erfolgen. Bei polumschaltbaren Motoren ergibt sich daraus eine Aufteilung für das Heben in Einschalten des Antriebs, Wechseln in den Hauptgang und Zurückwechseln in den Feingang. Beim Lastsenken

erfolgt derselbe Ablauf, so dass je Arbeitsspiel sechs Schaltungen angesetzt werden können. Mithilfe der relativen Einschaltdauer des Antriebs nach [FEM- 9.683] wird in Abhängigkeit der Triebwerksgruppe die Einschaltzeit je Hubspiel (Arbeitsspiel) von 36 s abgeleitet. Die Anzahl der Hubspiele ergibt sich mithilfe der Vollastlebensdauer in der gewählten Triebwerksgruppe nach [FEM- 9.511] und einer auf dem realen Lastkollektiv basierenden, äquivalenten Lebensdauer, die mithilfe sogenannter Vollastäquivalente gebildet wird. Mit diesen Daten kann zunächst die Anzahl der Arbeitsspiele je Stunde berechnet und daraus die Gesamtanzahl der Arbeitsspiele des Krans abgeleitet werden. Durch diese Daten lassen sich die Einsatzmerkmale eines Krans charakterisieren. Hinsichtlich des Energiebedarfs wurde dieses Verfahren bereits in [Bru-2013] zur Berechnung des Energiebedarfs auf Populationsebene verwendet.

Ein für die Konstruktion der Antriebe von Hubwerken maßgebliches Regelwerk stellt die [DIN EN 14492-2] dar. Eine ähnliche Zielstellung verfolgt die von der Europäischen Fördertechnik Vereinigung FEM (Fédération Européenne de la Manutention) herausgegebene Richtlinie [FEM- 9.752]. Ausgehend von den Gefährdungen, die durch den Betrieb eines Hubwerks ausgehen, werden Maßnahmen und Berechnungsverfahren dargelegt, wie diesen Gefährdungen begegnet werden kann, um den Anforderungen der europäischen Maschinenrichtlinie zu genügen. Hinsichtlich der Auslegung wird wiederum auf die FEM-Richtlinie 1.001 verwiesen und der Inhalt reproduziert [DIN EN 14492-2]. Hierbei wird zunächst zwischen den Antrieben für die vertikale Bewegung und die horizontale Fahrbewegung unterschieden und die entsprechenden Gleichungen für die mechanische und thermische Auslegung der Antriebsmotoren vorgestellt. Speziell für Serienhebezeuge wird für die Auslegung auf die FEM-Richtlinie [FEM- 9.683] verwiesen, in der Tabellen für die relativen Einschaltdauern und die Schaltheufigkeiten der Motoren in Abhängigkeit des Einsatzes des Krans angegeben werden.

Die thermische Auslegung eines Drehstromasynchronmotors basiert sehr stark auf der Betriebsart [Sch-2013]. Hierzu werden unterschiedliche Klassen für die Betriebsart definiert. Hinsichtlich des Kranbaus ist insbesondere die Betriebsart S3 (Kurzzeitbetrieb) relevant, bei der auch eine kurzzeitige Überlastung des Motors toleriert werden kann. Dabei stellt sich nach [Sch-2013] ein stabiles Temperaturfenster ein, in dem der Motor betrieben wird. Bei der Auslegung ist von Bedeutung, dass der Motor nicht über seine thermischen Grenzen hinaus belastet wird.

Während des Betriebes einer Krananlage ist der Nachweis sicherer Betriebsperioden (SWP) zu führen. Mit diesem wird Gefährdungen, die sich aus Materialermüden oder Alterung ergeben, begegnet [Bun-1995]. Ausgangspunkt ist die Einstufung in eine

Triebwerksgruppe nach [FEM- 9.755]. Mithilfe des Berechnungsverfahrens in [FEM- 9.755] wird auf Basis der „Belastungsgeschichte“ des Krans der bereits verbrauchte Anteil an den Volllaststunden bestimmt, die der jeweiligen Triebwerksgruppe zugrunde liegen. Mit diesen Daten kann die Restnutzungsdauer des Hubwerks ab dem Prüfungszeitpunkt abgeschätzt werden [Bun-1995].

Neben diesen standardisierten Berechnungsverfahren zur Bemessung der Triebwerke in Serienhebezeugen und Kranen sind in der Vergangenheit weitere Arbeiten entstanden, die sich mit zusätzlichen Aspekten der Antriebstechnik in Krananlagen auseinandersetzen. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über Arbeiten aus diesem Bereich gegeben, insoweit sie für die vorliegende Arbeit Relevanz besitzen.

Föhl gibt in [Föh-1982] einen Überblick über die Eigenschaften unterschiedlicher Antriebssysteme für Krane. Allerdings werden vor allem Antriebssysteme für Turmdrehkrane adressiert. Wesentliche Aussagen sind hingegen auch auf andere Krane übertragbar, soweit die gleiche Antriebstechnik eingesetzt wird. Dies betrifft vor allem die Begrenzung des Einsatzes polumschaltbarer Asynchronmotoren auf ca. 30 kW Nennleistung, da die Einschaltströme bei höheren Leistungen in einem nicht mehr annehmbar hohen Bereich liegen. Hinsichtlich des Wirkungsgrades unterschiedlicher Antriebssysteme werden in [Föh-1982] qualitative Verläufe in Abhängigkeit von der Last und der Motornennleistung gezeigt. Dabei steigt beim polumschaltbaren Drehstromasynchronmotor der Wirkungsgrad mit der Nennleistung und auch mit der am Motor anliegenden Last, wobei das Wirkungsgradmaximum bei einer Last von ca. 75 % der Nennlast erreicht wird [Föh-1982].

Fickenscher zeigt in [Fic-2001] einen Ansatz zur Simulation der dynamischen Anregung aus Bremsvorgängen mithilfe einer Exponentialfunktion exemplarisch an einem Windwerk für Gießereikrane. Die betrachteten Lastfälle beziehen sich auf die Untersuchung der Nachlaufwege beim Bremsen aus maximaler Senkgeschwindigkeit, die Belastung des Getriebes bei Not-Aus, die Ermittlung der Nachlaufwege bei einem Bruch der Getriebeabtriebswelle und die Ermittlung der Nachlaufwege bei einem Bruch der Getriebeeingangswelle. Als weiteren Untersuchungsaspekt zeigt *Fickenscher* anhand des Simulationsmodells Auswirkungen, die sich aus der Wahl verschiedener Antriebssteuerungen ergeben, auf den Dynamikbeiwert beim Lastheben. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass bei einer linearen Anlaufkennlinie geringere Belastungen auftreten als bei einer gestuften Kennlinie, was bei der Bemessung des Tragwerks berücksichtigt werden kann [Fic-2001].

Iannuzzi et al. untersuchen in [Ian-2009] den Einsatz von Kondensatoren als Energiespeicher in Hubwerksanwendungen mit dem Ziel den Energiebedarf zu reduzieren. Als Betrachtungsgegenstand dienen zum einen ein direkt am Netz betriebenes Hubwerk und zum anderen ein Umrichter-gesteuerter Seilzug. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, mit dem die korrekte Bemessung der Kondensatoren hinsichtlich Kapazität und Leistungsfähigkeit ermöglicht wird. Die Untersuchung erfolgt mithilfe eines Simulink-Modells anhand eines Referenzspiels. Ergebnis ist eine deutliche Energieeinsparung von bis zu 33 % je Spiel im Vergleich zum System ohne Kondensatoreinsatz [Ian-2009].

Repo et al. vergleichen in [Rep-2014] den Wirkungsgrad von frequenzgeregelten Elektromotoren für den aussetzenden Betrieb (S3-Betrieb) in Abhängigkeit vom Lastkollektiv, der Motornennleistung, der Länge des Rotors und dem verwendeten Werkstoff für den Rotor. Sie stellen demgegenüber die Energie, die zusätzlich für die Fertigung bzw. die Änderung des Werkstoffs von Aluminium zu Kupfer aufgebracht werden muss. Ergebnis der Untersuchung ist, dass aufgrund der sehr geringen Einschaltdauern von Kranhubwerken und der in aller Regel leichten Lastkollektive nur ein geringes Einsparpotenzial hinsichtlich Energie existiert. Allerdings kann die Effizienz der verwendeten Motoren durch Maßnahmen wie die Verlängerung des Läufers bzw. des verwendeten Werkstoffs bei Bedarf erhöht werden. Dabei muss großer Wert auf das Thema Sicherheit und die dynamischen Eigenschaften gelegt werden, da die Motoren deutlich öfter Anlaufen als stationär betriebene und sich höhere Massenträgheiten an dieser Stelle in der Energiebilanz negativ auswirken [Rep-2014].

Ludwig beschäftigt sich in seiner Arbeit [Lud-1985] mit den Auswirkungen der Auswahl unterschiedlicher, elektrischer Kranantriebe für das Kranfahren auf die Schnittgrößen in tragenden Bauteilen und Antriebselementen. Hierzu wird der Kran als Mehrmassensystem modelliert. Der Einfluss des Kranführers wird abgebildet, indem das Modell mit einem Fahrsimulator gekoppelt und die Fahrbefehle des Fahrers direkt auf das Modell übergeben werden. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass die untersuchten Antriebe nicht erst aufwändig in einen Versuchskran eingebaut, sondern lediglich die entsprechenden Kennlinien im Modell hinterlegt werden müssen. Das Modell ist als Viermassenmodell aufgebaut. Als Auswertegrößen dienen für die Beanspruchung der Triebwerksteile der Schub- und Normalspannungszeitverlauf aus der Belastung. Diese Größen werden in einzelne geschlossene Schwingspiele zerlegt, welche als Basis für eine darauffolgende Schädigungsrechnung dienen. Zusätzlich vergleicht *Ludwig* in seiner Arbeit die Antriebe hinsichtlich ihrer Energiebilanz und der Spielzeit für die betrachteten Kranfahrten, wobei sich dieser Vergleich auf Antriebe bezieht, die in dieser Form heute kaum noch Verwendung finden (u. a. Asynchronmotor mit Schleifringläufer und Gleichstromantriebe).

Zusammenfassend ergibt sich, dass ein breit angelegtes Schrifttum zur Bemessung und Auslegung von Antriebssystemen für Krananlagen besteht. Vor allem Normungsanstrengungen in dieser Hinsicht haben dazu beigetragen, eine fundierte Bemessungsgrundlage zu schaffen und die Sicherheit für den Anwender von Krananlagen zu erhöhen. Hinsichtlich ökologischer Auswirkungen sind dagegen nur wenige Arbeiten bekannt, die sich aber zumeist isoliert mit dem Aspekt des Energiebedarfs und der Energieeinsparung beschäftigen [Rep-2014, Bra-2016a]. Weitere Arbeiten thematisieren vor allem die Modellierung der Dynamik unterschiedlicher Antriebe und deren Wechselwirkungen mit dem Tragwerk auf Basis von Mehrmassenschwingungsmodellen und die Berechnung des Tragwerks selbst.

3.2.3 Anregung durch die Antriebe

Zur Beschreibung von Anregungen aus Antrieben haben sich in der Vergangenheit unterschiedliche Herangehensweisen etabliert. Ziel dabei ist die Abbildung des Anlaufverhaltens des Antriebs, da sich hieraus die Belastung des Tragwerks ergeben. Der gewählte Modellierungsansatz muss in der Lage sein, den Anlauf unterschiedlicher Antriebe von sehr sanft anlaufenden frequenzgeregelten Systemen bis zu nahezu sprunghaften Anregungen, wie es bei direkt am Netz betriebenen Motoren der Fall ist, wiederzugeben. Im Folgenden werden Ansätze vorgestellt, die sich in ähnlichen Fragestellungen bereits bewährt haben.

- **Vorgabe einer konstanten Beschleunigung**

Durch die Vorgabe einer konstanten Beschleunigung kann der Anlauf eines elektrischen Antriebes angenähert werden. Verfolgt wird dieser Ansatz beispielsweise in [Bru-2013] für die Simulation des Energiebedarfs von Regalbediengeräte oder in [VDI 2195] zur Abschätzung der Spielzeit von Krananlagen. Durch Integration der Beschleunigung werden die Geschwindigkeit des Antriebs und durch eine weitere Integration der zurückgelegte Weg ermittelt. Nachteilig wirkt sich bei diesem Ansatz aus, dass ein genauer Verlauf, der unterschiedlichen Konstruktionscharakteristika von Antrieben geschuldet ist, nur angenähert wiedergegeben werden kann.

– **Kloßsche Gleichung**

Zur Annäherung der Drehmoment-Drehzahlkennlinie einer Asynchronmaschine hat sich die Kloßsche Gleichung nach Formel (3-1) etablieren können [Sch-2013].

$$\frac{M_M}{M_K} = \frac{2}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}} \quad (3-1)$$

Darin bezeichnen M_M das Moment, das vom Motor abgegeben wird, M_K das Kippmoment des Motors, s_K den Schlupf des Motors am Kipp-Punkt und s den Schlupf am betrachteten Punkt. Diese Gleichung gilt für die Asynchronmaschine im stationären Betrieb unter Vernachlässigung des Statorwiderstandes, was nur bei Motoren mittlerer bis hoher Leistung eine geeignete Näherung darstellt [Sch-2013]. Ist neben der Kennlinie des Motors auch die Last aus der Arbeitsmaschine bekannt, kann die Beschleunigung des Antriebs und damit die Rückwirkung auf das Tragwerk berücksichtigt werden.

– **Stetig differenzierbare Funktionen**

Golder schlägt in seiner Arbeit zu Modellierung der Anregung aus dem Anlauf von Antrieben stetig differenzierbare Funktionen auf Basis der Tangenshyperbolicus-Funktion vor [Gol-2004]. Durch die Wahl der entsprechenden Parameter kann die Zeit für den Hochlauf an das gemessene Verhalten angenähert werden, so dass sich eine gute Übereinstimmung ergibt [Gol-2004]. Auf Basis der Arbeit von *Golder* wurde diese Modellierung auch in [Amb-2012] verwendet.

– **Sieben-Phasen-Anlauf**

Sowohl *Günthner et al.* [Gün-2011b, Gün-2011c] als auch *Braun* [Bra-2016b] verwenden zur Modellierung des Anlaufes von elektrischen Antrieben ein siebenphasiges Modell, dem der Ruck (Differentiation der Beschleunigung nach der Zeit) zugrunde liegt. Durch numerische Integrationen kann auf die Beschleunigung und damit auf die Anfahrtdynamik eines Antriebes geschlossen werden. In Abbildung 3-8 ist das Anlaufmodell exemplarisch dargestellt.

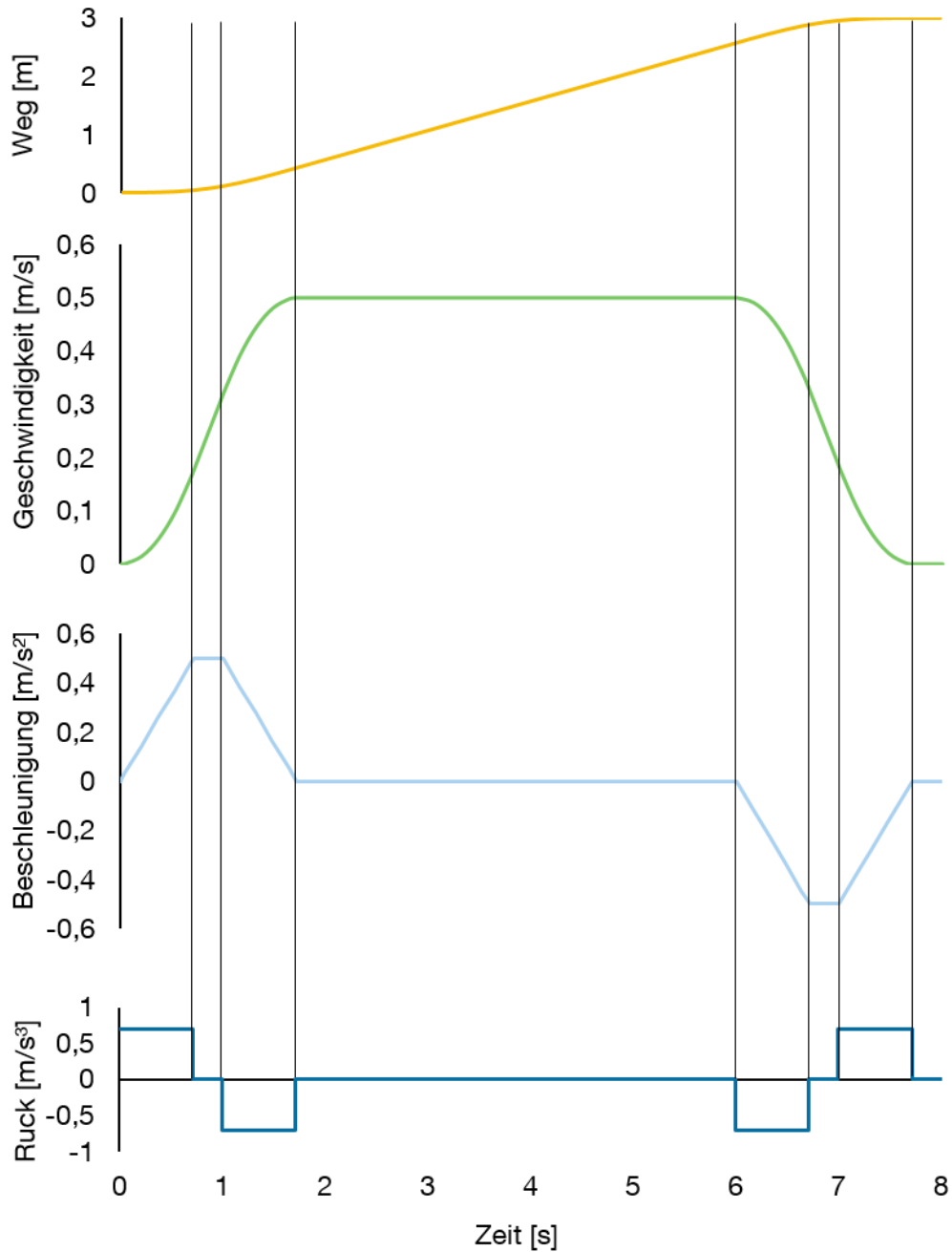


Abbildung 3-8: Sieben-Phasen-Modell für den Anlauf

Die erste Phase ist durch einen konstanten Ruck gekennzeichnet, der in einer linear ansteigenden Beschleunigung mündet. Darauf folgt die Beschleunigung in der zweiten Phase konstant. In Phase drei folgt ein negativer Ruck, was zu einer linear verlaufenden Beschleunigung führt. In der vierten Phase bleibt die Geschwindigkeit konstant. Die Phasen fünf, sechs und sieben verhalten sich antimetrisch zu den Phasen eins bis drei, bis die Endposition erreicht ist. Dieses Modell bietet den Vorteil einer sehr hohen Flexibilität durch die Vielzahl an frei wählbaren Parametern, womit der Anlauf jedes Antriebs-

systems auch ohne die Kenntnis der konstruktiven Parameter abgebildet werden kann. Die Kalibrierung muss anhand von Messwerten an realen Antrieben erfolgen.

– **Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie**

Liegen detaillierte Informationen über das Drehmoment-Drehzahlverhalten des Antriebes vor, können diese Daten direkt verwendet werden, um das Anfahrverhalten des Antriebs zu modellieren. Hierzu ist der Verlauf des am Motor benötigten mechanischen Moments als Eingangsparameter anzusetzen. Die entsprechende Beschleunigung ergibt sich aus der Differenz zwischen dem vom Antrieb bereitgestellten Drehmoment und dem benötigten Moment [Sch-2013].

– **Modellierung des Antriebs als Differentialgleichungssystem**

Die Arbeitsweise eines Drehstromantriebs, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit behandelt wird, lässt sich durch ein entsprechendes Differentialgleichungssystem auf Basis der maßgeblichen Konstruktionsparameter beschreiben [Sch-2013]. Hierbei wird der Anlauf der Maschine basierend auf der Last und der Motorparameter wie Widerstände und Induktivitäten abgebildet. Nachteilig bei diesem Ansatz ist, dass die entsprechenden Parameter bekannt sein müssen, wohingegen bei allen anderen Anregungsmodellen ein Abgleich mit entsprechenden Messwerten des Anlaufverhaltens ausreicht.

Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass eine Abbildung des Anlaufverhaltens prinzipiell mit allen dargestellten Ansätzen möglich ist. Als Einschränkung ergeben sich vor allem aber die Genauigkeit, mit der eine Abbildung darstellbar ist und die notwendigen Parameter, die nicht für alle Ansätze in gleicher Weise zur Verfügung stehen. Eine Bewertung der Ansätze und die Auswahl des im Rahmen der vorliegenden Arbeit umgesetzten Modells werden in Abschnitt 4.2.3 vorgestellt.

3.2.4 Eingrenzung im Sinne der Arbeit

Hinsichtlich der vorliegenden Arbeit ist es notwendig einige wichtige Begriffe zu definieren und den Betrachtungsrahmen einzuschränken. Dabei soll die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ähnliche Problemstellungen erhalten bleiben.

Die Ergebnisse der Arbeit werden am Beispiel eines Ein-Träger-Laufkrans erarbeitet und dargestellt. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell zur gleichermaßen ökologisch und wirtschaftlich sinnvollen Auswahl der Antriebstechnik für Industriekrananlagen ist in seinen wesentlichen Aspekten auch für andere Kran-

bauarten anwendbar. Eine Restriktion betrifft die Anzahl der Hubwerke, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf eine Laufkatze beschränkt wird. Bei der Anwendung des Vorgehensmodells auf Krananlagen mit mehreren Hubwerken gestaltet sich vor allem die Bemessung des Tragwerks deutlich aufwändiger (siehe [Gol-2004]). Eine Übertragung der vorgestellten Methodik auf gänzlich andere Kranbauarten wie Turmdrehkrane oder Fahrzeugkrane ist zwar generell denkbar, allerdings ist hier der Lösungsraum für die Auswahl der Antriebe meist deutlich eingeschränkter, sodass der Fokus nicht auf diese Krane gelegt wird. Da die Mehrzahl an Hebezeugen mit elektrischen Antrieben ausgerüstet ist, bleibt der Betrachtungsrahmen auf diese Technologie beschränkt. Hinsichtlich des Motors werden Drehstromasynchronmotoren untersucht, da diese bei ca. 90 % aller verkauften Hebezeuge zum Einsatz kommen, wohingegen Synchronmotoren nur einen geringen Anteil an den verkauften Einheiten haben [Gol-2012]. Die Gleichstrommotoren als Antriebsquelle sind in der industriellen Praxis beinahe verschwunden.

3.3 Bewertungsansätze für ökonomische und ökologische Leistung

Zur Beantwortung der Forschungsfragen sollen geeignete Verfahren gewählt werden, mit denen zunächst auf die einzelnen Teilfragestellungen eingegangen und die übergeordnete Forschungsfrage beantwortet wird. Hierzu werden unterschiedliche Verfahren und Werkzeuge zur ökonomischen Beurteilung und Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von Kranen vorgestellt. Hinsichtlich der ökologischen Bewertung werden in Abschnitt 3.3.2 geeignete Verfahren aufgezeigt und in Kapitel 3.3.3 Werkzeuge für eine gemeinsame Vergleichsbasis beschrieben, die einen Vergleich ökologischer und ökonomischer Aspekte ermöglichen.

3.3.1 Verfahren zur ökonomischen Bewertung

Verfahren zur ökonomischen Bewertung von Investitionsgütern sind in zahlreichen unterschiedlichen Ausprägungen vorhanden, wobei nicht alle Verfahren den gesamten Produktlebenszyklus für die Bewertung heranziehen. Wesentliche Herangehensweisen, die alle Lebensphasen adressieren, sind die Lebenszykluskosten (LCC = Life Cycle Costing) und die Total Cost of Ownership (TCO). Modelle, die lediglich die Anschaffungskosten berücksichtigen, sind bei einem Investitionsgut mit einer langen Lebensdauer, das auch während des Betriebs Kosten verursacht, nicht geeignet [Hof-2012]. Aus diesem Grund wird auf eine Darstellung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet und lediglich auf Verfahren eingegangen, die den gesamten Lebenszyklus in Betracht ziehen.

Geißdörfer [Gei-2008] stellt hierzu eine Übersicht zum Thema Lebenszykluskosten und Total Cost of Ownership zusammen. Die Lebenszykluskosten nehmen dabei die Rolle der Entscheidungsgrundlage bei Investitionen ein, bei denen mehrere Alternativen zur Verfügung stehen. Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt dabei aus der Sicht des Kunden bzw. des Betreibers der Anlage. Die Analyse zahlreicher Veröffentlichungen in [Gei-2008] kommt zu dem Schluss, dass LCC entweder synonym zu den TCO zu verstehen sind oder LCC eine Untermenge der TCO darstellen. Als Unterscheidungsmerkmal wird genannt, dass die LCC die Transaktionskosten nur unzureichend oder gar nicht betrachten. [Gei-2008]

Zentrales Instrument zur ökonomischen Bewertung von Investitionsgütern aus Betreibersicht ist demnach die Betrachtung der Lebenszykluskosten [VDI 2884]. Hierzu stellt diese Richtlinie den erforderlichen methodischen Rahmen bereit. Dabei wird in dieser Richtlinie der gesamte Produktlebenszyklus mit allen anfallenden Kosten betrachtet. Aus Betreibersicht bietet die Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung eine Reihe von Vorteilen:

- Alternative Produktionsprozesse in Erwägung ziehen
- Untersuchung unterschiedlicher Produktionskonzepte
- Entscheidungen hinsichtlich Instandhaltungs- und Logistikkonzepten treffen
- Beschaffungsquellen beurteilen und Alternativen suchen
- Alternative Betreibermodelle in Betracht ziehen

Durch die Betrachtung des gesamten Produktlebensweges wird gewährleistet, dass neben den im Lastenheft definierten Anforderungen hinsichtlich Leistung und Qualität die instandhaltungsrelevanten Aspekte und die daraus entstehenden Kosten mit einbezogen werden. Innerhalb des Beschaffungsprozesses kann die Anwendung in den ersten Phasen Definition der Bestellspezifikationen, Angebotseinholung und Angebotsbewertung zum Einsatz kommen. Die [VDI 2884] gliedert den Prozess der Lebenszykluskostenrechnung in insgesamt acht unterschiedliche Abschnitte.

- **Entscheidung für LCC:** Zur Entscheidung, ob für die geplante Investition eine Lebenszykluskostenanalyse angewandt werden soll, stellt die [VDI 2884] Leitfragen zur Verfügung, die als Entscheidungshilfe herangezogen werden können. Hierzu zählt insbesondere das Verhältnis zwischen Beschaffungskosten und den wiederkehrenden Kosten während des Betriebs.

- **Ermittlung von alternativen Produktionsmitteln:** Auf Basis der im Lastenheft definierten Anforderungen werden am Markt unterschiedliche Lösungsansätze für das Investitionsgut ausgewählt. Diese Auswahl erfolgt zunächst nur auf den reinen Leistungsdaten. Erst die Durchführung einer Lebenszykluskostenrechnung gibt einen ganzheitlichen Einblick, welche Alternative die wirtschaftlichste darstellt.
- **Festlegung der Instandhaltungsstrategie:** Als Instandhaltungsstrategien kommen generell nach [VDI 2884] die korrektive und die präventive Instandhaltung in Frage. Die korrektive Instandhaltung ist gekennzeichnet durch eine Störfallbeseitigung erst bei Ausfall der Maschine, eine aufgeschobene Instandhaltung und das Vorhalten redundanter Systeme. Bei der präventiven Instandhaltung handelt es sich um eine präventive, zustandsorientierte und voraussagende Maßnahme.
- **Erfassung der Einsatzbedingungen und Festlegung der geplanten Nutzungsdauer:** Hinsichtlich der Einsatzbedingungen spielen in erster Linie die Nutzungsintensität und die Nutzungshäufigkeit eine entscheidende Rolle, welche als Vorleistung vom Betreiber der Anlage zu liefern sind. Die Richtlinie [VDI 2885] führt hierzu Ansätze zur Beschreibung von instandhaltungsrelevanten Einsatzbedingungen auf. Den sich hieraus ergebenden Bedarf an Instandhaltungsmaßnahmen liefert die Basis zur Berechnung der anfallenden Instandhaltungskosten.
- **Festlegung der relevanten Kosten bzw. Faktoren, die zur Entscheidungsfindung berücksichtigt werden sollen:** In dieser Phase gilt es festzulegen, welche Kostenarten im Rahmen der Lebenszykluskosten berücksichtigt werden sollen. Hierzu soll die Auswahl auf die maßgeblichen Kostenarten beschränkt werden, um den Aufwand für die Lebenszykluskostenrechnung begrenzen zu können. Hierzu liefert die [VDI 2884] eine tabellarische Auflistung von möglichen Kostenarten, die berücksichtigt werden können.
- **Erhebung der relevanten Kosten und Erlöse:** An dieser Stelle erfolgt die tatsächliche Erhebung der anfallenden Kosten in den im vorherigen Abschnitt festgelegten Kostenarten.
- **Bewertung der Alternativen:** Die Bewertung der Alternativen erfolgt durch den Vergleich der berechneten Lebenszykluskosten. Die dabei eingesetzten Verfahren entsprechen den Verfahren der Investitionsrechnung. Bei der statischen Investitionsrechnung erfolgt die Betrachtung über einen periodisierten

Bezugszeitraum in der Nutzungsphase, wohingegen die dynamische Investitionsrechnung den gesamten Nutzungszeitraum zugrunde legt. Hierbei wird auch der zeitliche Unterschied der anfallenden Kosten und Erlöse in die Betrachtung aufgenommen und durch eine entsprechende Auf- bzw. Abzinsung auf einen Bezugszeitpunkt berücksichtigt.

- **Entscheidung:** Als Absicherung einer Entscheidung auf Basis der Lebenszyklusrechnung wird die Durchführung von Sensitivitätsanalysen vorgeschlagen, um vor allem Parameter, die nicht genau spezifiziert werden können, näher zu untersuchen.

Insgesamt stellt die Lebenszyklusrechnung nach [VDI 2884] damit ein probates Werkzeug zum Vergleich unterschiedlicher Varianten eines Investitionsgutes dar. [VDI 2884]

Neben dem Verein Deutscher Ingenieure und der daraus hervorgegangenen Richtlinie [VDI 2884] hat sich auch das Deutsche Institut für Normung der Thematik der Lebenszykluskosten angenommen. Die [DIN EN 60300-3-3] definiert den Begriff Lebenszykluskosten als „Gesamtkosten einer Einheit über ihren gesamten Lebenszyklus“ [DIN EN 60300-3-3], wobei der Lebenszyklus den „Zeitraum von der Konzipierung bis zur Entsorgung eines Produkts“ [DIN EN 60300-3-3] umfasst. Zur Ermittlung der Lebenszykluskosten wird ein Vorgehensmodell bestehend aus fünf Schritten vorgeschlagen:

- **Organisatorischen Kontext herstellen:** In dieser Phase gilt es zum einen den Aufbau zukünftiger Szenarien miteinzubeziehen, um die daraus entstehenden Kostenflüsse abschätzen zu können. Zum anderen werden Faktoren ermittelt, die in Zukunft Einfluss auf das Produkt haben. Zudem werden in dieser Phase mögliche Alternativen für die zu bewertende Investition bewertet. Kriterien hierfür sind u. a. die Abwägung zwischen Beschaffungs- und Betriebskosten. [DIN EN 60300-3-3]
- **Analyse planen:** In dieser Phase müssen die maßgeblichen Lebensphasen, die Betriebsumgebung und Instandhaltungsszenarien festgelegt werden. Des Weiteren werden die Analyseziele fixiert, die Durchführung geplant und die dafür notwendigen Ressourcen ermittelt. Ein weiterer wesentlicher Baustein dieser Phase ist die Ermittlung von Beschränkungen vor allem hinsichtlich Mindestverfügbarkeit oder Mindestleistung der Investition. Abschließend müssen die relevanten Finanzparameter ermittelt und festgelegt werden. Hierzu zählen die Festlegung des Basisjahrs, auf das sich alle Eingangsdaten beziehen, und

die Entscheidung, ob Steuern und die Inflation mit in die Betrachtung aufgenommen werden. [DIN EN 60300-3-3]

- **Vorgehensweise festlegen:** Diese Phase umfasst zu Beginn die Vereinbarung über Methoden und Regeln für die Lebenszykluskostenanalyse. Wesentliche Elemente hierbei sind die Festlegung, ob es sich um eine absolute oder vergleichende Analyse handelt, die erforderliche Genauigkeit und welche Daten und Ressourcen verfügbar sind. Zur eigentlichen Analyse muss entweder ein bereits bestehendes Analysemodell ausgewählt oder ein eigenes Modell entwickelt werden. In der Kostenaufbruch-Struktur sollten die Kostenarten einzeln ermittelt werden mit dem Ziel, eine möglichst geringe Anzahl an Kostenarten für die Entscheidung heranzuziehen. Unsicherheiten entstehen bspw. aus den getroffenen Annahmen und aus der Qualität der Eingangsdaten. Bezüglich der Eingangsdaten können Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, welche die Auswirkungen der Variation der einzelnen Parameter aufzeigen. [DIN EN 60300-3-3]

- **Analyse durchführen:** Diese Phase zielt darauf ab, entsprechende Methoden zur Kostenabschätzung anzuwenden. Hierzu zählen die parametrische Kostenschätzung in der frühen Planungsphase, die analoge Kostenschätzung und die technik-basierte Kostenschätzung, bei der bereits technische Spezifikationen in späteren Phasen herangezogen werden. Anschließend folgt die Durchführung der eigentlichen Lebenszykluskostenanalyse, bei der zusätzlich Sensitivitätsanalysen zur Absicherung der Ergebnisse angewandt werden. Abschließend folgt in dieser Phase eine Bewertung der Analyse, bei der u. A. die Zielsetzung, das Modell, die Anwendung, die Anwendbarkeit und Genauigkeit der Datenquellen und die getroffenen Annahmen bewertet werden. Die Beurteilung des Erreichens der Analyseziele bildet den letzten Arbeitsschritt in dieser Phase. [DIN EN 60300-3-3]

- **Analyse abschließen:** Abschließend werden aus den Erkenntnissen der Lebenszykluskostenanalyse Schlussfolgerungen gezogen und entsprechende Folgetätigkeiten, wie z.B. Optionen für Kostensenkungen durch Entwurfsänderungen, genannt. Die abschließende Dokumentation der Ergebnisse sollte neben der Anpassung der Modelle an die Zielsetzung und Informationen zur Modellgenauigkeit auch eine Bewertung der Datenquellen und der Datenqualität enthalten.

Neben dieser Darstellung des Aufbaus einer Lebenszykluskostenanalyse enthält die [DIN EN 60300-3-3] auch Informationen zum Lebenszyklus eines Produkts, welcher

in insgesamt sechs Phasen gegliedert wird und dem abschnittsweise die entsprechenden Kostenarten zugeordnet werden. In Abbildung 3-9 ist eine Auswahl an Kostenarten für die ersten drei Lebensphasen Konzeption, Entwicklung und Realisierung dargestellt. Die Aufteilung entspricht der Richtlinie des VDMA [VDMA 34160] mit den übergeordneten Phasen Entstehung, Betrieb und Verwertung.

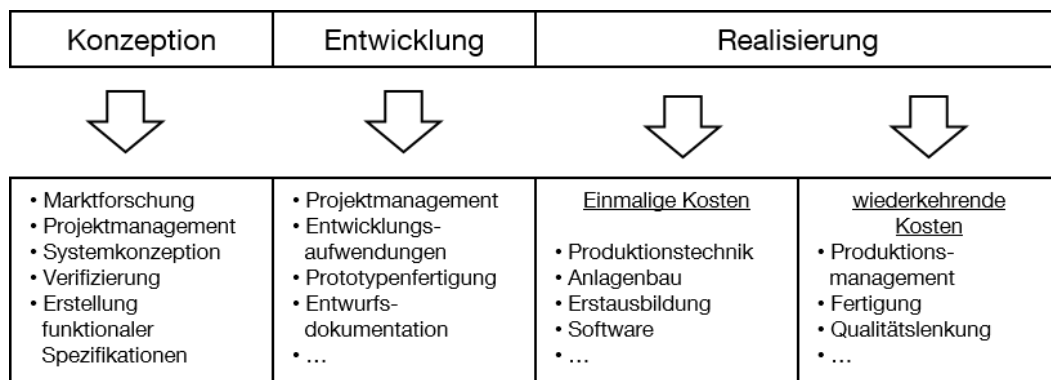


Abbildung 3-9: Kostenaufbruch-Struktur für Konzeption, Entwicklung und Realisierung gemäß [DIN EN 60300-3-3]

Maßgebliche Kostenbestandteile bei der Konzeption sind aus Betreibersicht die Marktforschung, das Projektmanagement oder auch die Erstellung funktionaler Spezifikationen. In der Entwicklungsphase spielen vor allem die Kostenarten Projektmanagement, Aufwendungen für die Entwicklung und die Entwurfsdokumentation die wichtigste Rolle. In der Realisierungsphase muss zwischen einmaligen und wiederkehrenden Kosten unterschieden werden. Als einmalige Kosten sind insbesondere der Anlagenbau oder die Erstausbildung der entsprechenden Mitarbeiter in Betracht zu ziehen. Zu den wiederkehrenden Kosten zählen die Fertigung an sich, das Produktionsmanagement oder auch die Qualitätslenkung.

Die Nutzung und Erweiterung entsprechen im Wesentlichen der Betriebsphase nach [Bod-2011], wobei sich die Kosten in der Nutzungsphase weiter in den Betrieb, die Instandhaltung, die Mittelausstattung und unterstützende Tätigkeiten untergliedern lässt. Abbildung 3-10 zeigt eine Auswahl der betrachteten Kostenarten für den Betrieb der Anlage, die im Weiteren in die Nutzung und Erweiterung eingeteilt werden kann.

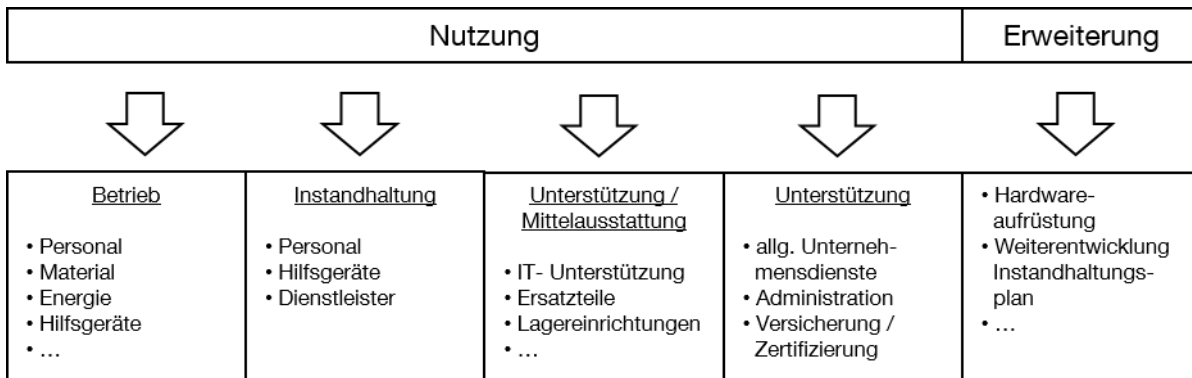


Abbildung 3-10: Kostenaufbruchstruktur für Nutzung und Erweiterung [DIN EN 60300-3-3]

In der Betriebsphase spielen maßgeblich die Kosten für das Personal, das Material und die für die Maschine benötigte Energie eine Rolle. Im Rahmen der Instandhaltung müssen insbesondere das hierfür benötigte Personal, notwendige Hilfsgeräte oder externe Dienstleister in die Betrachtung aufgenommen werden. Hinsichtlich der Mittelausstattung müssen die Kosten für mögliche IT-Unterstützung, Ersatzteile und die entsprechenden Lagereinrichtungen berücksichtigt werden. Weitere Kosten entstehen durch unterstützende Tätigkeiten aus allgemeinen/zentralen Unternehmensdiensten oder auch der Administration.

Die Kosten für mögliche Erweiterungen der Anlagen können einerseits in die Nutzungsphase integriert oder andererseits separat betrachtet werden. Die maßgeblichen Kostenarten für die Erweiterung betreffen eine mögliche Aufrüstung der Hardware oder eine Weiterentwicklung des Instandhaltungsplans. Anschließend an die Betriebsphase erfolgt nach [Bod-2011] die Entsorgung der Anlage. Neben Kosten können an dieser Stelle aber auch Erlöse für den Wiederverkauf von gebrauchten Maschinen auftreten. Die Kostenarten in der Entsorgungsphase sind in Abbildung 3-11 dargestellt.

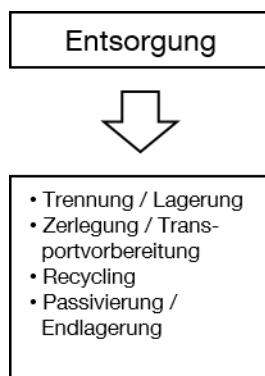


Abbildung 3-11: Kostenaufbruch-Struktur für die Entsorgung [DIN EN 60300-3-3]

Innerhalb der Entsorgungsphase können vor allem Kosten für die Trennung und Lagerung bzw. Zerlegung und die Transportvorbereitung der Anlage und ihrer Kompo-

nennten auftreten. Weitere wichtige Faktoren adressieren das Recycling bzw. die Passivierung oder Endlagerung von Stoffen. [DIN EN 60300-3-3]

Zur Berücksichtigung von immateriellen Werten, die nicht in finanzieller Art quantifiziert werden können, liefert die [DIN EN 60300-3-3] zunächst eine Definition und darauf aufbauend die entsprechenden Bewertungsmethoden zur Berechnung dieser Faktoren. Voraussetzung ist, dass Gewinne oder Verluste einem bestimmten Ereignis zugeordnet und ausreichend genau quantifiziert werden können. [DIN EN 60300-3-3]

In [Bod-2011] geben *Bode et al.* einen Leitfaden zur Berechnung der Lebenszykluskosten auf Basis der VDMA-Richtlinie [VDMA 34160]. Hierzu definieren sie zunächst den Begriff der Lebenszykluskosten und grenzen ihn von den Total-Cost-of-Ownership ab, wobei auf die maßgebliche Gemeinsamkeit der Lebenswegbetrachtung verwiesen wird. Vor allem für große, sich nicht wiederholende Anschaffungen wird ein individuelles, genau auf die Problemstellung abgestimmtes Modell für die Berechnung der Lebenszykluskosten empfohlen. Einen maßgeblichen Aspekt bildet zudem die Auswahl der Kostenarten, die im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse untersucht werden sollen. Zur Ermittlung wird in [VDMA 34160] ein Modell auf Basis von drei Lebensphasen des Modells vorgeschlagen, das sich in die nacheinander ablaufenden Phasen Entstehung, Betrieb und Verwertung gliedert. Die Betriebsphase wird in weitere Unter Aspekte aufgeteilt und ist in seinen Grundzügen in Abbildung 3-12 dargestellt.

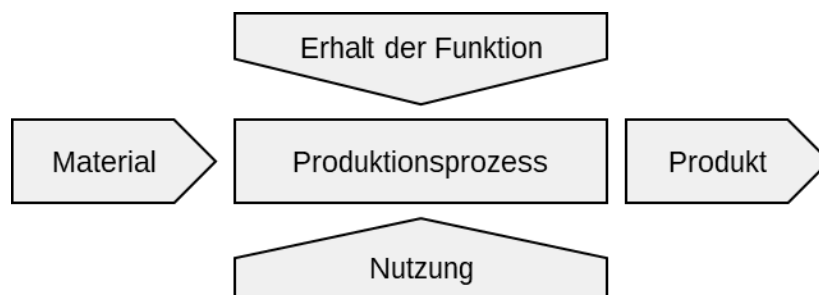


Abbildung 3-12: Phasenmodell nach [VDMA 34160]

Zentraler Aspekt hierbei ist ein Prozess zur Herstellung eines Produkts auf Basis unterschiedlicher Materialien, die dem Prozess zugeführt werden. Die entsprechenden Prozessparameter sind dabei Leistungsspezifikationen, die Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr, der Qualitätsgrad, die Produktionsleistung und die MTBF (=Mean Time between failure) bzw. MTTR (Mean Time to Repair). Zum Erhalt der Funktion dienen die Wartung und Inspektion sowie Ersatzteile und möglicher Schulungsaufwand für

das Bedienpersonal. Der Aspekt Nutzung adressiert die Kostenarten Werkzeuge, Betriebsstoffe aber auch Personal und Energie.

Als Vorgehensweise zur Berechnung der Lebenszykluskosten wird ein siebenstufiges Vorgehensmodell vorgeschlagen, das auch die Ansätze für die Modelltiefe aufzeigt. In Abbildung 3-13 ist das Modell nach [VDMA 34160] in Form eines Ablaufdiagramms dargestellt.

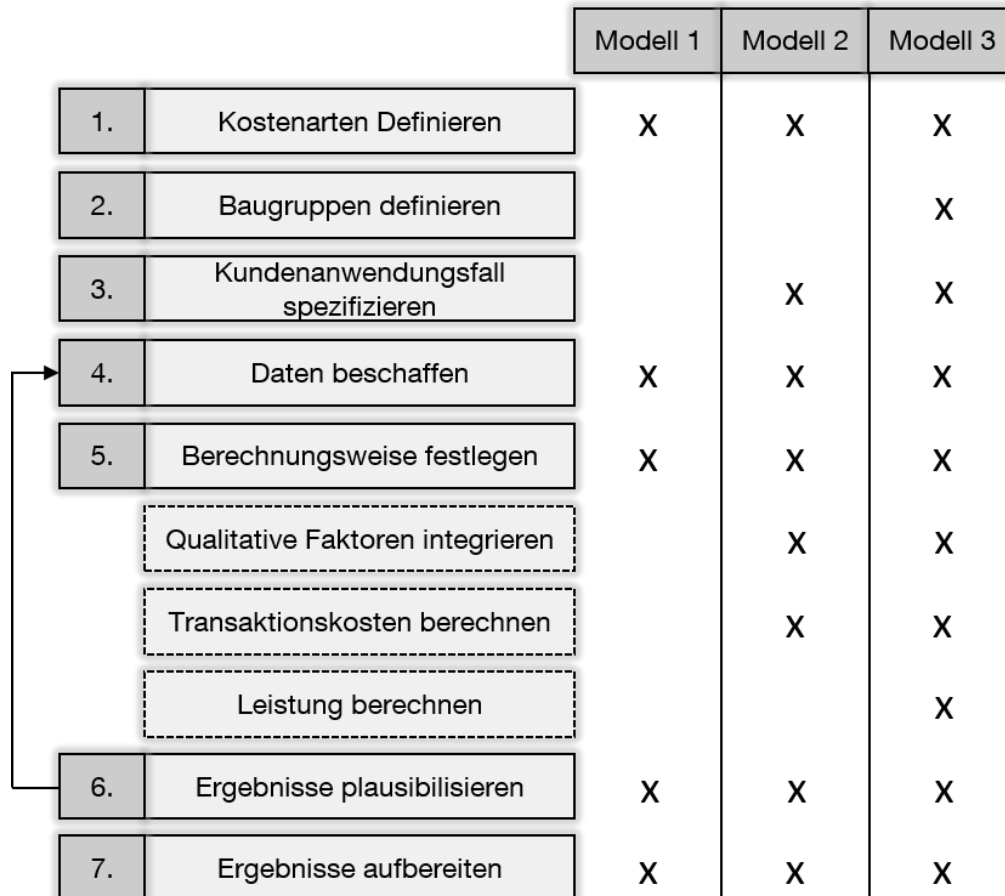


Abbildung 3-13: siebenstufiges Modell zur Berechnung der Lebenszykluskosten [VDMA 34160]

Die erste Phase dieses Modells adressiert die Auswahl der maßgeblichen Kostenarten bzw. Kostenelemente für die Lebenszykluskostenberechnung. Diese Elemente sind spezifisch für jeden Anwendungsfall festzulegen und zwischen dem Kunden und dem Lieferant abzustimmen. Im Rahmen der zweiten Phase erfolgt die Definition der Baugruppen, welche für die Berechnung der Kosten für Wartung und Instandhaltung notwendig sind, da hier auf die Ebene einzelner Baugruppen und Bauteile heruntergebrochen werden muss. Bei dieser Vorgehensweise ist es notwendig, für jedes Element eine eigene spezifische Ausfallrate zu erzeugen. Als praxistauglicher Ansatz wird die Definition auf Basis der Stücklistenstruktur empfohlen, wobei die Baugrup-

pen auch identisch im Ersatzteilkatalog auftauchen. Die Spezifikation des Kundenanwendungsfalls zielt darauf ab, die Aufgabenstellung und die Spezifikation der Einsatzbedingungen sowie den Betrachtungszeitraum und das Lastenheft festzulegen. Zur Beschaffung der Daten für die Berechnung der Lebenszykluskosten stehen Quellen wie das Angebot des Herstellers, Datenblätter des Investitionsgutes oder technische Spezifikationen zur Verfügung. Restwerte für einen möglichen Wiederverkauf können dem Gebrauchtmaschinenmarkt entnommen oder geschätzt werden. Zur Akquise der Daten für die Zuverlässigkeit der Komponenten und Bauteile wird auf die Analyse von Felddaten, Tests und Expertenschätzungen oder Handbücher und Standards verwiesen. In der Phase der Festlegung der Berechnungsweise wird bestimmt, ob die Kosten gleichmäßig über den gesamten Betrachtungszeitraum auftreten oder ob diese zum Zeitpunkt des Auftretens verrechnet werden sollen. Allerdings erfordert diese zeitpunktgenaue Berechnung die Modellstufe 3 bei der Detaillierung der Kostenarten. Die abschließenden Schritte Plausibilisierung und Aufbereitung der Ergebnisse dienen zum einen der Prüfung der Ergebnisse und zum anderen zu deren präsentationsgerechten Aufbereitung. Neben den bereits vorgestellten obligatorischen Schritten besteht zudem die Möglichkeit der Integration qualitativer Faktoren, die allerdings einen Wert von 10 % der monetären Lebenszykluskosten nicht übersteigen sollten. Müssen diese qualitativen Faktoren integriert werden, so liefert [Bod-2011] entsprechende Berechnungsvorschriften für Gewichtungsfaktoren. Die Berücksichtigung von Transaktionskosten spielt nur eine untergeordnete Rolle und kann in analoger Weise zu den qualitativen Faktoren erfolgen. Hinsichtlich der Diskontierung der Kosten gilt bei Investitionsgütern und Gütern mit hohen Betriebskosten verglichen mit den Anschaffungskosten die Empfehlung, eine Diskontierung zu berücksichtigen. [Bod-2011]

Um die jeweiligen Kostenblöcke mit den entsprechenden Werten hinterlegen zu können, schlagen die Autoren drei Detaillierungsmodelle vor:

- **Modell 1:** Es werden nur Pauschalbeträge ohne weitere Detaillierung für Lebensphasen erfasst.
- **Modell 2:** Gemäß [VDMA 34160] werden die Kosten auf der nächsten Detaillierungsebene erfasst. Hinsichtlich dieser Vorgehensweise erfolgt eine weitere Aufspaltung in den einzelnen Lebensphasen. So werden die Kosten der Entstehungsphase beispielsweise in Beschaffungskosten, Infrastrukturkosten und sonstige Kosten aufgeteilt. Für die weiteren Lebensphasen wird analog zu diesem Vorgehen verfahren. Für die Phase des Betriebs bedeutet dies u. A. eine Aufspaltung in Energiekosten, Personalkosten und Kosten für Hilfs- und Betriebsstoffe. In der Verwertungsphase werden auf dieser Ebene die Rück-

baukosten betrachtet, genauso wie der Restwert im Falle eines Verkaufs der gebrauchten Anlage.

- **Modell 3:** Das Modell 3 greift auf eine weitere Detaillierung der untersuchten Kostenarten aus dem Modell 2 zurück. Hierfür müssen exakte Daten des Betreibers zu den Einsatzbedingungen und zur Baugruppenstruktur der Maschine vorliegen. Konkret bedeutet dies bspw. für die Beschaffungskosten eine weitere Aufspaltung in den Anschaffungspreis, Zollkosten aber auch Kosten für die Schulung der Mitarbeiter.

Unter der Mitwirkung von *Ellram* sind zahlreiche Veröffentlichungen entstanden, die sich mit der Methode von Total Costs of Ownership beschäftigen. In [Eil-1993] wird ein achtstufiges Konzept vorgestellt, wie das Konzept der Total Cost of Ownership implementiert werden kann. Hierzu wird die Herangehensweise von sieben Firmen untersucht und auf dieser Basis die Methodik zur Verwendung von Total Cost of Ownership abgeleitet. Der Ablauf des entwickelten Modells wird in Abbildung 3-14 veranschaulicht.

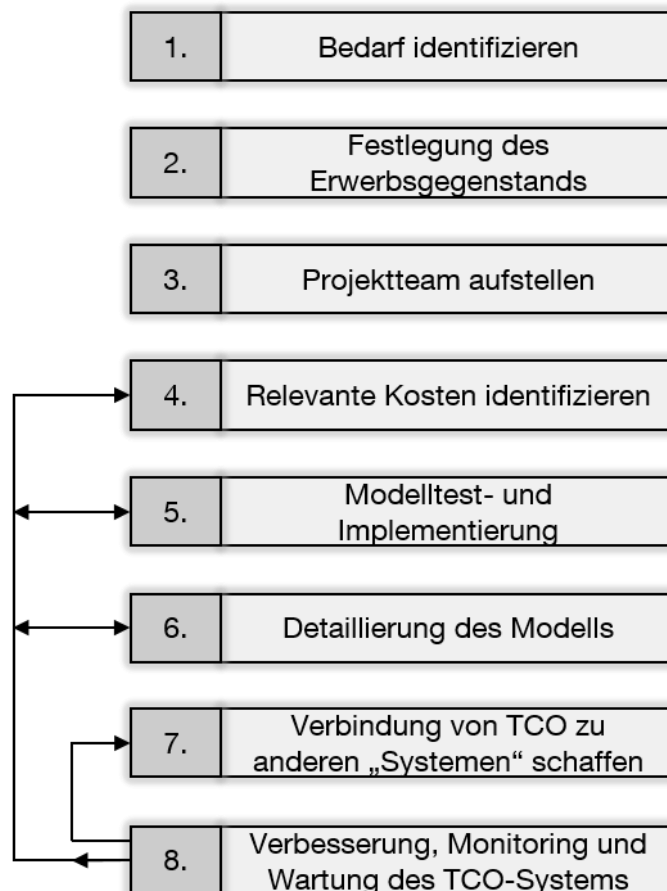


Abbildung 3-14: achtstufiges Modell zur Einführung von TCO nach [Eil-1993]

Im ersten Schritt des Modells gilt es den Bedarf für die Einführung von TCO für den Beschaffungsprozess zu identifizieren. Die Gründe für die Einführung können mannigfaltig sein. Darauf aufbauend gilt es, eine Investition auszuwählen, für das TCO-Modell eingeführt werden soll. Hierbei ist zu beachten, dass die Investition auch ein ausreichendes Potenzial für Kosteneinsparungen ermöglicht, da die Implementierung eines TCO-Modells einen gewissen Aufwand mit sich bringt. Die Aufstellung eines Projektteams, das sich aus Mitgliedern mit unterschiedlichem fachlichem Hintergrund zusammensetzt, trägt zu einer Verbesserung der Projektergebnisse bei der Einführung und Anwendung des Modells bei. Die tatsächliche Projektarbeit beginnt mit der iterativen Aufstellung und der entsprechenden Hierarchisierung der Kosten, die im Modell berücksichtigt werden sollen. Das Zusammentragen der Daten für die Kostenanalyse ist ebenso aufwändig, da eine Vielzahl von unterschiedlichen Quellen herangezogen werden muss. Die fünfte Stufe bilden die Implementierung und der Test des TCO-Modells. Auf Basis dieser Tests kann im nächsten Schritt eine iterative Detaillierung und Verbesserung des Modells vorangetrieben werden. Damit ist die eigentliche Einführung des TCO-Modells abgeschlossen. Allerdings kann es sehr sinnvoll sein, den TCO-Gedanken auch in andere Teile des Unternehmens zu übertragen. Hierbei bieten sich vor allem das Zulieferer-Monitoring, interne Schulungs- und Ausbildungssysteme und das unternehmenseigene EDV-System an. Um das entwickelte Modell auf dem jeweils aktuellen Stand der Technik zu halten, ist es nötig fortlaufend Verbesserungen und Wartungsarbeiten am TCO-Modell vorzunehmen. [EII-1993]

Als weiteren Anwendungsfall für das Konzept der Total-Cost-of-Ownership neben dem Vergleich unterschiedlicher Anbieter zeigen *Ellram* und *Maltz* in [EII-1995] anhand eines Fallbeispiels die Möglichkeit auf, Outsourcing-Entscheidungen auf Basis dieses Kriteriums zu treffen. Zentrale Fragestellungen hierbei adressieren die Kosten, die durch das Outsourcing intern eingespart werden können, zusätzliche Kosten durch das Outsourcing und die Veränderung der aktuellen Kosten. Die Autoren schränken allerdings ein, dass das Konzept der Total Cost of Ownership nur bei weitreichenden Entscheidungen verwendet werden sollte, da es einen merklichen Aufwand für das Unternehmen bedeutet. Im Gegenzug erhalten Unternehmen auch einen sehr detaillierten Einblick in die Kostenstruktur einer „make or buy“-Entscheidung. [EII-1995]

Bünting gibt in seinem Beitrag [Bün-2009] einen Überblick über die Grundidee der Lebenszykluskosten. Hierzu nennt er praxisrelevante Anforderungen an ein Lebenszykluskostenmodell:

- Berechnungsmodell als Grundlage, in definierten Grenzen anpassbar gestaltet, ohne das Modell an sich infrage zu stellen
- Quantifizierbare Eingangsgrößen
- Konzentration auf die wesentlichen Aspekte
- Adaptierbarkeit auf möglichst viele Bereiche
- keine Bevorteilung eines der Geschäftspartner (Lieferant oder Kunde)
- Aufzeigen von Optimierungspotenzialen
- Gültigkeit über Ländergrenzen hinweg
- gute Umsetzungsmöglichkeit in der IT-Infrastruktur

Am Beispiel des VDMA-Einheitsblattes [VDMA 34160] erläutert *Bünting* die Phasen und die Anwendung eines Lebenszyklusberechnungsmodells, während er am Beispiel der VDI-Richtlinie [VDI 2884] auf die Messbarkeit der einzelnen Bestandteile eingeht. Als Vorteile für den Kunden / Betreiber sieht er generell die Möglichkeit eine höhere Zuverlässigkeit und damit Verfügbarkeit zu monetarisieren wie auch das einfache Auffinden von Ansätzen für Verbesserungen an Maschinen. Für den Anbieter bietet sich u.a. die Möglichkeit seine Entwicklungskapazitäten auf Ansätze fokussieren, welche die kostenmäßig bedeutendste darstellt. Wesentliche Elemente einer Lebenszykluskostenanalyse sind nach *Bünting* die Identifizierung der maßgeblichen Kostenfaktoren sowie die Betrachtung für Wartung und Instandhaltung. [Bün-2009]

Dreier und *Wehking* adressieren in ihren Beiträgen [Dre-2015a, Dre-2015b] insbesondere die Lebenszykluskosten von elektrischen Antriebssystemen in intralogistischen Fördertechnikanlagen. Hierzu definieren die Autoren die relevanten Kostenarten für die Antriebssysteme und stellen dabei die zentrale Rolle der Energiekosten für diese Antriebssysteme heraus. Hierzu wird ein Berechnungsmodell auf Basis analytischer Gleichungen aufgestellt, mit dem es möglich ist, den Energiebedarf in der Nutzungsphase zu berechnen. Dieses Modell geht ähnlich zu [Hab-2013a] von der mechanisch benötigten Leistung aus und berücksichtigt mithilfe von entsprechenden Wirkungsgraden die Verluste in Getrieben, Motoren und weiteren Elementen der elektrischen Antriebstechnik. Zur Berechnung der gesamten Lebenszykluskosten wird ein Vier-Ebenen-Modell entwickelt, bei dem die Berechnung der Lebenszykluskosten ausgehend von Fördertechnikanlagenebene über die Fördermittelebene auf die Ebene der einzelnen Antriebe heruntergebrochen wird. In jeder Ebene werden dabei die maßgeblichen Parameter für die Berechnung identifiziert. Die Umsetzung des Modells erfolgt im Rahmen einer Softwarelösung, die auf Basis der entsprechenden Parameter die gesamten Lebenszykluskosten berechnet. Das vorge-

stellte Berechnungsmodell wird auf Basis von Energiemessungen validiert und an unterschiedlichen Fördermitteln angewandt. Ergebnis dieser Anwendung ist, dass die Anschaffungskosten mit ca. 80 % bei den betrachteten Fördermitteln mit kleinen Nennleistungen der Antriebe den Großteil der Kosten verursachen. Die Energiekosten spielen im Vergleich dazu nur eine untergeordnete Rolle. Neben den Anschaffungskosten sind die Instandsetzungskosten die zweite nennenswerte Kostenart. [Dre-2015a, Dre-2015b]

Bornschlegl et al. zeigen in ihrer Veröffentlichung [Bor-2016] die Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung am Beispiel des automobilen Karosseriebaus. Da ein Großteil der während der Nutzung auftretenden Kosten bereits während der Planungsphase festgelegt wird, ist es erforderlich, dass für langfristigen Investitionen auch der Energiebedarf berücksichtigt wird. Ziel der Autoren ist die Entwicklung eines Ansatzes, mit dem das Kostenoptimum durch die Einbeziehung der Betriebskosten über die Laufzeit der Anlage gefunden werden kann. Hierzu werden zunächst die in den einzelnen Lebensphasen maßgeblichen Einflussfaktoren identifiziert. Die Autoren entwickeln auf Basis der einzelnen Kostenarten ein Modell, mit dem die Lebenszykluskosten berechnet werden können. Eine besondere Herausforderung stellt die Berücksichtigung des Energiebedarfs der Anlage dar, da diese Daten nicht direkt zur Verfügung stehen, sondern mithilfe des Methods-Energy-Measurement erst abgeschätzt werden müssen. Für die Prognose der Wartungs- und Instandhaltungskosten wird ebenso ein Modell aufgestellt, mit dem diese Kosten über der Anlagenlaufzeit berücksichtigt werden können. Das entwickelte Modell wird in einer Software umgesetzt, mit der auch unterschiedliche Varianten hinsichtlich ihrer Lebenszykluskosten verglichen werden. [Bor-2016]

Rechl und Günthner gehen in ihrem Beitrag [Rec-2016] insbesondere auf die Lebenszykluskosten von Intralogistikanlagen ein, um eine Basis für Investitionsentscheidungen zu schaffen. Hierzu werden zunächst die Struktur der Lebenszykluskosten für automatisierte Intralogistiksysteme und die maßgeblichen Kostenarten definiert. Als Lebenszyklus werden insgesamt vier Phasen erläutert:

- Konzeption und Design
- Beschaffung und Installation
- Nutzung
- Entsorgung

Für jede dieser Phasen werden die maßgeblichen Kostenarten identifiziert und Möglichkeiten zur Quantifizierung aufgezeigt. Die Phase der Entsorgung wird als nicht relevant vernachlässigt, da sie bei der Beschaffung nur eine untergeordnete Rolle

gegenüber den Beschaffungs- und Betriebskosten spielt. Darauf aufbauend stellen die Autoren anhand von drei ausgeführten Anlagen eine Analyse dieser Anlagen vor und zeigen dabei die maßgeblichen Kostenarten auf. Hierzu zählen u. a. die Beschaffung, die Instandhaltung, Energie- und Personalkosten.

Zusammenfassend existieren zur wirtschaftlichen Bewertung eine Vielzahl an Verfahren aus dem Controlling und der Investitionsrechnung, wobei der Ansatz einer Betrachtung des gesamten Lebenszyklus nicht bei allen Verfahren zur Anwendung kommt. Dieser Aspekt wird nur von den Ansätzen Total-Cost-of-Ownership (TCO) und Lebenszykluskosten (LCC) fokussiert, wobei sich beide Verfahren nur in Details unterscheiden und eine sehr große Schnittmenge in den Herangehensweisen zeigen bzw. die Lebenszykluskosten teilweise auch als Teilmenge der TCO angesehen werden können. Unterstützt wird die Anwendung dieser Verfahren sowohl in methodischer als auch in vorgehenssystematischer Hinsicht durch ein ausführliches Schrifttum, vor allem aus dem Bereich unterschiedlicher Verbände [VDI 2884, VDMA 34160, DIN EN 60300-3-3].

3.3.2 Verfahren zur ökologischen Bewertung

Dieser Abschnitt behandelt Verfahren, mit denen die ökologische Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Produkte ermittelt werden kann. Hierzu haben sich bereits zahlreiche Verfahren etabliert, die teilweise deutlich unterschiedliche Aspekte adressieren.

Ökobilanzierung

„Die Ökobilanz ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umweltwirkungen [...] Die Ökobilanz-Studie untersucht die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebenswegs eines Produktes (d. h. von der Wiege bis zur Bahre) von der Rohstoffgewinnung, über Produktion, Anwendung bis zur Beseitigung“ [DIN EN ISO 14040]. Maßgeblicher Gedanke bei der Ökobilanzierung ist die Analyse des Produkts auf seinem vollständigen Lebensweg, nicht nur während seiner Nutzung. Der Lebenszyklus eines materiellen Produkts untergliedert sich stark vereinfacht nach [Klöß-2009] in die folgenden Phasen:

- Rohstoff- und Energieträgergewinnung
- Herstellung der Zwischenprodukte
- Herstellung des Endprodukts
- Ge- bzw. Verbrauch/Nutzungsphase
- Beseitigung bzw. Verwertung

Zwischen den einzelnen Phasen erfolgen jeweils Transporte der Zwischenprodukte bzw. anderer Stoffe, die für den Betrieb oder die Beseitigung des Produkts notwendig sind. In [DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14040] wird kein expliziter Lebenszyklus vorgegeben, sondern nur Richtlinien für die Definition des Zyklus.

Die Ökobilanzierung bezieht sich zumeist auf einen bestimmten Nutzen, was die Definition einer funktionellen Einheit notwendig macht. Als markantes Beispiel wird an dieser Stelle meistens auf unterschiedliche Getränkeverpackungen verwiesen, die zwar alle denselben Nutzen aufweisen (Transport einer bestimmten Menge Getränk), sich allerdings in den Umweltwirkungen deutlich unterscheiden.

Die Ökobilanz ist nach [DIN EN ISO 14040] in vier unterschiedliche Phasen gegliedert, die während der Bilanz durchlaufen werden. Dabei sind auch Iterationen vorgesehen, so dass auch zu späteren Zeitpunkten noch Anpassungen am Untersuchungsrahmen ermöglicht werden. In Abbildung 3-15 sind die einzelnen Phasen einer Ökobilanz nach [DIN EN ISO 14040] schematisch dargestellt.

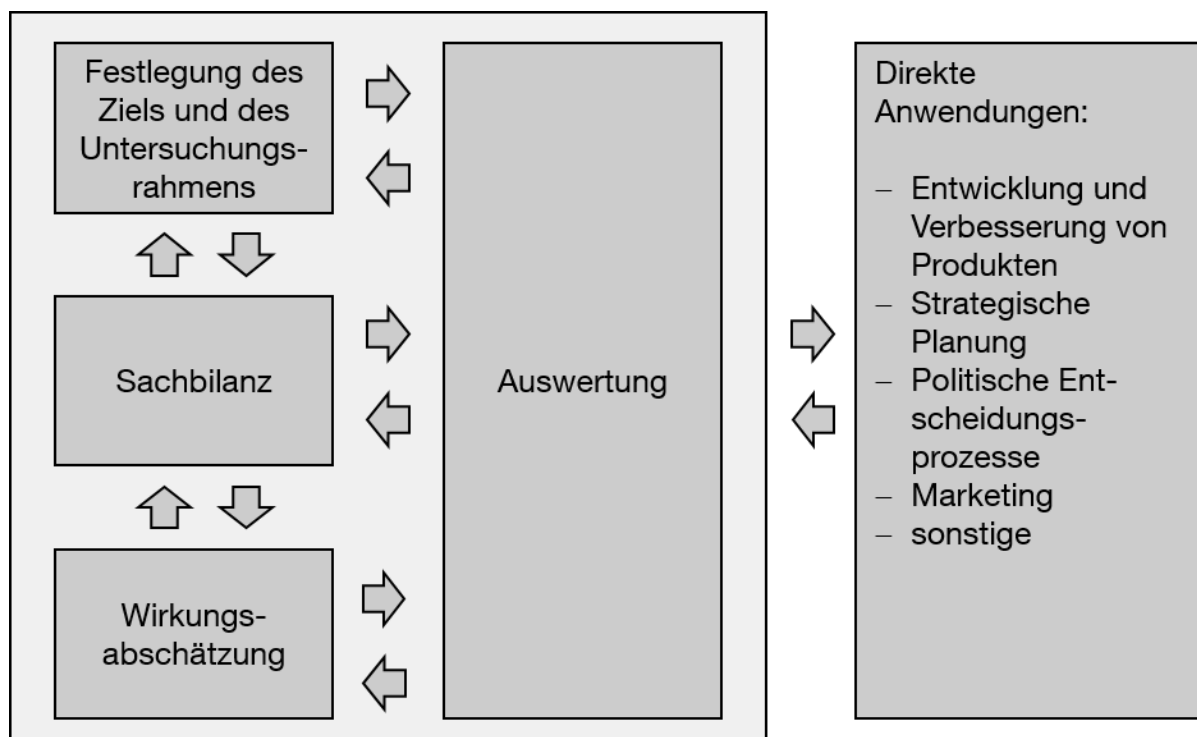


Abbildung 3-15: Phasen einer Ökobilanz nach [DIN EN ISO 14040]

Die Grundsätze und Rahmenbedingungen für eine Ökobilanz werden in [DIN EN ISO 14040] beschrieben und stellen die Leitlinien bei der Erstellung einer Ökobilanz dar. Eine Ökobilanz wird in unterschiedliche Phasen eingeteilt. Zu Beginn steht die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens. In dieser Phase gilt es neben dem Grund für die Durchführung der Ökobilanz zum einen das Produktsys-

tem an sich festzulegen, aber auch die Systemgrenzen für das betrachtete Produktsystem. Dies betrifft die eindeutige Festlegung der Systemgrenze und die Beschreibung der Funktion als Basis für die Definition der funktionellen Einheit [Klöß-2009]. Als Modellierungswerkzeug für die Abbildung des Produktsystems eignen sich Systemfließbilder, in denen die einzelnen Prozessmodule und die Verbindungen bzw. Wechselwirkungen zwischen den Modulen dargestellt werden. Sollen Lebenswegabschnitte bei der Ökobilanzierung weggelassen werden, so muss geprüft werden, dass sich hierdurch keine Fehler in der Wirkungsabschätzung ergeben. Bei vergleichenden Ökobilanzen zwischen zwei Produktsystemen ist es hingegen einfacher Lebenswegabschnitte entfallen zu lassen, falls sie für beide Produkte zu den identischen Ergebnissen in der Wirkungsabschätzung führen [Klöß-2009]. Die Wahl der Systemgrenze verlangt vor allem bei vergleichenden Ökobilanzen größtmögliche Sorgfalt, da die Ergebnisse sonst nicht miteinander vergleichbar sind. Dies gilt neben der Systemgrenze für das Produktsystem auch für die geografische und die zeitliche Systemgrenze. Weiterhin ist bei den sog. Abschneide-Regeln für das Produktsystem eine sorgsame Auswahl zu treffen. Nach [DIN EN ISO 14044] werden Abschneide-Regeln für folgende Aspekte definiert:

- Masse
- Energie
- Umweltrelevanz

Dabei wird oftmals ein Anteil von 1 % am Gesamtsystem als relevantes Abschneide-Kriterium gewählt. Dies betrifft bei der Herstellung beispielsweise verwendete Materialien, die weniger als 1 % der Gesamtmasse ausmachen. Diese Materialien werden in der Ökobilanzierung nicht mehr berücksichtigt. Der Gesamtanteil an weggelassener Masse sollte allerdings die Größenordnung 5 % nicht übersteigen [Klöß-2009]. Die Festlegung der funktionellen Einheit als Referenzgröße für die Ökobilanz erfolgt ebenfalls während der ersten Phase der Ökobilanz. Maßgeblicher Faktor hierfür ist der Produktnutzen, der genau darzustellen ist, sowie der Zeithorizont vor allem für langlebige Produkte. Bereits in der ersten Phase der Ökobilanz werden auch die Art und die Kategorien für die Wirkungsabschätzung definiert und festgelegt. Dabei wird unter anderem in ressourcenbezogene Kategorien und emissionsbezogene Kategorien unterschieden [Klöß-2009]. Im Rahmen der Sachbilanz erfolgt die Bilanzierung der Stoff- und Energieströme über die Systemgrenze des Produktsystems in den einzelnen Phasen des Lebenszyklus. Dabei werden dieser Bilanzierung grundlegende naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten, wie die Energie- und die Massenerhaltung oder die Gesetze der Stöchiometrie zugrunde gelegt [Klöß-2009]. Der Lebensweg des Produkts wird in einzelne Prozessmodule als kleinste Einheit untergliedert, wobei für jeden einzelnen Prozessschritt die Stoff- und Energieströme bilanziert

werden. In Abbildung 3-16 ist die Modellierung eines einzelnen Prozessmoduls am Beispiel eines Fertigungsschrittes dargestellt.

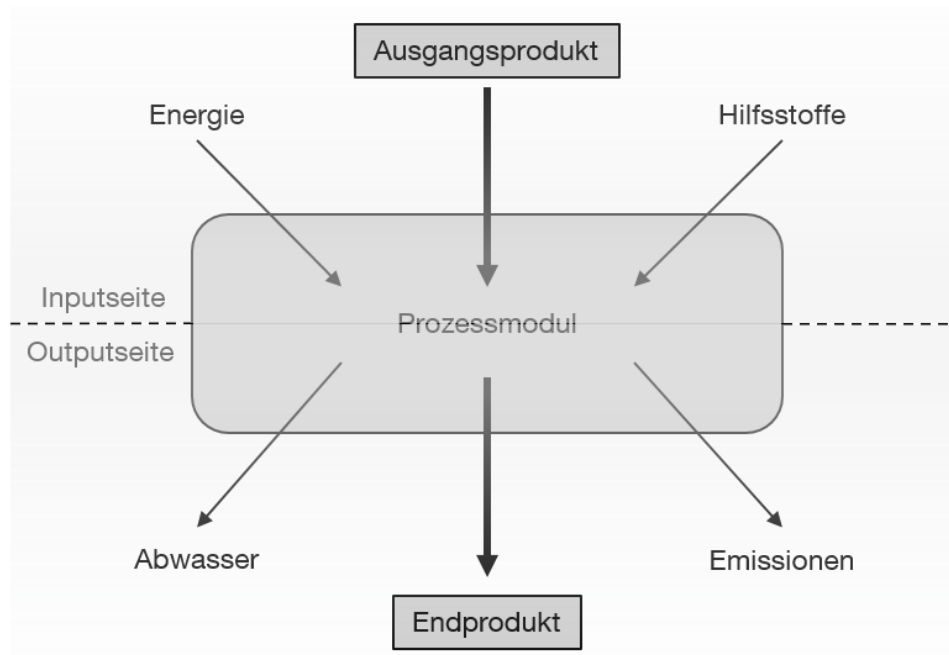


Abbildung 3-16: Prozessmodul in einer Ökobilanz gemäß [Klö-2009]

Auf der Inputseite werden neben dem Ausgangsprodukt aus dem vorhergehenden Prozess alle weiteren Eingangsgrößen wie Energie oder Hilfsstoffe dargestellt und größenmäßig erfasst, die innerhalb des Prozessschrittes notwendig sind. Das entsprechende Abschneide-Kriterium ist auf diese Größen anzuwenden. Auf der Ausgangsseite stehen neben dem Endprodukt aus diesem Prozessschritt die Bilanzierung von Emissionen in Wasser, Luft und Boden im Vordergrund. Die Weiterverarbeitung des Produkts erfolgt in nachgelagerten Prozessschritten, genauso wie die Behandlung von Abfällen. Die Abfolge von einzelnen Prozessmodulen bildet ein Fließdiagramm, das die Basis für die Quantifizierung der In- und Outputs auf dem gesamten Lebensweg eines Produkts ausmacht. Besonderes Augenmerk ist auf Verzweigungen in Prozessketten zu legen. Diese treten immer dann auf, wenn entweder mehrere Ausgangsprodukte in einem Prozessmodul in ein Folgeprodukt übergehen oder aus einem Vorprodukt ein Folgeprodukt und zusätzlich mehrere Nebenprodukte entstehen. Die Behandlung dieser als Koppelprodukte bezeichneten Größen erfolgt entweder durch Allokation oder durch Systemerweiterung. Bei der Allokation verlassen die Koppelprodukte das untersuchte Produktsystem, während bei der Systemerweiterung die Systemgrenze auch über die Koppelprodukte gezogen und das System damit deutlich größer und komplexer wird. Zwischen den einzelnen Lebensphasen erfolgen in der Regel Transporte des fertigen Produkts oder der Zwischenprodukte. In [Klö-2009] werden als Bezugsgröße Tonnenkilometer [tkm] bzw.

Personenkilometer [Pkm] unter Berücksichtigung der Auslastung vorgeschlagen. Für diese Größen liegen für unterschiedliche Transportmittel wie Flugzeug, Bahn oder LKW Datensätze vor, die in der Sachbilanz verwendet werden können.

Hinsichtlich der Entsorgungsphase eines Produkts besteht die Fragestellung nach Recycling in geschlossenen oder offenen Kreislauf. Beim geschlossenen Recycling liefert das Produkt nach dem Gebrauch wieder die Ausgangsstoffe für die Produktkette desselben Produkts. In der Praxis ist dieser Ansatz allerdings kaum möglich, sodass das Recycling in einem offenen Kreislauf stattfindet [Klö-2009]. Im Fall des offenen Kreislaufs bilden die Recyclingstoffe eines Produkts wieder die Ausgangsstoffe für ein anderes Produkt [Klö-2009].

Besonderes Augenmerk bei der Ökobilanz ist auf die Datenbasis hinsichtlich Datenherkunft und Datenqualität für die Sachbilanz zu legen. Mithilfe der Produktbeschreibungen wird definiert, welche Materialien mit welchen Anteilen im Produkt verwendet werden. Durch das Aufstellen der entsprechenden Systemfließbilder werden die In- und Outputs für jedes einzelne Prozessmodul erfasst. Als Datengrundlage zur Bestimmung der Emissionen aus bestimmten Prozessen wie bspw. der Bereitstellung von elektrischer Energie oder Transporte können sog. generische Daten oder Daten aus Teilsachbilanzen verwendet werden. Diese Daten können meistens in Datenbanken wie ProBas (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente) des Umweltbundesamtes gefunden werden [Klö-2009].

Eine vollständige Ökobilanz beinhaltet eine Wirkungsabschätzung, in der die potentiellen Umweltwirkungen eines Produkts oder Produktsystems auf dem gesamten Produktlebensweg hinsichtlich ihrer Größe und Bedeutung beurteilt werden [DIN EN ISO 14044]. Verbindliche Bestandteile einer Wirkungsabschätzung sind nach der aktuellen Normung auf diesem Gebiet [DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14040] die Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen, die Zuordnung der Sachbilanzergebnisse und die Berechnung der Wirkungsindikatorwerte.

Die abschließende Auswertephase dient vor allem dazu, die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam zu betrachten und die Ergebnisse hinsichtlich der festgelegten Ziele im Untersuchungsrahmen gegenüberzustellen [DIN EN ISO 14040]. Die Auswertung gliedert sich in die beiden Hauptbestandteile „Identifizieren der signifikanten Parameter“ und „Beurteilung“. Bei der Beurteilung werden neben der Vollständigkeitsprüfung, der Sensitivitätsprüfung, der Konsistenzprüfung weitere Prüfungen herangezogen [DIN EN ISO 14044]. Die am weitesten verbreitete Methode ist dabei die Sensitivitätsprüfung. Diese dient dazu, die Qualität

der getroffenen Annahmen hinsichtlich der Abschneide-Kriterien oder der Datengrundlage zu beurteilen [Klö-2009].

Für die Durchführung einer Ökobilanz oder Sachbilanzstudie wird meist auf kommerzielle Softwarepakete zurückgegriffen, die den Vorteil einer einfachen Bedienung besitzen und oftmals bereits Datenbanken für bestimmte Prozesse als generische Daten beinhalten. *Lüdemann* und *Feig* vergleichen in ihrem Beitrag [Lüd-2014] unterschiedliche Softwarelösungen und kommen zu dem Ergebnis, dass sich die einzelnen Pakete vor allem hinsichtlich der grafischen Benutzeroberfläche, der notwendigen Arbeitsschritte für die Modellierung und denkbarer Erweiterungsmöglichkeiten unterscheiden [Lüd-2014]. *Köhler* und *Steinhilper* zeigen in ihrem Beitrag [Köh-2011] die Anwendung der Ökobilanz auf die Logistikbranche anhand eines Beispiels mithilfe der Softwarelösung SimaPro und der ecoinvent Datenbank. Dabei beschränken sie die Untersuchung auf das Erderwärmungspotenzial GWP (Global Warming Potential) [Köh-2011].

Wörner und *Dold* [Wör-2006] geben in [Krc-2006] mit ihrem Beitrag einen Einblick in die Rolle der Ökobilanzierung im Stoffstrommanagement. So können die Ergebnisse bspw. vom Handelsunternehmen für die Sortimentspolitik verwendet werden, um die Umweltverträglichkeit ihrer Produkte nachzuweisen und zu bewerben. Im Bereich der Produktentwicklung ist es möglich Schwachstellen in Produkten aufzudecken und denkbare Verbesserungsansätze an den maßgeblichen Stellen abzuleiten. Diese Verbesserungen können dazu Kosteneinsparpotenziale darstellen. Zusätzlich weisen die Autoren auf mögliche Anwendungsprobleme und Grenzen der Ökobilanzierung hin. Hierzu zählen insbesondere notwendige Ausgrenzungen hinsichtlich der Lebensphasen oder auch der Umweltwirkungen, die im Rahmen der Ökobilanz betrachtet werden. Diese Ausgrenzungen sind aber aufgrund der mitunter noch unbefriedigenden Datenlage zwingend notwendig. Vor allem bei vergleichenden Ökobilanzen stellt sich häufig die Frage der funktionalen Äquivalenz. Um diese sicherzustellen, ist es nötig, Eigenschaften der verglichenen Produkte in einander umzurechnen bzw. auf eine einheitliche Basis zu stellen. Eine generelle Herausforderung bei der Durchführung von Ökobilanzen besteht darin, dass nur endliche Ressourcen in zeitlicher und finanzieller Hinsicht zur Verfügung stehen, welche die Tiefe der Untersuchung limitieren. [Wör-2006]

Kellens et al. präsentieren in ihrem zweiteiligen Beitrag [Kel-2012a, Kel-2012b] als Einsatzgebiet für die Ökobilanzierung eine Methode für die systematische Bilanzierung von Fertigungsprozessen mit dem Ziel, Einheitswerte für diese Prozesse zur Verfügung zu stellen. Hierzu entwickeln die Autoren ein zweistufiges Verfahren, das zum einen sog. Screening Approach und zum anderen einen In-Depth Approach

enthält. Basis für beide Ansätze ist die Definition einer funktionellen Einheit, die bspw. für das Laserschneiden mit 1 m festgelegt werden kann und die Festlegung von Systemgrenzen und Einheitsprozessen, welche im Rahmen der Analyse bilanziert werden sollen. Der Screening Approach liefert lediglich auf Basis der vorhandenen Daten eine schnelle Abschätzung der Umweltwirkungen. Hierzu werden auf Basis physikalischer Gesetzmäßigkeiten der Energiebedarf aus der benötigten Leistung und der Einschaltzeit berechnet. In analoger Art und Weise wird mit den Stoffen für die Bilanz verfahren. Demgegenüber steht der In-Depth Approach, bei dem die unterschiedlichen Leistungsanforderungen der Maschine näher betrachtet werden. Zusätzlich erfolgt bei diesem Ansatz eine exaktere Bilanzierung von Hilfsstoffen wie Druckluft oder Sauerstoff. Dazu kommt eine Messung der direkten Emissionen, die in jedem Arbeitszustand der Maschine anfallen wie Partikel oder andere Emissionen in die Umgebungsluft. Mithilfe dieser Methoden gelingt es den Autoren eine umfangreiche Datenbank für die Einbeziehung unterschiedlicher Fertigungsprozesse in Ökobilanzen zu schaffen. Die Anwendbarkeit beider Methoden wird mithilfe zweier Fallstudien vorgestellt. Durch die Anwendung der vorgestellten Methoden an einer Vielzahl unterschiedlicher Maschinen und Prozesse besteht ein großes Potenzial für den Ersteller von Ökobilanzen eine fundierte Grundlage hinsichtlich von Fertigungsverfahren zu schaffen. [Kel-2012a, Kel-2012b]

Grotz und *Scholl* adressieren in ihrem Beitrag [Gro-1996] die Anwendung der Ökobilanz in unterschiedlichen Industriezweigen in Deutschland auf Basis einer Umfrage unter Unternehmen in diversen Branchen. Ziel dieser Umfrage war in erster Linie die Untersuchung der Relevanz der Ökobilanzierung für Unternehmen. Hierfür wurden insgesamt 77 positive Rückläufer der Fragebögen ausgewertet. Ergebnis der Umfrage ist, dass die Ökobilanzierung intern vor allem zur Optimierung von Produkten und Prozessen und zur Analyse von Schwachstellen verwendet wird. Externe Ziele werden vor allem hinsichtlich Marketing, Verbraucher- /Käuferinformation und Information von öffentlichen Organen angewendet. Die Anwendung bleibt dabei nicht nur auf die eigenen, bestehenden Produkte beschränkt, es werden auch Wettbewerbs- sowie geplante Produkte untersucht. Zusammenfassend merken die Autoren an, dass die Bedeutung der Ökobilanz in der deutschen Industrie wächst und sich die Erfahrung von deutschen Unternehmen in diesem Bereich vergrößert, wobei die Breite der Anwendung branchenspezifisch variiert. [Gro-1996]

Ostad-Ahmad-Ghorabi und *Collado-Ruiz* zeigen in ihrer Veröffentlichung [Ost-2011] ein Werkzeug für die Ökobilanzierung von Knickarmkränen (LKW-Ladekränen) auf Basis von 13 maßgeblichen Konstruktions- und Leistungsparametern. Die Herausforderung bei dieser Arbeit bestand darin ein Modell für die Ökobilanzierung auf Basis einer geringen Anzahl an Parametern zu erstellen und zudem Größen zu identifi-

zieren, mit denen die Leistung dieser Kranbauart dargestellt werden kann. Hierzu wurde der Designprozess in Zusammenarbeit mit einem Kranhersteller analysiert und die Schlüsselparameter herausgearbeitet. Mithilfe einer vollständigen Ökobilanz an einem repräsentativen Referenzkran werden die Prozesse auf dem gesamten Produktlebensweg abgebildet, wobei der Lebensweg die Aspekte Materialauswahl, Fertigung, Distribution, Verwendung und Lebensende umfasst. Als Schlüsselparameter konnte so das maximale Lastmoment identifiziert werden. Weitere Parameter beziehen sich auf die einzelnen Produktlebensphasen und werden in [Ost-2011] in einer Übersicht zusammengestellt. Zusätzlich zu diesen Schlüsselparametern werden weitere in den einzelnen Lebenswegabschnitten aufgezeigt, die innerhalb der Ökobilanz berücksichtigt werden und die Wechselwirkungen zwischen diesen Parametern und den Schlüsselparametern herausgearbeitet. Zum Vergleich unterschiedlicher Krane wird ein Kennzahlensystem entwickelt, bei dem die Leistungsfähigkeit des Krans ins Verhältnis zu seinen Umweltwirkungen gesetzt wird und damit die ökologische Effizienz des Krans I_3^i bildet. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung (3-2) dargestellt.

$$I_3^i = \frac{\text{Größtes Lastmoment}}{\text{Gesamte Umweltwirkung}} \quad (3-2)$$

Als Umweltwirkungen können beispielsweise die Treibhausgasemissionen oder der kumulierte Energiebedarf verwendet werden. Durch den Bezug dieser Kenngröße auf die innerhalb einer Produktkategorie mächtigsten gefunden Größe lässt sich eine dimensionslose Kennzahl ableiten, mit der die ökologische Effizienz neuer Produkte bewertet werden kann. In einer Studie, in der sechs unterschiedliche LKW-Ladekrane mit dem entwickelten Model unter Einbeziehung der Schlüsselparameter bewertet und die Ergebnisse mit einer Ökobilanzierung, bei der auch die weiteren Parameter zum Einsatz kamen, verglichen werden, wird die Anwendung des Modells gezeigt. Ergebnis dieser Untersuchung ist, dass bereits mit wenigen Parametern eine sehr gute Annäherung an das Ergebnis gelingen kann, wobei nur Abweichungen zwischen beiden Verfahren von höchstens 4 % in Kauf genommen werden müssen. Für diese Kranbauart ist es damit möglich mit diesem reduzierten Parametersatz bereits in frühen Designphasen eine qualitativ gute Abschätzung der ökologischen Effizienz durchzuführen. [Ost-2011]

Kumulierter Energieaufwand

Die Richtlinie 4600 des Vereins Deutscher Ingenieure definiert zur Bewertung der Ressourcenbelastung durch die Technik den kumulierten Energieaufwand als maßgebliche Größe [VDI 4600, VDI 4600-1]. Der kumulierte Energieaufwand ist dabei nicht nur als Einzelaspekt zu verstehen, sondern ist auch Bestandteil einer umfassenden Ökobilanzierung. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) „gibt die Gesamtheit

des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann“ [VDI 4600]. Damit vollzieht sich die Berechnung des kumulierten Energieaufwands nach Gleichung (3-3).

$$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E \quad (3-3)$$

Darin bezeichnen KEA den kumulierten Energieaufwand, KEA_H den Anteil für die Herstellung, KEA_N für die Nutzung und KEA_E repräsentiert den Anteil für die Entsorgung des Guts.

Die einzelnen Anteile am kumulierten Energieaufwand spiegeln dabei die im folgenden dargestellten Aspekte wieder:

- **KEA_H:**
Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung KEA_H umfasst neben den eigentlichen Herstellungsprozessen auch die bei der Gewinnung, Verarbeitung, Herstellung und Entsorgung entstehenden primärenergetischen Aufwendungen. Auch Transportaufwendungen werden in dieser Kategorie berücksichtigt. [VDI 4600]
- **KEA_N:**
Der kumulierte Energieaufwand für die Nutzung KEA_N beinhaltet alle primärenergetischen Aufwände für den Betrieb oder die Nutzung des betrachteten Guts. In diese Kategorie fallen auch die Wartung und Instandhaltung und die damit verbundenen Aufwände für Herstellung und Entsorgung von Betriebsstoffen bzw. Betriebsmitteln. Notwendige Transporte sind ebenfalls mit in die Betrachtung einzubeziehen. [VDI- 3633-8, VDI 4600]
- **KEA_E:**
Der kumulierte Energieaufwand für die Nutzung KEA_N summiert alle Primärenergieaufwände für die Entsorgung des Guts oder Teile davon. Dazu gehören auch die Herstellung und Entsorgung von Betriebs- und Hilfsstoffen für die Entsorgung sowie die notwendigen Transporte. [VDI- 3633-8, VDI 4600]

Der kumulierte Energieaufwand setzt sich aus den Bestandteilen kumulierter Energieverbrauch KEV mit den Unterkategorien Endenergie für Wärme, Kraft, Licht und sonstige Nutzungselektrizitätserzeugung und kumulierter nicht energetischer Aufwand KNV zusammen. Der kumulierte nicht energetische Aufwand besteht wiederum aus dem nicht energetischen Verbrauch NEV und dem stoffgebundenen Energieein-

halt SEI. Der gesamte kumulierte Energieaufwand berechnet sich damit aus den einzelnen Bestandteilen nach Gleichung (3-4). [VDI 4600]

$$KEA = \sum_{l=1} \frac{EE_l}{g_l} + \sum_{j=1} \frac{NEV_j}{g_j} + \sum_{k=1} \frac{SEI}{g_k} \quad (3-4)$$

Der jeweilige Bereitstellungsnutzungsgrad g_i ist die Bezugsgröße und ist vergleichbar mit einem Wirkungsgrad, der sämtliche Prozesse von der Gewinnung der Primärenergieträger bis zur Bereitstellung der Energie abbildet [VDI 4600].

Ein wesentlicher Aspekt bei der Ermittlung des kumulierten Energieaufwandes ist die Definition der Bilanzgrenze, die in zeitlicher Hinsicht den gesamten Lebenszyklus des Produkts umfasst. Weitere Grenzen werden bezüglich des Ortes und weiteren technischen Kriterien, die in direktem Zusammenhang zueinander stehen und sich damit auch gegenseitig beeinflussen können. Die Bilanzierung erfolgt über einzelne Bilanzelemente, die beispielsweise einen Fertigungsschritt darstellen können. Als Eingangsgrößen wirken alle diesem Element zurechenbaren Primärenergie- und Rohstoffaufwendungen für die benötigten Fertigungs-, Betriebs- und Hilfsstoffe. [VDI 4600]

Die Methodik zur Bilanzierung basiert im Wesentlichen auf der Prozesskettenanalyse, bei der der Herstellungsvorgang in einzelne Prozesse aufgeteilt und die Bilanzen für jeden einzelnen Prozess aufgestellt werden. Die Gliederung dieser Prozesskettenanalyse vollzieht sich in eine Makroanalysephase, in der für die Herstellung der KEA_H auf Basis der Endfertigung und der Materialzusammensetzung geschätzt wird und die für die Nutzung und die Entsorgung ebenfalls Abschätzungen des KEA_N und des KEA_E erfolgen. Im Rahmen der Mikroanalyse erfolgt eine detailliertere Betrachtung auf der Ebene des Fertigungsaufwandes für Baugruppen und -teile für die Herstellung und die Ermittlung des Energie- und Wartungsaufwandes für die Nutzungsphase. Für die Entsorgung und den damit verbundenen KEA_E steht die Ermittlung der in Frage kommenden Entsorgungsverfahren und ihrer Prozesse im Vordergrund. Diese Mikroanalyse mündet in einem vorläufigen KEA, der in einem dritten Schritt einer Fehlerbetrachtung unterzogen werden muss. Als Werkzeug hierfür dient für gewöhnlich eine Sensitivitätsanalyse, mit der die Fehler eingegrenzt werden können. Ergebnis nach diesem Schritt ist der KEA für das Produkt auf Basis der betrachteten Prozesskette. [VDI 4600]

Product Carbon Footprint

Neben dem kumulierten Energieaufwand hat sich als weitere Größe zur ökologischen Bewertung von Produkten und Dienstleistungen der Product Carbon Footprint in den letzten Jahren etablieren können. Zur Durchführung eines Product Carbon Footprints sind in der Vergangenheit vor allem auf der Ökobilanzierung aufbauende Verfahren eingesetzt worden [Mat-2008, Pet-2010].

Für den Product Carbon Footprint gab es in der Vergangenheit keine einheitliche Definition, sondern zahlreiche unterschiedliche Ansätze [Wie-2008]. In den meisten Fällen beinhalten die Ansätze die Emission von Kohlenstoffdioxid oder generell Treibhausgasen, welche in CO₂-Äquivalenten ausgedrückt werden [Wie-2008]. Wiedmann schlägt deshalb in seinem Beitrag eine etwas eingeschränktere Definition vor:

"The carbon footprint is a measure of the exclusive total amount of carbon dioxide emissions that is directly and indirectly caused by an activity or is accumulated over the life stages of a product." [Wie-2008]

Im Gegensatz hierzu erweitert die [DIN CEN ISO/TS 14067] den Begriff auf alle Treibhausgasemissionen, nicht ausschließlich auf die Emissionen von Kohlenstoffdioxid und definiert Carbon Footprint gemäß des folgenden Wortlautes:

„Summe der emittierten Treibhausgasmengen (3.1.3.5) und der entzogenen Treibhausgasmengen (3.1.3.6) in einem Produktsystem (3.1.4.2), angegeben als CO₂-Äquivalent (3.1.3.2) und beruhend auf einer Ökobilanz (3.1.5.3), unter Nutzung der einzigen Wirkungskategorie (3.1.5.8) Klimawandel.“ [DIN CEN ISO/TS 14067]

Aus dieser internationalen Norm geht die Anforderung an die Durchführung einer Ökobilanz für die Ermittlung des CO₂-Äquivalents und eine Betrachtung des gesamten Produktlebenswegs hervor. Damit entsprechen die Phasen der Durchführung eines Product Carbon Footprints auch exakt denen, die in der Ökobilanzierung verwendet werden. Des Weiteren sind die Festlegung einer funktionellen Einheit und die Definition sinnvoller Abschneide-Regeln ein äquivalenter Baustein zur Ökobilanz. Die Offenlegung und Kommunikation der Ergebnisse eines Product Carbon Footprints werden ebenfalls als maßgebliche Bestandteile in [DIN CEN ISO/TS 14067] formuliert und entsprechende Leitlinien aufgestellt.

Einen zusammenfassenden Überblick über die wesentlichen methodische Ansätze und deren unterschiedliche Ausprägung bei der Erstellung eines Produkt Carbon Footprints liefern *Wiemann* und *Minx* [Wie-2008]. Zum einen kommt für einzelne Produkte oder Dienstleistungen ein sog. Bottom-up-Ansatz zur Anwendung, bei dem im

Rahmen einer Prozessanalyse eine Ökobilanz für den Umweltaspekt Treibhausgase durchgeführt wird. Besonderes Augenmerk bei diesem Ansatz muss auf die korrekte Wahl der Systemgrenze gelegt werden.

Im Gegensatz hierzu eröffnet der sog. Top-Down-Ansatz in Form einer Input-Output-Analyse die Möglichkeit, einen Carbon Footprint für Fragestellungen größeren Maßstabs wie bspw. für Regionen oder ganze Länder zu erzeugen. Diesem Ansatz liegt eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung für unterschiedliche Sektoren in Verbindung mit den entsprechenden Umweltdaten hinsichtlich Treibhausgasen zu Grunde, die im Rahmen der Analyse zusammengeführt werden.

Hybride Ansätze, die eine Verbindung zwischen Top-Down und Bottom-Up-Ansatz darstellen sind gegenwärtig noch Stand der Forschung und in der Lage, die Vorteile aus beiden Methoden zu vereinigen. [Wie-2008]

Weidema et al. ordnen in ihrem Beitrag [Wei-2008] den Product Carbon Footprint in den Kontext der Ökobilanzierung ein. Ein wesentlicher Unterschied zur vollständigen Ökobilanzierung besteht in der Tatsache, dass nur auf einen Wirkungsindikator – die Treibhausgasemissionen – eingegangen wird. Dieses Vorgehen kann laut den Autoren zu einer unvollständigen und damit fehlerhaften Einschätzung eines Produktes führen, eignet sich in bestimmten Fällen für einen Vergleich sehr ähnlicher Produkte. Als wesentlicher Aspekt wird zudem die Wahl der geeigneten Systemgrenze, sowohl hinsichtlich der Lebensphasen als auch hinsichtlich möglicher Koppelprodukte und Abschneide-Regeln herausgestellt. Die Autoren sehen im Product Carbon Footprint vor allem auch eine Möglichkeit, die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf ökologische Fragestellungen zu richten, z. B. mithilfe webbasierter Berechnungsprogramme für den eigenen Footprint. [Wei-2008]

Peters gibt in seinem Beitrag [Pet-2010] einen Überblick über unterschiedliche Definitionen und Methoden zur Durchführung eines Product Carbon Footprints. Als Anforderungen stellt er neben der Betrachtung des gesamten Lebenswegs auch die Applizierbarkeit auf unterschiedliche Betrachtungsebenen, beginnend von Produkten des täglichen Bedarfs bis hin zu gesamten Ländern, auf. Hinsichtlich der Methoden wird zwischen Input-Output-Modellen für die Betrachtung in großem Maßstab wie Länder oder Regionen und einer ökobilanzbasierten Betrachtung für einzelne Produkte unterschieden. Dazwischen rangieren Hybridmodelle, die wesentliche Aspekte aus beiden Ebenen verbinden und noch Gegenstand der Forschung sind. [Pet-2010]

Finkbeiner konzentriert sich in seiner Veröffentlichung [Fin-2009] vor allem auf Möglichkeiten und Fallstricke bei der Durchführung eines Product Carbon Footprints. Hierzu zeigt er zunächst unterschiedliche Aktivitäten, die sich mit der Erstellung bzw.

Harmonisierung von Regeln zur Durchführung des Footprints beschäftigen. Als relevante Fragestellungen für die Forschung identifiziert er u. A. folgende Aspekte:

- Auswahl der Treibhausgase
- Phasen des Lebenszyklus
- Systemgrenzen
- Speicherung von Kohlenstoffdioxid

Schlussfolgernd merkt *Finksteiner* an, dass der Product Carbon Footprint lediglich einen Teilaspekt der Ökobilanzierung darstellt, allerdings auch der Erfolg als „Augeöffner“ für ökologische Fragestellungen von der Wissenschaft anerkannt werden und die bestehenden Fragestellungen gelöst werden sollten. [Fin-2009]

Pandey et al. adressieren in ihrem Beitrag [Pan-2011] unterschiedliche Methoden zur Abschätzung des Product Carbon Footprints. Die Autoren gehen dabei von einem vollständigen Produktlebenszyklus aus, der alle Lebensphasen umfasst. Als Vorgehensweise werden folgenden Schritte propagiert:

1. Auswahl der Treibhausgase, die betrachtet werden sollen

In diesem Schritt erfolgt die Auswahl, welche Treibhausgase mit in die Betrachtung aufgenommen werden sollen. Neben Kohlenstoffdioxid, Methan und Distickstoffmonoxid haben weitere Gase ähnliche Klimawirkungen und sollten in Abhängigkeit des Anwendungsgebiets Eingang in die Betrachtung finden.

2. Aufstellen der Systemgrenzen

Das Aufstellen der Systemgrenzen adressiert mehrere Aspekte. Die wesentlichen dabei sind die Berücksichtigung von direkten und indirekten Emissionen und die sinnvolle Eingrenzung auf Basis der organisatorischen, finanziellen oder geschäftlichen Struktur.

3. Sammeln der entsprechenden Daten der Treibhausgase

Die Zusammenstellung der Treibhausgasemissionen basiert im Wesentlichen auf Emissionsfaktoren und Berechnungsmodellen, die Energiebedarfe zugrunde legen. Auch eine Messung der direkten Emissionen ist in einigen Anwendungsgebieten denkbar.

Mithilfe von Umrechnungsfaktoren werden die einzelnen Treibhausgasemissionsmengen auf ein sog. CO₂-Äquivalent umgerechnet. Einen wichtigen Aspekt stellt dabei der Zeitraum dar, für welchen der Footprint erstellt wird. Jährliche Footprints sind beispielsweise für die Nutzung von Gebäuden sinnvoll, wohingegen für Postsendun-

gen oder Reisen die Ausweisung eines einzelnen Footprints sinnvoller erscheint. Die Autoren zeigen anhand unterschiedlicher Beispiele aus der Literatur die unterschiedlichen Herangehensweisen zur Erstellung des Product Carbon Footprints auf. [Pan-2011]

Meier und *Shi* widmen sich in ihrem Beitrag [Mei-2011] der CO₂-Bestimmung und -Bewertung bei der Produktherstellung. Hierzu entwickeln sie ein Modell, mit dem die Produktionsprozesse unter dem Gesichtspunkt einer „Low Carbon“-Strategie analysiert werden können, die das Ziel einer Verringerung der CO₂-Emissionen aus der Produktion von Gütern verfolgt und dabei die gesamte Wertschöpfungs- bzw. Lieferkette betrachtet. Innerhalb des Modells werden drei unterschiedliche Arten von CO₂-Emissionen betrachtet:

- **Direkte Emissionen:** Diese entstehen bei der eigenen Erzeugung von Energie und Ressourcen.
- **Indirekte Emissionen:** Diese Emissionen entstehen durch den Verbrauch von zugekaufter Energie oder durch zugekaufte Teile.
- **Prozessemissionen:** Diese Kategorie adressiert Emissionen aus der Umwandlung von Ressourcen in Produktionsprozessen.

Das propagierte Modell besteht aus einem dreistufigen Verfahren. In einem ersten Schritt (Funktionsebene) werden sämtliche Energie- und Ressourcenflüsse für alle Teilprozesse ermittelt. Jeder Prozessschritt wird hierbei einer detaillierten Analyse unterzogen, bei der jeder Input in den Prozess zurückverfolgt wird und damit die Basis zur Berechnung aller Energie- und Ressourcenflüsse liefert. Durch eine Input-Output-Analyse werden sämtliche Energien und Ressourcen aufgenommen, die während eines bestimmten Zeitraums in ein System ein- oder ausgehen. An dieser Stelle werden ebenso die externen Zukaufteile untersucht. In der Datenebene erfolgt die Analyse des Energiebedarfs und der Emissionen der einzelnen Betriebsmittel und darauf aufbauend die Berechnung der CO₂-Emissionen mithilfe von CO₂-Emissionswerten bzw. -äquivalenten aus Datenbanken. In der letzten Ebene – der Berechnungsebene – werden die Soll-CO₂-Emissionen geplanter Prozessabläufe berechnet. Durch den Vergleich mit den Ist-Emissionen können Stellhebel für das Unternehmen identifiziert werden. [Mei-2011]

Zusammenfassend zeigt sich das Bild, dass im Augenblick nur die Ökobilanzierung als vollumfängliches Werkzeug zur Ermittlung aller Umweltaspekte eines Produkts oder einer Dienstleistung geeignet ist. Andere Verfahren adressieren jeweils nur ei-

nen einzelnen Aspekt, wie beispielsweise den kumulierten Energiebedarf oder die Treibhausgasemissionen.

3.3.3 Stand der Technik für die Schaffung einer Vergleichsbasis

Als dritte Komponente des Verfahrens steht die Schaffung einer Vergleichsbasis zwischen ökologischen und ökonomischen Aspekten im Fokus der Betrachtung. Hierzu wird an dieser Stelle ein Überblick über den Stand der Verfahren für diese Fragestellung gegeben. Dabei liegt der Fokus primär auf Ansätzen, mit denen sich die entstehenden Umweltwirkungen monetär erfassen und bewerten lassen. Dieses Verfahren bietet den zentralen Vorteil praxisnah, anschaulich und einheitenkonform (Geldeinheiten) in die Kostenrechnung integrierbar zu sein. Dabei wird zunächst allgemein auf mögliche ökonomische Bewertungsansätze von Umweltveränderungen eingegangen und darauf aufbauend der Stand der Umweltkostenrechnung dargestellt und anhand von Beispielen aus der Praxis erläutert. Zusätzlich wird ein Überblick über weitere Verfahren zur ökonomischen Bewertung von Umweltwirkungen gegeben.

Hansjürgens gibt in seinem Beitrag [Han-2015] eine Übersicht über mögliche ökonomische und soziale Bewertungsansätze von Umweltveränderungen. Ökonomische und damit meist auf monetären Aspekten basierende Bewertungsverfahren bieten den Vorteil, dass alle Größen auf eine einheitliche Basis gestellt werden. Die ökonomischen Bewertungsansätze basieren auf dem Kriterium der Knappheit und damit auf den Aspekt, dass die Leistungen der Umwelt nicht in unbegrenztem Maße zur Verfügung stehen. Die ökonomische Bewertung kann die tatsächlichen bzw. drohenden Einbußen der Leistungsfähigkeit der Umwelt transparent machen und leistet damit einen Beitrag zur Gesamtgesellschaftlichen Wohlfahrt. Dies betrifft nicht nur direkte Aspekte wie die Landwirtschaft, sondern auch die negativen Wirkungen auf Dritte, wie Gewässerqualität oder Verluste an biologischer Vielfalt. Abbildung 3-17 zeigt die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Unterkategorien des ökonomischen Gesamtwerts der Umwelt.

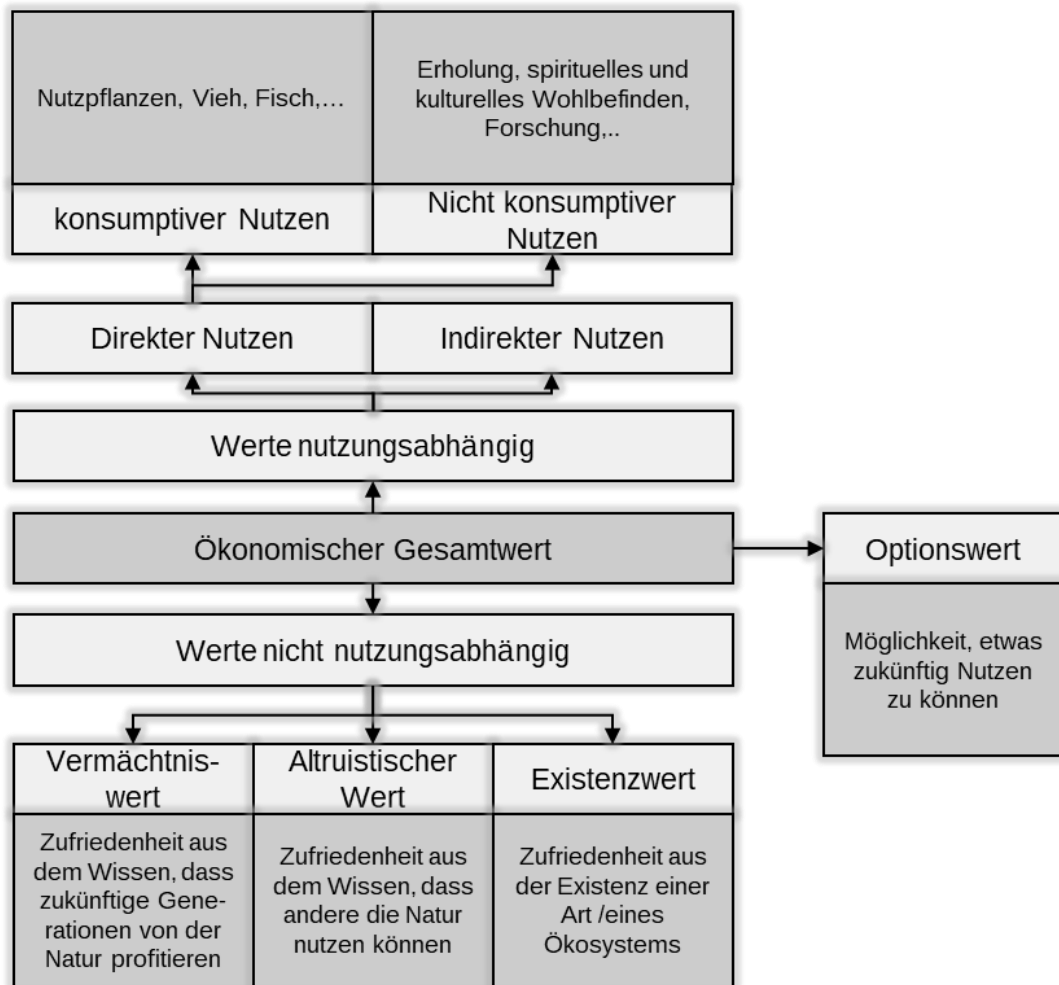


Abbildung 3-17: ökonomischer Gesamtwert der Umwelt in Anlehnung an [Nat-2012]

Generell zielen die ökonomischen Bewertungsverfahren darauf ab, die Zahlungsbereitschaft für die Umwelt zu quantifizieren, wobei hierfür unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen, welche in [Han-2015] zusammengefasst sind. Einen Ansatz die Inanspruchnahme der Umwelt kostenmäßig zu quantifizieren, stellen dabei die kostenbasierten Ansätze dar. Hierzu zählen die Opportunitätskosten, die Vermeidungskosten, die Ersatzkosten und die Wiederbeschaffungskosten.

Hinsichtlich der Unterstützung von Entscheidungen im politischen Rahmen existieren die Kosten-Nutzen-Analyse, die Kosten-Wirksamkeitsanalyse und die Multi-Kriterien-Analyse.

– **Kosten-Nutzen-Analyse:**

Bei diesem Verfahren wird der Nutzen der Umweltveränderung mit den entsprechenden Kosten für die dazugehörigen Maßnahmen bewertet. Mithilfe dieses monokriterialen Verfahrens wird es ermöglicht politische Entscheidungen auf Basis eines gesamtwirtschaftlichen Nutzens zu treffen. [Han-2015] Für die Vorgehensweise bei der Kosten-Nutzen-Analyse wird auf [Han-

2011] verwiesen. Ein Element stellt ähnlich der dynamischen Investitionsrechnung die Diskontierung der Kosten auf ein Basisjahr dar [Han-2011].

– **Kosten-Wirksamkeitsanalyse:**

Dieses Verfahren zielt primär darauf ab, unterschiedliche politische Optionen, die zu einem vergleichbaren Nutzen führen, miteinander zu vergleichen. Eine Vereinfachung gegenüber der Kosten-Nutzen-Analyse ergibt sich daraus, dass nur die Kostenseite bei gleichem Nutzen betrachtet wird. Dieses Instrument wird vor allem dann verwendet, wenn mehrere politische Optionen mit demselben prognostizierten Nutzen miteinander verglichen werden sollen. [Han-2015]

– **Multi-Kriterien-Analyse:**

Falls sich die Entscheidungsfindung unterschiedlicher politischer Alternativen nicht auf ein einzelnes Kriterium zurückführen lässt, steht die Multi-Kriterien-Analyse als geeignetes Instrument zur Verfügung. Zwar werden bei dieser Analyse mehrere Kriterien zur Bewertung von Alternativen herangezogen, allerdings kann es erforderlich werden, eine Gewichtung der einzelnen Kriterien aufzubauen, was bei der Einbeziehung unterschiedlicher Interessengruppen sehr aufwändig werden kann. [Han-2015]

Loew et al. liefern in [Loe-2003a] einen Vergleich von Ansätzen zur Umweltkostenrechnung und gehen dabei insbesondere auf die betrieblich Praxis ein. Als Umweltkostenrechnung werden entsprechende Methoden, Ansätze und Verfahren verstanden, die zur Berechnung der Umweltkosten herangezogen werden können. Umweltkosten per se entstehen aus den Prozessen des Umweltmanagements, Maßnahmen für den Umweltschutz und den aus dem Handeln eines Unternehmens entstehenden Umweltauswirkungen. Die Betrachtung von Umweltkosten kann neben einer ökologischen Vorteilhaftigkeit auch in einigen Fällen einen wirtschaftlichen Benefit mit sich bringen. Hierzu zählen insbesondere Einsparungen durch verringerten Energie- oder Wasserbedarf. Zur Berechnung der Umweltkosten gliedern die Autoren die möglichen Ansätze in vier unterschiedliche Gruppen:

– **Ansätze der Umweltschutzkostenrechnung:**

Dieser Ansatz dient im Wesentlichen zur Ermittlung und Abgrenzung der Kosten für den Umweltschutz, die ein Unternehmen zu tragen hat. Dies umfasst alle Tätigkeiten, die ein Unternehmen zur Vermeidung, zur Verringerung, zur Beseitigung, zur Überwachung aber auch zur Dokumentation von Umweltschäden oder -belastungen durchzuführen hat. [VDI 3800] Geeignete Berechnungsmodelle hierfür bilden die Richtlinie [VDI 3800] oder das Handbuch Um-

weltkostenrechnung des Umweltbundesamtes [Umw-1996]. Zusätzlich werden die gewonnenen Daten zur externen Kommunikation verwendet. [Loe-2003a]

– **Material- und energieflossorientierte Ansätze:**

Bei diesen Ansätzen stehen die Energie- und Materialflüsse insbesondere von produzierenden Unternehmen im Fokus, da diese meist einen direkten Zusammenhang mit den Umweltwirkungen besitzen. Basis für die Betrachtung der Kosten ist die detaillierte Modellierung der Materialflüsse, wofür eine breite Datenbasis aus den gängigen ERP-Systemen genutzt werden kann. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere zur Verbesserung der Ökoeffizienz und Erhöhen die Transparenz in der Kostenrechnung [Loe-2003a]. Hierzu werden beim Ansatz der Flusskostenrechnung die Materialflüsse im gesamten Unternehmen erfasst und die Kosten für den Umweltschutz, den Materialfluss und die Bearbeitung zusammengefasst. Beim Ansatz der Reststoffkostenrechnung werden – als ein Ansatz der Flusskostenrechnung – nur die bei jedem Schritt anfallenden Reststoffe gewertet, die nicht in das Produkt eingehen. Weitere Methoden, welche in [Loe-2003a] als geeignetes Instrument für die Verfolgung von Material- und energieflossorientierten Ansätzen dargestellt werden, ist das Materials-Only-Costing und das Lean und Green Supply Chain Management. [Loe-2003a]

– **Ansätze der umweltorientierten Investitionsrechnung:**

Bei der umweltorientierten Investitionsrechnung steht die Berücksichtigung von Umweltaspekten bei der Investitionsentscheidung im Vordergrund. Die verwendeten Ansätze zur Berücksichtigung sind hier der Richtlinie [VDI 3800], dem Ansatz der Investitionsrechnung für Umweltschutzinvestitionen nach Wicke [Wic-1992] und den Methoden der material- und energieflossorientierten Ansätze zu entnehmen. Wesentliches Ziel ist die Verbesserung von Produkten oder Produktionsprozessen oder die Bewertung von Umweltschutzmaßnahmen. Auch Alternativlösungen für den Umweltschutz können mit diesem Verfahren bewertet werden. Während der Ansatz von Wicke und die VDI-Richtlinie [VDI 3800] vor allem darauf abzielen, geforderte Mindeststandards hinsichtlich der Umweltwirkungen, die von einem Unternehmen ausgehen, möglichst kostengünstig einhalten zu können, indem unterschiedliche in Frage kommende Alternativen unter Kostenaspekten miteinander verglichen werden, gehen die material- und energieflossorientierten Ansätze einen Schritt weiter. Hier fließen neben den Anschaffungs- auch die Entsorgungskosten ein; es werden sämtliche Energie- und Stoffströme bilanziert und damit auch alle Ressourcenverbräuche und Emissionen. Die Einsparmöglichkeiten, die durch diesen Ansatz offenkundig werden, leisten sowohl einen direkten wirtschaftli-

chen Beitrag, als auch einen indirekten hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs und der Umweltwirkungen, an den sich ebenfalls Verbesserungspotenziale erschließen. Diese Herangehensweise hat zur Folge, dass die ökologische Zielsetzung deutlich weiter im Vordergrund steht. [Loe-2003a]

– **Ansätze, die externe Kosten berücksichtigen:**

Die bisher vorgestellten Ansätze beschäftigen sich vor allem mit den internen Kosten für den Umweltschutz, die von einem Unternehmen zu tragen sind. Allerdings verursacht das wirtschaftliche Handeln auch Kosten, die von der Allgemeinheit zulasten fallen, die bisher nicht berücksichtigt wurden. Betriebswirtschaftlich gesehen ist die Integration dieser Kosten nicht notwendig, allerdings besteht die Möglichkeit, dass diese externen Kosten durch entsprechende Gesetze internalisiert werden. Dadurch bietet sich insbesondere bei langfristigen Investitionen an, diese externen Umweltkosten mit in die Entscheidungsfindung einzubeziehen, um Fehlinvestitionen durch eine nachträgliche, staatliche Pönalisierung zu vermeiden. Auf die Ansätze zur Internalisierung dieser Kosten wird im Folgenden anhand der Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes noch genauer eingegangen. Ein ähnliches Verfahren wird bei Beschaffungen im Rahmen öffentlicher Ausschreibung im Oberschwellenbereich für Fahrzeuge vorgeschlagen [Bun-2016]. Hierbei werden Emissionskostensätze für Kohlendioxid (CO₂), Stickoxide (NO_x), Nichtmethan Kohlenwasserstoffe und partikelförmige Abgasbestandteile herangezogen und zu den Lebenszykluskosten diese externen Umweltkosten als Bewertungsgrundlage addiert.

Generell ist die Auswahl des geeignetsten Ansatzes fallspezifisch zu sehen. Als Hilfestellung kann die in [Loe-2003a] gezeigte Zusammenfassung verwendet werden:

Tabelle 3-1: Vergleich Ansätze für umweltbezogen Kostenrechnung [Loe-2003a]

Fokus	Kosten	Ziel
Umweltschutzmaßnahmen	Umweltschutzkosten / -aufwendungen	Vorgegebene Umweltschutzmaßnahmen wirtschaftlich umsetzen
Material- und Energieflüsse	Materialflusskosten	Material- und Ökoeffizienz
Umweltwirkungen	Externe Kosten	Strategieabsicherung

Hinsichtlich externer Umweltkosten definieren *Loew et al.* den Begriff auf Basis einer ausführlichen Literatursichtung auf folgende Art und Weise:

- „Externe Effekte sind Auswirkungen einer wirtschaftlichen Aktivität auf Dritte, ohne dass die Auswirkungen dem Verursacher durch den Marktmechanismus vermittelt oder zugerechnet werden. Es gibt sowohl negative externe Effekte (z.B. Einkommenseinbußen eines Fischers durch industrielle Gewässerbelastungen) wie auch positive externe Effekte (z.B. Förderung von Artenreichtum durch den Einkauf ökologisch angebauter Lebensmittel).“ [Loe-2003a]
- „Externe Kosten sind in Geldeinheiten bewertete negative externe Effekte. Umweltbezogene externe Kosten sind solche, die durch negative Umweltauswirkungen entstehen, ohne dass sie vom Verursacher direkt (über Marktpreise) oder indirekt (z.B. Abgaben, Entschädigungszahlungen) getragen werden.“ [Loe-2003a]

Zur Quantifizierung der externen Umweltkosten definieren die Autoren unterschiedliche Kostenkategorien, die mit den entsprechenden Umweltauswirkungen korrespondieren:

- **Wiederherstellungs- und Beseitigungskosten:** Beseitigung eines entstandenen Schadens
- **Ausweichkosten:** Kosten für den Ersatz eines Gutes durch ein anderes
- **Kompensationskosten:** Ausgleich des entstandenen Schadens an einer anderen Stelle
- **Kosten durch nicht vermiedene Umweltschäden:** Nutzeneinbußen durch die Beeinträchtigung von Lebensqualität, Gesundheitsschäden und Ertragsverlust in der Landwirtschaft

Anhand von Beispielen aus der Praxis zeigen *Loew et al.* auf, wie das Konzept der Internalisierung von externen Umweltkosten auch ohne gesetzlichen Zwang bereits im Einsatz ist. Als Motive für diese freiwillige Umsetzung tragen die Autoren die Absicherung von langfristigen Planungen und zur Risikominimierung, da heutige externe Kosten durch entsprechende Gesetze sehr schnell zu internen Kosten werden können, als Aspekte zusammen. Zusätzlich dient die Betrachtung der externen Kosten auch dem Marketing der Unternehmen, die sich dadurch als umweltfreundlich darstellen können. Für die Praxis geben *Loew et al.* die Empfehlung, die externen Kosten vor allem bei langfristigen Investitionsentscheidungen nicht gänzlich zu ignorieren, auch wenn die Quantifizierung bisher noch nicht vollständig methodisch abgesichert ist. [Loe-2003b]

Einen sehr praxistauglichen Ansatz zur Bewertung externer Umweltkosten liefert das Umweltbundesamt in der Methodenkonvention 2.0 zur Ermittlung und Anwendung der Internalisierung externer Umweltkosten [Mai-2007, Sch-2012c]. Diese Methode dient als Basiswerkzeug, die entsprechenden Kostensätze für die Verursachung von Umweltschäden abzuleiten. Hierzu bildet die Methodenkonvention 2.0 den Rahmen zu ökonomischer Bewertung von Umweltschäden, wobei ein einheitlicher Rahmen zur Schätzung geschaffen wird. Hinsichtlich der Schäden gilt es, sowohl heutige als auch erst in Zukunft auftretende Schäden zu untersuchen, genauso wie reversible und irreversible Schäden zu betrachten. Der Bewertungsmaßstab lässt sich dabei in unterschiedliche Gruppen einteilen:

– **Individuelle Präferenzen:**

Individuelle Präferenzen beziehen sich auf die durch Umweltschäden entstehenden Nutzungseinbußen für die davon Betroffenen. In der Methodenkonvention werden diese Kosten durch das Abfragen der Zahlungsbereitschaft abgebildet.

– **Gesellschaftliche Bewertungen und Expertenurteile:**

Da das Wissen über die Auswirkungen einzelner Umweltwirkungen in der Gesellschaft i.d.R. nicht ausreichend verankert ist, reichen die individuellen Präferenzen als Bewertungsmaßstab allein nicht aus. In diesen Fällen können umweltschutzbezogene Ziele wie Emissionsminderungsziele oder Lärmschutzziele herangezogen werden. Als Zahlungsbereitschaft werden die Kosten für das Erreichen dieser vordefinierten Qualitätsziele verwendet. Für Sensitivitätsanalysen können darüber hinaus Expertenurteile zur Zahlungsbereitschaft einfließen.

– **Bewertung irreversibler Schäden:**

Umweltschäden, die innerhalb eines Zeitraums von 150 Jahren nicht rückgängig gemacht werden können bzw. durch natürliche Regenerationsprozesse ausgeglichen werden, werden als irreversibel angesehen, was zu einem Verlust an Wohlfahrt gegenwärtiger und aktueller Generationen führt. Als Empfehlung wird an dieser Stelle gegeben, dass tolerierbare Schäden oder Schäden, die durch ein Äquivalenzprodukt zu ersetzen sind, mit den entsprechenden Ersatzkosten erfasst werden. Bei Schäden, die nicht genau abgeschätzt werden können, sollten die Risiken qualitativ beschrieben werden.

– **Unsicherheit und Risikoaversion:**

Als Basis für die Bewertung von Risiken werden gewöhnlich das Schadensausmaß und die Eintrittswahrscheinlichkeit herangezogen, welche auch die

Grundlage für die Berechnung des Erwartungswertes eines Schadens bildet. Der Erwartungswert bildet die Basis für die ökonomische Bewertung von Umweltschäden, wobei dieser in einigen Fällen nicht das volle Ausmaß der Bewertung abdeckt. Dies trifft vor allem bei Risiken zu, gegenüber denen in der Bevölkerung eine hohe Aversion besteht. Zur Vermeidung dieser Risiken ist damit die Bereitschaft in der Bevölkerung einen größeren Aufwand zur Vermeidung zu betreiben deutlich höher, als es der Erwartungswert des Schadens widerspiegelt. Der Erwartungswert stellt dabei dann die Untergrenze des zu erwartenden Schadens dar. Risikoverversionen bestehen bei katastrophalen Ereignissen wie Damokles-Risiken, Kernkrafttrisiken oder Pythia-Risiken, bei denen sowohl Eintrittswahrscheinlichkeit als auch Schadenshöhe einer großen Unsicherheit unterliegen.

Analog zur wirtschaftlichen Herangehensweise gilt für die Berechnung der Kosten für Umweltschäden, die Vorgabe die Kapitalwertmethode anzuwenden und so zukünftige Kosten auf den heutigen Zeitpunkt zu diskontieren.

Die Schadenskosten lassen sich hinsichtlich des Bewertungsansatzes systematisieren. Diese Einteilung ist in Abbildung 3-18 dargestellt.

		Schadensverringerungskosten			Kosten nicht vermiedener Umwelt- und Gesundheitsschäden	
		Direkte Kosten	Indirekte Kosten	Vorsorgekosten	Maßnahmen zur Schadensverringerung	Nicht vermiedene / vermeidbare Schäden
Beispiele		Wiederherstellung Sanierung Reparatur	Kosten für Anpassung / Ausweichung			Ertragsverlust in der Landwirtschaft
Bewertungsansatz		Begrenzung und Beseitigung materieller und gesundheitl. Schäden	Maßnahmen zur Verringerung der Beeinträchtigung aus Schäden	Verringerung des Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit	Gesellschaftspolitische Ziele und Expertenurteile über Maßnahmen zur Verringerung	Nutzungseinbußen

Abbildung 3-18: Aufbruch-Struktur zur Schätzung der Umweltkosten [Sch-2012c]

Maßgeblich für die korrekte Aufstellung der Kostensätze sind vor allem das Vermeiden von Doppelzuweisungen von Kosten und damit das doppelte Verrechnen in un-

terschiedlichen Kategorien und die Abgrenzung von Kosten zur Vermeidung von Umweltschäden, die bereits von Unternehmen auf Basis gesetzlicher Vorgaben getragen werden müssen. Die Autoren liefern zudem ein standardisiertes Vorgehen zur ökonomischen Bewertung von Umweltschäden, wobei die Bewertung – das Überführen der Umweltauswirkungen in Geldeinheiten – an sich den letzten Schritt darstellt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 3-19 als siebenstufiges Verfahren dargestellt.

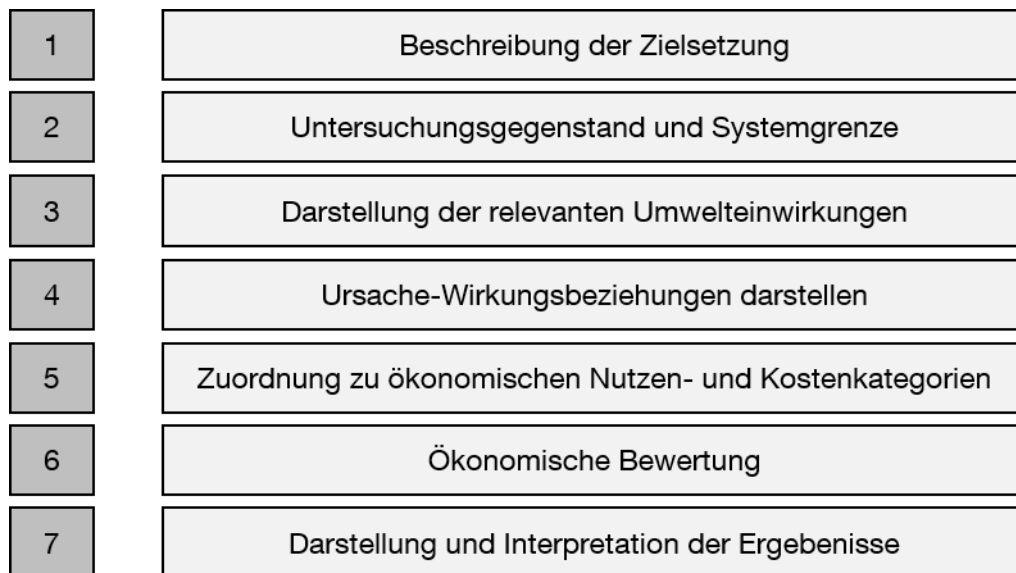


Abbildung 3-19: Vorgehen zur ökonomischen Bewertung von Umweltschäden

Wesentliche Aspekte bei diesem Vorgehen stellen die Ermittlung der Umwelt(ein)wirkungen in Schritt drei, die Darstellung der Ursache-Wirkungsbeziehungen (Wirkungsabschätzung) als vierter Schritt und die Ökonomische Bewertung dar. In [Sch-2012c] werden in Anhang B hierfür Empfehlungen für Best-Practice-Ansätze zur Bewertung von Luftschadstoffen, Verkehr, Wärme- und Stromerzeugung, genannt. In Tabelle 3-2 sind exemplarische die Kostensätze für Treibhausgasemissionen für das Basisjahr 2010 mit den unteren, mittleren und oberen Werten bei kurz-, mittel- und langfristiger Betrachtung dargestellt.

Tabelle 3-2: Kostensätze für Treibhausgasemissionen [Sch-2012c]

	Klimakosten [€ ₂₀₁₀ /t _{CO2}]		
	kurzfristig	mittelfristig	langfristig
Unterer Wert	40	70	130
Mittlerer Wert	80	145	260
Oberer Wert	120	215	390

Als Empfehlung gilt ein Wert von 80 € je t Treibhausgas nach [Sch-2012c], wobei Sensitivitätsanalysen im Bereich von 40 € bis 120 € durchgeführt werden sollten. In einer ausführlichen Literatursichtung kommen Schwermer et al. zu dem Schluss, dass es im internationalen Umfeld deutliche Abweichungen in den Kostensätzen gibt. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Kostensätze können dem Anhang B entnommen werden.

Die praktische Anwendung der Methodenkonvention am Beispiel öffentlicher Investitionen wird von *Maibach et al.* im Rahmen eines Forschungsprojekts am Beispiel von öffentlichen Investitionen beschrieben [Mai-2007]. Innerhalb dieser Arbeit wurden sowohl die Einsatzmöglichkeiten der Integration von Umweltkosten in die Investitionsentscheidung untersucht als auch konkrete Vorschläge für die Einbeziehung im öffentlichen Rahmen gemacht und anhand von Anwendungsbeispielen umgesetzt. Ein sinnvoller Ansatzpunkt für die Integration von Umweltkosten in die Wirtschaftlichkeitsrechnung einer Investition ist gegeben, wenn es unterschiedliche Varianten gibt, die sich hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen unterscheiden und wenn die Umweltfolgen einfach zu ermitteln sind. Für die Einbeziehung der Umweltkosten wird der in Abbildung 3-20 dargestellte Ablauf vorgeschlagen.

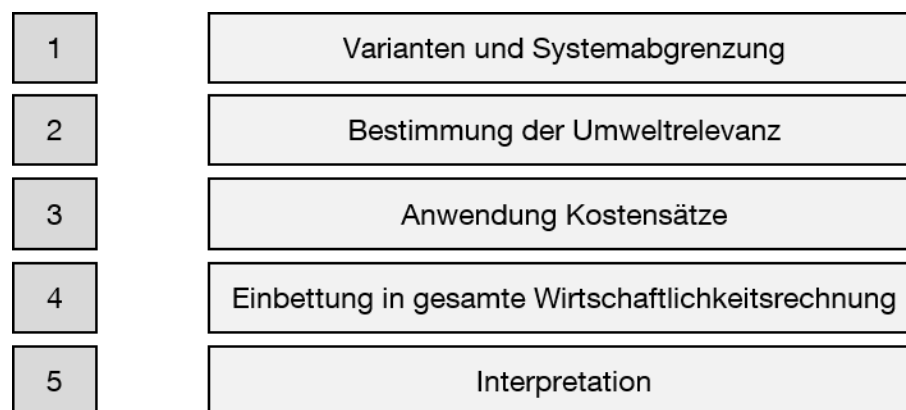


Abbildung 3-20: Ablauf für die Berücksichtigung von Umweltkosten

Anhand eines Fallbeispiels wird die Vorgehensweise bei der Integration von Umweltkosten in die Wirtschaftlichkeitsberechnung dargestellt. [Mai-2007]

Porsch et al. gehen in einer vom Umweltbundesamt beauftragten Studie [Por-2015] vor allem auf die Kosten-Nutzen-Abschätzung umweltrelevanter Auswirkungen in der Gesetzgebung ein. Dabei steht die monetäre Bewertung des Nutzens umweltpolitischer Maßnahmen im Vordergrund, welcher i. d. R. keinen Marktpreis besitzen und damit nur sehr schwer zu quantifizieren sind. Der Ablauf bei der Bewertung ist dabei in Abbildung 3-21 dargestellt.

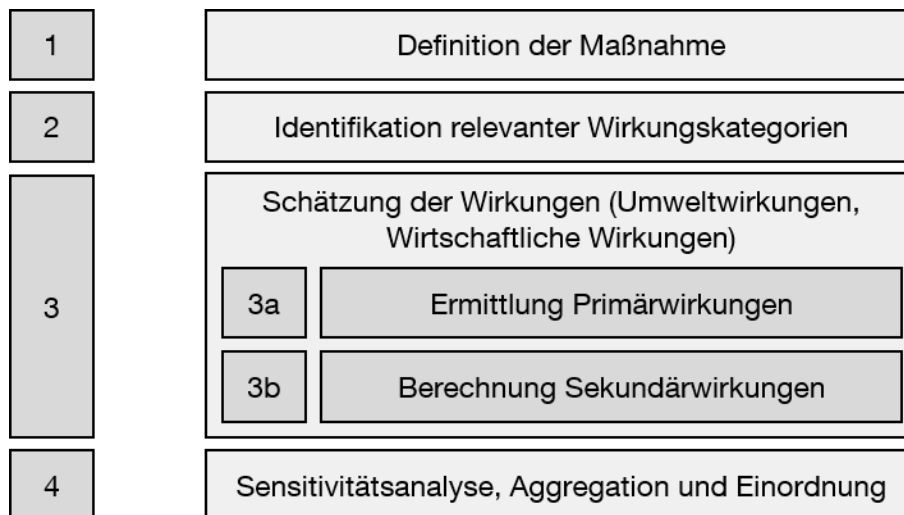


Abbildung 3-21: Arbeitsschritte zur Schätzung Kosten und Nutzen politischer Maßnahmen [Por-2015]

Im ersten Schritt werden die Maßnahmen definiert und die entsprechende Systemgrenze festgelegt. Darauf folgend werden die Wirkungskategorien geregelt. Diese Arbeiten umfassen die Ableitung der Wirkungen des Gesetzes und die Identifikation der maßgeblichen Wirkungskategorien, die zu einem späteren Zeitpunkt quantifiziert bzw. monetarisiert werden. Die Abschätzung der Wirkungen erfolgt nach einem zweistufigen Verfahren, bei dem zunächst die primären Wirkungen wie der Ausstoß von Treibhausgasen (CO₂-Äquivalent) ermittelt und darauf aufbauend in der zweiten Stufe die entsprechenden Kosten berechnet werden. Um die Robustheit der Analyse zu erhöhen, werden abschließend die Daten mithilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht und so auch das Verständnis für die Wirkungen verbessert. Durch die Monetarisierung können am Ende durch Aggregation der Daten der Umweltnutzen und die –kosten miteinander verglichen werden. [Por-2015]

Fichter et al. geben in [Fic-1997] einen Überblick über die unterschiedlichen Herangehensweisen für die Umweltkostenrechnung und den Einsatz in der Praxis. Hierbei steht vor allem die Ermittlung der Kosten, die durch den Umweltschutz in den Betrieben entstehen, im Vordergrund. Hierzu werden verschiedene Berechnungsansätze auf Voll- bzw. Teilkostenrechnung dargestellt. Zusätzlich wird auf die Möglichkeit der Internalisierung externer Umweltkosten verwiesen. [Fic-1997]

Einen sehr ähnlichen Überblick über die Möglichkeiten der Umweltkostenrechnung liefert auch das Handbuch des Umweltbundesamtes [Umw-1996]. Hierin wird neben den Grundlagen zur Kostenermittlung auch auf die Einführung in Unternehmen und die damit verbundenen Kostensenkungspotenziale durch Verbesserungsmaßnahmen für den Umweltschutz verwiesen. Hierzu zählt bspw. die Substitution von einge-

setzten Materialien durch weniger umweltschädliche und zugleich günstigere Äquivalenzprodukte. [Umw-1996]

Vogtländer et al entwickeln in [Vog-2001] das Konzept der virtuellen Öko-Kosten (Virtual Eco-Costs '99). Dieses Konzept basiert auf dem Ansatz, dass neben den Kosten, die von wirtschaftlicher Bedeutung sind, auch sog. Öko-Kosten als Maß für die Umweltwirkungen eines Produktes zu betrachten sind. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen den direkten Öko-Kosten wie den virtuellen Verhinderungskosten für Verschmutzung, Ökokosten für Energie und Ökokosten für den Raubbau an Rohmaterialien und den indirekten Ökokosten wie Wertverlusten (bspw. für die Nutzung von Gebäuden) Ökokosten für Arbeit (Pendeln und Büronutzung im Sinne von Heizung, Beleuchtung). Auf der anderen Seite steht der Wert (Produktwert) eines Gutes, der sich aus der Produktqualität, der Servicequalität und dem Image zusammensetzt. Entlang des Produktentstehungsprozesses wachsen beide Größen, einerseits die Öko-Kosten durch die Produktionsprozesse, aber auch der Wert des Gutes. Als Ergebnis wird hieraus die aggregierte Kennzahl EVR (= eco-costs / value ratio) definiert.

Im Folgenden wird auf eine detaillierte Beschreibung der Ökokosten eingegangen, für die entsprechenden Berechnungsgleichungen wird auf die Veröffentlichung von *Vogtländer et al.* [Vog-2001] verwiesen.

- **virtuelle Verhinderungskosten für Verschmutzung:** Diese Kosten stellen eine Aggregation der Ergebnisse aus den Emissionen dar, die im Rahmen einer Ökobilanz ermittelt werden. Diese Daten werden mit den entsprechenden Kostensätzen verrechnet, so dass sich die virtuellen Kosten aus diesem Bereich ergeben. [Vog-2002].
- **Ökokosten für die Energie:** Der Grundgedanke hinter dieser Kostenkategorie ist, dass fossile Energieträger durch erneuerbare Energien ersetzt werden müssen.
- **Ökokosten für den Raubbau an Rohmaterialien:** Ansatzpunkt an dieser Stelle sind an den Marktwert der Rohmaterialien unter Berücksichtigung von Recyclinganteilen angelehnt.
- **Ökokosten für Arbeit:** Da für die Arbeit an sich keine ökologischen Auswirkungen zu erwarten sind, beziehen sich diese indirekten Kosten auf Aspekte, bspw. die Heizung oder Beleuchtung von Gebäuden. Bezugsgröße für diese Kostenart ist die Anzahl der Mitarbeiter.

- **Ökokosten durch Wertverlust:** Diese Kosten beziehen sich vor allem auf die Produktionsstätten und werden äquivalent zur Investitionsrechnung betrachtet, sodass den einzelnen Produkten anteilmäßig die entstehenden Kosten zugewiesen werden.

Die Berechnung der Ökoeffizienz wird nach einem dreistufigen Rechenverfahren vollzogen. In Gleichung (3-5) ist die Berechnung der Ökoeffizienz auf Basis der Ökokosten und des Produktwertes dargestellt.

$$\text{Ökoeffizienz} = \frac{(\text{Produktwert} - \text{Ökokosten})}{\text{Produktwert}} = 1 - \text{EVR} \quad (3-5)$$

Die Autoren definieren damit eine Kennzahl für die ökologische Effizienz eines Produkts. Im Unterschied zur Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes sind aber die externen Folgekosten für Umweltschäden nicht in die Berechnung mit einbezogen, sondern nur die Kosten für die Verminderung auf ein nachhaltiges Niveau. [Vog-2001]

In [Vog-2002] wird die Anwendung des Konzepts der Ökokosten und der Ökoeffizienz anhand eines Beispiels dargestellt. Hierzu werden vier unterschiedliche Service- und Wartungskonzepte für eine Induktionskochplatte verglichen. Auf Basis der Daten aus dem After-Sales-Bereich für diese Kochplatte werden die entsprechenden Ökokosten ermittelt. Durch die Befragung von drei unterschiedlichen Interessensgruppen (Kunden, Herstellerindustrie und Regierungsvertreter) zu den Wartungsansätzen hinsichtlich wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte wird die Akzeptanz des Konzepts der Öko-Kosten und der Ökoeffizienz überprüft. Ergebnis dieser Befragung ist, dass das Konzept zu einer deutlichen Verbesserung in der Kommunikation von Umweltinformationen beiträgt als es eine normale Ökobilanz ermöglicht, wobei vor allem Regierungsvertreter den zusätzlichen Nutzen einer weiteren Kennzahl hinterfragen. [Vog-2002]

Hunkeler und Biswas stellen in [Hun-2000] zur Validierung von Ökobilanzen das Konzept des „Return-on-Environment“ (ROE) vor. Dieses Konzept stellt die auf den Verkaufspreis bezogenen Lebenszykluskosten eines Produkts ins Verhältnis zu den Ergebnissen der skalierten Ökobilanz nach Gleichung (3-6).

$$\text{ROE} = \frac{\frac{\text{Lebenszykluskosten}}{\text{Verkaufspreis}}}{\text{skalierte Ökobilanz}} \cdot 100\% \quad (3-6)$$

Der Skalierungsmaßstab für die Ökobilanz wird von 1 bis 100 festgelegt. Anhand von Beispielen erfolgt die Evaluierung des Konzepts. Hierzu werden die Lebenszykluskosten und der Verkaufspreis unterschiedlicher Alternativen für ein Produkt bestimmt und für die skalierte Ökobilanz das Erderwärmungspotenzial als Wirkungsindikator herangezogen. Mithilfe dieser Daten kann im Anschluss der *ROE* bestimmt und entsprechend die günstigste Variante des Produkts ausgewählt werden. Mithilfe des vorgestellten Ansatzes ist es möglich die Ergebnisse aus einer ökobilanziellen Untersuchung in die Wirtschaftlichkeitsrechnung mit einzubeziehen. [Hun-2000]

Kicherer et al. zeigen in ihrem Beitrag [Kic-2007] eine Möglichkeit der Öko-Effizienzbewertung auf, indem sie die Ergebnisse aus Ökobilanzierung und Lebenszykluskosten mithilfe eines Normierungsverfahrens zu einem einzigen Indikator verknüpfen. Die Ökobilanzierung baut hierzu auf der anerkannten Normenreihe [DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14040] auf und erfolgt innerhalb derselben Systemgrenzen wie die Lebenszykluskostenanalyse. Die Verbindung von Lebenszykluskosten und Ökobilanzierung basiert dabei auf dem in [DIN EN ISO 14042] dargestellten Verfahren. Bezugsgröße für die Normierung ist die Höhe der Umweltwirkung auf Landes- oder sogar kontinentaler Ebene. Auch ein Bezug auf einen Industriezweig ist denkbar. Hinsichtlich der Lebenszykluskosten erfolgt ebenfalls eine Normierung. Der Quotient aus diesen beiden relativen Größen beschreibt im Endeffekt das Verhältnis zwischen der Kosten- und der Umweltseite eines Projekts. Mithilfe einer grafischen Auswertung kann eine Auswahl der effizienteren Variante eines Produkts ausgewählt werden. Das entwickelte Verfahren wird anhand des Streichens einer 1000 m² großen Wandfläche angewendet und als Referenzrahmen für die Bezugsgrößen Deutschland ausgewählt. Die Autoren merken abschließend an, dass das Verfahren vor allem einen relativen Beitrag zur Bewertung der Öko-Effizienz liefert. [Kic-2007]

Reinhardt beschäftigt sich in ihrer Arbeit [Rei-2013] der Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Hierzu wird eine Methode entwickelt, mit der sich aufbauend auf den Vorgaben der Ökobilanzierung [DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14040] die Ressourceneffizienz mithilfe eines mehrphasigen Modells bewertet werden kann. Die Phasen dieses Modells gliedern sich in Anlehnung an die Ökobilanzierung in Festlegung von Produktfeatures und alternativen Prozessketten, Modellierung von Ressourcenströmen, Charakterisierung von Ressourcen und Bewertung der Ressourceneffizienz. Dabei stellt die Funktionelle Einheit die Fertigungsaufgabe dar. Zur Bewertung der Ressourceneffizienz werden als Kennzahlen Materialeffizienz und Energieeffizienz definiert und daraus das gewichtete, arithmetische Mittel aus beiden abgeleitet. Ein weiteres Hauptaugenmerk gilt der Modellierung der Prozesse in den Fertigungsketten auf Basis der Ressourcenströme in der Prozesskette und der Quantifizierung dieser Ströme. Mithilfe von charakteristischen

Ressourcenfaktoren, welche die Auswirkungen der eingesetzten Ressourcen für die Fertigung wiedergeben. Weiterhin werden Kennzahlen auf Basis der vorangegangenen Arbeiten definiert, die schlussendlich zur quantitativen Bewertung herangezogen werden. Abschließend erfolgt eine Anwendung der Methodik anhand eines Fallbeispiels mithilfe eines entwickelten Softwaretools. [Rei-2013]

Als Fazit ergibt sich, dass keiner der dargestellten Ansätze sofort und direkt auf die dargestellte Problemstellung angewendet werden kann, da die kranzspezifischen Fragestellungen in keiner Methode vollständig enthalten sind. Allerdings können Teilaspekte sehr wohl zur Beantwortung der Forschungsfrage herangezogen und zu einer entsprechenden ganzheitlichen Betrachtung weiterentwickelt werden. Neben rein Kennzahlbasierten Ansätzen hat vor allem die Umweltkostenrechnung und deren Anwendung sehr stark Einzug in entsprechende Literatur gehalten. Dabei muss grundlegend zwischen internen Kosten, die bereits jetzt vom Unternehmen zu tragen sind und solchen, die im Moment noch extern anfallen, unterschieden werden. Die Möglichkeit der Internalisierung dieser externen Kosten bietet eine Möglichkeit, die entstandenen Umweltschäden transparent in Geldeinheiten darzustellen und so das Handeln von Unternehmen positiv zu beeinflussen. Die Ableitung des Konzepts mit der entsprechenden Auswahl und Bewertung der Ansätze wird in Kapitel 4.2.3 dargestellt.

4 Entwicklung des Vorgehensmodells

Auf Basis der Forschungsfragen wird mithilfe des Design-Process nach French [Fre-1998] ein Konzept entwickelt und die Verfahren zur Beantwortung der Forschungsfragen ausgewählt. Hierzu wird das in Abbildung 4-1 dargestellte Vorgehen verwendet, das dem Schritt „Conceptual Design“ nach French entspricht.



Abbildung 4-1: Schritte zur Entwicklung des Vorgehensmodells

Zu Beginn muss der Produktlebenszyklus sowohl aus wirtschaftlicher als aus ökologischer Sicht definiert werden und die gegenseitige Zuordnung der Phasen durchgeführt werden. Auf dieser Basis erfolgt die Beschreibung der Vorgänge und Tätigkeiten, welche wirtschaftlich bzw. umwelttechnisch zu erfassen sind. Die Vorgänge führen zu den sog. Aufbruch-Strukturen, in welchen die Kostenarten und die auftretenden Umweltwirkungen abgeleitet werden. Die Beschreibung der Lebensphasen und die Entwicklung der Aufbruch-Strukturen erfolgt in Kapitel 4.1. Zur Quantifizierung der Kostenarten und Umweltwirkungen müssen in den einzelnen Arten der Aufbruch-Struktur geeignete Quellen bzw. Berechnungsmodelle festgelegt und aufgestellt werden, die bereits in der Planungsphase des Krans eingesetzt werden können. Die Aufbruchstruktur für die Untersuchung und Quantifizierung der Umweltwirkungen spiegelt die in der Lebensphase notwendigen Prozesse und Tätigkeiten wider, aus welchen die daraus entstehenden Umweltwirkungen auf Basis von Einheitswerten abgeleitet werden können. Quellen für diese Einheitswerte sind Datenbanken wie die „Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme“ (ProBas) des Umweltbundesamtes [Umw-2017]. Beispielhaft ist diese Umrechnung für die Umweltwirkungen aus dem Verbrauch von elektrischer Energie in Abbildung 4-2 dargestellt, welche bereits in [Bru-2013] in dieser Form eingesetzt wurde. Neben diesen frei verfügbaren Datenbanken stehen auch kostenpflichtige Varianten zur Verfügung, wie sie in Softwarepaketen zur Ökobilanzierung eingesetzt werden.

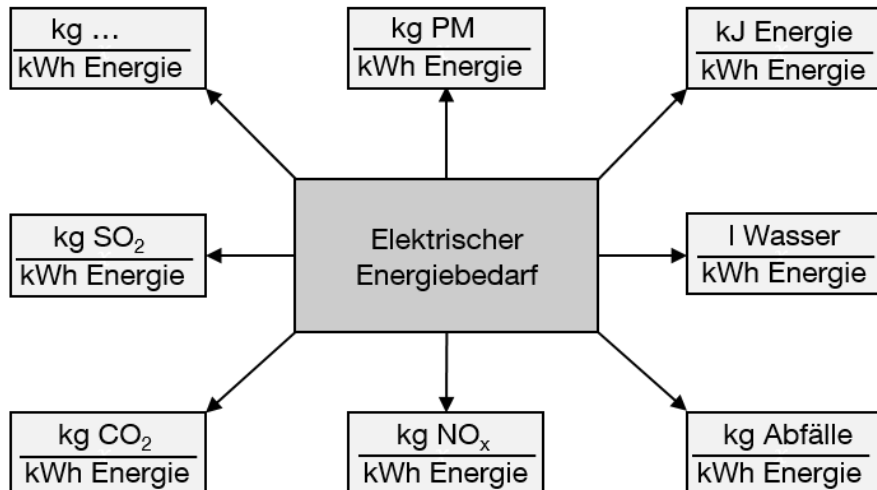


Abbildung 4-2: Berechnung der Umweltwirkungen aus dem elektrischen Energiebedarf

Eingangsgröße ist in diesem Fall der für einen Prozess in einem Lebenswegabschnitt notwendige Bedarf an elektrischer Energie. Aus diesem Energiebedarf werden mithilfe entsprechender Einheitswerte die daraus entstehenden Umweltwirkungen quantifiziert. Dabei können alle relevanten Kategorien an Umweltwirkungen, wie Emissionen in die Luft, in das Wasser, in den Boden aber auch Bedarf an Fläche oder Primärenergiebedarf berücksichtigt werden. Tabellenwerte für die Umrechnung existieren nicht nur für den Energiebedarf, sondern auch Werte für Werkstoffe wie Stahl werden auch in dieser Form zur Verfügung gestellt. Zudem besteht die Möglichkeit mithilfe entsprechender Softwarewerkzeuge selbst Bearbeitungsprozesse aus einzelnen untergeordneten Schritten zu definieren und die Bilanz an diesen Einzelbausteinen aufzustellen. Wichtig an dieser Stelle ist die Berücksichtigung der Datenbasis hinsichtlich einer ausreichend guten Verfügbarkeit. Die Aufbruch-Struktur besteht damit zusammengefasst aus zwei unterschiedlichen Aspekten. Auf der Kostenseite werden diejenigen Kostenarten festgelegt, die in der vorliegenden Lebensphase betrachtet werden, auf der ökologischen Seite die eingesetzten Materialien und die ablaufenden Prozesse. Die Auswahl und die Festlegung der Berechnungsmodelle zur Quantifizierung der Kostenarten und Prozesse erfolgen in Abschnitt 4.2.2 anhand einer vereinfachten Nutzwertanalyse. Die Auswahl der Berechnungsmodelle repräsentiert den Aspekt Selected Schemes im Design Process nach French. Die Schritte Embodiement of Schemes und Detailing werden separat in den Kapiteln 5, 6 und 7 dargestellt. Als letzter Schritt in der Vorgehensweise folgt die Vorstellung des Vorgehens beim Variantenvergleich unterschiedlicher Antriebe für eine Krananlage.

4.1 Strukturierung des Produktlebenszyklus und Aufbruch-Strukturen

Die Definition der Lebensphasen einer Industriekrananlage muss im Rahmen der vorliegenden Arbeit in einer Form gestaltet werden, die sowohl eine klare Strukturierung hinsichtlich der Ökobilanzierung als auch einer Modellierung der Lebenszykluskosten für die Krananlage ermöglicht. Hierzu ist es nötig, aus den kleinskaligen Abschnitten größere Untergruppen zu definieren, die innerhalb der Öko- bzw. Lebenszykluskostenbilanzierung verwendet werden können. Als Gliederung dient der in Abbildung 4-3 dargestellte Produktlebenszyklus.

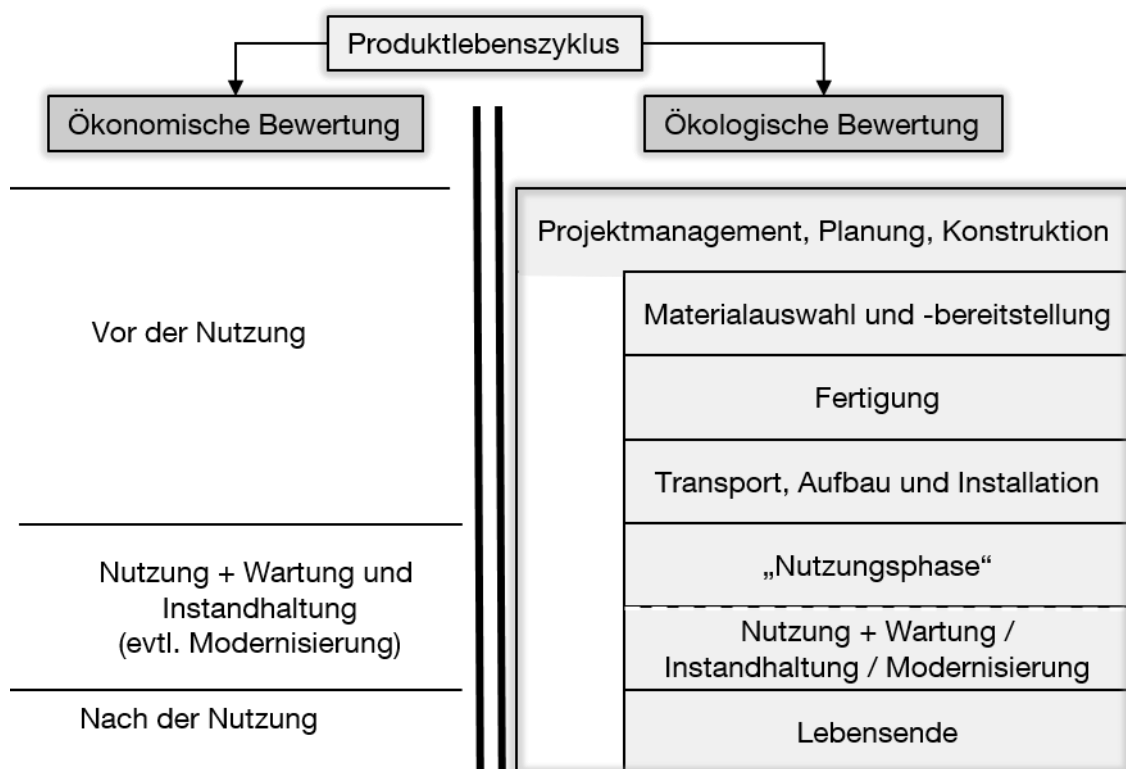


Abbildung 4-3: Produktlebensweg einer Krananlage

Hinsichtlich der ökonomischen Bewertung wird auf den vereinfachten Zyklus aus der [VDMA 34160] zurückgegriffen, die sich lediglich auf die Abschnitte vor der Nutzung, die Nutzung selbst und nach der Nutzung bezieht. Die ökobilanziellen Abschnitte lassen sich aber diesen Abschnitten eindeutig zuordnen. So sind die Materialauswahl, die Fertigung und die Transport-, die Aufbau- und die Installationsphase eindeutig vor der Nutzung des Krans zu sehen. Die Modelle der Nutzungsphase entsprechen sich auf beiden Seiten. Die Phase nach der Nutzung lässt sich auf ökologischer Seite eindeutig dem Lebensende zuordnen.

4.1.1 Projektmanagement, Planung und Konstruktion

In diese Lebensphase fallen alle Tätigkeiten, die im Vorfeld der Beschaffung notwendig sind. Sie tritt aber auch während der Nutzungsphase insbesondere bei Retrofitmaßnahmen oder spätestens bei der Außerbetriebnahme in den Fokus. Anzumerken ist hinsichtlich dieser Lebensphase, dass sie unabhängig von den am Kran gewählten Antrieben auftritt. Als Planungsgrundlage für Industriekrananlagen ist die VDI-Richtlinie 2388 zu sehen, in der bereits wichtige Aspekte erfasst werden [VDI 2388]. Die wesentlichen Kernthemen vor der Anschaffung sind in Abbildung 4-4 in der Zusammenstellung dargestellt.

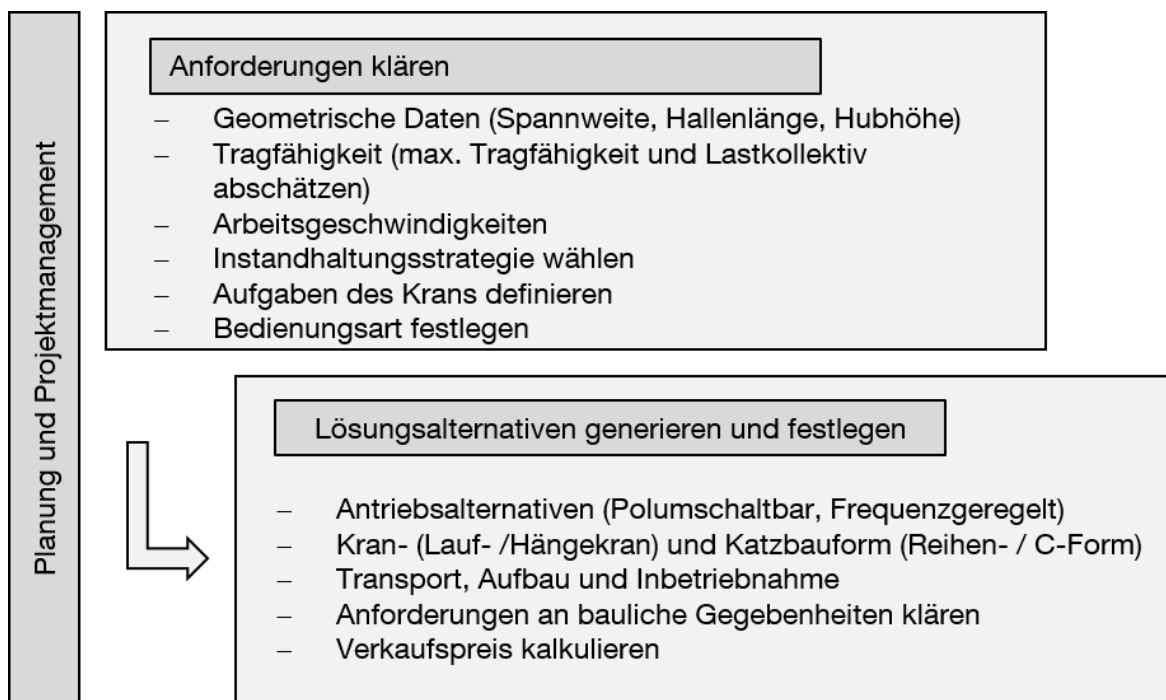


Abbildung 4-4: Anforderungen klären und Lösungsalternativen für Kran generieren

Die Definition und Klärung der Anforderungen an den Kran obliegen im Wesentlichen dem Betreiber des Krans und orientieren sich an [VDI 2388]. Aspekte, die dabei berücksichtigt werden müssen, sind die geometrischen Daten, die den Arbeitsraum des Krans festlegen, die Tragfähigkeit, die durch den Betreiber festgelegt werden muss und die gewünschten Arbeitsgeschwindigkeiten, wobei an dieser Stelle auch gesetzliche Vorschriften eingehalten werden müssen. Neben der maximalen Tragfähigkeit sind auch Angaben zum Lastkollektiv und den Aufgaben, mit denen der Kran betrieben wird, notwendig. Hierzu zählen die mit den entsprechenden Lasten zurückgelegten Wege. Daneben spielt auch die Festlegung der Bedienung des Krans eine wichtige Rolle. Hierbei gibt es unterschiedliche technische Ausführungen von einer einfachen Steuerbirne mit fester Leitung über eine Fernbedienung oder am Kran montierte Fahrerkabinen für große Industriekrananlagen.

Für die genannten Anforderungen gilt es von Seiten des Kranherstellers, mögliche Lösungsalternativen zu generieren, die sich zum einen auf die Bauform des Krans an sich (Laufkran oder Hängekran / Einträger- oder Zweiträger-Ausführung), die Bauform des Hubwerks (C-Bauform oder Reihen-Bauform) und zum anderen auf die gewählte Antriebstechnik beziehen. Hierfür gibt es mit der Richtlinie 3652 des VDI eine Grundlage, welche sich aber nicht explizit mit den wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen beschäftigt [VDI 3652]. Auf Basis dieser Alternativen kann der Hersteller die entsprechenden Verkaufspreise kalkulieren und dem Kunden damit die Anschaffungskosten kommunizieren, was der ersten Kostenart in der Kostenaufbruch-Struktur in der Phase vor der Nutzung entspricht.

Da die Wahl der Antriebe auch Auswirkungen auf das Tragwerk eines Krans aufgrund des unterschiedlichen Anlaufverhaltens besitzt, muss geprüft werden, ob es durch eine günstigere Wahl des Antriebs möglich ist das Tragwerk mit geringeren Querschnitten zu bemessen. Dabei wird auf die Kranbrücke als i.d.R. größtes Bauteil eingegangen, da hieraus zum einen Kosteneinsparungen für das Profil des Trägers und zum anderen Verbesserungen bei den Umweltwirkungen durch den geringeren Ressourcenverbrauch zu erwarten sind. Eine erste Untersuchung dieser Tatsache in [fml-2016a] durchgeführt und zeigt in dieser Hinsicht mögliche Einsparpotenziale auf. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf eine detaillierte Untersuchung verzichtet, da die genauen Spezifikationen des Krans im Rahmen eines Angebots vom Kranhersteller ausgearbeitet werden und als direkte Eingangsgrößen für die Betrachtung der ökologischen Aspekte als auch der wirtschaftlichen Aspekte dienen. Weitere Effekte sind in geringem Umfang ein zurückgehender Energiebedarf [Yif-2013] für die Fahrt des Krans, da nur eine geringere Masse bewegt werden muss und Einsparungen bei allen Transporten, welche die Kranbrücke betreffen.

4.1.2 Materialauswahl und -bereitstellung

Die Materialauswahl und -bereitstellung beschreibt als erste Lebensphase des Krans alle Prozesse, die zur Herstellung der Rohmaterialien und Halbzeuge notwendig sind. Die Herstellung in dieser Lebensphase umfasst dabei nicht die Herstellung des Krans selbst, sondern die hierzu notwendigen Halbzeuge wie Stahlprofile oder Grobbleche. Die dabei betrachteten Bestandteile sind in Abbildung 4-5 in der Übersicht in Anlehnung an [DIN EN 15804] dargestellt.

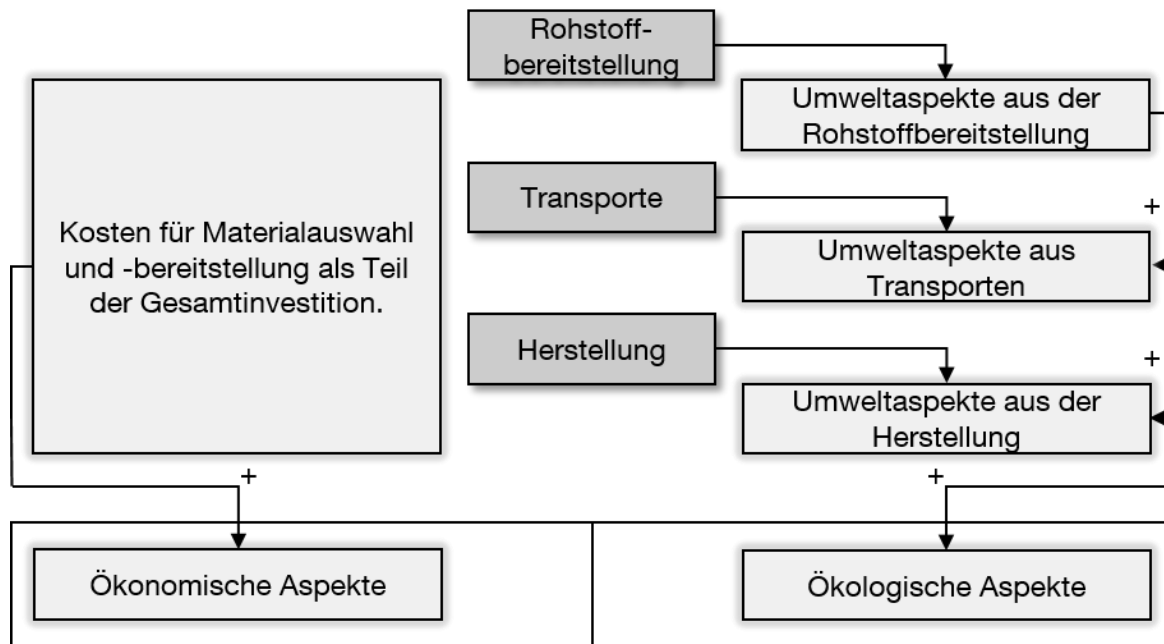


Abbildung 4-5: Lebensphase Materialauswahl und -bereitstellung

Die Lebensphase der Materialauswahl und -bereitstellung untergliedert sich dabei in die folgenden Aspekte Rohstoffbereitstellung, die notwendigen Transporte und die Herstellung von Halbzeugen wie bspw. Profile oder Platten, welche dann im Rahmen der Fertigung weiterverarbeitet werden können. In [Bru-2013] wurde bereits festgestellt, dass für eine Krananlage mit durchschnittlicher Größe in Europa der Hauptwerkstoff Stahl in Platten- oder Profilform ist. Zur Berücksichtigung der dargestellten Schritte ist es möglich, diese auf Basis einer Ökobilanzierung abzubilden oder auf bereits vorgefertigte Ökobilanzergebnisse, wie sie etwa in [IBU-2018] zu finden sind, zurückzugreifen und die benötigten Ergebnisse für die ökologische Betrachtung bereits enthalten. Die Transporte beinhalten i.d.R. nur solche, die bis zur Fertigstellung der Halbzeuge auftreten. Auf ökonomischer Seite ist aus Sicht des Kranbetreibers keine detaillierte Aufschlüsselung der einzelnen Kostenarten notwendig, da diese in den Anschaffungskosten der Krananlage enthalten und für den Betreiber als maßgeblich anzusehen sind.

4.1.3 Fertigung

Die Fertigung aller Komponenten der Krananlage ist kostenmäßig im Angebot des Kranherstellers erfasst und wird nicht weiter untergliedert. Hinsichtlich der möglichen Umweltwirkungen aus den Fertigungsschritten wird eine Aufteilung nach [DIN 8580] in die Hauptgruppen Urformen, Umformen, Fügen, Beschichten und Montage vollzogen. Zusätzlich fallen zwischen den einzelnen Fertigungsschritten inner- und außerbetriebliche Transporte an, die ebenfalls berücksichtigt werden können. In Abbildung 4-6 ist die Aufteilung in die einzelnen Schritte dargestellt.

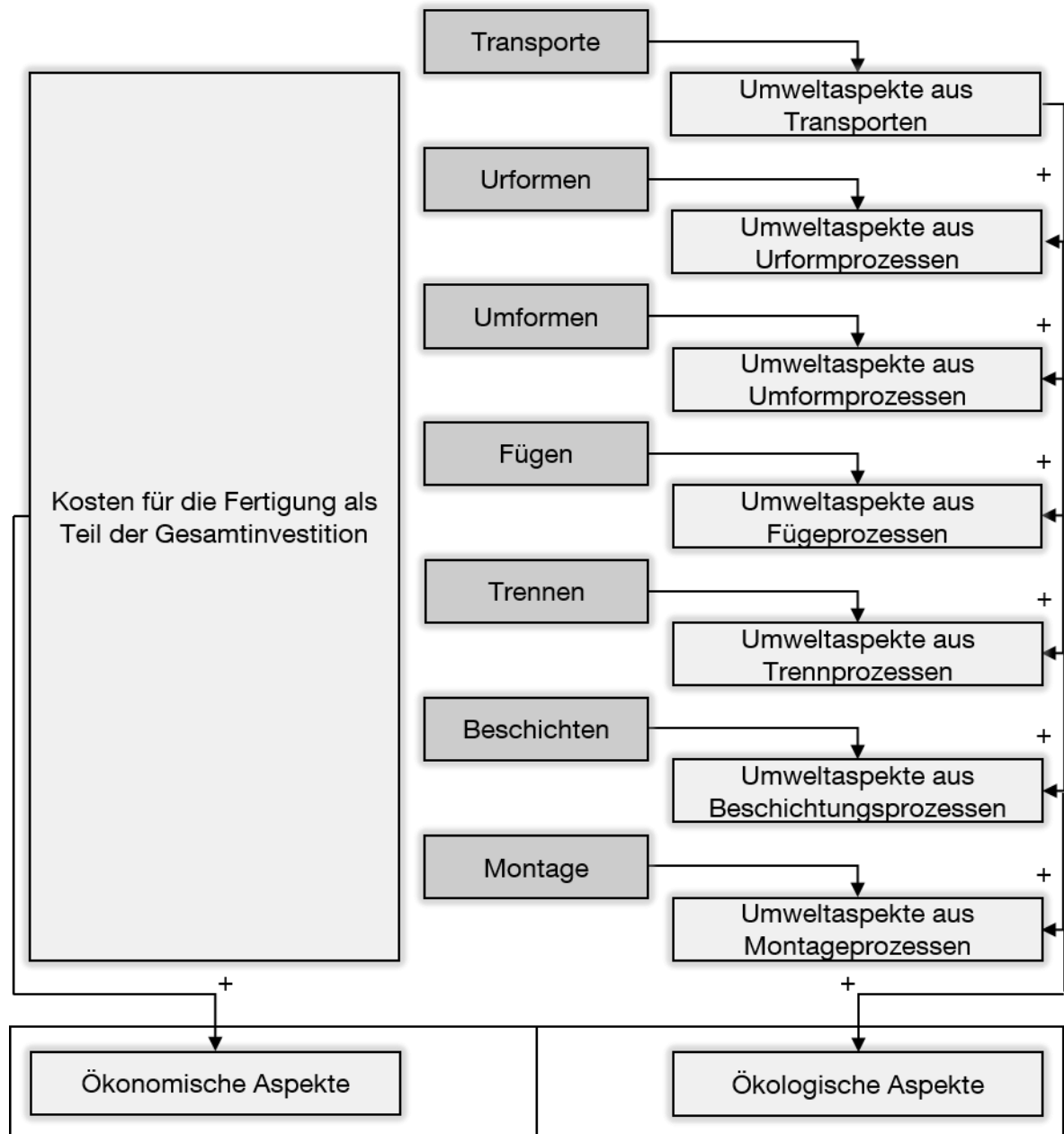


Abbildung 4-6: Lebensphase Fertigung

Ansätze zur Berücksichtigung der einzelnen Fertigungsschritte werden im Rahmen der Ökobilanzierung in Kapitel 6.2.2 aufgezeigt und auf die Komponenten im Kran bezogen.

4.1.4 Transport, Aufbau und Installation

Die Phase Transport, Aufbau und Installation erfolgt nach der Fertigung des Krans und umfasst im Wesentlichen die in Abbildung 4-7 dargestellten Aspekte, wobei der Fokus auf der Modellierung der ökologischen Bestandteil liegt. Innerhalb der Kostenaufbruch-Struktur wird diese Phase im Rahmen eines Komplettangebots in die Kos-

tenart Anschaffungskosten integriert. Es wird keine weitere Detailmodellierung auf der Kundenseite vorgenommen.

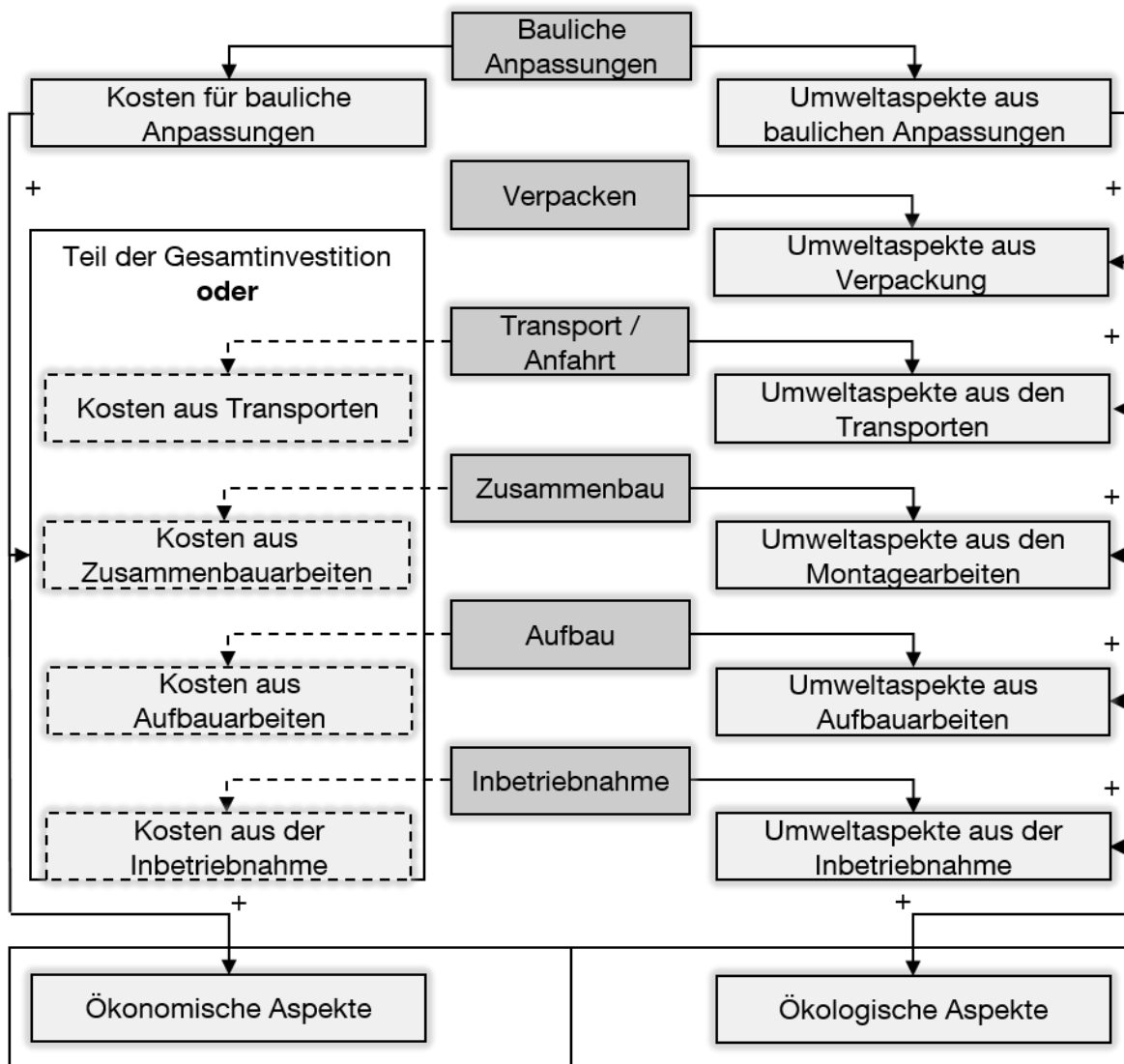


Abbildung 4-7: Betrachtete Aspekte in der Lebensphase Transport, Aufbau und Installation

Zu den betrachteten Prozessen gehört auf der ökologischen Betrachtungsebene das Verpacken der Krankomponenten für den Transport. Hierzu werden in der Praxis häufig Holzkisten und Einwegpaletten in unterschiedlichen Größen verwendet. Als zusätzliche Verpackungsmaterialien werden im Wesentlichen Folien verwendet. Der Anteil der Komponenten, die für den Transport verpackt werden, richtet sich vor allem nach der Art des Transportes und der Größe der jeweiligen Komponente. Bei den Transporten fallen vor allem innerbetrieblich Transporte der Krankomponenten beim Verladen und Umsetzen sowie der Transport aller verpackten Komponenten vom Hersteller zum Aufbauort des Krans an. Zusätzlich muss die Anfahrt der Mitarbeiter für die Montage des Krans mit in die Berechnung aufgenommen werden. Auch neue Vertriebskonzepte über lokale Kranbau-Partnerunternehmen [o.V-2011b] müs-

sen an dieser Stelle in Betracht gezogen werden. Beim Zusammenbau werden sämtliche Aspekte der Montage der vorgefertigten Komponenten des Krans berücksichtigt. Hierzu zählen, die Montage der Kopfträger an der Kranbrücke, das Anbringen der Laufkatze, genauso wie die Installation der elektrischen Ausrüstung am Kran und in der Halle. Für den Aufbau werden unterschiedliche Maschinen zum Heben und Transportieren von Lasten eingesetzt. Dies beinhaltet insbesondere Mobilkrane, Gabelstapler und Hubsteiger bzw. Hebebühnen, um die vormontierte Kranbrücke an den Bestimmungsort zu bringen. Für die Inbetriebnahme sind der Transport von Prüfgeräten zur Abnahme des Krans und die Anfahrt des Prüfers genauso zu berücksichtigen wie der Energiebedarf des Krans für die Prüfung.

4.1.5 Nutzungsphase

Da es sich bei einer Industriekrananlage um ein langfristiges Investitionsgut handelt, ist die Nutzungsphase auch die längste Lebensphase. Durch Modernisierungs- und Retrofitmaßnahmen kann diese Zeit vor allem bei sehr großen Anlagen auch erheblich länger ausfallen [Weh-2006]. Die in dieser Lebensphase zu betrachtenden Aspekte sind zusammengefasst in Abbildung 4-8 dargestellt.

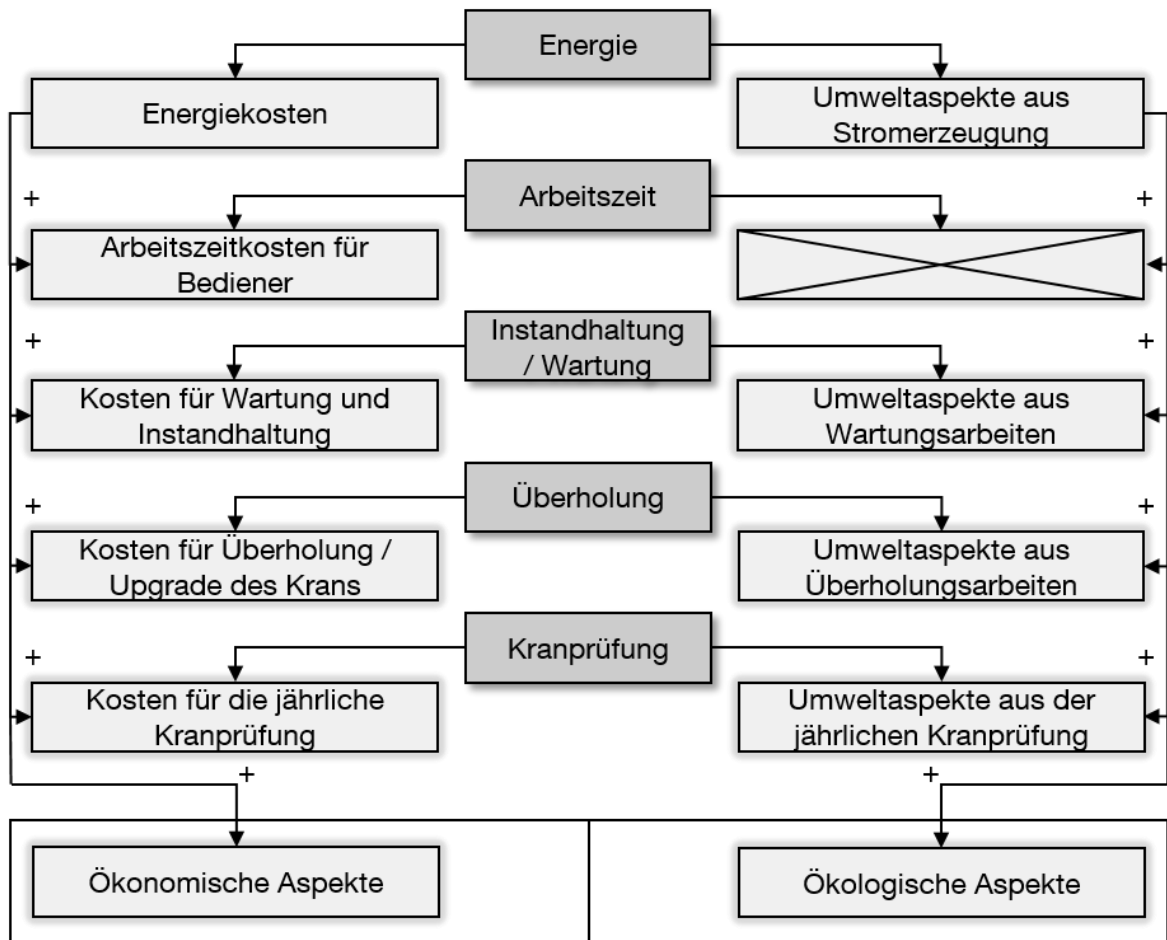


Abbildung 4-8: Betrachtete Aspekte in der Nutzungsphase

Die wesentlichen Aspekte, die in der Nutzungsphase einer Industriekrananlage eine Rolle spielen sind neben dem Bedarf an elektrischer Energie, die Arbeitszeit des Kranbedieners, die Instandhaltung sowie Wartung und die vorgeschriebene jährlich wiederkehrende Kranprüfung. Auch die Überholung der gesamten Krananlage oder einzelner Komponenten zur Verbesserung der Leistung kann während der Nutzungsdauer anfallen. Im Folgenden wird auf die einzelnen genannten Aspekte genauer eingegangen; auftretende Kosten bzw. Umweltaspekte werden näher erläutert. Durch die Summierung der Einzelaspekte dieser Lebensphase ergibt sich das Gesamtbild sowohl auf ökonomischer als auch auf ökologischer Seite.

Die Nutzungsphase des Krans wird im Wesentlichen durch die Aufgaben charakterisiert. Diese Aufgaben sind anwendungsspezifisch bei jedem Kran unterschiedlich, so dass sie als Vorgabe des Kranbetreibers zu sehen sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dafür auf die Definitionen in [DIN EN 13001-1] zurückgegriffen.

- **Gesamtzahlen von Arbeitsspielen:** Ein Arbeitsspiel ist eine Abfolge von Bewegungen des Krans. Ein Arbeitsspiel beginnt, wenn der Kran zum Anheben der Nutzlast bereit ist; es endet, wenn der Kran zum Anheben der nächsten Nutzlast bereit ist. [DIN EN 13001-1]
Die Bewegungen betreffen dabei alle Achsen des Krans und werden mithilfe von sog. U-Klassen in den Abstufungen U_0 bis U_9 eingeteilt. Die Gesamtzahl der Arbeitsspiele wird in Gruppen eingeteilt, von denen jede Gruppe eine bestimmte, (wiederkehrende) Aufgabe des Krans umfasst, wobei jede Aufgabe durch eine bestimmte Abfolge von Bewegungen charakterisiert wird. [DIN EN 13001-1]
- **Durchschnittliche Wege oder Drehwege:** Einem Arbeitsspiel bzw. einer Aufgabe des Krans wird nach [DIN EN 13001-1] für jede Aufgabe ein bestimmter Weg bzw. Drehweg zugeordnet. Diese Wege werden in sog. D-Klassen eingeteilt.
- **Häufigkeiten von Lasten:** Der Parameter für die Beschreibung der während der Arbeitsbewegungen zu transportierenden Lasten wird in [DIN EN 13001-1] als k_Q bezeichnet. Für jede einzelne Aufgabe des Krans charakterisiert der Lastkollektivbeiwert k_{Q_f} die Häufigkeit der Last. Die Klassifizierung erfolgt nach [DIN EN 13001-1] in den sog. Q-Klassen Q_0 bis Q_5 .

- **Positionieren von Lasten:** Dieser Parameter beschreibt die Anzahl der zusätzlichen Beschleunigungen, die zum Erreichen der endgültigen, beabsichtigten Position der Last durchgeführt werden müssen. Die Klassifizierung erfolgt in sog. P-Klassen P_0 bis P_3 . [DIN EN 13001-1]

Mit diesen Basisdaten werden im nächsten Schritt der Energiebedarf des Krans und die Arbeitskosten auf Basis der Arbeitszeit des Bedieners berechnet.

Energiebedarf

Der Energiebedarf während der Nutzung des Krans muss in zweierlei Hinsicht betrachtet werden. Zum einen entstehen durch den Bedarf an elektrischer Energie direkt Stromkosten für den Betreiber und zum anderen entstehen Umweltwirkungen durch die Bereitstellung des Stroms. Zur Berechnung des Energiebedarfs für Intralogistiksysteme haben sich in der Vergangenheit unterschiedliche Ansätze etablieren können, die in [Hab-2013b] vergleichend gegenübergestellt werden. Darunter finden sich neben der Methode des Schätzens auch analytische Berechnungsverfahren, die numerische Simulation und die direkte Messung an der Maschine. Die Umweltaspekte ergeben sich aus der Bereitstellung der Energie und damit aus dem betreffenden Strommix. Basis für die Ermittlung des Energiebedarfs sind die einzelnen Aufgaben des Krans, deren Definition nach der [DIN EN 13001-1] erfolgt und vom Kranbetreiber vorzugeben ist.

Arbeitszeit des Kranbedieners

Da sich die unterschiedlichen Antriebe für Krane in ihren Arbeitsgeschwindigkeiten deutlich unterscheiden können, ergeben sich hieraus Unterschiede in den Spielzeiten für die einzelnen Kranaufgaben. Diese Unterschiede spiegeln sich damit auch in den Arbeitskosten für den Bediener des Krans wider. Die Arbeitskosten setzen sich nach [Eur-1999, Wir-2012] aus folgenden Bestandteilen zusammen:

- **Direkte Arbeitskosten:** Darunter fallen u. a. die Bruttolöhne und Gehälter der Mitarbeiter.
- **Indirekte Arbeitskosten:** Diese beinhalten u. a. die Sozialbeiträge der Arbeitgeber sowie bspw. Kosten für berufliche Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen.

Hierfür müssen die entsprechenden Kostensätze in der Berechnung berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Spielzeit und damit des Zeitaufwandes für den Kranbediener sind mehrere Ansätze geeignet. Darunter fallen neben der Messung an realen Anlagen bspw. im Rahmen einer MTM-Analyse auch die Möglichkeiten einer analytischen Berechnung, wie sie in [VDI 2195, VDI- 4446] dargestellt wird. Daneben bietet

die numerische Simulation (Mehrkörpersimulation) die Möglichkeit automatisiert die Spielzeit von Krananlagen zu simulieren und dabei auch dynamische Effekte wie das Pendeln der Last und die damit verbundene Zeit zu berücksichtigen. Direkte Umwelaspekte, die vom Menschen ausgehen, sind während der Nutzung des Krans nicht zu erwarten und werden daher auch nicht mit in die Betrachtung aufgenommen.

Wartung und Instandhaltung

In [DIN EN 13306] wird Instandhaltung allgemein definiert als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ [DIN EN 13306]. Obwohl die Instandhaltung demnach über den gesamten Lebenszyklus zu betrachten ist, wird gemäß [VDI 2884] die Instandhaltung kostenmäßig während der Nutzungsdauer verbucht und dieser Ansatz auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfolgt. Insbesondere hinsichtlich der Instandhaltung von Krananlagen liefert die Richtlinie [VDI 2485] Hinweise zu den durchzuführenden Arbeiten. Dabei bezieht sich diese Richtlinie bei den möglichen Strategien für die Instandhaltung auf die [DIN EN 13306], welche folgende Szenarien vorgibt.

- **Zustandsorientierte Instandhaltung:** kontinuierliche Erfassung des Zustandes mit geeigneten Mess- und Diagnoseverfahren
- **Vorausbestimmte Instandhaltung:** vorbeugend und periodisch festgelegter Umfang für die Instandhaltungsmaßnahmen
- **Korrektive Instandhaltung:** Anwendung, sobald ein Schadensfall an der Anlage auftritt

Als Instandhaltungsstrategie für Krananlagen wird in [VDI 2485] die zustandsorientierte Instandhaltung vorgeschlagen, die im Rahmen der jährlich durchzuführenden Kranprüfung platziert werden kann. Eine generelle Differenzierung erfolgt zwischen planmäßigen Maßnahmen, denen neben auf Herstellervorgaben basierenden Tätigkeiten auch eigene Betriebserfahrungen zurgrunde liegen können und nicht planmäßigen Maßnahmen. Die planmäßigen, zustandsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen können kostenmäßig ähnlich der wiederkehrenden Kranprüfung erfasst werden, indem hierfür die entsprechende Kostenart berücksichtigt wird. Die ökologischen Aspekte der Wartung und Instandhaltung werden durch die Anfahrt des nötigen Personals und die auszutauschenden Bauteile bestimmt, deren Umweltwirkungen im Rahmen der Ökobilanzierung mit in die Betrachtung aufgenommen werden müssen. Eine Unterstützung zur Ermittlung der Instandhaltungskosten liefert die VDI-

Richtlinie [VDI 2885], in der die Kosten kategorisiert und mithilfe von Tabellen transparent gemacht werden. Durch die Berücksichtigung aller während der Lebensdauer der Krananlage auftretenden Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen, kann diese Kostenart in den Lebenszykluskosten berücksichtigt werden.

Überholung und Modernisierung des Krans

Insbesondere bei großen Krananlagen, die sehr lange Nutzungsdauern aufweisen, kann eine Modernisierung während der Einsatzzeit sinnvoll sein. Diese Modernisierungen betreffen in den meisten Fällen die Antriebs- und Steuerungstechnik, um die Produktivität des Krans zu erhöhen [Weh-2005, Weh-2012] oder die Nutzungsdauer des Krans über den inertial geplanten Zeitraum hinaus zu verlängern [Weh-2006]. Vor allem der Einbau frequenz geregelter Antriebe bietet hier große Potenziale. In seltenen Fällen ist auch eine Tragkraftsteigerung realisierbar. Dies setzt aber voraus, dass der Stahlbau bei der Erstausrüstung bereits entsprechend dimensioniert wurde [Weh-2005]. Eine Übersicht über die wesentlichen Maßnahmen, die der Instandhaltung und Überholung von Krananlagen dienen, wird in [Weh-2008] gegeben. Kostenseitig werden diese Aspekte im Rahmen eines Gesamtangebots analog des Anschaffungspreises betrachtet. Die Umweltwirkungen werden ebenfalls analog zu den Lebensphasen Materialauswahl, Fertigung und Montage, Aufbau und Inbetriebnahme berücksichtigt, wobei nur die Komponenten in die Betrachtung aufgenommen werden, die im Rahmen der Modernisierung getauscht werden. Hinsichtlich der Ausführung und der Vorkehrungen für Modernisierungsmaßnahmen ist den in [BGV-2001] gegebenen Richtlinien Folge zu leisten, um Gefahren auszuschließen.

Kranprüfung

Die Unfallverhütungsvorschrift Krane der Berufsgenossenschaft Maschinenbau und Metall [BGV-2001] schreibt in der Richtlinie BGV D 6 eine der Einsatzbedingungen und betrieblichen Verhältnisse angepasste Prüfung des Krans mindestens in jährlichem Rhythmus vor. Die Prüfung muss dabei von einem Sachkundigen durchgeführt werden. [BGV-2001]

Ein Bestandteil dieser Prüfung ist die Bestimmung des verbrauchten Anteils der theoretischen Nutzungsdauer, die von Hersteller des Krans angegeben wird. Weitere Bestandteile der wiederkehrenden Kranprüfung sind u. a. die Prüfung von Bauteilen und anderen Einrichtungen auf Beschädigungen oder Verschleiß bzw. Korrosion sowie die Prüfung der ordnungsgemäßen Funktion der Bremseinrichtungen. Das Ergebnis der Prüfung ist im Prüfbuch des Krans festzuhalten. [Deu-2012]

Die Durchführung dieser jährlichen Kranprüfung verursacht kostenseitig die Ausgaben für den Sachkundigen, der die Prüfung durchführt und dessen Anreise. Zusätzlich müssen die Kosten für Ausrüstungsgegenstände wie ein Hubsteiger berücksich-

tigt werden. Hinsichtlich der Umwelt entstehen Wirkungen aus der Anfahrt des Prüfers, aus dem Betrieb des Hubsteigers und aus dem Betrieb des Krans.

4.1.6 Lebensende

Die letzte Lebensphase, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird ist das Ende der Lebensdauer. Die in diesem Abschnitt herangezogenen Prozesse werden in Abbildung 4-9 dargestellt.

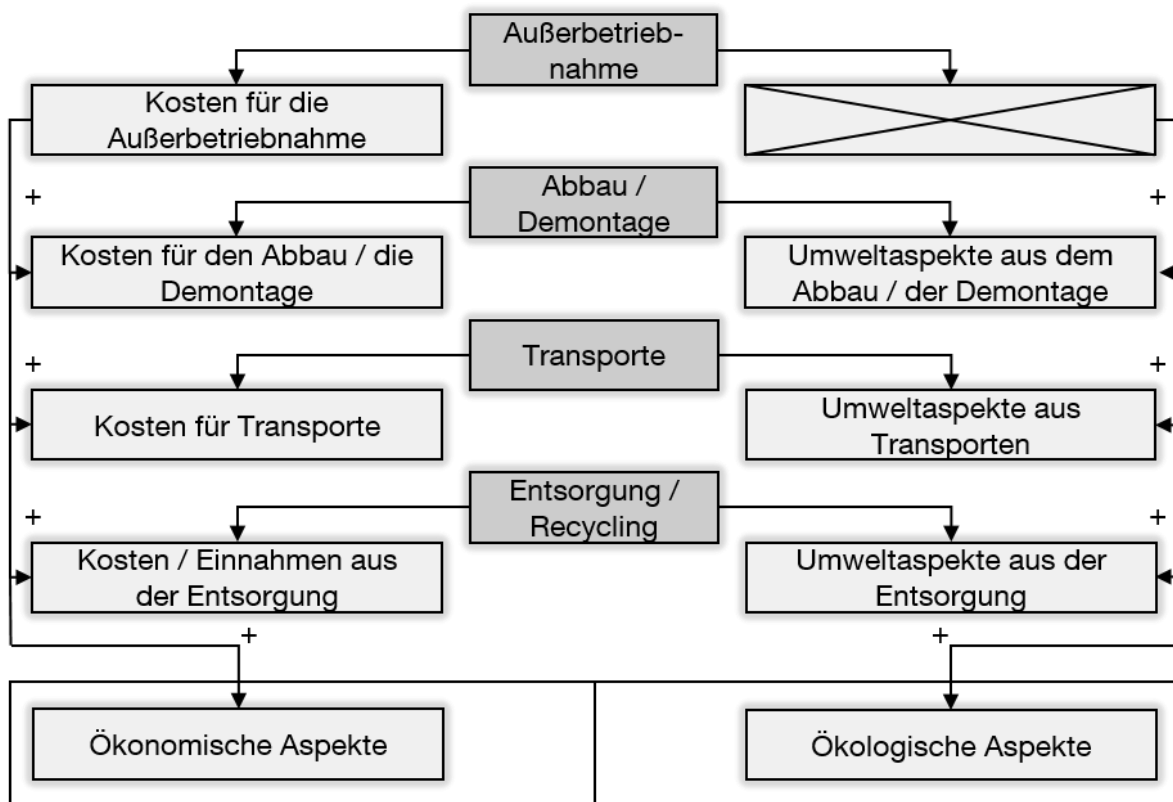


Abbildung 4-9: Betrachtete Aspekte am Lebensende des Krans

Vielfach liegt das Lebensende einer Krananlage darin begründet, dass eine Überholung der Anlage oder eine notwendige Steigerung der Leistung nicht mehr möglich ist und daraus Bedarf für eine Ersatzbeschaffung resultiert. Hierzu wird die vorhandene Krananlage abgebaut und durch eine neue Anlage ersetzt. Innerhalb dieses Lebenswegabschnittes werden die folgenden vier Untergruppen Außerbetriebnahme, Abbau und Demontage, Transporte und Entsorgung und Recycling näher betrachtet.

Außerbetriebnahme

Eine generelle Richtlinie zur endgültigen Außerbetriebsetzung einer Krananlage existiert in expliziter Form nach Kenntnis des Autors bisher nicht. Allerdings erscheint es sinnvoll ähnlich den Vorkehrungen bei Instandhaltungs-, Wartungs- oder Überho-

lungsarbeiten Sicherheitsvorkehrungen zu treffen, welche die wesentlichen Gefährdungen bei Arbeiten am Kran ausschließen. Die wichtigsten Aspekte werden dabei in [Zim-2015] oder auch in [Deu-2012] dargestellt. Hierzu zählen u.a. das Sichern des Krans gegen die Bedienung durch Unbefugte oder das Absetzen der Hublast vor der Außerbetriebnahme. Umweltwirkungen sind aus diesen Tätigkeiten nicht zu erwarten, allerdings entstehen durch diese Arbeiten Kosten, die im Rahmen der Kostenbetrachtung berücksichtigt werden können.

Abbau und Demontage

Für den Abbau und die Demontage werden die analogen Arbeitsschritte in umgekehrter Reihenfolge berücksichtigt, wie für den Aufbau und die Installation des Krans. Hierzu werden Krane, Hebebühnen oder auch Flurförderzeuge benötigt, um den Kran von der Kranbahn zu heben und die Komponenten für den Transport zu verladen. Auch erste Demontage- und Zerkleinerungsarbeiten können bereits in diesem Schritt Berücksichtigung finden, um große Komponenten einfacher transportieren zu können. Kosten hierfür entstehen durch die Bereitstellung der genannten Geräte und aus den Arbeitskosten für die Mitarbeiter, die mit der Durchführung der Demontage- und Abbauarbeiten betraut sind. Umweltwirkungen ergeben sich vor allem durch den Bedarf an Energie für die Hilfsgeräte, welche entweder elektrisch, aber wie im Falle von Fahrzeugkränen auch dieselmotorisch betrieben sein können.

Transporte

Hinsichtlich der Transporte werden in diesem Lebenswegabschnitt alle Arbeiten betrachtet, die für die Anfahrt von LKWs und dem Abtransport des Krans bzw. seiner Komponenten notwendig sind, sowie der An- und Abfahrt des notwendigen Personals. Dies geschieht auf der ökonomischen Seite durch die daraus entstehenden Kosten für den Betreiber. Im ökologischen Sinne werden die Anzahl der Personen- bzw. Tonnenkilometer (pkm und tkm) für die Berechnung auf Basis der zurückgelegten Entfernung herangezogen. Als Grundlage für die Basisdaten gehen die jeweils geltenden Abgasemissionsvorschriften sowohl für Nutzfahrzeuge als auch für Personenkraftwagen in die Betrachtung ein.

Recycling und Entsorgung

Auf der wirtschaftlichen Betrachtungsebene können für die Entsorgung und das Recycling Kosten anfallen, wenn es sich um nicht recyclingfähige Materialien handelt, aber auch entsprechend dem Verkauf Erlöse erzielt werden. Bei Metallen kann einerseits entsprechend der Schrottpreis als Erlös angesetzt werden oder andererseits der Verkauf noch funktionsfähiger Komponenten entsprechend des Marktpreises, die dann an anderer Stelle als Gebrauchtkomponenten verwendet werden. Die Kosten für die Entsorgung und das Recycling werden im Rahmen eines Gesamtangebots

von einem dafür qualifizierten Betrieb berücksichtigt. Hinsichtlich der Umweltwirkungen sind neben Gutschriften für das Recycling auch schädliche Wirkungen für Deposition oder thermische Verwertung zu berücksichtigen. Allerdings besteht auch die Möglichkeit, die Gutschriften aus dem Recyclingpotenzial bereits bei der Materialbereitstellung zu verrechnen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Recyclingpotenzial separat ausgewiesen.

4.2 Auswahl geeigneter Verfahren

Die Auswahl der Modellierungs- und Berechnungsansätze, die in den Teilmodulen verwendet werden, richtet sich nach einer Nutzwertanalyse, in der die Eigenschaften der Ansätze an vorher definierten Kriterien gespiegelt werden. Ergebnis dieser Bewertung ist der qualitative Erfüllungsgrad hinsichtlich jedes einzelnen Kriteriums, woraus sich der Gesamterfüllungsgrad für die gesamte Aufgabe ergibt.

4.2.1 Anforderungen

Die Auswahl der entsprechenden Verfahren zur Beantwortung der Forschungsfragen richtet sich nach einer Nutzwertanalyse, für die geeignete Bewertungskriterien und Anforderungen an die verwendeten Verfahren festzulegen sind. Die wesentlichen Anforderungen an die Lösungen für die Forschungsfragen werden im Folgenden diskutiert.

- **Lebenszyklusbetrachtung**

Da sowohl die ökologischen Auswirkungen als auch die betriebswirtschaftlichen Kosten entlang des gesamten Lebensweges eines Produkts anfallen, müssen die eingesetzten Verfahren und Werkzeuge geeignet sein, alle Lebensphasen abzudecken. Die relevanten Lebensphasen bestehen dabei aus den in Kapitel 4.1 dargestellten Abschnitten. In [Klö-2009] wird ebenfalls diese Forderung nach einer vollumfänglichen Betrachtung aufgestellt. Auch in wirtschaftlicher Hinsicht wird in der Literatur dieser Ansatz verfolgt.

- **Umfängliche Betrachtung der Umweltwirkungen**

Hinsichtlich der betrachteten Umweltaspekte soll das Verfahren zur Ermittlung zunächst keine Einschränkungen machen. Eine sehr umfangreiche Auflistung von Umweltaspekten, die in die ökologische Bewertung eingehen können, ist in [Bru-2013] zu finden. Dabei wird eine Grobeinteilung der Umweltaspekte nach den Wirkungsorten zugrunde gelegt. Eine definierte und zielgerichtete Auswahl der für den Einzelfall am sinnvollsten erscheinenden Umweltwirkungen soll aber dennoch möglich sein.

- **Umfängliche Betrachtung der auftretenden Kosten**
Neben einer auf den kompletten Lebenszyklus ausgerichteten Kostenbetrachtung ist es notwendig alle maßgeblichen anfallenden Kostenarten zu betrachten, die in den einzelnen Lebenswegabschnitten auftreten. Hierzu müssen die gewählten Verfahren in der Lage sein, eine hinreichend genaue Aufbruchstruktur der Kostenarten zu unterstützen.
- **Vergleichsbetrachtung auf einer einheitlichen Basis**
Der Vergleich zwischen den wirtschaftlichen und den ökologischen Aspekten muss auf einer Basis erfolgen, in der beide Seiten nicht separat nebeneinander dargestellt werden, sondern gegeneinander verrechnet werden können. Nur auf diese Weise kann eine eindeutige Auswahl der geeigneten Antriebe erfolgen. Dabei ist es denkbar, die ökologischen Aspekte auf eine in der wirtschaftlichen Betrachtung üblichen Einheit bzw. umgekehrt zu überführen. Auch ein Vergleich auf einer neutralen Einheit bzw. auf Basis von Kennzahl erscheint denkbar.
- **Günstige Verfügbarkeit von Daten**
Die günstige Verfügbarkeit von Daten zielt einerseits auf eine ausreichende Verfügbarkeit von notwendigen Daten an sich bspw. für die Ableitung von Kennzahlen und andererseits auf eine gleich bleibend hohe Qualität und Genauigkeit der Daten ab.

4.2.2 Lösungsauswahl für Forschungsfrage

Die Forschungsfrage und die darin enthaltenen Fragestellungen wurden bereits im Vorfeld in Abschnitt 2.2 diskutiert. Auf Basis des Standes der Technik werden die Lösungen zur Beantwortung der Teilfragestellungen ausgewählt. Die Auswahl dieser Lösungen entspricht dabei dem Schritt „Selection of Schemes“ im Design-Process nach French.

Auswahl des Verfahrens für die ökonomische Bewertung

Zur wirtschaftlichen Betrachtung bei Investitionsgütern haben sich unterschiedliche Verfahren in der Literatur und in der Praxis etablieren können. Vor allem bei Investitionsgütern, für die während der Nutzungszeit weitere Kosten anfallen bzw. sich die Kosten unterschiedlicher Varianten unterscheiden, ist der Ansatz einer rein kaufpreisbasierten Entscheidungsfindung nicht ausreichend [Hof-2012]. Im Falle von Industriekrananlagen treten durch Energiebedarf, Arbeitskosten und auch Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen auch Kostenarten auf, welche die in Abschnitt 4.2.1 vorgestellte Anforderung nach einer lebenswegbasierten Kostenbetrachtung rechtfertigen.

tigen. Die hierfür eingesetzten Verfahren sind zum eine etwa die Lebenszykluskostenrechnung (LCC = Life Cycle Costing) bzw. die Benutzung des Total-Cost-of-Ownership-Ansatzes (TCO). Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchzuführende Untersuchung werden beide Verfahren ebenfalls als äquivalent gesehen und im Weiteren unter dem Begriff Lebenszykluskosten zusammengefasst.

Ableitung der Vergleichsbasis

Die Analyse des aktuellen Wissensstandes hinsichtlich der Integration der zunächst wenig vereinbar erscheinenden Dimensionen von ökonomischer und ökologischer Betrachtungsebene ergibt im Wesentlichen zwei Ansatzpunkte. Durch die Wahl von geeigneten Bezugsgrößen und die Ableitung von Kennzahlen aus diesen Größen wird ein Vergleich zwischen ökonomischer und ökologischer Betrachtungsweise ermöglicht [Ost-2011]. Ein anderes Verfahren besteht darin, die aus der wirtschaftlichen Aktivität resultierende Umweltbelastung kostenmäßig zu erfassen. In Abbildung 4-10 ist dieses Verfahren schematisch dargestellt.

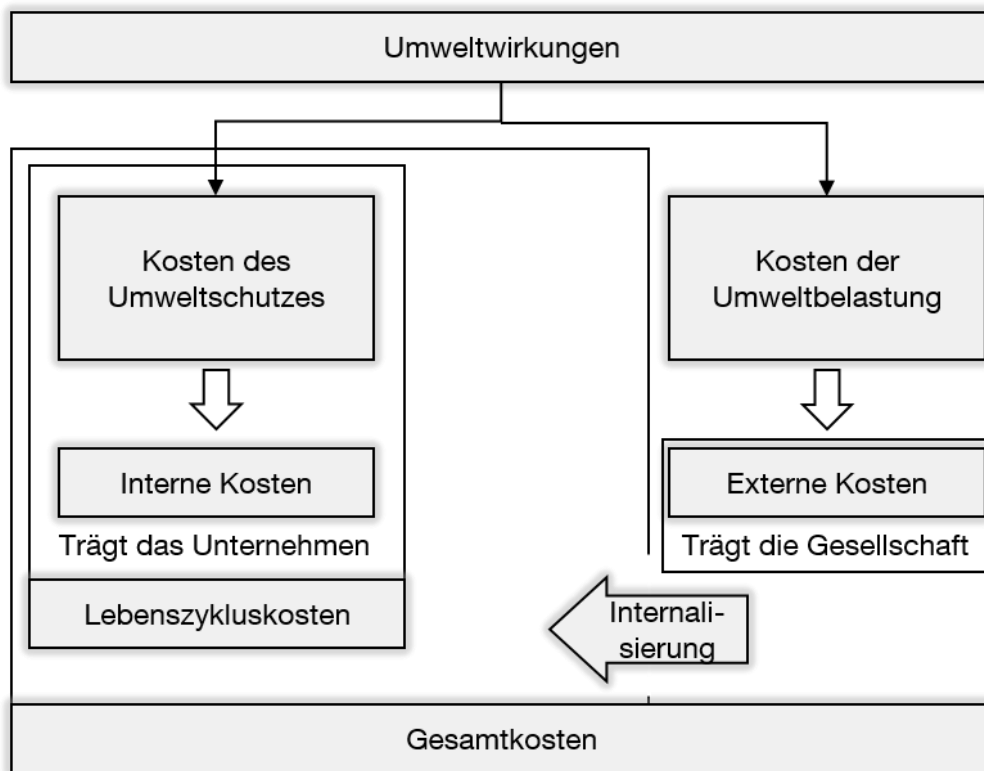


Abbildung 4-10: Internalisierung der externen Umweltkosten

Insgesamt setzen sich die Umweltkosten zusammen aus den Kostenaspekten für den Umweltschutz, welche bereits jetzt durch das Unternehmen zu tragen sind und für Maßnahmen zur Verringerung der Umweltbelastung dienen und aus den externen Kosten für die Umweltbelastung, die zur Zeit nicht vom Verursacher, sondern von der

Gesellschaft getragen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Kosten für den Umweltschutz nicht gesondert ausgewiesen, sondern sind als Teil der Investition zu verstehen und damit in wirtschaftlicher Hinsicht vor der Nutzung und bei fortlaufenden Maßnahmen während der Nutzung anzusetzen. Für die Entsorgung sind diese Kosten ebenfalls in den betrachteten Kostenarten bereits enthalten. Um einen Vergleich auf der Basis der gesamten Umweltkosten zu ermöglichen, werden die externen Kosten internalisiert und bilden damit eine einheitliche Vergleichsmöglichkeit. Durch die Integration von Lebenszyklus- und Umweltfolgekosten in ein einheitliches System ist es möglich die insgesamt günstigste Variante der Antriebstechnik für einen spezifischen Kran auszuwählen und damit die Forschungsfrage zu beantworten. Da dieses Verfahren im Vergleich zu den kennzahlbasierten Ansätzen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Daten deutlich besser anzuwenden ist, wird auch im Rahmen dieser Arbeit auf die Möglichkeit der Internalisierung der externen Umweltkosten als Vergleichswerkzeug zurückgegriffen.

Auswahl des Verfahrens für die ökologische Bewertung

Ein Überblick über die bekanntesten Verfahren zur ökologischen Bewertung von Produkten während des gesamten Lebenszyklus wurde bereits in Kapitel 3.3.2 gegeben. Dabei gewährleistet nur die vollständige Ökobilanz die umfassende Untersuchung aller Umweltwirkungen, während Verfahren wie der Produkt-Carbon-Footprint und der kumulierte Energieaufwand lediglich Teilaspekte adressieren. Zudem hat sich die Ökobilanzierung als Verfahren bereits in zahlreichen weiteren Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Logistik etabliert [Bru-2013, Gün-2015a, Gün-2016b]. Aus diesem Grund wird auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Ökobilanzierung zur ökologischen Bewertung von Industriekrananlagen verwendet.

4.2.3 Lösungsauswahl für Teilmodule

Im vorliegenden Kapitel die Auswahl geeigneter Lösungen für die einzelnen Modulen dargelegt. Diese Fragestellungen betreffen die bei der Definition der Lebensphasen in Abschnitt 4.1 dargestellten Aspekte.

Für die Teilaspekte werden unterschiedliche Lösungsansätze vorgestellt und bewertet, so dass der für die jeweiligen Fragestellungen der geeignetste Ansatz ausgewählt werden kann. Die Ansätze für die Abbildung des Anlaufverhaltens wurden bereits in Kapitel 3 dargestellt. In Tabelle 4-1 ist die Bewertung dieser Ansätze hinsichtlich der Eignung für die vorliegende Arbeit anhand maßgebender Kriterien abgebildet.

Tabelle 4-1: Vergleich der Ansätze für die Anlaufmodelle

	Konstante Beschleunigung	Klossche Gleichung	Sieben-Phasen-Anlaufmodell	Stetig differenzierbare Funktion	Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie	Detailliertes Motor-Modell
Genauigkeit des Modells						
Abbildung unterschiedlicher Anlaufverhalten						
Benötigte Datenbasis						
Verwendung während der Planung						
Aufwand für die Modellierung						
Favorisierte Lösung	3	5	1	2	4	6

Voll erfüllt
 Zum Großteil erfüllt
 Teilweise erfüllt
 Kaum erfüllt
 Nicht erfüllt

Die Genauigkeit des Modells bezieht sich auf die zu erwartende Güte des Ansatzes bei einem Vergleich mit Messungen. Das Kriterium der benötigten Datenbasis adressiert vor allem den Aspekt, welche internen Daten des Antriebes benötigt werden und inwiefern diese Daten verfügbar sind. Beim Aufwand für die Modellierung erfolgt die Bewertung hinsichtlich der Umsetzbarkeit und Integrierbarkeit in die Berechnungs- und Simulationsmodelle, die in dieser Arbeit verwendet werden. Bis auf das detaillierte Motor-Modell sind alle anderen Modelle in der Lage, den Anforderungen zu begegnen. Hinsichtlich der geforderten Genauigkeit stellt die tatsächlich aufgenommene Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie die optimale Lösung dar, erfordert allerdings die Aufnahme für jeden Motor einzeln. Die Klossche Gleichung stellt ein Näherungsverfahren für die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie dar, für welche ebenfalls Daten des Motors hinsichtlich des Schlupfes vorhanden sein müssen, was die Verwendung während der Planungsphase erschwert. Der Ansatz einer konstanten Beschleunigung ist der am wenigsten aufwändige hinsichtlich der Modellierung und der benötigten Daten, stellt aber nur eine grobe Näherung dar und ist damit kaum geeignet für die vorliegende Untersuchung. Der Ansatz stetig differenzierbarer Funktionen hat

sich bereits in [Gol-2004] bewährt und erfüllt alle Kriterien sehr gut. Bei der Genauigkeit ist nur der Ansatz mithilfe des Sieben-Phasen-Anlaufs geringfügig besser zu sehen, da in den einzelnen Phasen mit der Zeitdauer und dem jeweiligen Ruck eine noch bessere Anpassung ermöglicht wird. Zudem ist diese Variante bereits in anderen Arbeiten sehr erfolgreich eingesetzt worden [Gün-2011b, Gün-2011c, Bra-2016b]. Ein Vergleich der dargestellten Modellierungsvarianten in [fml-2015a] kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass die vereinfachte Abbildung mithilfe einer des Sieben-Phasen-Anlaufmodells zu einer sehr guten Übereinstimmung zwischen dem realen Verhalten des Antriebs und des Modells führt. In dieser Hinsicht wird im Rahmen dieser Arbeit bei der Modellierung des Anlaufverhaltens unterschiedlicher Antriebe auf dieses Modell zurückgegriffen.

Arbeitskosten:

Grundlage für die Berechnung der Arbeitskosten für die Bedienung des Krans bilden die Spielzeiten für die einzelnen Aufgaben des Krans. Die Ermittlungsverfahren für die Spielzeit lassen sich dabei in vier unterschiedliche Klassen einteilen. Als erste Möglichkeit besteht der Ansatz, die Spielzeit mithilfe von Experten aus der Branche oder einem erfahrenen Bediener des Krans zu schätzen. Neben den reinen Schätzverfahren besteht die Möglichkeit auf Basis von anerkannten Richtlinien [VDI 2195, VDI- 4446] eine Berechnung der Spielzeiten vorzunehmen. Eine deutlich aufwändigere, aber auch genauere Ermittlung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Antriebscharakteristika stellt die numerische Simulation dar. Insbesondere die Mehrkörpersimulation hat sich zur kinematischen und kinetischen Analyse von mechanischen Systemen etablieren können. Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit steht die Möglichkeit der Messung zur Verfügung. Zudem haben sich Verfahren wie das Methods-Time-Measurement-Verfahren (MTM) [Gün-2017] in der Vergangenheit etabliert. Die genannten Verfahren zur Ermittlung der Spielzeit werden anhand der Kriterien, Automatisierbarkeit in der Berechnung, Genauigkeit, Möglichkeit das Anlaufverhalten und dynamische Vorgänge abzubilden, des Aufwands und der Möglichkeit das betreffende Verfahren bereits während der Planung einsetzen zu können, bewertet. In Tabelle 4-2 ist die Bewertung der unterschiedlichen Ansätze zur Berechnung der Spielzeit für Industriekrananlagen dargestellt.

Tabelle 4-2: Vergleich der Ansätze für die Berechnung der Spielzeit

	Schätzung	Analytische Modelle [VDI 4446]	Numerische Simulation (MKS)	Messung
Automatisierbarkeit				
Genauigkeit				
Abbildung Anlaufverhalten				
Abbildung dynamischer Vorgänge (Lastpendeln)				
Aufwand				
Verwendung während der Planung				
Favorisierte Lösung	4	2	1	3

Voll erfüllt
 Zum Großteil erfüllt
 Teilweise erfüllt
 Kaum erfüllt
 Nicht erfüllt

Die Schätzung der Spielzeit kann nur auf Basis von Erfahrungswerten des Herstellers oder eines erfahrenen Kranbedieners erfolgen und ist insgesamt deutlich zu ungenau, um unterschiedliche Antriebe in ihrer Charakteristik untersuchen zu können. Zudem ist die Spielzeit aufgabenabhängig, so dass für eine Schätzung das Wissen über die Zeiten für ähnliche Aufgaben vorliegen muss. Analytische Berechnungsmodelle für die Spielzeit von Krananlagen wie bspw. die VDI-Richtlinien [VDI 2195, VDI-4446] sind aufgrund des vorgegebenen Berechnungsverfahrens ebenso nur bedingt in der Lage die Details unterschiedlicher Antriebe zu erfassen und damit die Spielzeit ausreichend genau zu berechnen. Allerdings lassen sich diese Modelle sehr einfach automatisieren. Der Aufwand für die Modellierung ist eher gering einzuschätzen. Diese Modelle können deshalb bereits während der Planungsphase gut eingesetzt werden. Die Abschätzung der Spielzeiten auf Basis von Messungen ist das aufwändigste der vorgestellten Verfahren und bedingt, dass bereits ähnliche Krananlagen mit den entsprechenden Antrieben existieren und für Versuche zur Verfügung stehen. Damit lassen sich aber alle Aufgaben des Krans im Vorfeld durchführen und damit die Spielzeiten sehr genau ermitteln. Mit einer ähnlichen Genauigkeit ist diese

Ermittlung mithilfe der Mehrkörpersimulation als Vertretern numerischer Simulationsverfahren in der Planung möglich. Der Aufwand für die Modellierung und die Gewinnung von Basisdaten für die einzelnen Antriebe ist höher als bei rein analytischen Berechnungsmodellen. Allerdings lässt sich damit das dynamische Verhalten bereits während der Planung besser erfassen und die Spielzeiten für jede Aufgabe bestimmen. Auf Basis der vorliegenden Bewertung ist die Mehrkörpersimulation im Rahmen der vorliegenden Arbeit am besten geeignet, die Spielzeit von Krananlagen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Antriebe zu ermitteln.

Energiebedarf / Energiekosten:

Der Energiebedarf der Krananlage während der Nutzungszeit spielt in zweierlei Hinsicht eine maßgebliche Rolle. Einerseits entstehen dadurch dem Betreiber direkte Kosten durch den Strombedarf. Andererseits ist der Energiebedarf Ausgangsbasis für die Berechnung der Höhe der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase durch die Bereitstellung von elektrischer Energie. Die entsprechenden Umweltwirkungen ergeben sich nach dem bereits in [Bru-2013] verwendeten Verfahren durch Umrechnung des Energiebedarfs mithilfe öffentlich zugänglicher Datenbanken. Für die Bestimmung des Energiebedarfs haben sich in der Vergangenheit unterschiedliche Ansätze etablieren können. Hinsichtlich der Genauigkeit und des Modellierungsaufwandes zeigen *Habenicht* und *Günthner* in [Hab-2013b] einen Vergleich zwischen den Möglichkeiten Schätzung, Berechnung nach analytischen Modellen, der numerischen Simulation und der Messung. Schätzverfahren können dabei u. a. auf der installierten Antriebsleistung als maßgebende Größe, den Einschalt Dauern des Antriebs und dem Lastanteil beruhen. Analytische Berechnungsmodelle wie sie etwa in [Ert-2013a, Ert-2013b, Hab-2013a] verwendet werden, bilden die benötigte Leistung für unterschiedliche Aufgaben des Fördermittels mithilfe analytischer Gleichungen ab und ziehen die Einschaltdauer des Antriebs zur Berechnung des Energiebedarfs heran. Eine detailgetreuere Möglichkeit den Energiebedarf zu berechnen ist die numerische Simulation. Hierbei wird die Leistung auf Basis mechanischer Grundgleichungen abgebildet und der Energiebedarf mithilfe numerischer Integrationsverfahren ermittelt. Zentraler Vorteil dieses Verfahrens ist die einfache Integrierbarkeit unterschiedlicher Anlaufkurven und dynamischer Effekte, die mit rein analytischen Verfahren nur sehr schwer zu greifen sind. Diese Verfahren haben sich in der Forschung bereits seit längerer Zeit bewährt und kommen vor allem bei der Energiebedarfsberechnung von automatischen Lagersystemen (insbesondere bei Regalbediengeräten) zum Einsatz [Gün-2011b, Gün-2011c, Bra-2016b]. Die Methode des Messens setzt voraus, dass ein äquivalentes System für Messungen zur Verfügung steht. Mithilfe entsprechender Messtechnik wie sie bspw. in [Bru-2013, Gün-2015a] zum Einsatz kommt, kann der Gesamtenergiebedarf während der Lebensdauer berechnet werden. Verfahren, die sich aus unterschiedlichen Teilverfahren zusammensetzen wie z. B. die Ermittlung

des Energiebedarfs mit sog. Profilen existieren vor allem für komplexere Anlagen wie Werkzeugmaschinen oder ganze Produktionssysteme [Die-2008]. Tabelle 4-3 zeigt den Vergleich der Ansätze zur Ermittlung des Energiebedarfs von Krananlagen.

Tabelle 4-3: Vergleich der Ansätze für die Berechnung des Energiebedarfs

	Schätzung	Analytische Modelle	Numerische Simulation	Messung
Automatisierbarkeit				
Genauigkeit				
Abbildung Anlaufverhalten				
Abbildung dynamischer Vorgänge (Lastpendeln)				
Aufwand				
Verwendung während der Planung				
Favorisierte Lösung	4	2	1	3

Voll erfüllt
 Zum Großteil erfüllt
 Teilweise erfüllt
 Kaum erfüllt
 Nicht erfüllt

Für eine automatisierte Berechnung des Energiebedarfs auf Basis der Aufgaben des Krans mithilfe vorgefertigter Listen eignen sich vor allem die numerische Simulation, aber auch Schätzverfahren oder analytische Modelle. Die Messung jedes Spiels ist hingegen sehr zeitaufwändig und lässt sich nicht automatisieren. Bei der Abbildung unterschiedlicher Antriebsvarianten bei Anlaufverhalten und dynamischen Vorgängen können nur die numerische Simulation und die Messung die gestellten Anforderungen erfüllen. Die Anwendung während der Planungsphase ist lediglich mithilfe von analytischen Berechnungsmodellen und der Simulation durchführbar. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der Praxis unterschiedliche, auf die jeweilige Anwendung zugeschnittene Verfahren zur Energiebedarfsermittlung zur Verfügung stehen. Hinsichtlich des Einsatzes in der vorliegenden Arbeit hat sich nach der Bewertung aller Verfahren die numerische Simulation als bestmögliche Alternative er-

wiesen. In dieser Hinsicht wird auf dieser Basis in Kapitel 6.2.4 ein Modell zur Energiebedarfsermittlung entwickelt, das für Industriekrananlagen geeignet ist.

4.3 Entwurf des Gesamtkonzepts

Der Ablauf zur Ermittlung der Gesamtkosten (Lebenszykluskosten) basiert auf den in Kapitel 4.1 dargestellten Lebenswegabschnitten und den darin formulierten Aspekten und wird in Abbildung 4-11 in der Übersicht dargestellt.

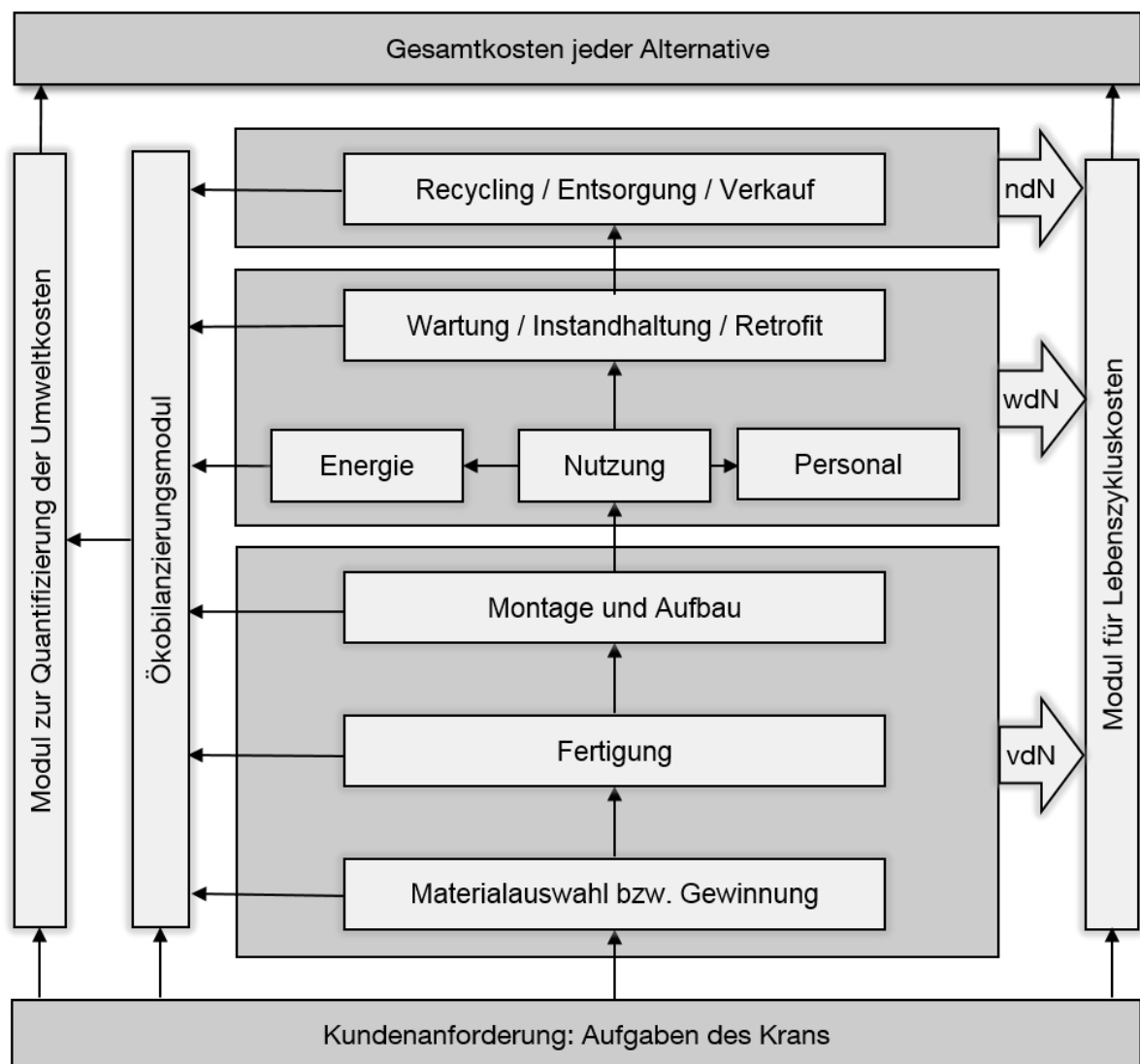


Abbildung 4-11: Konzept zur Ermittlung der Gesamtkosten

Ausgehend von den Anforderungen des Kranbetreibers werden vom Kranhersteller die möglichen Alternativen hinsichtlich der Antriebstechnik angeboten. In den Lebensphasen vor der Nutzung (vdN) Materialauswahl, Fertigung und Montage bzw. Aufbau werden hinsichtlich der ökologischen Bewertung die relevanten Daten für die

Ökobilanzierung jeder Variante in diesen Lebensphasen gesammelt bzw. Abschätzungen für die Prozesse durchgeführt. Im Sinne der Lebenszykluskosten bildet dieser Aspekt die Anschaffungskosten in der Aufbruch-Struktur ab. Die hierzu verwendeten Modelle werden in Kapitel 6 dargestellt. Während der Phase der Nutzung (N) werden mithilfe eines Energiebedarfsmodells die Energiebedarfe für sämtliche Kranaufgaben für jede Antriebsvariante berechnet und damit die Basis für Berücksichtigung innerhalb des Lebenszykluskostenmoduls einerseits und andererseits in der Ökobilanz gelegt. Zur Berücksichtigung der Arbeitskosten für die Arbeiten mit dem Kran wird die Spielzeit für jede einzelne Fahraufgabe des Krans zu Grunde gelegt, die mithilfe eines Mehrkörpermodells ermittelt wird. In die Phase der Nutzung fallen auch die Aspekte Wartung und Instandhaltung sowie mögliche Modernisierungsmaßnahmen, die auf der Kostenseite mit einer entsprechenden Kostenart berücksichtigt werden. Die entsprechenden Modelle für die Ökobilanz werden auf Basis der notwendigen Arbeiten aufgestellt. Nach der Nutzung des Krans (ndN) werden die entsprechenden Kostenarten in der Lebenszykluskostenrechnung berücksichtigt und in der Ökobilanzierung die Umweltwirkungen ermittelt. Hierbei ist zu beachten, dass es durch das Potenzial an recyclingfähigen Stoffen auch Gutschriften geben kann. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung bilden die Grundlage für die kostenmäßige Bewertung nach der Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes zur Ermittlung der Umweltfolgekosten, mit der die extern anfallenden Umweltkosten verursachergerecht internalisiert werden können.

5 Dynamische Simulation von Krananlagen

Zur dynamischen Simulation von Industriekrananlagen mithilfe von Mehrkörpermodellen müssen geeignete Ansätze zur Abbildung der mechanischen Komponenten, der Antriebe und der Steuerung entwickelt werden, die hier am Beispiel der Brückenkrananlage dargestellt werden. Diese Ansätze sind auch bei den anderen Bauformen von Industriekrananlagen anwendbar. Wesentliche Aspekte stellen die Modellierung des Tragwerks, des Seiltriebs, des Rad-Schiene-Kontakts und der Bewegungssteuerung des Krans dar. Neben der reinen Modellbildung sind die Umsetzung in der Simulationsumgebung und die Validierung zu klären.

5.1 Einführung in die Mehrkörperdynamik

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen zur Mehrkörpersimulation und deren Anwendung in der Praxis vorgestellt. Dabei wird neben dem Aufbau eines Mehrkörpersystems und den Grundgleichungen auch auf die Vorgehensweise bei der Modellbildung eingegangen.

5.1.1 Aufbau eines Mehrkörpersystems und Grundgleichungen

In [För-2008] wird ein Mehrkörpersystem als physikalische Beschreibung eines technischen Systems durch einzelne Körper und die Verbindungselemente zwischen den Körpern angesehen. In Abbildung 5-1 sind der Aufbau und die wesentlichen Elemente eines Mehrkörpersystems dargestellt.

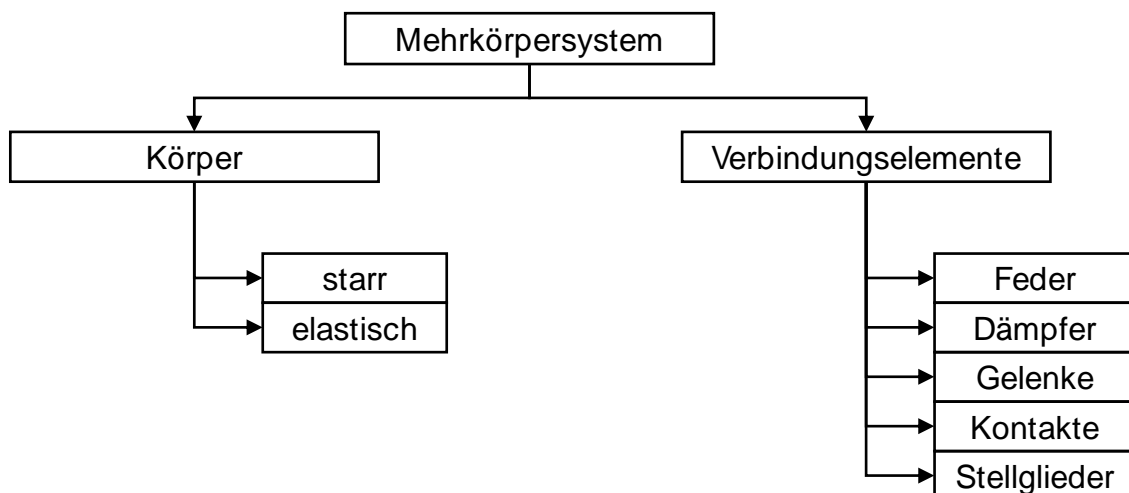


Abbildung 5-1: Komponenten und Aufbau eines Mehrkörpersystems [Bre-1992, För-2008]

Ein Mehrkörpersystem besteht aus massebehafteten Körpern und masselosen Verbindungselementen zwischen den Körpern. Die Körper werden häufig als starr angenommen können aber auch elastisch modelliert werden, um deren Schwingungseigenschaften im Modell abzubilden. Im Allgemeinen wird hinsichtlich der Modellierung der Körper zwischen drei unterschiedlichen Arten von Mehrkörpersystemen unterschieden. Abbildung 5-2 zeigt schematisch die Unterschiede zwischen den Modellierungsansätzen von Mehrkörpersystemen [Bre-1992].

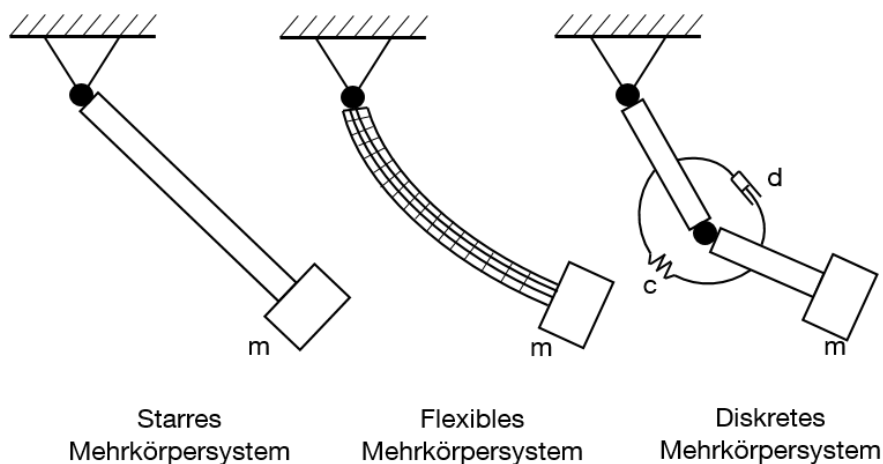


Abbildung 5-2: Modellierungsansätze für Mehrkörpersysteme [Löh-2002]

Ein starres Mehrkörpersystem besteht aus starren Körpern, bei denen Punkte auf dem Körper immer denselben Abstand besitzen. Bei flexiblen Mehrkörpersystemen sind die Körper elastisch modelliert, was bedeutet, dass sich der Abstand zwischen Punkten auf dem Körper während der Laufzeit der Simulation ändern kann. Bei Mehrkörpersystemen, bei denen sowohl starre als auch elastische Körper verwendet werden, handelt es sich nach [Bre-1988, Bre-1992] um ein hybrides Mehrkörpersystem.

Die Verbindungselemente stellen die Verknüpfung zwischen den einzelnen Körpern dar. Neben einfachen Gelenken, welche die Bewegung der Körper relativ zueinander einschränken und dabei in den gesperrten Freiheitsgraden Kräfte bzw. Momente übertragen, können auch Kraftelemente wie Federn oder Dämpfer zwischen den Körpern wirken. Mithilfe von Stellgliedern ist es möglich einzelnen Körpern Bewegungen vorzugeben und so das System von außen zu beeinflussen. Die Bewegungsgleichungen für das gesamte Mehrkörpersystem werden automatisiert in der verwendeten Software aufgestellt. Hierzu werden die einzelnen Körper freigeschnitten und die Gleichgewichtsbedingungen an jedem Körper i aufgestellt. Mithilfe der Newton-Euler-Gleichungen (siehe Gleichung (5-1)) werden die Bewegungsgleichungen in generalisierten Koordinaten formuliert.

$$\sum_{i=1}^n [J_{Ti}^T \cdot (\dot{p}_i - F_i^e) + J_{Ri}^T \cdot (\dot{L}_i - M_i^e)] = 0 \quad (5-1)$$

Darin bezeichnen J_{Ti}^T bzw. J_{Ri}^T die Jacobi-Matrizen der Translation und der Rotation, p_i bezeichnet den Impuls, L_i und F_i^e bzw. M_i^e die an jedem Körper i angreifenden Kräfte und Momente. Ergebnis sind die Bewegungsdifferentialgleichungen für jeden Körper i . Zur Lösung dieser Gleichungen werden sowohl explizite als auch implizite Verfahren zur Verfügung gestellt, deren Schrittweite fest oder variabel gestaltet werden kann [För-2008].

5.1.2 Modellbildung im Rahmen der Mehrkörpersimulation

Zur Lösung technischer Probleme mithilfe der Mehrkörpersimulation hat sich eine feste Vorgehensweise bei der Modellbildung von Mehrkörpersystemen etabliert, die auf mehrere einzelne Schritte aufgeteilt ist. In Abbildung 5-3 ist das Vorgehen bei der Modellbildung in der Mehrkörpersimulation nach [För-2008] dargestellt.

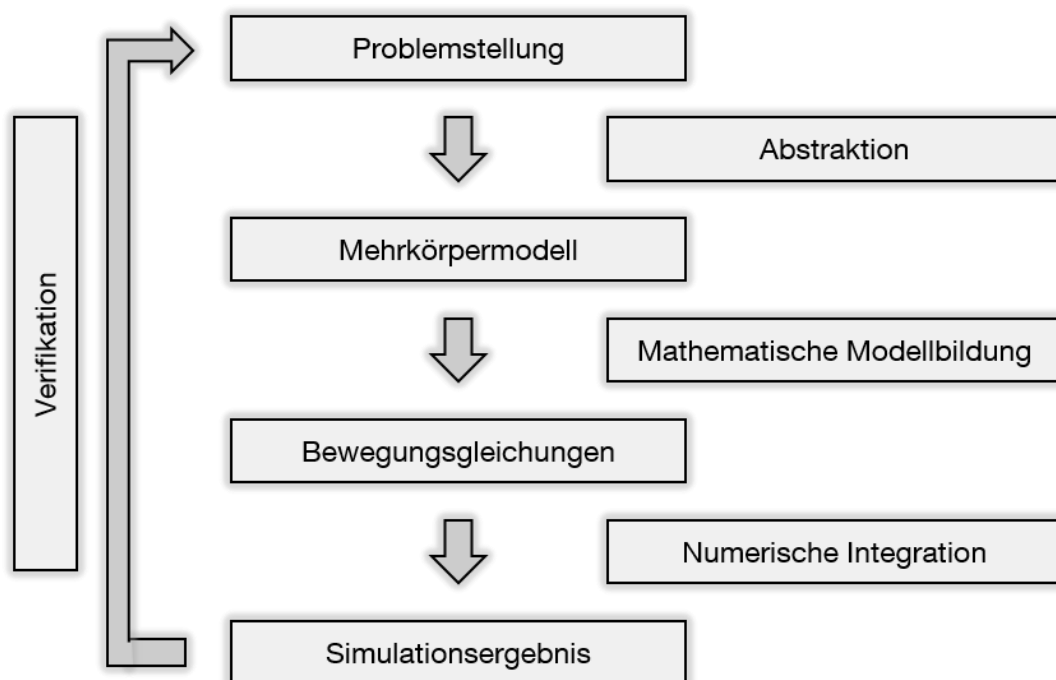


Abbildung 5-3: Modellbildung in der Mehrkörpersimulation [För-2008]

Ausgehend von einer realen Problemstellung für ein mechanisches System wird ein Mehrkörpermodell generiert. Hierbei ist es nötig, an mehreren Stellen des Modells vereinfachende Annahmen zu machen, ohne dabei die Aussagegüte des Modells zu verringern. Diese Abstraktionen betreffen beispielsweise die Verbindungselemente im Modell, die generell masselos ausgeführt werden. Zudem wird angestrebt, die

meisten Körper starr zu modellieren, da sich bei elastischen Körpern die Anzahl der Freiheitsgrade im Modell drastisch erhöht. Das entstandene Mehrkörpermodell beschreibt das mechanische System auf Basis von Differentialgleichungen (Bewegungsgleichungen), durch welche die Bewegung des Systems beschrieben wird. Zur Integration dieser Bewegungsgleichungen haben sich zahlreiche numerische Verfahren etabliert, die sich einerseits in Ein- und Mehrschrittverfahren und andererseits in explizite und implizite Integrationsverfahren einteilen lassen. Eine Auswahl der wesentlichen Verfahren kann [För-2008] entnommen werden. Die Ergebnisse der numerischen Integration bestehen zum einen aus der Bewegung des Systems unter den einwirkenden Kräften und Momenten und andererseits aus den Kräften und Momenten, die in den Verbindungselementen übertragen werden. Die Verifikation der Ergebnisse erfolgt in den meisten Fällen anhand entsprechender Messgrößen am realen System und dient dazu, nachzuweisen, dass die im Modell ermittelten Werte mit den in der Realität auftretenden hinreichend gut übereinstimmen. Ist dies der Fall, besitzt das entwickelte Mehrkörpermodell die Eignung das Systemverhalten unter verschiedenen Parametern vorherzusagen, ohne dieses Experimente in der Realität durchführen zu müssen.

5.1.3 Stand der Anwendung in der Intralogistik

In den letzten Jahren fand die Mehrkörpersimulation auch verstärkt Einzug in die Untersuchung sowohl von Personenförderertechnik, aber auch von intralogistischen Maschinen und Anlagen.

Im Bereich der Personenförderertechnik ist hier vor allem die Simulation von Seilbahnsystem zu nennen [Löh-2002]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde vor allem die Stationseinfahrt einer kuppelbaren 4er-Sessel- und einer 6er-Kabinen-Einseil-Umlaufbahn untersucht. Der Fokus der Untersuchung lag auf der Ermittlung der Belastung am Kontakt zwischen Station und Klemme, die während der Stationseinfahrt entsteht und der Ermittlung der Einflussfaktoren auf die Belastung. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden mithilfe des Mehrkörpersystems konstruktive Optimierungsmaßnahmen an einer bestehenden Anlage simulativ untersucht, um die Belastung auf die Komponenten zu reduzieren.

Im Bereich der Intralogistik wurde die Mehrkörpersimulation vor allem im Bereich der Flurförderzeuge eingesetzt. Den Anfang bildete hier die Untersuchung der dynamischen Auswirkungen von Bodenunebenheiten auf das Fahrverhalten von Schmalgangstaplern [Gün-2006, Sch-2006] mithilfe eines hybriden Mehrkörpermodells. Im Fokus der Untersuchungen standen dabei vor allem die Einflüsse auf das Schwingungsverhalten des Schmalgangstaplers, die durch eine gezielte Variation

der Haupteinflussparameter wie Last, Hubhöhe oder Bodenunebenheiten herausgearbeitet wurden. Zudem konnten mithilfe der Simulation Hinweise und Kriterien für die Bodenqualität in Lagern für Schmalgangstapler abgeleitet werden [Sch-2006].

In weiteren Forschungsarbeiten im Bereich der dynamischen Simulation von Flurförderzeugen wurden die Humanschwingungen, die im Betrieb auf den Fahrer wirken, untersucht [Gün-2011a, Fis-2015]. Gegenstand dieser Untersuchung war insbesondere die tägliche Exposition von Hand-Arm-Vibrationen und deren maßgebliche Einflussgrößen. Hierfür wurden für unterschiedliche, repräsentative Flurförderzeuge Mehrkörpermodelle entwickelt und anhand von Testfahrten validiert. In den Simulationen wurden die Einflussgrößen wie Beladungszustand, Fahrbahnbeschaffenheit oder auch Masse des Fahrers [Gün-2011a, Fis-2015] untersucht.

Neben der Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Flurförderzeugen wurde mithilfe der Mehrkörpersimulation auch die Querdynamik von Flurförderzeugen betrachtet [Bus-2010]. Eine besondere Herausforderung bei dieser Forschungsarbeit war die Abbildung der realen Reifeneigenschaften von Superelastikreifen, wie Sie bei Flurförderzeugen verwendet werden. Zwar existieren im Bereich der Fahrzeugtechnik bereits Reifenmodelle, die allerdings von Luftreifen ausgehen und deshalb nicht ohne weiteres verwendet werden können. In dieser Hinsicht sollte in einem weiteren Forschungsprojekt ein speziell auf die Bedürfnisse von Superelastikreifen abgestimmtes Reifenmodell für den Einsatz an Flurförderzeugen entwickelt werden [Oh-2013, Oh-2017]. Bei diesem Projekt wurden die elastischen Eigenschaften des Reifens (Steifigkeit und Dämpfung) in der Simulation über ein System von Federn und Dämpfern abgebildet, welche die Körper verbinden. Die Kalibrierung des Simulationsmodells fand in Labortests an einem Trommelprüfstand und Hydropulser-Prüfstand statt, welche in der Simulation nachgebildet wurden.

In [Gün-2016a] wird die Mehrkörpersimulation auf die Entwicklung und Konstruktion eines Integralhebesystems zur kranlosen Montage und Wartungsabsenkung von Windenergieanlagen angewendet. Wesentliche Aspekte in diesem Forschungsprojekt waren die Modellbildung des Systems und die Simulation des Hubvorgangs unter unterschiedlichen Einflüssen. Hierzu zählten insbesondere die Geometrie des Hebe- und Kippmechanismus und verschiedene Windfelder, die mithilfe eines entsprechenden Kraftelements abgebildet wurden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Mehrkörpersimulation mittlerweile als Werkzeug zur Lösung komplexer, mechanischer Fragestellungen für intralogistische etabliert hat und bereits in vielen Anwendungen erfolgreich eingesetzt wurde. Über den Einsatz dieses Werkzeugs im Bereich der Industriekrananlagen zur

Abbildung des mechanischen Systems und zur Auswertung von Spielzeiten liegen dem Autor der vorliegenden Arbeit keine Veröffentlichungen vor.

5.2 Modellbildungsansätze am Beispiel Brückenkran

Die wesentlichen Komponenten für die Modellbildung sind das Tragwerk, in diesem Fall die Kranbrücke, der Seiltrieb, die Rad-Schiene-Kontakte für das Kran- und Katzfahren und die Bewegungssteuerung des Krans. Die Auswahl der Ansätze wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Auch wird auf deren Umsetzung im Rahmen des Mehrkörpermodells eingegangen. Vergleichbare Ansätze wurden bereits in [fml-2015b].

5.2.1 Modellbildung der Kranbrücke

Die Kranbrücke soll im Mehrkörpersystem als elastischer Körper abgebildet werden, da sie durch das Heben und Senken der Last und das Verfahren zu Schwingungen angeregt werden kann, die sich wiederum potentiell auf das Fahrverhalten und damit die Spielzeit auswirken. Als Untersuchungsgegenstand dient ein I-Träger, der für Einträger-Brückenkrane sehr häufig Verwendung findet. Für die Abbildung als elastische Struktur bieten sich unterschiedliche Modellierungsansätze an, die nachfolgend kurz skizziert werden.

- Ansatz mit Balkenelementen nach der Euler-Bernoulli-Theorie
- Ansatz mit Balkenelementen nach der Timoshenko-Theorie
- Aufbau eines Balkens als Finite-Elemente-Modell aus einzelnen Platten- und Scheibenelementen

Da der Balkenansatz mit Euler-Bernoulli-Elementen weniger Freiheitsgrade aufweist als der Ansatz nach Timoshenko-Theorie und die Modellierung aus Platten- und Scheibenelementen, sind bei diesem Ansatz die günstigsten Rechenzeiten aufgrund der geringeren Anzahl an Freiheitsgraden zu erwarten. Da die Verformungen der Kranbrücke hinsichtlich der Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit in der Regel klein anzusetzen sind [ISO 22986], stellt ein linearer Ansatz, wie er auch in der Biegebalkentheorie verwendet wird, bereits eine hinreichend genaue Lösung zur Verfügung, welche durch den Euler-Bernoulli-Balken abgedeckt wird. Hinsichtlich der Kontaktmodellierung zwischen den Rollen der Laufkatze und der Kranbrücke sind alle genannten Ansätze in der Lage diese Problemstellung zu handhaben, wobei die Ansätze mit Balkenelementen in der Vergangenheit sich bei ähnlichen Fragestellungen bereits als günstige [Sch-2006] Lösung erwiesen haben. Die Abbildung der Schwin-

gung der Kranbrücke erfolgt mithilfe eines Modalansatzes, bei dem die Anzahl der betrachteten Eigenfrequenzen des Balkens eingeschränkt wird, um günstige Rechenzeiten für das Modell zu erreichen. Zusammenfassend ergibt sich, dass bereits der einfache Ansatz mit Balkenelementen nach der Euler-Bernoulli-Theorie eine sinnvolle Basis für die Modellierung der Kranbrücke bildet, sodass dieser Ansatz weiterverfolgt wird. In Abbildung 5-4 ist der Ansatz für die Modellierung der Kranbrücke bildlich dargestellt.

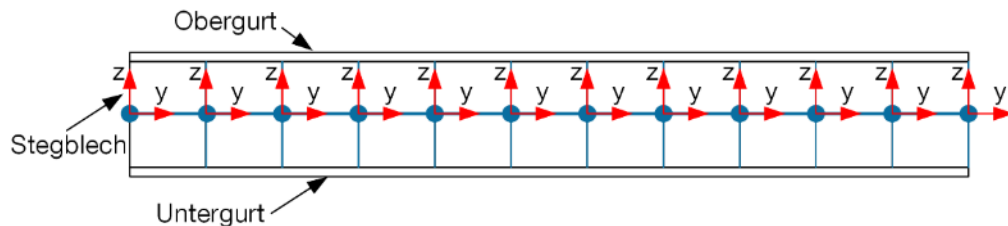


Abbildung 5-4: Modellbildung der Kranbrücke in der Mehrkörpersimulation

Umgesetzt wird eine abschnittsweise Diskretisierung mit mehreren verbundenen Balkenelementen, die Querschnittswerte bleiben entlang der Kranbrücke konstant. Hinsichtlich der Anzahl der Knoten wird eine Unterteilung in insgesamt 40 Abschnitte, die Anzahl der betrachteten Eigenmoden wird auf die ersten zehn festgelegt. Da in der Vergangenheit zur Abbildung der Brückenschwingung bereits Ein- und Zwei-Massen-Schwingungssysteme als ausreichend genau identifiziert wurden (vgl. bspw. [Kör-1965]), ist diese Anzahl in jedem Fall geeignet.

5.2.2 Abbildung des Seiltriebs

Seile weisen elastische Eigenschaften auf, die im Rahmen des Mehrkörpermodells berücksichtigt werden sollen. Dies bezieht sich zum einen auf die Steifigkeit des Seiltriebes als auch auf die Dämpfung, die von der Länge des Seils und von der Einscherung abhängen. In [Gol-2004] wird ein Ansatz zur Abbildung von Seilen in Hebezeugen vorgestellt, der auf einem einfachen Feder-Dämpfer-Element basiert, auf welches die Steifigkeit und die Dämpfung des Seiltriebes kondensiert werden. In der Mehrkörpersimulation erfolgt keine Übertragung dieser Eigenschaften auf nur ein Element, vielmehr wird der Seiltrieb abgebildet, wie er auch im Hubwerk zu finden ist. Die Eigenschaften jedes Seilstrangs einzeln berücksichtigt, wenn auch das Laufen des Seils über die Seilrollen und das Aufwickeln auf die Seiltrommel vernachlässigt werden. In Abbildung 5-5 ist der Modellierungsansatz für den Seiltrieb und die Umsetzung in der Mehrkörpersimulation am Beispiel eines zweisträngigen Seiltriebs dargestellt.

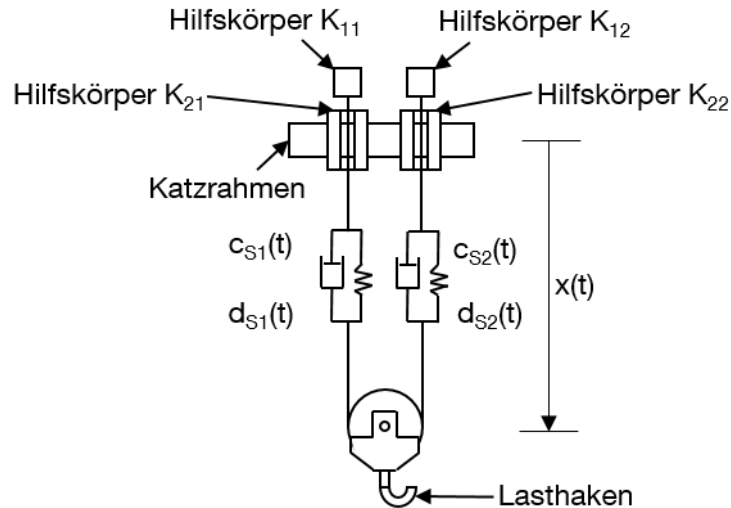


Abbildung 5-5: Schema Abbildung des Seiltriebs

Die Steifigkeit $c_s(t)$ und die Dämpfung $d_s(t)$ des Seils sind von seiner Länge $x(t)$ abhängig und werden analog zu [Gol-2004] modelliert. Dieser Eigenschaft wird durch die Abbildung einer längenabhängigen Steifigkeit und Dämpfung in der Mehrkörpersimulation begegnet. Der gewählte Ansatz entspricht in den Grundzügen dem bereits in [Gün-2016a] verwendeten Vorgehen. Hinsichtlich des Auftrommelns des Seils beim Heben der Last wird in der Simulation eine Abstraktion bei der Steuerung vorgenommen. Der Prozess des Aufwickelns des Seils wird vernachlässigt, genauso wie das Laufen des Seils über Seilrollen. Vielmehr ist an jedem Ende eines Seilstranges ein beinahe masseloser Hilfskörper (K_{1x} für Hilfskörper 1 an Seilstrang x) angebracht, der die Hubbewegung vorgibt. Dieser Hilfskörper bewegt sich relativ zu jeweils einem weiteren Hilfskörper (K_{2x} für Hilfskörper 2 an Seilstrang x), der am Katzrahmen befestigt ist. Dieser Hilfskörper ist gelenkig um zwei Achsen am Katzrahmen aufgehängt, damit auch das Pendeln der Last in der Simulation berücksichtigt werden kann. Die entsprechende Steifigkeit und Dämpfung, die für ein Abklingen der Lastschwingungen sorgt, werden mithilfe von Rotations-Feder-Dämpfer-Elementen abgebildet. Die Hub- und Senkbewegung wird durch die Hilfskörper K_{1x} realisiert, indem ihnen eine Bewegung in die positive bzw. negative z -Richtung relativ zu den Hilfskörpern K_{2x} vorgegeben wird. Am unteren Ende sind die Feder-Dämpfer-Elemente am Lasthaken im Auf- bzw. Ablaufpunkt auf die Seilrolle fixiert.

5.2.3 Modellierung der Rad-Schiene-Kontakte

Rad-Schiene-Kontakte treten bei den betrachteten Kransystemen zum einen zwischen den Laufrollen der Kopfträger und der Kranbahn und den Laufrollen der Katze und der Kranbrücke selbst auf. Die Bandbreite reicht dabei von einfachen Punkt-Punkt-Kontaktmodellen, die darauf basieren, dass sich die Kontaktpunkte entlang einer Kurve bewegen bis hin zu Finite-Elemente-Kontaktmodellen, die ein sehr detail-

liertes Abbild des realen Kontaktgeschehens ermöglichen, allerdings zu sehr hohen Rechenzeit führen. Da für die vorliegende Arbeit lediglich die Einleitungsstelle und der Betrag der Kräfte in der Kranbahn bzw. der Kranbrücke von Bedeutung ist, ist es nicht notwendig auf sehr aufwendige Berechnungsmodelle zurückzugreifen. In vorangegangenen Projekten hat sich das Kontaktmodell nach Hertz [Sim-2014] für ähnliche Fragestellungen als sehr günstig erwiesen [Gün-2016a], sodass auch für die vorliegende Arbeit auf diesen Ansatz zurückgegriffen wird. In Abbildung 5-6 ist der zu Grunde liegende Kontaktmechanismus schematisch dargestellt.

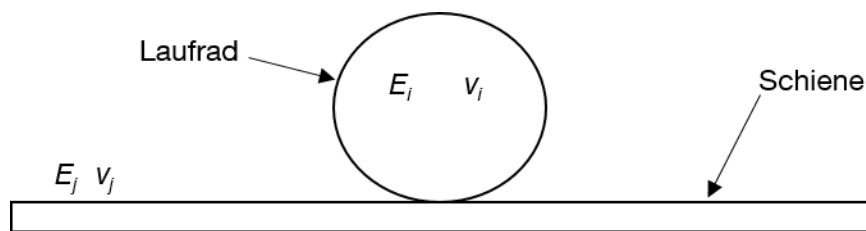


Abbildung 5-6: Schema Laufrad-Schiene-Kontakt nach Hertz

Das Laufrad wird als Zylinder mit dem Elastizitätsmodul E_i und der Querdehnzahl ν_i abgebildet, die Schiene als Ebene mit den korrespondierenden Eigenschaften E_j und ν_j , so dass sich der Berechnungsfall Zylinder auf Ebene nach Hertz ergibt. Die Kontaktkraft auf Basis dieser Kontaktformulierung berechnet sich nach Gleichung (5-2).

$$F_{\text{Kontakt}} = \frac{\pi}{8} \cdot E^* \cdot L \cdot y \cdot |y| \quad (5-2)$$

Darin bezeichnet E^* den mittleren Elastizitätsmodul, der nach Gleichung (5-3) berechnet wird, L die Länge des Linienkontakts und y die gegenseitige Durchdringung der beiden Körper [Sim-2014].

$$E^* = \frac{2 \cdot E_i \cdot E_j}{(1 - \nu_i^2) \cdot E_j + (1 - \nu_j^2) \cdot E_i} \quad (5-3)$$

In die Berechnung des mittleren Elastizitätsmoduls E^* nach (5-3) fließen die Elastizitätsmoduln E_i und E_j von Zylinder und Schiene sowie die jeweiligen Querdehnzahl der beiden Körper ein. Zusätzlich zur Kontaktnormalkraft wird die Reibungskraft nach Gleichung (5-4) mithilfe des Reibungsgesetzes nach Coulomb auf Basis der Kontaktnormalkraft und des Reibwertes μ berechnet. Die Berechnung des Reibwertes kann [Sim-2014] entnommen werden.

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (5-4)$$

Ein ähnlicher Ansatz wird auch für die Dämpfungskraft im Kontakt verwendet. Diese Kraft wird in Abhängigkeit der Normalgeschwindigkeit im Kontakt v_{Norm} und dem Dämpfungskoeffizienten d_{act} , dessen Berechnung in [Sim-2014] dargestellt ist, nach Gleichung (5-5) berechnet.

$$F_D = d_{act} \cdot v_{Norm} \tag{5-5}$$

Mithilfe dieses Kontaktmodells ist es möglich, die Kontaktkräfte zwischen Laufkatze und Kranbrücke bzw. zwischen den Laufrädern im Kopfträger und der Kranbahn zu berechnen.

5.2.4 Bewegungssteuerung des Krans

In Abbildung 5-7 ist die Benutzeroberfläche für die Bewegungseingaben in Matlab dargestellt.

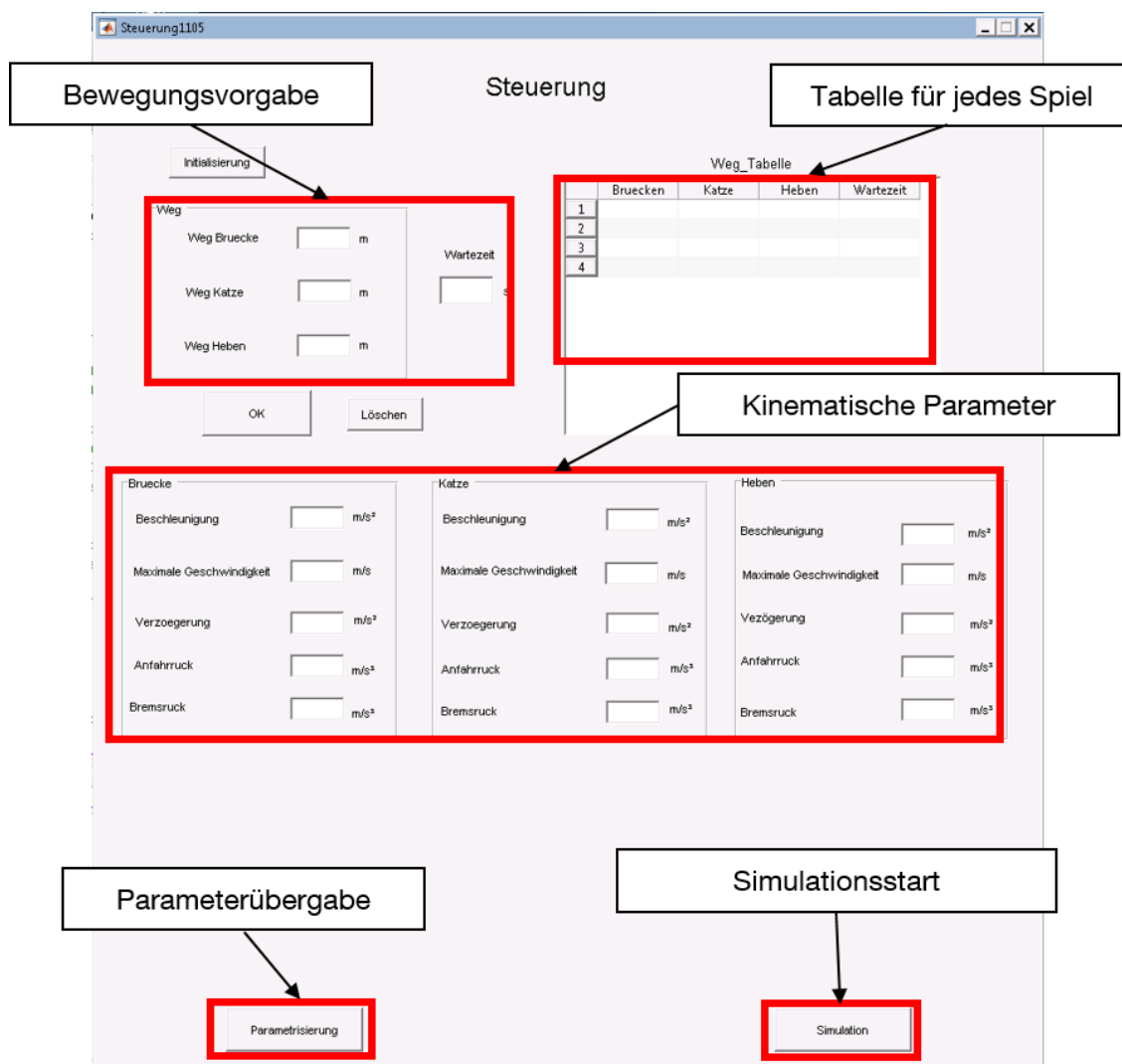


Abbildung 5-7: Eingabemaske für die Bewegung des Krans

Die Daten für die Bewegung des Krans werden für jedes Arbeitsspiel separat vom Anwender vorgegeben. Diese Daten beziehen sich auf die Bewegungsabfolge, die einzelnen zurückzulegenden Wege und die Pausen zwischen jeder Einzelbewegung eines Spiels. Daten für die Beschleunigungen, die Fahr- und Hubgeschwindigkeit sind in Abhängigkeit des zu untersuchenden Antriebs und ggfs. der Last vorgegeben. Realisiert wird die Eingabe mithilfe der Co-Simulation zwischen dem Software-Paket Matlab/Simulink und der Mehrkörpersimulationssoftware Simpack.

Jede Aufgabe eines Krans setzt sich aus der Hublast, den kinematischen Parametern und den Verfahrwegen entlang jeder einzelnen Kranachse sowie weiteren für die Simulation notwendigen Parametern zusammen. Die Eingabe dieser Daten erfolgt mithilfe einer grafischen Benutzeroberfläche in Matlab, welches aus den Daten die Bewegungsvorgabe für den Kran in der Mehrkörpersimulation berechnet. Die Verfahrswege innerhalb jeder Kranaufgabe müssen vom Anwender einzeln in der Sektion Bewegungsvorgabe angegeben werden. Die kinematischen Parameter sind von Antrieb abhängig und müssen in der entsprechenden Rubrik der Oberfläche eingetragen werden.

5.3 Modellvalidierung und Simulationsdurchführung

Die Implementierung des Modells und die Durchführung der Simulationsläufe erfolgt in der Software Simpack. Die Nutzung dieses kommerziellen Simulationswerkzeugs bietet im Vergleich zu einem selbst programmierten Lösungsalgorithmus einige zentrale Vorteile. Hierzu zählen insbesondere die guten Kopplungseigenschaften zu anderen Produkten wie Matlab und Simulink, die im Rahmen dieser Arbeit auch zum Einsatz kommen und damit für durchgängig konsistente Modellierungsansätze sorgen. Zum anderen bestehen sehr gute Auswertemöglichkeiten im Rahmen des Post-processings. Einen zentralen Schritt bei der Mehrkörpersimulation stellt die Validierung des Simulationsmodells dar. Hierzu werden in den meisten Fällen Messungen der entsprechenden Größen wie Geschwindigkeiten, Beschleunigungen oder Kräfte vorgenommen und diese mit den Ergebnissen aus der Simulation verglichen.

5.3.1 Parametrierung und Validierung des Simulationsmodells

Zur Validierung des Simulationsmodells werden unterschiedliche Experimente an einer realen Krananlage durchgeführt und charakteristische Messwerte ausgewertet. Diese Messwerte werden dann mit Werten aus der Simulation verglichen, die in den äquivalenten virtuellen Experimenten gewonnen werden. Als Testgerät dient ein Einträger-Brückenkran (10 t Tragfähigkeit), mit dem die im Folgenden beschriebenen Versuche durchgeführt werden. Zur Validierung der Simulation für die Bewegung der

Kranbrücke werden zum einen ein Ausschwingversuch und zum anderen ein Anfahrversuch verwendet. In Abbildung 5-8 ist der Versuchsaufbau für den Ausschwingversuch zur Validierung des Mehrkörpermodells dargestellt.

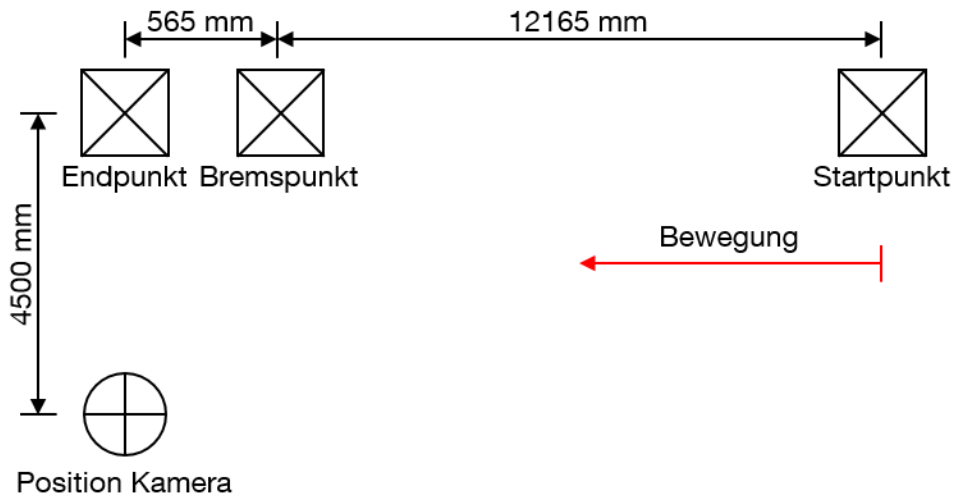


Abbildung 5-8: Aufbau Ausschwingversuch Kranbrücke

Zu Beginn befindet sich die Last in angehobenem Zustand in Ruhe. Der Taster für den Fahrbefehl der Kranbrücke wird gedrückt und der Kran beschleunigt bis zu seiner Nennfahr Geschwindigkeit. Am Bremspunkt wird der Taster losgelassen und der Kran bremst bis zum Stillstand ab, der in diesem Fall im 565 mm entfernten Bremspunkt liegt. Auf gleicher Höhe befindet sich eine Kamera in einer Entfernung von 4500 mm, die das Ausschwingen der Last aufnimmt. Die Auswertung der Bewegung erfolgt mithilfe der Open-Source-Software *Tracker*. In Abbildung 5-9 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Die Positionsmarkierungen werden entsprechend des in Abbildung 5-8 dargestellten Aufbaus auf dem Boden der Versuchshalle markiert. Zusätzlich wird ein Objekt, dessen Abmessungen bekannt sind, als Maßstab festgelegt. Mit diesem Objekt – hier ein markierter Blechstreifen mit einer Länge von 1500 mm – wird ein Referenzobjekt definiert, mit der Anzahl der Pixel, die bei jeder Bewegung überstrichen werden in eine tatsächliche, SI-konforme Längeneinheit umzurechnen. Der Unterschied im Abstandsabstand des Maßstabs und des Markers zur Kamera wird im Zuge der Auswertung berücksichtigt, sodass dieser Fehler eliminiert werden kann.

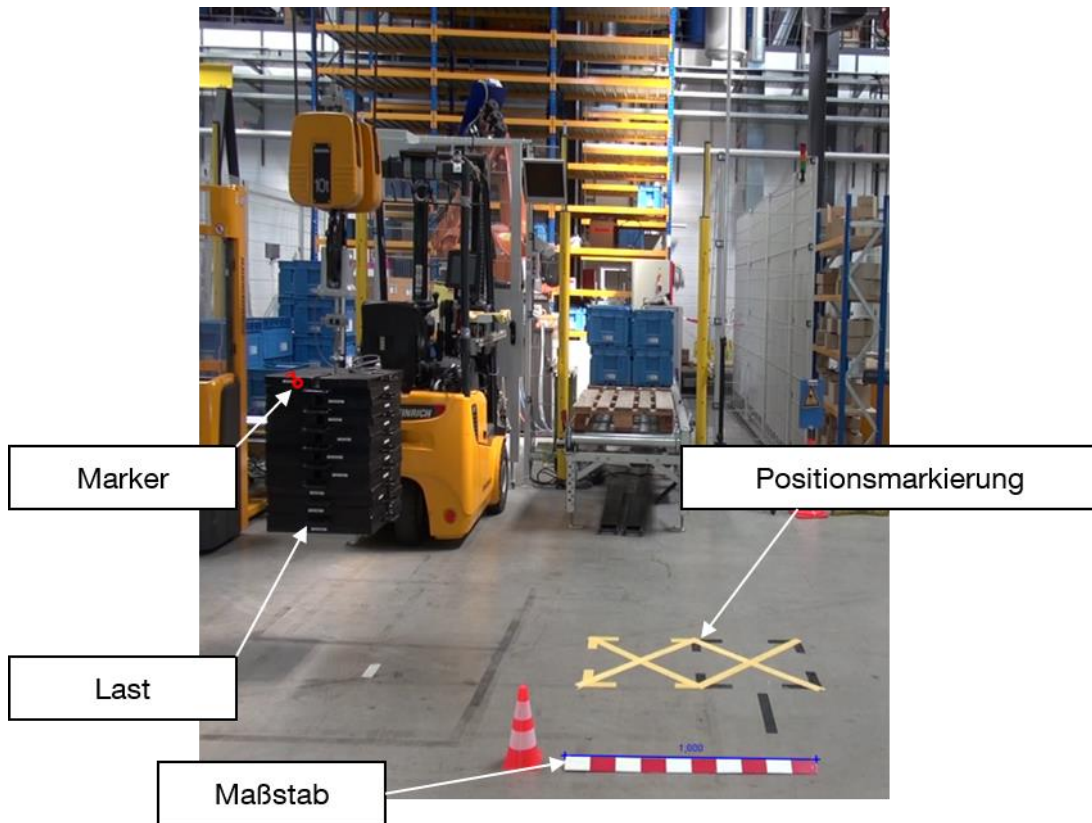


Abbildung 5-9: Aufbau Anfahrversuch Kranbrücke

In Abbildung 5-10 ist exemplarisch die Amplitude der Schwingung in x-Richtung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

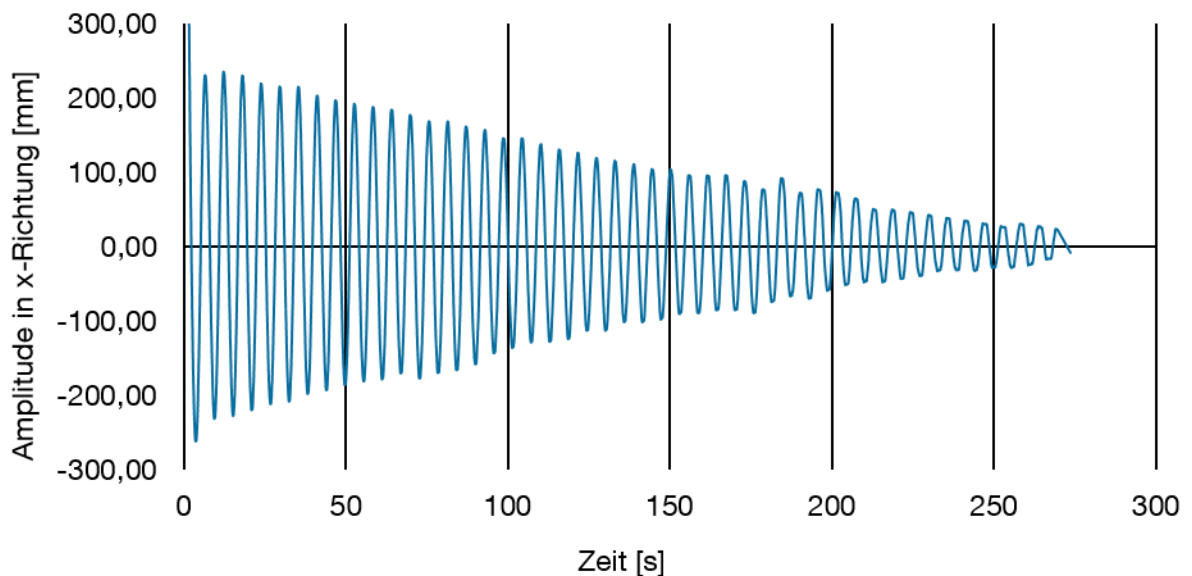


Abbildung 5-10: Ausschwingversuch Kranbrücke

Deutlich zu erkennen ist in dieser Abbildung die sehr schwache Dämpfung des Systems, sodass die Schwingung der Last erst nach einer Zeit von ca. 280 s abgeklun-

gen ist. Mithilfe dieser Ausschwingversuche ist es möglich die Steifigkeits- und Dämpfungsdaten des Systems zu ermitteln und in der Simulation richtig einzustellen. Ein Abgleich der Simulation mit den gemessenen Daten dient zur Validierung des Simulationsmodells. Die äquivalenten Versuche werden mit der Krankatze durchgeführt und auch hier das Ausschwingverhalten mithilfe von Filmaufnahmen untersucht. In Abbildung 5-11 ist ein entsprechender Versuch mit einer Last von 1100 kg, welche 500 mm über dem Boden positioniert ist, dargestellt.

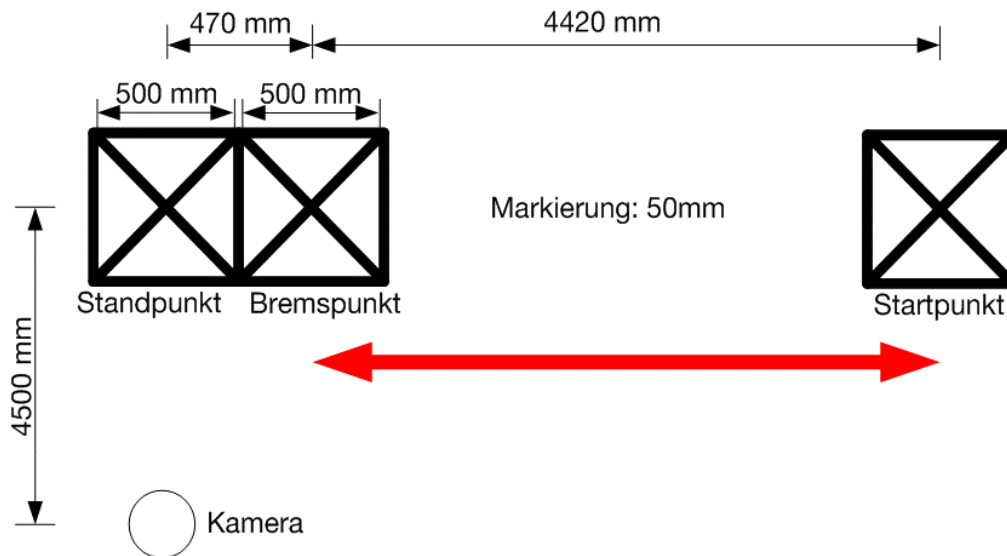


Abbildung 5-11: Aufbau Ausschwingversuch Katzfahren

Für die Katze ergibt sich ein qualitativ ähnliches Bild, Unterschiede in der Ausschwingzeit entstehen durch unterschiedliche geometrische Verhältnisse hinsichtlich der Seilabhängung an der Katze und Unterschiede in den Steifigkeits-, Reibungs-, und Dämpfungsparametern.

Parameteridentifikation

Mithilfe dieser Daten ist es möglich die Parameter für die Dämpfung, die für ein Ausschwingen der Last am Ende des Fahrvorgangs sorgen, zu ermitteln. Hierzu wird anhand der Ausschwingversuche der Dämpfungsparameter abgeschätzt. Abbildung 5-12 zeigt exemplarisch das Ergebnis für den Ausschwingversuch bei Katzfahrt mit einer Last von ca. 1.100 kg und einer Lastposition von 500 mm über dem Boden.

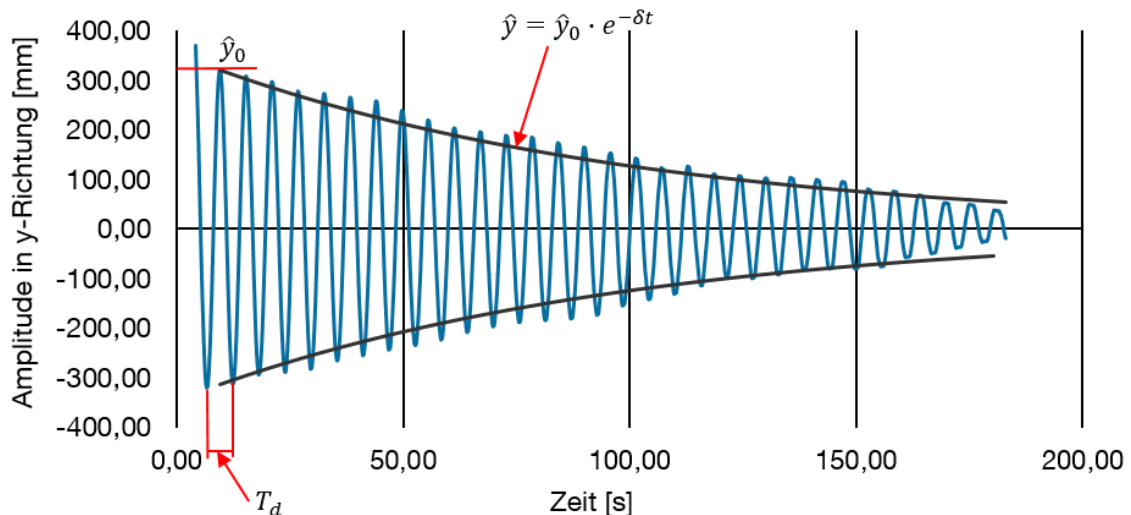


Abbildung 5-12: Auswertung Ausschwingversuch Kranfahren

Zu erkennen ist analog zur Kranbrücke das schwache Dämpfungsverhalten des Systems, was eine Ausschwingzeit von über 180 s zur Folge hat. Diese Dämpfung ist auf die Reibung in den Lagern der Aufhängungsstellen und die Werkstoffdämpfung der einzelnen Elemente zurückzuführen. Mithilfe dieser Daten ist es möglich, die Dämpfungskennwerte für jeden Kran abzuleiten und damit das Mehrkörpermodell entsprechend zu parametrisieren. Hierzu wird die Kranbrücke mit der angehängten Last als mathematisches Pendel mit Dämpfung idealisiert angesehen. Diese Annahme betrifft vor allem die Aufhängung des Seiltriebs an der Katze, welche im hier angewandten Modellierungsansatz auf einen Punkt reduziert wird. Die hierzu gehörende Differentialgleichung wird mithilfe eines Momentengleichgewichts um den Aufhängungspunkt aufgestellt und ist in Formel (5-6) dargestellt.

$$M_T = M_C + M_D \quad (5-6)$$

Darin bezeichnen M_T das Moment aus der Trägheitswirkung der Last, M_C das Moment aus der Steifigkeit der Lagerungen und der anderen Bauteile, die als Feder wirken und M_D das Dämpfungsmoment. Die Berechnung der einzelnen Komponenten vollzieht sich nach den Gleichungen (5-7), (5-8) und (5-9).

$$M_T = J \cdot \ddot{\alpha} \quad (5-7)$$

$$M_C = -c \cdot \alpha \quad (5-8)$$

$$M_D = -\gamma \cdot \dot{\alpha} \quad (5-9)$$

Der Parameter J beschreibt die Trägheit der Last bezogen auf den Drehpunkt, c die Steifigkeit und γ den Dämpfungskoeffizienten. Während die Trägheit auf Basis der Geometrie der Hublast, der Masse und dem Abstand des Schwerpunkts zum imaginären Drehpunkt bestimmt werden kann, müssen die benötigte Steifigkeit und die Dämpfung aus Experimenten gewonnen werden. Zur Ermittlung der Dämpfung wird der Zusammenhang zwischen der Abklingkonstante δ und dem Dämpfungskoeffizienten γ nach Gleichung (5-10) herangezogen.

$$\gamma = 2 \cdot J \cdot \delta \quad (5-10)$$

Die Abklingkonstante wird auf Basis der Fahrversuche mit Kranbrücke bzw. Katze ermittelt. Die Berechnung wird auf Basis der Amplituden zweier aufeinander folgender Schwingungen mithilfe des logarithmischen Dekrements Λ nach Gleichung (5-11) durchgeführt.

$$\Lambda = \ln \left(\frac{\hat{y}_i}{\hat{y}_{i+1}} \right) \quad (5-11)$$

Das logarithmische Dekrement wird aus dem Mittelwert der Schwingungsamplituden berechnet. Der Abklingkoeffizient γ wird nach Gleichung (5-12) auf Basis des logarithmischen Dekrements und der Schwingungsdauer T_d berechnet.

$$\delta = \frac{\ln \left(\frac{\hat{y}_i}{\hat{y}_{i+1}} \right)}{T_d} \quad (5-12)$$

Für die Auswertung wird näherungsweise die mittlere Zeit für zwei aufeinander folgende Schwingungsmaxima verwendet. Die Auswertung erfolgt zunächst getrennt auf Basis der Schwingungsmaxima und –minima, woraus sich zwei unterschiedliche Abklingkoeffizienten ergeben. Als Gesamtergebnis wird der Mittelwert aus beiden Untersuchungen für die Berechnung des Dämpfungswertes herangezogen. Für den vorliegenden Fall wird die Gesamtdämpfung auf die vier Aufhängungspunkte im Modell gleichmäßig verteilt.

Validierung

Nach der Parameteridentifikation ist es notwendig, zu überprüfen, ob das Modell das reale Verhalten des Systems hinreichend genau widerspiegelt. Hierzu werden die gemessenen Daten hinsichtlich Ausschwingverhalten für das Katz- und das Kranfahren mit den entsprechenden Simulationen verglichen. Abbildung 5-13 zeigt in dieser

Hinsicht einen Vergleich für das Ausschwingverhalten beim Kranfahren mit einer Last von 1100 kg und einer Lastposition über dem Boden von 500 mm.

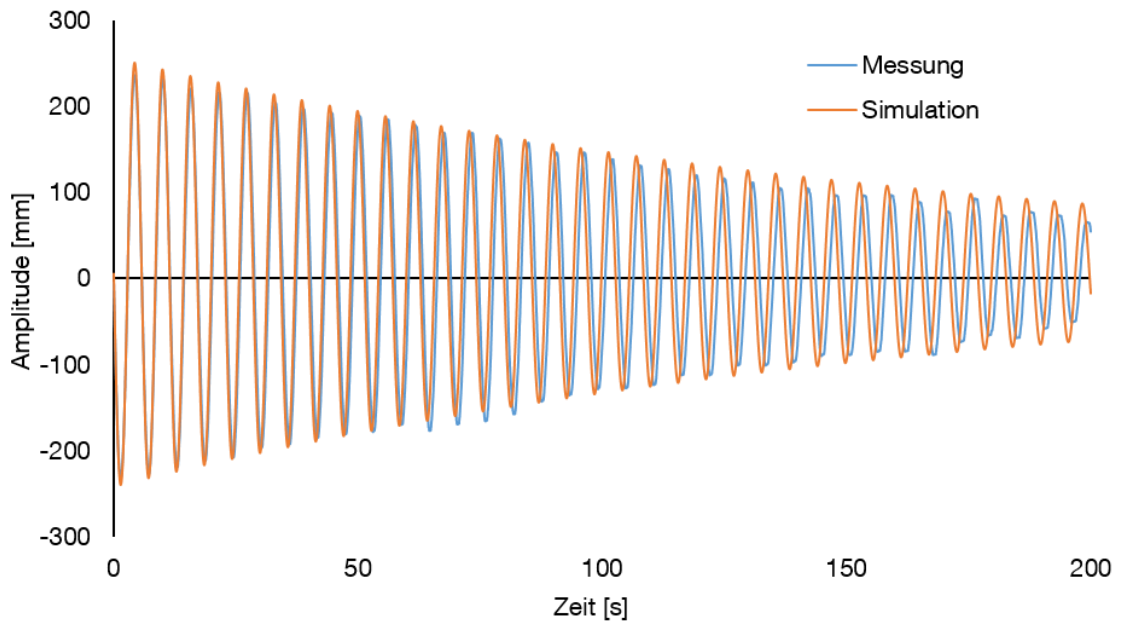


Abbildung 5-13: Validierung Kranfahren

Bezüglich des Ausschwingverhaltens zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den in der Simulation erzielten Daten. Für das Katzfahren wird analog zum Kranfahren die Validierung durchgeführt. Exemplarisch ist ein Vergleich des Ausschwingverhaltens in der Simulation und bei der Versuchsdurchführung mit einer Masse von 500 kg in Abbildung 5-14 dargestellt.

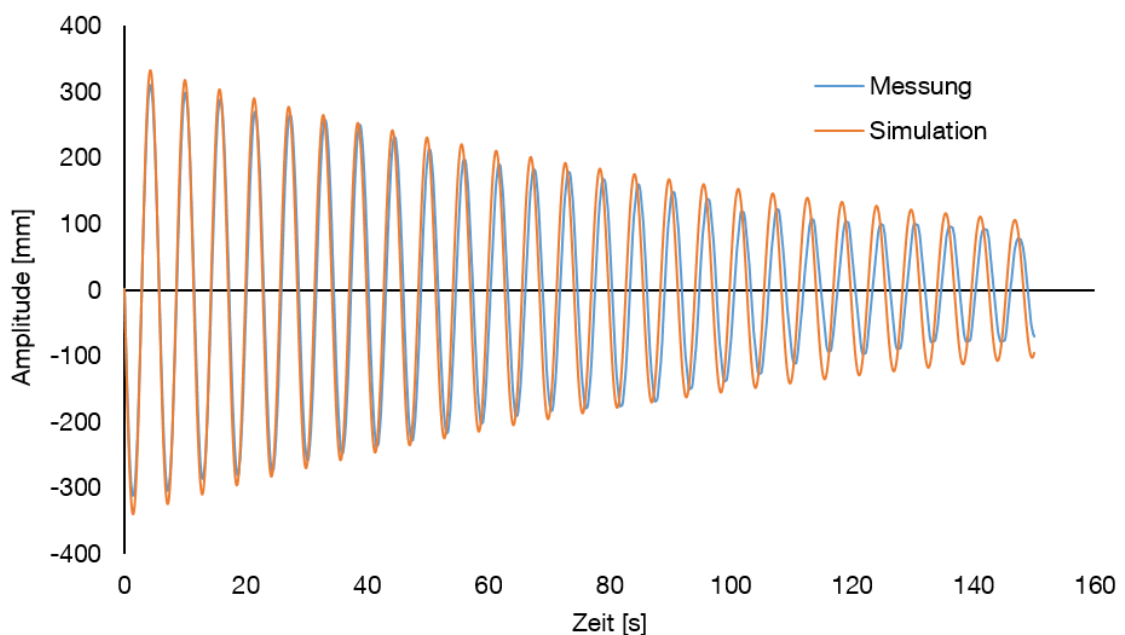


Abbildung 5-14: Validierung Katzfahren

Auch für das Katzfahren zeigt das entwickelte Modell eine ausreichend gute Übereinstimmung mit den Messungen. Damit kann das entwickelte Mehrkörpermodell für das Kran- und das Katzfahren als geeignet zur Simulation der Fahraufgaben des Brückenkrans betrachtet werden.

5.3.2 Durchführung der Simulationen

Zur Durchführung der Simulation wird ein Vorgehen entwickelt, mit dem die Spielzeit für jede Kranaufgabe ermittelt werden kann und damit als Basis für die wirtschaftliche Kostenbewertung dient. Zum Einsatz kommt hierbei die Co-Simulation zwischen MATLAB/Simulink und der Mehrkörpersimulationssoftware Simpack. Der Ablauf für die Durchführung der Simulationen ist in Abbildung 5-15 in einem vereinfachten Ablaufdiagramm dargestellt.

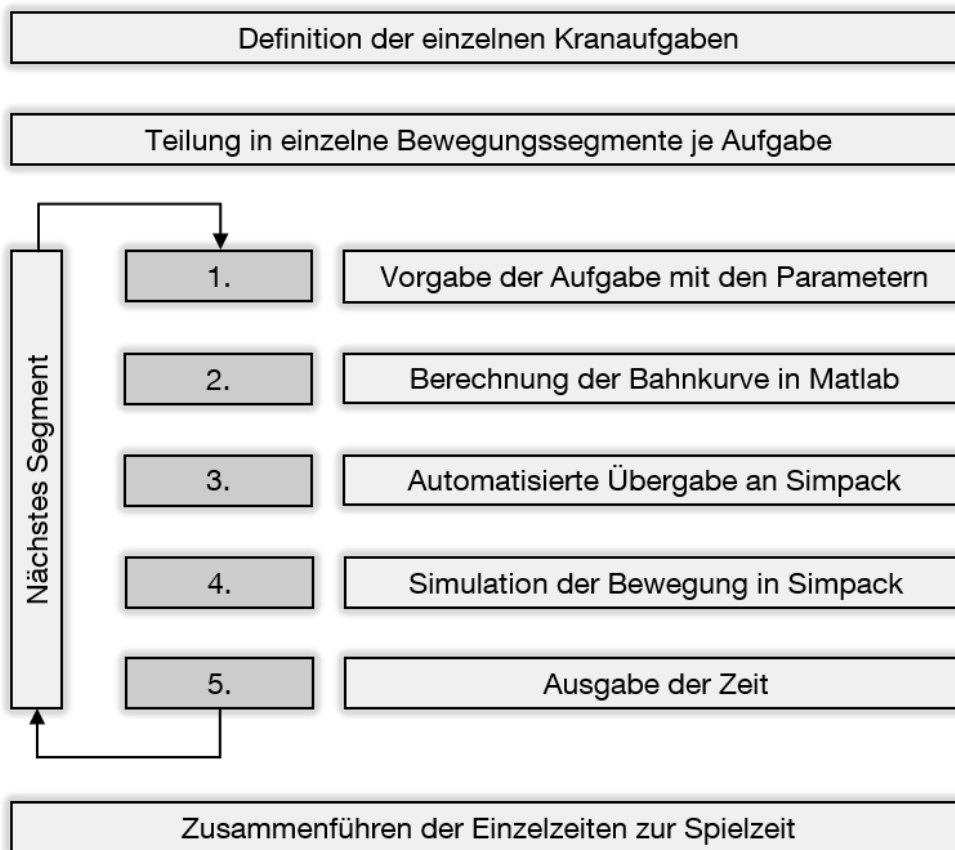


Abbildung 5-15: Vorgehen zur Durchführung der Simulationsläufe

Wie bereits in Kapitel 4.3 dargelegt, werden zunächst alle Aufgaben des Krans, die er während seiner Nutzungszeit abarbeitet, mit der entsprechenden Hublast und den dazugehörigen Bewegungen definiert. Für die Simulation werden diese Aufgaben in einzelne Bewegungssegmente untergliedert. Jedes Bewegungssegment ist dabei als Abfolge unterschiedlicher Fahr- und Hub- bzw. Senkbewegungen definiert und

beginnt mit der Aufnahme einer neuen Hublast. Für die Mehrkörpersimulation ist es notwendig die entsprechenden Segmente gemäß den Parametern in Abbildung 5-7 vorzugeben. Da Antriebe auch eine von der Hublast abhängige Geschwindigkeit aufweisen können, ist es nötig auch die kinematischen Parameter für jedes Bewegungssegment zu überprüfen bzw. anzupassen. Mithilfe der kinematischen Parameter und den vorgegebenen Fahrwegen werden die Bahnkurven für die Bewegung des Krans berechnet und in der Co-Simulation an Simpack übergeben. Auf Basis dieser Daten wird die Bewegung des Krans simuliert. Ergebnis am Ende der Simulation ist die Zeit für die jeweilige Bewegungssequenz. Im letzten Schritt werden die Zeiten für die einzelnen Sequenzen zur Spielzeit für die betrachtete Kranaufgabe addiert. Dieses Vorgehen wird für jede vom Benutzer vorgegebene Kranaufgabe durchgeführt. So ist die Basis für die Berechnung der Arbeitskosten für den Kranbediener gelegt.

Zusammenfassend ist die Mehrkörpersimulation mit der gewählten Modellierung ein geeigneter Ansatz, die Spielzeiten von Krananlagen ermitteln zu können. Für die Parametrierung müssen Untersuchungen am realen Objekt durchgeführt werden, damit sich insbesondere die Dämpfungsparameter bei der Kranbewegung abschätzen lassen.

6 Ökobilanzierung

Zur Bewertung des ökologischen Profils eines Produkts hat sich die Ökobilanz als allgemein anerkanntes Werkzeug etabliert. Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst Aufbau und Vorgehensweise hinsichtlich der Anwendung auf Krane betrachtet. Als Ergebnis aus der Sachbilanz werden die relevanten Umweltwirkungen analysiert, die im weiteren Verlauf als Basisdaten für die Berechnung der Umweltkosten verwendet werden.

6.1 Ziel und Untersuchungsrahmen: Industriekrananlagen

Da das Vorgehen bei der Durchführung der Ökobilanz im Rahmen dieser Arbeit den Richtlinien [DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14040] folgt, werden zunächst die Ziele der Ökobilanz festgelegt und der Untersuchungsrahmen definiert. Hierfür wird auf die Empfehlungen in [Klö-2009] zurückgegriffen. In der Sachbilanzphase erfolgen die Beschreibung der Prozesse, die an dieser Stelle relevant sind und die Abbildung der Berechnungsmodelle zur Quantifizierung der In- und Outputströme für diese Prozesse. Die Wirkungsabschätzung zielt auf die Auswertung und Beschreibung der Ergebnisse in den betreffenden Wirkungskategorien.

6.1.1 Ziel der Ökobilanz

Ziel der Ökobilanz ist die Bereitstellung von Basisdaten für die Berechnung der Umweltfolgekosten auf dem Produktlebensweg einer Industriekrananlage. Hierzu werden die in Kapitel 4.1 beschriebenen Lebenswegabschnitte und die darin auftretenden Prozesse analysiert und geeignete Berechnungsmodelle abgeleitet. Die entsprechenden Wirkungskategorien werden bei der Definition des Untersuchungsrahmens festgelegt und orientieren sich dabei an der gängigen Praxis in dem Bereich der Integralistik. Die Ökobilanz soll den Vergleich der Umweltwirkungen unterschiedlicher Kranalternativen ermöglichen, die bei der Anschaffung in einem Betrieb infrage kommen.

6.1.2 Definition des Untersuchungsrahmens

Bei der Definition des Untersuchungsrahmens stehen vor allem die Festlegung der funktionellen Einheit, des Produktsystems und die Festlegung der Kategorien für die Wirkungsabschätzung im Vordergrund.

Die funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit wird im Rahmen dieser Arbeit auf den Kran an sich festgelegt. Die Kranbahn wird als ein Teil des Gebäudes angesehen und ist nach den Regelwerken des Eurocode 3 [DIN EN 1993-6] zu bemessen, wohingegen für den Kran die Regelwerke der DIN EN 13001 Gültigkeit besitzen. Somit ergibt sich die in Abbildung 6-1 dargestellte Festlegung der funktionellen Einheit für einen Kran.

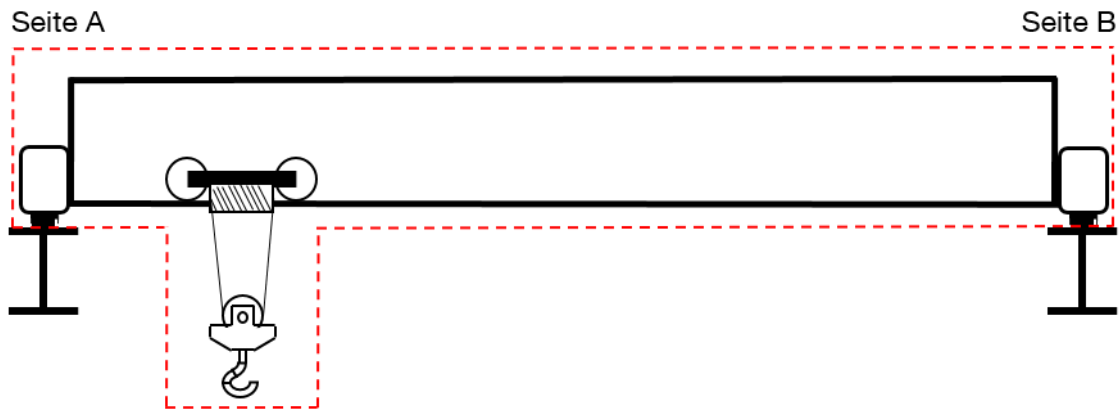


Abbildung 6-1 Definition der funktionellen Einheit Kran

Die betrachteten Hauptbaugruppen bei der Ökobilanzierung sind die beiden Kopfträger, die Kranbrücke bzw. das Portal bei Portalkranen und die Laufkatze. Da es sich beim Vergleich der Alternativen um Krane der gleichen Tragfähigkeit mit den gleichen Aufgaben handelt, die sich nur in den Antrieben unterscheiden, ist bei der Kranbahn kein gravierender Unterschied zu erwarten, weshalb diese Betrachtung ausgeschlossen wird.

Das Produktsystem

Da es sich bei der vorliegenden Untersuchung um einen Vergleich zwischen zwei Alternativen für einen Kran handelt, muss dieser Aspekt bei der Modellierung des Produktsystems Berücksichtigung finden. Diese Anforderung wird durch die Wahl eines modularen Ansatzes erfüllt, bei dem die betroffenen Komponenten in Abhängigkeit der gewählten Antriebsvariante ausgetauscht werden können. Damit ist es ausreichend ein grundlegendes Modell für das Produktsystem Industriekran zu erstellen und entsprechend der gewählten Antriebe nur einzelne Funktionsbausteine auszutauschen. In Abbildung 6-2 ist die Modellierung des Produktsystems Brückenkran mit den betrachteten Elementen dargestellt.

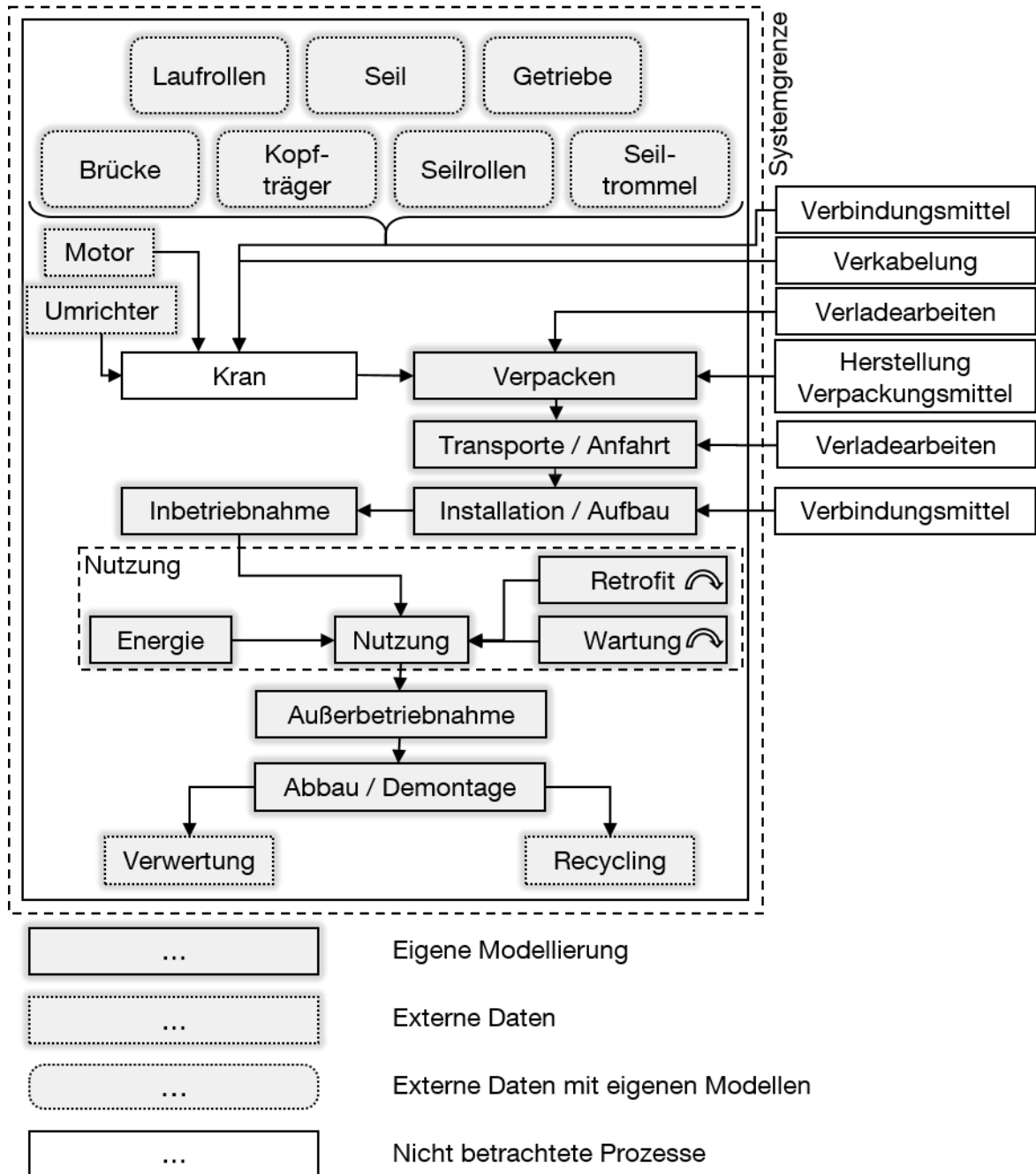


Abbildung 6-2: Produktsystem Brückenkran

Die Abbildung zeigt das gesamte Produktsystem des Brückenkrans mit den Komponenten Laufrollen, Seil, Brücke, Kopfträger, Seilrollen, Seiltrommel und dem Getriebe. Für diese Komponenten werden eigene Berechnungsmodelle auf Basis der Materialzusammensetzung erstellt, die Umweltwirkungen werden mithilfe dieser Modelle berechnet. Für die Motoren und mögliche Frequenzumrichter werden externe Daten aus Ökobilanzen für diese Komponenten verwendet. Im Folgenden werden die Modelle auf Basis externer Daten näher beschrieben. Abbildung 6-3 zeigt die betrachteten Prozesse zur Fertigung der Kranbrücke.

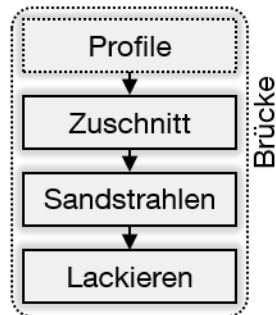


Abbildung 6-3: Produktsystem Brücke

Als Ausgangsbasis für dieses Modell wird ein entsprechendes Stahlprofil nach [DIN 1025-4] gewählt. Basisdaten für Betrachtung der Umweltwirkungen dieser Kategorie Träger können Ökobilanzen des Bauwesens [IBU-2018] bzw. entsprechenden Datenbanken entnommen werden. Hinsichtlich der Bearbeitung werden der Zuschnitt auf Basis der Geometrie des Trägers, das Sandstrahlen als Vorbereitung für die Lackierung und die Lackierung selbst berücksichtigt. Für das Sandstrahlen und das Lackieren dienen die Flächen des Trägers als Berechnungsgrundlage. Die Darstellung der Berechnungsgleichungen erfolgt im Rahmen der Sachbilanz in Abschnitt 6.2.2.

An der Kranbrücke wird an beiden Seiten jeweils ein Kopfträger als weitere Komponente montiert. Das zugehörige Produktsystem und die darin betrachteten Prozesse werden in Abbildung 6-4 gezeigt.

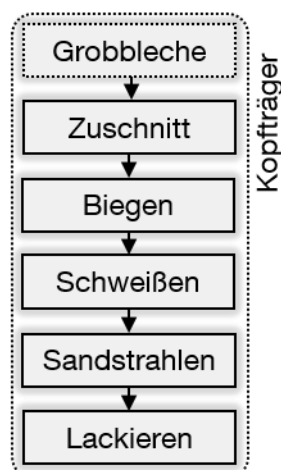


Abbildung 6-4: Produktsystem Kopfträger

Als Halbzeug wird für die Kopfträger Grobblech verwendet und die entsprechenden Basisdaten für die Umweltwirkungen aus der Datenbank der Software GABI entnommen. Die betrachteten Prozesse betreffen den Zuschnitt des Grobblechs auf Basis der Abmessungen des Kopfträgers, das Biegen und Verschweißen. Die Basisda-

ten zu diesen Prozessen werden ebenfalls aus der Datenbank der Software GABI entnommen. Gleiches gilt für das Sandstrahlen und Lackieren als letzte Prozesse zur Fertigung der Kopfträger. Montagearbeiten werden im Zuge der Ökobilanzierung nicht betrachtet.

Der Lasthaken wird auf Basis seiner Masse vereinfacht mit den Prozessen Bereitstellung des Stahls und Schmieden abgebildet (siehe Abbildung 6-5)

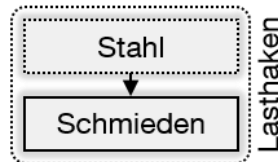


Abbildung 6-5: Produktsystem Lasthaken

Weitere Prozesse zur Herstellung des Lasthakens werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet. Da die Gesamtmasse des Hakens im Vergleich mit anderen Baugruppen des Krans (v.a. Brücke und Kopfträger) deutlich geringer ausfällt, liegt diese Betrachtung im Rahmen des Abschneide-Kriteriums. Ein ähnlicher Ansatz wird für das Hubseil verfolgt. Die zu Grunde liegenden Prozesse umfassen hier die Bereitstellung des Stahls für das Seil, wobei kein spezifischer Stahl Verwendung findet. Als Fertigungsprozess wird lediglich das Drahtziehen berücksichtigt (vgl. Abbildung 6-6)

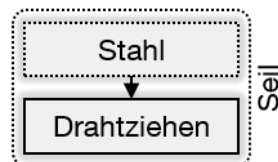


Abbildung 6-6: Produktsystem Seil

Zur Fertigung der verbauten Getriebe werden neben der Bereitstellung von Stahl als Grundwerkstoff die Prozesse Spanen und Gießen betrachtet (vgl. Abbildung 6-7).

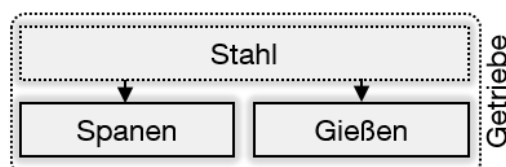


Abbildung 6-7: Produktsystem Getriebe

Im Unterschied zu den bisher beschriebenen Produktsystemen laufen die Prozesse nicht sequenziell nacheinander ab; vielmehr werden zwei unterschiedliche Material-

fraktionen betrachtet. Ein Teil der Gesamtmasse des Getriebes wird gemäß dieser Annahme für die spanende Fertigung (Zahnräder und Wellen) vorgesehen und der restliche Anteil des Materials für das Gießen des Gehäuses. Weitere Materialanteile werden nicht betrachtet. Die Gesamtmasse des Getriebes wird auf Basis der Übersetzung und entsprechender Katalogwerte auf Basis von Angaben aus Herstellerkatalogen abgeschätzt.

Hinsichtlich der Laufrollen für die Kranfahrwerke wird zunächst der Stahl als Grundwerkstoff bereitgestellt und daraus zunächst ein Rohling gegossen, welcher entsprechend der Endgeometrie spanend nachbearbeitet wird (siehe Abbildung 6-8).

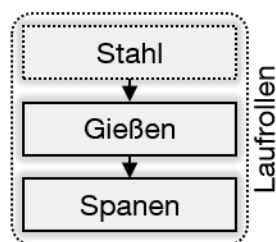


Abbildung 6-8: Produktsystem Laufrollen

Die Auswahl der Laufräder erfolgt auf Basis des Angebots des Kranherstellers. Bei den Seilrollen wird von geschmiedeten Rollen ausgegangen und das Schmieden als einziger Prozess abgebildet (siehe Abbildung 6-9).

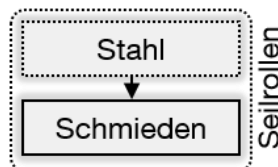


Abbildung 6-9: Produktsystem Seilrollen und Ausgleichrollen

Bei der Seiltrommel wird analog der meisten anderen seilführenden Komponenten vom Grundwerkstoff Stahl ausgegangen und die entsprechenden Bearbeitungsprozesse auf dieser Basis modelliert. In Abbildung 6-10 ist das Produktsystem der Seiltrommel dargestellt.

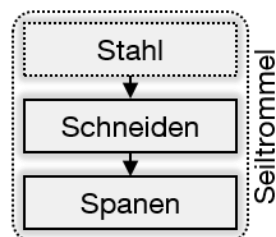


Abbildung 6-10: Produktsystem Seiltrommel

Abgebildet werden hinsichtlich der Fertigung nur die entsprechenden Schneidprozesse zur Herstellung der Einzelkomponenten für die Seiltrommel und die spanende Fertigung, die sich vor allem auf die Herstellung der Seilrillen auf der Trommel bezieht. Fügeoperationen wie das Verschweißen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Hinsichtlich der verbauten Motoren und optionaler Frequenzumrichter wird auf Ökobilanzen aus der Herstellerindustrie und Studienergebnisse, die als Basis zu Durchführungsverordnung im Rahmen der Ökobilanzierung dienen, zur Abschätzung der Umweltwirkungen zurückgegriffen. Eine detaillierte Betrachtung dieser Komponenten erfolgt nicht. Damit wird hinsichtlich der Herstellung auch nicht zwischen Motoren mit nur einer Geschwindigkeit und polumschaltbaren Maschinen unterschieden, es wird lediglich die Nennleistung als maßgeblichen Parameter berücksichtigt.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass das Produktsystem des Brückenkrans deutlich vereinfacht abgebildet wird. Damit orientiert sich die vorliegende Arbeit an der bisherigen und gängigen Praxis in ähnlichen Untersuchungen, wie sie auch in [Gün-2015a] und [Gün-2016b] vorzufinden ist und zudem bei der Bewertung von Energie-betriebenen-Produkten und Energieverbrauchsrelevanten Produkten eingesetzt wurde [Kem-2011a, Kem-2011b]

Festlegung der Systemgrenzen

Bei der Festlegung der Systemgrenze muss zwischen der zeitlichen, geografischen aber auch technischen Abgrenzung des Systems unterschieden werden [Klö-2009].

– Geografische Systemgrenze

Hinsichtlich geografischer Systemgrenzen ist zu beachten, ob das betrachtete Produkt speziell an einem Ort für einen bestimmten Zweck hergestellt wird oder ob es sich um ein Produkt handelt, das einer Gruppe von äquivalenten Produkten zugeordnet werden kann [Klö-2009]. Dieser Ansatz wird vor allem in der vorliegenden Arbeit für Energie und Halbzeuge wie Stahlbleche verwendet. Zudem muss hinsichtlich der geografischen Systemgrenze beachtet werden, dass bestimmte Lebensphasen bei Exportgütern in anderen Ländern mit bspw. anderen Gesetzesgrundlagen stattfinden. Im Rahmen der Arbeit wird von einer Herstellung und der Verwendung innerhalb Europas ausgegangen.

– Zeitliche Systemgrenze

Die Wahl der zeitlichen Systemgrenze adressiert vor allem die Fragestellung nach der Lebensdauer des Produkts. Diese Festlegung ist vor allem deshalb

entscheidend, weil die Modellierung weit in der Zukunft liegender Prozesse einer deutlich größeren Unsicherheit unterliegt, als gegenwärtige. Zum zweiten bedingen einige Wirkungskategorien wie der Treibhauseffekt einen Zeitbezug, welcher sich i.d.R. über den Bezugszeitraum von 100 Jahren erstreckt.

Für die Berechnungen in der vorliegenden Arbeit wird der Algorithmus auf eine Lebensdauer der Krananlage von 30 Jahren begrenzt. Hinsichtlich der Wahl der einzelnen Prozesse wird davon ausgegangen, dass es keine Änderungen an dieser Stelle gibt. Die Basisdaten für Energie oder Transporte werden hingegen – sofern es die Datenlage erlaubt – entsprechend angepasst. Einschränkend muss angemerkt werden, dass es über zukünftige politische Entscheidungen, welche bspw. neue Abgasemissionsstufen zur Folge haben, nicht berücksichtigt werden können.

– **Technische Systemgrenze**

Die Technische Systemgrenze wird insbesondere durch die geeignete Wahl von Abschneide-Regeln definiert. Sinnvolle Abschneide-Regeln sind im Rahmen einer Ökobilanzierung gewollt und notwendig, um nicht jeden geringfügigen Input mit sehr hohem Aufwand betrachten zu müssen. Als sinnvolle Abschneide-Regeln haben sich Anteile von einem Prozent an Masse, Energie und Umweltrelevanz in der Praxis etablieren können [Klö-2009]. Dieser Ansatz soll auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verfolgt werden und hat sich in [Gün-2015a] ebenfalls bewährt.

Als Systemgrenze wird im Rahmen der Ökobilanz eine Begrenzung gesehen, über welche die Inputs in das System wie Energie oder Rohstoffe aus der Umgebung entnommen und Outputs wie Abfälle und Emissionen an die Umgebung abgegeben werden [Klö-2009]. Im Rahmen der Arbeit wird der Kran an sich als Produktsystem festgelegt und die entsprechenden Inputs für Rohstoffe und Energie betrachtet.

Bewertung der Datengrundlage

Die Qualität der zur Verfügung stehenden Daten besitzt einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz. Diese Fragestellung bezieht sich zum einen auf die Verfügbarkeit entsprechender Datensätze für Prozesse, die bereits vorhanden sind oder eigens für die Bearbeitung erhoben werden müssen. Der Detaillierungsgrad der Datengrundlage entscheidet maßgeblich darüber, wie tief gehend die Ökobilanz durchgeführt werden kann. [Klö-2009]

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist die Qualität der Daten in unterschiedlicher Hinsicht zu beurteilen. Zum einen betrifft die Beurteilung die Vorgaben des Betreibers hinsichtlich der Aufgaben des Krans, mit deren Hilfe die Umweltwirkungen im Betrieb berechnet werden. An dieser Stelle liegen nur die Daten aus der Sicht des Betreibers vor, die direkt zum Vergleich der Alternativen herangezogen werden. Fehler, die hier gemacht werden, wirken sich auf das Ergebnis aller verglichenen Systeme aus, wobei die Fehler, die aus der Betrachtung resultieren in jeder Alternative Abweichungen zeigen können. Zum anderen ist das Ergebnis von der Qualität der Daten hinsichtlich der eingesetzten Prozesse auf dem Lebensweg des Krans und der eingesetzten Materialfraktionen abhängig.

Arten der Wirkungsabschätzung

In der Wirkungsabschätzung werden die in der Sachbilanz erhobenen Daten entsprechenden Kategorien, welche die Wirkungen auf die Umwelt beschreiben (z.B. Treibhauseffekt in Kohlenstoffdioxidäquivalenten) zugeordnet und zu Gesamtwerten mithilfe von Charakterisierungsfaktoren zusammengefasst. Charakterisierungsfaktoren drücken die Tatsache aus, dass nicht alle emittierten Stoffe dieselben Auswirkungen innerhalb einer Kategorie besitzen, so dass mithilfe der Charakterisierungsfaktoren eine einheitliche Bezugsgröße geschaffen werden kann. [Klö-2009]

Als Wirkungskategorien haben sich im Rahmen der Intralogistik [Gün-2015a, Gün-2016b] zur Beschreibung der Umweltauswirkungen folgende Indikatoren nach [DIN EN 15978] und [DIN EN 15804] als sinnvoll erwiesen:

Tabelle 6-1 Wirkungskategorien nach [DIN EN 15978, DIN EN 15804]

Indikator	Abkürzung	Einheit
Treibhauspotential	GWP	[kg CO ₂ -Äquivalent]
Potential zur Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	[kg FCKW-Äquivalent]
Potential zur Versauerung von Wasser und Boden	AP	[kg SO ₂ -Äquivalent]
Eutrophierungspotential	EP	[kg (PO ₄) ³⁻ -Äquivalent]
Potential zur Bildung von bodennahem Ozon	POCP	[kg Ethen-Äquivalent]
Abiotisches Ressourcenabbaupotential (für Elemente)	ADP - Elemente	[kg Sb-Äquivalent]
Abiotisches Ressourcenabbaupotential (für fossile Brennstoffe)	ADP - Brennstoffe	[MJ]

Zusätzlich zu diesen Wirkungsindikatoren werden in anderen Arbeiten noch weitere Indikatoren herangezogen (siehe hierzu [Sta-1998] in der Übersicht). Insgesamt besteht hinsichtlich der Wirkungskategorien Einigkeit bei der Berücksichtigung folgender Aspekte [Sta-1998]:

- Treibhauseffekt / Treibhauspotential
- Ozonabbau
- Versauerung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zunächst auf oben dargestellten Wirkungsindikatoren zurückgegriffen. Neben dem allgemeinen Konsens hinsichtlich der betrachtenswerten Indikatoren, der hinter einer anerkannten europäischen Norm vermutet werden darf, spricht auch die in [Gün-2016b] gezeigte Anwendbarkeit für die Auswahl dieser Kategorien. In [Gün-2015a] werden zwar weitere Kategorien für die ökologische Bewertung unterschiedlicher Antriebstechniken von Flurförderzeugen nach der CML-Methode genannt, allerdings bleibt die Quantifizierung auf das Treibhausgaspotential beschränkt. Eine ähnliche Herangehensweise wird in [Bru-2013] und [Jun-2011] gewählt und als maßgebliche Wirkungskategorie das Treibhausgasäquivalent herangezogen. In [Sch-1999] erfolgt eine Priorisierung der möglichen Wirkungsindikatoren hinsichtlich der ökologischen Gefährdung, wobei der Treibhauseffekt, Naturraumbeanspruchung und stratosphärischer Ozonabbau in die höchste Kategorie A eingeordnet werden.

Kritische Prüfung

Die kritische Prüfung im Rahmen der Ökobilanzierung adressiert vor allem die Fragestellungen, ob die Methoden den in den Normen [DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14040] vorgegebenen Ansätzen entsprechen und dabei auch als wissenschaftlich anerkannter Stand der Technik für die Ökobilanzierung anzusehen sind [Klö-2009]. Die zweite Komponente der kritischen Prüfung richtet sich an die Qualität der verwendeten Daten hinsichtlich der Zielstellungen. Schlussendlich muss auch der Bericht auf Transparenz und Nachvollziehbarkeit geprüft werden. Diese kritische Prüfung ist i.d.R. von einem externen Gutachter vorzunehmen und bei vergleichenden Ökobilanzen, die veröffentlicht werden sollen, vorgeschrieben [DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14040].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine für den Kranbetreiber interne Ökobilanzierung, welche die Kaufentscheidung bei der Investition in eine neue Krananlage unterstützen soll. Daher kann auf eine kritische Prüfung im Sinne der Normung verzichtet werden. Gleichwohl werden die Anforderungen, welche die

kritische Prüfung an die Durchführung der Ökobilanzierung richtet, bei der Ausführung berücksichtigt.

Allokationsverfahren bei Koppelprodukten

Koppelprodukte entstehen vor allem aus Prozessen, bei denen neben dem eigentlichen Hauptprodukt zusätzlich verwendbare Nebenprodukte entstehen. Die Fragestellung hierbei adressiert vor allem das Verfahren der Aufteilung der Outputs und die entsprechende Zuweisung zu den Produkten [Klö-2009]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit entstehen keine Koppelprodukte, die durch geeignete Allokationsverfahren berücksichtigt werden müssen.

6.2 Sachbilanz

In den folgenden Abschnitten wird auf die Modellierungsansätze für die Ökobilanzierung in den einzelnen Lebensphasen der Krananlage eingegangen. Der Produktlebenszyklus und die darin vorkommenden Prozesse und Elemente wurden bereits in Kapitel 4.1 dargestellt. In diesem Abschnitt werden darauf aufbauend Verfahren zur Berechnung und zur Abschätzung der Umweltwirkungen in den definierten Wirkungskategorien dargestellt. Die vorliegenden Ansätze werden auch in [fml-2016b] verwendet und haben sich als praktikabler Ansatz erwiesen.

6.2.1 Materialauswahl und -bereitstellung

Die Materialauswahl und -bereitstellung stellt die erste Lebensphase der Krananlage dar. Bei der Ökobilanzierung erfolgt hier die Bewertung des ökologischen Profils der eingesetzten Materialien und Werkstoffe. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Berechnung der Umweltwirkungen aus dieser Lebensphase nicht auf Basis einer exakten Modellierung der Prozesse, die hinter der Materialbereitstellung stehen, vielmehr werden hierzu Daten aus vorgefertigten Ökobilanzen und Datenbanken in Anspruch genommen. Bei der Beschreibung des Produktsystems in Abschnitt 6.1.2 wurde diese Phase entsprechend als externe Daten modelliert. Basisdaten für die Betrachtung sind die entsprechenden Massenanteile für die eingesetzten Werkstoff-Fractionen bzw. Zulieferteile. Auf die Modellierung der maßgeblichen Baugruppen für einen Brückenkran wird im Folgenden genauer eingegangen. Die Daten basieren auf im Wesentlichen auf elementar-geometrischen Beziehungen.

Kranbrücke / Hauptträger

Als Basisdaten für die Kranbrücken werden Profile nach [DIN 1025-4] hinterlegt und die Umweltwirkungen auf Basis der in der Software GABI hinterlegten Datenbank

verwendet. Die Berechnung vollzieht sich auf Basis der Spannweite des Krans und der Masse des verwendeten Profils nach Gleichung (6-1).

$$m_{Br} = m'_{profil} \cdot l_{Br} \quad (6-1)$$

Darin bezeichnen m_{Br} die Gesamtmasse des unlackierten Kranträgers, m'_{profil} die längenbezogene Masse des verwendeten Stahlprofils und l_{Br} die Spannweite der Kranbrücke. Die verwendeten Grundäquivalente für die Wirkungskategorien werden in Abschnitt B.1.1 dargestellt.

Kopfträger

Der Kopfträger verwendet als Halbzeug eine Stahlplatte, welche zu einem rechteckigen, hohlen Quader gebogen wird. Als Bezugsgröße für die Bereitstellung einer Stahlplatte als Halbzeug wird die entsprechende Masse verwendet, welche nach Gleichung (6-2) berechnet wird.

$$m_{KT} = l_{KT} \cdot 2 \cdot (h_{KT} + b_{KT}) \cdot d_{KT} \cdot \rho_{Stahl} \cdot 1,05 \quad (6-2)$$

Darin bezeichnen l_{KT} die Länge des Kopfträgers, h_{KT} seine Höhe, b_{KT} die entsprechende Breite und d_{KT} die verwendete Blechstärke. Mithilfe der Werkstoffdichte von Stahl ρ_{Stahl} wird die Masse des verwendeten Blechs abgeschätzt. Mithilfe des konstanten Faktors 1,05 wird ein Ausschuss von 5 % für die vorliegende Arbeit festgelegt.

Motoren und Frequenzumrichter

Hinsichtlich der Motoren und der möglichen Frequenzumrichter für die Fahrtriebe und das Hubwerk müssen deutliche Abstraktionen durchgeführt werden. Diese Herangehensweise ist vor allem dann anzuwenden, wenn keine Primärdaten oder generischen Daten für die vorhandene Fragestellung existieren. Allerdings sind für Motoren und Umrichter Ökobilanzen verfügbar, deren Daten im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet werden können. Hinsichtlich der Motoren wird auf die Daten aus [Alm-2008] zurückgegriffen, welche im Rahmen einer Vorstudie zum Energiebetriebe-Produkte-Gesetze („Ökodesign-Richtlinie“) erzielt wurden. Darin werden für unterschiedliche Motorbaugrößen mit Nennleistungen von 1,1 kW bis 110 kW vereinfachte Ökobilanzen erstellt. Einschränkend gilt, dass sich diese Ökobilanzen nur auf eintourige Motoren beziehen, sodass die Verwendung im Rahmen dieser Arbeit für polumschaltbare Maschinen lediglich eine Abschätzung darstellt. Zudem wird nur eine eingeschränkte Auswahl an Materialien und Basisdaten für den Aufbau der Motoren verwendet:

- Stahl (Elektrostahl und Stahl)
- Gusseisen
- Aluminium
- Kupfer
- Energieaufwand für die Fertigung

Da der Energieaufwand für die Fertigung bereits an dieser Stelle verbucht wird, ist eine zusätzliche Betrachtung im Rahmen der Fertigungsprozesse in Abschnitt 6.2.2 nicht mehr notwendig. Zwischen den einzelnen Leistungen, die gemäß [Alm-2008] abgedeckt werden, werden die Daten auf Basis der Nennleistung linear interpoliert.

Bei den Frequenzumrichter wird analog zu den Motoren auf externe Ökobilanzen als Ausgangsbasis zurückgegriffen und die Daten auf Basis der installierten Leistungen abgeschätzt. Hierzu werden herstellerseitig entwickelte Umweltdeklarationen (EPDs = Environmental Product Declarations) [ABB-2002a, ABB-2002b, ABB-2004] verwendet und folgende Werkstoffe im Rahmen der Materialauswahl und der Fertigung betrachtet:

- Stahl (Elektrostahl und Stahl)
- Gusseisen
- Aluminium
- Kupfer
- Energieaufwand für die Fertigung.

Zusammenfassend wird angemerkt, dass bei der ökobilanziellen Betrachtung von Motoren und Umrichtern hinsichtlich der Verfügbarkeit und der Genauigkeit von Daten größere Abstraktionen vorzunehmen sind, als es bspw. für den Kranträger notwendig ist. Da die genannten Komponenten aber nur eine sehr kleine Fraktion der Gesamtmasse bilden, ist der zu erwartende Fehler in einem akzeptablen Bereich.

Getriebe

Die Materialauswahl für das Getriebe beschränkt sich insgesamt auf Stahl. Weitere Werkstoffe werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Die Masse des Getriebes wird mithilfe der benötigten Übersetzung und Katalogwerten von Herstellern von Planeten- oder Stirnradgetrieben abgeschätzt. Die benötigte Übersetzung wird auf Basis der Geschwindigkeiten für das Heben der Last, das Kran- und das Katzfahren und der Nenndrehzahl des Antriebsmotors berechnet und daraus aus einem entsprechenden Katalog ([Bon-2017, DEM-2017a] für mehrstufige Planeten oder Stirnradgetriebe die Masse des Getriebes approximiert. Mithilfe dieser Daten wird die Ge-

samtmasse des Getriebes abgeschätzt und bildet damit die Basis für die massebezogene Betrachtung der nachgelagerten Fertigungsprozesse.

Seil

Das Seil wird als Stahlseil angenommen und die entsprechende Masse auf Basis des Durchmessers berechnet. Hierzu wird die entsprechende längenbezogene Masse des Seils nach [DIN EN 12385-4] in Abhängigkeit von der Stahldicke ausgewählt und die Seillänge nach Gleichung (6-3) berechnet, wobei die Seilreserve l_{Res} nach Gleichung (6-4) bestimmt wird.

$$m_S = (h_{hub,max} \cdot n_{S,tot} + l_{Res}) \cdot m'_{Seil} \quad (6-3)$$

$$l_{Res} = 2 \cdot D_{Tr} \cdot \pi \quad (6-4)$$

Darin bezeichnen $h_{hub,max}$ die maximale Hubhöhe, $n_{S,tot}$ die Anzahl tragenden Seilstränge und m'_{Seil} die längenbezogene Masse des Seils. l_{Res} bezeichnet die Seilreserve, die mit zwei Windungen angenommen wird.

Lasthaken

Zur Herstellung des Lasthakens wird als Grundwerkstoff Stahl verwendet und die entsprechende Masse direkt aus dem Datenblatt des Hakens entnommen. Für den vorliegenden Fall wird von einem Einfachhaken nach [DIN 15401] ausgegangen und die darin enthaltenen Massen zur Berechnung des Werkstoffeinsatzes berechnet.

Seil- und Ausgleichsrollen

Eingangsparameter für die Abschätzung der Umweltwirkungen aus der Werkstoffbereitstellung des Stahls für die Seil- und Ausgleichsrollen sind die Massen der betreffenden Rollen. Die Bestimmung der Masse erfolgt auf Basis des Durchmessers, welcher mithilfe von [DIN 15020] nach Gleichung (6-5) abgeschätzt wird. Alternativ können auch Daten des Kranherstellers direkt verwendet werden, falls diese im Rahmen der Angebotseinholung vorliegen.

$$D_{min} = h_1 \cdot h_2 \cdot d_{Seil} \quad (6-5)$$

Darin bezeichnen h_1 und h_2 Beiwerte für die Berechnung nach [DIN 15020] und d_{Seil} den Durchmesser des Hubseils. Mithilfe von Herstellerdatenblättern, wie sie etwa in [Bur-2012] zu finden sind, kann die benötigte Masse abgeschätzt werden.

Seiltrommel

Basis für die Ermittlung der Umweltwirkungen ist die Masse der Seiltrommel, die mithilfe der Abmessungen ermittelt wird. Dabei wird angenommen, dass die Trommel aus einer Trommelhülle in Form eines Rohrs jeweils aus einer Endscheibe am Ende der Trommel und insgesamt vier umlaufenden Versteifungen im Inneren der Trommel besteht. Die Berechnung der Gesamtmasse wird in Gleichung (6-6) gezeigt.

$$m_{Tr} = (m_{Versteifungen} + m_{Deckel} + m_{Trm}) \cdot 1,05 \quad (6-6)$$

Diese einzelnen Komponenten der Seiltrommel werden auf Basis ihrer Geometrie berücksichtigt und die entsprechenden Massen mit der Werkstoffdichte von Stahl berechnet. Auf eine ausführliche Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet, da es sich bei den Gleichungen um elementargeometrische Formulierungen handelt.

Laufträder

Die Betrachtung der Werkstoffbereitstellung für die Laufträder richtet sich nach deren Gesamtmasse, welche aus Stahl gefertigt werden. Dabei werden für die Katze vier Laufträder zu Grunde gelegt und für die Kranfahrwerke die Anzahl als Benutzereingabe mit dem Parameter $n_{LR,Brücke}$ ermittelt. Die Berechnung der Gesamtmasse richtet sich nach Gleichung (6-7).

$$m_{LR} = (2 \cdot n_{LR,Brücke} \cdot m_{LR,Brücke} + 4 \cdot m_{LR,Katze}) \cdot 1,05 \quad (6-7)$$

Darin bezeichnen $m_{LR,Brücke}$ die Masse eines Lauftrades für die Kranbrücke und $m_{LR,Katze}$ die Masse eines Katzlauftrades. Durch den Faktor 1,05 wird ein Verlust von 5 % Material für die spanende Fertigung bereits an dieser Stelle berücksichtigt. Die Daten für die Massen der Laufträder in Abhängigkeit der Durchmesser und des konstruktiven Aufbaus (mit oder ohne Spurkränze) können den entsprechenden Katalogen der Herstellerindustrie (vgl. [DEM-2016c]) entnommen werden.

6.2.2 Fertigung

In den folgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Fertigungsschritte für die Kran-komponenten auf Basis der ausgewählten Halbzeuge und Werkstoffe eingegangen. Die verwendeten Prozesse beziehen sich auf die in der Software GaBi hinterlegten Fertigungsverfahren, die als Eingangsdaten gewöhnlich die Masse oder die Abmessungen des zu fertigenden Bauteils anwenden. Die entsprechenden Grundäquivalente zur Berechnung der Umweltwirkungen bzw. der Wirkungsindikatoren werden jeweils im Anhang B.1.2 dargestellt.

Kranbrücke / Hauptträger

Da davon ausgegangen wird, dass der Brückenträger als Halbzeug auf das exakte Maß zugeschnitten werden muss, wird hierzu als erster Fertigungsschritt ein Laserschneidprozess angesetzt, welcher den Träger auf die benötigte Länge einkürzt und die Umweltwirkungen auf Basis der Schneidlänge berechnet (vgl. Gleichung (6-8))

$$l_{LS} = 2 \cdot (2 \cdot B_{\text{Profil}} + H_{\text{Profil}}) \quad (6-8)$$

In dieser Gleichung bezeichnen l_{LS} die gesamte Länge des Schneidprozesses, B_{Profil} die Breite der Gurte und H_{Profil} die Höhe des Steges. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Träger an beiden Enden zugeschnitten wird. Die verwendeten, längenbezogenen Äquivalente für das Laserschneiden sind in Kapitel B.1.2 dargestellt. Der Kranträger wird nach dem Ablängen als Vorbereitung für die Lackierung sandgestrahlt. Hinsichtlich des Sandstrahlens wird die Fläche des Trägers als Bezugsgröße verwendet, welche nach Gleichung (6-9) berechnet wird.

$$A_{\text{Profil}} = 4 \cdot B_{\text{Profil}} \cdot l_{Br} + 2 \cdot H_{\text{Profil}} \cdot l_{Br} \quad (6-9)$$

Die Stirnseiten des Trägers werden in dieser Berechnung vernachlässigt, wobei dieses Vorgehen im Rahmen des Abschneide-Kriteriums anwendbar ist. Für die Lackierung wird analog die Oberfläche des Trägers herangezogen und der Lackbedarf nach Gleichung (6-10) berechnet.

$$m_L = A_{\text{Profil}} \cdot d_L \cdot \rho_L \quad (6-10)$$

In (6-10) bezeichnen m_L die Massen des verwendeten Lacks, d_L die aufgetragene Lackdicke und ρ_L die Dichte des verwendeten Lacks. In Anlehnung an die [DIN EN ISO 12944-5] wird die Schichtdicke mit $d_L = 375 \mu\text{m}$ angenommen und die Dichte des Lacks mit $\rho_L = 1030 \text{ kg/m}^3$. Die Grundäquivalente für das Sandstrahlen und das Lackieren sind im Anhang B.1.2 dargestellt.

Kopfträger

Bei den Kopfträgern werden als Herstellungsprozesse das Laserschneiden auf Basis der Schnittlänge, das Biegen der Grundform, das Verschweißen, das Sandstrahlen und das finale Lackieren berücksichtigt. Die Schnittlänge $l_{LS,Kt}$ für das Laserschneiden wird nach Gleichung (6-11) approximiert.

$$l_{LS,Kt} = 2 \cdot (4 \cdot b_{Kt} + 4 \cdot h_{Kt} + 2 \cdot l_{Kt}) + 4 \cdot 0,1 \text{ m} \cdot \pi \quad (6-11)$$

Darin bezeichnen b_{Kt} die Breite, h_{Kt} die Höhe und l_{Kt} die Länge des fertig montierten Kopfträgers. Zusätzlich werden zur Unterbringung der Antriebe insgesamt vier kreisförmige Ausschnitte mit einem Durchmesser von 0,1 m vorgesehen und in der Gesamtschnittlänge berücksichtigt. Neben dem Zuschneiden wird das Verschweißen zu einem vollständigen Kasten auf Basis der Länge l_{Kt} der Kopfträger berücksichtigt. Für das Sandstrahlen wird die Oberfläche der Kopfträger als Ausgangsbasis verwendet. Diese Berechnung wird in Gleichung (6-12) gezeigt.

$$A_{Kt} = 2 \cdot (2 \cdot l_{Kt} \cdot h_{Kt} + 2 \cdot l_{Kt} \cdot b_{Kt}) \quad (6-12)$$

Die Oberfläche der Kopfträger wird auch als Ausgangsbasis für die Betrachtung des Lackierprozesses verwendet. Hinsichtlich der Lackierung gelten dieselben Randbedingungen, wie sie bei der Herstellung der Kranbrücke beschrieben wurden. Die Berechnung der verwendeten Lackmasse wird in Gleichung (6-13) dargestellt.

$$m_{L,Kt} = A_{Kt} \cdot d_{Lack} \cdot \rho_{Lack} \quad (6-13)$$

Die vorgestellten Prozesse beschreiben die Fertigung des Kopfträgers in vereinfachter Form. So wird beispielsweise das Anfertigen von Bohrungen zum Verschrauben der Brücke und der Antriebe aus der Betrachtung ausgeklammert. Die Berechnungen der Oberflächen und der Schnittlängen stellen jeweils nur eine Approximation dar.

Getriebe

Hinsichtlich der Getriebe für das Hubwerk und die Fahrwerke des Krans erfolgt die Approximation der Umweltwirkungen aus der Fertigung auf Basis eines Gieß und eines spannenden Fertigungsprozesses. Dabei wird angenommen, dass zunächst auf Basis der Gesamtmasse des Getriebes ein Gießprozess zur Anwendung kommt und darauffolgend ein spanender Fertigungsprozess anschließt, der sich nur auf 30 % der Gesamtmasse bezieht. Mit diesem spanenden Prozess soll vor allem die Fertigung der Getriebewellen, Verzahnung und die Nachbearbeitung abgebildet werden.

Seil

Zur Herstellung des Seils wird der Prozess Drahtziehen verwendet. Das Flechten des Seils wird an dieser Stelle vernachlässigt. Für das Drahtziehen wird die in Abschnitt 6.2.1 ermittelte Masse des Seils herangezogen.

Lasthaken

Zur Herstellung des Lasthakens wird lediglich der Prozess des Gesenkschmiedens berücksichtigt und dabei die Masse des geschmiedeten Hakens als direkte Eingangsgröße herangezogen.

Seilrollen und Ausgleichsrollen

Als Fertigungsprozess wird bei der Herstellung von Seil- und Ausgleichsrollen das Gesenkschmieden berücksichtigt. Dieser Prozess wird analog zum Lasthaken auf Basis der Masse aller verbauten Rollen betrachtet.

Seiltrommel

Zur Fertigung der Seiltrommel werden ein Schneidprozess, mit dem die benötigten Einzelbauteile ausgeschnitten werden, und die spanende Fertigung herangezogen. Der Schneidprozess wird auf Basis der Schnittlänge der Geometrie abgebildet, während für die spanende Fertigung die Masse der Seiltrommel herangezogen wird, welche bereits in Abschnitt 6.2.1 berechnet wurde.

Laufrollen

Neben dem Gießen des Laufradrohlings wird die spanende Fertigung als zweiter Prozess zur Herstellung der Laufrollen herangezogen. Beide Prozesse basieren auf der Masse des verwendeten Werkstoffs.

Zusammenfassend wird angemerkt, dass die getroffenen Annahmen zwar eine deutliche Abstraktion der Lebensphasen Materialauswahl und -bereitstellung sowie der Fertigung darstellen, aber sehr vergleichbar mit anderen Arbeiten auf diesem Gebiet sind (vgl. [Jun-2011, Gün-2015a, Gün-2016b]). Vor diesem Hintergrund erscheint auch die praktizierte Herangehensweise für Industriekrane in dieser Arbeit sinnvoll zu sein, vor allem wenn zu Grunde gelegt wird, dass diese beiden Lebensphasen für einen als europäisches Mittel geltenden Kran im Vergleich zur Nutzungsphase nur einen kleinen Teil der Umweltwirkungen ausmachen [Bru-2013].

6.2.3 Transport, Montage und Aufbau

Für den Transport des Krans, die Montage und den Aufbau beim Betreiber werden die Prozesse betrachtet, welche mit zusätzlichen Maschinen wie Flurförderzeuge oder Mobilkrane durchgeführt werden. Dieses Verfahren hat sich bereits in [Gün-2016b] bewährt. Für die Berechnung der Umweltwirkungen als Basis für die Kostenbetrachtung werden anerkannte Berechnungsmodelle verwendet oder eigene Modelle zur Abschätzung entwickelt. Das Portfolio der untersuchten Geräte erstreckt sich dabei von reinen Transportmitteln für Güter oder Personen (LKW, PKW und LNF)

über Flurförderzeuge und Hebebühnen und Mobilkrane. Fallen für die Anfahrt dieser Maschinen an den Aufbauort zusätzlich Aufwände an, so werden diese im Berechnungsmodell berücksichtigt. Die Fertigung, Transporte und auch die restlichen Lebensphasen bleiben bei diesen Montagehilfsmitteln gemäß des aktuellen Standes der Technik [Klö-2009] unberücksichtigt. Im Fokus der vorgestellten Berechnungsmodelle steht bei elektrisch betriebenen Maschinen die Ermittlung der Energiebedarfe. Auf Basis dieser Energiebedarfe werden die weiteren Umweltwirkungen mithilfe entsprechender Einheitswerte abgeleitet. Bei dieselmotorisch betriebenen Maschinen entfallen für die Nutzung zum einen Emissionen durch den Verbrennungsprozess selbst, als auch aus der Bereitstellung des Dieselkraftstoffs. Hinsichtlich der Verbrennung wird von folgender Abgaszusammensetzung ausgegangen [Eck-2014].

– Kohlenstoffdioxid	CO ₂
– Stickstoff	N ₂
– Sauerstoff	O ₂
– Wasser	H ₂ O
– Schwefeldioxid	SO ₂
– Rußpartikel	PM
– Kohlenwasserstoffe	HC
– Kohlenstoffmonoxid	CO
– Stickoxide	NO _x

Die Emissionen für die Bereitstellung des Dieselkraftstoffs werden analog zu [Gün-2016b] verwendet. Diese Herangehensweise wird für dieselbetriebene Flurförderzeuge und Mobilkrane zusammen mit dem TREMOD-MM Berechnungsverfahren nach [Lam-2004, Hel-2009] bzw. des äquivalenten Tier 3-Berechnungsansatzes der Europäischen Umweltagentur EEA [Eur-2016] verwendet. Für Transporte mit LKWs, LNFs und PKWs können sehr ähnliche Berechnungsverfahren angewendet werden, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Hebebühne

In Gleichung (6-14) ist die Berechnung des Energiebedarfs einer elektrisch betriebenen Hebebühne, welche über einen elektrischen Fahr- und Hubantrieb verfügt, zur Montage des Krans auf Basis einer zustandsbasierten Modellierung dargestellt.

$$E_{HB} = P_{HB} \cdot t_{HB} \quad (6-14)$$

Darin bezeichnen E_{HB} den Energiebedarf für den Zeitraum des Betriebs, t_{HBh} die Betriebszeit und P_{HBh} die zugehörige Leistung. Für diese Leistung wird analog zu [Bru-2013, Gün-2016b] die Nennleistung verwendet. Bei dieser Annahme handelt es sich um eine Vereinfachung, da für das Heben und Senken unterschiedliche Leistungen abgerufen werden. Da die Einschaltzeit insgesamt als sehr kurz eingeschätzt wird, wird von einem geringen Fehler ausgegangen, der für alle untersuchten Kranvarianten gleich groß ist.

Mobilkrane

Für den Hub der Krananlage auf die Kranbahn kann neben einem Stapler auch ein Mobilkran verwendet werden. Insbesondere für den Einsatz in Hallen eignen sich hierfür entsprechende Kompakt- oder City-Kran-Modelle mit der passenden Montagespitze. Bei diesen Kranen handelt es sich im Wesentlichen um All-Terrain-Krane mit nur einer Kabine, aus der sowohl der Kran als auch das Fahren des Krans gesteuert werden. Die Tragfähigkeit dieser Krane bleibt dabei im Bereich unter 100 t, sodass für die Modellierung des Emissionsverhaltens von einem Ein-Motoren-Kran ausgegangen werden kann, wobei sich die abgerufenen Leistungen für den Kranbetrieb und den Fahrbetrieb sehr deutlich unterscheiden. Dies bedingt, dass im Berechnungsmodell TREMOD-MM in Gleichung (6-15) beide Betriebsmodi implementiert werden müssen.

$$EM_{MK} = P_{FW} \cdot t_{FW} \cdot LF_{FW} \cdot EF_{FW} + P_{OW} \cdot t_{OW} \cdot LF_{OW} \cdot EF_{OW} \quad (6-15)$$

Die Gesamtemissionen EM_{MK} im Betrieb bei einem Mobilkran ergeben sich damit aus den Nennleistungen der Motoren für das Fahrgestell P_{FW} und den Oberwagen P_{OW}, den jeweiligen Einschaltzeiten der Motoren t_{FW} und t_{OW} , den Lastfaktoren LF_{FW} und LF_{OW} , die die tatsächlich abgerufene Leistung im Verhältnis zur installierten Motorleistung setzt und den Emissionsfaktoren EF_{FW} und EF_{OW} . Diese Faktoren können für die relevanten Umweltwirkungen dem Berechnungshandbuch der Europäischen Umweltagentur EEA [Eur-2016] entnommen werden.

Lastkraftwagen (LKW), Personenkraftwagen (PKW) und Leichte Nutzfahrzeuge (LNF)

Zur Berücksichtigung der Emissionen aus Transporten mit unterschiedlichen Fahrzeugen (FZG) der Kategorie i (Lastkraftwagen (LKW), Personenkraftwagen (PKW) Transportern / leichten Nutzfahrzeugen (LNF)) wird die zurückgelegte Entfernung $E_{FZG,i}$ und ein für die Fahrzeugkategorie zutreffender Emissionsfaktor $EF_{FZG,i}$ zugrunde gelegt und für jeden einzelnen Transport die Emissionen nach Gleichung (6-16) berechnet.

$$EM_{FZG,i} = E_{FZG,i} \cdot EF_{FZG,i} \quad (6-16)$$

Die Berechnung dieser Transport-bedingten Emissionen richtet sich dabei nach den Vorgaben der Europäischen Umweltagentur EEA, wobei die Methode Tier 2 an dieser Stelle angewendet wird [Eur-2016]. Diese Methode unterscheidet zum einen die Fahrzeugkategorie, den verwendeten Kraftstoff und die Abgasemissionseinstufung des betreffenden Fahrzeugs. Bei schweren (LKW) wird zusätzlich eine Unterscheidung bezüglich des zulässigen Gesamtgewichts des Fahrzeugs vorgenommen. Tabelle 6-2 zeigt eine Übersicht der in dieser Arbeit berücksichtigten Fahrzeugkategorien und Einstufungen.

Tabelle 6-2: Berücksichtigte Fahrzeugkategorien für Transporte [Eur-2016]

Kategorie i	Ausführung	Emissionseinstufungen
PKW	Mittelklassefahrzeuge	EURO 1
		EURO 2
		EURO 3
		EURO 4
		EURO 5
		EURO 6 vor 2017
		EURO 6 2017 bis 2019
LNF	Diesel	EURO 6 ab 2020
		EURO 1
		EURO 2
		EURO 3
		EURO 4
		EURO 5
		EURO 6 vor 2017
EURO 6 2017 bis 2019		
LKW	Diesel	EURO 6 ab 2020
		EURO I
		EURO II
		EURO III
		EURO IV
LKW	Diesel	EURO V
		EURO VI
		Diesel =< 7,5 t
		Diesel 7,5 t – 16 t
LKW	Diesel	Diesel 7,5 t – 32 t
		Diesel >= 32t

Die vorgestellte Einteilung wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet und versucht die große Bandbreite in den benötigten Transportfahrzeugen zusammenzufassen und auf eine handhabbare und mit nur wenigen Datensätzen ausführbare Methode zu

kondensieren. Dieser entfernungsbasierte Ansatz berücksichtigt damit nicht im Detail die Auslastung des Fahrzeugs, welches bspw. den Kran anliefert, sondern gibt einen für europäische Verhältnisse gültigen Mittelwert wieder. Im Bereich PKW werden neben Diesel- auch Benzin-betriebene Fahrzeuge berücksichtigt, wohingegen im Nutzfahrzeugsektor im Rahmen dieser Arbeit lediglich Dieselfahrzeuge als Berechnungsgrundlage zur Verfügung gestellt werden.

Flurförderzeuge

Flurförderzeuge können einerseits elektromotorisch und andererseits verbrennungsmotorisch betrieben werden. Für elektrisch betriebene Flurförderzeuge werden in [Gün-2015a] und [Bru-2013, Bru-2016] Ansätze zur Abschätzung der Umweltwirkungen im Betrieb vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf vereinfachte Modelle zur Berechnung des Energiebedarfs und damit der wesentlichen Umweltwirkungen im Betrieb zurückgegriffen. Für elektrisch betriebene Flurförderzeuge wird auf die Angaben in den Datenblättern gemäß [VDI 2198] verwiesen.

Verbrennungsmotorisch betriebene Flurförderzeuge können der Kategorie mobile Maschinen und Geräte zugeordnet werden, für die das Modell TREMOD-MM zur Berechnung der Schadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs während des Betriebes entwickelt wurde, bzw. nach dem Handbuch der Europäischen Umweltagentur zur Berechnung von Luftschadstoffen [Eur-2016] nach dem Tier 3-Ansatz, der auf dem gleichen Berechnungsansatz beruht. Gleichung (6-17) zeigt die Berechnung der Emissionen auf Basis des genannten Modells nach [Lam-2004, Hel-2009, Eur-2016].

$$EM_{FFZ} = P_{FFZf} \cdot t_{FFZf} \cdot LF_{FFZf} \cdot EF_{FFZf} + P_{FFZh} \cdot t_{FFZh} \cdot LF_{FFZh} \cdot EF_{FFZh} \quad (6-17)$$

Die in Gleichung (6-17) dargestellten Faktoren entsprechen den Faktoren für den Mobilkran und sind auf Flurförderzeuge bezogen. Deshalb wird zwischen Fahren (Index FFZf) und Hubbetrieb (Index FFZh) unterschieden und damit den unterschiedlichen Leistungsanforderungen Genüge geleistet. Die Basisemissionsfaktoren werden dabei aus dem Handbuch der europäischen Umweltagentur entnommen [Eur-2016].

Stehen Daten zu Flurförderzeugen gemäß der VDI-Richtlinien 2198 [VDI 2198] für den Energiebedarf nach dem darin genormten Fahrzyklus zur Verfügung, können auch für verbrennungsmotorisch betriebene Flurförderzeuge diese Daten direkt verwendet werden.

Verpackung

Als Verpackungsmaterialien werden Kunststoffolie und Holz berücksichtigt und dabei das Volumen der verpackten Kranteile als Berechnungsgrundlage herangezogen.

Dies betrifft die Kranbrücke, welche in Folie gewickelt und in einer Holzkiste verpackt wird, die Kopfträger und das Hebezeug, die ebenfalls in einer Holzkiste verpackt werden sowie eine weitere Holzkiste für diverse Kleinteile mit dem Volumen von 1 m³.

6.2.4 Nutzung

Da die Nutzungsphase hinsichtlich der Höhe der Umweltaspekte für einen repräsentativen, mittleren Kran die maßgebliche Lebensphase darstellt [Sch-2012a] bzw. [Bru-2013], gilt der Modellierung der hier auftretenden Umweltwirkungen ein besonderes Augenmerk. Die Basis hierfür stellt die Berechnung des Energiebedarfs für die Nutzung des Krans dar. Hierfür haben sich unterschiedliche Werkzeuge etablieren können, die in Kapitel 3.3.2 gegenübergestellt und bewertet werden. Als ausgewähltes Verfahren wird auf die numerische Simulation mithilfe von MATLAB-Simulink zurückgegriffen, das bereits in [Bru-2013] erfolgreich eingesetzt wurde und für diese Arbeit hinsichtlich der Abbildung des Anlaufverhaltens auf das Sieben-Phasen-Anlaufmodell angepasst wird. Das entsprechende Vorgehensmodell zur simulativen Berechnung des Energiebedarfs wird in Abbildung 6-11 dargestellt. Für eine detailliertere Erläuterung wird an dieser Stelle auf [Amb-2012, Bru-2013] verwiesen.



Abbildung 6-11: Vorgehensweise Berechnungsmodell für die Umweltwirkungen in der Nutzung

Der Energiebedarf des Krans setzt sich aus einer optionalen Grundlast E_{GL} und einer auf Basis der einzelnen Kranaufgaben bzw. der darin enthaltenen Bewegung entlang der Verfahrsachsen ermittelten aufgabenspezifischen Energiebedarfs nach Gleichung (6-18) zusammen.

$$E_{Kran} = E_{GL} + \sum_i E_{HW,i} + E_{Brücke,i} + E_{Katze,i} - E_{RS,i} \quad (6-18)$$

Darin bezeichnet $E_{HW,i}$ den Energiebedarf des Hubwerks, $E_{HW,i}$ den Energiebedarf für das Kranfahren, $E_{HW,i}$ den Bedarf für das Verfahren der Krankatze und $E_{HW,i}$ die rückgespeiste Energie während des Lastsenkens für die Kranaufgabe i .

Der Energiebedarf des Hubwerks E_{HW} berechnet sich für den Hubbetrieb nach Gleichung (6-18) aus der Integration der Leistung für den stationären Hubbetrieb und aus der Energie für während des Anfahrens $E_{HW,A}$.

$$E_{HW} = E_{HW,A} + \int_t P_{HW} dt \quad (6-19)$$

Die Berechnung der benötigten Leistung des Hubwerkmotors für den stationären Hubbetrieb P_{HW} erfolgt nach Gleichung (6-20) unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades des Getriebes η_G zwischen Seiltrommel und Motor und dem Wirkungsgrad des Motors η_{Mot} und der an der Seiltrommel benötigten Antriebsleistung P_{Tr} .

$$P_{HW} = \frac{1}{\eta_G} \cdot \frac{1}{\eta_{Mot}} \cdot \frac{1}{(\eta_{Um})^i} \cdot P_{Tr} \quad (6-20)$$

Der Wirkungsgrad eines Umrichters wird konstant mit dem Parameter η_{Um} abgebildet. Der Exponent i nimmt den Wert 1 an, wenn ein Umrichter vorhanden ist und den Wert 0, falls es sich um einen direkt am Netz betriebenen Antrieb handelt. Der Wirkungsgrad des Getriebes wird näherungsweise als konstant angesehen, ist aber vom Aufbau des Getriebes abhängig. Für den Einzelwirkungsgrad einer Stirnradstufe kann bei einer Innenverzahnung von 99,0 % und bei einer Außenverzahnung von 99,5 % ausgegangen werden [Mül-1998]. Die Berechnung des Wirkungsgrades von zusammengesetzten Planetengetrieben kann ebenfalls [Mül-1998] entnommen werden. Der Wirkungsgrad von Stirnradgetrieben ergibt sich durch multiplikative Berücksichtigung der Einzelwirkungsgrade entlang des Leistungsflusses durch das Getriebe. Hinsichtlich des Motorwirkungsgrades muss berücksichtigt werden, dass ein Drehstromasynchronmotor einen ausgeprägt von der Last abhängigen Wirkungsgrad besitzt. Dieses Verhalten wird im Simulationsmodell durch eine entsprechende Kennlinie hinterlegt. Abbildung 6-12 zeigt exemplarisch die Wirkungsgradkennlinie für einen Hubwerkmotor mit einer Nennleistung von 11,4 kW im Hauptgang, wie er in einem Hubwerk für einen 12 t Laufkran eingesetzt wird.

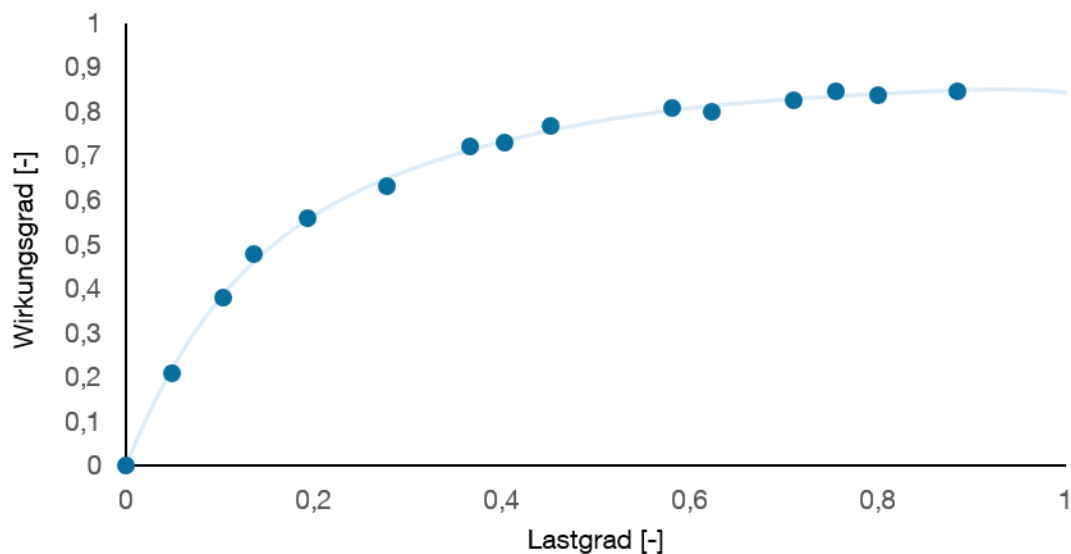


Abbildung 6-12: Wirkungsgradkennlinie Drehstromasynchronmaschine Lastheben

Die dargestellte Kurve ist durch die Interpolation einzelner Messwerte erzeugt, die an einer realen Krananlage mithilfe geeichter Prüfgewichte ermittelt wurde. Neben diesem Verfahren kann eine derartige Kurve auch mithilfe von Messungen der Motoren auf einem Prüfstand ermittelt werden. Auch die Verwendung vorhandener Kennlinien aus der Literatur hat sich als günstiges Verfahren erwiesen [Bra-2016a]. Ganz deutlich zu erkennen ist dabei, dass der Wirkungsgrad erst mit steigender Last zunimmt und bei ca. 85 % des Nenndrehmoments seinen Höchstwert erreicht. Neben der Möglichkeit, gemessene Daten für die Wirkungsgrade von Asynchronmotoren zu hinterlegen, stehen auch Ansätze zur Abschätzung einer Wirkungsgradkennlinie auf Basis der Datenblätter von Motoren zur Verfügung. Dort werden auch entsprechende Modelle zur Berechnung der Verluste in Umrichter-Antrieben gezeigt. [Sch-2015a]. Neben der genannten Arbeit wurde dieses Verfahren auch von Habenicht zur Bestimmung des Wirkungsgrades unterschiedlicher Motoren in Abhängigkeit von der Last angewendet [Hab-2018]. Im Ergebnis zielen beide vorgestellten Ansätze darauf ab, den Wirkungsgrad des Antriebs in Abhängigkeit von der Last abzuschätzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Verlust, der durch den Frequenzumrichter erzeugt wird, in erster Näherung als konstant angenommen.

Die an der Seiltrommel benötigte Leistung berechnet sich nach der Gleichung (6-21) mithilfe der Drehzahl der Seiltrommel n_{Tr} und des notwendigen Drehmoments an der Seiltrommel T_{Tr} .

$$P_{Tr} = 2 \cdot \pi \cdot T_{Tr} \cdot n_{Tr} \quad (6-21)$$

Das für das Heben der Last benötigte Drehmoment T_{Tr} an der Seiltrommel wird mithilfe von Gleichung (6-22) auf Basis der Seilkraft F_S , dem Durchmesser der Seiltrommel D_{Tr} und dem Wirkungsgrad der Seiltrommel η_{Tr} berechnet. Der Wirkungsgrad der Seiltrommel wird für einlagig bewickelte Trommeln mit 98 % angenommen.

$$T_{Tr} = F_S \cdot \frac{D_{Tr}}{2} \cdot \frac{1}{\eta_{Tr}} \quad (6-22)$$

Die Seilkraft F_S wird nach Gleichung (6-23) auf Basis der Hublast m_{Hub} , der Erdbeschleunigung g , der Anzahl der tragenden Seilstränge und dem Wirkungsgrad des Flaschenzugs η_F berechnet.

$$F_S = \frac{m_{Hub} \cdot g}{n \cdot \eta_F} \quad (6-23)$$

Die Berechnung des Wirkungsgrades des Flaschenzugs wird mithilfe von Gleichung (6-24) durchgeführt.

$$\eta_F = \frac{1}{n} \cdot \frac{1 - \eta_R^n}{1 - \eta_R} \quad (6-24)$$

Darin bezeichnen n die Anzahl der tragenden Seilstränge und η_R den Wirkungsgrad der Seilrollen. Hierbei wird zwischen gleit- und wälzgelagerten Seilrollen unterschieden. Seilrollen mit Wälzlagerung besitzen den nominell etwas höheren Wirkungsgrad mit $\eta_R = 985 \%$ gegenüber gleitgelagerten Rollen, die einen Wirkungsgrad von $\eta_G = 96 \%$ besitzen [Sch-1994].

Der Energiebedarf für das Anfahren $E_{HW,a}$ setzt sich aus insgesamt vier einzelnen Komponenten zusammen, die auf Basis des jeweils notwendigen Drehmoments berechnet werden können.

- Beschleunigung aller rotatorisch wirkenden Massen des Hubwerks
- Beschleunigung der translatorisch wirkenden Massen
- stationäres Heben der Last
- Überwindung der Fahrwiderstände bzw. Berücksichtigung von Verlusten im Antriebsstrang

Die Leistung und damit der Energiebedarf für das stationäre Heben der Last ist in Gleichung (6-19) bereits enthalten, so dass im Folgenden nur auf die verbleibenden drei Komponenten eingegangen wird. Die Überwindung der Fahrwiderstände im

Hubwerk wird mithilfe der entsprechenden Wirkungsgrade in den Komponenten Seiltrieb, Seiltrommel, Getriebe und Motor abgebildet. Die Modellierung der benötigten Kräfte und Momente an der Seiltrommel für das Beschleunigen basieren auf elementarmechanischen Beziehungen, weswegen an dieser Stelle auf deren Darstellung verzichtet wird. Für eine detaillierte Darstellung wird auf das entsprechende Schrifttum [Bra-2016b, Ert-2016] verwiesen. Um sicherzustellen, dass das Modell die Realität auch hinreichend genau widerspiegelt, erfolgt im Rahmen einer Modellvalidierung der Vergleich von Simulationsergebnissen mit gemessenen Leistungsverläufen.

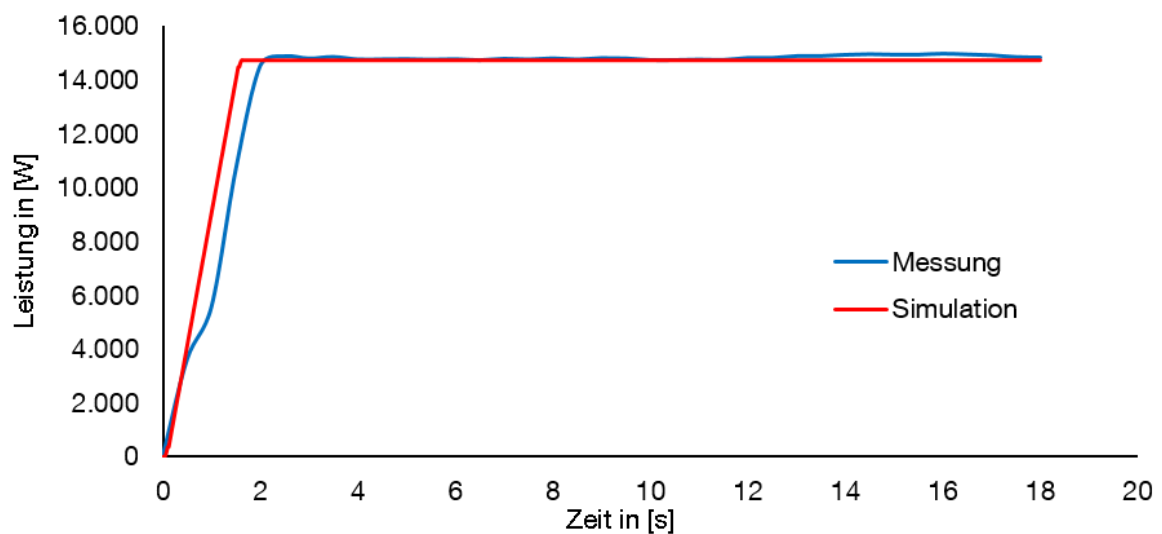


Abbildung 6-13: Validierung durch Vergleich mit Messwerten für eine Last von 10060 kg

Aus Abbildung 6-13 geht hervor, dass die gemessene Leistung und die in der Simulation ermittelte Leistung eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen und damit das Simulationsmodell für das Hubwerk als validiert gelten kann. Weitere vergleichende Abbildungen, welche die Validität des Modells belegen, sowie die verwendeten Basisdaten werden in Anhang C dargestellt.

In Abhängigkeit der gewählten Antriebskonfiguration wird beim Lastsenken Energie zurück ins Netz gespeist. Dies betrifft neben direkt am Netz betriebenen Asynchronmaschinen auch frequenzgeregelter Motoren, die mit einer Rückspeiseeinrichtung versehen sind. Bei Messungen hat sich gezeigt, dass der Bereich der Rückspeisung erst ab einem Lastgrad von ca. 20 % erreicht wird. Eine Erklärung für dieses Verhalten liegt darin begründet, dass es sich bei den verbauten Motoren um Bremsmotoren handelt, welche zum Lüften der Bremse mit Strom beaufschlagt werden müssen. Dieses Verhalten wird berücksichtigt, indem der Wirkungsgrad des Motors entsprechend angepasst wird, sodass die Modellierung des Antriebssystems ansonsten weitestgehend dem Hubvorgang entspricht. Die Verluste in Seiltrieb und Getriebe werden analog zum Hubvorgang durch konstante Wirkungsgrade im Modell abgebildet.

Abbildung 6-14 zeigt die im Modell verwendete, mithilfe eines Polynoms approximier- te Kennlinie für die Rückspeisung für einen polumschaltbaren Motor mit einer Nenn- leistung von 11,4 kW. Die Markierungen entsprechen dabei den in Messungen ermit- telten und für die Approximation verwendeten Daten.

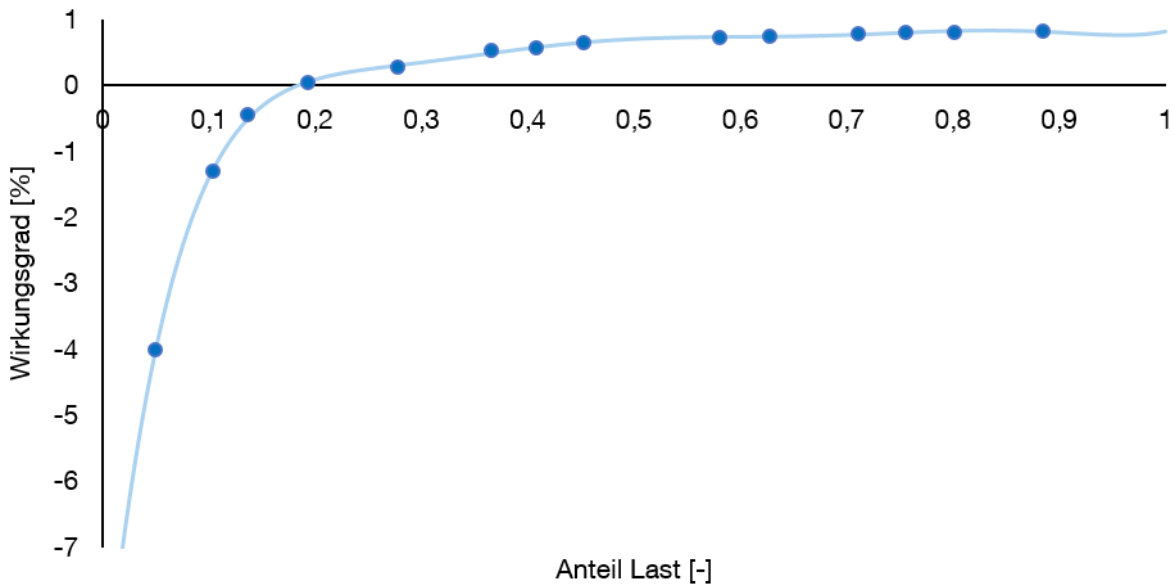


Abbildung 6-14: Kennlinie für die Rückspeisung bei einem 11,4 kW Motor

Im Unterschied zur in Abbildung 6-14 dargestellten Kennlinie ist bei frequenzregel- ten Antrieben eine Rückspeisung nur unter Verwendung von Rückspeiseeinrichtun- gen möglich. Ist diese Einrichtung nicht vorhanden, zeigt die Kennlinie im negativen Bereich ein vergleichbares Bild; der Rückspeisegrad ab einem Lastgrad von ca. 20 % liegt bei null.

Analog zur Berechnung der Leistung im Hubbetrieb werden die Verluste in den Ele- menten des Antriebsstrangs (Seiltrieb und Getriebe) durch entsprechende konstante Wirkungsgrade berücksichtigt. Die implementierten Gleichungen entsprechen weitestgehend denjenigen für das Heben der Last mit dem Unterschied, dass sich die Verluste beim Lastsenken mindernd auf die rückgespeiste Leistung auswirken.

Für das Kran- und das Katzfahren werden Modelle entwickelt, die analog zum Modell für das Hubwerk auf mechanischen Gesetzmäßigkeiten basieren. Die Modellie- rungsansätze sind dabei für die Katze und die Brücke äquivalent, Unterschiede be- stehen in den Parametern für Fahrwiderstände und darin, dass im Modell für das Katzfahren die Masse für die Kranbrücke nicht als Parameter berücksichtigt werden muss. Das Modell ist in Abbildung 6-15 für die Katze gezeigt.

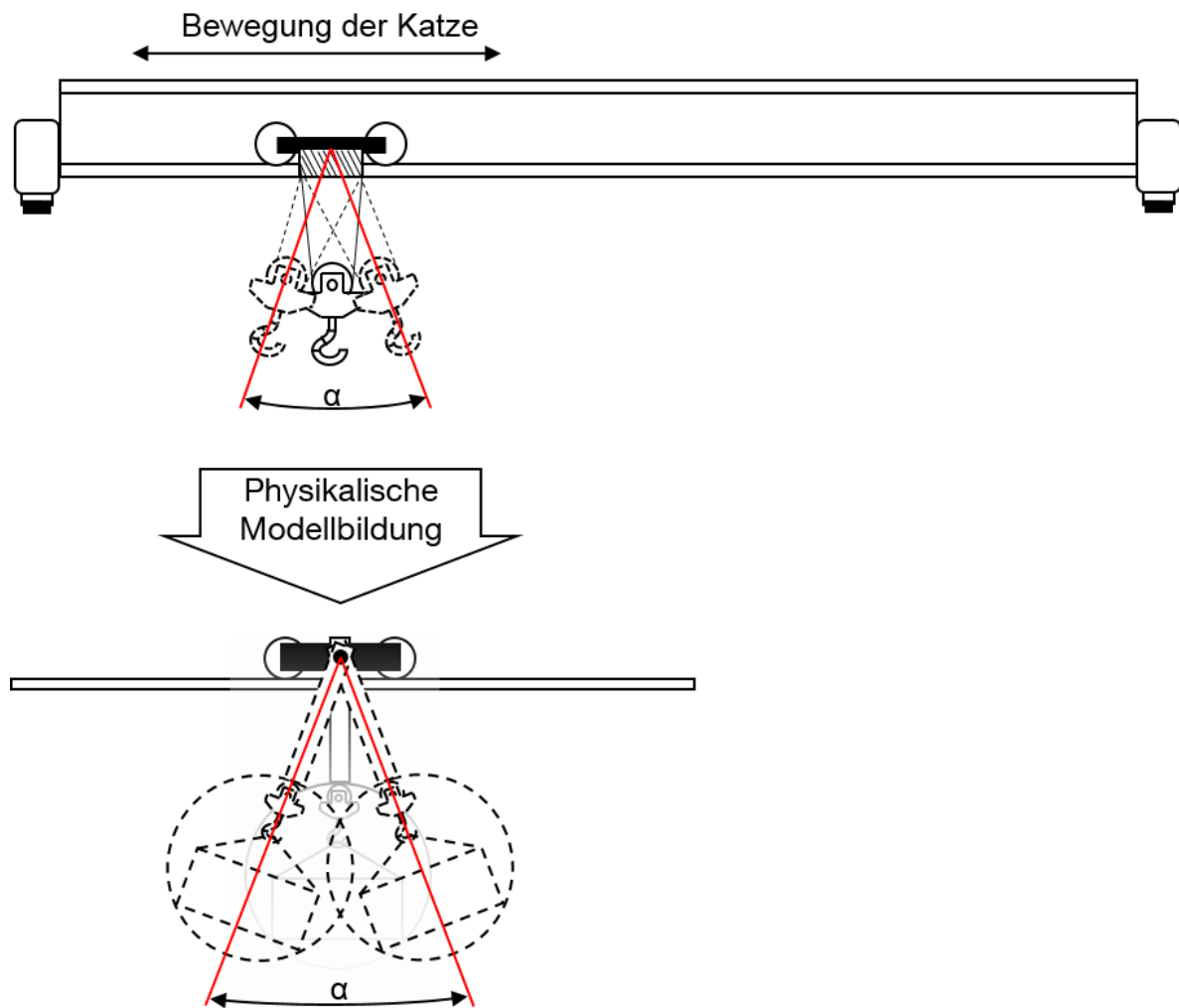


Abbildung 6-15: Modell zur Berechnung des Energiebedarfs beim Kran- und Katzfahren

Die Brücke bzw. die Katze werden in diesem Modell als Wagen (starrer Körper) abgebildet. Der Seiltrieb wird als starrer Stab modelliert, an dessen Ende die Hublast m_{hub} mit der zugehörigen Trägheit J_{hub} befestigt ist. Zur Berechnung der Kraft, die zum Antrieb der Bewegung bereitgestellt werden muss, werden die entsprechenden Newton-Euler-Gleichungen nach (6-25) aufgestellt und numerisch gelöst.

$$\sum_{i=1}^n [J_{Ti}^T \cdot (\dot{p}_i - F_i^e) + J_{Ri}^T \cdot (\dot{L}_i - M_i^e)] = 0 \quad (6-25)$$

Hierzu werden die einzelnen Körper freigeschnitten und an jedem Einzelkörper das Kräfte- und Momentengleichgewicht aufgestellt. Auf die Berücksichtigung der Dämpfung wird in diesem Rahmen verzichtet. Dieses Modell berücksichtigt die Beschleunigung der translatorischen Massen sowie das Auslenken der Hublast. Die Fahrwiderstände sowie die Leistung zur Beschleunigung der rotatorischen Massen inner-

halb des Antriebsstrangs werden durch zusätzliche Modelle berechnet. Zur Validierung des Modells für das Kran- und das Katzfahren werden die entsprechenden Simulationsergebnisse mit Fahrversuchen an einem realen Kran verglichen. Für diesen Vergleich wird neben einem Modell bei dem das Lastpendeln berücksichtigt wird, auch ein Modell verwendet, bei dem dieses Verhalten unberücksichtigt bleibt und nur die benötigte Energie für den Versuch verglichen. In Abbildung 6-16 ist der Vergleich der Messung und der entsprechenden Simulationsergebnisse gegenübergestellt.

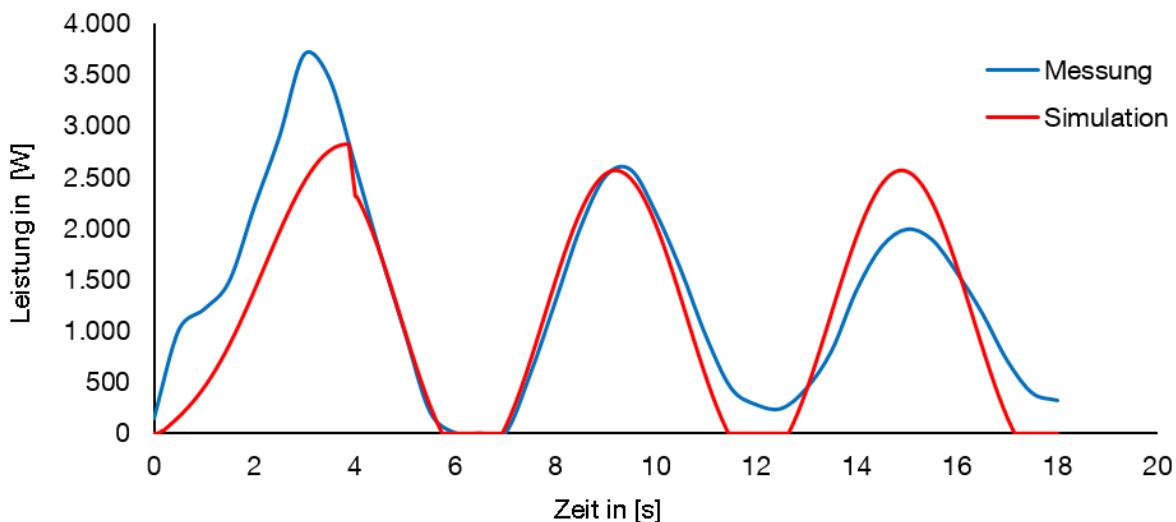


Abbildung 6-16: Validierung des Modells für das Kranfahren

Die Simulation und die Messungen zeigen eine hinreichend genaue Übereinstimmung, sodass das Modell als valide und damit zur Berechnung des Energiebedarfs als geeignet angesehen werden kann. Da der Modellierungsansatz für das Kranfahren und das Katzfahren kinematisch äquivalente Bewegungen sind, wird hier auf die Darstellung einer separaten Validierung verzichtet, sondern das Modell für das Kranfahren übernommen und die Parameter auf das Katzfahren angepasst.

Mithilfe des vorgestellten Energiebedarfsmodells ist es somit möglich den Energiebedarf von Industriekrananlagen für die unterschiedlichen Aufgaben unter Berücksichtigung verschiedener Antriebskonfigurationen zu prognostizieren. Damit ist die Basis geschaffen, einerseits die durch den Energiebedarf entstandenen Kosten und andererseits die entstanden Umweltwirkungen zu quantifizieren.

6.2.5 Instandhaltung und Wartung

Im Rahmen dieser Lebensphase müssen vor allem die Transporte und Anfahrten sowie die durchgeführten Arbeiten berücksichtigt werden. Für die Anfahrten werden dieselben Ansätze zu Grunde gelegt, wie für den Aufbau, wobei die entsprechenden Entfernungen und Arbeitszeiten angepasst werden müssen. Als Transportmittel

kommen für die notwendigen Ersatzteile neben LKWs auch Transporter und PKWs in Betracht, deren Emissionen nach den Ansätzen aus der Transport- und Aufbauphase bestimmt werden. Die Umweltwirkungen aus der Verwendung zusätzlicher Ausrüstung wie Hebebühnen oder Flurförderzeuge werden auf Basis der installierten Leistung, der benötigten Arbeitszeit und den entsprechenden Emissionsfaktoren abgeschätzt. Bei verbrennungsmotorisch betriebenen Maschinen kann zur Berechnung der Abgasemissionen im Betrieb als maßgebliche Kenngröße auf das Modell TREMOD-MM nach [Lam-2004, Lam-2004, Hel-2009] zurückgegriffen werden, welches auch in [Gün-2016b] und [Gün-2015b] verwendet wurde. Die Berechnungsgleichungen und Ansätze wurden bereits in den vorherigen Abschnitten ausführlich diskutiert, sodass an dieser Stelle auf eine weitere Darstellung verzichtet werden kann.

Hinsichtlich der verwendeten Ersatzteile muss in jedem Fall individuell eine ökobilanzielle Untersuchung durchgeführt werden, wobei die Ansätze für diese Betrachtung den in diesem Kapitel dargelegten Ausführungen entnommen werden können. Ist eine weiter reichende Modernisierungsmaßnahme geplant, die auch Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Krans besitzt, so müssen diese neben der ökologischen auch in die wirtschaftliche Betrachtung einfließen.

6.2.6 Entsorgung

Die betrachteten Prozesse bei der Entsorgung können sehr einfach mit den vorgestellten Berechnungsverfahren betrachtet werden. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Transport- und Anfahrtsprozesse und die für die Außerbetriebnahme und den Abbau notwendigen Maschinen. Die entsprechenden Berechnungsgleichungen hierfür wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellt, so dass an dieser Stelle auf eine weitere detaillierte Darlegung verzichtet wird. Hinsichtlich des Recyclings werden die zurückgewonnenen Materialanteile in der Phase der Materialauswahl berücksichtigt und ausgewiesen, so dass eine detailliertere Untersuchung an dieser Stelle nicht notwendig ist.

6.3 Wirkungsabschätzung

Innerhalb der Ökobilanz ist es die Aufgabe der Wirkungsabschätzung die Umweltwirkungen zu quantifizieren. Basis hierfür sind die Inputs und Outputs aus der Sachbilanz. Die Auswahl der Wirkungskategorien wird bereits in Abschnitt 6.1.2 beschrieben. Maßgeblicher Schritt innerhalb der Wirkungsabschätzung ist die Charakterisierung, welche in Abbildung 6-17 schematisch dargestellt ist.

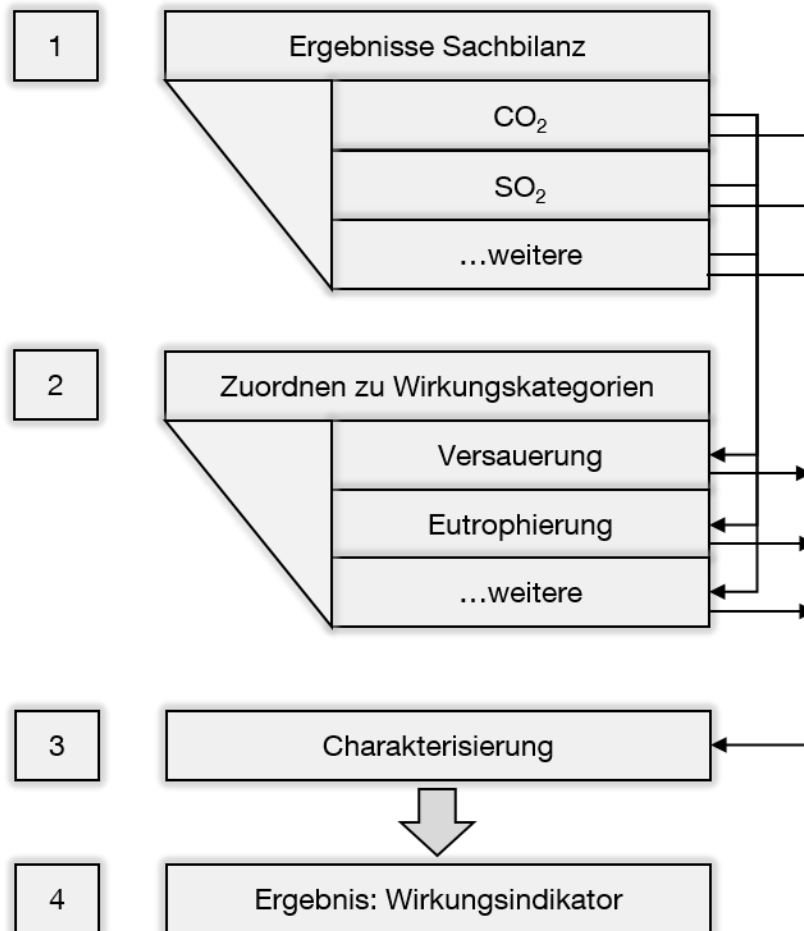


Abbildung 6-17: Vorgehen bei der Charakterisierung in Anlehnung an [Klö-2009]

In der vorliegenden Arbeit werden mit der Auswahl der Wirkungsindikatoren und der Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu diesen Kategorien die verbindlichen Bestandteile der Wirkungsabschätzung durchgeführt. Die optionalen Bestandteile Normierung, Ordnung und Gewichtung werden in dieser Arbeit nicht ausgeführt, da sich die nachgelagerte Berechnung der externen Umweltkosten auf Basis der Wirkungsindikatoren stützt.

7 Kostenmodellierung

Die Kostenmodellierung umfasst zum einen die ökonomische Bewertung mithilfe der Lebenszykluskosten und zum anderen die ökologische Bewertung mithilfe der Umweltkostenrechnung auf Basis der Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes. Basis für die Ermittlung der Umweltkosten sind die in der Ökobilanzierung ermittelten Daten zu den Umweltwirkungen. Zur Ermittlung der Lebenszykluskosten wird in Kapitel 7.1 auf gängige Verfahren zum Investitionsgütereinkauf eingegangen und Abschnitt 7.2 ein Modell für die Lebenszykluskosten von Krananlagen entwickelt. Die Darstellung der Berechnung der Umweltfolgekosten erfolgt in Kapitel 7.3. Mithilfe dieser beiden Einzelbetrachtungen wird in Abschnitt 7.4 der Brückenschlag zwischen der ökologischen und ökonomischen Betrachtung geschaffen.

7.1 Investitionsgütereinkauf

Zur Entscheidungsfindung bei Investitionsgütern, bei denen nicht nur aus der Anschaffung signifikante Kosten resultieren, ist es sinnvoll den Ansatz der Lebenszykluskosten nach einer anerkannten Methodik (bspw. [VDI 2884] oder [VDMA 34160]) zu verfolgen [Hof-2012]. Innerhalb des Beschaffungsprozesses treten die Lebenszykluskosten vor allem in den Phasen Vorauswahl der Angebote und Vergabeentscheidung in den Vordergrund [Hof-2012]. Zur Entscheidungsfindung stehen dabei neben der Nutzwertanalyse auch statischen und dynamische Verfahren der Investitionsrechnung zur Verfügung, die sich für die vorliegende Problemstellung eignen [Dau-2014].

7.1.1 Statische Verfahren

Zur Entscheidungsfindung bei der Bewertung von Investitionsalternativen betrachten die statischen Verfahren jeweils eine bestimmte durchschnittliche oder repräsentative Periode [Dau-2014]. Die statischen Verfahren bei der Investitionsrechnung berücksichtigen dabei nicht den Zeitpunkt der Ein- und Auszahlungen [Kru-2014]. Zu diesen Verfahren zählen die Kostenvergleichsrechnung, die Gewinnvergleichsrechnung, die Rentabilitätsrechnung und die Amortisationsrechnung [Dau-2014].

- **Kostenvergleichsrechnung:**

Bei der Kostenvergleichsrechnung werden alle auf dem Lebensweg anfallenden Kosten für die unterschiedlichen Alternativen gegenübergestellt. Die Investition mit den geringsten Kosten die damit die vorteilhafteste und damit

sinnvollste. Dieses Verfahren ist auch auf Krananlagen übertragbar, allerdings wird hier wie bei allen anderen statischen Verfahren nicht berücksichtigt, dass sich der Wert des Geldes über die Zeit ändert. Auch würde an dieser Stelle ein möglicher Gewinn aus dem Wiederverkauf des Krans nicht berücksichtigt. [Dau-2014]

– **Gewinnvergleichsrechnung**

Im Unterschied zur Kostenvergleichsrechnung werden bei der Gewinnvergleichsrechnung nicht nur die Kosten der Alternativen berücksichtigt, sondern auch die Leistungen (Gewinne mit Absatzpreisen) bewertet. Diese Methode kann herangezogen werden, wenn sich die Leistungen der Alternativen unterscheiden. [Dau-2014]

– **Rentabilitätsrechnung**

Die Rentabilitätsrechnung dehnt die Gewinnvergleichsrechnung um den Faktor des eingesetzten Kapitals aus, indem sie den Gewinn auf das eingesetzte Kapital bezieht. Damit handelt es sich um eine relative Größe. [Wil-2017]

– **Amortisationsrechnung**

Bei diesem Verfahren wird berechnet, ab welchem Zeitpunkt sich eine Investition selbst finanziert hat. Hierzu wird der durchschnittliche Gewinn eines Jahres auf den durchschnittlichen Kapitaleinsatz bezogen. Die Investitionen dürfen hinsichtlich Nutzungsdauern, Anschaffungskosten, etc. nicht zu stark voneinander abweichen.

7.1.2 Dynamische Verfahren

Dynamische Verfahren der Investitionsrechnung sind dadurch gekennzeichnet, dass Sie den zeitlichen Aspekte einer Ein- oder Auszahlung berücksichtigen, indem sie diese Ein- oder Auszahlungen mithilfe der Zinseszinsrechnung auf einen gemeinsamen Zeitpunkt auf- oder abzinsen [Kru-2014].

– **Kapitalwertmethode**

Bei diesem Verfahren wird der Barwert (Kapitalwert) einer Investition durch das Ab- bzw. Aufzinsen aus der Differenz der Ein- und Auszahlungen berechnet (siehe Gleichung (7-1)).

$$KW_K = -I_0 + \sum_{t=1}^n NE_t \cdot (1+i)^{-t} + R_K \cdot (1+i)^{-k} \quad (7-1)$$

Darin bezeichnet KW_K den Kapitalwert bei einer Nutzungsdauer von K Perioden, NE_t den Zahlungsüberschuss aus der Differenz zwischen den zum Zeitpunkt t betrachteten Ein- und Auszahlungen, R_K die Einzahlung nach der Nutzungsdauer und i den anzusetzenden Zinssatz [Hof-2012].

Die Herausforderung bei der Anwendung dieser Methode liegt insbesondere darin, die auftretenden Kosten bereits im Vorfeld der Investition hinreichend genau abschätzen zu können.

– **Annuitätenmethode**

Bei der Annuitätenmethode werden die einzelnen Zahlungen auf Jahresebene herangezogen. Diese Methode wird insbesondere bei Versicherungsunternehmen verwendet und setzt voraus, dass die jährlichen Ein- und Auszahlungen gleichmäßig groß sind [Dau-2014]. Bei einmaligen Zahlungen bspw. am Beginn oder am Ende des Betrachtungszeitraums müssen diese auf den gesamten Zeitraum verteilt werden. Mit diesem Verfahren wird bewertet, inwiefern eine Investition am Ende profitabel ist [Dau-2014].

– **Methode der internen Zinssätze**

Bei der Methode der internen Zinssätze wird die Verzinsung eines Investitionsobjekts bewertet. Ist dessen Verzinsung mindestens so groß wie vom Investor gefordert, gilt die Investition als vorteilhaft. Die Berechnung dieses Verfahrens gilt als aufwändiger als bspw. die Kapitalwertmethode, allerdings ist der Grad der Anwendung höher [Däu-2007].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die dynamischen Verfahren deutlich besser zur wirtschaftlichen Bewertung von langfristigen Investitionen und zum Alternativenvergleich herangezogen werden können, als die statischen Verfahren. In [Bod-2011] wird eine Abzinsung auf das Basisjahr empfohlen. Diese Anforderung lässt sich bereits mit der Kapitalwertmethode erreichen, welche im Folgenden an den Lebenszykluskosten einer Krananlage angewendet wird.

7.2 Lebenszykluskosten von Krananlagen

Die für die Berechnung der Lebenszykluskosten herangezogene Kostenaufbruchstruktur wird auf Basis des in Abschnitt 4.1 dargestellten und beschriebenen Lebenszyklus entwickelt. Dabei wird zwischen den Phasen „vor der Nutzung“, „Nutzung“ und „nach der Nutzung“ unterschieden und die auftretenden Kostenarten und deren Entstehung erläutert. Zudem wird dargestellt, ob es sich um eine einmalige, eine jährliche oder eine nach Bedarf auftretende Kostenart handelt, die im jeweiligen

Jahr des Auftretens berücksichtigt werden. Zudem wird auf die wichtigsten Modelle zur Berechnung der jährlichen Energie- und Arbeitskosten eingegangen.

7.2.1 Vor der Nutzung

In diesem Abschnitt wird die Kostenaufbruch-Struktur und damit die Kostenarten in der Lebensphase „vor der Nutzung“ vorgestellt. Die Nomenklatur (Kurzbeleg) bei den Kosten leitet sich von der Bezeichnung des Lebenswegabschnitts (vdN = vor der Nutzung) ab und wird aufsteigend nummeriert. Eine Übersicht über die betrachteten Kosten ist in Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Übersicht betrachtete Kostenarten vor der Nutzung

Kurzbeleg	Kostenart	Quelle	Durchführung durch	Intervall
vdN.1	Projektmanagement / Planung	Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
vdN.2	Anschaffungskosten	Angebot des Kranherstellers	Hersteller	einmalig
vdN.3	Bauliche	Angebot	Externer Anbieter	einmalig
vdN.4	Anpassungen	Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
vdN.5	Infrastrukturkosten	Angebot	Externer Anbieter / Hersteller	einmalig
vdN.6		Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
vdN.2	Installations- und Aufbaukosten	Angebot des Kranherstellers	Hersteller	einmalig
vdN.7		Angebot	Externer Anbieter	einmalig
vdN.8		Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
vdN.2		Angebot des Kranherstellers	Hersteller	einmalig
vdN.9	Transportkosten	Angebot	Externer Anbieter	einmalig
vdN.10		Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
vdN.2		Sonstige Installationskosten	Angebot des Kranherstellers	Hersteller

vdN.11	Angebot	Externer Anbieter	einmalig
vdN.12	Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig

Zu den Kurzbelegen wird jeweils eine Kostenart zugeordnet. Diese leiten sich direkt aus den Tätigkeiten und anfallenden Arbeiten in der entsprechenden Lebensphase nach Kapitel 4.1 ab. Hinsichtlich der Quelle wird unterschieden, ob die Kosten bereits im Angebot des Kranherstellers integriert sind oder ob diese Leistungen durch einen weiteren externen Anbieter bzw. durch den Kranbetreiber erbracht werden sollen. Im Falle von externen Anbietern resultieren die Kosten analog zur Anschaffung aus den zugehörigen Angeboten und bei Leistungen, die der Betreiber selbst erbringt, aus den internen Kostensätzen für Personal und eingesetzte Materialien und Werkzeuge. Beispielsweise ist es üblich, dass das Aufsetzen des Krans auf die Kranbahn mithilfe eines Fahrzeugkrans erfolgt, der von einem regionalen Betreiber angemietet wird und für den ein entsprechendes Angebot auf Basis der Entfernung und der benötigten Einsatzzeit vorliegt. Bauliche Anpassungen, die dazu dienen, damit der Kran überhaupt aufgebaut werden kann, werden in den meisten Fällen von externen Unternehmen auf Basis eines Angebots durchgeführt. Im Falle von zusätzlichen Infrastrukturkosten wie bspw. die Bereitstellung einer ausreichenden Energieversorgung wird ebenso eine Aufteilung in vom Betreiber durchgeführte Arbeiten und Angebote von externen Unternehmen durchgeführt. Die Kosten während der Phase vor der Nutzung fallen nur einmalig an und können zur Investitionssumme nach Gleichung (7-2) zusammengefasst werden.

$$I_0 = \sum_{i=1}^{12} vdN.i \quad (7-2)$$

Da sich die einzelnen Kostenarten auch aus Aspekten, die von mehreren Anbietern durchgeführt werden, zusammensetzen können, sind in den Gesamtkosten für die Phase vor der Nutzung auch immer alle Kostenarten enthalten.

7.2.2 Nutzung

Die betrachteten Kosten in der Nutzungsphase werden durch die Arten Energiekosten, Wartung und Instandhaltung, Modernisierung und Überholung, die Arbeitskosten des Kranbedieners und sonstige auftretende Kosten charakterisiert.

Tabelle 7-2 ist eine Übersicht über die in der Nutzungsphase betrachteten Kostenarten dargestellt.

Tabelle 7-2: Übersicht betrachtete Kostenarten in der Nutzungsphase

Kurzbeleg	Kostenart	Quelle	Durchführung durch	Intervall
wdN.1	Energiekosten	Energiebedarfsmodell auf Basis Betreiberangaben	Betreiber	jährlich
wdN.2	Jährliche Kranprüfung	Angebot	Externer Anbieter	jährlich
wdN.3		Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	jährlich
wdN.4		Angebot	Externer Anbieter	jährlich
wdN.5	Geplante Wartung und Instandhaltung	Wartungsvertrag	Externer Anbieter / Hersteller	jährlich
wdN.6		Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	jährlich
wdN.7		Angebot	Externer Anbieter	Nach Bedarf
wdN.8	ungeplante Wartung und Instandhaltung	Angebot	Hersteller	Nach Bedarf
wdN.9		Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	Nach Bedarf
wdN.10		Angebot	Externer Anbieter	Nach Bedarf
wdN.11	Modernisierung und Überholung	Angebot	Hersteller	Nach Bedarf
wdN.12		Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	Nach Bedarf
wdN.13	Arbeitskosten	MKS-Modell für Spielzeit und Stundensätze	Betreiber	jährlich
wdN.14	Sonstige Kosten während der Nutzung	Eigene Kostensätze	Betreiber	Nach Bedarf
wdN.15		Angebot	Externer Anbieter	Nach Bedarf

Die Kostenarten während der Nutzung werden mit dem Kurzbeleg wdN gekennzeichnet und aufsteigend nummeriert. Während der Nutzung sind vor allem die jährlich betrachteten Kosten für Energie und die Arbeitskosten für den Kranbediener so-

wie die notwendigen Wartungs- und Instandhaltungskosten anzusetzen. Hinsichtlich der Instandhaltungsstrategie wird kostenseitig unterschieden, ob die durchgeführten Arbeiten vom Kranhersteller im Rahmen eines Wartungs- und Servicevertrages, durch den Betreiber selbst oder durch externe Unternehmen durchgeführt werden. Analog wird für die jährlich wiederkehrende Kranprüfung verfahren. Die im Jahr t geltenden Gesamtkosten während der Nutzung setzen sich aus jährlich auftretenden Kosten $NE_{j,t,i}$ und den nur bei Bedarf im Jahr t auftretenden Kostenarten $NE_{e,t,i}$ zusammen, wobei die gemäß Tabelle 7-2 aufgestellten Kostenarten $wdN.i$ jeweils einer Kategorie zugeordnet werden (siehe Gleichung (7-3)).

$$NE_t = \sum NE_{e,t,i} + \sum NE_{j,t,i} \quad (7-3)$$

Zur Berechnung der Arbeitskosten ($wdN.13$) und der Energiekosten ($wdN.1$), die nicht auf Angeboten externer Unternehmen basieren und vom Betrieb des Krans abhängen, werden eigene Modelle entwickelt. Die Arbeitskosten $wdN.13_t$ für das Jahr t ergeben sich aus der Spielzeit des Krans und dem Kostensatz für die Arbeitszeit nach Gleichung (7-4), welche für die Kranaufgaben angesetzt werden muss.

$$wdN.13_t = t_{SP,t} \cdot AK_t \quad (7-4)$$

Darin bezeichnet $t_{SP,t}$ die gesamte Arbeitszeit während des Jahres t für die Kranbedienung und AK_t den Kostensatz für die anfallende Arbeitszeit im entsprechenden Jahr t . Die Arbeitszeit ist dabei äquivalent zur Spielzeit, die auf Basis des Mehrkörpermodells ermittelt wird. Hinsichtlich des Arbeitskostensatzes wird als Option eine jährliche Lohnsteigerung im Modell berücksichtigt. Die jährlichen Energiekosten $wdN.1_t$ werden auf Basis des Strompreises und des jährlich benötigten Energiebedarfs nach Gleichung (7-5) berechnet, wobei für die Berechnung des Energiebedarfs das entsprechende MATLAB/Simulink-Modell zu Grunde gelegt wird.

$$wdN.1_t = E_t \cdot K_{E,t} \quad (7-5)$$

Darin bezeichnen E_t den jährlich anfallenden Energiebedarf und $K_{E,t}$ die im Jahr t geltenden Strompreise für das Unternehmen. Beim Strompreis wird analog zu den Arbeitskosten neben der Möglichkeit einer manuellen Anpassung auch eine jährliche Steigerung als Option berücksichtigt.

Mithilfe dieser Aufbruch-Struktur ist es möglich, die Gesamtkosten während der Nutzung des Krans auf Basis von Berechnungsmodellen und Angeboten externer Unternehmen zu berechnen.

7.2.3 Nach der Nutzung

Nach der Nutzung entstehen die Kosten vor allem durch Transporte und Entsorgung des Krans, während angemerkt werden muss, dass auch der Verkauf und die Wiedernutzung des Krans bzw. Teile davon bei anderen Unternehmen denkbar ist und entsprechend berücksichtigt wird. Tabelle 7-3 zeigt eine Übersicht über die betrachteten Kostenkategorien nach der Nutzung des Krans, wobei der Kurzbeleg analog zu den Phasen vor der Nutzung und Nutzung mit ndN und einer aufsteigenden Nummerierung aufgebaut ist.

Tabelle 7-3: Übersicht betrachtete Kostenarten nach der Nutzung

Kurzbeleg	Kostenart	Quelle	Durchführung durch	Intervall
ndN.1	Verkaufserlös	Energiebedarfsmodell auf Basis Betreiberangaben	Betreiber	einmalig
ndN.2	Außerbetriebnahme	Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
ndN.3		Angebot	Externer Anbieter	einmalig
ndN.4	Abbau und Demontage	Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
ndN.5		Angebot	Externer Anbieter	einmalig
ndN.6	Transporte	Eigene Stunden- bzw. Kostensätze	Betreiber	einmalig
ndN.7		Angebot	Externer Anbieter	einmalig
ndN.8	Entsorgung und Recycling	Angebot	Externer Anbieter	einmalig
ndN.9	Sonstige Verwertungskosten	Angebot	Externer Anbieter	einmalig

Die Phase „nach der Nutzung“ beinhaltet alle Kostenarten, die sich mit der Außerbetriebnahme, dem Abbau und der Entsorgung beschäftigen. Hierzu zählen die Erlöse aus dem Verkauf des Krans bzw. einzelner Komponenten. Ausgabenseitig sind die Kosten für die Außerbetriebnahme, den Abbau und die Demontage zu erfassen, wel-

che durch den Betreiber selbst oder durch ein anderes Unternehmen auf Basis eines entsprechenden Angebots durchgeführt werden. Hierzu zählen die Kosten für die Mitarbeiter und für die benötigten Geräte wie Flurförderzeuge und Mobilkrane. Der äquivalente Ansatz wird für notwendige Transporte implementiert. Zudem werden nach der Nutzung die Kosten für Entsorgung und Recycling und sonstige Verwerungskosten auf Basis von Angeboten angesetzt. Die Kostenarten nach der Nutzung des Krans fallen im Gegensatz zur Nutzungsphase nur einmal an. Die Berechnung der Gesamtkosten „nach der Nutzung“ R_K wird in Gleichung (7-6) als Summe über die einzelnen Kostenarten dargestellt.

$$R_K = \sum_{i=1}^9 ndN.i \quad (7-6)$$

Mithilfe der dargestellten Modellierung ergibt sich die Möglichkeit unterschiedliche Varianten eines Krans auf Basis ihrer Lebenszykluskosten zu vergleichen. Da die Kosten nach der Kapitalwertmethode abhängig vom Jahr des Auftretens abgezinst werden, ist eine gemeinsame Vergleichsbasis für alle Varianten gegeben. Mithilfe dieses Verfahrens ist es auch möglich das Jahr der Amortisation zu berechnen.

7.3 Betrachtung von Umweltfolgekosten

Als Berechnungsgrundlage der externen Umweltkosten werden die Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes und die darin dargestellten Kostensätze herangezogen. Die Berechnung der Umweltkosten erfolgt für die Wirkungskategorie Treibhausgasäquivalent, wobei das Verfahren auch auf andere Wirkungskategorien deckungsgleich anwendbar ist. Die Beschränkung auf diese Wirkungskategorie ist durch folgende Aspekte begründet:

- **Datengrundlage**

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind nicht für alle in dieser Arbeit bisher betrachteten Wirkungskategorien Kostensätze in der Methodenkonvention 2.0 verfügbar, sodass die durchgängige Betrachtung nur anhand des Treibhausgasäquivalents erfolgt. In gleicher Weise können in Zukunft weitere Wirkungskategorien hinzugefügt werden, sobald die entsprechenden Kostensätze hinreichend verfügbar sind.

– **Maßgeblichkeit**

Das anthropogen verursachte Treibhausgaspotenzial wird als eine der Hauptursachen für den Klimawandel und die entsprechende Temperatursteigerung auf der Erde gesehen. In dieser Hinsicht erscheint es als äußerst sinnvoll, diesen weltweit anerkannten Parameter priorisiert in die Betrachtung aufzunehmen. Entsprechend wurde in der Vergangenheit auch in [Bru-2013] verfahren.

Die Berechnung der Umweltfolgekosten jeder Alternative a nach k Perioden wird in Gleichung (7-7) auf Basis der Umweltkosten in den einzelnen Wirkungskategorien w dargestellt.

$$KU_{K,a} = \sum_w \sum_k KU_{w,k,a} \quad (7-7)$$

Darin bezeichnen $KU_{K,a}$ die gesamten externen Umweltkosten nach K Perioden (im vorliegenden Fall Jahren) für die einzelnen Alternativen a, $KU_{w,k,a}$ die Umweltkosten für Alternative a innerhalb der Periode k für die Wirkungskategorie w. Die in jeder Periode ermittelten externen Umweltkosten werden mit dem gewählten Zinssatz auf das Basisjahr der Betrachtung abgezinst. Damit können die Umweltkosten in den vordefinierten Wirkungskategorien quantifiziert werden und in die Lebenszykluskostenrechnung integriert werden. Durch die Abzinsung auf den Barwert werden die Umweltkosten und die Lebenszykluskosten äquivalent behandelt.

7.4 Gesamtkostenbetrachtung

Im Rahmen dieses Abschnitts werden die ermittelten Lebenszykluskosten, die die wirtschaftlichen Aspekte beinhalten und die Umweltkosten, die sich auf die ökologischen Aspekte beziehen, zu den Gesamtkosten zusammengefasst. Bei einer rein wirtschaftlichen Betrachtung wird der Kapitalwert nach der Nutzung, der auf Basis der Lebenszykluskosten berechnet wurde, für die Bewertung zu Grunde gelegt. Werden zwei zur Diskussion stehende Alternativen miteinander verglichen, ist die betragsmäßig kleinere Alternative auch die wirtschaftlichere. Sollen die Umweltfolgekosten nach Kapitel 7.3 in die Betrachtung aufgenommen werden, erfolgt dies durch die Addition dieser Kosten zum Kapitalwert zu den Gesamtkosten $K_{ges,a}$ für eine Alternative a nach Gleichung (7-8).

$$K_{ges,a} = |KW_{K,a}| + |KU_{K,a}| \quad (7-8)$$

Darin bezeichnen $KW_{K,a}$ den Kapitalwert nach K Perioden für eine Alternative a und $KU_{K,a}$ die entsprechenden Umweltkosten, die auf Basis der ökologischen Betrachtung aus der Ökobilanz berechnet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass damit der in der Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes geforderten Internalisierung der externen Umweltkosten Genüge geleistet wird. Nach dem aktuellen Stand der Gesetzeslage sind die Umweltkosten für den Betreiber noch nicht zu entrichten. Allerdings sind die Ansätze zur Bewertung der Einführung von umweltfreundlichen Technologien, bereits auf ähnlicher Basis im Einsatz [Gün-2015b].

8 Anwendung des Verfahrens

In diesem Kapitel wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Vorgehensmodell an einem Fallbeispiel angewendet und damit die Funktionsweise validiert. Hierfür werden zunächst die Randbedingungen definiert. Diese beziehen sich auf die geometrischen Daten des Krans und die Festlegung der unterschiedlichen Antriebssysteme, die im Rahmen des Fallbeispiels miteinander verglichen werden sollen. Im Vordergrund bei der Durchführung des Fallbeispiels stehen folgende Aspekte:

- **Funktionsnachweis:**
Mithilfe des Fallbeispiels soll die Funktionsweise des entwickelten Vorgehensmodells und die darin enthaltenen Module erläutert werden. Hierzu werden sämtliche Schritte chronologisch abgearbeitet und die Ergebnisse am Ende interpretiert.
- **Herausarbeiten von Kostentreibern:**
Im Rahmen des Fallbeispiels werden die Haupteinflussgrößen auf die Gesamtkosten aufgezeigt. Die Aufspaltung in die einzelnen Lebenswegabschnitte zeigt die Kostentreiber auf und bietet damit Ansatzpunkte für eine zukünftige Optimierung.

In diesem Abschnitt wird zunächst das Fallbeispiel mit den maßgeblichen Randbedingungen definiert und vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse aus der Berechnung in Abschnitt 8.2 vorgestellt und diskutiert. In Kapitel 8.1 werden zunächst die Parameter, welche variiert werden sollen, festgelegt und die Werte dafür definiert.

8.1 Definition Fallbeispiel

Zur Berechnung der Höhe der Umweltaspekte auf europäischer Ebene wird in [Bru-2013] ein 10 t-Laufkran als Referenz verwendet. Da in dieser Tragfähigkeitsklasse alle Antriebssysteme, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht werden, verfügbar sind, wird auch an dieser Stelle auf diese Tragfähigkeitsklasse zurückgegriffen. Die maßgeblichen Parameter und Randbedingungen für die Basiskonfiguration des Krans werden in Kapitel 8.1.1 und die Daten der betrachteten Antriebssysteme in Abschnitt 8.1.2 dargestellt. In Abschnitt 8.1.3 werden die einzelnen Aufgaben des Krans, die während der Nutzungszeit anfallen, definiert.

8.1.1 Basisdaten

Die Festlegung der Basisdaten umfasst neben der Definition der kran- und antriebs-technischen Spezifikationen auch die Vorgabe der Aufgaben des Krans und die geometrischen Randbedingungen. In Tabelle 8-1 sind die wichtigsten Basisparameter hinsichtlich der geometrischen Randbedingungen für das Fallbeispiel dargestellt. Diese Parameter gelten für den Kran unabhängig von der gewählten Antriebstechnik und sind als vorgegeben anzusehen.

Tabelle 8-1: Basisparameter hinsichtlich geometrischer Randbedingungen und Tragfähigkeit

	Wert	Einheit
Tragfähigkeit	10.000	[kg]
Länge Arbeitsraum (Kranfahren)	25	[m]
Länge Arbeitsraum (Katzfahren)	14	[m]
Länge Arbeitsraum (Lastheben)	7	[m]
Katzenfahrmaß Seite A	1	[m]
Katzenfahrmaß Seite B	1	[m]
Kranfahrmaß Seite 1	1,5	[m]
Kranfahrmaß Seite 2	1,5	[m]
Spurmittelmaß l_s	17	[m]

Die verwendete Nomenklatur orientiert sich an den in Abbildung 3-1 vorgestellten Parametern. Mithilfe dieser Parameter wird der Arbeitsraum des Krans festgelegt. Der Arbeitsraum beschreibt einen theoretischen Bereich, in dem jede Position vom Lasthaken ohne Einschränkungen, die von der Geometrie des Krans ausgehen, erreicht werden kann. Das Katzenfahrmaß beschreibt den Abstand zwischen der Kranbahn und den jeweils am weitesten links und rechts gelegenen Punkte entlang des Kranträgers, welche vom Haken erreicht werden können.

8.1.2 Betrachtete Antriebssysteme

Im Rahmen dieses Fallbeispiels erfolgen die Anwendung und damit der Nachweis der Funktion der entwickelten Methodik anhand der Auswahl der Antriebstechnik für einen Brückenkran. Hierzu werden zwei unterschiedliche Varianten (als System A

und System B bezeichnet), die für diesen Kran in Frage kommen, ausgewählt und miteinander verglichen. Zunächst werden die Spezifikationen der untersuchten Antriebe beschrieben und die notwendigen Daten und Parameter definiert.

Variante A:

Die Variante A für die Antriebsausstattung des Krans ist charakterisiert durch polumschaltbare Antriebe sowohl für das Hubwerk als auch für das Kran- und das Katzfahren. Damit werden in dieser Konfiguration zwei unterschiedliche Arbeitsgeschwindigkeiten (Fein- und Hauptgang) zur Verfügung gestellt. Für das Hubwerk zeigt Tabelle 8-2 die wichtigsten Parameter in der Übersicht.

Tabelle 8-2: Parameter Antriebsvariante A für das Hubwerk

	Parameter	Einheit
Motorbauart Hubwerk	Polumschaltbar mit zwei Geschwindigkeiten	[-]
Übersetzung Getriebe	94	[-]
Einscherung	4/1	[-]
Nennleistung Motor Feingang / Hauptgang	1,4 / 9	[kW]
Geschwindigkeit Hubwerk Feingang	0,0138	[m/s]
Geschwindigkeit Hubwerk Hauptgang	0,0833	[m/s]
Beschleunigung Hubwerk	0,25	[m/s ²]
Ruck Hubwerk	1	[m/s ³]

Für die Kranfahrwerke wird in jedem Kopfträger je ein polumschaltbarer Antrieb eingesetzt. Die verbaute Leistung ist dabei deutlich geringer als im Hubwerk, da es sich lediglich um eine Horizontal- und keine Hubbewegung handelt. Die für die Simulationsmodelle benötigten Daten hinsichtlich dieser Antriebe beschränken sich auf die Nennleistungen, die Getriebeübersetzungen, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie den Anfahruck des Antriebs. In Tabelle 8-3 sind die Basisdaten für das Kranfahren in der Alternative A je Motor dargestellt.

Tabelle 8-3: Parameter Antriebsvariante A für das Kranfahren

	Parameter	Einheit
Motorbauart Kranfahrwerke	Polumschaltbar mit zwei Geschwindigkeiten	[-]
Nennleistung Motor Feingang / Hauptgang	0,009 / 0,37	[kW]
Übersetzung Getriebe	53,8	[-]
Geschwindigkeit Kranfahren Feingang	0,133	[m/s]
Geschwindigkeit Kranfahren Hauptgang	0,533	[m/s]
Beschleunigung Kranfahren	0,18	[m/s ²]
Verzögerung Kranfahren	0,15	[m/s ²]
Ruck Kranfahren	0,5	[m/s ³]

Die äquivalenten Daten werden auch für das Katzfahren des Krans in den entsprechenden Modellen benötigt. Im Unterschied zur Kranbrücke wird für das Katzfahren lediglich ein Motor eingebaut. Die Verfahrgeschwindigkeit der Katze ist aufgrund der kürzeren Distanz kleiner gewählt. Im vorliegenden Beispiel werden für das Katzfahren und das Kranfahren die gleichen Motoren verwendet. Die Einstellung unterschiedlicher Verfahrgeschwindigkeiten der Katze wird analog zur Brücke durch Polumschaltung realisiert. Die notwendigen Daten für die Simulations- und Berechnungsmodelle sind damit die gleichen wie bei der Kranbrücke. Tabelle 8-4 zeigt die Übersicht der verwendeten Parameter für das Katzfahren für die Kranvariante A.

Tabelle 8-4: Parameter Antriebsvariante A für das Katzfahren

	Parameter	Einheit
Motorbauart Katze	Polumschaltbar mit zwei Geschwindigkeiten	[-]
Nennleistung Motor Feingang / Hauptgang	0,1 / 0,55	[kW]
Übersetzung Getriebe	56	[-]
Geschwindigkeit Katzfahren Feingang	0,0833	[m/s]

Geschwindigkeit Katzfahren Hauptgang	0,333	[m/s]
Beschleunigung Katzfahren	0,13	[m/s ²]
Verzögerung Katzfahren	0,15	[m/s ²]
Ruck Katzfahren	0,5	[m/s ³]

Die dargestellten Parameter dienen als Ausgangsbasis für die Berechnung der Spielzeiten in den einzelnen Kranaufgaben und den während dieser Aufgaben notwendigen Energiebedarf.

Variante B:

Die Variante B besitzt im Vergleich zur Variante A frequenzgeregelter Antriebe für das Hubwerk, die Kranfahrwerke und die Laufkatze. Die Basisdaten für das Hubwerk dieser Antriebsvariante werden in Tabelle 8-5 dargestellt.

Tabelle 8-5: Parameter Antriebsvariante B für das Hubwerk

	Parameter	Einheit
Motorbauart Hubwerk	Frequenzgeregelter Antrieb mit Nutzung Feldschwächebereich, keine Rückspeisung	[-]
Einscherung	4/1	[-]
Nennleistung Motor	4,5	[kW]
Übersetzung Getriebe	94	[-]
Geschwindigkeit Hubwerk Hauptgang	2,5	[m/s]
Beschleunigung Hubwerk	0,1	[m/s ²]
Ruck Hubwerk	0,5	[m/s ³]

In dieser Variante wird im Hubwerk ein frequenzgeregelter Antrieb eingesetzt, der in der Lage ist, den Feldschwächebereich zu nutzen und so geringe Lasten schneller als die Nennhubgeschwindigkeit zu heben und damit Zeit einzusparen. Eine Rückspeiseeinheit wird in der vorgestellten Variante nicht verbaut, vielmehr wird die beim Lastsenken anfallende Energie in einem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Als Basisdaten für die Berechnungsmodelle dienen die kinematischen Parameter

(Geschwindigkeit, Beschleunigung und Anfahrdruck) sowie die Nennleistung und die notwendige Übersetzung des Getriebes. Neben dem Hubwerk sind in dieser Konfiguration auch die Antriebe für das Kranfahren und das Katzfahren als frequenzgeregelte Antriebe ausgeführt. Im Unterschied zum Hubwerk wird beim Kran- und Katzfahren der Feldschwächebereich des Antriebs nicht genutzt, sondern stufenlos bis zur Nenngeschwindigkeit gefahren. Eine Rückspeisung von Energie aus dem Fahrbetrieb ist nicht vorgesehen. In Tabelle 8-6 ist die Übersicht der verwendeten Parameter für das Kranfahren dargestellt.

Tabelle 8-6: Parameter Antriebsvariante B für das Kranfahren

	Parameter	Einheit
Motorbauart Kranfahrwerke	Frequenz geregelter Antrieb ohne Rückspeisung	[-]
Nennleistung Motor	2 x 2,1	[kW]
Übersetzung Getriebe	44,4	[-]
Geschwindigkeit Kranfahren	0,533	[m/s]
Beschleunigung Kranfahren	0,12	[m/s ²]
Ruck Kranfahren	0,5	[m/s ³]

Analog dem Kranfahren zeigt Tabelle 8-7 die Daten der Variante B des Krans für das Katzfahren. Die für die Berechnung notwendigen Parameter entsprechen dabei denen für das Kranfahren.

Tabelle 8-7: Parameter Antriebsvariante B für das Katzfahren

	Parameter	Einheit
Motorbauart Katze	Frequenz geregelter Antrieb	[-]
Nennleistung Motor	2,1	[kW]
Übersetzung Getriebe	46	[-]
Geschwindigkeit Katzfahren	0,416	[m/s]
Beschleunigung Katzfahren	0,093	[m/s ²]
Ruck Katzfahren	0,5	[m/s ³]

Die vorgestellten Daten entsprechen im Wesentlichen den Informationen, die für das Energiebedarfsmodell und das Mehrkörpermodell verwendet werden. Wirtschaftliche Aspekte werden in Abschnitt 8.1.4 und die Ergebnisse des Fallbeispiels in Kapitel 8.2 vorgestellt.

8.1.3 Definition der Kranaufgaben

Die Definition der Aufgaben des Krans erfolgen wie in Kapitel 4 beschrieben auf Basis der Vorgaben aus der [DIN EN 13001-1] durch den Anwender des Krans. Im Unterschied zur Definition der Norm erfolgen die Kranspiele nach einer etwas praxisnäheren Aufteilung, die auch für dieses Fallbeispiel zur Anwendung kommen soll. Der Kran fährt hierbei von einer festen Parkposition der Halle zur Last, nimmt diese auf und transportiert sie zu einem vorgegebenen Abgabepunkt. Anschließend kehrt der Kran im Lehrhakenbetrieb wieder an seine Ausgangsposition zurück und wartet dort, bis die nächste Aufgabe beginnt. Die zurückgelegten Wegstrecken ändern sich damit nicht, lediglich die Aufteilung der einzelnen Bewegungsabschnitte weicht ab. Im Endergebnis wird dieselbe Spielzeit ermittelt. Als Ausgangspunkt wird im Fallbeispiel die Mitte der Kranbrücke für die Katze festgelegt und der Haken einen Meter unter der Kranbrückenunterkante positioniert. Die Kranbrücke selbst steht am Ausgangspunkt an einer Hallenseite. Die Daten werden aufgabenbezogen für die gesamte Betriebszeit des Krans erfasst. Das gesamte Aufgabenspektrum des Krans sowie die Lasten und Verfahrswege für das Fallbeispiel ist in Anhang A festgehalten. Tabelle 8-8 zeigt das Format für die Erfassung der einzelnen Kranaufgaben durch den Nutzer.

Tabelle 8-8: Definition der Kranaufgaben

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
1	1	0	0 – 8	7,5 – 7,55	0 – 0	0
1	2	0	8 – 8	7,5 – 10,5	0 – 0	0
1	3	0	8 – 8	10,5 – 10,5	0 – 6	60
1	4	1500	8 – 8	10,5 – 10,5	6 – 5	0
1	5	1500	8 – 8	10,5 – 5,5	5 – 5	0
1	6	1500	8 – 8	5,5 – 5,5	5 – 5,5	60
1	7	0	8 – 8	5,5 – 5,5	5,5 – 0	0

1	8	0	8 – 0	5,5 – 5,5	0 – 0	0
1	9	0	0 – 0	5,5 – 7,5	0 – 0	0

Analog zu dieser Tabelle befindet sich im Anhang A eine vollständige Auflistung der Kranaufgaben für das Fallbeispiel. Die Aufgaben des Krans werden zur besseren Strukturierung beginnend mit 1 bis zur letzten Aufgabe durchnummeriert. Jede Aufgabe des Krans setzt sich aus unterschiedlichen Bewegungen entlang der Verfahrachsen x, y und z des Krans zusammen, welche mit 1 beginnend durchnummeriert werden. Jedem Bewegungsabschnitt wird eine Last zugeordnet, wobei es sich hierbei um die Gesamtmasse der Hublast inklusive Lasthaken und Anschlagmittel handelt. Die Positionen richten sich nach dem in Abschnitt 3 dargestellten Koordinatensystem. In der Tabelle werden dabei die Startposition und die Endposition des Lasthakens bezüglich des Koordinatenursprungs dargestellt. Als Nomenklatur ergibt sich damit bspw. z_{11} als Positionsänderung in z-Richtung für die Aufgabe 1 und den Abschnitt 1. Dies entspricht dem Anheben einer Last vom Ausgangsniveau von 2 m auf 4 m in diesem Beispiel. In der Spalte Wartezeit wird eine Zeitspanne angegeben, die zwischen den einzelnen Bewegungen gewartet wird, bis der nächste Bewegungsabschnitt startet. Die ausführliche Darstellung der Kranaufgaben für das Fallbeispiel kann dem Anhang C entnommen werden. Da dieses Fallbeispiel lediglich dem Funktionsnachweis dient, basieren die gewählten Daten nicht auf einer statistischen Erhebung, sondern sind frei gewählt.

8.1.4 Basisdaten für die Kostenbetrachtung

Hinsichtlich der Basisdaten für die Kostensätze erfolgt eine Aufteilung in kranspezifische Aspekte, die sich jeweils nur auf eine Antriebsvariante beziehen, wie z. B. die Anschaffungskosten und allgemeine Aspekte, die für alle untersuchten Varianten gleich angenommen werden können. Dies betrifft Kostenarten wie die Arbeitskosten je Stunde und die Stromkosten.

Allgemeine Daten

Die Darstellung der für die Berechnung notwendigen Basisdaten erfolgt in tabellarischer Form, wobei zwischen Kostendaten und weiteren allgemeinen Festlegungen unterschieden werden muss. Tabelle 8-9 gibt in dieser Hinsicht einen Überblick über die allgemein notwendigen Parameter und die maßgeblichen Kostenaspekte für beide Varianten.

Tabelle 8-9: Allgemeine Daten und Daten für die Anlieferung

Parameter	Wert / Randbedingung	Einheit
Nutzungsdauer	20	Jahre
Retrofit vorgesehen	Nein	[-]
Kalkulatorischer Zinssatz	2,5	[%]
Stromkosten im Basisjahr	0,20	[€/kWh]
Jährliche Zunahme Stromkosten	1,6	[%]
Arbeitskosten im Basisjahr	38,00	[€/h]
Jährliche Zunahme Arbeitskosten	1,6	[%]
Anlieferung, Installation und Aufbau	Hersteller	[-]
Wartung und Instandhaltung	Externer Anbieter	[-]
Jährlich wiederkehrende Kranprüfung	Externer Anbieter	[-]
Außerbetriebnahme, Abbau und Abtransport	Externer Anbieter	[-]
Transportentfernung Kran	400	[km]
Transportmittel	1 LKW 7,5 t – 16t, EURO VI	
	1 LKW <=7,5t, EURO VI	[-]
	1 LNF Diesel, EURO 5	
Aufbauhilfsmittel	1 Kran (80 to), Stufe 4	
	1 Hebebühne	[-]
	1 Gabelstapler	
Einsatzzeit Kran für Aufbau	3	[h]
Einsatzzeit Hebebühne	4	[h]
Einsatzzeit Gabelstapler	4	[h]
Anfahrt Kran	80	[km]
Transportentfernung Hebebühne	40	[km]

Für den betrachteten Kran wird als Randbedingung festgelegt, dass die Anlieferung mithilfe eines LKWs und eines Transporters mit der entsprechenden Entfernung erfolgt. Für den Aufbau werden als Montagehilfsmittel ein Fahrzeugkran der 80 t-Klasse sowie eine Hebebühne vorgehalten, für die die Anfahrten und die Einsatzzeit als Randbedingung dienen. Die Nutzungsdauer wird für die vorliegende, modellhafte Betrachtung mit 30 Jahren festgelegt und in dieser Zeit keine Modernisierungs- bzw. Überarbeitungsmaßnahmen am Kran vorgesehen, welche die Leistung verbessern. Der kalkulatorische Zinssatz zur Abzinsung auf den Barwert wird nach mit 2,5 % festgelegt. Die Stromkosten werden nach dem Verbrauch mit 0,20 €/kWh veranschlagt und die Arbeitskosten mit 38,00 €/h [Sta-2015]. Für beide Varianten sind die Transportkosten für die Anlieferung, den Aufbau und die Installation im Angebot des Kranherstellers enthalten. Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sowie die jährlich wiederkehrende Kranprüfung werden durch einen externen Anbieter übernommen. Gleiches gilt für den Abbau, den Abtransport und die Entsorgung, die ebenfalls durch externe Anbieter auf Basis eines entsprechenden Angebots quantifiziert werden. Weitere Kosten hinsichtlich der Infrastruktur und Anpassungen an der baulichen Substanz des Gebäudes werden für das Fallbeispiel ausgeklammert. Daten für Transporte und Aufbauarbeiten werden gemäß den in Tabelle 8-9 getroffenen Festlegungen einbezogen.

8.1.5 Basisdaten für die Ökobilanzierung

Analog zur Herangehensweise für die Kostenbetrachtung werden im Rahmen der Ökobilanzierung Datensätze benötigt, die für beide betrachteten Varianten gleichermaßen gelten. Diese Daten sind in Tabelle 8-10 in der Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 8-10: Allgemeine Daten für die Wartung und Instandhaltung

Parameter	Wert / Randbedingung	Einheit
Transportmittel	1 LKW, <= 7,5 t	[-]
	1 Transporter, DIESEL, EURO 4	
Hilfsmittel	1 Hebebühne	[-]
Einsatzzeit Hebebühne	1	[h]
Transportentfernung Hebebühne	40	[km]
Anfahrt Kranprüfer	25	[km]

Basisdaten für die Anlieferung und den Aufbau des Krans sind bereits in Tabelle 8-9 dargestellt. Für die jährlich stattfindende Kranprüfung wird unterstellt, dass eine ge-

eignete Hebebühne zur Verfügung stehen muss. Dabei wird angenommen, dass diese ausgeliehen wird und die gleiche Transportentfernung wie für die Aufbau- und Installationsarbeiten gilt. Hinsichtlich der Wartung- und Instandhaltungsmaßnahmen wird als Randbedingung angesetzt, dass die Anfahrt mithilfe eines Transporters vollzogen und gemäß den Herstellervorgaben durchgeführt wird. Weitere Hilfsmittel wie Krane oder Flurförderzeuge werden im Rahmen dieses Fallbeispiels nicht betrachtet. Für den Abbau des Krans wird analog zum Aufbau vorgegangen und die in Tabelle 8-11 gezeigten Datensätze verwendet.

Tabelle 8-11: Allgemeine Daten für den Abbau des Krans

Parameter	Wert / Randbedingung	Einheit
Transportmittel	1 LKW, <= 7,5 t 1 Transporter, DIESEL, EURO 4	[-]
Hilfsmittel	1 Hebebühne	[-]
Einsatzzeit Kran	4	[h]
Einsatzzeit Hebebühne	2	[h]
Einsatzzeit Gabelstapler	2	[h]
Transportentfernung Hebebühne	60	[km]
Anfahrt Kran	60	[km]

8.2 Ergebnisse aus dem Fallbeispiel

Die an dieser Stelle vorgestellten Ergebnisse aus dem Fallbeispiel beziehen sich auf die Gesamtbewertung der Antriebssysteme mithilfe der entwickelten Methodik und Einbeziehung der Lebenszykluskosten und externer Umweltkosten. Die Daten für die anfallenden Kosten vor und nach der Nutzung werden in Zusammenarbeit mit der Herstellerindustrie ermittelt und dienen in diesem Fall der Vorstellung der Funktionsweise des entwickelten Vorgehensmodells. Eine Ableitung allgemein gültiger Aussagen ist auf diese Weise nicht möglich. Dies entspricht im Wesentlichen auch der in [Bra-2016a] durchgeführten Untersuchung, bei der eine Einteilung in unterschiedliche Nutzungskategorien für Krane vorgenommen und auf dieser Basis Energieeffizienzmaßnahmen im Antrieb beurteilt werden. Die Ergebnisse werden zunächst für die untersuchten Varianten getrennt berechnet und anschließend miteinander vergli-

chen. Dabei erfolgt die Auswertung nicht nur im Rahmen des Gesamtergebnisses für die Kosten, vielmehr werden die anfallenden Kosten zeitabhängig aufbereitet.

8.2.1 Ergebnisse für die Variante A

Die Berechnung der Ergebnisse erfolgt nach der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Vorgehensweise. Zunächst werden die Lebenszykluskosten in der Kategorie „vor der Nutzung“ für die entsprechenden Kostenarten ermittelt.

Lebenszykluskosten vor der Nutzung

Die Kostenarten in dieser Phase entsprechen der in Abschnitt 7.2.1 aufgestellten Aufbruch-Struktur. Die entsprechenden Daten für die Variante A sind in Tabelle 8-12 zusammengefasst.

Tabelle 8-12: Spezifische Parameter Variante A vor der Nutzung für Variante A

Parameter	Wert	Einheit	Kostenart (Kurzbeleg)
Anschaffungskosten	33.305,00	[€]	vdN.2
Transportkosten	0	[€]	vdN.2
Installation und Aufbau	0	[€]	vdN.2
Gesamtkosten vor der Nutzung:	33.305,00 [€]		

Sämtliche anfallenden Kosten, die sich neben dem Anschaffungspreis des Kranes auch aus den Transporten und der Installation zusammensetzen, sind im Rahmen des Fallbeispiels als Teil eines Gesamtangebots des Kranherstellers angenommen, Bauliche Anpassungen am Gebäude und an der Infrastruktur werden an dieser Stelle ausgeklammert.

Lebenszykluskosten während Nutzung

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus den Teilmodulen für die Nutzungsphase des Krans dargestellt. Diese Ergebnisse werden auf Basis der in Abschnitt 8.1 definierten Basisdaten erstellt und betreffen in erster Linie die Arbeitskosten und die Energiekosten während der Nutzungsdauer. Diesbezüglich sind in Tabelle 8-13 die jährlichen Ergebnisse für diese Kostenarten und die Gesamtkosten am Ende der Nutzungsdauer dargestellt.

Tabelle 8-13: Ergebnisse aus dem Arbeits- und dem Energiekostenmodul Variante A

Parameter	Wert	Einheit
Jährliche Arbeitszeit	77,82	[h]
Arbeitskosten während der Nutzungsdauer	69.059,93	[€]
Jährlicher Energiebedarf	46,74	[kWh]
Energiekosten während der Nutzungsdauer	218,29	[€]

In der Gesamtbetrachtung werden die Kosten entsprechend der Kapitalwertmethode auf das Basisjahr abgezinst. In Abhängigkeit des Jahres, in dem die Kosten anfallen, werden auch die jährlichen Steigerungen in den Arbeits- und Stromkosten berücksichtigt. Neben den Energie- und Arbeitskosten spielen in der Phase der Nutzung vor allem Kosten für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen eine entscheidende Rolle. Die im Rahmen des vorliegenden Beispiels angenommenen Randbedingungen in dieser Hinsicht werden in Tabelle 8-14 dargestellt und den entsprechenden Kostenarten zugewiesen.

Tabelle 8-14: Spezifische Parameter Variante A vor der Nutzung

Parameter	Wert	Einheit	Kostenart (Kurzbeleg)
Jährliche Kranprüfung	500	[€]	wdN.2
Geplante jährliche Wartungsarbeiten	0	[€]	wdN.4

Es wird von einer jährlichen Kranprüfung ausgegangen, die von einem externen Anbieter auf Basis eines Angebots durchgeführt wird. Die geplanten jährlichen Wartungsarbeiten auf Basis der Herstellervorgaben werden durch diesen selbst durchgeführt. Zusammenfassend werden in Tabelle 8-15 die Gesamtkosten während der Nutzung dargestellt.

Tabelle 8-15: Gesamtkosten Variante A während der Nutzung (nicht abgezinst)

Gesamtkosten während der Nutzung:	79.278,22 [€]
-----------------------------------	---------------

Lebenszykluskosten nach der Nutzung

Die Aufbruch-Struktur der Kosten wurde bereits in Abschnitt 7.2.3 vorgestellt, wobei im Rahmen des Fallbeispiels nicht alle Kostenarten benötigt werden. Die an dieser Stelle behandelten Kosten werden in Tabelle 8-16 dargestellt.

Tabelle 8-16: Spezifische Parameter Variante A nach der Nutzung

Parameter	Wert	Einheit	Kostenart (Kurzbeleg)
Verkaufserlös:	8.000	[€]	ndN.1
Abbau und Demontage:	0	[€]	ndN.5
Abtransport:	0	[€]	ndN.7
Entsorgungskosten:	0	[€]	ndN.8
Gesamtkosten nach der Nutzung:	8.000 [€]		

Im Rahmen des Fallbeispiels wird davon ausgegangen, dass der Kran als Ganzes verkauft wird und der Käufer sich um den Abbau und den Abtransport der Krananlage bemühen muss.

Ökobilanzierung Variante A

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus der Ökobilanzierung für die Variante A in den festgelegten Wirkungskategorien dargestellt. Tabelle 8-17 zeigt die Ergebnisse in der Übersicht.

Tabelle 8-17: Ergebnis der Ökobilanzierung für Variante A

Wirkungskategorie	Wert	Einheit
Treibhausgaspotenzial	7.090	[kg]

Umweltkosten Variante A

Wie in Abschnitt 7.3 bereits dargestellt, erfolgt die Berechnung der externen Umweltkosten auf Basis des Treibhausgasäquivalents. Hierzu werden die jährlichen Kosten auf Basis des Treibhausgasäquivalents ermittelt und auf das Basisjahr der Betrachtung abgezinst. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Tabelle 8-18 dargestellt.

Tabelle 8-18: Externe Umweltkosten Variante A

Externe Umweltkosten Variante A:	245,50 €
---	-----------------

Bereits hier lässt sich erkennen, dass für die Variante A die externen Umweltkosten, welche in die Gesamtkostenrechnung miteinbezogen werden im Vergleich zu den Arbeitskosten und zu den Investitionen nur eine geringe Rolle spielen.

8.2.2 Ergebnisse für die Variante B

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Lebenszyklus- und der Umweltkosten gleicht im Vorgehen der Berechnung für die Variante A, so dass in den folgenden Abschnitten nur auf die spezifischen Details, die sich unterscheiden, eingegangen wird. Die Aufbereitung der Ergebnisse ist dabei äquivalent zu Abschnitt 8.2.1 gewählt.

Lebenszykluskosten vor der Nutzung

Die in der Phase vor der Nutzung betrachteten Kostenarten unterscheiden sich nicht von der Variante A, so dass in Tabelle 8-19 die entsprechenden Werte für die Variante B angegeben werden.

Tabelle 8-19: Spezifische Parameter Variante B vor der Nutzung

Parameter	Wert	Einheit	Kostenart (Kurzbeleg)
Anschaffungskosten	38.305,00	[€]	vdN.2
Transportkosten	[-]	[€]	vdN.2
Installation und Aufbau	[-]	[€]	vdN.2

Da es sich bei der Variante B um einen Kran mit frequenzgeregelten Antrieben handelt, sind die Anschaffungskosten zunächst höher. Die Transport- und Installationskosten sind im Gesamtangebot des Herstellers enthalten, so dass im Rahmen dieses Fallbeispiels keine separate Ausweisung erfolgt. Zusätzlich wird vom gleichen Aufbauort wie bei der Variante A ausgegangen, sodass sich für den Transport und die Installation keine Unterschiede zwischen den betrachteten Varianten ergeben.

Lebenszykluskosten während Nutzung

Die Lebenszykluskosten während der Nutzung betreffen im Rahmen des Fallbeispiels neben den Energie- und Personalkosten vor allem die Wartungs- und Instandhaltungskosten. Tabelle 8-20 zeigt hierzu zunächst die Übersicht über die Energie- und Arbeitskosten für Variante B.

Tabelle 8-20: Ergebnisse aus dem Arbeits- und dem Energiekostenmodul Variante B

Parameter	Wert	Einheit
Jährliche Arbeitszeit	68,99	[h]
Arbeitskosten während der Nutzungsdauer	61.223,42	[€]
Jährlicher Energiebedarf	76,57	[kWh]
Energiekosten während der Nutzungsdauer	357,63	[€]

Die Arbeitskosten während der Nutzung stellen bereits den auf das Basisjahr abgezinnten Barwert nach der Kapitalwertmethode dar. Der jährliche Energiebedarf wird auf Basis der Kranaufgaben mithilfe des Simulationsmodells in MATLAB / Simulink berechnet und die Kosten mithilfe des entsprechenden Strompreises bestimmt. Auch diese Gesamtkosten stellen bereits den abgezinnten Wert dar. Die jährliche Kranprüfung und die geplanten jährlichen Instandhaltungskosten werden analog zur Variante A betrachtet und in Tabelle 8-21 demonstriert.

Tabelle 8-21: Kosten für die jährliche Kranprüfung für Variante B

Parameter	Wert	Einheit	Kostenart (Kurzbeleg)
Jährliche Kranprüfung	500	[€]	wdN.2
Geplante jährliche Wartungsarbeiten	0	[€]	wdN.2

Aus den dargestellten Kostenarten werden mithilfe der Kapitalwertmethode die gesamten Lebenszykluskosten für die Phase der Nutzung für die Variante B berechnet. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Tabelle 8-22 dargestellt.

Tabelle 8-22: Gesamtkosten Variante B während der Nutzung (nicht abgezinst)

Gesamtkosten während der Nutzung:	71.580,63 [€]
--	----------------------

Lebenszykluskosten nach der Nutzung

Die betrachteten Kostenarten für die Variante B sind äquivalent zur Variante A gewählt und in Tabelle 8-23 dargestellt.

Tabelle 8-23: Spezifische Parameter Variante B nach der Nutzung

Parameter	Wert	Einheit	Kostenart (Kurzbeleg)
Verkaufserlös:	9.130	[€]	ndN.1
Abbau und Demontage:	0	[€]	ndN.5
Abtransport:	0	[€]	ndN.7
Entsorgungskosten:	0	[€]	ndN.8
Gesamtkosten nach der Nutzung:	9.130 [€]		

Da der Aufbau des Krans in dieser Variante hinsichtlich der gewählten Antriebstechnik sich deutlich von der Variante A unterscheidet, ergeben sich auch andere Werte in den einzelnen Kostenarten vor allem hinsichtlich eines möglichen Verkaufserlöses und auch der Entsorgungskosten.

Ökobilanzierung Variante B

Tabelle 8-24 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanzierung für die Variante B des betrachteten Krans mit frequenzgeregelten Antrieben. Diese Daten werden als Basis für die Berechnung der externen Umweltkosten verwendet.

Tabelle 8-24: Ergebnis Ökobilanzierung Variante B für das Treibhauspotenzial

Wirkungskategorie	Wert	Einheit
Treibhausgaspotenzial	8.010	[kg]

Umweltkosten Variante B

Auf Basis des Erderwärmungspotenzials in Tabelle 8-24 werden die externen Umweltkosten analog zur Variante A abgeschätzt und in die Gesamtberechnung der Lebenszykluskosten einbezogen. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in Tabelle 8-25 dargestellt.

Tabelle 8-25: Externe Umweltkosten Variante B

Externe Umweltkosten Variante B:	261,25 €
---	----------

Im Ergebnis zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei Variante A. Die externen Umweltkosten tragen nur einen sehr kleinen Anteil verglichen mit den Investitions- und Arbeitskosten zu den Gesamtkosten bei.

8.2.3 Variantenvergleich

Am Ende der Lebenszykluskostenberechnung steht an dieser Stelle der Vergleich der beiden Varianten A und B. Hierzu erfolgt in Tabelle 8-26 eine Gegenüberstellung der Ergebnisse, wobei in beiden Varianten auch die externen Umweltkosten bereits einbezogen sind.

Tabelle 8-26: Vergleich Lebenszykluskosten (auf Basisjahr abgezinst)

	Gesamtkosten	Einheit
Variante A:	90.098,46	[€]
Variante B:	88.297,00	[€]

Trotz des geringeren Grundpreises und der vorhandenen Energierückspeisung ist im abschließenden Vergleich auf Basis der Lebenszykluskosten die Variante A teurer als die Variante B mit frequenzgeregelten Antrieben. Diese Tatsache ist vor allem dem gewählten Einsatzspektrum des Krans geschuldet. Hier erweist sich die Variante B als deutlich effizienter beim Handling der Lasten, so dass sich insgesamt deutlich geringere Arbeitskosten ergeben. Die Energiekosten sowie die externen Umweltkosten unterscheiden sich nur in geringerem Umfang, so dass diese Anteile keinen entscheidenden Einfluss auf das Endergebnis ausüben.

Neben den Absolutwerten für die Kosten ist auch die Verteilung über die Lebensdauer des Krans von Interesse. In dieser Hinsicht zeigt Abbildung 8-1 die in den einzelnen Jahren anfallenden Kosten für jede Variante im Vergleich.

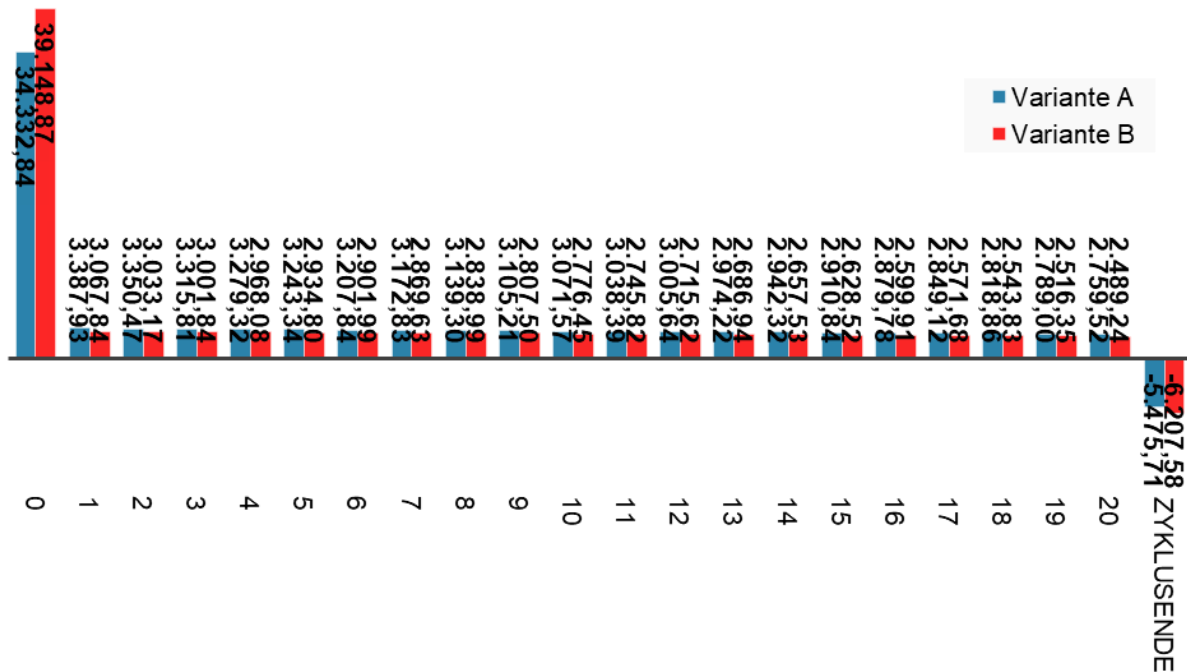


Abbildung 8-1: Kostenvergleich in Abhängigkeit von der Nutzungszeit

Im Jahr „null“ treten anfänglich die Investitionskosten und die Umweltkosten auf, die bei Variante B aufgrund der aufwändigeren Antriebstechnik jeweils höher ausfallen als bei Variante A. In den folgenden Jahren während der Nutzung des Krans stehen vor allem die Arbeits- energie- und Wartungs- und Instandhaltungskosten im Vordergrund. Am Ende der Lebensdauer erfolgt der Verkauf des gesamten Krans abzüglich der Kosten für den Abbau und notwendige Demontearbeiten. Durch die unterschiedlichen Antriebssysteme ergeben sich in den jährlich anfallenden Kosten Unterschiede, die über die Nutzungsdauer des Krans dazu führen, dass der Vorteil in den Anschaffungskosten von Variante A aufgezehrt wird. In Abbildung 8-2 sind in dieser Hinsicht die Differenzkosten aus beiden Varianten in Abhängigkeit von der Nutzungszeit dargestellt.

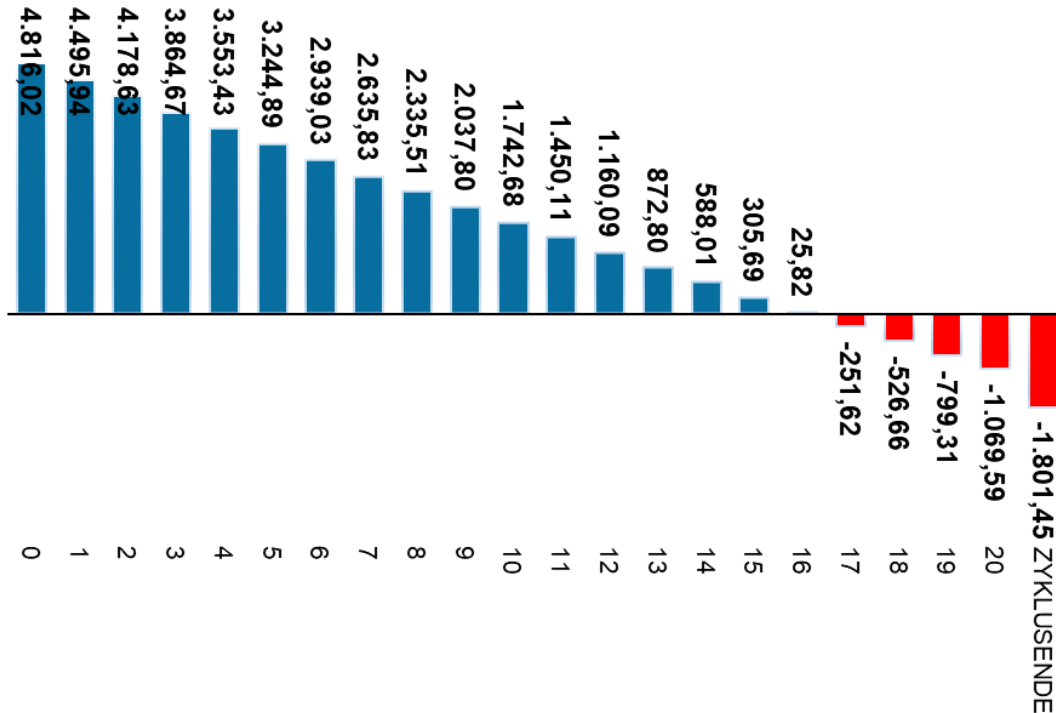


Abbildung 8-2: Lebenszykluskostendifferenz in Abhängigkeit von der Nutzungszeit

Daraus geht deutlich hervor, dass der Kostenvorteil der Variante A im Lauf der Nutzungsdauer langsam abgebaut wird und am Ende die Variante B vor allem durch die effizientere Arbeitsweise und die damit verbundenen geringeren Arbeitskosten die bessere Wahl in diesem Fallbeispiel darstellt.

8.3 Fazit aus dem Fallbeispiel

Im Rahmen des Fallbeispiels wurden die Funktion und die Anwendung des entwickelten Verfahrens aufgezeigt und beschrieben. Da es sich bei einer Krananlage immer um eine speziell auf den Anwendungsfall zugeschnittene Lösung handelt, lassen sich an dieser Stelle nur wenig allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten für die Antriebsauswahl ableiten. Insgesamt können jedoch Aspekte, welche auch in [Gol-2012] und [Bra-2016a] behandelt wurden, bestätigt werden:

- **Arbeitskosten:**

Hinsichtlich der Arbeitskosten bieten frequenzgeregelter Antriebe Vorteile gegenüber einem polumschaltbaren Motor. Diese Tatsache kommt zum einen durch den feinfühligere Bewegungsablauf und die damit verbundenen kürzeren Ausschwingzeiten der Last am Ende eines Spiels zustande, zum anderen durch die generelle stufenlo-

se Steuerung. Damit ist es möglich die maximale Arbeitsgeschwindigkeit im Fahrtrieb etwas höher zu wählen und damit die Spielzeiten zu reduzieren.

– **Energiekosten:**

Die in [Bra-2016a] getroffene Aussagen, dass ein polumschaltbarer Antrieb wegen der generellen Rückspeisefähigkeit energetische gesehen Vorteile gegenüber einem frequenzgeregelten Antrieb mit Bremswiderstand bietet, konnte auch im Rahmen des Fallbeispiels verifiziert werden. Erst mit dem Einsatz einer Rückspeiseeinrichtung, welche die beim Senken von Lasten anfallende Energie für weitere Verbraucher nutzbar macht, ergibt sich eine Verbesserung der Energiekosten. Beim gewählten Einsatzszenario im Rahmen des Fallbeispiels spielen die Energiekosten allerdings generell eine untergeordnete Rolle und werden von den Investitionskosten und den Arbeitskosten bei weitem übertroffen. Diese Aussage deckt sich damit auch mit den von *Repo et al.* in [Rep-2014] vorgestellten Ergebnissen, bei denen der Einfluss unterschiedlicher Konstruktions- und Materialparameter auf die Energieeffizienz von Hubwerksmotoren untersucht wurde. Dabei wurde festgestellt, dass in der Gesamtkostenbetrachtung eine Verbesserung der Energieeffizienz bei Kranen mit geringem Einsatzumfang (Lastkollektiv L1) keine signifikanten Kostenvorteile hervorruft.

– **Umweltkosten:**

Bei dem gewählten Fallbeispiel einer Krananlage im Werkstattbetrieb mit einer überschaubaren Anzahl an Arbeitsspielen sind die Unterschiede in den Umweltkosten lediglich gering. Unterschiede ergeben sich allenfalls aus dem Energiebedarf und der Herstellung, die bei einem frequenzgeregelten Antrieb aufwändiger gestaltet ist. Generell ist der Anteil der Umweltkosten, die im Rahmen der Betrachtung internalisiert werden, verglichen mit den Investitions- und vor allem den Arbeitskosten vergleichsweise gering, so dass es im Sinne der Kosten sinnvoll ist, in erster Linie diese Kostenarten in den Fokus zu rücken.

Insgesamt gesehen spielen bei dem gewählten Fallbeispiel lediglich die Investitions- und die Arbeitskosten eine signifikante Rolle, wohingegen die Kosten für die Energie und die umweltbedingten Folgekosten nur einen kleineren Anteil einnehmen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und die erzielten Ergebnisse mit den aufgestellten Forschungsfragen verglichen. Der Ausblick dient dazu, weitere Forschungsbedarfe auf dem bearbeiteten Gebiet darzustellen.

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, mit der die Auswahl der Antriebstechnik in Industriekrananlagen gleichermaßen nach ökologischen als auch ökonomischen Aspekten gewährleistet wird. Hierzu wurde eine zentrale Forschungsfrage formuliert und in sich abgeschlossene Teilfragestellungen untergliedert, welche im Folgenden nochmals aufgegriffen werden. Die Ergebnisse der Arbeit werden an diesen Fragen gespiegelt. Hinsichtlich der wirtschaftlichen Bewertung wurde folgende Teilfragestellung formuliert:

„Wie kann die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Antriebstechniken für Industriekrananlagen in einem ökonomischen Blickwinkel charakterisiert und quantifiziert werden?“

Um eine ökonomische Betrachtung entlang des gesamten Lebenswegs einer Krananlage gewährleisten zu können, wurde das Verfahren der Lebenszykluskostenrechnung identifiziert. Die Lebenszykluskosten werden auf Basis eines modifizierten Modells nach [VDMA 34160] erfasst und vor allem für die Betriebsphase eigene Berechnungsmodelle entwickelt, mit denen sich der Energiebedarf und die Arbeitskosten bestimmen lassen. Dabei basiert das Modell zur Berechnung der Arbeitskosten auf einem Mehrkörpersystem, mit dem die Spielzeit für jedes einzelne Arbeitsspiel des Krans vorhergesagt werden kann. Zur Berechnung des Energiebedarfs wurde ein Modell in Matlab-Simulink erstellt, mit dem der Energiebedarf unterschiedlicher Antriebsvarianten auf Basis der vom Betreiber vorgegebenen Aufgaben prognostiziert werden kann. Als weitere Berechnungsgrundlagen werden Daten aus dem Angebot für den Kran und zur Instandhaltung und Wartung verwendet. Dabei wird hinsichtlich der Kostenstellen auch unterschieden, ob die Wartung vom Kranhersteller, einem externen Servicepartner oder durch das Unternehmen selbst durchgeführt wird. Am Ende der Lebensdauer werden mögliche Einnahmen durch den Wiederverkauf ebenso berücksichtigt wie Kosten für den Abtransport und die Entsorgung. Da die Kosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Lebensdauer des Krans

anfallen, erfolgt eine Abzinsung nach der Kapitalwertmethode auf das Basisjahr der Investition, um den tatsächlichen Barwert korrekt zu erfassen.

Die zweite Teilfragestellung adressiert die Charakterisierung und Quantifizierung der ökologischen Auswirkungen einer Krananlage.

„Wie unterscheiden sich verschiedene Antriebe in Industriekranen hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen und mit welchen Verfahren ist eine Quantifizierung erreichbar?“

Um analog zur wirtschaftlichen Betrachtung den gesamten Lebensweg der Krananlage analysieren zu können, wurde die Ökobilanzierung als Werkzeug gewählt. Hierzu wurde der Lebensweg der Krananlage strukturiert und für alle maßgeblichen auf dem Lebensweg auftretenden Prozesse und Arbeiten Modelle entwickelt, mit denen die Umweltwirkungen berechnet werden können. Zur Berechnung der Umweltwirkungen aus dem Energiebedarf und den Transporten wurden eigene Berechnungsmodelle erstellt, welche diese Aspekte quantifizieren. Dabei entspricht das Modell für den Energiebedarf dem Modell, das auch zur Kostenbetrachtung verwendet wird. Die Modelle für den Transport basieren zum einen auf der Fahrzeugkategorie einschließlich der entsprechenden Abgasnorm und der Transportentfernung. Eine ähnliche Herangehensweise hat sich für Aufbauhilfsmaschinen wie Krane und Hebebühnen bewährt, wobei hier die Einsatzstunden zur Berechnung des Energiebedarfs und damit der Umweltwirkungen herangezogen werden. Daten für die Materialauswahl und die Fertigung im Rahmen der Ökobilanzierung werden auf Basis des verwendeten Materials und der entsprechenden Fertigungsprozesse modelliert.

Die dritte Teilfragestellung adressiert eine gemeinsame Vergleichsbasis, mit der die wirtschaftlichen und die ökologischen Aspekte auf eine gemeinsame Vergleichsbasis gestellt werden können.

„Wie muss eine Basis gestaltet sein, mit der sowohl ökonomische als auch ökologische Aspekte unterschiedlicher Antriebe in Industriekranen einheitlich miteinander verglichen werden können?“

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde die Methodenkonvention 2.0 des Umweltbundesamtes als geeignetes Verfahren identifiziert, bei dem die ökologischen Aspekte nach einem klar definierten Schema in Kostensätze umgerechnet werden. Diese Umweltkosten werden internalisiert und den Lebenszykluskosten zugeschlagen, sodass am Ende sowohl eine Bewertung von ökologischen als auch ökonomischen Aspekten auf einer einheitlichen Basis möglich ist.

Mit den vorgestellten Lösungsansätzen ist es möglich, die übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten und damit unterschiedliche Antriebsvarianten für einen Kran zu vergleichen. Schlussendlich wird damit auch die an dieser Stelle nochmals aufgegriffene Forschungsfrage beantwortet.

„Wie kann eine gleichermaßen ökonomisch als auch ökologisch sinnvolle Auswahl der Antriebstechnik in Industriekrananlagen gewährleistet werden?“

Die Funktionsweise der entwickelten Modelle wurde anhand eines Fallbeispiels nachgewiesen. Innerhalb des Fallbeispiels erfolgte ein Vergleich zwischen direkt am Netz betriebenen, polumschaltbaren Antrieben mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen und Antrieben mit Frequenzumrichtern für alle Bewegungsrichtungen. Die generelle Vorgehensweise und die Modelle sind auf weitere Antriebssysteme übertragbar, die Parameter für die Modelle müssen für jeden Antrieb separat bestimmt werden. Damit und einhergehend mit der Tatsache, dass jeder Kran für unterschiedliche Anwendungen gebaut wird, ist eine allgemein gültige Aussage zur Auswahl der am besten passenden Antriebstechnik nur schwer möglich. Vielmehr ist es sinnvoll, das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Vorgehensmodell einzelfallspezifisch zu sehen und anzuwenden, um für eine konkrete Fragestellung die beste Auswahl treffen zu können.

9.2 Kritische Würdigung und Ausblick

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Aspekte betreffen vor allem die Ermittlung der Lebenszykluskosten und der externen Umweltkosten auf Basis spezifischer Berechnungsmodelle. Hierzu wurden erste Ansätze für den Kranbau entwickelt, wobei die Ergebnisse zunächst auf die Betrachtung des Kohlenstoffdioxidäquivalents als einer maßgeblichen Umweltwirkung beschränkt bleiben. Dieses Vorgehen ist sowohl der nicht hinreichend guten Datengrundlage für die Betrachtung weiterer Umweltwirkungen geschuldet als auch der Tatsache, dass in anderen Arbeiten [Gün-2015a, Gün-2016b] dem Treibhausgasäquivalent eine hohe Bedeutung beigemessen wird. Bei der Modellierung der Produktion des Krans wird auf eine vereinfachte Betrachtung zurückgegriffen.

Für zukünftige, auf diesem Gebiet anschließende Forschungsarbeiten, sollte vor allem die Berücksichtigung weiterer Wirkungskategorien neben dem Treibhausgasäquivalent im Vordergrund stehen. Zwar ist mit dem Treibhausgaspotenzial bereits ein maßgeblicher Faktor für ökologische Betrachtungen identifiziert, allerdings noch keine vollumfängliche Bewertung. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Krananlagen

bietet es sich für zukünftige Arbeiten an, auch moderne Regelungsalgorithmen mit in die Betrachtung aufzunehmen. Insbesondere sind an dieser Stelle Lastpendelregelungen und andere Positionieralgorithmen zu nennen. Erste Untersuchungen auf diesem Gebiet haben gezeigt, dass sich damit deutliche Einsparungen bei der Spielzeit ergeben und auch der Kranführer entlastet wird. Ein systematischer Vergleich kann an dieser Stelle Gegenstand weiterer Forschungsaktivitäten sein.

Literaturverzeichnis

- [ABB-2002a] ABB: Environmental Product Declaration Drive Low Voltage AC Drive for 400 frequency converter, 4 kW output. Herausgegeben von: ABB, 2002.
- [ABB-2002b] ABB: Environmental Product Declaration Drive Low Voltage ACS Drive 800 frequency converter, 18.5 kW output. Herausgegeben von: ABB, 2002.
- [ABB-2004] ABB: Environmental Product Declaration ABB Drive HVAC applications ACH550 frequency converter, 4 kW power Drive Low Voltage AC Drive. Herausgegeben von: ABB, 2004.
- [Alm-2008] Almeida, A. T. d.; Ferreira, F. J. T. E.; Fong, J.; Fonseca, P.: Lot 11 Motors. Studie, University of Coimbra. Coimbra, 2008.
- [Amb-2012] Amberger, M.; Fischer, G.; Günthner, W. A.: Umweltaspekte beim Betrieb von Brückenkrananlagen. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 52 (2012) 9, S. 450–452.
- [BGV-2001] BGV: Unfallverhütungsvorschrift Krane - D6BGV, 2001.
- [Bod-2011] Bode, M.; Bünting, F.; Geißdörfer, K.: Rechenbuch der Lebenszykluskosten. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag, 2011.
- [Bol-2017] Bolender, S.; Braun, M.; Golder, M.: Die modulare Kranbruecke. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 58 (2017) 9, S. 64–65.
- [Bon-2017] Bonfiglioli: Serie 300 industrial, 2017. URL: <http://pdf.directindustry.de/pdf/bonfiglioli/300-industrial-series/46-597070.html> (Aufruf am 09.03.2017).
- [Bor-2016] Bornschlegl, M.; Müller, A.; Bregulla, M.; Matwill, F.; Franke, J.: Lebenszyklusbetrachtungen im Planungsprozess. In: wt Werkstatttechnik online, Jg. 106 (2016) 1, S. 89–93.
- [Bra-2012] Braun, M.; Linsel, P.; Schönung, F.; Furmans, K.: Energiebetrachtung beim Lager- und Kommissioniervorgang. In: Zadek, H. (Hrsg): Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. Stuttgart: WGTL, 2012, S. 110–117.

- [Bra-2016a] Braun, M.; Bolender, S.; Kivelä, T.; Golder, M.: Einsatz von Energieeffizienzmaßnahmen im elektrischen Antriebsstrang von Kranen. In: Wehking, K.-H. (Hrsg): 12. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V.: Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), 2016, S. 1–8.
- [Bra-2016b] Braun, M.: Entwicklung, Analyse und Evaluation von Modellen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe, 2016.
- [Bre-1988] Bremer, H.: Dynamik und Regelung mechanischer Systeme. Stuttgart: Teubner, 1988.
- [Bre-1992] Bremer, H.; Pfeiffer, F.: Elastische Mehrkörpersysteme. Stuttgart: B.G. Teubner, 1992.
- [Bru-2010] Bruns, R.; Frenkel, A.: Umweltauswirkungen von Gabelstaplern. In: Logistra, Jg. 22 (2010) 4, S. 16–19.
- [Bru-2013] Bruns, R.; Schilling, T.; Frenkel, A.; Günthner, W. A.; Amberger, M.; Fischer, G.; Furmans, K.; Braun, M.; Linsel, P.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik. Forschungsbericht, Helmut-Schmidt-Universität; Technische Universität München; Karlsruher Institut für Technologie. Hamburg, München, Karlsruhe, 2013.
- [Bru-2016] Bruns, R.; Schilling, T.: Prognosemodell für den Energieverbrauch von Flurförderzeugen. In: Bruns, R.; Ulrich, S. (Hrsg): Tagungsband 11. Hamburger Staplertagung. Hamburg, 2016, S. 95–107.
- [Bun-1995] Bunzel, L.; Knöbel, W.: Nachweis sicherer Betriebsperioden (Safe Working Periods) für Kranhubwerke. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 35 (1995) 3, S. 115–116.
- [Bün-2009] Bunting, F.: Grundidee der Lebenszykluskosten. In: Schweiger, S. (Hrsg): Lebenszykluskosten optimieren. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2009, S. 36–50.
- [Bun-2015] Bundesministerium für Finanzen: AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter. Herausgegeben von: Bundesministerium für Finanzen, 2015. URL: http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-

- Tabellen/2000-12-15-afa-103.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (Aufruf am 08.04.2015).
- [Bun-2016] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Verordnung über die Vergabe öffentlicher Aufträge - VgV. In: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016.
- [Bur-2012] Burkhardt: Seilrollen. Herausgegeben von: Burkhardt GmbH, 2012.
- [Bus-2010] Busch, N.; Bruns, R.: Simulation der Querdynamik. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 50 (2010) 1, S. 34–36.
- [Däu-2007] Däumler, K.-D.; Grabe, J.: Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung. 12 Auflage. Herne: NWB, 2007.
- [Dau-2014] Daum, A.; Greife, W.; Przywara, R.: BWL für Ingenieurstudium und -praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [DEM-2013] DEMAG: Demag-Einträger-Laufkran für schnelle und unkomplizierte Montage, 2013. URL: <https://www.technische-logistik.net/demag-eintr%C3%A4ger-laufkran-f%C3%BCr-schnelle-und-unkomplizierte-montage> (Aufruf am 26.04.2016).
- [DEM-2016a] DEMAG: Der neue Demag V-Profilkran. Herausgegeben von: DEMAG AG, 2016.
- [DEM-2016b] DEMAG: Der Weg zum passenden Brückenkran. In: dhf, Jg. 62 (2016) 7, S. 42–43.
- [DEM-2016c] DEMAG: Radsatz DWS, 2016. URL: <http://www.demagcranes.de/Antriebstechnik/Radspektrum/Radsatz-DWS> (Aufruf am 09.03.2017).
- [DEM-2017a] DEMAG: Demag Antriebe. Herausgegeben von: DEMAG, 2017. URL: <http://www.demag-ku.de/DDS/servlet/com.demagcranes.dds.getPDF?IdentNr=20873244> (Aufruf am 09.03.2017).
- [DEM-2017b] DEMAG: Richtungsweisende Technologien vereint. In: Fördern und Heben, Jg. 67 (2017) 1, S. 38–39.

- [Deu-2012] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): Prüfung von Kränen - DGUV Grundsatz 309-001 Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), 2012.
- [Die-2008] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. In: wt Werkstatttechnik online, Jg. 98 (2008) 7, S. 640–645.
- [DIN 1025-4] DIN 1025--4:1994: Warmgewalzte I-Träger. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 15001-1] DIN 15001--1:1973: Krane - Begriffe, Einteilung nach der Bauart. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 15001-2] DIN 15001--2:1975: Krane - Begriffe, Einteilung nach der Verwendung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 15020] DIN 15020:1974: Hebezeuge - Grundsätze für Seiltriebe - Berechnung und Ausführung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 15401] DIN 15401:1982: Lasthaken für Hebezeuge - Einfachhaken - Rohteile. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 323] DIN 323:1974: Normzahlen und Normzahlreihen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN 8580] DIN 8580:2003: Fertigungsverfahren. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN CEN ISO/TS 14067] DIN CEN ISO/TS 14067:2014: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung und Kommunikation. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 12385-4] DIN EN 12385--4:2008: Drahtseile aus Stahldraht – Sicherheit – Teil 4: Litzenseile für allgemeine Hebezwecke. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 13001-1] DIN EN 13001--1:2015: Krane - Konstruktion allgemein - Teil 1: Allgemeine Prinzipien und Anforderungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.

- [DIN EN 13001-3-3]DIN EN 13001--3-3:2015: Krane –Konstruktion allgemein – Teil 3-3: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Laufrad/Schiene-Kontakten. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 13306]DIN EN 13306:2015: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 14492-2] DIN EN 14492--2:2010: Krane – Kraftgetriebene Winden und Hubwerke – Teil 2: Kraftgetriebene Hubwerke. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 15011]DIN EN 15011:2014: Krane – Brücken- und Portalkrane;. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 15804]DIN EN 15804:2014: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauwerke. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 15978]DIN EN 15978:2012: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 1993-6] DIN EN 1993--6:2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN 60300-3-3]DIN EN 60300--3-3:2014: Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden – Lebenszykluskosten. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN ISO 12944-5] DIN EN ISO 12944--5:2008: Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme – Teil 5: Beschichtungssysteme. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN ISO 14040] DIN EN ISO 14040:2009: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [DIN EN ISO 14042] DIN EN ISO 14042:2000: Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.

- [DIN EN ISO 14044] DIN EN ISO 14044:2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth.
- [Dre-2015a] Dreier, J.: Betriebskosten im Griff. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 55 (2015) 11, S. 584–587.
- [Dre-2015b] Dreier, J.; Wehking, K.-H.: Lebenszykluskosten von elektrischen Antriebssystemen in intralogistischen Fördertechnikanlagen. In: Noche, B. (Hrsg): 11. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL): WGTL, 2015, S. 1–14.
- [Eck-2014] Eckert, P.; Rakowski, S.: Schadstoffbildung und -reduktion. In: Merker, G. P.; Teichmann, R. (Hrsg): Grundlagen Verbrennungsmotoren. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014, S. 471–523.
- [Ell-1993] Ellram, L. M.: A Framework for Total Cost of Ownership. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, Jg. 4 (1993) 2, S. 49–60.
- [Ell-1995] Ellram, L. M.; Maltz, A. B.: The Use of Total Cost of Ownership Concepts to Model the Outsourcing Decision. In: The International Journal of Logistics Management, Jg. 6 (1995) 2, S. 55–66.
- [Ert-2013a] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil 1: Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: Fördern und Heben, Jg. 63 (2013) 6, S. 12–15.
- [Ert-2013b] Ertl, R.; Günthner, W. A.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil 2: Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: Fördern und Heben, Jg. 63 (2013) 8, S. 12–15.
- [Ert-2016] Ertl, R.: Energiebedarfsermittlung und Energieeffizienzbewertung von Regalbediengeräten in automatischen Kleinteilelagern. Dissertation, Technische Universität München. München, 2016.
- [Eur-1999] Europäische Kommission: Verordnung (EG) Nr. 1726/1999 der Kommission vom 27. Juli 1999 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 530/1999 des Rates zur Statistik über die Struktur der Verdienste und der Arbeitskosten in Bezug auf Definition und Übermittlung von Informationen über Arbeitskosten - 1729/1999, 1999.

- [Eur-2006] Europäisches Parlament und Rat: über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG - 2006/42/EG, 2006.
- [Eur-2009] Europäisches Parlament und Rat: Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. In: Europäisches Parlament und Rat, 2009.
- [Eur-2016] European Environment Agency: Methodology for the Calculation of Exhaust Emissions. Herausgegeben von: European Environment Agency, 2016.
- [Eur-2017] Europäische Kommission: Klima- und Energiepaket 2020, 2017. URL: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_de (Aufruf am 19.06.2017).
- [FEM- 9.511] FEM- 9.511:1986: Einstufung der Triebwerke. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- [FEM- 9.683] FEM- 9.683:1995: Serienhebezeuge - Auswahl von Hub- und Fahrmotoren. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- [FEM- 9.752] FEM- 9.752:2003: Serienhebezeuge mit drehzahlveränderbaren elektrischen Antriebssystemen Drehstrom-Niederspannungs-Antriebssysteme mit variabler Frequenz. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- [FEM- 9.755] FEM- 9.755:1993: Maßnahmen zum Erreichen sicherer Betriebsperioden von motorisch angetriebenen Serienhubwerken. Fédération Européenne de la Manutention. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag.
- [Fic-1997] Fichter, K.; Leow, T.; Seidel, E.: Betriebliche Umweltkostenrechnung. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997.
- [Fic-2001] Fickenscher, G.: Simulationsrechnungen für Kranhubwerke. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 41 (2001) 5, S. 292–296.
- [Fin-2009] Finkbeiner, M.: Carbon footprinting—opportunities and threats. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 14 (2009) 2, S. 91–94.

- [Fis-2015] Fischer, G.: Einflussfaktoren auf die Exposition von Flurförderzeug-fahren gegenüber Ganzkörper-Vibrationen. Dissertation, Technische Universität München. München, 2015.
- [Fis-2016] Fischer, R.: Elektrotechnik für Maschinenbauer. 15. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [Föh-1982] Föhl, W.: Antriebstechnik und Steuerung von Turmdreh- und Kletterkranen sowie von Hydraulikbaggern, Planier- und Laderaupen. In: BMT, Jg. 19 (1982) 8, S. 426–427.
- [För-2008] Förg, M.: Mehrkörpersimulation. Skriptum zur Vorlesung Mehrkörpersimulation, Technische Universität München. München, 2008.
- [Fre-1998] French, M. J.: Conceptual design for engineers. 3. Auflage. London, New York: Springer, 1998.
- [Fre-2017] Freis, J.: Wechselwirkungen und Auswirkungen von Planungsalternativen auf die Gesamtenergiebilanz und die CO₂-Emissionen von Logistikzentren. Dissertation, Technische Universität München. München, 2017.
- [Gei-2008] Geißdörfer, K.: Total Cost of Ownership (TCO) und Life Cycle Costing. Dissertation, European Business School. Oestrich-Winkel, 2008.
- [Gol-2004] Golder, M.: Ein Beitrag zur Kostenabschätzung für Brückenkranträger in Kastenbauweise auf Basis ihrer Bemessungsgrundlagen und Dimensionierungsnachweise. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH). Karlsruhe, 2004.
- [Gol-2012] Golder, M.: Electrical Drives for lifting applications. Stresa:13.09.2012
- [Gro-1996] Grotz, S.; Scholl, G.: Application of LCA in German industry. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 1 (1996) 4, S. 226–230.
- [Gün-2006] Günthner, W. A.; Fischer, R.; Frenz, T.; Schmalzl, J.: Einfluss der Bodenungenauigkeiten auf das dynamische Verhalten von Schmalgangstaplern. Forschungsbericht, Technische Universität München. München, 2006.

- [Gün-2009] Günthner, W. A.; Tenerowicz, P.; Schneider, O.; Blume, M.; Boppert, J.; Seebauer, P.; Szelwis, E.: Change to Green - Handlungsfelder und Perspektiven für nachhaltige Logistik und Geschäftsprozesse, 2009.
- [Gün-2011a] Günthner, W. A.; Fischer, G.; Ebner, A.: Untersuchung der Humanschwingungen von Flurförderzeugen. Forschungsbericht, Technische Universität München. München, 2011.
- [Gün-2011b] Günthner, W. A.; Schippl, M.; Ertl, R.; Hahn-Woernle, P.: Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz - Teil I. In: Fördern und Heben, Jg. 61 (2011) 6, S. 276–279.
- [Gün-2011c] Günthner, W. A.; Schippl, M.; Ertl, R.; Hahn-Woernle, P.: Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz - Teil II. In: Fördern und Heben, Jg. 61 (2011) 7, S. 326–329.
- [Gün-2015a] Günthner, W. A.; Micheli, R.: H2IntraDrive - Einsatz einer Wasserstoff-betriebenen Flurförderzeugflotte unter Produktionsbedingungen. Forschungsbericht, Technische Universität München. München, 2015.
- [Gün-2015b] Günthner, W. A.; Freis, J.; Amberger, M.: Impact Study on Mobile Cranes. Studie, Technische Universität München. München, 2015.
- [Gün-2016a] Günthner, W. A.; Amberger, M.: KALOS – Integral-Hebesystem zur kranlosen Errichtung und Wartungsabsenkung einer Windenergieanlage. Forschungsbericht, Technische Universität München. München, 2016.
- [Gün-2016b] Günthner, W. A.; Winter, S.; Ludwig, C.; Glaser, P.: Wirtschaftliche und ökologische Potenziale von Hochregallagern aus Holz. Forschungsbericht, Technische Universität München. München, 2016.
- [Gün-2017] Günthner, W. A.; Fottner, J.: Planung technischer Logistiksysteme. Skriptum zur Vorlesung, Technische Universität München. München, 2017.
- [Hab-2013a] Habenicht, S.; Ertl, R.; Günthner, W. A.: Analytische Energiebedarfsbestimmung in Intralogistiksystemen in der Planungsphase. In: Hompel, M. ten (Hrsg): 9. Fachkolloquium Logistik der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Dortmund: Praxiswissen Service, 2013, S. 77–90.

- [Hab-2013b] Habenicht, S.; Günthner, W. A.: Energiebedarfsermittlung in der Grobplanungsphase - Welche Ansätze eignen sich. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 53 (2013) 3, S. 128–130.
- [Hab-2018] Habenicht, S.: Energiebedarfsermittlung einzelner Elemente von Stückgut-Stetigförderanlagen. Dissertation, Technische Universität München. München, 2018.
- [Hah-2018] Hahn-Woernle, P.: Reduzierung der Betriebskosten mehrgassiger Lagersysteme mittels elektrischem Lastmanagement. Dissertation, Technische Universität München. München, 2018.
- [Han-2011] Hanusch, H.: Nutzen-Kosten-Analyse. 3 Auflage. München: Franz Vahlen, 2011.
- [Han-2015] Hansjürgens, B.: Ökonomische und soziale Bewertungsansätze. In: Kaltschmitt, M.; Schebek, L. (Hrsg): Umweltbewertung für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2015, S. 12–146.
- [Hei-1976] Heine, P.: Ein Beitrag zu Ermittlung der Kräfte aus Kranschräglauf. In: Fördern und Heben, Jg. 26 (1976) 7, S. 749–751.
- [Hel-2009] Helms, H.; Lambrecht, U.; Knörr, W.: Aktualisierung des Modells TREMOD - Mobile Machinery (TREMOMM). Herausgegeben von: Umweltbundesamt, 2009.
- [Hof-2012] Hofmann, E.; Maucher, D.; Hornstein, J.; den Ouden, R.: Investitionsgütereinkauf. 1 Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [Hun-2000] Hunkeler, D.; Biswas, G.: Return on environment - An Objective Indicator To Validate Life Cycle Assessments? In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 5 (2000) 6
- [Ian-2009] Iannuzzi, D.; Piegari, L.; Tricoli, P.: Use of Supercapacitors for Energy Saving in Overhead Travelling Crane Drives. In: Pietro (Hrsg): 2nd International Conference on Clean Electrical Power Renewable energy resources impact, 2009, S. 562–568.
- [IBU-2018] IBU Institut Bauen und Umwelt: Umwelt-Produktdeklaration - Bau- stähle: Offene Walzprofile und Grobbleche. Herausgegeben von: IBU Institut Bauen und Umwelt, 2018.

- [ISO 22986] ISO 22986:2007: Cranes — Stiffness — Bridge and gantry cranes. International Organization for Standardization. Berlin: Beuth.
- [Jun-2011] Jungheinrich AG: Das Jungheinrich - Umweltprädikat. Herausgegeben von: Jungheinrich AG, 2011.
- [Kel-2012a] Kellens, K.; Dewulf, W.; Overcash, M.; Hauschild, M.; Duflou, J. R.: Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life cycle inventory (UPLCI) CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 2: case studies. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 17 (2012) 2, S. 242–251.
- [Kel-2012b] Kellens, K.; Dewulf, W.; Overcash, M.; Hauschild, M. Z.; Duflou, J. R.: Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 17 (2012) 1, S. 69–78.
- [Kem-2011a] Kemna, R.: MEErP 2011 Methodology Report Part 2: Environmental policies & data. Herausgegeben von: Europäische Kommission, 2011.
- [Kem-2011b] Kemna, R.: MEErP 2011 Methodology Report Part 1: Methods. Herausgegeben von: Europäische Kommission, 2011.
- [Kic-2007] Kicherer, A.; Schaltegger, S.; Tschochohei, H.; Pozo, B. F.: Eco-efficiency - Combining Life Cycle Assessment and Life Cycle Costs via Normalization. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 12 (2007) 7, S. 537–543.
- [Kiv-2015] Kivelä, T.; Golder, M.: Simulation and analysis of an emergency lowering system for crane applications. In: Noche, B. (Hrsg): 11. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL): WGTL, 2015, S. 1–14.
- [Klö-2009] Klöpffer, W.; Grahl, B.: Ökobilanz (LCA) - Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- [Köh-2011] Köhler, D. C. F.; Steinhilper, R.: Life Cycle Assessment in der Logistik. In: Zadek, H.; Schulz, R. (Hrsg): Sustainable Logistics. Hamburg: DVV Media Group, Dt. Verkehrs-Verl., 2011, S. 34–43.

- [Köp-1980] Köppe, U.: Rechnerisches Ermitteln von Beanspruchungskollektiven. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 20 (1980) 2, S. 41–44.
- [Kör-1965] Körber, K.: Dynamische Beanspruchung der Brückenkrane beim Lastanheben. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 5 (1965) 4, S. 111–115.
- [Kos-1980] Kos, M.: Über die Tragkonstruktion der Einträgerkrane. In: Stahlbau, Jg. 49 (1980) 9, S. 281–286.
- [Kos-1988] Kos, M.: Grundlagen einer Systematik der Krantragwerke. In: Stahlbau, Jg. 57 (1988) 7, S. 201–204.
- [Krc-2006] Krcmar, H.; Dold, G.: Aspekte der Ökobilanzierung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts Verlag, 2006.
- [Kru-2014] Kruschwitz, L.: Investitionsrechnung. 14 Auflage. München: Oldenbourg, 2014.
- [Lam-2004] Lambrecht, U.; Helms, H.; Kullmer, K.; Knörr, W.: Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Motoren in mobilen Geräten und Maschinen. Herausgegeben von: Umweltbundesamt, 2004.
- [Len-2015] Lenze: Automation Systems Drive Solutions - Motoren. Herausgegeben von: Lenze SE, 2015.
- [Loe-2003a] Loew, T.; Fichter, K.; Müller, U.; Schulz, W. F.; Strobel, M.: Ansätze zur Umweltkostenrechnung im Vergleich. Herausgegeben von: Umweltbundesamt, 2003.
- [Loe-2003b] Loew, T.; Müller, U.; Strobel, M.; Fichter, K.: Leitfaden Betriebliches Umweltkostenmanagement. Herausgegeben von: Bundesumweltministerium und Umweltbundesamt, 2003.
- [Löh-2002] Löh, M.-O.: Simulation der Stationseinfahrt kuppelbarer Einseilumlaufbahnen. Dissertation, Technische Universität München. München, 2002.
- [Lud-1985] Ludwig, H. G.: Vergleich elektromotorischer Antriebe für Kranfahrwerke unter Berücksichtigung des Fahrereinflusses durch Echtzeitsimulation. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt, 1985.

- [Lüd-2014] Lüdemann, L.; Feig, K.: Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung – eine softwareergonomische Analyse. In: *Logistics Journal* (2014), S. 1–17.
- [Mai-2007] Maibach, M.; Sieber, N.; Bertenrath, R.; Ewringmann, D.; Koch, L.; Thöne, M.; Bickel, P.: Praktische Anwendung der Methodenkonvention: Möglichkeiten der Berücksichtigung externer Umweltkosten bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen von öffentlichen Investitionen. Herausgegeben von: UBA, 2007.
- [Man-1999] Mannesmann Dematic: Betriebsanleitung Demag-Hubwerke DH 200, DH 300, DH 400, DH 500, DH 600, DH 1000, DH 2000, 1999.
- [Mat-2008] Matthews, H. S.; Weber, C. L.; Hendrickson, C. T.: Estimating Carbon Footprints with Input-Output Models. In: *International Input Output Meeting on Managing the Environment: IIOA*, 2008, S. 1–10.
- [Mei-2011] Meier, H.; Shi, X.: CO₂-Bestimmung und -Bewertung bei der Produktherstellung. In: *wt Werkstatttechnik online*, Jg. 101 (2011) 7, S. 539–543.
- [Mie-1995] Mierke, W.: Einsatz von Frequenzumrichtern an Kranen und Hebezeugen. In: *Hebezeuge Fördermittel*, Jg. 35 (1995) 5, S. 184–190.
- [Mül-1998] Müller, H. W.: Die Umlaufgetriebe. 2 Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.
- [Nat-2012] Naturkapital Deutschland - TEEB DE: Der Wert der Natur für Wirtschaft und Gesellschaft - Eine Einführung. Herausgegeben von: Naturkapital Deutschland - TEEB DE, 2012.
- [o.V-2010a] o.V.: Alle Vorteile einer Neuanlage. In: *Hebezeuge Fördermittel*, Jg. 50 (2010) 6, S. 288–289.
- [o.V-2010b] o.V.: Höhere Traglasten, kundenspezifische Lösungen. In: *FM*, Jg. 42 (2010) 9, S. 24–29.
- [o.V-2011a] o.V.: Herstellerumfrage Krane + Hebezeuge. In: *dhf*, Jg. 57 (2011) 7, S. 1–12.
- [o.V-2011b] o.V.: Neue Vertriebsstrategie, alter Qualitätsanspruch. In: *FM*, Jg. 43 (2011) 6, S. 30–31.

- [Oh-2013] Oh, S.; Fischer, G.; Günthner, W. A.; Danilov, E.; Bruns, R.: Untersuchung und Modellierung der Schwingungsübertragung von Flurförderzeugreifen. In: Hompel, M. ten (Hrsg): 9. Fachkolloquium Logistik der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL). Dortmund, 2013, S. 143–154.
- [Oh-2017] Oh, S.: Modellierung und Entwicklung eines Flurförderzeugreifenmodells als Mehrkörpersystem. Dissertation, Technische Universität München, 2017.
- [Ost-2011] Ostad-Ahmad-Ghorabi, H.; Collado-Ruiz, D.: Tool for the environmental assessment of cranes based on parameterization. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 16 (2011) 5, S. 392–400.
- [Pan-2011] Pandey, D.; Agrawal, M.; P. anday, J. S.: Carbon footprint: current methods of estimation. In: Environmental monitoring and assessment, Jg. 178 (2011) 1, S. 135–160.
- [Pet-2010] Peters, G. P.: Carbon footprints and embodied carbon at multiple scales. In: Current Opinion in Environmental Sustainability, Jg. 2 (2010) 4, S. 245–250.
- [Pfe-1998] Pfeifer, H.; Kabisch, G.; Lautner, H.: Fördertechnik. 7 Auflage. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1998.
- [Por-2015] Porsch, L.; Sutter, D.; Maibach, M.; Priess, P.; Müller, W.: Leitfaden zur Nutzen-Kosten-Abschätzung umweltrelevanter Effekte in der Gesetzesfolgenabschätzung. Herausgegeben von: Umweltbundesamt, 2015.
- [Rec-2016] Rechl, F.; Günthner, W. A.: Identification of significant life-cycle costs of intralogistics systems as a basis for investment decisions. In: 5th World Conference on Production and Operations Management, 2016, S. 1–10.
- [Rei-1979] Reitor, G.: Fördertechnik - Hebezeuge - Stetigförderer Lagertechnik. 1 Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1979.
- [Rei-2013] Reinhardt, S.: Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Dissertation, Technische Universität München. München, 2013.

- [Rep-2014] Repo, A.; Montonen, J.; Sizonenko, V.; Lindh, P.; Pyrhonen, J.: Energy efficiency of hoisting motors. In: 2014 XXI International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2014, S. 144–149.
- [Roc-1996] Rockwell Automation: Grundlagen für die Praxis Drehstromasynchronmotoren. Herausgegeben von: Rockwell Automation, 1996.
- [Rüc-2017] Rücker, A.; Fottner, J.: Energiebedarf und Nutzen. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 57 (2017) 4, S. 48–50.
- [Rüc-2018a] Rücker, A.; Fottner, J.: Bestimmung spezifischer Wirkungsgrade von Hub- und Fahrtrieb eines Regalbediengerätes. In: Schmidt, T. (Hrsg): Energiebedarfsermittlung einzelner Elemente von Stückgut-Stetigförderanlagen, S. 1–18.
- [Rüc-2018b] Rücker, A.: Forschungsansatz zur Bestimmung der Energieeffizienz von Fördermitteln der Intralogistik. In: itl (Hrsg): Logistkwerkstatt Graz, S. 1–32.
- [Sch-1994] Scheffler, M.: Grundlagen der Fördertechnik - Elemente und Triebwerke. 1 Auflage. Wiesbaden: Springer; Vieweg & Teubner, 1994.
- [Sch-1998] Scheffler, M.; Feyrer, K.; Matthias, K.: Fördermaschinen - Hebezeuge, Aufzüge, Flurförderzeuge. 1 Auflage. Wiesbaden: Springer, 1998.
- [Sch-1999] Schmitz, S.; Paulini, I.: Bewertung in Ökobilanzen. Herausgegeben von: Umweltbundesamt, 1999.
- [Sch-2006] Schmalzl, J.: Simulation des dynamischen Verhaltens von Flurförderzeugen in der Lagertechnik. Dissertation, Technische Universität München. München, 2006.
- [Sch-2012a] Schilling, T.; Frenkel, A.; Bruns, R.; Amberger, M.; Fischer, G.; Günthner, W. A.; Braun, M.; Schönung, F.; Furmans, K.: Analyse und Quantifizierung der Umweltaspekte von Fördermitteln in der Intralogistik. In: Zadek, H. (Hrsg): Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. Stuttgart: WGTL, 2012, S. 98–109.
- [Sch-2012b] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: Zadek, H. (Hrsg): Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V. Stuttgart: WGTL, 2012, S. 70–79.

- [Sch-2012c] Schwermer, S.: Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung von Umweltkosten. Herausgegeben von: Umweltbundesamt, 2012.
- [Sch-2013] Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Grundlagen. 5 Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [Sch-2014] Schulz, R.: Untersuchung und Ableitung geeigneter Lagerbetriebsstrategien zur Verringerung des Energiebedarfs von Regalbedienegeräten. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität. Magdeburg, 2014.
- [Sch-2015a] Schützhold, J.: Auswahlssystematik für energieeffiziente quasistationäre elektrische Antriebssysteme. Dissertation, Technische Universität Dresden. Dresden, 2015.
- [Sch-2015b] Schilling, T.: Modulares Prognosemodell für den einsatzspezifischen Energieverbrauch von Gabelstaplern. In: Noche, B. (Hrsg): 11. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e. V. (WGTL): WGTL, 2015, S. 1–7.
- [SEW-2001] SEW Eurodrive: Antriebe Projektieren. Herausgegeben von: SEW Eurodrive, 2001.
- [Sim-2014] Simpack AG: Simpack Documentation. Herausgegeben von: Simpack AG, 2014.
- [Sta-1998] Stahl, B.: Methodenvergleich und Methodenentwicklung zur Lösung der Bewertungsproblematik in produktbezogenen Ökobilanzen. Dissertation, Universität Bremen. Bremen, 1998.
- [Sta-2015] Statistisches Bundesamt: EU-Vergleich der Arbeitskosten 2015: Deutschland auf Rang acht. Herausgegeben von: Statistisches Bundesamt, 2015. URL: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/04/PD16_143_624.html (Aufruf am 20.02.2017).
- [sta-2016] statista: Industriestrompreise (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2016, 2016. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/> (Aufruf am 14.10.2016).
- [Umw-1996] Umweltbundesamt: Handbuch Umweltkostenrechnung. München: Vahlen, 1996.

- [Umw-2017] Umweltbundesamt: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme. Herausgegeben von: UBA, 2017. URL: <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (Aufruf am 09.01.2017).
- [VDI 2195] VDI 2195:1985: Zeit- und Umschlagstudien an Kranen. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 2198] VDI 2198:2012: Typenblätter für Flurförderzeuge. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 2388] VDI 2388:2007: Krane in Gebäuden - Planungsgrundlagen. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 2485] VDI 2485:2014: Instandhaltung von Krananlagen. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 2884] VDI 2884:2005: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 2885] VDI 2885:2003: Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten - Daten und Datenermittlung. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 3573] VDI 3573:2016: Arbeitsgeschwindigkeiten von schienengebundenen Kranen. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI- 3633-8] VDI- , 3633-8:2007: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Maschinennahe Simulation. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 3652] VDI 3652:2007: Auswahl der elektrischen Antriebsarten für Krantriebwerke. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 3800] VDI 3800:2001: Ermittlung der Aufwendungen für Maßnahmen zum betrieblichen Umweltschutz. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI- 4446] VDI- 4446:2004: Spielzeitermittlung von Krananlagen. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 4468] VDI 4468:2009: Elektronische Pendeldämpfung für Krane. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.

- [VDI 4600] VDI 4600:2012: Kumulierter Energieaufwand (KEA) - Begriffe, Berechnungsmethoden. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDI 4600-1] VDI , 4600-1:2015: Kumulierter Energieaufwand - Beispiele. Verein Deutscher Ingenieure. Berlin: Beuth.
- [VDMA 34160] VDMA 34160:2006: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer. Berlin: Beuth.
- [Vog-2001] Vogtländer, J. G.; Brezet, H. C.; Hendriks, C. F.: The virtual Eco-Costs '99 - A Single LCA-Based Indicator for Sustainability and the Eco-Costs - Value Ratio (EVR) Model for Economic Allocation. In: The International Journal of Life Cycle Assessment, Jg. 6 (2001) 3, S. 157–166.
- [Vog-2002] Vogtländer, J. G.; Bijma, A.; Brezet, H. C.: Communicating the eco-efficiency of products and services by means of the eco-costs/value model. In: Journal of Cleaner Production, Jg. 10 (2002) 1, S. 57–67.
- [Vog-2016] Vogel, S.: Innovationsarbeit zwischen Pflicht und Kür. In: dhf, Jg. 62 (2016) 7, S. 24–34.
- [Weh-2005] Wehner, D.: Auswahl nach Bewertungssystem. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 45 (2005) 5, S. 236–239.
- [Weh-2006] Wehner, D.: Über die projektierte Lebensdauer hinaus nutzen. In: Fördern und Heben, Jg. 56 (2006) 1, S. 40–42.
- [Weh-2008] Wehner, D.: Erhaltungsmaßnahmen an Kranen: welche, wann und wie? In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 48 (2008) 6, S. 422–424.
- [Weh-2012] Wehner, D.: Die Modernisierung von Kranen verlangt Sachkenntnis. In: Fördern und Heben, Jg. 62 (2012) 6, S. 44–46.
- [Wei-2008] Weidema, B. P.; Thrane, M.; Christensen, P.; Schmidt, J.; Løkke, S.: Carbon Footprint - A Catalyst for Life Cycle Assessment. In: Journal of Industrial Ecology, Jg. 12 (2008) 1, S. 3–6.
- [Wic-1992] Wicke, L.; Haasis, H.-D.: Betriebliche Umweltökonomie - Eine praxisorientierte Einführung. 1 Auflage. München: Vahlen, 1992.

- [Wie-2008] Wiedmann, T.; Minx, J.: A Definition of 'Carbon Footprint'. In: Pertsova, C. C. (Hrsg): Ecological economics research trends. New York: Nova Science Publishers, 2008, S. 1–11.
- [Wil-2017] Wildt, A.: Investitionsrechnung, 2017. URL: <http://www.controllingportal.de/Fachinfo/Investitionsrechnung/dynamische-und-statische-Investitionsrechnungen.html> (Aufruf am 18.01.2017).
- [Wir-2012] Wirtschaftskammer Österreich: Wichtige Informationen zur Sonderauswertung der Arbeitskostenerhebung 2012 nach Wirtschaftskammersystematik. Herausgegeben von: WKO, 2012. URL: https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjrq5CTIrzQAhULahoKHbhABgEQFggmMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.fmfi.at%2Ffileadmin%2Fcontent%2FDokumente%2FZahlen_Daten_Fakten%2FArbeitskosten%2F Erlaeuterungen2012.pdf&usq=AFQjCNHrbii6E4BQDSV1U7A_SG2tsENbFg (Aufruf am 22.11.2016).
- [Wör-2006] Wörner, C.; Dold, G.: Einordnung, Aufbau und Grenzen von Ökobilanzen. In: Krcmar, H.; Dold, G. (Hrsg): Aspekte der Ökobilanzierung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts Verlag, 2006, S. 1–21.
- [Yif-2013] Yifei, T.; Wei, Y.; Zhen, Y.; Dongbo, L.; Xiangdong, L.: Research on Multidisciplinary Optimization Design of Bridge Crane. In: Mathematical Problems in Engineering, Jg. 18 (2013) 5, S. 1–10.
- [Zim-2015] Zimmermann, B.: Krane - Beschaffenheit, Ausbildung, Einsatz. 3. Auflage. Gräfelfing: Resch-Verlag, 2015.

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde eine Reihe von studentischen Arbeiten unter maßgeblicher, wissenschaftlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität angefertigt. Den Studierenden sei an dieser Stelle für den gebotenen Einsatz und die Leistungsbereitschaft während der Durchführung der Arbeiten gedankt. Inhalte aus den betreuten Arbeiten sind auch an den gekennzeichneten Stellen in die vorliegende Dissertation eingeflossen.

- [fml-2015a] Servi, J.: Systematischer Vergleich unterschiedlicher Modellierungsansätze für die Antriebe von Brückenkrananlagen. Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch M. Amberger. Abgegeben im Oktober 2015
- [fml-2015b] Wei, X.: Systematische Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Brückenkrananlagen mithilfe von Mehrkörpersimulation. Masterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch M. Amberger. Abgegeben im November 2015
- [fml-2016a] Rücker, A.: Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Antriebe auf die Bemessung des Tragwerks von Industriekrananlagen. Masterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch M. Amberger. Abgegeben im März 2016
- [fml-2016b] Weinmann, G.: Methodik zur Investitionsentscheidung bei Brückenkranen unter Berücksichtigung der Lebenszyklus- und Umweltkosten. Masterarbeit am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München. Betreut durch M. Amberger. Abgegeben im April 2016

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Industriestrompreise in Deutschland [sta-2016]	3
Abbildung 2-1:	Wechselwirkungen und Einflussfaktoren durch Kranantriebe	8
Abbildung 2-2:	Design Prozess in Anlehnung an [Fre-1998]	12
Abbildung 2-3:	Aufbau der Arbeit	13
Abbildung 3-1:	Festlegung der Basisgeometrie	17
Abbildung 3-2:	Krane mit quaderförmigem Arbeitsraum in Anlehnung an [Sch-1998]	18
Abbildung 3-3:	Krane mit zylinderförmigem Arbeitsraum in Anlehnung an [Sch-1998]	19
Abbildung 3-4:	Aufbau Einträger-Laufkran (Bildquelle [DEM-2013])	20
Abbildung 3-5:	Aufbau eines Hubwerks, (Bildquelle: [Man-1999])	22
Abbildung 3-6:	Aufbau eines Drehstromasynchronmotors und qualitative Kennlinien [Roc-1996]	23
Abbildung 3-7:	standardisierte Lastkollektive nach [FEM- 9.511]	26
Abbildung 3-8:	Sieben-Phasen-Modell für den Anlauf	32
Abbildung 3-9:	Kostenaufbruch-Struktur für Konzeption, Entwicklung und Realisierung gemäß [DIN EN 60300-3-3]	39
Abbildung 3-10:	Kostenaufbruchstruktur für Nutzung und Erweiterung [DIN EN 60300-3-3]	40
Abbildung 3-11:	Kostenaufbruch-Struktur für die Entsorgung [DIN EN 60300-3-3]	40
Abbildung 3-12:	Phasenmodell nach [VDMA 34160]	41
Abbildung 3-13:	siebenstufiges Modell zur Berechnung der Lebenszykluskosten [VDMA 34160]	42
Abbildung 3-14:	achtstufiges Modell zur Einführung von TCO nach [Eil-1993]	44
Abbildung 3-15:	Phasen einer Ökobilanz nach [DIN EN ISO 14040]	49
Abbildung 3-16:	Prozessmodul in einer Ökobilanz gemäß [Klö-2009]	51
Abbildung 3-17:	ökonomischer Gesamtwert der Umwelt in Anlehnung an [Nat-2012]	63
Abbildung 3-18:	Aufbruch-Struktur zur Schätzung der Umweltkosten [Sch-2012c]	69
Abbildung 3-19:	Vorgehen zur ökonomischen Bewertung von Umweltschäden	70
Abbildung 3-20:	Ablauf für die Berücksichtigung von Umweltkosten	71
Abbildung 3-21:	Arbeitsschritte zur Schätzung Kosten und Nutzen politischer Maßnahmen [Por-2015]	72
Abbildung 4-1:	Schritte zur Entwicklung des Vorgehensmodells	77
		215

Abbildung 4-2:	Berechnung der Umweltwirkungen aus dem elektrischen Energiebedarf	78
Abbildung 4-3:	Produktlebensweg einer Krananlage	79
Abbildung 4-4:	Anforderungen klären und Lösungsalternativen für Kran generieren	80
Abbildung 4-5:	Lebensphase Materialauswahl und -bereitstellung	82
Abbildung 4-6:	Lebensphase Fertigung	83
Abbildung 4-7:	Betrachtete Aspekte in der Lebensphase Transport, Aufbau und Installation	84
Abbildung 4-8:	Betrachtete Aspekte in der Nutzungsphase	85
Abbildung 4-9:	Betrachtete Aspekte am Lebensende des Krans	90
Abbildung 4-10:	Internalisierung der externen Umweltkosten	94
Abbildung 4-11:	Konzept zur Ermittlung der Gesamtkosten	101
Abbildung 5-1:	Komponenten und Aufbau eines Mehrkörpersystems [Bre-1992, För-2008]	103
Abbildung 5-2:	Modellierungsansätze für Mehrkörpersysteme [Löh-2002]	104
Abbildung 5-3:	Modellbildung in der Mehrkörpersimulation [För-2008]	105
Abbildung 5-4:	Modellbildung der Kranbrücke in der Mehrkörpersimulation	109
Abbildung 5-5:	Schema Abbildung des Seiltriebs	110
Abbildung 5-6:	Schema Laufrad-Schiene-Kontakt nach Hertz	111
Abbildung 5-7:	Eingabemaske für die Bewegung des Krans	112
Abbildung 5-8:	Aufbau Ausschwingversuch Kranbrücke	114
Abbildung 5-9:	Aufbau Anfahrversuch Kranbrücke	115
Abbildung 5-10:	Ausschwingversuch Kranbrücke	115
Abbildung 5-11:	Aufbau Ausschwingversuch Katzfahren	116
Abbildung 5-12:	Auswertung Ausschwingversuch Kranfahren	117
Abbildung 5-13:	Validierung Kranfahren	119
Abbildung 5-14:	Validierung Katzfahren	119
Abbildung 5-15:	Vorgehen zur Durchführung der Simulationsläufe	120
Abbildung 6-1	Definition der funktionellen Einheit Kran	124
Abbildung 6-2:	Produktsystem Brückenkran	125
Abbildung 6-3:	Produktsystem Brücke	126
Abbildung 6-4:	Produktsystem Kopfträger	126
Abbildung 6-5:	Produktsystem Lasthaken	127
Abbildung 6-6:	Produktsystem Seil	127
Abbildung 6-7:	Produktsystem Getriebe	127

Abbildung 6-8:	Produktsystem Laufrollen	128
Abbildung 6-9:	Produktsystem Seilrollen und Ausgleichsrollen	128
Abbildung 6-10:	Produktsystem Seiltrommel	128
Abbildung 6-11:	Vorgehensweise Berechnungsmodell für die Umweltwirkungen in der Nutzung	145
Abbildung 6-12:	Wirkungsgradkennlinie Drehstromasynchronmaschine Lastheben	147
Abbildung 6-13:	Validierung durch Vergleich mit Messwerten für eine Last von 10060 kg	149
Abbildung 6-14:	Kennlinie für die Rückspeisung bei einem 11,4 kW Motor	150
Abbildung 6-15:	Modell zur Berechnung des Energiebedarfs beim Kran- und Katzfahren	151
Abbildung 6-16:	Validierung des Modells für das Kranfahren	152
Abbildung 6-17:	Vorgehen bei der Charakterisierung in Anlehnung an [Klöß-2009]	154
Abbildung 8-1:	Kostenvergleich in Abhängigkeit von der Nutzungszeit	185
Abbildung 8-2:	Lebenszykluskostendifferenz in Abhängigkeit von der Nutzungszeit	186
Abbildung B-1:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 9 kW Nennleistung im Hubbetrieb	B-5
Abbildung B-2:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 0,37 kW Nennleistung	B-6
Abbildung B-3:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 0,55 kW Nennleistung	B-7
Abbildung B-4:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 9 kW Nennleistung im Senkbetrieb	B-8
Abbildung B-5:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 4,4 kW Nennleistung	B-9
Abbildung B-6:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 2,2 kW Nennleistung	B-11
Abbildung B-7:	Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 4,4 kW Nennleistung im Senkbetrieb	B-11
Abbildung C-1:	Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 1040 kg	C-2
Abbildung C-2:	Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 3840 kg	C-2
Abbildung C-3:	Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 5880 kg	C-3
Abbildung C-4:	Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 7480 kg	C-3
Abbildung C-5:	Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 1040 kg	C-4
Abbildung C-6:	Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 3840 kg	C-4
217		

Abbildung C-7: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 5880 kg	C-5
Abbildung C-8: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 7480 kg	C-5
Abbildung C-9: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 1040 kg	C-6
Abbildung C-10: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 3840 kg	C-6
Abbildung C-11: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 5880 kg	C-7
Abbildung C-12: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 7480 kg	C-7
Abbildung C-13: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 10060 kg	C-7
Abbildung D-1: Validierung mit einer Last von 2500 kg und einem Bodenabstand von 500 mm	D-II
Abbildung D-2: Validierung mit einer Last von 1100 kg einem Bodenabstand von 2500 mm	D-II
Abbildung D-3: Validierung mit einer Last von 2500 kg einem Bodenabstand von 2500 mm	D-III
Abbildung D-4: Validierung mit einer Last von 2500 kg und einem Bodenabstand von 500 mm	D-IV
Abbildung D-5: Validierung mit einer Last von 1100 kg einem Bodenabstand von 2500 mm	D-IV
Abbildung D-6: Validierung mit einer Last von 2500 kg einem Bodenabstand von 2500 mm	D-V

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Vergleich Ansätze für umweltbezogenen Kostenrechnung [Loe-2003a]	66
Tabelle 3-2:	Kostensätze für Treibhausgasemissionen [Sch-2012c]	70
Tabelle 4-1:	Vergleich der Ansätze für die Anlaufmodelle	96
Tabelle 4-2:	Vergleich der Ansätze für die Berechnung der Spielzeit	98
Tabelle 4-3:	Vergleich der Ansätze für die Berechnung des Energiebedarfs	100
Tabelle 6-1	Wirkungskategorien nach [DIN EN 15978, DIN EN 15804]	131
Tabelle 6-2:	Berücksichtigte Fahrzeugkategorien für Transporte [Eur-2016]	143
Tabelle 7-1:	Übersicht betrachtete Kostenarten vor der Nutzung	158
Tabelle 7-2:	Übersicht betrachtete Kostenarten in der Nutzungsphase	160
Tabelle 7-3:	Übersicht betrachtete Kostenarten nach der Nutzung	162
Tabelle 8-1:	Basisparameter hinsichtlich geometrischer Randbedingungen und Tragfähigkeit	168
Tabelle 8-2:	Parameter Antriebsvariante A für das Hubwerk	169
Tabelle 8-3:	Parameter Antriebsvariante A für das Kranfahren	170
Tabelle 8-4:	Parameter Antriebsvariante A für das Katzfahren	170
Tabelle 8-5:	Parameter Antriebsvariante B für das Hubwerk	171
Tabelle 8-6:	Parameter Antriebsvariante B für das Kranfahren	172
Tabelle 8-7:	Parameter Antriebsvariante B für das Katzfahren	172
Tabelle 8-8:	Definition der Kranaufgaben	173
Tabelle 8-9:	Allgemeine Daten und Daten für die Anlieferung	175
Tabelle 8-10:	Allgemeine Daten für die Wartung und Instandhaltung	176
Tabelle 8-11:	Allgemeine Daten für den Abbau des Krans	177
Tabelle 8-12:	Spezifische Parameter Variante A vor der Nutzung für Variante A	178
Tabelle 8-13:	Ergebnisse aus dem Arbeits- und dem Energiekostenmodul Variante A	179
Tabelle 8-14:	Spezifische Parameter Variante A vor der Nutzung	179
Tabelle 8-15:	Gesamtkosten Variante A während der Nutzung (nicht abgezinst)	179
Tabelle 8-16:	Spezifische Parameter Variante A nach der Nutzung	180
Tabelle 8-17:	Ergebnis der Ökobilanzierung für Variante A	180
Tabelle 8-18:	Externe Umweltkosten Variante A	181
		219

Tabelle 8-19:	Spezifische Parameter Variante B vor der Nutzung	181
Tabelle 8-20:	Ergebnisse aus dem Arbeits- und dem Energiekostenmodul Variante B	182
Tabelle 8-21:	Kosten für die jährliche Kranprüfung für Variante B	182
Tabelle 8-22:	Gesamtkosten Variante B während der Nutzung (nicht abgezinst)	183
Tabelle 8-23:	Spezifische Parameter Variante B nach der Nutzung	183
Tabelle 8-24:	Ergebnis Ökobilanzierung Variante B für das Treibhauspotenzial	183
Tabelle 8-25:	Externe Umweltkosten Variante B	184
Tabelle 8-26:	Vergleich Lebenszykluskosten (auf Basisjahr abgezinst)	184
Tabelle A-1:	Anzahl Kranaufgaben	A-1
Tabelle A-2:	Kranaufgabe 2	A-2
Tabelle A-3:	Kranaufgabe 3	A-2
Tabelle A-4:	Kranaufgabe 4	A-3
Tabelle A-5:	Kranaufgabe 5	A-4
Tabelle A-6:	Kranaufgabe 6	A-4
Tabelle A-7:	Kranaufgabe 7	A-5
Tabelle A-8:	Kranaufgabe 8	A-6
Tabelle A-9:	Kranaufgabe 9	A-6
Tabelle A-10:	Kranaufgabe 10	A-7
Tabelle B-1:	Basisdaten für die Materialbereitstellung	B-1
Tabelle B-2:	Basisdaten für die Ökobilanzierung der Fertigung	B-2
Tabelle B-3:	Basisdaten für Transporte, Montage und Aufbau	B-2
Tabelle B-4:	Basisdaten für die Nutzungsphase	B-3
Tabelle B-5:	Basisdaten für das Hubwerk mit polumschaltbarem Antrieb	B-4
Tabelle B-6:	Basisdaten für die Motoren des Kranfahrwerks mit polumschaltbarem Antrieb	B-5
Tabelle B-7:	Basisdaten für den Motor des Katzfahrwerks mit polumschaltbarem Antrieb	B-6
Tabelle B-8:	Basisdaten für das Hubwerk mit frequenzgeregeltem Antrieb	B-8
Tabelle B-9:	Basisdaten für das Kran- und das Katzfahrwerk mit frequenzgeregeltem Antrieb	B-10
Tabelle B-10:	Basisdaten für die Entsorgung	B-12
Tabelle B-1:	Basisdaten für die Umweltkostenrechnung	B-12
Tabelle C-1:	Basisdaten für die Validierung des Energiebedarfsmodells	C-1
Tabelle D-1:	Basisdaten für die Validierung des Mehrkörpermodells	D-I

Anhang A Kranaufgaben

An dieser Stelle erfolgt die Festlegung der Aufgaben des Krans im Rahmen des Fallbeispiels. Diese Aufgaben sind kranspezifisch und müssen für jede Untersuchung separat festgelegt werden. Diese Daten dienen als Eingangsgrößen für das Mehrkörpermodell zur Spielzeitermittlung und für das Energiemodell zur Berechnung des Energiebedarfs. Tabelle A-1 zeigt die Anzahl der jeweiligen Kranaufgaben, die während eines Jahres durchzuführen sind. Dabei wird in diesem Fallbeispiel davon ausgegangen, dass in jedem Jahr dieselben Aufgaben anfallen.

Tabelle A-1: Anzahl Kranaufgaben

Aufgabe	Anzahl pro Jahr
1	52
2	52
3	104
4	52
5	26
6	104
7	52
8	104
9	52
10	104

Tabelle A-2: Kranaufgabe 2

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
2	1	0	0 – 0	7,5 – 9,5	0 – 0	0
2	2	0	0 – 0	9,5 – 9,5	0 – 5	0
2	3	0	0 – 0	9,5 – 9,5	5 – 5	120
2	4	4000	0 – 0	9,5 – 9,5	5 – 4	2
2	5	4000	0 – 0	9,5 – 9,5	5 – 5	0
2	6	4000	0 – 12	9,5 – 9,5	5 – 5	0
2	7	4000	12 – 12	9,5 – 5,5	5 – 5	0
2	8	4000	12 – 12	5,5 – 5,5	5 – 4,5	60
2	9	0	12 – 12	5,5 – 5,5	5 – 0	0
2	10	0	12 – 12	5,5 – 7,5	0 – 0	0
2	11	0	12 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0

Tabelle A-3: Kranaufgabe 3

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
3	1	0	0 – 3	7,5 – 7,5	0 – 0	0
3	2	0	3 – 3	7,5 – 5,5	0 – 0	0
3	3	0	3 – 3	5,5 – 5,5	0 – 6	60
3	4	6000	3 – 3	5,5 – 5,5	6 – 3	0
3	5	6000	3 – 8	5,5 – 5,5	3 – 3	0
3	6	6000	8 – 8	5,5 – 9,5	3 – 3	0

3	7	6000	8 – 8	9,5 – 9,5	3 – 6	60
3	8	0	8 – 8	9,5 – 9,5	6 – 0	0
3	9	0	8 – 8	9,5 – 7,5	0 – 0	0
3	10	0	8 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0
3	11	0	8 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0

Tabelle A-4: Kranaufgabe 4

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
4	1	0	0 – 12	7,5 – 7,5	0 – 0	0
4	2	0	12 – 12	7,5 – 7,5	0 – 6	60
4	3	0	12 – 12	7,5 – 7,5	6 – 3	0
4	4	1800	12 – 6	7,5 – 7,5	3 – 3	0
4	5	1800	6 – 6	7,5 – 7,5	3 – 6	60
4	6	0	6 – 6	7,5 – 7,5	6 – 0	0
4	7	0	6 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0

Tabelle A-5: Kranaufgabe 5

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
5	1	0	0 – 20	7,5 – 7,5	0 – 0	0
5	2	0	20 – 20	7,5 – 7,5	0 – 6	60
5	3	2000	20 – 20	7,5 – 7,5	6 – 5	0
5	4	2000	20 – 20	7,5 – 3,5	5 – 5	0
5	5	2000	20 – 20	3,5 – 3,5	5 – 6	60
5	6	0	20 – 20	3,5 – 3,5	6 – 0	0
5	7	0	20 – 20	3,5 – 7,5	0 – 0	0
5	8	0	20 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0

Tabelle A-6: Kranaufgabe 6

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
6	1	0	0 – 12	7,5 – 7,5	0 – 0	0
6	2	0	12 – 12	7,5 – 7,5	0 – 6	60
6	3	500	12 – 12	7,5 – 7,5	6 – 2	0
6	4	500	12 – 12	7,5 – 12,5	2 – 2	0
6	5	500	12 – 20	12,5 – 12,5	2 – 2	0
6	6	500	20 – 20	12,5 – 12,5	2 – 6	60
6	7	0	20 – 20	12,5 – 12,5	6 – 0	0
6	8	0	20 – 20	12,5 – 7,5	0 – 0	0
6	9	0	20 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0

Tabelle A-7: Kranaufgabe 7

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
7	1	C	0 – 12	7,5 – 7,5	0 – 0	0
7	2	0	12 – 12	7,5 – 3,5	0 – 0	0
7	3	0	12 – 12	3,5 – 3,5	0 – 6	60
7	4	3000	12 – 12	3,5 – 3,5	6 – 5	0
7	5	3000	12 – 12	3,5 – 11,5	5 – 5	0
7	6	3000	12 – 4	11,5 – 11,5	5 – 5	0
7	7	3000	4 – 4	11,5 – 11,5	5 – 6	60
7	8	0	4 – 4	11,5 – 11,5	6 – 0	0
7	9	0	4 – 0	11,5 – 11,5	6 – 0	0
7	10	0	0 – 0	11,5 – 7,5	6 – 0	0

Tabelle A-8: Kranaufgabe 8

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
8	1	0	0 – 0	7,5 – 7,5	0 – 5	60
8	2	8000	0 – 0	7,5 – 7,5	5 – 4	0
8	3	8000	0 – 12	7,5 – 7,5	4 – 4	0
8	4	8000	12 – 12	7,5 – 5,5	4 – 4	0
8	5	8000	12 – 12	5,5 – 5,5	4 – 5	60
8	6	0	12 – 12	5,5 – 5,5	5 – 0	0
8	7	0	12 – 12	5,5 – 7,5	0 – 0	0
8	8	0	12 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0

Tabelle A-9: Kranaufgabe 9

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
9	1	0	0 – 0	7,5 – 4,5	0 – 0	0
9	2	0	0 – 0	4,5 – 4,5	0 – 4	60
9	3	3800	0 – 0	4,5 – 4,5	4 – 3,5	0
9	4	3800	0 – 4	4,5 – 4,5	3,5 – 3,5	0
9	5	3800	4 – 4	4,5 – 4,5	3,5 – 6	60
9	6	0	4 – 4	4,5 – 4,5	6 – 0	0
8	7	0	4 – 4	4,5 – 7,5	0 – 0	0
9	8	0	4 – 0	7,5 – 7,5	0 – 0	0

Tabelle A-10: Kranaufgabe 10

Aufgabe	Abschnitt	Last m [kg]	Position s [m]			Wartezeit [s]
			x	y	z	
10	1	0	0 – 3	7,5 – 7,5	0 – 0	0
10	2	0	3 – 3	7,5 – 4,5	0 – 0	0
10	3	0	3 – 3	4,5 – 4,5	0 – 6	60
10	4	1200	3 – 3	4,5 – 4,5	6 – 5	0
10	5	1200	3 – 3	4,5 – 10,5	5 – 5	0
10	6	1200	3 – 3	10,5 – 10,5	5 – 6	60
10	7	0	3 – 3	10,5 – 10,5	6 – 0	0
10	8	0	3 – 0	10,5 – 10,5	0 – 0	0
10	9	0	0 – 0	10,5 – 7,5	0 – 0	0

Anhang B Basisdaten

In diesem Anhang wird eine Übersicht über die Grundäquivalente für die innerhalb der Ökobilanzierung betrachteten Prozesse gegeben. Zudem werden die für die Umweltkostenrechnung verwendeten Parameter und Basisdaten vorgestellt.

B.1 Ökobilanzierung

Die vorgestellten Basisdaten beziehen sich dabei insbesondere auf die Berechnungen im Rahmen des Fallbeispiels. Hinsichtlich der Gliederung werden die einzelnen Lebensphasen, wie sie im Rahmen der Ökobilanzierung definiert werden, zu Grunde gelegt. Die Basisdaten sind überwiegend der Ökobilanzierungssoftware GABI entnommen, die Daten für Motoren und Getriebe werden auf Basis der benötigten Leistungen und der verwendeten Technologie Datenblättern unterschiedlicher Hersteller entnommen.

B.1.1 Materialbereitstellung

Die vorgestellten Daten zur Materialbereitstellung beziehen sich auf die Äquivalente zum Treibhausgaspotenzial für die im Berechnungsmodell hinterlegten Materialien und Prozesse. Diese werden in Tabelle B-1 dargestellt.

Tabelle B-1: Basisdaten für die Materialbereitstellung

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Rohstoffherstellung Stahl	2,16	[1/kg]	
Rohstoffherstellung Kupfer	2,01	[1/kg]	
Rohstoffherstellung Aluminium	9,72	[1/kg]	
Rohstoffherstellung Gusseisen	0,88	[1/kg]	
Holz	-1,1	[1/kg]	
Kunststoff	1,95	[1/kg]	

B.1.2 Fertigung

Tabelle B-2 zeigt die Basisdaten für die in Kapitel 6.2.2 dargestellten Berechnungsgleichungen zur Berechnung der Umweltwirkungen aus der Fertigung des Krans und seiner Komponenten.

Tabelle B-2: Basisdaten für die Ökobilanzierung der Fertigung

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Laserschneiden	0,0377	[1/m]	
Sandstrahlen	0,359	[1/m ²]	
Lackieren	1,98	[1/kg]	
Biegen	0,0231	[1/kg]	
Schweißen	0,181	[1/m]	
Gießen	1,43	[1/kg]	
Spanen	0,127	[1/kg]	
Gesenkschmieden	0,485	[1/kg]	
Drahtziehen	0,183	[1/kg]	

B.1.3 Transporte, Montage und Aufbau

Die Berechnungsmodelle für anfallende Transporte, Montage- und Aufbauarbeiten wurden bereits in Kapitel 6.2.3 vorgestellt. An dieser Stelle werden die verwendeten Basisdaten für die Berechnungsmodelle in der Übersicht gezeigt. Tabelle B-3 zeigt in der Übersicht die Basisdaten für die Berechnung von Umweltwirkungen aus Transporten mit unterschiedlichen Verkehrsmitteln nach [Eur-2016].

Tabelle B-3: Basisdaten für Transporte, Montage und Aufbau

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Elektrischer Strom	0,634	[1/kWh]	

B.1.4 Nutzung

Hinsichtlich der Nutzung liegt das Hauptaugenmerk bei den Parametern bei der Berechnung des Energiebedarfs für die Spiele des Krans. Dabei wird zwischen Parametern, die nicht von der Last abhängen und lastabhängigen Parametern unterschieden. Tabelle B-4 zeigt die für die Bewertung der Nutzungsphase verwendeten Parameter für das Energiebedarfsmodell, die unabhängig von der betrachteten Antriebstechnik verwendet werden.

Tabelle B-4: Basisdaten für die Nutzungsphase

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Erdbeschleunigung	9,81	[N/kg]	
Wirkungsgrad Seilrolle rollengelagert	0,985	[-]	
Wirkungsgrad Seilrolle gleitgelagert	0,96	[-]	
Wirkungsgrad Getriebestufe Außenverzahnung	0,99	[-]	
Wirkungsgrad Getriebestufe Innenverzahnung	0,995	[-]	

Auf Basis dieses Datensatzes werden die im Berechnungsmodell verwendeten, in Abhängigkeit des konstruktiven Aufbaus und der Ausstattung des betreffenden Krans abgeleitet.

Daten Hubwerk polumschaltbar

Tabelle B-5 zeigt die Basisdaten für die Betrachtung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase für das Hubwerk mit polumschaltbarem Antrieb. Die Daten adressieren dabei in erster Linie die Erstellung der Kennlinie für den Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last gemäß [Sch-2015a] für direkt am Netz betriebene Elektromotoren. Zudem werden weiteren für die Berechnung des Energiebedarfs notwendige, motorabhängige Daten aus entsprechenden Datenblättern für Motoren der benötigten Größenordnung dargestellt.

Tabelle B-5: Basisdaten für das Hubwerk mit polumschaltbarem Antrieb

Parameter	Wert	Einheit
Wirkungsgrad bei 100 % Last: $\eta_{100\%}$	0,87	[-]
Wirkungsgrad bei 75 % Last: $\eta_{75\%}$	0,85	[-]
Bemessungsleistung P_{nenn}	9.000	[W]
Nenn Drehzahl n_{nenn}	2.680	[1/min]
Nenn-Strangstrom I_{SN}	19	[A]
Strangspannung U_{SN}	400	[V]
Leistungsfaktor $\cos\varphi_N$	0,9	[-]
Trägheit Motor	0,042	[kgm ²]
Trägheit Getriebe	0,028	[kgm ²]
Trägheit Seiltrommel	0,96	[kgm ²]
Durchmesser Seiltrommel	0,224	[m]
Masse Seiltrommel	96	[kg]
Masse Lasthaken	100	[kg]

Mithilfe dieser Daten wird nach der Berechnungsmethode nach Schützhold [Sch-2015a] der Wirkungsgrad des Elektromotors direkt am Netz in Abhängigkeit von der Last berechnet. Der entsprechende Verlauf des Wirkungsgrades ist in Abbildung B-1 dargestellt.

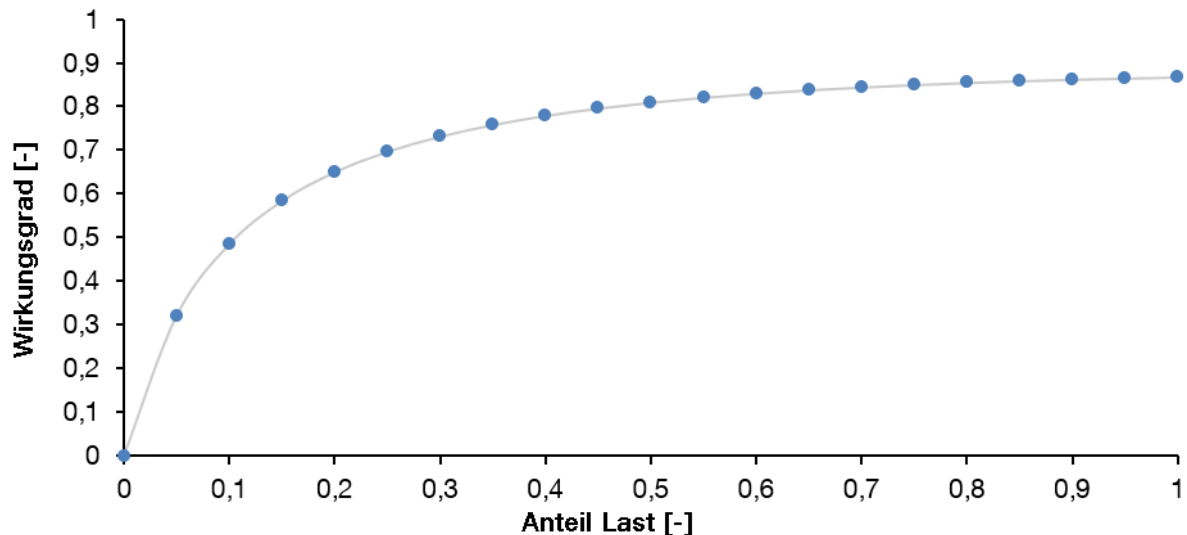


Abbildung B-1: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 9 kW Nennleistung im Hubbetrieb

Daten Kranfahrantrieb polumschaltbar

Für die Kranfahrantriebe werden zwei Motoren für die Berechnung betrachtet. In Tabelle B-6 sind die Basisdaten für die Berechnung des lastabhängigen Wirkungsgrades der Motoren für das Kranfahren dargestellt.

Tabelle B-6: Basisdaten für die Motoren des Kranfahrwerks mit polumschaltbarem Antrieb

Parameter	Wert	Einheit
Wirkungsgrad bei 100 % Last: $\eta_{100\%}$	0,66	[-]
Wirkungsgrad bei 75 % Last: $\eta_{75\%}$	0,65	[-]
Bemessungsleistung P_{nenn}	370	[W]
Nenn-drehzahl n_{nenn}	2.420	[1/min]
Nenn-Strangstrom I_{SN}	1,3	[A]
Strangspannung U_{SN}	230	[V]
Leistungsfaktor $\cos\varphi_N$	0,82	[-]
Trägheit Motor	0,00071	[kgm ²]
Trägheit Getriebe	0,000033	[kgm ²]

Trägheit Laufrad	0,942	[kgm ²]
Masse Katze	1200	[kg]

Mithilfe dieser Daten wird nach der Berechnungsmethode nach Schützhold [Sch-2015a] der Wirkungsgrad der Elektromotoren für das Kranfahren, welche direkt am Netz betrieben werden, in Abhängigkeit von der Last berechnet. Der entsprechende Verlauf des Wirkungsgrades ist in Abbildung B-2 dargestellt.

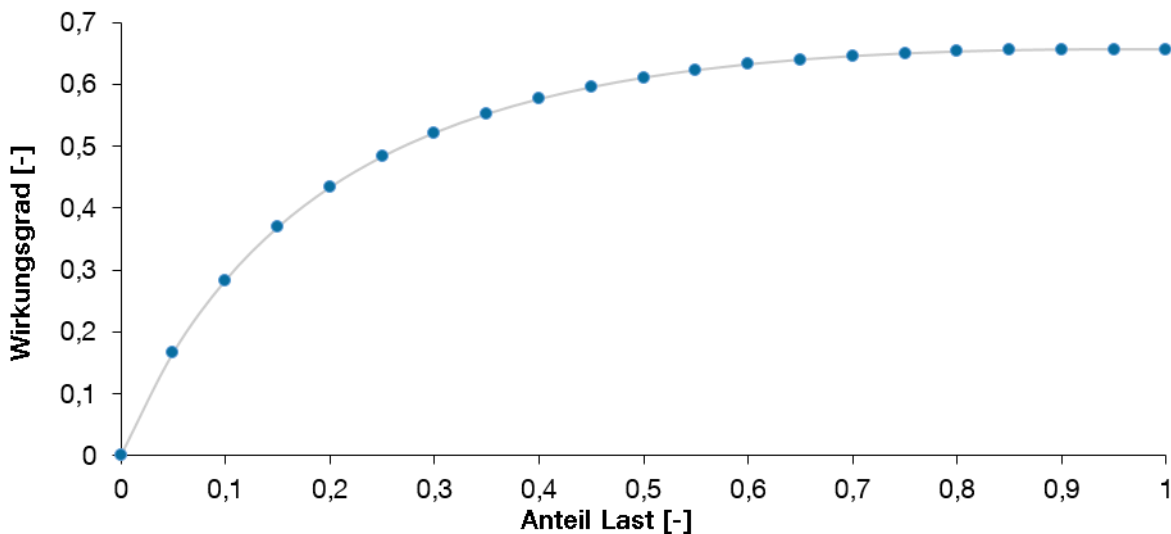


Abbildung B-2: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 0,37 kW Nennleistung

Daten Katzfahrantriebe polumschaltbar

Für den Katzfahrantrieb wird ein einzelner Motor betrachtet. Die Basisdaten für die Abschätzung der Wirkungsgradkennlinie gemäß der Berechnungsmethodik nach Schützhold [Sch-2015a] sind in Tabelle B-7 dargestellt.

Tabelle B-7: Basisdaten für den Motor des Katzfahrwerks mit polumschaltbarem Antrieb

Parameter	Wert	Einheit
Wirkungsgrad bei 100 % Last: $\eta_{100\%}$	0,71	[-]
Wirkungsgrad bei 75 % Last: $\eta_{75\%}$	0,71	[-]
Bemessungsleistung P_{nenn}	550	[W]
Nennzahl n_{nenn}	2.540	[1/min]

Nenn-Strangstrom I_{SN}	2,37	[A]
Strangspannung U_{SN}	230	[V]
Leistungsfaktor $\cos\varphi_N$	0,82	[-]
Trägheit Motor	0,00071	[kgm ²]
Trägheit Getriebe	0,000033	[kgm ²]
Trägheit Laufrad	0,049	[kgm ²]
Masse Brücke	4.200	[kg]

Abbildung B-3 zeigt als Ergebnis den aus den Basisdaten generierten, lastabhängigen Verlauf des Wirkungsgrades für das Katzfahren.

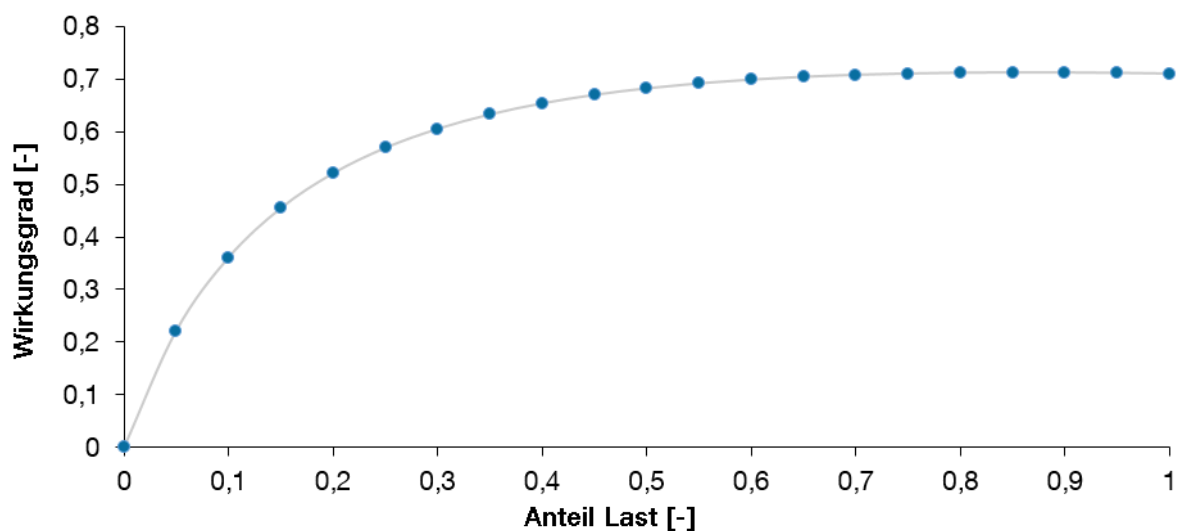


Abbildung B-3: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 0,55 kW Nennleistung

Daten Hubwerk im Senkbetrieb polumschaltbar

Im Unterschied zum Hubbetrieb wird der lastabhängige Wirkungsgrad für das Lastsenken nicht gemäß der Berechnungsmethode nach Schützhold berechnet, sondern es wird eine Kennlinie auf Basis von Messwerte verwendet [Bru-2013].

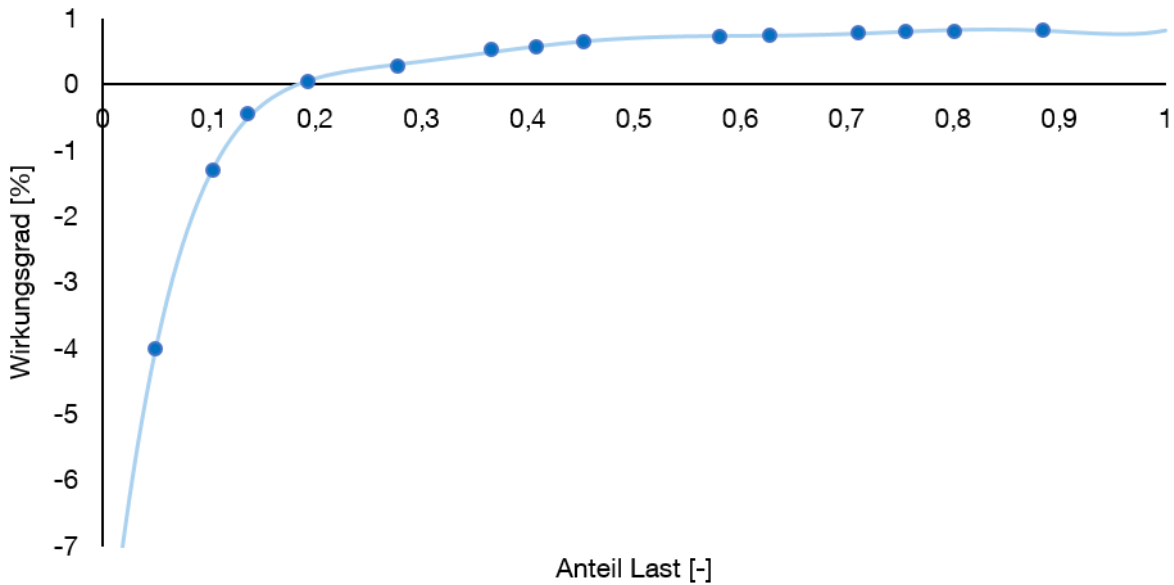


Abbildung B-4: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 9 kW Nennleistung im Senkbetrieb

Zwar entstammen die verwendeten Daten Messungen an einem Motor mit einer Nennleistung von 11,4 kW, da allerdings an dieser Stelle die verwendeten Daten lediglich der Darstellung der Verwendung des Modells dienen und keine allgemein gültigen Aussagen abgeleitet werden sollen, wird die Abschätzung auf dieser Basis als akzeptabel angesehen.

Daten Hubwerk frequenzgeregelt

In Tabelle B-8 sind die Basisdaten für die Betrachtung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase für das Hubwerk mit frequenzgeregeltem Antrieb dargestellt. Auf Basis dieser Daten wird die Kennlinie des Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Last gemäß [Sch-2015a] für frequenzgeregelt Elektromotoren entwickelt.

Tabelle B-8: Basisdaten für das Hubwerk mit frequenzgeregeltem Antrieb

Parameter	Wert	Einheit
Wirkungsgrad bei 100 % Last: $\eta_{100\%}$	0,832	[-]
Wirkungsgrad bei 75 % Last: $\eta_{75\%}$	0,843	[-]
Bemessungsleistung P_{nenn}	4.500	[W]
Synchrondrehzahl n_{nenn}	1.500	[1/min]
Nenn Drehzahl n_{nenn}	1.410	[1/min]

Nenn Drehmoment M_{nenn}	29,84	[Nm]
Nenn-Strangstrom I_{SN}	8,9	[A]
Strangspannung U_{SN}	230	[V]
Leistungsfaktor $\cos\varphi_{\text{N}}$	0,78	[-]
Nennfrequenz f_{nenn}	50	[Hz]
Trägheit Motor	0,0091	[kgm ²]
Trägheit Getriebe	0,0015	[kgm ²]
Trägheit Seiltrommel	0,96	[kgm ²]
Masse Katze	1.200	[kg]

Der entsprechende Verlauf des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Last ist in Abbildung B-5 dargestellt.

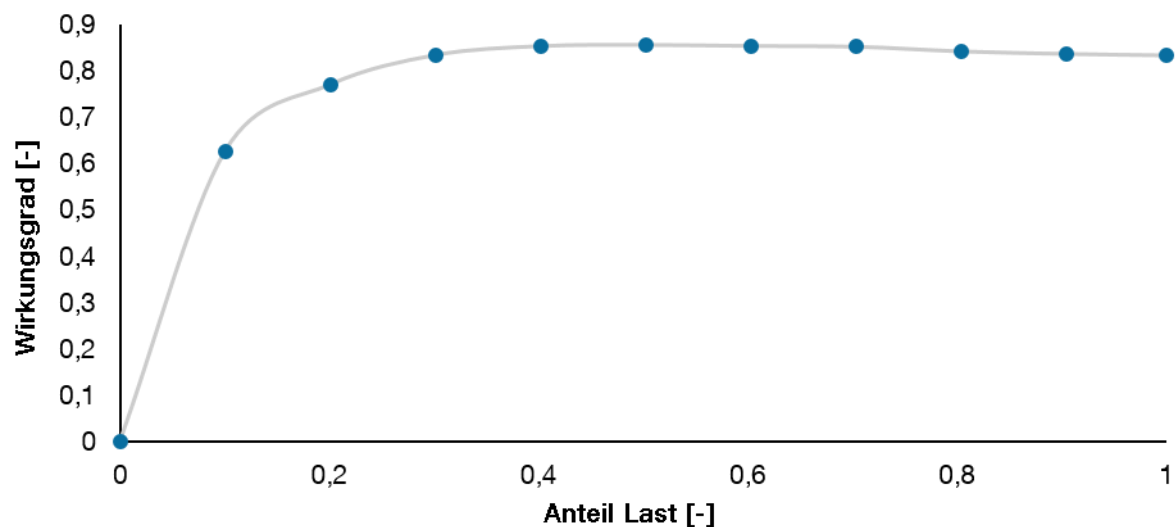


Abbildung B-5: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 4,4 kW Nennleistung

Daten Kran- und Katzfahrwerk frequenzgeregelt

In Tabelle B-9 sind die Basisdaten für die Generierung der Kennlinien für den lastabhängigen Wirkungsgrad für einen frequenzgeregelt Elektromotor mit einer

Nennleistung von 2,2 kW. Analog zum Kran mit polumschaltbaren Antrieben werden auch bei diesem Kran zwei Motoren für das Kranfahren verwendet.

Tabelle B-9: Basisdaten für das Kran- und das Katzfahrwerk mit frequenzgeregeltem Antrieb

Parameter	Wert	Einheit
Wirkungsgrad bei 100 % Last: $\eta_{100\%}$	0,81	[-]
Wirkungsgrad bei 75 % Last: $\eta_{75\%}$	0,81	[-]
Bemessungsleistung P_{nenn}	2.200	[W]
Nenn Drehzahl n_{nenn}	2.740	[1/min]
Nenn Drehmoment N_{nenn}	7,6	[Nm]
Nenn-Strangstrom I_{SN}	2,9	[A]
Strangspannung U_{SN}	400	[V]
Leistungsfaktor $\cos\varphi_N$	0,83	[-]
Nennfrequenz f_{nenn}	50	[Hz]
Trägheit Motor	0,0056	[kgm ²]
Trägheit Getriebe Brücke	0,0001	[kgm ²]
Trägheit Getriebe Katze	0,00012	[kgm ²]
Trägheit Laufrad Brücke	0,942	[kgm ²]
Trägheit Laufrad Katze	0,049	[kgm ²]
Masse Brücke	4.200	[kg]
Masse Katze	1.200	[kg]

Der entsprechende Verlauf des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Last ist in Abbildung B-6 dargestellt.

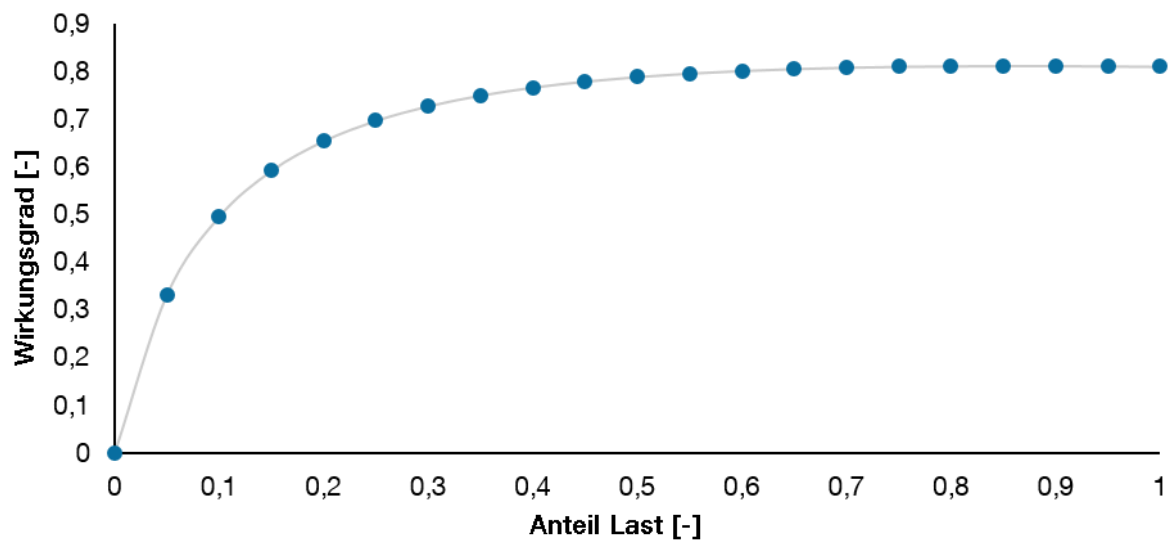


Abbildung B-6: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 2,2 kW Nennleistung

In diesem Fallbeispiel werden für das Kran- und das Katzfahren Motoren mit der gleichen Nennleistung verwendet, so dass auf die Berechnung einer eigenen Wirkungsgradkennlinie für das Katzfahren verzichtet wird.

Daten Hubwerk im Senkbetrieb frequenzgeregelt

Analog zum Kran mit polumschaltbarem Antrieb wird auch für den Kran mit frequenzgeregeltem Hubwerk die Kennlinie für den lastabhängigen Wirkungsgrad auf Basis einer Messung verwendet. Abbildung B-7 zeigt die im Modell verwendete Kennlinie im Rahmen des Fallbeispiels.

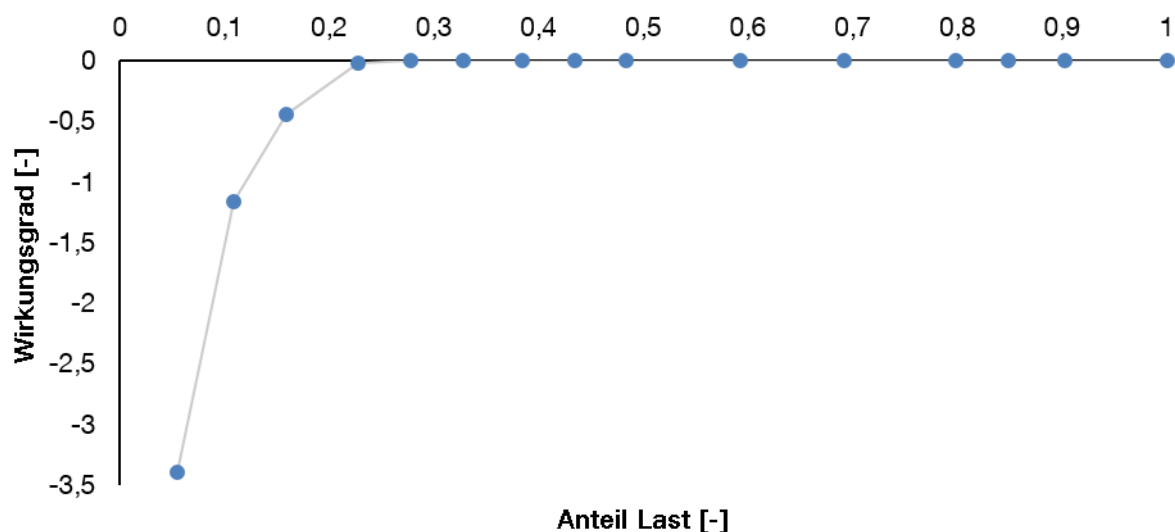


Abbildung B-7: Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Last bei einem Motor mit 4,4 kW Nennleistung im Senkbetrieb

Da der für das Fallbeispiel gewählte Kran über keine Einrichtung zur Energierückspeisung verfügt, kann die beim Senken ab einer Last von ca. 20 % anfallende Energie nicht an anderer Stelle genutzt werden, sondern wird in einem Bremswiderstand in Wärme umgewandelt.

B.1.5 Instandhaltung und Wartung

Für die Abschätzung der Umweltwirkungen aus der Instandhaltung und Wartung werden die Entfernungen für die Anfahrt und den Maschinentransport sowie die Emissionen auf Grund des Maschineneinsatzes herangezogen. Aus diesem Grund können die Basisdaten dem Bereich Transporte und Montage entnommen werden.

B.1.6 Entsorgung

In Tabelle B-10 sind die Basisdaten für das Fallbeispiel hinsichtlich der Entsorgungsphase dargestellt.

Tabelle B-10: Basisdaten für die Entsorgung

Parameter	Wert	Einheit
Recycling Stahl	-1,51	[1/kg]
Recycling Kupfer	-0,849	[1/kg]
Recycling Aluminium	-8,46	[1/kg]
Entsorgung diverse	1,26	[1/kg]

B.2 Umweltkostenrechnung

Tabelle B-1 zeigt die Basisdaten für die Berechnung der umweltbedingten Folgekosten nach [Sch-2012c].

Tabelle B-1: Basisdaten für die Umweltkostenrechnung

Parameter	Wert	Einheit
CO ₂ Basisjahr	0,80	[€/kg]
CO ₂ bis 2020	0,113	[€/kg]

CO₂ bis 2025	0,129	[€/kg]
CO₂ bis 2030	0,186	[€/kg]
CO₂ bis 2040	0,203	[€/kg]
CO₂ bis 2050	0,261	[€/kg]

Da zunächst nur die Berechnung der umweltbedingten Folgekosten infolge des Treibhausgaspotenzials im Vordergrund steht, wird an dieser Stelle der entsprechende Wert für die Folgen des Treibhausgasäquivalents herangezogen.

Anhang C Validierung Energiemodell

Zur Validierung des in Kapitel 6.2.4 vorgestellten Energiebedarfsmodells in Matlab / Simulink werden die simulierten Daten mit den entsprechenden Messwerten mit gleicher Last gegenübergestellt. Die Validierung erfolgt getrennt nach Hubwerk beim Lastheben und Last senken, Kranfahren und Katzfahren in den nächsten Abschnitten in Abhängigkeit unterschiedlicher Hublasten.

C.1 Basisdaten für die Modellvalidierung

In den folgenden Tabellen werden die Basisdaten für die Modellvalidierung tabellarisch vorgestellt. Die jeweiligen Lasten, die für die Validierung verwendet wurden, können den Abbildungen entnommen werden.

Tabelle C-1: Basisdaten für die Validierung des Energiebedarfsmodells

Parameter	Wert	Einheit
Nennhubgeschwindigkeit	0,1	[m/s]
Einscherung	4/2	[-]
Nennleistung Hubwerk	11.000	[W]
Geschwindigkeit Kranfahren	0,5	[m/s]
Nennleistung Kranfahrwerk	2x1.000	[W]
Geschwindigkeit Katzfahren	0,33	[m/s]
Nennleistung Kranfahrwerk	1.000	[W]

C.2 Validierung Hubwerk

In den folgenden Abbildungen (Abbildung C-1, Abbildung C-2, Abbildung C-3 und Abbildung C-4) werden als Validierung Simulationsdaten und die entsprechenden Messwerte in Abhängigkeit unterschiedlicher Hublasten hinsichtlich der Leistungsaufnahme gegenübergestellt.

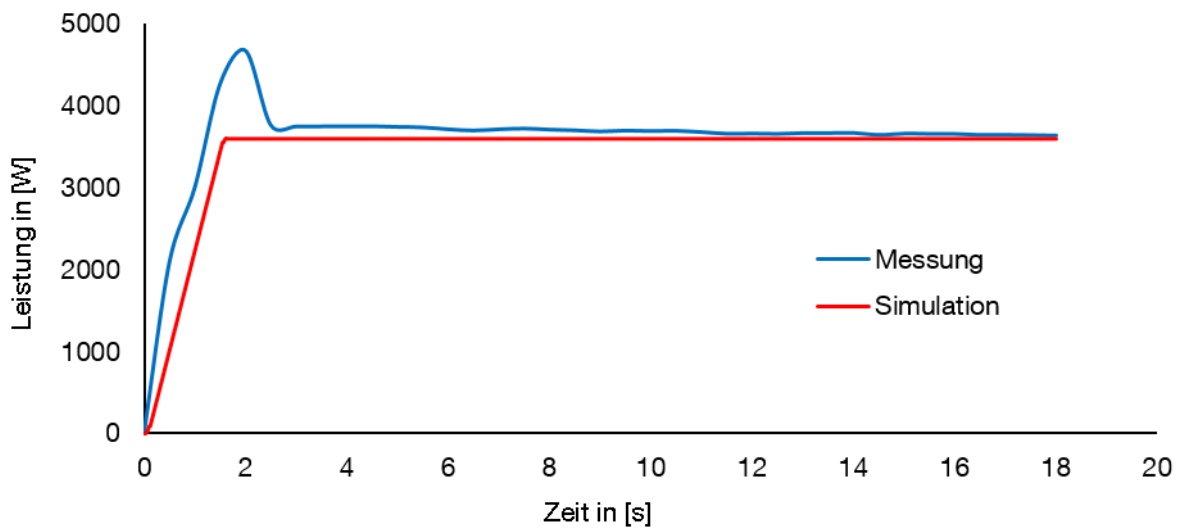


Abbildung C-1: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 1040 kg

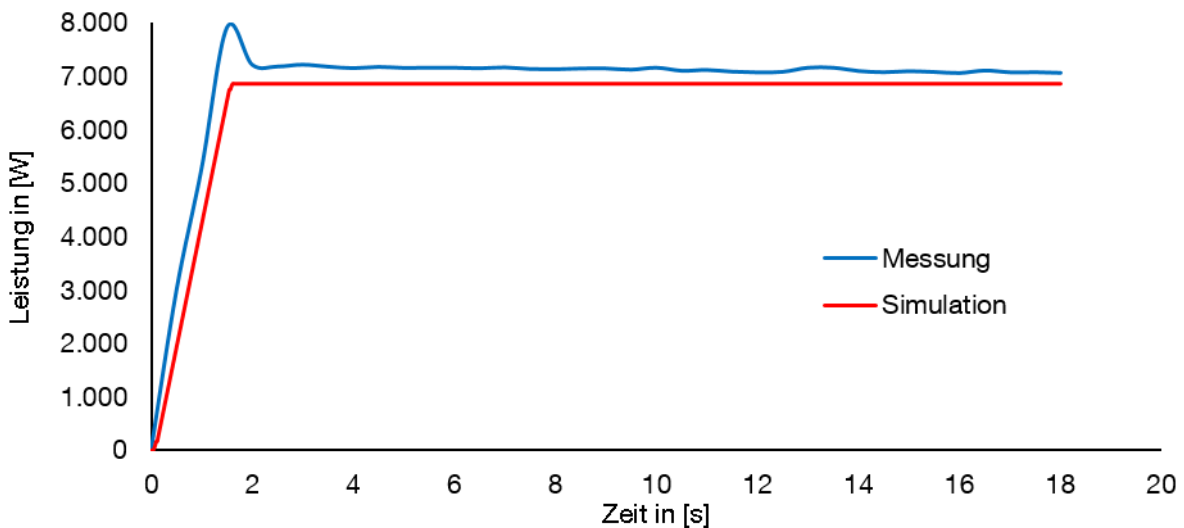


Abbildung C-2: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 3840 kg

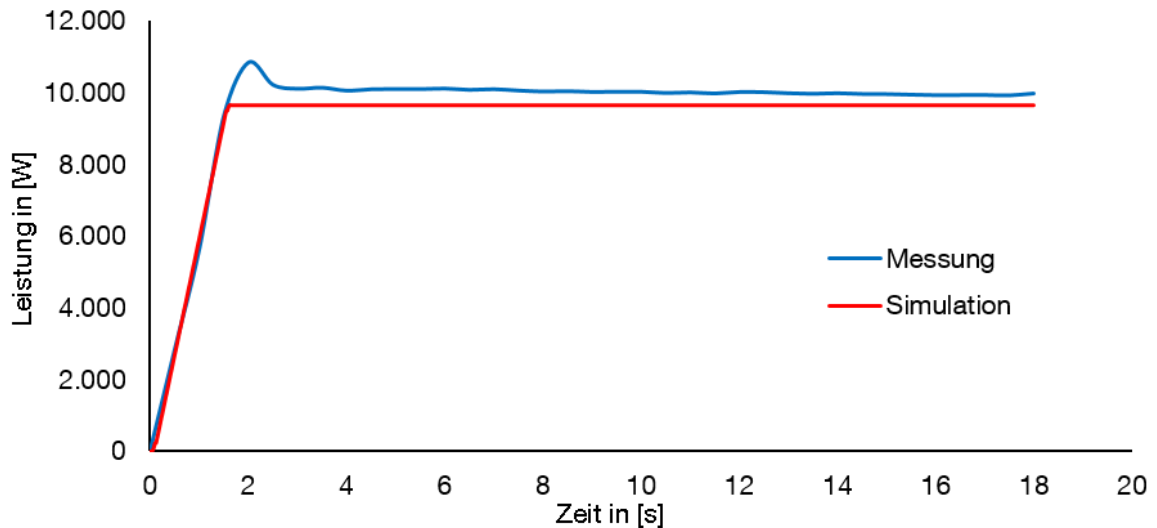


Abbildung C-3: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 5880 kg

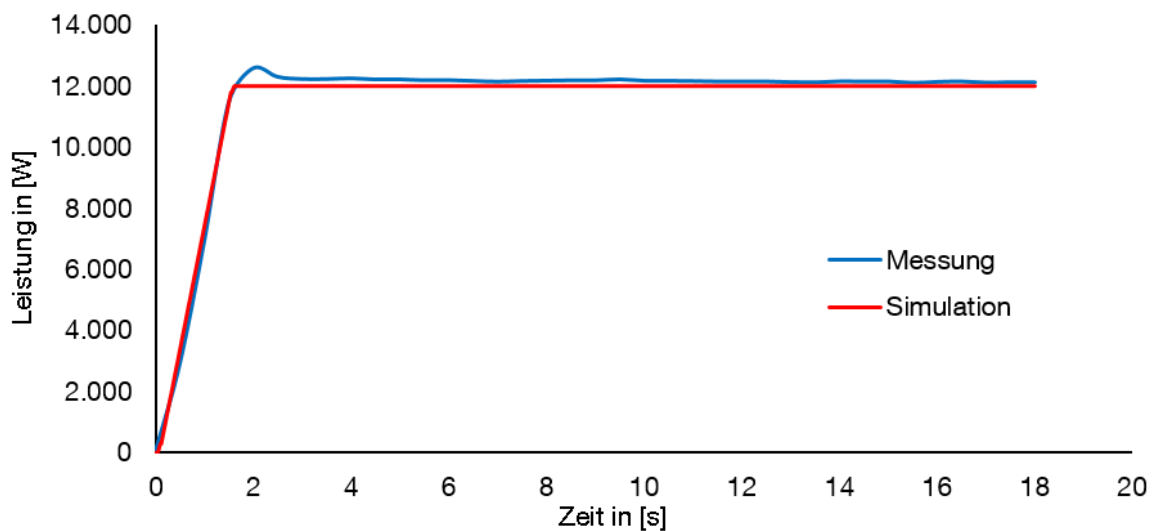


Abbildung C-4: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 7480 kg

Insgesamt zeigen die Vergleiche zwischen den Messungen und den Simulationen eine zufrieden stellende Übereinstimmung, so dass das Modell für die Abschätzung des Energiebedarfs für Kranhubwerke geeignet ist.

C.3 Validierung Kranfahren und Katzfahren

Das Modell ist für das Kran- und das Katzfahren identisch aufgebaut, lediglich die Parameter für den jeweiligen Antrieb sind angepasst; die Vorgabe der Bewegung wird getroffen. In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung C-5, Abbildung C-6, Abbildung C-7 und Abbildung C-8) werden die Messwerte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Lasten mit den in den Simulationen erzielten Daten für das Kranfah-

ren gegenübergestellt. Da das Katzfahren dem gleichen Modellierungsansatz unterliegt wird auf eine entsprechende Gegenüberstellung verzichtet, da lediglich die Parameter angepasst werden, aber nicht das physikalisch hinterlegte Grundmodell geändert wird.

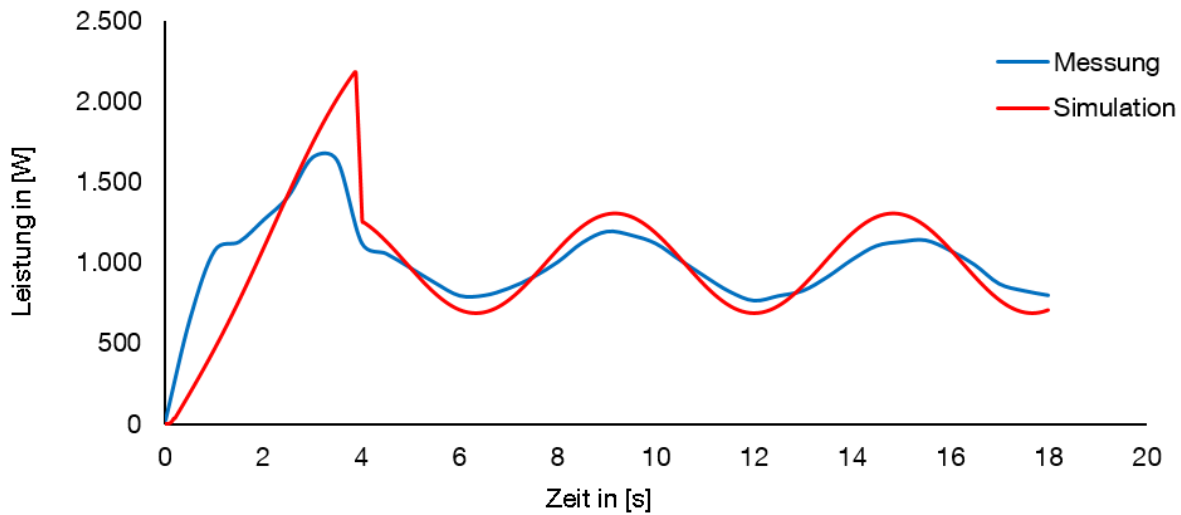


Abbildung C-5: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 1040 kg

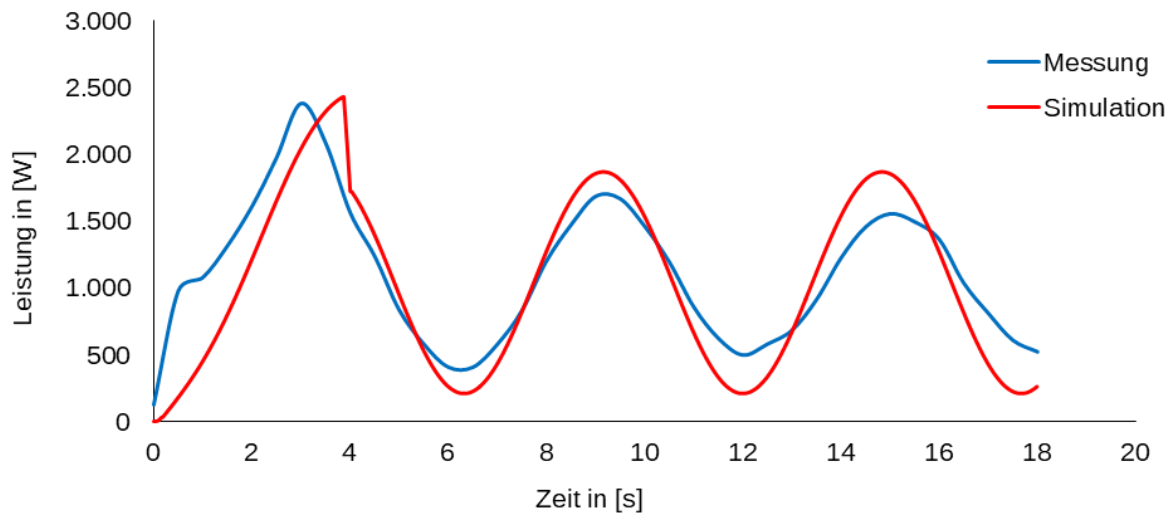


Abbildung C-6: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 3840 kg

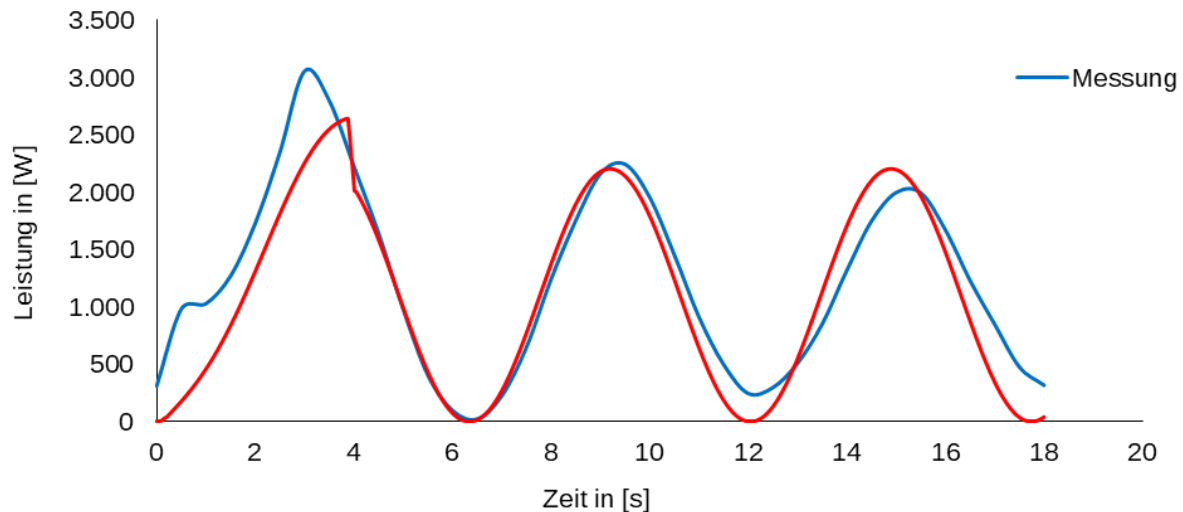


Abbildung C-7: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 5880 kg

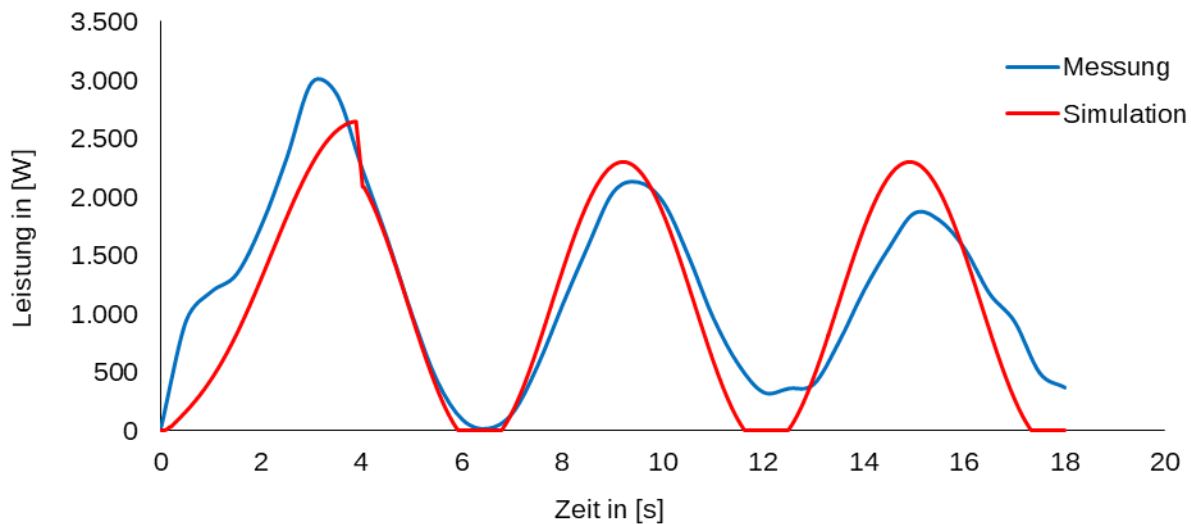


Abbildung C-8: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 7480 kg

Insgesamt zeigt sich eine ausreichende Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Simulationsdaten, so dass das Modell auch als validiert angesehen werden kann.

C.4 Validierung Lastsenken

Die Validierung des Modells für das Lastsenken erfolgt in analoger Weise zum Lastheben, mit dem grundlegenden Unterschied, dass beim Lastsenken die Bewegungswiderstände von der ziehenden Last teilweise aufgewogen werden. Der Modellierungsansatz entspricht aber weitestgehend dem Ansatz für das Hubwerk, so dass in den folgenden Abbildungen (Abbildung C-9, Abbildung C-10, Abbildung C-11

und Abbildung C-12) die Ergebnisse für die Validierung in Abhängigkeit unterschiedlich großer Hublasten dargestellt werden.

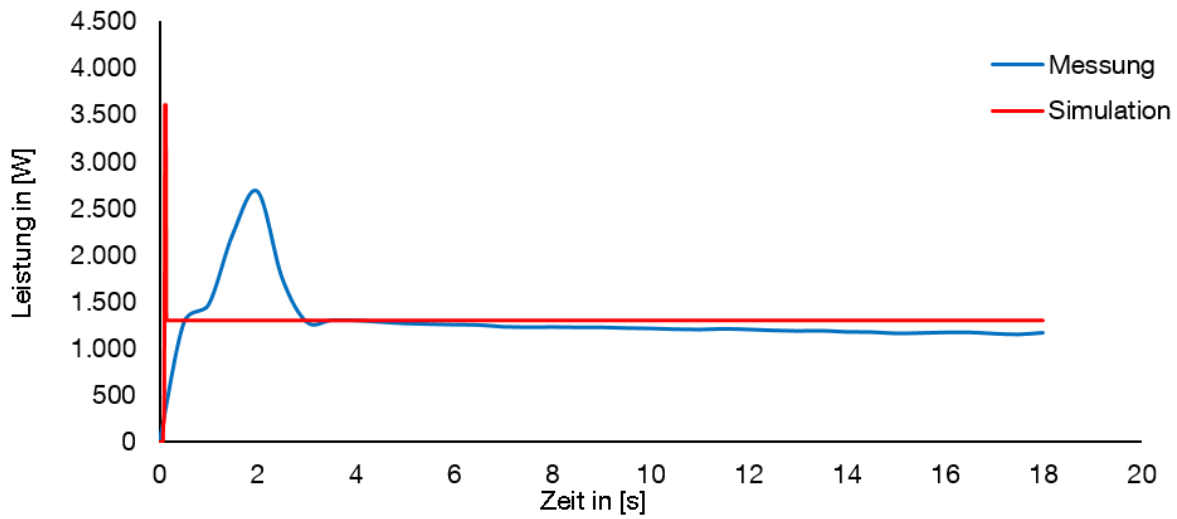


Abbildung C-9: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 1040 kg

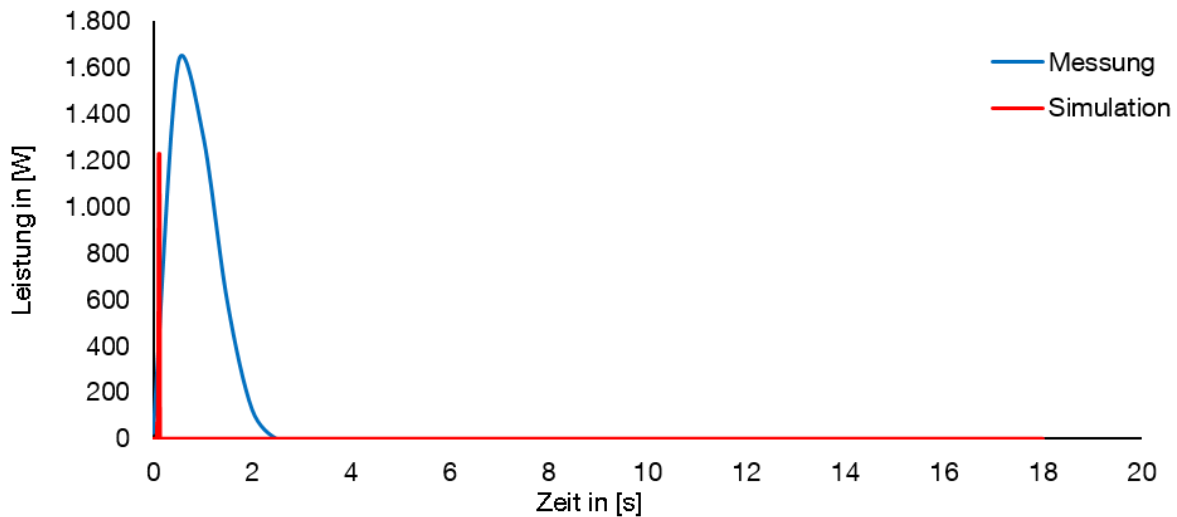


Abbildung C-10: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 3840 kg

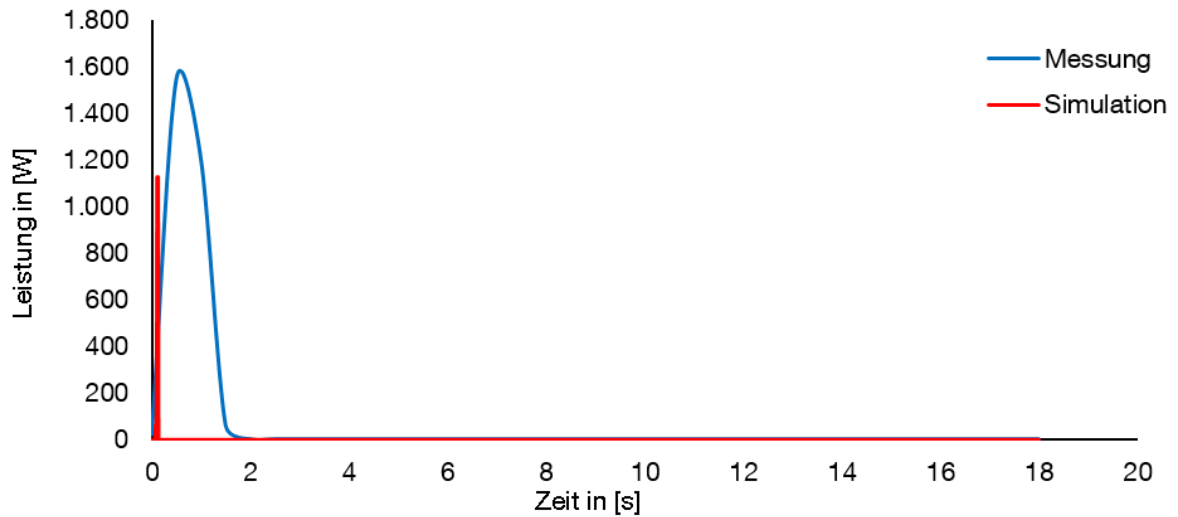


Abbildung C-11: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 5880 kg

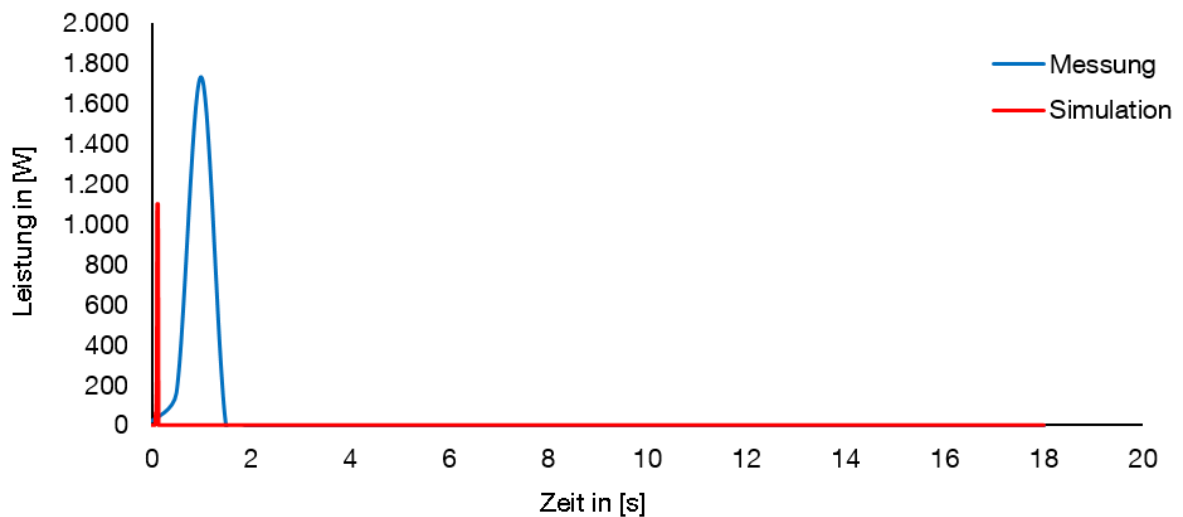


Abbildung C-12: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 7480 kg

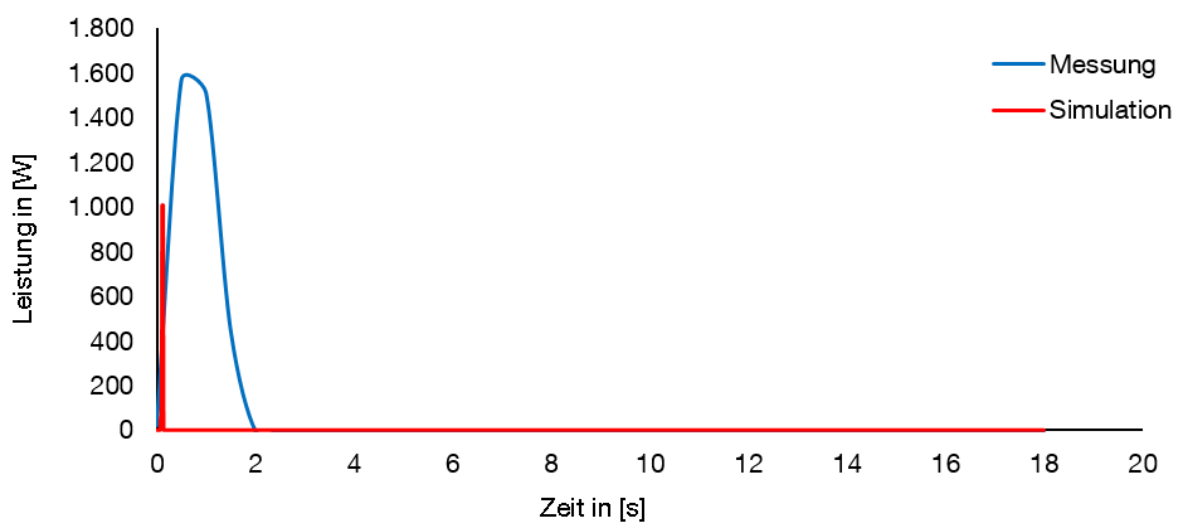


Abbildung C-13: Vergleich Messung und Simulation mit einer Last von 10060 kg

Insgesamt zeigt sich auch für das Lastsenken eine zufrieden stellende Übereinstimmung zwischen den Simulationsdaten und den gemessenen Werten für die betrachteten Lasten, so dass auch dieses Modell als valide bezeichnet werden kann. Die Abweichungen im Anlaufverhalten sind dem gewählten Modellierungsansatz geschuldet, bei dem von der mechanischen Seite ausgegangen und nicht das Anlaufverhalten des Motors an sich implementiert wird.

Anhang D Validierung Mehrkörpermodell

Analog zur Validierung des Simulationsmodells zur Berechnung des Energiebedarfs erfolgt an dieser Stelle der Abgleich von Messdaten und Simulationen für das Mehrkörpermodell des Krans. Die Randbedingungen für die Durchführung der Versuche und die verwendeten Parameter für die Simulation und die Messungen wurden bereits in Abschnitt 5.3.1 vorgestellt. Die Aufteilung der verwendeten Lasten richtet sich nach den Gewichten, die für die Durchführung der Versuche zur Verfügung stehen.

D.1 Basisdaten für die Validierung des Mehrkörpermodells

Tabelle D-1 zeigt die Basisdaten für die Mehrkörpersimulation, die für die Validierung des Modells verwendet wurden.

Tabelle D-1: Basisdaten für die Validierung des Mehrkörpermodells

Parameter	Wert	Einheit
Nennhubgeschwindigkeit	0,1	[m/s]
Geschwindigkeit Kranfahren	0,5	[m/s]
Geschwindigkeit Katzfahren	0,33	[m/s]

Als Referenzkran wurde der Einträger-Laufkran am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik an der Technischen Universität München verwendet und die entsprechenden Daten aus dem Datenblatt des Krans in die Simulation übernommen.

D.2 Kranfahren

Zur Validierung des Kranfahrens werden die Messwerte aus den Fahrversuchen mit Simulationsdaten für die äquivalenten Bewegungen gegenübergestellt. Maßgeblich für die Bestimmung der Spielzeit ist das Verhalten der Last am Ende, so dass der Fokus auf der Auswertung des Ausschwingverhaltens liegt. Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung D-1, Abbildung D-2 und Abbildung D-3) zeigen das Ergebnis der Validierung für das Kranfahren.

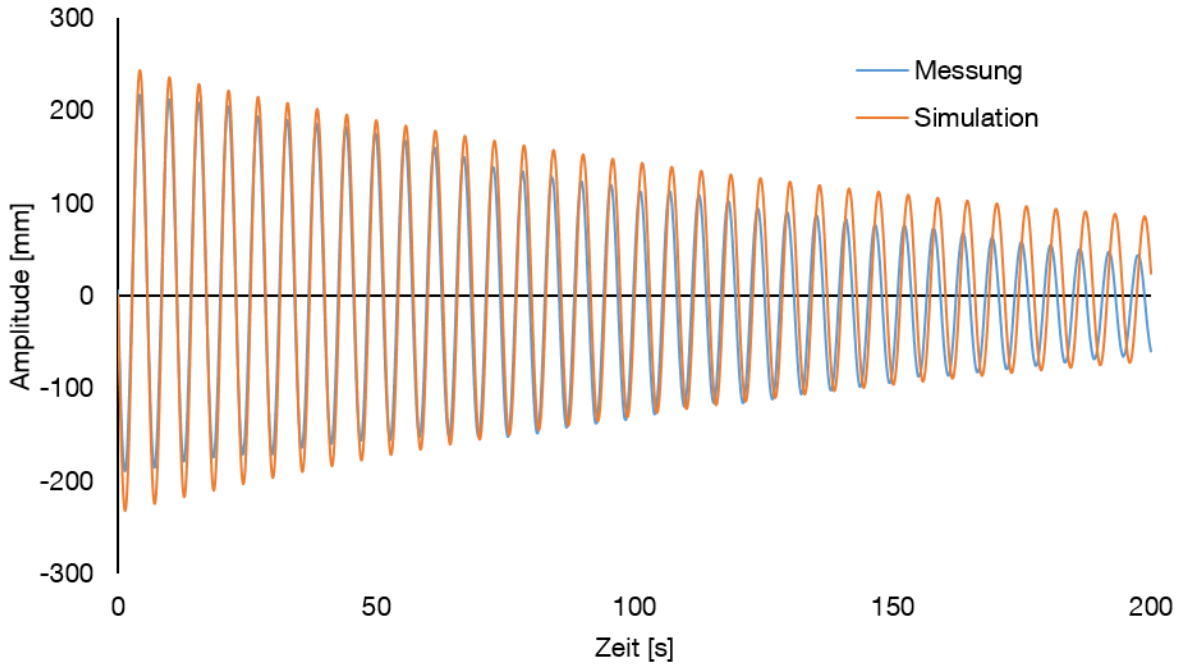


Abbildung D-1: Validierung mit einer Last von 2500 kg und einem Bodenabstand von 500 mm

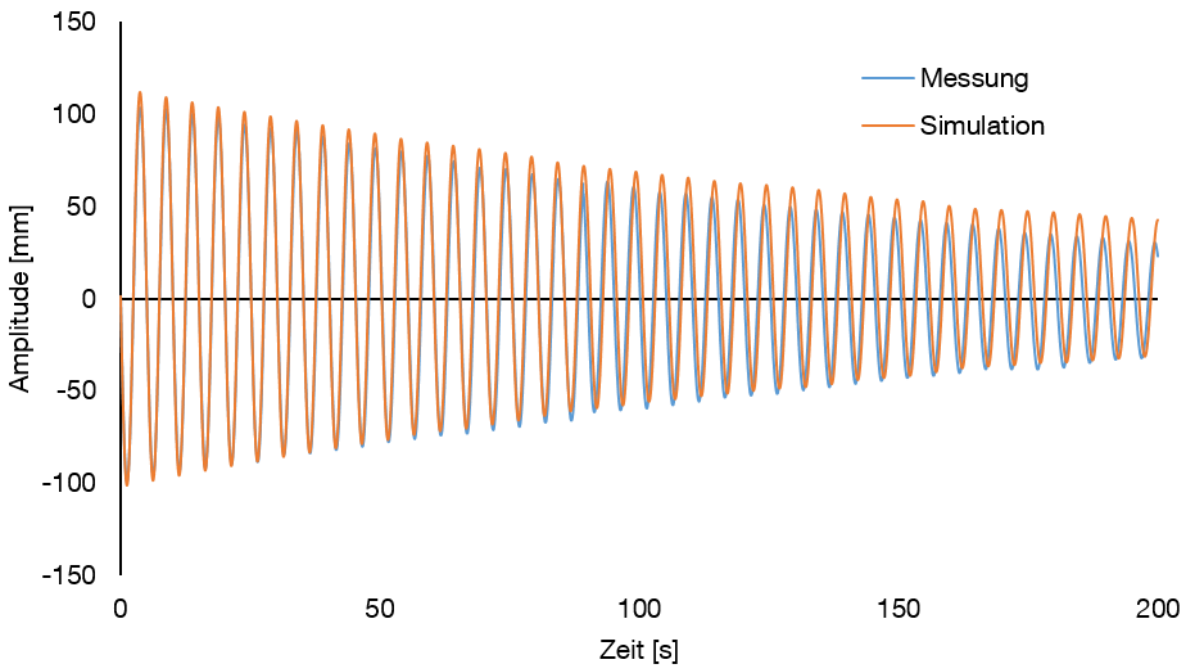


Abbildung D-2: Validierung mit einer Last von 1100 kg einem Bodenabstand von 2500 mm

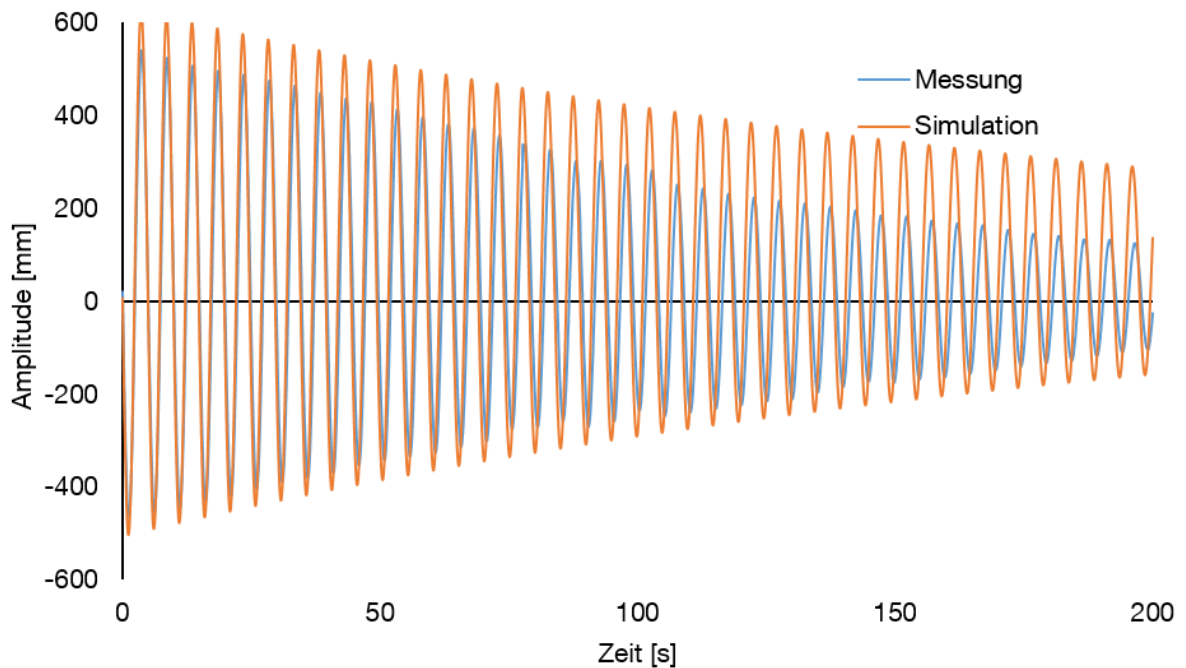


Abbildung D-3: Validierung mit einer Last von 2500 kg einem Bodenabstand von 2500 mm

Insgesamt zeigen die Vergleiche zwischen den Simulationen und den Messungen eine gute Übereinstimmung; es kann also davon ausgegangen werden, dass das Modell die Bewegung des Krans hinsichtlich des Ausschwingens unter unterschiedlichen Antriebssystemen auch ausreichend genau wiedergibt. Dies gilt sowohl für die betrachteten Amplituden als auch für die Frequenz, mit der das System schwingt. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, das Ausschwingverhalten beim Kranfahren mithilfe der Mehrkörpersimulation abzubilden und damit die Spielzeiten beim Kranfahren zu berechnen.

D.3 Katzfahren

Die Validierung des Modells für das Katzfahren erfolgt unter den gleichen Randbedingungen und Parametern wie das Kranfahren. Dabei wird analog das Ausschwingverhalten des Systems betrachtet die erzeugten Simulationsdaten mit den Messwerten aus den Fahrversuchen verglichen. Die folgenden Abbildungen (Abbildung D-4, Abbildung D-5 und Abbildung D-6) zeigen das Ergebnis der Validierung für das Katzfahren.

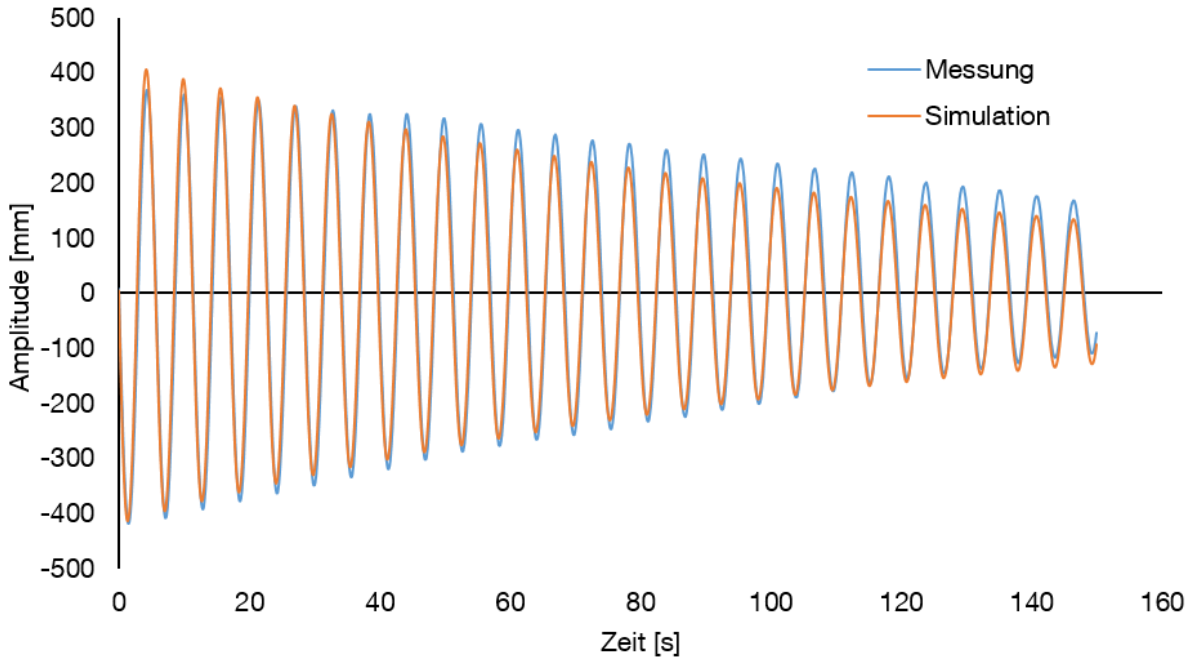


Abbildung D-4: Validierung mit einer Last von 2500 kg und einem Bodenabstand von 500 mm

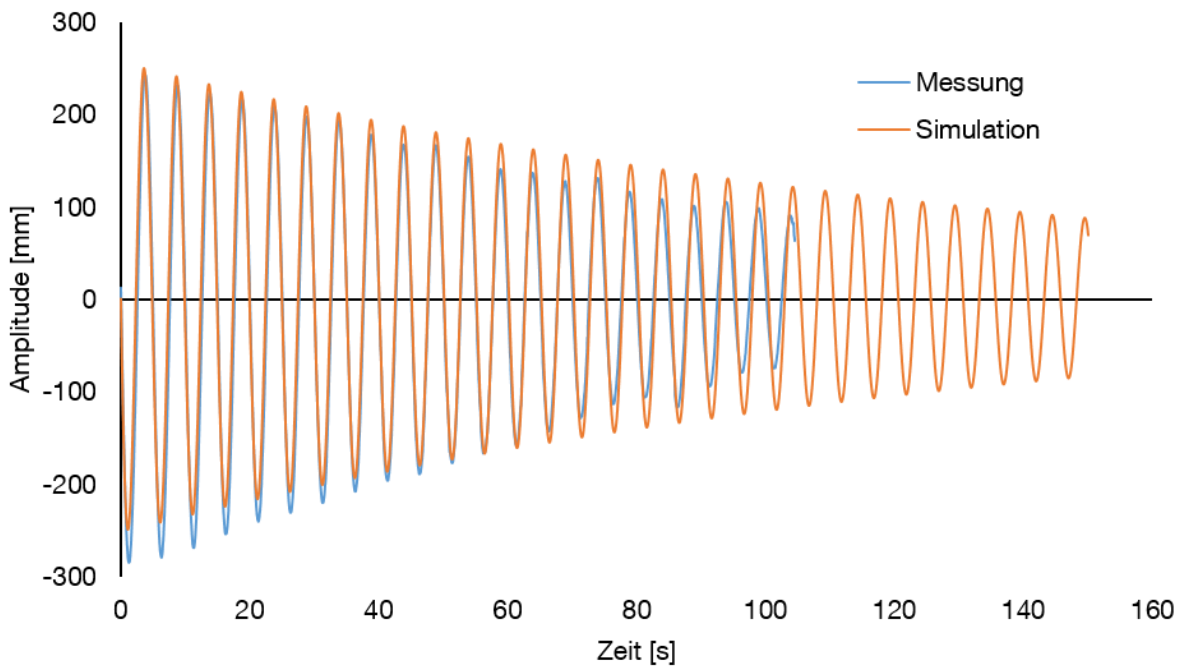


Abbildung D-5: Validierung mit einer Last von 1100 kg einem Bodenabstand von 2500 mm

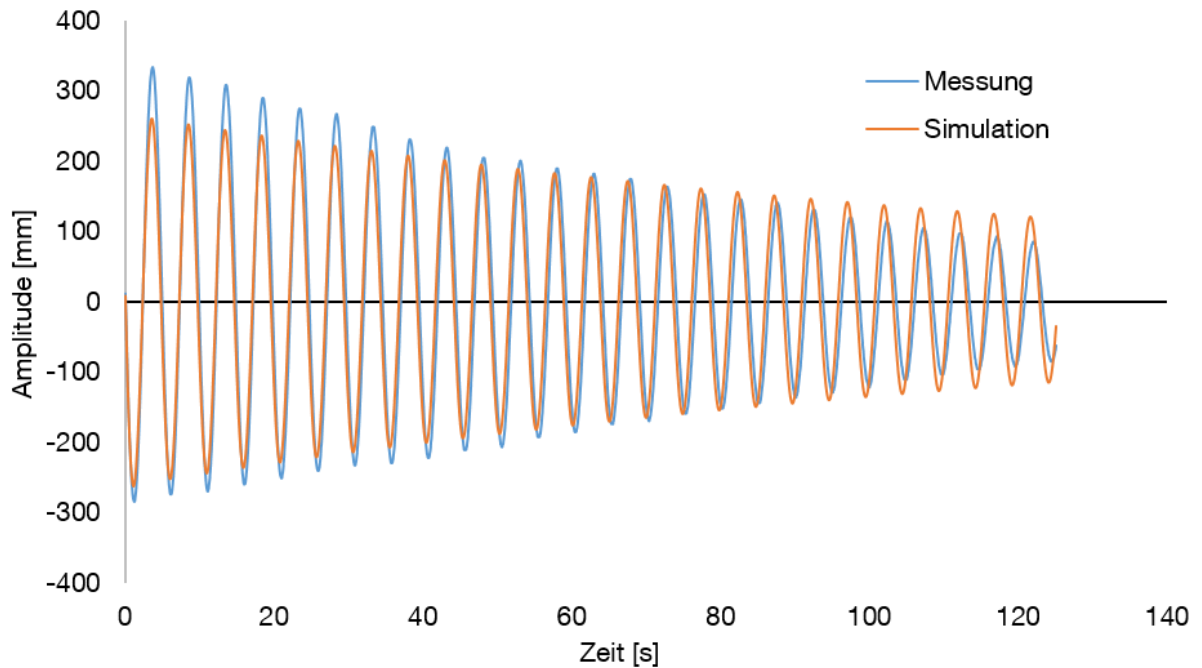


Abbildung D-6: Validierung mit einer Last von 2500 kg einem Bodenabstand von 2500 mm

Analog zum Kranfahren zeigt auch die Validierung für das Katzfahren eine hinreichend genaue Übereinstimmung von Messwerten und den äquivalent durchgeführten Simulationen mit dem Mehrkörpermodell. Damit ist es auf Basis der Simulation möglich, die Ausschwingzeiten und damit die Gesamtspielzeiten von Krananlagen abzubilden und damit die Basis für die Berechnung der Arbeitskosten zu schaffen.