

FORSCHUNGSBERICHT

W.A. Günthner · S. Habenicht

Erweiterte Logistiksystemplanung unter
Einbeziehung des Energieverbrauchs

Forschungsbericht

der Forschungsstelle

Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **17168 N**

Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs

der AiF-Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

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

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Printed in Germany 2013

ISBN: 978-3-941702-36-3

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Telefon: + 49 89 289 15921

Telefax: + 49 89 289 15922

www.fml.mw.tum.de

Zusammenfassung

Energieeffizienz stellt aufgrund von ökonomischen, ökologischen und soziologischen Gründen einen aktuellen Trend dar, der auch für die Planung von Logistiksystemen von Bedeutung ist. Innerhalb des Forschungsvorhabens „Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs“ stehen Ansätze für die Bestimmung des Energiebedarfs und energieeffiziente Betriebsstrategien von logistischen Anlagen im Fokus. Ziel ist, die Berücksichtigung des Energiebedarfs bei der Auswahl von Planungsalternativen zu erleichtern oder erst zu ermöglichen.

In den Grundlagenuntersuchungen für die Energiebedarfsermittlung stehen die Einflussgrößen auf den Energiebedarf sowie mögliche Ansätze und Werkzeuge zur Ermittlung des Jahresenergiebedarfs im Mittelpunkt. Darüber hinaus werden Messungen an Komponenten im Betrieb durchgeführt. Es zeigt sich, dass bestehende Ansätze bzw. Werkzeuge den Anforderungen nicht gerecht werden.

Um den jährlichen Energiebedarf schnell, aufwandsarm und bereits in der Planungsphase von Logistiksystemen zu ermitteln, werden analytische Modelle für Stetigförderanlagen sowie Regalbediengeräte entwickelt. Beide Modelle werden in einem Softwarewerkzeug implementiert, welches eine praktikable Anwendung ermöglicht. Innerhalb des Werkzeugs können verschiedene Planungsvarianten angelegt, deren jährlicher Energiebedarf bestimmt und hinsichtlich der Energiekosten verglichen werden.

Durch Betriebsstrategien kann der Energiebedarf verschiedener Fördermittel merklich reduziert werden. Energieeffiziente Betriebsstrategien für Regalbediengeräte und Stetigförderanlagen werden untersucht und bewertet. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Handlungsempfehlungen für die Nutzung der Ergebnisse generiert. Auch die weiteren Projektergebnisse werden in Handlungsempfehlungen überführt und in das Softwarewerkzeug eingebunden.

Mittels Lebenszykluskostenuntersuchungen für verschiedene Szenarien kann die Bedeutung der Energiekosten herausgestellt werden.

Mit den erarbeiteten Berechnungsansätzen und abgeleiteten Handlungsempfehlungen kann eine Berücksichtigung des Energiebedarfs in der Planungsphase von Logistiksystemen erfolgen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Wissenschaftlich-technische Problemstellung	1
1.2	Forschungsziel	2
1.2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	2
1.2.2	Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	3
1.2.3	Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	3
2	Stand der Technik und der Wissenschaft	7
2.1	Planung von Logistiksystemen	7
2.1.1	Strukturierung von Logistiksystemen	7
2.1.2	Planungsvorgehen	9
2.2	Energieeffizienz für Logistiksysteme	11
2.2.1	Grundlagen zum elektrischen Energiebedarf	11
2.2.2	Messung von elektrischer Leistung und Arbeit	14
2.2.3	Ansätze zur Ermittlung des Energiebedarfs	15
2.2.4	Aktuelle Werkzeuge zur Ermittlung des Energiebedarfs	19
2.2.5	Mess- und Visualisierungssysteme	23
3	Modellierung des Energiebedarfs	25
3.1	Anforderungen an die Energiebedarfsermittlung in der Planungsphase von Logistiksystemen	25
3.2	Einflussgrößen auf den Energiebedarf	26
3.3	Klassifikation von Energieverbrauchern	28
3.3.1	Klassifikationsschema	28
3.3.2	Untersuchungsszenarien	30
3.3.3	Klassifikation der Verbraucher innerhalb der Szenarien	32
3.4	Durchführung von Messungen	34
3.5	Auswahl der Methode zur Energiebedarfsermittlung	38
3.6	Energiebedarf von Stetigförderern	40
3.6.1	Abbildung von Stetigförderanlagen	41
3.6.2	Modellierung der elektrischen Leistung	44
3.6.3	Modellierung der Laufzeit	51

3.6.4	Zusammenführung der Modelle	53
3.6.5	Validierung	54
3.7	Energiebedarf von Regalbediengeräten	56
3.7.1	Analyse von Regalbediengeräten	56
3.7.2	Energiebedarf je Verfahrenspiel	58
3.7.3	Modell für die Bestimmung des Jahresenergiebedarfs	61
3.8	Energiebedarf von Hochregalstaplern	62
4	Entwicklung und Evaluierung effizienter Betriebsstrategien	67
4.1	Energieeffiziente Betriebsstrategien für Stetigförderanlagen	67
4.1.1	Zyklusspezifische Betriebsstrategien	69
4.1.2	Zyklusübergreifende Betriebsstrategien	70
4.2	Energieeffiziente Betriebsstrategien für Regalbediengeräte	73
4.2.1	Energieeffiziente Lagerbewirtschaftungsstrategien	74
4.2.1	Energieeffiziente Verfahrenstrategien	76
5	Implementierung eines Softwarewerkzeugs zur Bestimmung des Energiebedarfs	81
5.1	Struktur des Werkzeugs	82
5.2	Energiebedarfsermittlung von Stetigförderanlagen	83
5.3	Energiebedarfsermittlung von Regalbediengeräten	87
5.4	Variantenvergleich hinsichtlich Energiekosten	88
6	Einsparpotenziale und Ableitung von Handlungsempfehlungen	91
6.1	Aufzeigen von Einsparpotenzialen	91
6.1.1	Lebenszykluskosten	92
6.1.2	Energiekosten	93
6.1.3	Einsparpotenziale im Szenario „Stetigförderanlage“	94
6.1.4	Einsparpotenziale im Szenario „Erweiterung AKL“	97
6.1.5	Einsparpotenziale im Szenario „Manuell vs. Automatisch“	98
6.2	Ableitung von Handlungsempfehlungen	100
6.2.1	Struktur der Handlungsempfehlungen	101
6.2.2	Komponentenwahl bei Regalbediengeräten	101
6.2.3	Auswahl der Fördermittel / Komponenten bei Stetigförderanlagen	102
6.2.4	Handlungsempfehlung für energieeffiziente Betriebsstrategien für Regalbediengeräte	104

6.2.5 Handlungsempfehlung für energieeffiziente Betriebsstrategien für Stetigförderanlagen	105
6.2.6 Handlungsempfehlungen zur Implementierung von Mess- und Visualisierungssystemen	105
7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	107
7.1 Zusammenfassung	107
7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	108
7.3 Ausblick	109
Literaturverzeichnis	111
Abbildungsverzeichnis	123
Tabellenverzeichnis	127

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a_x	[m/s ²]	Fahrbeschleunigung bzw. –verzögerung
a_y	[m/s ²]	Hubbeschleunigung bzw. –verzögerung
b	[-]	Regalwandparameter
D_a	[mm]	Außendurchmesser der Rollen
d	[mm]	Lagerzapfendurchmesser der Rollen
E	[J]	Energie
$E_{Arbeitsgang}$	[J]	gesamte jährliche Energiebedarf des Flurförderzeugs innerhalb der Arbeitsgänge
E_{DS}	[J]	mittlerer Energiebedarf für ein Doppelspiel
E_{ESA}	[J]	mittlerer Energiebedarf für ein Auslager-Einzelspiel
E_{ESE}	[J]	mittlerer Energiebedarf für ein Einlager-Einzelspiel
E_{Gesamt}	[J]	Gesamtenergiebedarf
$E_{Hauptgang}$	[J]	jährliche Energiebedarf für die Förderung entlang des Hauptgangs
E_i	[J]	Energiebedarf für einen Zyklus i
E_{Jahr}	[J]	jährlicher Energiebedarf
E_o	[J]	Energiebedarf eines Spiels vom E/A-Punkt zum Arbeitsgang o
F	[N]	vom Kettengewicht unabhängige Reibkraft
F_{ges}	[N]	Reibkraft
f	[mm]	Hebelarm der Rollreibung
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
H	[m]	maximale Hubweg
I	[A]	Effektivwert der Stromstärke
$i(t)$	[A]	Momentanwert der Stromstärke
\hat{i}	[A]	Scheitelwert der Stromstärke
i	[-]	maximale Anzahl an Fördereinheiten des Zyklus
k	[-]	Anzahl der Zyklusabschnitte
L	[m]	maximaler Fahrweg
l	[m]	Länge der Förderstrecke

Formelzeichenverzeichnis

l_A	[m]	minimale Abstand zwischen zwei Fördereinheiten
l_F	[m]	Länge der Fördereinheit
M	[-]	Anzahl Fördereinheiten im Jahr
m	[-]	Anzahl der verschiedenen Zyklusausprägungen
$m_{\text{Fördergewicht}}$	[kg]	Fördergewicht
M_G	[kg]	Gesamtmasse
m_H	[kg]	Hubmasse
m_N	[kg]	Nutzlast
$m_{\text{spezif. Kettengewicht}}$	[kg/m]	spezifische Kettengewicht
N	[-]	maximale Blockgröße
N_{DS}	[-]	Anzahl Doppelspiele pro Jahr
N_{ES}	[-]	Anzahl Einzelspiele pro Jahr
N_{ESE}	[-]	Anzahl Einlager-Einzelspiele pro Jahr
N_{ESA}	[-]	Anzahl Auslager-Einzelspiele pro Jahr
n	[-]	Häufigkeiten der Zyklusausprägungen
O	[-]	Anzahl Arbeitsgänge
P	[W]	Leistung
P_0	[W]	Leerlaufleistung
$P_{\text{elektrisch}}$	[W]	elektrische Leistung
P_G	[W]	Grundlast
P_j	[W]	mittlere Leistung innerhalb des Zyklusabschnitts j
P_{LAM}	[W]	mittlere Leistung des Lastaufnahmemittels
$P_{\text{mechanisch}}$	[W]	mechanische Leistung an der Motorwelle
$p(t)$	[W]	Momentanwert der Leistung
Q	[W]	Blindleistung
q	[-]	Anteil der Fördereinheiten, die einen größeren Abstand als das Abrisskriterium besitzen
S	[W]	Scheinleistung
T_B	[s]	Betriebszeit
T_L	[s]	Gesamtlaufzeit
T_S	[s]	Standby-Zeit
t_0	[s]	Totzeit
t_{ES}	[s]	mittlere Spielzeit pro Einzelspiel
t_{DS}	[s]	mittlere Spielzeit pro Doppelspiel
t_j	[s]	Dauer eines Zyklusabschnitts j
U	[V]	Effektivwert der Spannung

$u(t)$	[V]	Momentanwert der Spannung
\hat{u}	[V]	Scheitelwert der Spannung
v	[m/s]	Fördergeschwindigkeit
v_{max}	[m/s]	maximale Geschwindigkeit
v_{xm}	[m/s]	mittlere Fahrgeschwindigkeit
v_x	[m/s]	maximale Fahrgeschwindigkeit
v_y	[m/s]	maximale Hubgeschwindigkeit
W	[J]	elektrische Arbeit
w_x	[-]	Widerstandsbeiwert des Fahrwerks
w_y	[-]	Widerstandsbeiwert des Hubwerks
x_0	[m]	Weg zum Beschleunigen auf v_x
η	[-]	gesamter Wirkungsgrad von Getriebe, Übertragungselementen sowie Trag- und Zugmittel
η_{FU}	[-]	Wirkungsgrad des Frequenzumrichters
η_{Ladung}	[-]	Wirkungsgrad der Batterieladung
η_{Motor}	[-]	Wirkungsgrad des Motors
η_R	[-]	Wirkungsgrad der Energierückgewinnung
η_x	[-]	Wirkungsgrad Fahrwerk
η_y	[-]	Wirkungsgrad Hubwerk
μ	[-]	Reibbeiwert
μ_L	[-]	Lagerreibwert
φ	[°]	Phasenverschiebungswinkel

1 Einleitung

1.1 Wissenschaftlich-technische Problemstellung

Bei der Logistiksystemplanung stehen nach wie vor minimale Investitionen bei der Auswahl aus verschiedenen Planungsalternativen im Mittelpunkt des Entscheidungsprozesses. Trotz des nachweislich hohen Einsparpotenzials [Fra-2008, o. V.-2008, Muh-2011] ist die Energieeffizienz intralogistischer Anlagen in der Planungsphase im Moment kaum von Bedeutung. Erst bei vergleichbarem Anschaffungspreis werden längerfristige Betrachtungen zu Energie- und Wartungskosten zur Entscheidungsfindung herangezogen [Sei-2006]. Angesichts steigender Energiepreise [BDE-2013] kann diese Nichtbeachtung des Faktors Energieeffizienz bei der Auswahl von Planungsvarianten in der Nutzungsphase hohe Kosten mit sich bringen.

Neben den Entwicklungen am Energiemarkt steigern geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen die Bedeutung energieeffizienter Lösungen zusätzlich. So beschäftigt sich beispielsweise die EU-Richtlinie 2009/125/EG (bzw. Ökodesign-Richtlinie) mit der umweltgerechten Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte [Eur-2009b]. Im November 2011 wurde die Richtlinie unter dem Namen „Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz“ für Deutschland in nationales Recht umgesetzt. Derartige Gesetze fördern u. a. auch die Nachfrage nach einer energieeffizienten Fördertechnik [Bla-2009].

Dritter Treiber für ein Umdenken in Bezug auf den Energieverbrauch sind Überlegungen zum Unternehmensimage. Vor dem Hintergrund einer gesteigerten öffentlichen Wahrnehmung, der durch den Energiebedarf verursachten Umweltauswirkungen (z. B. Klimawandel), können mit entsprechenden energiesparenden Produkten aber auch mit effizienten Produktions- und Logistikanlagen positive Marketingeffekte erzeugt werden.

Um die Energieeinsparpotenziale aufzuzeigen und die häufig höheren Investitionen bei der Anschaffung energieeffizienterer Systeme zu rechtfertigen, ist eine Betrachtung der gesamten Anlagenlebensdauer nach dem Prinzip der Lebenszykluskosten erforderlich. Der während der Nutzung anfallende Energiebedarf intralogistischer Anlagen wird bereits in der Planungsphase festgelegt. Dies geschieht einerseits

durch die Auswahl technischer Komponenten, andererseits auch durch die Gestaltung von Prozessabläufen.

Um die Energieeffizienz in der Planungsphase als Entscheidungskriterium einzubeziehen, müssen Vorhersagen über den zukünftigen Energiebedarf getroffen werden. Um dies zu ermöglichen, bestehen verschiedene Ansätze zur Energiebedarfsermittlung, die jedoch aufgrund ihrer geringen Eignung keine große Verbreitung in der Logistiksystemplanung finden.

1.2 Forschungsziel

Ziel des Forschungsprojekts ist es, die Berücksichtigung des Energiebedarfs bei der Auswahl von Planungsalternativen zu erleichtern oder erst zu ermöglichen. Dazu muss bereits in der Grobplanungsphase eine Möglichkeit bestehen, den zukünftigen Energiebedarf verschiedener Planungsvarianten aufwandsarm zu kalkulieren. Ein weiteres Ziel stellt das Aufzeigen der Vorteilhaftigkeit einer Planung unter Berücksichtigung des Energiebedarfs dar.

1.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll einerseits der Nutzen einer erweiterten Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energiebedarfs herausgearbeitet werden, andererseits der Aufwand für die Ermittlung des Energiebedarfs für unterschiedliche Planungsalternativen so gering wie möglich gehalten werden, um somit die Akzeptanz in der Wirtschaft zu steigern.

Dafür sollen zunächst Erkenntnisse über den Einfluss von Betriebsstrategien und Komponenten auf den Energiebedarf gewonnen werden. In diesem Zusammenhang sind auch die Wechselwirkungen zwischen den eingesetzten Komponenten und den umsetzbaren Betriebsstrategien von Bedeutung. So lässt sich beispielsweise eine an den Durchsatz angepasste Fördergeschwindigkeit nur realisieren, wenn der Einsatz von geregelten Antrieben geplant ist.

Aus diesen Erkenntnissen werden Handlungsempfehlungen zur Optimierung des zukünftigen Energiebedarfs abgeleitet. So können Einsparpotenziale und mögliche Umsetzungsvarianten für die Systemplanung aufgezeigt werden.

Die Erstellung von Energiebilanzen kann durch den Einsatz geeigneter Software unterstützt werden. Daher soll im Rahmen des Forschungsvorhabens eine Bewertung der Aussagekraft bereits am Markt erhältlicher Werkzeuge zur Ermittlung des Energiebedarfs in Logistiksystemen erfolgen. Diese Analyse soll Planer auf Nutzen und Grenzen derartiger Lösungen hinweisen. Als Grundlage für die Berechnung von Energiebilanzen dienen Messsysteme, die den Strombedarf einzelner Verbraucher protokollieren, somit ist ein weiteres Ziel des Forschungsvorhabens, die Vorteile derartige Messsysteme aufzuzeigen.

Bei den Betreibern intralogistischer Anlagen herrscht vielfach Unklarheit über den tatsächlichen Energiebedarf einzelner Teilsysteme und derer Komponenten. Folglich ist eine Quantifizierung von Einsparpotenzialen in der Planungsphase kaum möglich. Mit den Ergebnissen dieser Arbeit soll Transparenz über die Kosten während der Betriebsphase der Anlagen geschaffen werden. Durch eine Optimierung der Energiekosten wird eine Reduzierung der Lebenszykluskosten möglich. Zusätzlich dienen effiziente Betriebsstrategien als neue Stellhebel für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb. Darüber hinaus ermöglicht das Wissen über die Zusammensetzung der Gesamtenergiekosten eine flexiblere Reaktion auf geänderte Rahmenbedingungen (z. B. schwankende Energiepreise, gesetzliche Vorgaben).

1.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Mit den angestrebten Forschungsergebnissen wird das Ziel verfolgt, erstmals eine umfassende Betrachtung der Energiekosten als zusätzliches Entscheidungskriterium neben Anschaffungskosten und Leistungsdaten bereits in der Grobplanungsphase zu etablieren. Die Berücksichtigung von effizienten Betriebsstrategien und Energiebedarfsdaten der Fördererlemente in dieser frühen Phase erweitert das Verfahren bei der Planung von Logistiksystemen.

1.2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens gliedert sich in acht Arbeitspakete (AP), die nachfolgend aufgeführt werden. Im Rahmen der einzelnen Beschreibungen der Arbeitspakete erfolgt der Verweis auf die Abschnitte des Berichts, welche die Ergebnisse beinhalten.

AP 1: Bestimmung und Analyse von Energieverbrauchern in intralogistischen Anlagen

Ziel des ersten Arbeitspaketes war die Untersuchung von Energieverbrauchern innerhalb von Logistiksystemen. Dabei erfolgt zum einen die Strukturierung von Logistiksystemen (Abschnitt 2.1.1) und zum anderen die Klassifikation von Verbrauchern nach geeigneten Kriterien (Abschnitt 3.3). Außerdem wurden verschiedene Ansätze zur Bestimmung des Energiebedarfs (Abschnitt 2.2.3) ermittelt.

AP 2: Definition von repräsentativen Untersuchungsszenarien

Für die weiteren Untersuchungen innerhalb des Forschungsprojekts wurden mit den Projektpartnern verschiedene, repräsentative Untersuchungsszenarien definiert (Abschnitt 3.3.2). Es erfolgte eine Beschreibung sowie eine Analyse der Verbraucher innerhalb der Szenarien (Abschnitt 3.3.3).

AP 3: Ermittlung der Energieaufnahme von Teilsystemen für die Untersuchungsszenarien

Ziel des dritten Arbeitspaketes war die Ermittlung der Energieaufnahme für die Untersuchungsszenarien. Dafür wurden Messungen an realen Komponenten im Betrieb durchgeführt (Abschnitt 3.4). Außerdem erfolgte die Untersuchung und Bewertung am Markt erhältlicher Softwarewerkzeuge zur Analyse des Energiebedarfs in Logistiksystemen (Abschnitt 2.2.4). Um die Kenntnisse über den Energiebedarf einzelner Elemente zu steigern, können Mess- und Visualisierungssysteme eingesetzt werden. Diese Systeme wurden analysiert (Abschnitt 2.2.5) und eine Handlungsempfehlung zum zielgerichteten Einsatz erarbeitet (Abschnitt 6.2.6).

AP 4: Implementierung von Werkzeugen zur Bestimmung des Energieverbrauchs

Im AP 4 wurde ein Softwarewerkzeug implementiert (Kapitel 5), welches die Bestimmung des Energiebedarfs von verschiedenen Anlagen ermöglicht. Dafür war im ersten Schritt eine Modellierung des Energiebedarfs notwendig (Kapitel 3).

AP 5: Entwicklung und Evaluierung effizienter Betriebsstrategien

Die Entwicklung von energieeffizienten Betriebsstrategien erfolgte im AP 5 (Kapitel 4). Die dabei zu beachtenden Wechselwirkungen wurden identifiziert und berücksichtigt.

AP 6: Aufzeigen von Einsparpotenzialen

Um die Vorteile einer Berücksichtigung der Energiekosten bei der Planung von Logistiksystemen zu untersuchen, wurden Einsparungspotenzialen innerhalb der identifizierten Szenarien aufgezeigt (Abschnitt 6.1).

AP 7: Ableitung von Handlungsempfehlungen

Dieses Arbeitspaket führte sämtliche Erkenntnisse der vorangegangenen Arbeitsschritte in allgemeine Handlungsempfehlungen zur Optimierung der Energiekosten zusammen (Abschnitt 6.2).

AP 8: Dokumentation

Die Projektergebnisse wurden während der gesamten Projektlaufzeit dokumentiert und zusätzlich in Fachzeitschriften, im Internet sowie auf Fachtagungen in Form von Vorträgen publiziert.

2 Stand der Technik und der Wissenschaft

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen sowie den Stand der Technik und der Wissenschaft, die für die Berücksichtigung des Energiebedarfs in den Planungsprozessen von intralogistischen Systemen benötigt werden. Dafür wird zum einen die Planung von Logistiksystemen näher betrachtet, zum anderen erfolgt die Beschreibung der Grundlagen zum Thema Energieeffizienz für Logistiksysteme. Bei der Betrachtung der Energieeffizienz steht die Ermittlung des Energiebedarfs im Fokus. Dafür werden Ansätze und Methoden recherchiert und eine Marktanalyse, mit dem Ziel erhältliche Softwarewerkzeuge zu bestimmen und zu bewerten, durchgeführt.

2.1 Planung von Logistiksystemen

Bei einem Logistiksystem handelt es sich um ein komplexes, vielschichtiges System mit verschiedenartigen Elementen. Aus diesem Grund erfolgt vor der Darstellung des Planungsprozesses die Definition sowie Beschreibung von Logistiksystemen.

2.1.1 Strukturierung von Logistiksystemen

Unter Logistiksystemen werden unterschiedlichste Ansätze verstanden, die vom innerbetrieblichen Materialfluss bis zu einem überbetrieblichen allgemeinen, systemtechnischen Verständnis reichen [Dür-2001]. Im Folgenden wird unter einem Logistiksystem ein System verstanden, welches die Funktionen der Technischen Logistik (Lagern, Kommissionieren, Umschlagen, Transportieren, Verpacken) erfüllt. Dieses System kann weiter in die Anlagen- und Geräteebene untergliedert werden (vgl. Abbildung 2-1).

Ein Logistiksystem besteht aus einer oder mehreren Anlagen (Materialflusstechnik), sowie der ganzheitlichen Informationsverarbeitung [Gün-2009]. Materialflussanlagen bestehen unter anderem aus Steuerungstechnik, Informationsmittel sowie der Fördertechnik (den einzelnen Geräten) [Gün-2009]. Innerhalb einer Anlage können verschiedene Fördertechniken zum Einsatz kommen. Ein Gerät setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen. „Komponenten sind in der Fördertechnik maschinenbauliche und elektrotechnische Bauteile und Baugruppen, die der Hersteller fördertechnischer Anlagen komplett beziehen und für seine speziellen Zwecke einsetzen“ [Gün-2009].

zen kann“ [Bög-2011]. Beispiele dafür sind der Antrieb sowie mechanische Komponenten (vgl. Abbildung 2-1). Ein weiterer Bestandteil von Fördermitteln ist der Maschinen- und Stahlbau.

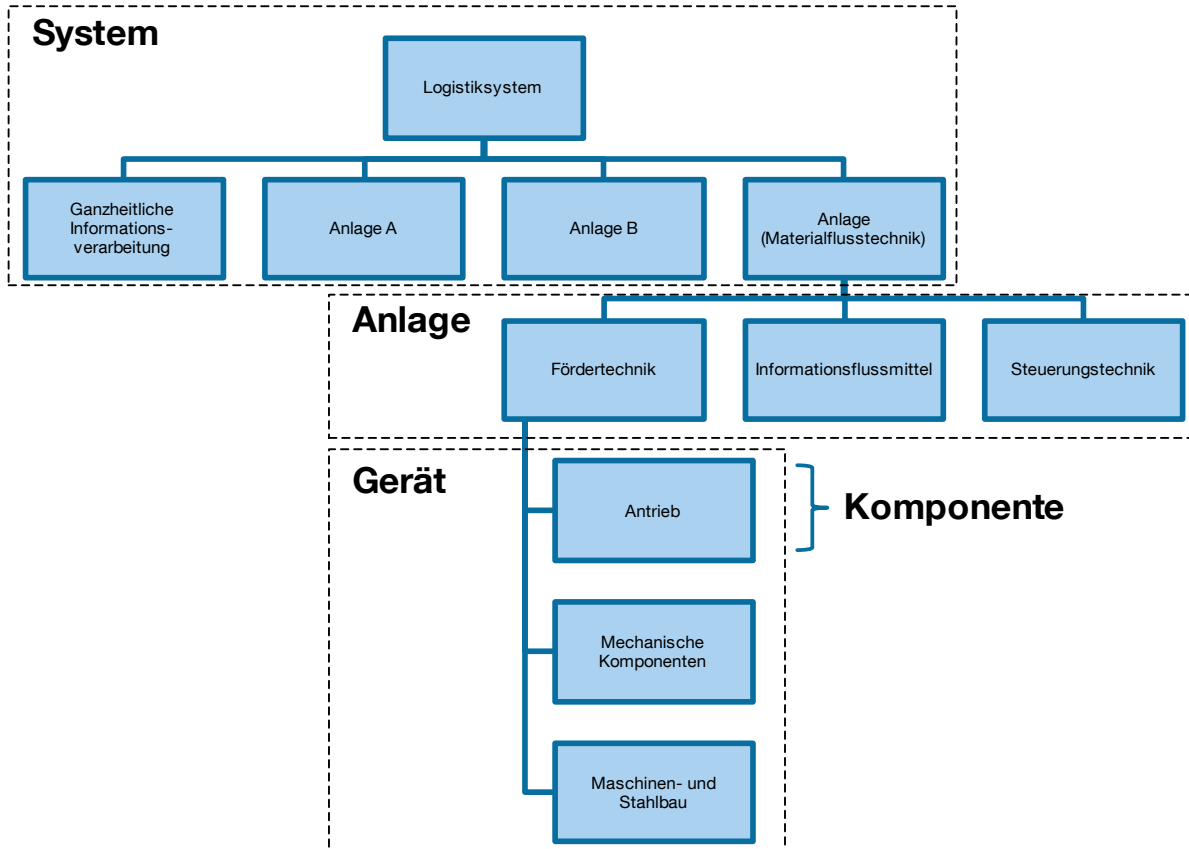


Abbildung 2-1: Bestandteile eines Logistiksystems

Betrachtete Systeme des Forschungsprojektes sind Lagersysteme, Stetigförderanlagen, Unstetigförderanlagen und Sortieranlagen, wie sie in der innerbetrieblichen Logistik im produzierenden Gewerbe sowie im Handel zum Einsatz kommen. Die eingesetzte Fördertechnik innerhalb dieser Systeme bzw. Anlagen zeigt Abbildung 2-2.

Auch die Elemente der Komponentenebene können weiter untergliedert und detailliert werden. Jedoch soll in dieser Arbeit lediglich auf das für das Forschungsvorhaben bedeutendste Element, den Antrieb, eingegangen werden. Der Antrieb besteht aus einem Motor zur Wandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie, einem Getriebe zur Übersetzung von Motordrehmoment und Motordrehzahl, einer Steuerung sowie weiteren Übertragungselementen [Mar-2009]. Ein weiterer möglicher Bestandteil stellt ein sogenannter Frequenzumrichter dar [Kie-2007]. Frequenz-

umrichter ermöglichen die Anpassung der Motordrehzahl und somit Geschwindigkeitsanpassungen sowie kontrollierte Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge.

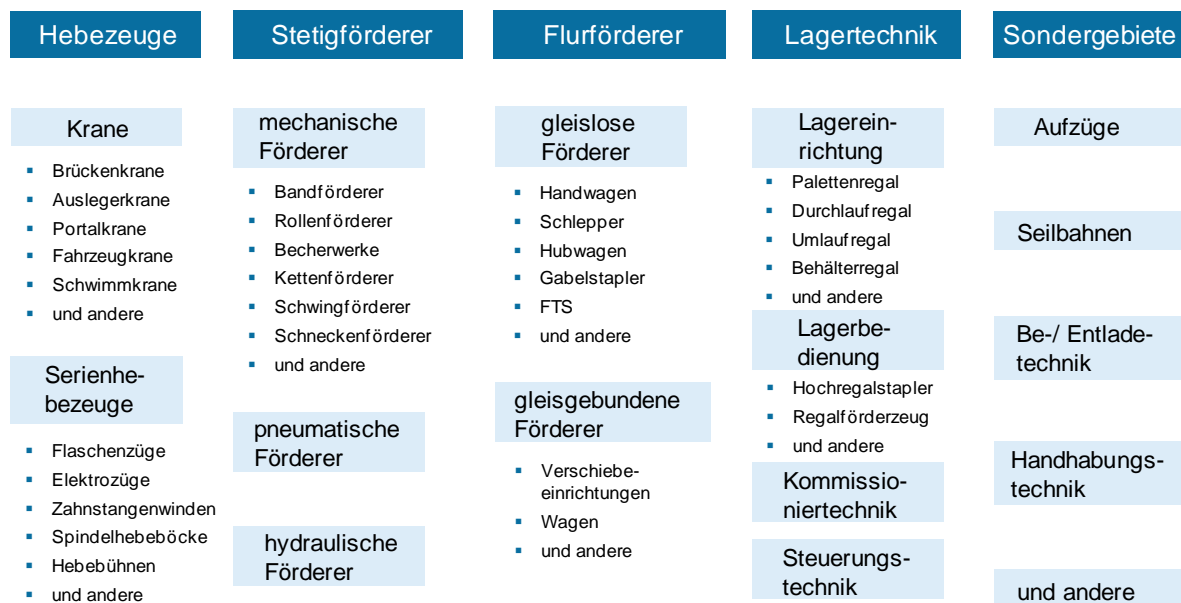


Abbildung 2-2: Strukturierung der Fördertechnik [Gün-2013a]

2.1.2 Planungsvorgehen

In der Literatur sind diverse Vorgehensmodelle für die Planung von intralogistischen Systemen zu finden. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Detaillierung sowie der Anzahl an enthaltenden Planungsschritten [Gud-2010, All-1999, Hom-2007]. Obwohl Planungsvorgehen von intralogistischen Systemen einen linearen Charakter besitzen, ist zu beachten, dass es sich hierbei um einen iterativen Planungsprozess handelt [Hom-2007].

Die Planungsschritte können den Phasen Vorarbeiten, Grobplanung, Feinplanung und Realisierung zugeordnet werden (vgl. Abbildung 2-3) [All-1999]. Das wesentliche Ziel der Vorarbeiten dient der Ermittlung und Beschaffung der für die Planungsaufgabe notwendigen Daten. Darüber hinaus erfolgen die Festlegung der Zielsetzung sowie die Ableitung von Teilaufgaben. Die Grobplanungsphase untergliedert sich in die Strukturplanung und Systemplanung. Innerhalb der Strukturplanung erfolgt die Erstellung verschiedener Ablauffolgen, die sich aus Arbeitsschritten und/oder Materialflussoperationen zusammensetzen. Die Ablauffolgen dienen als Grundlage für die Erstellung von ersten Blocklayouts. Auf Basis dieser Layouts und der Ablauffolgen werden innerhalb der Systemplanung den einzelnen Ablaufschritten Materialflussmittel zugeordnet. Des Weiteren erfolgt die Dimensionierung und Bewertung der

verschiedenen Systemvarianten und die Erstellung von Groblayouts. In der nachfolgenden Feinplanung wird die ausgewählte Planungsvariante weiter ausgearbeitet und detailliert. Hierbei liegt der Fokus auf der Festlegung der Steuerung und Organisation des geplanten Systems. Zum Ende der Feinplanung erfolgt die Ausschreibung und Vergabe der Aufträge. In der planungsabschließenden Realisierung wird durch die beauftragten Firmen das System umgesetzt und zuletzt abgenommen. [All-1999]

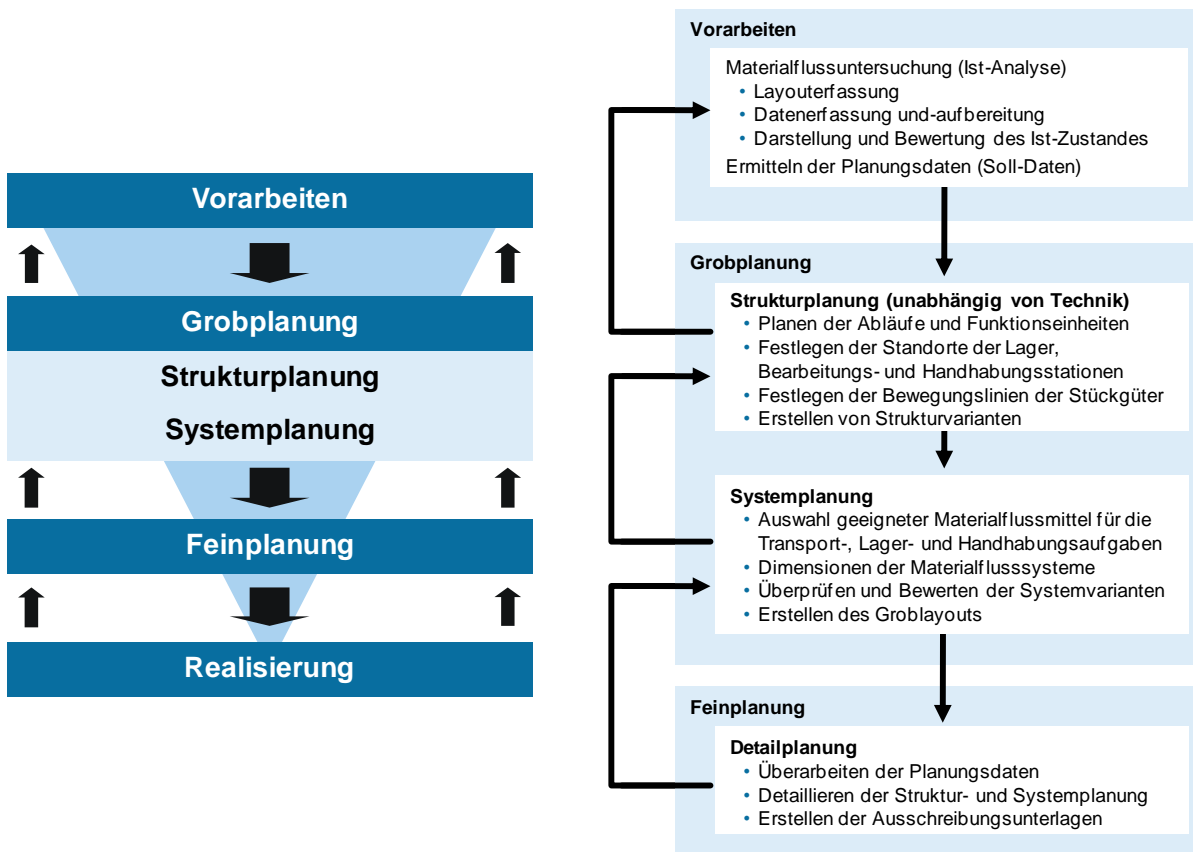


Abbildung 2-3: Vorgehen bei der Planung von intralogistischen Systemen [Gün-2013a]

Die Zuordnung der Materialflussmittel zu Arbeitsschritten erfolgt innerhalb der Systemplanung [Gud-2010, All-1999]. Ebenfalls wird am Ende der Systemplanungsphase die Auswahl der Planungsvariante durchgeführt. Diese erfolgt auf Basis der Systemeigenschaften und der Wirtschaftlichkeit, wobei die Bewertung mittels Nutzwert- und Wirtschaftsanalysen erfolgt [Arn-2009]. Jedoch stellt der Nachweis der Wirtschaftlichkeit die wichtigste Bewertungsgrundlage dar [All-1999]. Bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung werden ausgabenwirksame Kosten und Einsparungen innerhalb der Nutzungsdauer gegenübergestellt [VDI 2498-1]. Eine Berücksichtigung der Energiekosten findet dabei auch statt [VDI 2693-1], jedoch basieren diese Werte meist auf Schätzungen.

2.2 Energieeffizienz für Logistiksysteme

2.2.1 Grundlagen zum elektrischen Energiebedarf

Die elektrische Energie wird mittels verschiedener Spannungsquellen übertragen. Es kann zwischen Gleichstrom, Wechselstrom und dem Dreiphasenwechselstrom unterschieden werden (vgl. Abbildung 2-4). Unter Gleichstrom (DC) wird ein elektrischer Strom verstanden, der mit der Zeit weder seine Richtung noch seine Spannung verändert. Die Stromzuführung besteht bei Gleichstrom aus zwei stromführenden Leitern, der positive Leiter (P-Leiter) und der negative Leiter (N-Leiter).

Wechselstrom

Im Gegensatz zum Gleichstrom verändert sich beim Wechselstrom (AC) die Höhe der Spannung und auch die Stromrichtung mit der Zeit. Diese Änderung erfolgt meistens periodisch. Das europäische Stromversorgungsnetz wechselt beispielsweise die Stromrichtung mit einer Frequenz von 50 Hertz in einem Sinus-Rhythmus. Beim Wechselstrom wird zwischen ein- und mehrphasigem Wechselstrom unterschieden. Die am weitesten verbreitete Stromart ist der einphasige Wechselstrom, der im Haushalt an Steckdosen anliegt und eine Spannung von 230 V besitzt. In diesem Fall besteht die Stromzuführung aus drei Kabeln, wobei jedoch nur ein Kabel im üblichen Betrieb unter Spannung steht. Bei dem zweiten Kabel handelt es sich um den sogenannten Schutzleiter, welcher mit der Erde verbunden ist und somit eine direkte Ableitung von Spannung ermöglicht. Das dritte Kabel ist der Neutralleiter, welcher mit dem Neutralpunkt des Versorgungssystems verbunden ist. Das am weitesten verbreitete mehrphasige Wechselstromnetz ist der Dreiphasenwechselstrom, welcher auch als Drehstrom bezeichnet wird.

Dreiphasenwechselstrom

Der Dreiphasenwechselstrom besteht aus drei sinusförmigen Wechselspannungen, welche dieselbe Frequenz besitzen und jeweils zeitlich um 120° phasenverschoben sind. Mit Hilfe des Drehstromes kann ein räumlich umlaufendes, magnetisches Feld erzeugt werden, wodurch die in der Fördertechnik weit verbreiteten Synchron- und Asynchronmotoren angetrieben werden.

Ein Drehstromnetz besteht aus drei stromführenden Phasen L1, L2 und L3, dem Neutralleiter N (auch als Nullleiter bezeichnet) und dem Schutzleiter. Drehstromverbraucher werden entweder durch eine sogenannte Sternschaltung oder durch eine Dreiecksschaltung an das Versorgungssystem angeschlossen.

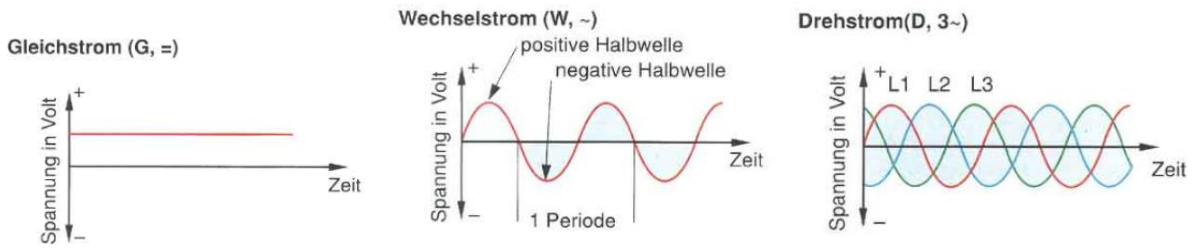


Abbildung 2-4: Spannungsverlauf von Gleich-, Wechsel- und Dreiphasenwechselstrom [sch-2013]

In Abbildung 2-5 sind die Sternschaltung und Dreiecksschaltung von drei Widerständen an ein Drehstromnetz zu sehen. Wird ein Verbraucher mittels einer Sternschaltung an ein Niederspannungsdrehstromnetz angeschlossen, so beträgt die Effektivspannung zwischen den Leitern L1, L2, L3 und dem Neutraleiter N 230 V. Erfolgt ein Anschluss mittels einer Dreiecksschaltung, so ergibt sich eine Effektivspannung zwischen den Leitern L1, L2, L3 von 400 V sowie ein Scheitelwert von 560 V. Mittels der Dreiecksschaltung kann demnach eine höhere Spannung erreicht und somit eine größere elektrische Leistung übertragen werden. Aus diesem Grund werden größere (leistungsstärkere) Drehstrommotoren mittels einer Dreiecksschaltung an das Versorgungsnetz angeschlossen.

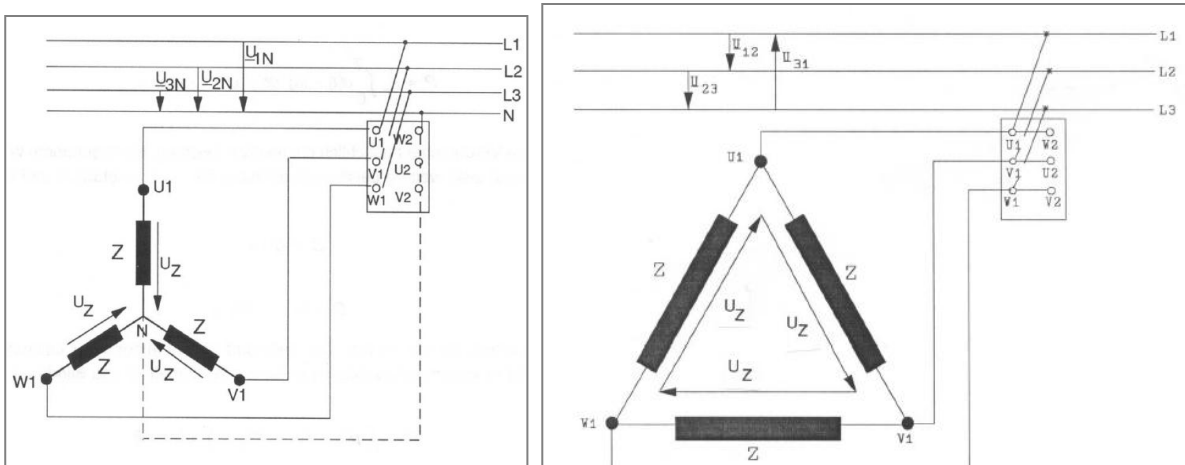


Abbildung 2-5: Sternschaltung und Dreiecksschaltung eines Drehstromverbrauchers [Uni-2013c]

Elektrische Leistung

Die nachfolgenden Ausführungen zu den physikalischen Grundlagen orientieren sich an der Veröffentlichung des Instituts für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung [Uni-2013c]. Die physikalische Größe der elektrischen Leistung ergibt sich für Gleichstrom aus der Multiplikation von Spannung U und Stromstärke I . Bei der

Untersuchung von Wechselspannung ergibt sich der Momentanwert der Leistung $p(t)$ mittels:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2-1)$$

Aufgrund der Tatsache, dass in einem Wechselstromsystem die Größen Spannung und Strom sinusförmig verlaufen, können die Momentanwerte mittels folgenden Formeln bestimmt werden, wobei \hat{u} und \hat{i} die Scheitelwerte darstellen:

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin \omega t \quad (2-2)$$

$$i(t) = \hat{i} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2-3)$$

Der Winkel φ wird als Phasenverschiebungswinkel bezeichnet. Er entsteht durch kapazitive und induktive Widerstände im Stromkreis.

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)] \quad (2-4)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 2-2 und 2-3 in die Gleichung 2-1 und unter der Berücksichtigung der in der Formel 2-4 dargestellten Beziehung ergibt sich für den Momentanwert der Leistung:

$$p(t) = \frac{\hat{u} \cdot \hat{i}}{2} \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (2-5)$$

Mit den Effektivwerten U und I für Spannung und Strom:

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}, \quad I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \quad (2-6)$$

vereinfacht sich die Gleichung (2-5) zu:

$$p(t) = U \cdot I \cdot [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (2-7)$$

Aus dem Grund, dass für eine Ermittlung der Leistungsaufnahme die Momentanwerte im Gegensatz zu den Mittelwerten meist weniger relevant sind, soll die Formel zur Ermittlung des zeitlichen Mittelwertes der Leistung angegeben werden:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2-8)$$

Die mittels der Formel 2-8 berechnete Leistung wird als Wirkleistung bezeichnet und stellt die Leistung dar, welche der Verbraucher auch tatsächlich benötigt. Weitere elektrische Leistungsgrößen sind die Schein- und Blindleistung.

Das Produkt aus den Effektivwerten von Spannung und Stromstärke ergibt die sogenannte Scheinleistung S :

$$S = U \cdot I \quad (2-9)$$

Die Scheinleistung wird auch als Anschlussleistung bezeichnet und gibt die Leistung an, die einem Verbraucher zugeführt wird. Für die Auslegung des Netzanschlusses stellt sie die maßgebliche Größe dar. Sie ergibt sich aus der Wirkleistung und der Blindleistung. Die Blindleistung Q lässt sich folgendermaßen ermitteln:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (2-10)$$

Die Blindleistung wird von Verbrauchern nicht aufgenommen, stellt eine nicht nutzbare Energie dar und ist somit eine unerwünschte Größe. Unter Umständen wird die Blindleistung dem Abnehmer sogar durch die Energieversorger in Rechnung gestellt. Es bestehen jedoch Möglichkeiten, die Blindleistungen mittels induktiven oder kapazitiven Widerständen zu reduzieren.

Für die Ermittlung der elektrischen Arbeit W , die ein Verbraucher verrichtet, wird das Integral der Leistung über die Zeit berechnet:

$$W = \int p(t) dt \quad (2-11)$$

2.2.2 Messung von elektrischer Leistung und Arbeit

Wie in dem vorherigen Abschnitt aufgezeigt wurde, wird für die Ermittlung der elektrischen Arbeit und Leistung eine Messung von Spannung und Stromstärke benötigt. Für die Messung der am Verbraucher anliegenden Spannung wird ein direkter Kontakt mit dem stromführenden Leiter benötigt. Hierbei ist zubeachten, dass große Gefahren für Mensch und Maschine bestehen. Unter Umständen muss hierfür sogar die Maschine komplett ausgeschaltet werden. Die Messung der Stromstärke kann indirekt durch die Nutzung des magnetischen Feldes des Leiters erfolgen.

Die Abbildung 2-6 zeigt verschiedene Alternativen der Leistungsmessung in einem Drehstromnetz. Ist der Verbraucher mittels einer Sternschaltung an das Netz angeschlossen, so besteht die einzige Möglichkeit zur Leistungsmessung in dem Abgreifen der Spannung an allen Leitern (vgl. linke Abbildung). Wenn der Verbraucher mittels einer Dreieck-Schaltung an das Netz angeschlossen, ist so kann entweder die Aronschaltung oder eine Schaltung, bei der an allen drei Leitern die Spannung abgegriffen wird, verwendet werden. Bei der Aronschaltung wird aus den gemessenen Strömen und den beiden Leiter-Leiter-Spannungen die fehlende dritte Phase berechnet (vgl. Abbildung 2-6, rechts).

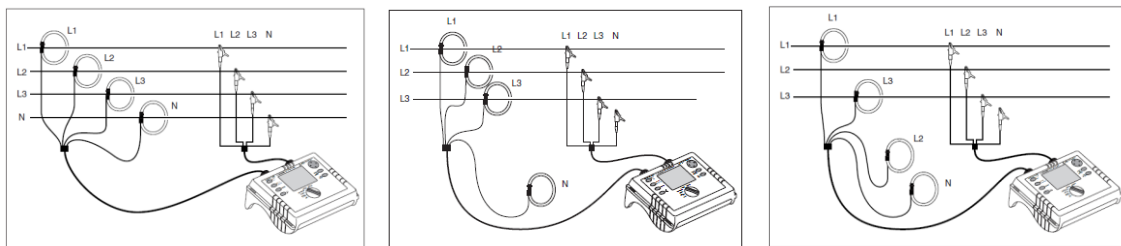


Abbildung 2-6: Anschlussmöglichkeiten für die Messung der Energieaufnahme im Dreiphasenwechselstromnetz [Flu-2006]

2.2.3 Ansätze zur Ermittlung des Energiebedarfs

Die Ermittlung des Energiebedarfs der verschiedenen Fördermittel ist eine zentrale Anforderung, um diesen in der Planungsphase zu berücksichtigen. Prinzipiell kann der Energiebedarf gemessen, berechnet (analytisch oder simulativ) oder geschätzt werden.

Schätzen des Energiebedarfs verschiedener Fördermittel

Bei der Methode Schätzen erfolgt eine ungefähre Bestimmung des Energiebedarfs auf der Basis von Annahmen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung der Nennleistung der eingesetzten elektrischen Antriebe. Dieser Ansatz wird unter anderem im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Ermittlung der Energiekosten eingesetzt. Ein Beispiel für den Einsatz bei Stetigförderern (Rollen- und Bandförderer) ist bei *Furmans et al.* [Fur-2010] zu finden. Zur Berechnung der Energiekosten erfolgt eine Multiplikation von Leistung je Meter, Strompreis und Jahreslaufzeit. Die Leistung pro Meter berechnet sich durch die Division der Motornennleistung durch die Länge der angetriebenen Förderstrecke [Fur-2010]. Bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Fördertechnik immer im gleichen Lastfall betrieben wird und die Nennleistung des Motors aufnimmt.

Ein in der Praxis weit verbreiteter Ansatz, den Energiebedarf zu schätzen, ist die Verwendung eines Aufschlagsatzes auf Basis der Investitionen zur Bestimmung der jährlichen Stromkosten.

Berechnen des Energiebedarfs mittels der Methode „Berechnen“

Der Energiebedarf von Fördermitteln kann mittels analytischer Formeln bestimmt werden. Ein möglicher Berechnungsansatz ist die mechanische Energiebetrachtung unter Berücksichtigung von Wirkungsgraden. Hierbei erfolgt im ersten Schritt die Berechnung der für die Durchführung der Förderaufgabe benötigten mechanischen Arbeit. Durch die Berücksichtigung der Wirkungsgrade der verschiedenen Fördermittelkomponenten ergibt sich die benötigte elektrische Arbeit – der Energiebedarf. Dieses Verfahren wird auch für die Bestimmung der benötigten Antriebsleistungen der Fördermittel eingesetzt. Der Wirkungsgrad von verschiedenen Anlagenkomponenten, insbesondere der Antrieb, hängt unter anderem von der Drehzahl sowie dem Drehmoment ab. Um eine detaillierte Ermittlung der aufgewendeten elektrischen Arbeit zu erhalten, muss diese Abhängigkeit berücksichtigt werden. Für die Darstellung dieser Zusammenhänge werden entweder Wirkungsgrad-Kennlinien (Wirkungsgrad abhängig vom Drehmoment oder Drehzahl) oder Wirkungsgrad-Kennfelder (Wirkungsgrad abhängig vom Drehmoment und Drehzahl) verwendet. Die Untersuchung des Energiebedarfs einer Fräsmaschine mittels eines Wirkungsgrad-Kennfeldes ist bei *Daganescu et al.* zu finden [Dra-2003]. Hierbei wird der Gesamtwirkungsgrad in Abhängigkeit des Drehmoments sowie der Drehzahl am Werkzeug dargestellt (vgl. Abbildung 2-7).

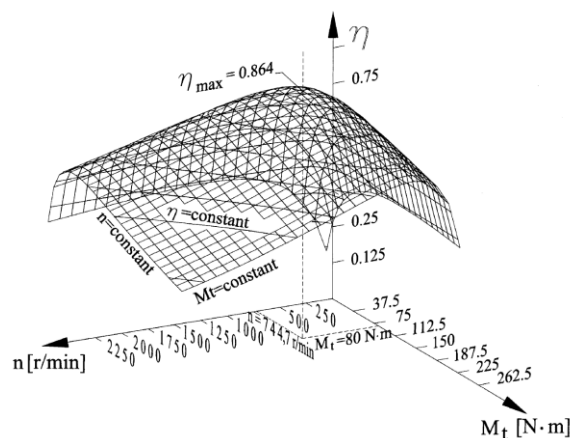


Abbildung 2-7: Wirkungsgrad-Kennfeld einer Fräsmaschine [Dra-2003]

Eine Berechnungsmethode für die Ermittlung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen stellen *Dietmair et al.* vor [Die-2008]. Hierbei werden im Gegensatz zu *Daganescu et al.* keine Wirkungsgrad-Kennfelder ermittelt, sondern die Energiebe-

darfsbestimmung erfolgt anhand von Betriebszuständen. Zu jedem Betriebszustand wird entweder ein konstanter Energieverbrauchswert zugeordnet, oder es erfolgt eine detailliertere Beschreibung des Energieverbrauchs abhängig von Prozessparametern wie z. B. der Beschleunigung [Die-2008].

Ermittlung des Energiebedarfs mittels simulativer Vorgehen

Durch den Einsatz von Simulationsverfahren zur Ermittlung des Energiebedarfs können dynamische Aspekte berücksichtigt werden. Ein Beispiel für dynamische Einflussgrößen ist die Abhängigkeit des Wirkungsgrades von elektrischen Antrieben vom Motordrehmoment sowie der Motordrehzahl. Des Weiteren bietet die Simulation die Möglichkeit verschiedene Bewegungsabläufe mit einem geringen Aufwand abzubilden. Die Bestimmung des Energiebedarfs kann mit Hilfe der Simulation durch die Ablaufsimulation oder durch die Implementierung von mechatronischen Modellen von Maschinen oder Anlagen erfolgen. Mittels der Ablaufsimulation werden unter anderem komplexe logistische Systeme dimensioniert, optimiert und bewertet [Kud-2000]. In der Ablaufsimulation kann vergleichsweise einfach durch die Berücksichtigung der Masse von Transportmitteln und Transporteinheiten die mechanische Arbeit berechnet werden [Sch-2011b]. Für die Bestimmung der elektrischen Arbeit (=Energiebedarf) wird jedoch zusätzlich noch ein Wirkungsgrad-Kennfeld der jeweilig untersuchten Fördermittel benötigt [Sch-2011b]. Mit Hilfe der Ablaufsimulationen konnte der Energiebedarf von Stapler- und Schlepptransporten mit dem Energiebedarf bei dem Einsatz von stationärer Fördertechnik gegenübergestellt werden [Neu-2010].

Bei der Planung und Steuerung von Fabrik- und Produktionssystemen wird die Ablaufsimulation ebenfalls eingesetzt. Das Energiemanagementsystem TEEM (Total Energy Efficiency Management) hat eine Ablaufsimulation mit Energiedaten ergänzt und stellt somit ein Analysewerkzeug zur Optimierung des Energieeinsatzes dar [Fra-2010]. Das Institut Inpro beschreibt die Verwendung des Simulators Plant Simulation in Kombination mit dem VDA Automotive Bausteinkasten zur Energiebedarfsermittlung [Ber-2012].

Die Simulation eignet sich auch für die detaillierte Abbildung des mechatronischen Verhaltens von Maschinen und Anlagen. Diese Simulationsmethode fokussiert die detaillierte Untersuchung des mechanischen Verhaltens, um beispielsweise Schwingungen bei der Beschreibung des Bewegungsverlaufes zu berücksichtigen. Ein Beispiel für die Untersuchung des Energiebedarfes von Fördermitteln durch Simulation

zeigen *Günthner et al.* [Gün-2011b] für ein Regalbediengerät. Hierbei dient das Simulationsmodell insbesondere zur Untersuchung der Auswirkung von Geräteparametern und Betriebsstrategien auf den Gesamtenergiebedarf. *Beitelschmidt et al.* beschreiben ein mechatronisches Modell eines Hafenmobilkranes für die Untersuchung von verschiedenen Speicherkonfigurationen und Betriebsstrategien [Bei-2010]. Dieses Vorgehen wird auch im Bereich der Produktionsmaschinen angewendet [o. V.-2013].

Messen des Energiebedarfs verschiedener Fördermittel

Der Bedarf von elektrischer Energie kann mit einem geringen Messaufwand, mit einer hohen Genauigkeit und einer geringen Fehleranfälligkeit gemessen werden [Bun-1992]. Eine umfangreiche Beschreibung zu Energiebedarfsmessungen im Bereich von Fabriken ist bei *Müller et al.* zu finden [Mül-2009]. Es ist zu beachten, dass die Messkosten exponentiell zu dem Messdetaillierungsgrad wachsen [Mül-2009]. Das Messen besitzt somit die größte Genauigkeit, eignet sich jedoch nur bedingt zur Ermittlung des Energiebedarfs in der Planungsphase.

Eine Möglichkeit, die durch die Methode Messen erzielten Ergebnisse in der Planungsphase einzusetzen, ist die Sammlung dieser Daten. Als Beispiel können die nach der VDI-Richtlinie 2198 [VDI 2198] genormten Typenblätter für Flurförderzeuge angegeben werden. In dieser Norm wird der Energiebedarf der verschiedenen Flurförderzeuge anhand eines definierten Zyklus gemessen. Innerhalb dieses Zyklus muss eine vorgegebene Anzahl an Spielen durchgeführt werden, wobei ein Spiel aus einer festgelegten Fahrstrecke und zwei Hubvorgängen besteht [VDI 2198].

Klassifikation der Ansätze zur Energiebedarfsermittlung

Nachdem die einzelnen Ansätze zur Ermittlung des Energiebedarfs vorgestellt und beschrieben wurden, werden nun diese Methoden klassifiziert. Prinzipiell kann eine Klassifikation anhand von Bewertungskriterien oder anderen Merkmalen erfolgen. Mögliche Bewertungsmerkmale stellen die Abbildungsgüte und der Zeitaufwand dar. Die sich ergebene zweidimensionale Matrix ermöglicht eine Klassifizierung und erste Bewertung der Methoden (vgl. Abbildung 2-8).

Die Methode Messen wird prinzipiell bei jedem Ansatz zur Energiebedarfsermittlung benötigt. Sie dient als Grundlage für die Validierung und die Datenermittlung der einzelnen Methoden.

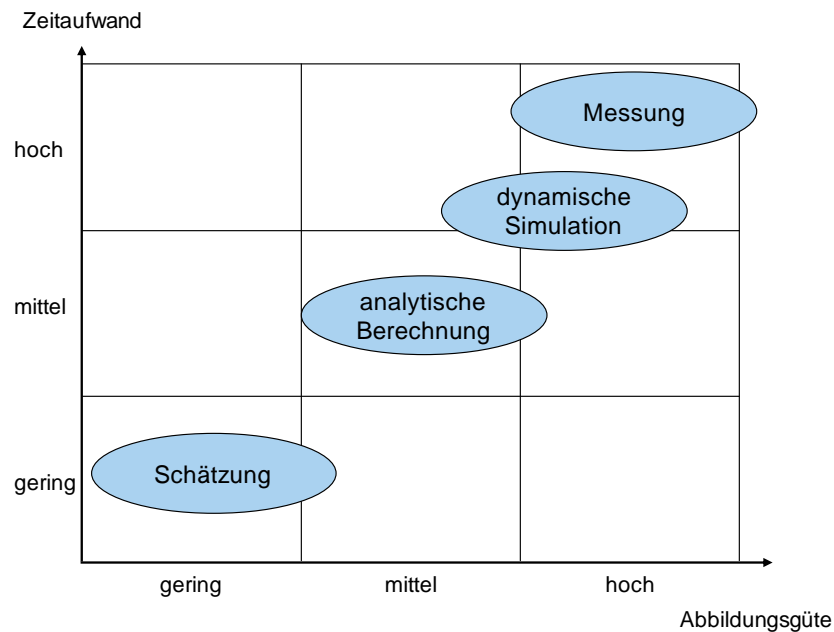


Abbildung 2-8: Klassifikation der Ansätze zur Energiebedarfsermittlung
(in Anlehnung an [Sch-2011a, Ral-1998])

2.2.4 Aktuelle Werkzeuge zur Ermittlung des Energiebedarfs

Um den Energiebedarf verschiedener Elemente von logistischen Systemen zu ermitteln, besteht neben der Verwendung der bereits vorgestellten Ansätze die Möglichkeit, die auf dem Markt verfügbaren Softwarewerkzeuge einzusetzen. Um die entsprechenden Werkzeuge zu bestimmen, wird eine Marktanalyse durchgeführt. Im Anschluss werden diese Werkzeuge auf ihre Verwendbarkeit für die Logistikplanung untersucht und bewertet.

Die durchgeführte Marktanalyse ergibt, dass neun Werkzeuge die Ermittlung des Energiebedarfs ermöglichen. Eine kurze Beschreibung ihrer Funktionen sowie weiterer Attribute ist in Tabelle 2-1 aufgeführt. Ein weiteres Werkzeug, welches die Ermittlung des Energiebedarfs von Fördertechnik ermöglicht, wurde von dem Fördertechnikhersteller TGW in der Fachliteratur vorgestellt [TGW-2009]. Im vorliegenden Zeitschriftenbeitrag sowie auf Nachfrage konnten dazu jedoch keine weiteren Informationen ermittelt werden, da dieses Werkzeug nur für den internen Gebrauch bestimmt ist.

Tabelle 2-1: Marktübersicht Werkzeuge zur Ermittlung des Energiebedarfs

Name	Anbieter	Beschreibung	Betrachtungsebene	Quelle
SinaSave	Siemens AG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grobauswahl Motor und Frequenzumrichter für bestimmte Anwendungen (Pumpen / Lüfter) ▪ Ermittlung Einsparpotenzial sowie die Amortisationszeit von energieeffizienten Motoren sowie Frequenzumrichtern für verschiedene Anwendungen 	Komponentenebene	[Sie-2013c]
Energiesparrechner	SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Energie- und CO₂-Vergleichsrechnungen zwischen Standardmotoren (IE1 = Standard Efficiency) und Energiesparmotoren (IE2 = High Efficiency, IE3 = Premium Efficiency) ▪ Ermittlung der Amortisationszeiten der Investition 	Komponentenebene	[SEW-2013b]
CT Energy Savings Estimator	Control Techniques GmbH	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vergleich des Energiebedarfs von Anwendungen mit oder ohne Frequenzumrichter ▪ Ermittlung der Amortisationszeiten der Investition 	Komponentenebene	[Con-2013]
SIZER	Siemens AG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projektierungswerkzeug für die Auslegung von Antriebssystemen (Getriebe, Motor, Umrichter) ▪ lastabhängige Energiebedarfsbestimmung 	Geräteebene	[Sie-2013b]
Workbench	SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projektierungswerkzeug für die Auslegung von Antriebssystemen (Getriebe, Motor, Umrichter) ▪ Energiebedarfsanalyse, Bestimmung von Energiekosten und CO₂-Emissionen ▪ Anwendungsbibliothek 	Geräteebene	[SEW-2013a]
Drive Solution Designer	Lenze AG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projektierungswerkzeug für die Auslegung von Antriebssystemen (Getriebe, Motor, Umrichter) ▪ Energiebedarfsanalyse, Bestimmung von Energiekosten und CO₂-Emissionen ▪ Anwendungsbibliothek 	Geräteebene	[Len-2013]
Plant Simulation	Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ablaufsimulationswerkzeug, welches u.a. Materialflusssysteme abbilden kann ▪ Erweiterbar zur Ermittlung der Spitzenleistung sowie des Energiebedarfs innerhalb eines Betrachtungszeitraums 	Anlagenebene	[Ber-2012]
WirthSim EcoSim	WirthLogistik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Materialflusssimulation ▪ Aufzeigen von Spitzenlasten ▪ Ermittlung der Energiekosten 	Anlagenebene	[Wir-2013]
EDV-Tool Elektrische Antriebe	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Untersuchung und Optimierung von elekt. betriebenen Motorsystemen ▪ Ermittlung Energiekosten ▪ Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ▪ Checklisten / Maßnahmenermittlung 	Anlagenebene	[Ind-2013]

Auf Basis des Untersuchungsgegenstandes der einzelnen Werkzeuge können diese den Anlagen-, Geräte- und Komponentenebenen zugeordnet werden. Hierbei werden die im Abschnitt 2.1.1 eingeführten Definitionen von Anlagen, Geräten und Komponenten verwendet. Die Werkzeuge der Komponentenebene ermöglichen die Untersuchung einzelner Komponenten des Antriebssystems, insbesondere die Analyse der Vorteilhaftigkeit durch den Einsatz von Frequenzumrichtern steht im Fokus. Mittels der Werkzeuge der Geräteebene kann der Energiebedarf von Fördermitteln

bestimmt werden. Hierbei handelt es sich um sogenannte Projektierungswerkzeuge verschiedener Antriebssystemhersteller, bei denen die Auslegung des Antriebs der Hauptanwendungsfall ist und die Energiebedarfsermittlung nur eine Zusatzfunktion darstellt. Die Ermittlung des Energiebedarfs von gesamten Anlagen bzw. Systemen kann mittels Materialflusssimulationswerkzeugen erfolgen.

Zusätzlich unterscheiden sich die untersuchten Werkzeuge bezüglich ihrer Methode zur Energiebedarfsermittlung sowie hinsichtlich der Fördermittel, die abgebildet werden können. Die Energiebedarfsermittlung der Werkzeuge, die der Komponenten- bzw. Geräteebene zuzuordnen sind, berechnen mit unterschiedlicher Genauigkeit den Energiebedarf. Diese Methode wird ebenfalls beim „EDV-Tool Elektrische Antriebe“ eingesetzt. Die anderen Werkzeuge der Anlagenebene ermitteln den Energiebedarf mittels einer Ablaufsimulation. Naturgemäß können die Werkzeuge der Komponentenebene nicht den Energiebedarf von Fördermitteln bestimmen. Diese Werkzeuge eignen sich lediglich für den Vergleich verschiedener Antriebskomponenten untereinander. Auf der Geräteebene erlauben die Projektierungswerkzeuge die Berechnung des Energiebedarfs von verschiedenen Fördermitteln. Die Werkzeuge der Antriebssystemhersteller Lenze und SEW bilden unter anderem die Bestimmung des Energiebedarfs von Rollen-, Ketten- und Gurtförderern (für Stück- oder Schüttgut) sowie von Hebezeugen ab [Len-2013, SEW-2011]. Beide Werkzeuge unterscheiden sich in ihrem Aufbau und in den hinterlegten Fördermitteln nur unwesentlich. Aus diesem Grund soll eine detailliertere Betrachtung des Werkzeugs „Drive Solution Designer“ stellvertretend stattfinden. Die anderen Werkzeuge werden nicht näher untersucht, da diese entweder keine Energiebedarfsermittlung von Fördermitteln ermöglichen (Komponentenebene) oder für einen Einsatz in der Grobplanungsphase aufgrund des hohen Implementierungsaufwands nicht vorgesehen sind (Simulationswerkzeuge).

Die Untersuchung des Drive Solution Designers erfolgt anhand der Energiebedarfsermittlung für einen Kettenförderer. Die benötigten Eingabegrößen sowie die resultierenden für das Forschungsvorhaben relevanten Ausgabegrößen zeigt Abbildung 2-9.

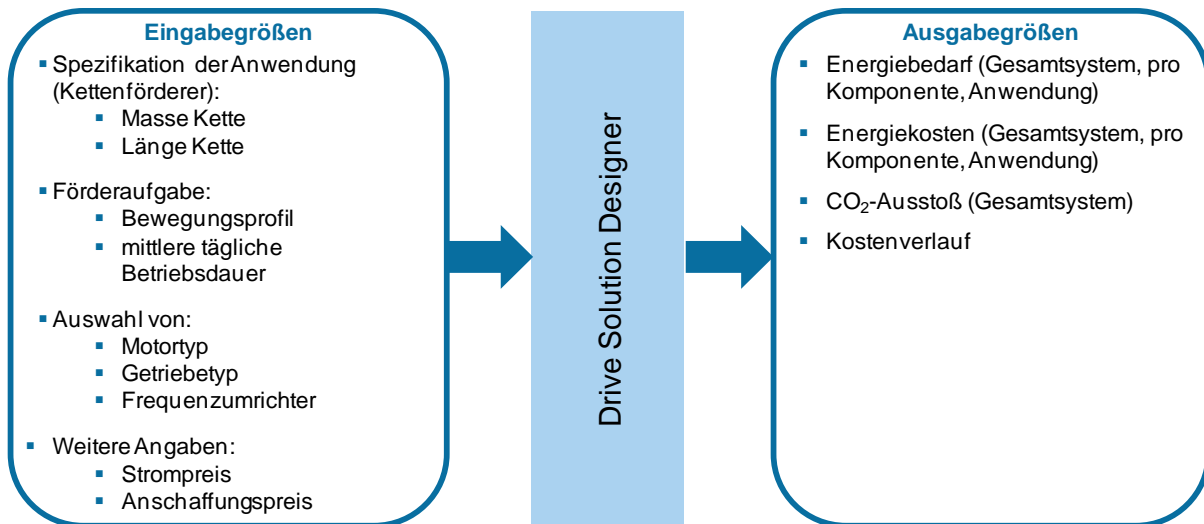


Abbildung 2-9: Ein- und Ausgabewerte des Werkzeugs Drive Solution Designer

Die weiteren für die Berechnung relevanten Parameter, wie z. B. der Reibungskoeffizient zwischen der Kette und der Unterlage, sind bereits hinterlegt, können aber vom Nutzer angepasst werden. Die größte Herausforderung bei der Verwendung durch einen Logistikplaner stellt die korrekte bzw. sinnvolle Auswahl des richtigen Motor- und Getriebetyps sowie des Frequenzumrichters dar. Hierbei kann der Nutzer mit einer geringen Hilfestellung aus einer umfangreichen Datenbank wählen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Auswahl der eingesetzten Komponenten nicht innerhalb der Grobplanungsphase erfolgt, sondern in der Feinplanung durch Personal des Fördertechnikherstellers festgelegt wird. Somit handelt es sich um keine typische Tätigkeit des Logistikplaners.

Nach Abschluss des Projektierungsprozesses berechnet das Werkzeug für jede Komponente innerhalb des abgebildeten Systems sowohl die Drehzahl, die Drehmomente als auch die Leistung. Die Abbildung der Förderaufgabe erfolgt durch die Eingabe von Geschwindigkeits- und Massenprofilen. Ein weiteres Ergebnis stellen die Energiebedarfe sowohl von den einzelnen Komponenten als auch von dem gesamten System dar. Auf Basis dieser Energiebedarfe und dem eingegebenen Strompreis erfolgt die Berechnung der Energiekosten für jedes Jahr des vorgegebenen Betrachtungszeitraums. Auch die Bestimmung der CO₂-Emissionen geschieht auf Basis des Energiebedarfs.

Zusammenfassend handelt es sich beim Drive Solution Designer um ein Werkzeug, das primär für die Auslegung von Antrieben bestimmt ist. Das führt zu einer sehr detaillierten Abbildung des Antriebssystems aus unternehmenseigenen Produkten. Das Werkzeug führt jedoch zu einer sehr genauen Betrachtung der einzelnen Kom-

ponenten hinsichtlich ihrer Verluste und somit der Energiekosten. Darüber hinaus besteht ebenfalls die Möglichkeit, verschiedene Varianten hinsichtlich der Energiekosten zu vergleichen, wobei Auswirkungen verschiedener Strompreise untersucht werden können.

Für eine Verwendung der Werkzeuge innerhalb der Planungsphase von Logistiksystemen und somit innerhalb des Forschungsvorhabens gelten Einschränkungen, die im Abschnitt 3.1 beschrieben werden.

2.2.5 Mess-und Visualisierungssysteme

Um die Transparenz von Energiebedarfen innerhalb logistischer Systeme zu steigern, können einzelne Komponenten oder Teilsysteme kontinuierlich gemessen und deren Energiebedarf visualisiert werden. Dazu ist eine Integration kontinuierlicher Messsysteme erforderlich, die den Strombedarf transparent machen und somit ein zielgerichtetes Handeln zur Steigerung der Energieeffizienz ermöglichen.

Um den Energiebedarf verschiedener Komponenten logistischer Systeme ermitteln zu können, wird geeignete Messtechnik benötigt. Diese Messgeräte unterscheiden sich hinsichtlich des Einsatzfalls - ob sie stationär oder mobil betrieben werden und ob eine permanente oder temporäre Energiedatenerfassung erfolgt [Mül-2011b]. Bei stationären Messgeräten wird eine Installation direkt am Verbraucher oder im Schaltschrank durchgeführt, wohingegen der Einsatz von mobilen Messgeräten keine Standortbeschränkungen erfordert.

Vorteile der mobilen Messtechnik sind nach *Müller et al.* [Mül-2009]:

- der flexible Einsatz,
- die schnelle Verfügbarkeit der Messwerte sowie
- die günstigen Gerätepreise.

Die stationäre Messtechnik erlaubt eine permanente, automatische Messung sowie eine automatische Auswertung und bietet somit die Möglichkeit der Integration in ein Energiemanagementsystem [Mül-2009]. Eine permanente Energiemessung wird in jedem Betrieb mittels des Energieversorgers durchgeführt, wobei neben der bezogenen elektrischen Arbeit auch die maximal in einem Messintervall in Anspruch genommene elektrische Leistung aufgezeichnet wird [Mül-2011b]. Ebenfalls kann

stationäre Messtechnik als Basis für energiesensitive Anlagensteuerungen von Fertigungsmaschinen dienen [Mül-2011b]. Beispiele für diese Betriebssteuerung stellen die Verlagerung von Prozessen in Niedertarifzeiten oder die Begrenzung der maximal aufgenommenen Leistung z. B. durch ein stufenweises Hochfahren der Anlagen dar [Mül-2011b].

Insgesamt können folgende Vorteile von Mess- und Visualisierungssystemen genannt werden:

- Energiemess- und Visualisierungssysteme schaffen Transparenz über den Energiebedarf. Insbesondere hohe Standby-Verbräuche werden sichtbar und ermöglichen ein gezieltes Abschalten von Anlagen, was zu einer Reduzierung des Energiebedarfs führt.
- Messsysteme sind ein Bestandteil bei der Einführung eines Energiemanagementsystems nach DIN EN ISO 50001.
- Sie ermöglichen ein Lastmanagement zur Vermeidung von Lastspitzen, was zu einer Reduzierung des lastabhängigen Bestandteiles des Strompreises führt.
- Der Einsatz von Energiemesssystemen führt zu einer Sensibilisierung von Mitarbeitern hinsichtlich der Energiebedarfe von Anlagen.

Um diese Vorteile auszuschöpfen, ist die Investition in Geräte sowie der Personaleinsatz für die Aufbereitung Voraussetzung. Insbesondere die Einführung der permanenten Energiedatenerfassung benötigt die Anschaffung von Messgeräten (Preise in zwei- bis dreistelliger Höhe) sowie die Integration in das Steuerungssystem und die Anschaffung einer Software zur Datenauswertung, wofür bei großen Produktionsstätten ein fünf- bis sechstelliger Betrag anzusetzen ist [Mül-2011b].

3 Modellierung des Energiebedarfs

Um die Zielsetzung des Forschungsvorhabens, nämlich die Berücksichtigung des Energiebedarfs in der Planungsphase von Logistiksystemen, zu erreichen, muss die Ermittlung des Energiebedarfs verschiedener Planungsvarianten möglich sein. In diesem Kapitel werden Modelle für die Energiebedarfsermittlung ausgewählter Fördermittel aufgestellt. Dafür werden zuerst die Anforderungen an die Energiebedarfsermittlung in der Grobplanungsphase von Logistiksystemen bestimmt. Im Anschluss erfolgt die Analyse der Einflussgrößen, die zum einen für die Modellierung des Energiebedarfs und zum anderen für die nachfolgende Klassifikation der Energieverbraucher eines Logistiksystems benötigt werden. Ziel der Klassifikation ist die Identifikation der Fördermittel, die den bedeutendsten Anteil am Energiebedarf des Gesamtsystems besitzen.

3.1 Anforderungen an die Energiebedarfsermittlung in der Planungsphase von Logistiksystemen

Um den Energiebedarf bereits in der Grobplanungsphase von Logistiksystemen bestimmen zu können, muss zum einen Kenntnis über den Planungsgegenstand der einzelnen Planungsphase bestehen und zum anderen die notwendige Genauigkeit bekannt und realisierbar sein.

Innerhalb der Systemplanung erfolgt die Auswahl und Zuordnung der Fördermittel zu Prozessen; die Auswahl auf Komponentenebene stellt jedoch keinen Planungsgegenstand der Systemplanung dar (vgl. Abschnitt 2.1.2). Somit sind zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Parameter der verschiedenen Systemelemente festgelegt bzw. werden nicht innerhalb dieser Planungsphase betrachtet. Die Grobplanung ist geprägt durch die Bildung einer Vielzahl an Varianten, die bewertet werden müssen [All-1999]. Insgesamt können die folgenden Anforderungen an die Methode zur Ermittlung des Energiebedarfes in der (Grob-)Planung abgeleitet werden:

- die benötigten Informationen müssen vorhanden sein;
- vertretbarer Aufwand bei der Durchführung der Methode;

- Einsatz unabhängig von einem speziellen Anwendungsfall, Anwendung auch für verschiedene Projekte möglich.

Im Rahmen eines Projekttreffens wurde von den Projektpartnern eine Genauigkeit von +/- 20 Prozent bei der Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs eines Logistiksystems in der Grobplanungsphase als ausreichend genau festgelegt [Pro-2012].

Bei einem Abgleich der Anforderungen mit den im Abschnitt 2.2.4 ermittelten Eigenschaften der Werkzeuge zur Bestimmung des Energiebedarfs kann festgestellt werden, dass diese Werkzeuge sich nur bedingt für den Einsatz in der Grobplanungsphase eignen. Der Hauptgrund liegt in den aufgrund der Planungsphase noch nicht vorliegenden Daten, die jedoch als Eingangsgrößen für die einzelnen Werkzeuge benötigt werden.

3.2 Einflussgrößen auf den Energiebedarf

Soll der Energiebedarf von Fördermitteln bestimmt oder sogar für eine Anwendung oder einen Anwendungsfall reduziert werden, so ist eine detaillierte Kenntnis der Einflussgrößen auf den Energiebedarf notwendig. Das Ergebnis der für die Ermittlung der Einflussgrößen durchgeführten Analyse zeigt Abbildung 3-1. Anzumerken ist, dass diese Übersicht nicht die Einflussgrößen eines spezifischen Fördermittels auf den Energiebedarf beinhaltet, sondern es sich um eine Aufzählung aller Größen für das gesamte Spektrum an Fördermitteln handelt. Somit ist es möglich, dass bestimmte Größen für spezifische Fördermittel nicht von Bedeutung sind. Der Energiebedarf wird von einer Vielzahl an Größen beeinflusst, die sich den Kategorien Betrieb, Komponenten, Förderaufgabe und Umgebungsbedingungen zuordnen lassen. Die Kategorie Umgebungsbedingungen stellt einen Sonderfall dar, da Lufttemperatur sowie Luftfeuchtigkeit nur einen Einfluss auf den Luftwiderstand besitzen. Somit sind diese Faktoren lediglich für Fördermittel von Bedeutung, die eine hohe Geschwindigkeit aufweisen. Für Regalbediengeräte zeigen Untersuchungen, dass der Luftwiderstand einen Einfluss von unter fünf Prozent auf die Leistungsaufnahme bei konstanter Geschwindigkeit besitzt [Voß-2012].

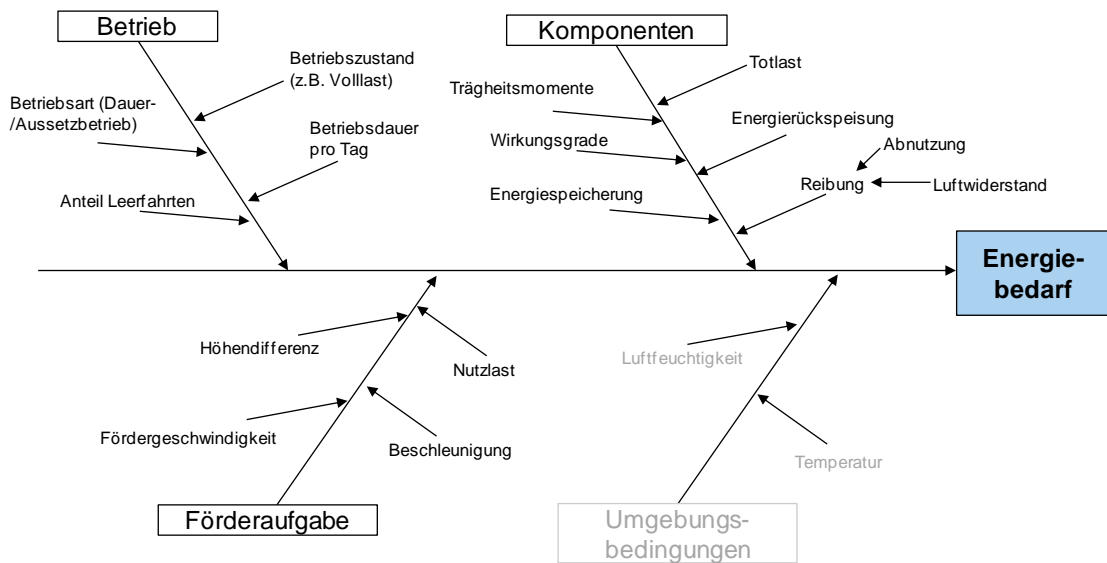


Abbildung 3-1: Ursache-Wirkungsdiagramm Energiebedarf von Fördermitteln

Die Einflussgrößen der Kategorie „Betrieb“ können als zeitlich nicht kontinuierlich angesehen werden. Sowohl die Betriebsdauer des Fördermittels, der Anteil an Leerfahrten sowie der zu bewerkstellende Durchsatz (Betriebszustand) schwanken innerhalb eines Betrachtungszeitraums. Die Unterscheidung, ob ein Fördermittel in Dauerbetrieb (z. B. Stetigförderer) oder im Aussetzbetrieb (z. B. Flurförderzeuge) betrieben wird, ist zeitlich konstant und hängt vom Fördermittel ab.

Wirkungsgrade, Trägheitsmomente, die sich durch das Gewicht der einzelnen Komponenten eines Fördermittels ergebene Totlast oder auch die verursachte Reibung beeinflussen die Höhe des Energiebedarfs. Durch den Einsatz von Komponenten zur Netzurückspeisung oder Energiespeicherung von zurückgewonnener Energie kann diese Höhe gesenkt werden.

Auch die definierte Förderaufgabe, die ein Fördermittel zu erfüllen hat, stellt eine Einflussgröße dar. Eine Förderaufgabe kann durch die zu fördernde Nutzlast, die Entfernungen (sowohl horizontal als auch vertikal) sowie durch die kinematischen Parameter (Geschwindigkeit und Beschleunigung) definiert werden.

Die Einflussgröße Planung ist in Abbildung 3-1 aufgrund der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Mittels der Planung erfolgt die Festlegung der Förderaufgabe sowie Auswahl von Komponenten und der Betriebsweise. Somit besitzt die Planung Einfluss auf alle in Abbildung 3-1 dargestellte Größen.

3.3 Klassifikation von Energieverbrauchern

Mit dem Ziel die Fördermittel, die einen maßgeblichen Anteil an dem Energiebedarf eines Logistiksystems besitzen, zu identifizieren, erfolgt eine Klassifikation der Fördermittel. Die Klassifikation wird zum einen allgemein gültig, d. h. für das gesamte Spektrum Fördertechnik durchgeführt und zum anderen für die im Rahmen des Forschungsvorhabens bestimmten Untersuchungsszenarien.

3.3.1 Klassifikationsschema

Soll der Fördermitteltyp bestimmt werden, der den größten Anteil am Energiebedarf logistischer Systeme besitzt, ist zum einen die Kenntnis über die Verbreitung bzw. Einsatzhäufigkeit der Fördermittel und zum anderen der Energiebedarf pro Fördermittel erforderlich. Somit wird zuerst der Energiebedarf berechnet und im nächsten Schritt die Verbreitung der einzelnen Fördermittel untersucht.

Die Formel (3-1) beschreibt den physikalischen Zusammenhang zwischen der Leistung P und der Zeit.

$$E = \int P(t)dt \quad (3-1)$$

Der Energiebedarf hängt von der Höhe der Leistung P sowie von der Zeit ab. Daraus folgt, dass die Motornennleistung eine erste Klassifikation der Energieverbraucher ermöglicht. Durch Literaturrecherchen sowie verfügbare Produktkataloge können für verbreitete Fördermittelgruppen die eingesetzten Motorleistungsklassen bestimmt werden. Abbildung 3-2 zeigt die ermittelten minimalen und maximalen Motornennleistungen von einzelnen Fördermitteln. Die Fördermittel wurden hinsichtlich der Einsatzfelder: KLT – Kleinladungsträger und GLT - Großladungsträger unterteilt. Es zeigt sich, dass die Fahr- und Hubwerke von Regalbediengeräten die größten Motornennleistungen besitzen.

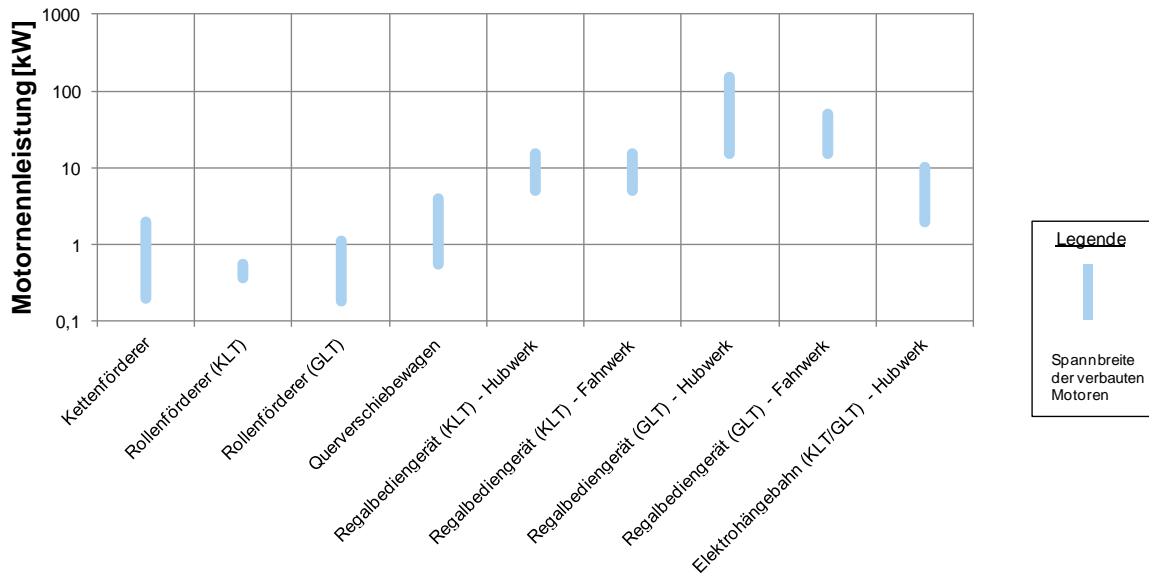


Abbildung 3-2: Klassifikation anhand der Motornennleistung (Quellen: [Uni-2013b, Geb-2013a, Geb-2013b, Uni-2013a, SSI-2013, Geb-2013c, Kie-2007])

Unberücksichtigt bei dieser Betrachtung bleiben die Zeitanteile, in denen ein Fördermittel diese Leistung einsetzt. Die tatsächlich aufgenommene elektrische Leistung der einzelnen Fördermittel ist aber stark von der Betriebsweise und Einschaltzeit der Fördermittel abhängig (vgl. Abbildung 3-3). Dieser Sachverhalt kann auf die Betriebsweise zurückgeführt werden. Hierbei können die Fördermittel in Stetig- und Unstetigförderer unterteilt werden. Stetigförderer bewegen das Fördergut stetig, im Takt oder mit wechselnden Geschwindigkeiten, von einer Aufgabe- zu einer Abgabestelle [DIN 15201-1]. Unstetigförderer transportieren das Fördergut diskontinuierlich von einer Aufgabe- zu einer Abgabestelle, wobei häufig Arbeitsspiele eingesetzt werden [Mar-2009].

Abbildung 3-3 zeigt die prinzipiellen Leistungsverläufe von einem Stetigförder- (links) und Unstetigfördermittel (rechts).

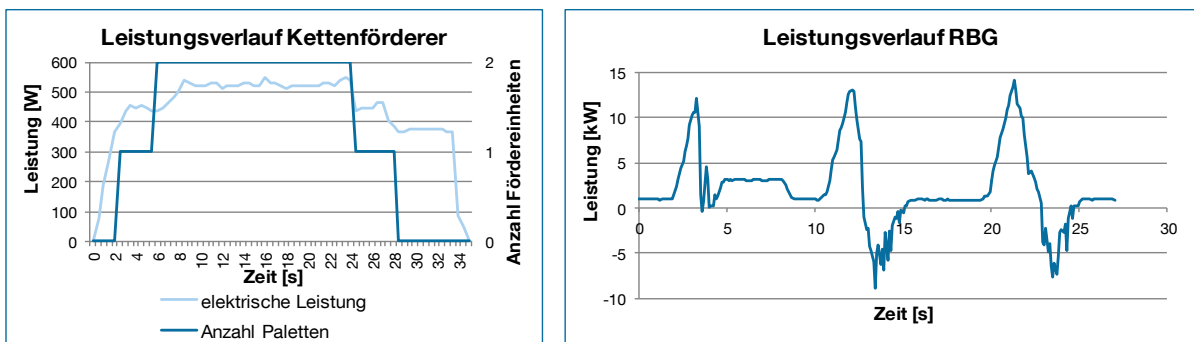


Abbildung 3-3: Leistungsverläufe eines Stetigförderers (Kettenförderer) sowie eines Unstetigförderers (RBG)

Das linke Diagramm zeigt den Leistungsverlauf eines Kettenförderers für einen Zyklus, der zwei Fördereinheiten umfasst. Aus dem Leistungsverlauf geht zum einen die Abhängigkeit der aufgenommenen Leistung von der Anzahl an Fördereinheiten und zum anderen eine hohe Leistungsaufnahme im Leerlauf hervor. Insgesamt lassen sich jedoch eher geringe Abweichungen zwischen einzelnen Beladungszuständen feststellen. Die Häufigkeiten bzw. Anteile für die einzelnen Lastzustände sind stark einsatzspezifisch, was auch *Jodin* [Jod-2012] bestätigt. Der Leistungsverlauf eines Regalbediengeräts (RBG) für den Transport von KLT bei einem Doppelspiel wird durch das rechte Diagramm in Abbildung 3-3 veranschaulicht. Hierbei verläuft die gemessene elektrische Leistung zwischen – 9 kW und 14 kW. Diese großen Abweichungen können auf die Beschleunigung und Verzögerung des Hub- bzw. Fahr-antriebs eines RBG zurückgeführt werden. Die Zeitanteile und die Ausprägungen der einzelnen Abschnitte hängen von den kinematischen Parametern des RBG sowie von der Lagergeometrie ab. Somit handelt es sich beim Leistungsverlauf eines RBG um eine einsatzfallspezifische Größe.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die zeitabhängigen Leistungsverläufe von einzelnen Fördermitteln nicht allgemeingültig bestimmt werden können. Vielmehr muss eine Untersuchung für einzelne Logistiksysteme, bei denen die Einsatzbedingungen bekannt sind, durchgeführt werden.

Das Ziel die Verbreitung einzelner Fördermittel – wie z. B. Krane – innerhalb festgelegter Gebiete zu bestimmen, kann prinzipiell durch die Verwendung der europäischen Produktionsstatistik Prodcorn und die Außenhandelsstatistik erfolgen [Bru-2013]. Es zeigt sich jedoch, dass die Gruppen der Produktionsstatistik Prodcorn so umfassend und unspezifisch aufgebaut sind, dass eine Zuordnung zu den im Abschnitt 2.1.1 identifizierten Fördermitteln im benötigten Detaillierungsgrad kaum möglich ist (vgl. [Sta-2008]). Somit besteht keine Möglichkeit die Anzahl der eingesetzten Fördermittel zu bestimmen. Eine Klassifikation der Energieverbraucher kann deshalb nur einsatzfallspezifisch erfolgen, dafür werden im Folgenden verschiedene Untersuchungsszenarien festgelegt.

3.3.2 Untersuchungsszenarien

Im Rahmen verschiedener Gespräche mit Industrievertretern werden die Untersuchungsszenarien für das Forschungsvorhaben definiert. Bei den gewählten Szenarien handelt es sich um Projekte aus der Industrie, anhand derer mögliche Stellhebel

in der Planungsphase für die Steigerung der Energieeffizienz untersucht werden. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

Szenario „Stetigförderanlage“

Das Szenario „Stetigförderanlage“ beinhaltet den Wareneingang eines Produktionsstandorts (vgl. Abbildung 3-4). Die Gitterboxen und Euro-Paletten werden mit einem Flurförderzeug von ankommenden Trailern auf das erste Element gesetzt und legen bis zur Senke eine Förderstrecke von ca. 30 m zurück. Auf dem letzten Element erfolgt die Identifikation der Fördereinheiten sowie der abschließende Weitertransport mit einem Flurförderzeug. Innerhalb eines Jahres werden ca. 25.000 Fördereinheiten transportiert.

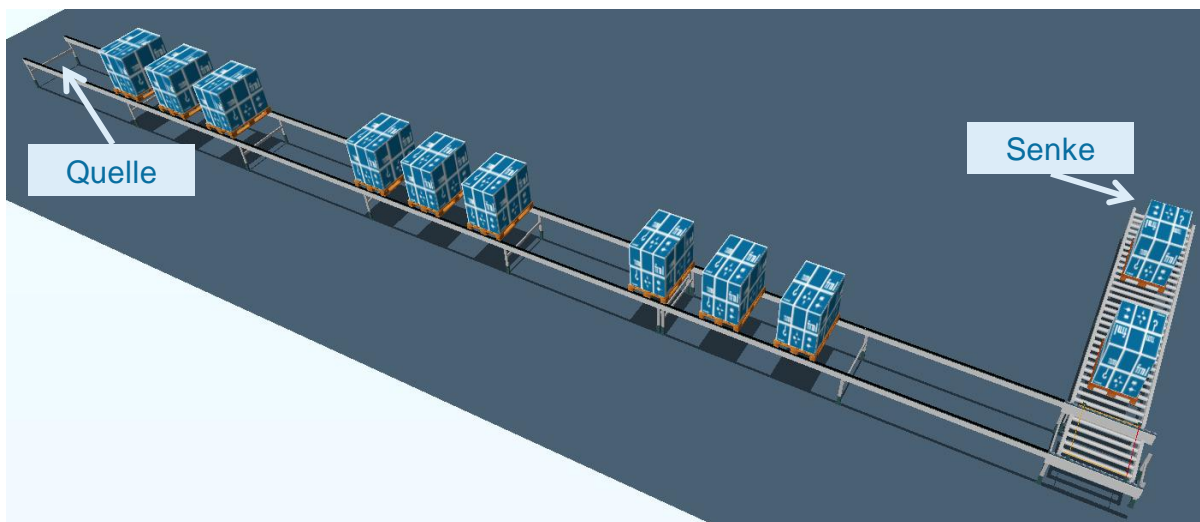


Abbildung 3-4: Szenario Stetigförderanlage

Szenario „Erweiterung eines automatischen Kleinteilelagers“

Bei dem Szenario „Erweiterung eines automatischen Kleinteilelagers“ handelt es sich um eine Erweiterung einer bestehenden Anlage. Planungsursache ist eine erhebliche Steigerung der Auftragslast sowie eine Erhöhung der vorzuhaltenden Lagerkapazitäten. Auf Basis dessen erfolgt eine Erhöhung der Gassenanzahl sowie eine Gassenverlängerung. Zusätzlich wird die Versorgung des Lagers umgestellt und der Kommissionierbereich erweitert.

Szenario „Manuell vs. Automatisch“

Das Szenario „Manuell vs. Automatisch“ vergleicht ein mit Schmalgangstaplern betriebenes Lager mit einem durch Regalbediengeräte betriebenes automatisches Hochregallager (HRL). Diese Lagertypen sind für unterschiedliche Anforderungen unterschiedlich gut geeignet. Die Investitionen pro Stellplatz sind für automatisch

betriebene Hochregallager höher als für Schmalgangstaplerlager, jedoch besitzen letztere deutlich höhere durchsatzabhängige Kosten [Gud-2010].

Um die beschriebenen Lagerarten miteinander vergleichen zu können, soll eine Konfiguration, bestehend aus einem vorgegeben Durchsatz sowie aus einer Lagerkapazität gewählt werden, bei der beide Lagerarten einsetzbar sind. Gemeinsam mit Projektpartnern wird ein Lager mit einer Kapazität von 15.000 Stellplätzen sowie einem jährlichen Durchsatz von 210.000 Palettenbewegungen festgelegt.

Das HRL besteht aus drei Regalgassen, deren Regale doppeltief ausgeführt sind und jeweils aus 93 Regalspalten und 14 Ebenen bestehen. Das manuelle Lager umfasst 12 Gassen sowie 48 Regale, wobei ein Regal 39 Fächer in der Horizontalen besitzt und aus acht Ebenen besteht.

3.3.3 Klassifikation der Verbraucher innerhalb der Szenarien

Für die im vorherigen Abschnitt erarbeiteten Szenarien erfolgt nun eine Klassifikation der Energieverbraucher. Als Basis dienen die Motornennleistungen der einzelnen Fördermittel.

Klassifikation Szenario „Stetigförderanlage“

Innerhalb dieses Szenarios werden die Fördermittel Kettenförderer, Rollenförderer sowie Eckumsetzer eingesetzt. Tabelle 3-1 zeigt die Klassifikation nach der Motornennleistung. Es zeigt sich, dass die Tragkettenförderer den größten Anteil an der gesamten verbauten Motornennleistung besitzen. In diesem Szenario wird die im Abschnitt 3.3.1 erstellte Klassifikation nach der Motornennleistung um die Anzahl eingesetzter Antriebe erweitert. Jedoch ist für die Klassifikation auf Basis des Energiebedarfs eine Erweiterung um Laufzeiten notwendig.

Tabelle 3-1: Klassifikation Szenario „Stetigförderanlage“

Fördermittel	Gesamte Motornennleistung [kW]	Anzahl Antriebe
Tragkettenförderer	7,7	7
Rollenförderer	0,74	2
Eckumsetzer	1,07	2

Klassifikation Szenario „Erweiterung eines automatischen Kleinteilelagers“

Innerhalb des Szenarios werden eine Vielzahl von verschiedenen Fördermitteln sowohl für den Transport von GLT als auch von KLT eingesetzt. Die Klassifikation erfolgt auf Basis der Motornennleistungen, die aus der Motorliste der Anlage bestimmt werden können. Das Ergebnis der Klassifikation veranschaulicht Tabelle 3-2.

Die Palettenfördertechnik besitzt einen Anteil von 40,2 Prozent an der gesamten installierten Motornennleistung. Der größte Anteil ist den Regalbediengeräten mit 47,7 Prozent zuzuordnen. Die fehlenden 12,1 Prozent entfallen auf die für den Behältertransport eingesetzten Fördermittel.

Tabelle 3-2: Klassifikation Szenario „Erweiterung eines automatischen Kleinteilelagers“

Bereich	Fördermittel	Anteile
Palettenfördertechnik	Tragkettenförderer	27,80 %
	Rollenförderer	3,09 %
	Sonstige	9,33 %
Behälterfördertechnik	Gesamt	12,07 %
Regalbediengeräte	Regalbediengeräte	47,71 %

Szenario „Manuell vs. Automatisch“

Für eine Klassifikation im Szenario „Manuell vs. Automatisch“ erfolgt nur die Betrachtung einzelner Geräte, da es sich, im Gegensatz zu den anderen Szenarien, bereits um zwei Planungsvarianten handelt, in denen jeweils nur ein Fördermitteltyp eingesetzt wird. Zum einen wird ein Regalbediengerät für Paletten und zum anderen ein Hochregalstapler eingesetzt. Das ausgewählte und für den betrachteten Fall geeignete Regalbediengerät besitzt drei Antriebe mit folgenden Motornennleistungen:

- Fahrtrieb: 5,5 kW,
- Hubtrieb: 11 kW,
- Antrieb des Lastaufnahmemittels: 2 kW.

Der Hochregalstapler besitzt einen Fahrtrieb mit einer Motornennleistung von 7,6 kW sowie einen Hubtrieb mit einer Motornennleistung von 20 kW.

Es zeigt sich, dass die Motornennleistung des Hochregalstaplers sowohl vom Fahr- als auch vom Hubantrieb größer ist, als die Motornennleistungen des Regalbediengeräts.

Fazit

Auf Basis der Klassifikation der Szenarien „Stetigförderanlage“ und „Erweiterung eines automatischen Kleinteilelagers“ rücken für weitere Untersuchungen die Tragkettenförderer sowie Regalbediengeräte in den Fokus. In beiden Szenarien weisen die Tragkettenförderer bedeutende Anteile an der gesamten installierten Motornennleistung auf. Beim Szenario „Erweiterung eines automatischen Kleinteilelagers“ besitzen die Regalbediengeräte den größten Anteil und sollen daher näher betrachtet werden. Das Szenario „manuell vs. automatisch“ führt zur Betrachtung von Hochregalstaplern.

Um detaillierte Kenntnisse über den Energiebedarf von Regalbediengeräten und Stetigfördermitteln, insbesondere von Tragkettenförderern zu erhalten, werden messtechnische Untersuchungen durchgeführt, die im nachfolgenden Abschnitt beschrieben werden. Für die Bestimmung des Energiebedarfs von Hochregalstaplern kann auf Messwerte zurückgegriffen werden, die in einem Simulationsmodell für die Energiebedarfsermittlung umgesetzt werden.

3.4 Durchführung von Messungen

Mit dem Ziel den Energiebedarf unterschiedlicher Fördermittel zu analysieren, werden verschiedene Messungen durchgeführt. Die Beschreibung der physikalischen Grundlagen enthalten die Abschnitten 2.2.1 bzw. 2.2.2. Der Ablauf der Messungen wird im Folgenden beschrieben, zudem wird ein Überblick über die Ergebnisse dieser Energiebedarfsmessungen gegeben.

Vorgehen

Das Vorgehen gliedert sich in die Phasen Vorbereitung (Analyse des zu messenden Fördermittels), Anschluss Messgerät, Durchführung von Messungen sowie Auswertung der Messergebnisse.

1. Analyse des zu messenden Fördermittels

Bevor der Anschluss des Messgeräts sowie die Messung erfolgen kann, muss die Aufnahme aller benötigten Größen geplant werden. Hierbei kann zwischen stati-

schen Größen (z. B. Konstruktionsparameter) und dynamischen Größen (Betriebsparameter) unterschieden werden. Tabelle 3-3 zeigt die relevanten Größen für Stetigförderer.

Tabelle 3-3: Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Größen bei der Messung eines Stetigförderers

statische Größen	dynamische Größen
Motortyp	Fördergewichte
Getriebetyp	Fördergeschwindigkeiten
Frequenzumrichter	Betriebsweise (z. B. Blockgröße)
Konstruktionsparameter (z. B. Länge des Förderers)	...
...	

Als Quelle der statischen Größen dienen häufig Typenschilder, Schaltpläne, technische Dokumentationen für Wartungszwecke oder Angebotsunterlagen. Die dynamischen Größen können auf verschiedenste Weise bestimmt werden. Die Dokumentation der Betriebsweise findet beispielsweise durch Videoaufnahmen und Messprotokolle statt. Die Ermittlung der Fördergewichte erfolgt mittels der Identifikationsnummern der Fördereinheiten. Variiert die Fördergeschwindigkeit innerhalb eines Zyklus oder im Betrieb, so kann dies über die Parameter des eingesetzten Frequenzumrichters bestimmt werden. Die Erstellung eines geeigneten Messprotokolls schließt den ersten Schritt des Vorgehens ab.

2. Anschluss Messgerät

Beim Anschluss des Messgerätes müssen verschiedene Gegebenheiten berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 2.2.2), insbesondere die Wahl der geeigneten Messzangen für den Stromstärke-Bereich des Verbrauchers ist bedeutsam. Auch die Identifikation einer geeigneten Messstelle im Schaltschrank ist zu beachten, als Datengrundlage dienen Schaltpläne. Der Messpunkt sollte zum einen vor dem Frequenzumrichter liegen, da nach dem Frequenzumrichter ein Großteil der Messgeräte keine sinnvollen Messergebnisse erhält und zum anderen sollte sich nur der zu messende Verbraucher im Stromkreis befinden. Insbesondere die dezentrale Antriebstechnik gestaltet den letzten Punkt schwierig (vgl. Abbildung 3-5). Aus Schaltplänen kann die Kenntnis über den Anschluss des Motors (Stern- oder Dreiecksschaltung) gewonnen werden.

3 Modellierung des Energiebedarfs

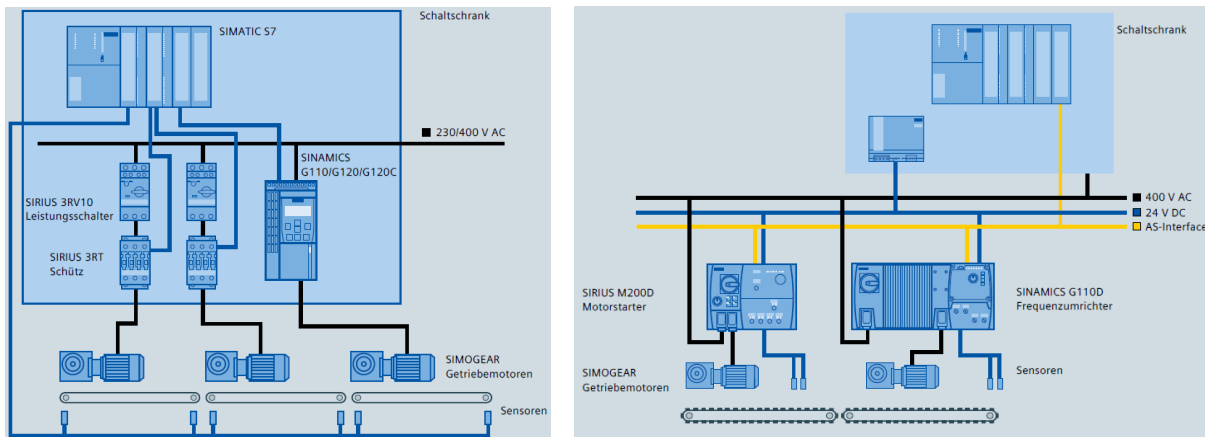


Abbildung 3-5: zentrale und dezentrale Steuerungskonzepte [Sie-2013a]

3. Durchführung von Messungen

Zum Zeitpunkt der durchgeführten Messungen wird unter Umständen an den Anlagen produziert, wodurch sich erhebliche Einschränkungen hinsichtlich der Messgrößen ergeben. Eine Einflussnahme auf die Fördergewichte oder Fördergeschwindigkeiten ist somit nicht möglich. Aus diesem Grund muss eine ausreichend große Anzahl an Messungen durchgeführt werden, um den Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und dem Energiebedarf zu ermitteln. Auch die Festlegung des Aufzeichnungsintervalls ist von Bedeutung, da die Speicherkapazität der mobilen Messgeräte endlich ist (z. B. beträgt die Aufzeichnungszeit des verwendeten Messgeräts 36 min bei der höchsten zeitlichen Auflösung). Somit führt die Wahl eines kleinen Intervalls zu einer geringen möglichen Aufzeichnungszeit, ergibt aber die exakteren Ergebnisse.

4. Auswertung und Plausibilisierung

Im letzten Schritt erfolgt die Auswertung sowie Plausibilisierung der Messwerte. Hierbei muss eine sinnvolle Aufbereitung der Messgrößen sowie eine Verknüpfung stattfinden. Abbildung 3-6 zeigt eine Aufbereitung von Messungen zweier verschalteter Stetigförderersegmente, wobei das erste Segment mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten betrieben wird. Um eine übersichtliche Aufbereitung zu ermöglichen werden drei Diagramme miteinander verknüpft. Das bedeutet, dass ihre x-Achsen die gleiche Skalierung besitzen. Somit kann ein Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung, dem durch die Fördereinheit belasteten Fördersegment sowie die Fördergeschwindigkeit hergestellt werden. Auch die Zeitanteile, in denen die beiden Antriebe aktiv sind, können so identifiziert werden.

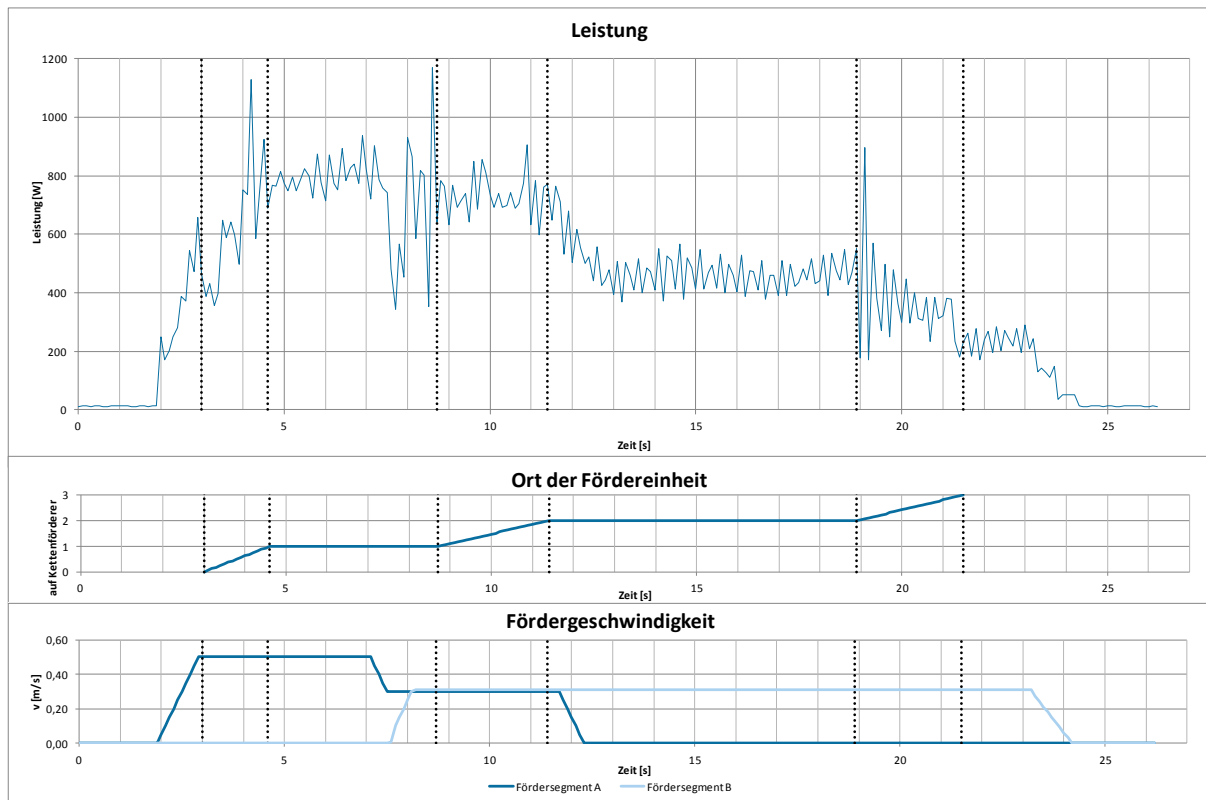


Abbildung 3-6: Auswertung einer Messung an zwei zusammenhängenden Fördersegmenten

Eine Plausibilisierung der Messergebnisse kann über die im Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Berechnungsmodelle erfolgen. Hierbei kann auch auf die Modelle zur Auslegung der Antriebe von Fördermitteln zurückgegriffen werden (z. B. [SEW-2001, Rie-2008]).

Durchgeführte Messungen

Auf Basis des vorgestellten Vorgehens werden unterschiedliche Fördermittel mehrerer Hersteller an verschiedenen Einsatzorten gemessen. Zur Messung der Leistungsaufnahme bzw. des Energiebedarfs einzelner Fördermittel wird das Messgerät Power Logger 1735 der Firma Fluke eingesetzt. Abbildung 3-7 zeigt das Messgerät Fluke 1735 sowie die benötigten Anschlüsse an das Versorgungsnetz des zu messenden Fördermittels.

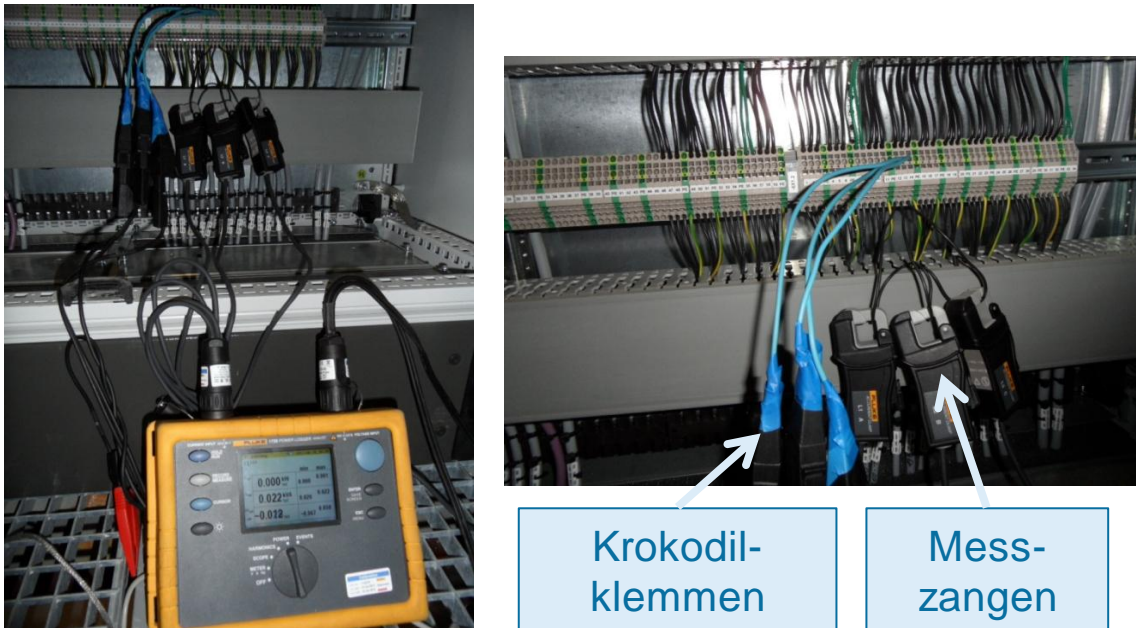


Abbildung 3-7: Messgerät Fluke 1735 Power Logger sowie deren Anschluss

Das Messgerät ermittelt die Stromstärke durch die Stromzangen. Für die Messungen der Spannung muss der direkte Anschluss des Geräts mittels Krokodilklemmen an die Spannungsquelle erfolgen.

Die aus den Messungen gewonnen Erkenntnisse fließen in die Modelle zur Energiebedarfsermittlung von Stetigförderern (Abschnitt 3.6) sowie Regalbediengeräten (Abschnitt 3.7) ein und dienen dort zur Validierung des Modells.

3.5 Auswahl der Methode zur Energiebedarfsermittlung

Die Methoden zur Ermittlung des Energiebedarfs von Logistiksystemen bzw. deren Systemelementen werden im Abschnitt 2.1.1 beschrieben und nach Abbildungsgüte und Zeitaufwand klassifiziert. Mit dem Ziel, die für den Einsatz in der Planungsphase von Logistiksystemen am besten geeignete Methode auszuwählen, erfolgt eine Ermittlung der Anforderungen an die Methoden, die als Kriterien für die abschließende Bewertung und Auswahl dienen.

Die Anforderungsanalyse ergibt folgende Bewertungskriterien:

- **Genauigkeit:** Aussagekraft des ermittelten Energiebedarfs
- **zeitlicher Aufwand:** benötigte Zeit zur Durchführung der Ermittlung

- **Nutzeranforderung:** erforderliche Erfahrung / Wissen des Anwenders
- **Informationsbeschaffungsaufwand:** Aufwand zur Ermittlung der benötigten Daten
- **Kostenaufwand:** Kosten für die Beschaffung der benötigten Software
- **Durchführbarkeit in der Planung:** Eignung für den Einsatz in der Planungsphase (siehe Abschnitt 3.1)

Die Bewertung der Methoden zur Energiebedarfsermittlung erfolgt mittels einer Nutzwertanalyse. Dafür muss für die einzelnen Bewertungskriterien eine Gewichtung bestimmt werden. Im vorliegenden Fall wird dafür ein paarweiser Vergleich eingesetzt, wobei jedes Bewertungskriterium mit jedem anderen verglichen wird und entschieden, ob es weniger wichtig (ein Punkt), gleich wichtig (zwei Punkte) oder wichtiger (drei Punkte) ist. Das Ergebnis zeigt Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Gewichtung der Bewertungskriterien auf Grundlage des paarweisen Vergleichs

Ermittlung der Gewichtung der Bewertungskriterien	Genauigkeit	zeitlicher Aufwand	Nutzeranforderung	Informationsbeschaffungsaufwand	Kostenaufwand	Durchführbarkeit in der Planung	Summe	Resultierende Gewichtung
Genauigkeit	1	1	3	2	3	1	10	0,167
zeitlicher Aufwand	3	1	3	2	3	1	12	0,200
Nutzeranforderung	1	1	1	2	1	6	0,100	
Informationsbeschaffungsaufwand	2	2	3	1	3	1	11	0,183
Kostenaufwand	1	1	2	1	1	6	0,100	
Durchführbarkeit in der Planung	3	3	3	3	3	1	15	0,250
Summe							60	1

Die nachfolgende Bewertung der Methoden zur Energiebedarfsermittlung wird mittels einer Skala von eins bis zehn durchgeführt, wobei eins einen geringen und zehn einen hohen Teilnutzen ausdrückt. Das Ergebnis der Bewertung zeigt Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Bewertung der Methoden zur Energiebedarfsermittlung

		Methoden zur Energiebedarfsermittlung													
		Schätzung				Berechnung				Simulation				Messung	
		Anhaltswert: Motornennleistung		Anhaltswert: Anschaffungskosten		mechanische Energiebetrachtung		zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile		mechatronisches Modell		Ablaufsimulation		Messungen	
Bewertungskriterium	Gewichtung	Bewertung	gew. Teilnutzen	Bewertung	gew. Teilnutzen	Bewertung	gew. Teilnutzen	Bewertung	gew. Teilnutzen	Bewertung	gew. Teilnutzen	Bewertung	gew. Teilnutzen	Bewertung	gew. Teilnutzen
Genauigkeit	0,167	3	0,50	1	0,17	8	1,33	7	1,17	9	1,50	7	1,17	10	1,67
zeitlicher Aufwand	0,200	9	1,80	10	2,00	5	1,00	5	1,00	2	0,40	3	0,60	2	0,40
Nutzeranforderung	0,100	2	0,20	2	0,20	7	0,70	6	0,60	5	0,50	5	0,50	3	0,30
Informationsbeschaffungsaufwand	0,183	3	0,55	3	0,55	2	0,37	3	0,55	2	0,37	3	0,55	1	0,18
Kostenaufwand	0,100	10	1,00	10	1,00	10	1,00	10	1,00	4	0,40	4	0,40	3	0,30
Durchführbarkeit in der Planung	0,250	8	2,00	8	2,00	8	2,00	8	2,00	7	1,75	7	1,75	2	0,50
Summe	1,000	35	6,05	34	5,92	40	6,40	39	6,32	29	4,92	29	4,97	21	3,35
Rang		3.		4.		1.		2.		6.		5.		7.	

Es zeigt sich, dass die sich ergebenden Nutzwerte eine Spannbreite von 3,35 bis 6,4 besitzen. Die höchsten Nutzwerte erreichen die beiden Berechnungsansätze. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Forschungsprojekts Berechnungsmodelle für die Energiebedarfsermittlung von Stetigförderanlagen sowie Regalbediengeräten entwickelt bzw. erweitert.

3.6 Energiebedarf von Stetigförderern

Mehrere Stetigförderer bilden zusammen eine Stetigförderanlage (vgl. Abschnitt 2.1.1). Eine beispielhafte Stetigförderanlage zeigt Abbildung 3-8. Der Energiebedarf der gesamten Anlage stellt die Summe der Energiebedarfe der einzelnen Systemelemente dar. Aus diesem Grund wird die Stetigförderanlage in ihre Elemente untergliedert. Im nachfolgenden Schritt erfolgt die Modellierung des Energiebedarfs einzelner Fördermittel. Im letzten Schritt kann auf Basis der vorherigen Schritte ein Gesamtmodell zur Bestimmung des Energiebedarfs einer Stetigförderanlage formuliert werden. Die nachfolgenden Ergebnisse können teilweise auch der Veröffentlichung [Hab-2013] entnommen werden.

3.6.1 Abbildung von Stetigförderanlagen

Eine Stetigförderanlage kann durch abstrahierte Elemente beschrieben werden, deren Bezeichnungen und Beschreibungen sich nachfolgend an *Gudehus* [Gud-2010] sowie *Arnold* und *Furmans* [Arn-2009] anlehnen (vgl. Abbildung 3-8):

- Quelle: Eingang der Fördereinheiten in die Stetigförderanlage; erzeugt die Systemlast
- Fördersegment: einzelnes Fördermittel
- Zusammenführungselement: Element, das mehrere Eingänge, jedoch nur einen Ausgang besitzt
- Verteilelement: Element, das einen Eingang und mehrere Ausgänge besitzt
- Senke: Ausgang der Fördereinheit aus dem betrachteten System

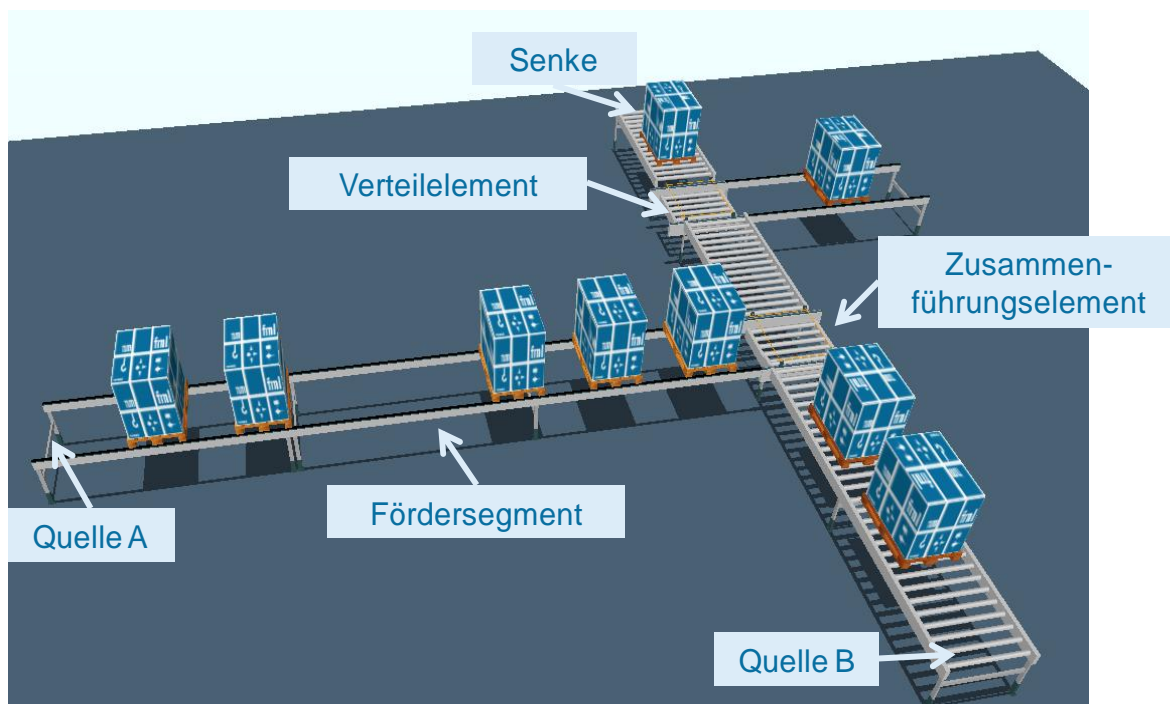


Abbildung 3-8: Beispielhafte Stetigförderanlage

Stetigfördermittel, die zur Förderung von GLT eingesetzt werden, weisen häufig eine zyklische Betriebsweise auf, wodurch der jährliche Energiebedarf durch die Summierung des Energiebedarfs je Zyklus ermittelt werden kann [Hab-2013]. Ein Zyklus besitzt eine feste Anzahl an Fördereinheiten, die transportiert werden. Diese Anzahl wird auch häufig als Blockgröße oder Pulklänge [Gud-2010] bezeichnet. Der Beginn

eines Zyklus stellt entweder das Beschleunigen des Fördermittels ohne Beladung oder das Eintreffen der ersten Fördereinheit des Zyklus dar. Durch das Verzögern des Fördermittels bis auf die Fördergeschwindigkeit null oder die Ankunft der ersten Fördereinheit des nächsten Zyklus endet dieser Zyklus.

Der Verlauf der elektrischen Leistung innerhalb eines beispielhaften Zyklus für einen Kettenförderer ist Abbildung 3-9 zu entnehmen. In diesem Diagramm sind auf der Sekundärachse zusätzlich die Anzahl der sich auf dem Förderer befindenden Fördereinheiten, die alle die gleiche Masse besitzen, dargestellt. Im betrachteten Fall werden zwei Fördereinheiten in einem Zyklus gefördert. Der Energiebedarf des Zyklus ergibt sich aus dem Integral der elektrischen Leistung über die Zeit und stellt somit die Fläche unterhalb der blauen Linie dar.

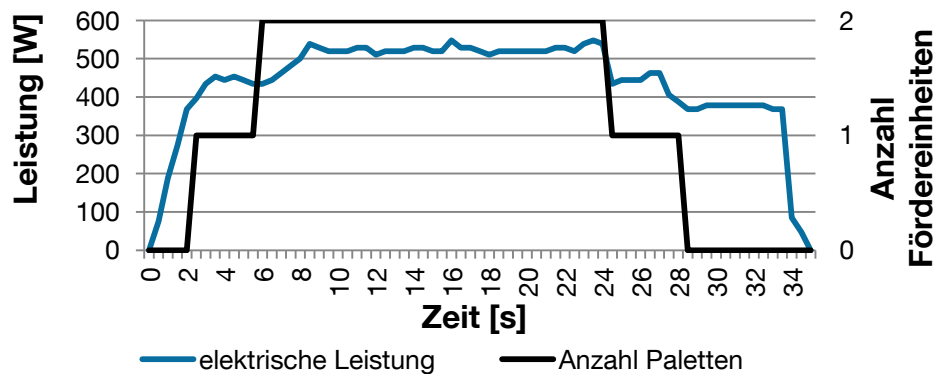


Abbildung 3-9: Zeitlicher Verlauf eines Zyklus

Das Diagramm zeigt, dass die elektrische Leistung über der Zeit nicht konstant ist. Unter der Berücksichtigung der Anzahl an Fördereinheiten, die sich zu den jeweiligen Zeitpunkten auf dem betrachteten Förderer befinden, lassen sich folgende Beobachtungen formulieren:

- Der Unterschied zwischen Leerlaufleistung und der elektrischen Leistung zu Zeitpunkten mit mehreren Fördereinheiten auf dem Kettenförderer ist gering.
- Innerhalb der Intervalle, in denen die Anzahl an Fördereinheiten konstant bleibt, schwankt die elektrische Leistung wenig.

Durch eine reine Betrachtung der Laufzeit zur Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs würden die unterschiedlichen Zustände hinsichtlich der Anzahl an Fördereinheiten und folglich die unterschiedlichen elektrischen Leistungen unberücksichtigt bleiben. Demzufolge erscheint es zielführend, den jährlichen Energiebedarf zyklus-

abhängig zu modellieren. Um den Energiebedarf eines Zyklus bestimmen zu können, erfolgt die Diskretisierung des Leistungsverlaufs in Abhängigkeit von der Anzahl an Fördereinheiten, die sich auf dem Förderer befinden (vgl. Abbildung 3-10).

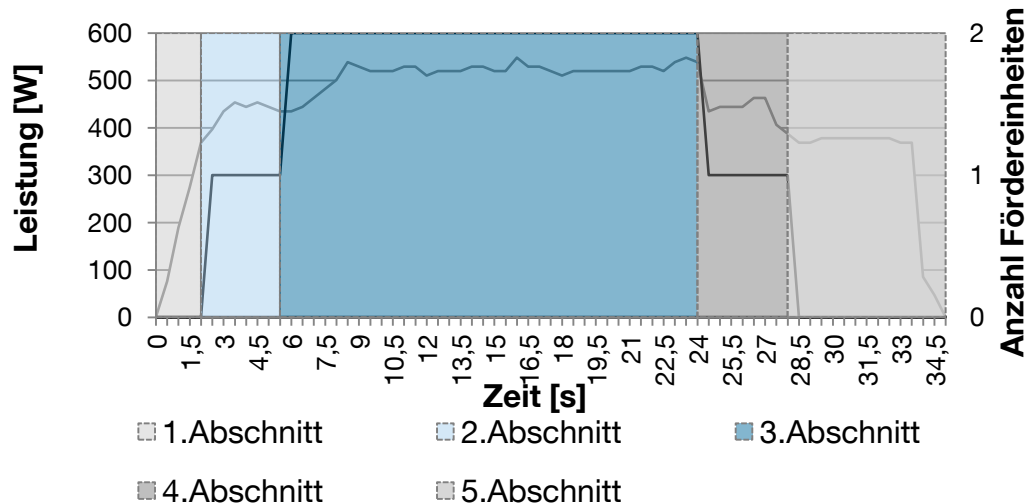


Abbildung 3-10: Abschnitte eines Zyklus

Somit ergibt sich der Energiebedarf E_i für einen Zyklus i durch:

$$E_i = \sum_{j=1}^k t_j \cdot P_j \quad (3-2)$$

mit t_j für die Dauer eines Zyklusabschnitts, k für die Anzahl der Zyklusabschnitte sowie P_j für die mittlere Leistung innerhalb des Zyklusabschnitts j .

Demnach erscheint es zweckmäßig, die Modellierung der elektrischen Leistung sowie die Modellierung der Zyklusanzahl und Zyklusausprägung getrennt voneinander durchzuführen. Der jährliche Energiebedarf E_{Jahr} ergibt sich dann aus dem Energiebedarf von m verschiedenen Zyklusausprägungen E_i und deren Häufigkeit n_i :

$$E_{Jahr} = \sum_{i=1}^m n_i \cdot E_i \quad (3-3)$$

Die Modellierung der Zyklusanzahl und -ausprägungen kann sowohl für Ketten- als auch für Rollenförderer gleichermaßen erfolgen. Aufgrund des unterschiedlichen mechanischen Aufbaus der Fördermittel müssen jedoch bei der Modellierung der elektrischen Leistung unterschiedliche Gleichungen berücksichtigt werden.

3.6.2 Modellierung der elektrischen Leistung

Für die Modellierung der elektrischen Leistung müssen zuerst die Komponenten sowie deren Einfluss auf den Energiebedarf bestimmt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, erfolgt die Systemanalyse der Stetigförderer. Die Eingangsgrößen in das System stellen Steuerungssignale sowie die elektrische Energie vom Versorgungsnetz dar. Die elektrische Energie gelangt über einen Umrichter oder Motorstarter zu einem Motor. Letzterer transformiert die elektrische Leistung in mechanische Leistung, welche mittels Getriebestufen und anderer Übertragungselemente auf die Trag-/ und Zugmittel übertragen wird. Die einzelnen identifizierten Elemente veranschaulicht Abbildung 3-11.

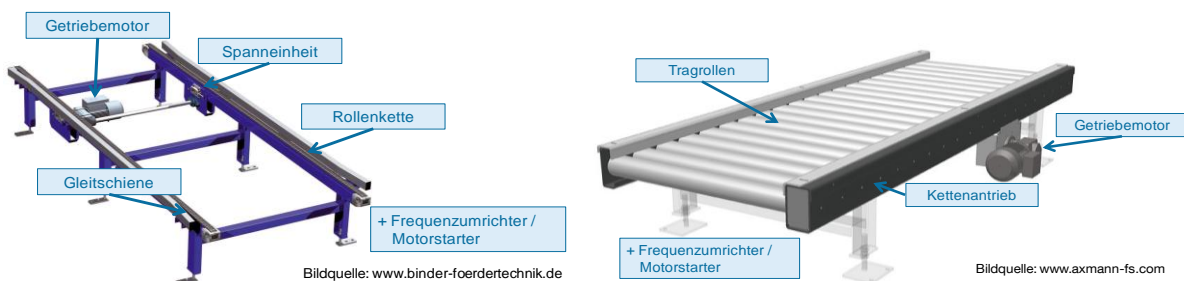


Abbildung 3-11: Komponenten von Tragkettenförderer (links) sowie Rollenförderer (rechts)

Bei Tragkettenförderern dienen zwei oder mehrere Rollenketten, deren Kettenrollen auf einer Gleitschiene aufliegen oder deren Kettenlaschen sich auf der Schiene abstützen, als Tragmittel [Rex-2013]. Somit können sowohl Roll- als auch Reibwiderstände vorliegen. Die Gleitschiene kann entweder aus Stahl oder aus Kunststoff ausgeführt werden [VDI 4440-2]. Weitere Komponenten des Tragkettenförderers stellen der Getriebemotor sowie die Spanneinheit dar. Ein Getriebemotor stellt eine zusammenhängende Kombination aus Getriebe und Motor dar [Fis-1983]. Die Ansteuerung des Antriebes erfolgt mittels Frequenzumrichter oder Motorstarter. Wird der Tragkettenförderer in einer getakteten Betriebsweise eingesetzt, so werden häufiger durch Frequenzumrichter angesteuerte Antriebe eingesetzt als bei dem reinen Dauerbetrieb [Kie-2007]. Die Spanneinheit gleicht die unter anderem durch Verschleiß verursachte Längenzunahme der Kette aus [Ber-1989].

Rollenförderer, auch als angetriebene Rollenbahnen bezeichnet, fördern das Fördergut mittels Reibkraft auf Tragrollen, die durch Gurte, Riemen oder Ketten angetrieben werden [VDI 4440-3]. Im untersuchten Fall für den GLT-Transport werden meist aufgrund der hohen Fördergewichte Kettenantriebe eingesetzt [VDI 4440-3]. Der Antrieb erfolgt in der Regel mit Getriebemotoren [VDI 4440-3]. Für die Ansteuerung

werden wie beim Tragkettenförderer Frequenzumrichter oder Motorstarter eingesetzt.

Jedes der aufgeführten Elemente weist Verluste auf, wodurch die elektrische Leistung am Systemeingang beeinflusst wird. Aufgrund von Reibung gibt es bei Stetigfördermitteln folgende typische Verlustquellen [Kie-2007]:

- Reibung auf der Unterlage,
- Rollreibung,
- Verformungsarbeit bzw. Walkarbeit bei Bandförderern,
- Gleitreibung beim Fahren des Förderguts gegen einen Anschlag sowie
- Verluste bei der Kraftübertragung.

Diese Verluste können teilweise durch Wirkungsgrade berücksichtigt werden. Um diese zu bestimmen, erfolgt analog zum Vorgehen bei der Motordimensionierung die Ermittlung der mechanischen Leistung an der Motorwelle (vgl. [SEW-2001, Tor-1997]). Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade von Motor und Umrichter kann die elektrische Leistung des Fördermittels bestimmt werden:

$$P_{elektrisch} = P_{mechanisch} / (\eta_{FU} \cdot \eta_{Motor}) \quad (3-4)$$

mit $P_{mechanisch}$ für die mechanische Leistung an der Motorwelle und η_{FU} und η_{Motor} als Wirkungsgrade für den Frequenzumrichter und Motor.

Zusammenfassend stellen Motoren, Getriebe sowie Frequenzumrichter bzw. Motorstarter die Komponenten dar, die sowohl in Tragketten- als auch Rollenförderern vorhanden sind. Diese Komponenten werden nachfolgend auch gemeinsam beschrieben und die Möglichkeiten zur Bestimmung der Wirkungsgrade aufgezeigt. Eine Beschreibung der fördermittelspezifischen Komponenten, wie z. B. die Gleitschiene für Tragkettenförderer, findet separat statt.

Frequenzumrichter und Motorstarter

Frequenzumrichter ermöglichen die Drehzahlanpassung und somit den Betrieb des Fördermittels mit einer variablen Geschwindigkeit. Ein weiterer bedeutender Vorteil stellt die Möglichkeit des kontrollierten Beschleunigens bzw. Verzögerns dar, was insbesondere für instabile Fördereinheiten von Bedeutung ist. Die Installation der

Frequenzumrichter kann entweder zentral im Schaltschrank oder dezentral am Antrieb erfolgen [Kie-2007].

Der Wirkungsgrad aktueller Frequenzumrichter liegt über 96 Prozent [Wol-2013]. Messungen an einer für Fördertechnik typischen Antriebskonfiguration zeigen, dass der betrachtete Frequenzumrichter einen Eigenverbrauch von 15 Watt besitzt und für den Betrieb im Nennpunkt 50 Watt aufnimmt [Tie-2013].

Die Verluste in einem Frequenzumrichter werden lastunabhängig als konstant angenommen. Da die Absolutverluste in einem Frequenzumrichter im Vergleich zu anderen Komponenten vergleichbar gering sind, erweist sich dieser Ansatz als ausreichend genau.

Alternativ können die Motoren auch direkt am Netz oder durch einen Motorstarter (Sanftanlaufgerät) betrieben werden, wobei keine Variation der Fördergeschwindigkeit möglich ist [Kie-2007]. Diese Komponenten werden verlustlos modelliert.

Motor

Drehstrom-Asynchronmotoren stellen die am meisten eingesetzten Antriebe für Stückgutförderer dar [VDI 4421]. Gründe dafür liegen im einfachen, robusten und wartungsarmen Aufbau sowie im günstigen Preis. Die Wirkungsgrade von Drehstrom-Asynchronmotoren sind nach Abbildung 3-12 sowohl von der Motornennleistung als auch von dem Lastgrad abhängig. Der Lastgrad ist hier definiert als Leistung an der Motorwelle bezogen auf die Motornennleistung.

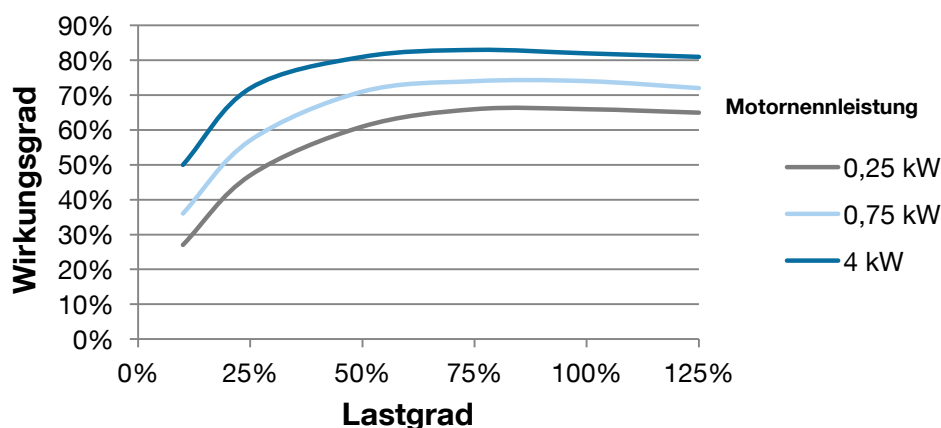


Abbildung 3-12: Wirkungsgrade verschiedener Drehstrom-Asynchronmotoren [Rud-2008]

Insbesondere bei kleinen Motornennleistungen, die eine typische Motorgröße in der Stetigfördertechnik darstellen, ist eine starke Abhängigkeit zwischen Wirkungsgrad

und Lastgrad zu erkennen. Da Stetigförderer häufig im Teillastbetrieb arbeiten ist eine Abbildung der aufgezeigten Abhängigkeiten unumgänglich, um die elektrische Leistung zu modellieren. Dafür muss zuerst die an der Motorwelle anliegende mechanische Leistung bestimmt und daraus der Lastgrad ermittelt werden. Durch die Interpolation innerhalb der Wirkungsgrad-Kennlinien kann der tatsächliche Wirkungsgrad approximiert werden. Da die funktionalen Zusammenhänge für alle eingesetzten Asynchronmotoren ähnlich sind, ist eine Betrachtung von standardisierten Kennlinien ausreichend [Hel-1998].

Aktuelle Entwicklungen stellen der Einsatz von Synchronmotoren, die Verwendung von 24-Volt-Technik sowie neue effizientere Asynchronmotoren dar, die aufgrund einer EU-Vorgabe [Eur-2009a] eingesetzt werden müssen. Seit dem 16. Juni 2011 müssen für den Dauerbetrieb ausgelegte Drehstrommotoren (mit einer Nennleistung zwischen 0,75 kW und 375 kW) mindestens das definierte Effizienzniveau IE2 erreichen [Eur-2009a]. Die Anforderungen werden stufenweise verschärft, sodass ab dem 1. Januar 2017 alle Motoren mindestens das definierte Effizienzniveau IE3 erreichen oder alternativ das definierte Effizienzniveau IE2 überschreiten und mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sind [Eur-2009a]. Die Unterschiede des einzelnen Effizienzniveaus für die Motoren mit einer geringen Motornennleistung zeigt Abbildung 3-13. Somit handelt es sich bei den in Abbildung 3-12 dargestellten Motoren um Motoren der Klasse IE1.

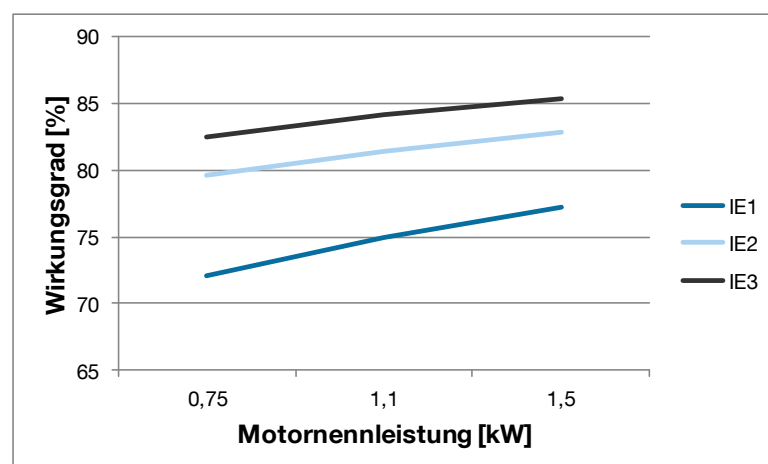


Abbildung 3-13: Wirkungsgrade der Effizienzniveaus für 4-polige Motoren [Top-2013]

Synchronmotoren, vor allem permanentmagneterregte besitzen höhere Wirkungsgrade (insbesondere im Schwachlastbereich) [ABM-2013] gegenüber Asynchronmotoren [Kie-2007, o. V.-2011]. Der Einsatz von Synchronmotoren erfordert jedoch immer einen Umrichter je Antrieb [Kie-2007].

Insbesondere für Rollenförderer gibt es seit einigen Jahren den Trend zum Einsatz der 24 V-Technologie anstelle von der herkömmlichen 400 V-Technologie [Hom-2007]. Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz vor allem im Aussetzbetrieb sinnvoll ist [Bra-2013]. Der Einsatz der aktuellen 24 V-Technologie ist jedoch nur für Fördergewichte kleiner 50 kg möglich [Bra-2013].

Getriebe

Die mechanische Leistung des Motors wird über ein Getriebe und verschiedene Übertragungselemente auf das Zug-/ Tragmittel transformiert. Abbildung 3-14 zeigt schematisch die verschiedenen mechanischen Elemente eines Tragkettenförderers. Dazu zählen unter anderem Getriebe, die Kettenübersetzung sowie die Tragkette.

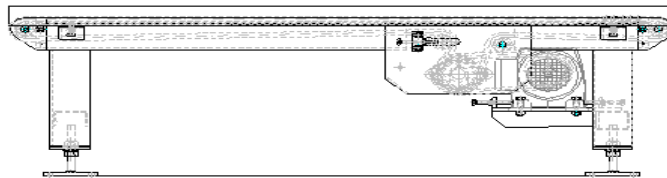


Abbildung 3-14: Schematische Darstellung eines Kettenförderers (Bildquelle: <http://www.tls-web.de>)

Getriebearten, die in der Stückgutfördertechnik hauptsächlich eingesetzt werden, sind nach [VDI 4421]:

- Stirnradgetriebe,
- Kegelaradgetriebe,
- Flachgetriebe,
- Schneckengetriebe,
- Planetengetriebe.

Diese Getriebearten besitzen Wirkungsgrade von 50 Prozent (Schneckengetriebe mit einer hohen Übersetzung) bis zu 99 Prozent (Planetengetriebe) je Getriebestufe [Nie-1983]. Die Wirkungsgrade sind im betrachteten Bereich größtenteils lastunabhängig und können somit als konstant abgebildet werden.

Gleitschiene und Rollenkette

Wie bereits erwähnt dienen bei einem Tragkettenförderer Rollenketten als Zug- und Tragmittel. Eine Rollenkette, bei der Kettenrollen auf einer Gleitschiene aufliegen,

zeigt Abbildung 3-15. Jedoch ist zu beachten, dass aufgrund einer schlechter werdenden Schmierung die am Beginn vorhandene Rollreibung immer mehr in Gleitreibung übergeht [Fri-2006]. Überwiegend werden Ketten nach DIN ISO 606 [ISO 606] mit geraden Laschen eingesetzt [Axm-2003].

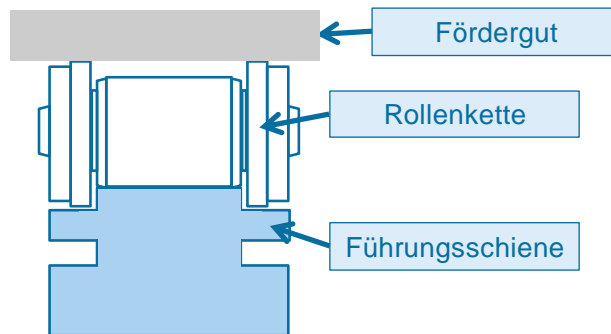


Abbildung 3-15: Rollenkette auf einer Kunststoffschiene (in Anlehnung an [Sum-1999])

Die resultierende Reibkraft F_{ges} unter der Berücksichtigung des gesamten auf dem Fördermittel befindenden Förderergewicht $m_{Förderergewicht}$ sowie des spezifischen Kettengewichts $m_{spezif.Kettengewicht}$ kann in Anlehnung an [Hom-2007] mittels folgender Formel berechnet werden:

$$F_{ges} = (m_{Förderergewicht} + m_{spezif.Kettengewicht} \cdot 2l) \cdot g \cdot \mu \quad (3-5)$$

mit g für die Erdbeschleunigung, μ für den Reibbeiwert und l für die Länge der untersuchten Förderstrecke.

Relevante Reib- bzw. Rollbeiwerte für Tragketten zeigt Tabelle 3-6.

Tabelle 3-6: Reib-/Rollbeiwert für Tragketten [Rex-2013]

Schmierung	Kunststoffschiene	Stahlschiene
gut	0,09	0,10
mäßig	0,10	0,12
gering	0,12	0,14
sehr gering	0,16	0,18

Die am Beginn vorherrschende Rollreibung geht in eine Gleitreibung über, wobei der Gleitanteil auf ca. 15 bis 30 Prozent beschränkt ist [Rex-2013]. Die sich aus dieser Annahme ergebenden Reibwerte variieren in Abhängigkeit der Materialbeschaffenheit

der Schiene sowie der Schmierung. In den meisten Fällen erfolgt der Einsatz von Führungsschienen aus thermoplastischen Werkstoffen [Sum-1999].

Zusätzlich entstehen aufgrund der Vorspannung der Kette hohe Verlustleistungen [Bun-1992], die bei der Ermittlung der benötigten mechanischen Leistung berücksichtigt werden müssen. Diese Verluste zeigen sich auch bei der Durchführung von Messungen, bei denen der Tragkettenförderer ohne Fördereinheiten betrieben wird. Mit diesen Messungen kann die benötigte Leerlaufleistung P_0 bestimmt werden. Die mechanische Leistung $P_{mechanisch}$, die an der Motorwelle anliegt, kann unter der Berücksichtigung von P_0 sowie der Formel (3-5), jedoch ohne den Term für die spezifische Masse der Kette, bestimmt werden:

$$P_{mechanisch} = P_0 + F \cdot v / \eta \quad (3-6)$$

mit v für die Fördergeschwindigkeit, F für die vom Kettengewicht unabhängige Reibkraft (vgl. Formel (3-7)) und η für den Wirkungsgrad aus Getriebe, Übertragungselementen sowie Trag- und Zugmittel.

$$F = m_{Fördergewicht} \cdot g \cdot \mu \quad (3-7)$$

Rollenförderer-spezifische Komponenten

Für die GLT-Förderung werden die Tragrollen mit einem Kettenantrieb angetrieben [Kuh-1988]. Der Reibungswiderstand von Rollenförderern setzt sich aus einem reinen Rollwiderstand sowie einem Lagerreibungswiderstand zusammen [Hof-2004]. Zusätzlich besteht ein geringer Reibbeiwert zwischen Tragrollen und der Fördereinheit [Egg-2011]. Darüber hinaus müssen die Wirkungsgrade der Kettentriebe berücksichtigt werden.

Die resultierende Reibkraft F für Rollenförderer unter der Berücksichtigung des gesamten auf dem Fördermittel befindenden Fördergewichts $m_{Fördergewicht}$ kann mittels folgender Formel berechnet werden:

$$F = m_{Fördergewicht} \cdot g \cdot [2 / D_a \cdot (\mu_L \cdot 0,5 \cdot d + f)] \quad (3-8)$$

mit D_a für den Außendurchmesser der Rollen, d Lagerzapfendurchmesser der Rollen, f Hebelarm der Rollreibung sowie μ_L Lagerreibwert [SEW-2001].

Die Ermittlung der an der Motorwelle anliegenden Leistung erfolgt analog zum Tragkettenförderer (vgl. Formel (3-6)). Bei der Ermittlung des Wirkungsgrades ist zudem die Anzahl an Kettenumschlingungen zu berücksichtigen [Len-2013].

3.6.3 Modellierung der Laufzeit

Nachdem im vorherigen Abschnitt Modelle für die Bestimmung der elektrischen Leistung aufgezeigt werden konnten, werden im Folgenden Möglichkeiten zur Bestimmung der Zyklushäufigkeit und der Zeitanteile der einzelnen Zyklusabschnitte dargestellt.

Ermittlung der Zyklushäufigkeit

Die Zyklushäufigkeit wird durch die Betriebsweise des Fördermittels, die Blockgröße sowie durch das Abrisskriterium bestimmt. Bei der Betriebsweise kann unterschieden werden, ob der Förderer kontinuierlich oder intermittierend betrieben wird. Kontinuierlich bedeutet, dass der Förderer unabhängig vom Beladungszustand durchgängig betrieben wird. Bei einer intermittierenden Betriebsweise wechselt das Fördermittel nach jedem Förderzyklus in den Standby-Betrieb. Erfolgt auf einem Fördermittel eine sogenannte Blockbildung (mehrere Fördereinheiten werden zu einem Block zusammengefasst und durchqueren die Förderstrecke hintereinander), wird aus steuerungstechnischen Gründen ein sogenanntes Abrisskriterium implementiert. Das Abrisskriterium stellt eine Zeitdauer dar, die beginnt, sobald eine Fördereinheit das Fördermittel erreicht hat. Wird das Abrisskriterium überschritten, so werden die sich aktuell auf dem Fördermittel befindlichen Fördereinheiten als ein Block weitergeleitet, der nicht die maximale Größe besitzt. Das beschriebene Verhalten beeinflusst die Häufigkeiten der einzelnen Zyklen und muss aus diesem Grund bei der Modellierung des jährlichen Energiebedarfs berücksichtigt werden.

Der zeitliche Abstand zwischen zwei Fördereinheiten wird durch die Quelle, die den Systemeingang darstellt, vorgegeben. Quellen können mittels Verteilungen der Zwischenankunftszeiten beschrieben werden. Die wichtigste Verteilung in diesem Zusammenhang stellt die um den Mindestabstand verschobene Exponentialverteilung dar [Arn-2009, Mei-2006]. Ein Beispiel zu einer Ankunftsverteilung inkl. eingezeichnetem Abrisskriterium von 20 s zeigt Abbildung 3-16.

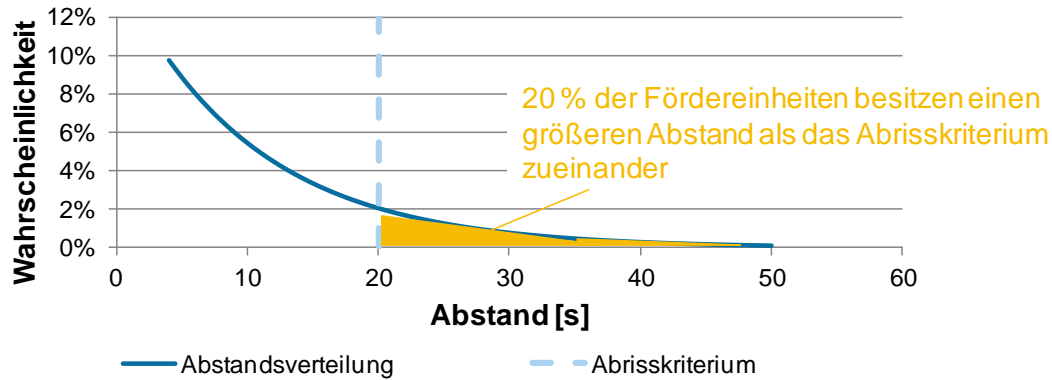


Abbildung 3-16: Exponential verteilte Abstände einer Quelle

Im aufgezeigten Fall besitzen 20 Prozent der Fördereinheiten einen größeren Abstand zueinander als das Abrisskriterium. Mittels dieser Angabe kann stochastisch die Häufigkeit für die Blockgrößen kleiner und gleich der maximalen Blockgröße ermittelt werden.

Die Häufigkeit n_i für Zyklen mit einer Blockgröße i kleiner der maximalen Blockgröße N berechnet sich mit dem Anteil der Fördereinheiten q , die einen größeren Abstand als das Abrisskriterium besitzen, durch:

$$n_i = M \cdot q \cdot (1 - q)^{i-1} / i \quad (3-9)$$

mit M für die Anzahl Fördereinheiten im Jahr.

Die Häufigkeit n_N für Zyklen mit der maximalen Blockgröße N ergibt sich aus folgender Formel:

$$n_N = M \cdot (1 - q)^{N-1} / N \quad (3-10)$$

Für den beschriebenen Fall mit $M = 10.000$ [FE/Jahr], $q = 20$ Prozent und einer maximalen Blockgröße $N = 4$ werden 2.000 Zyklen mit einer einzelnen Fördereinheit, 800 Zyklen mit 2er-Blocks, 427 Zyklen mit 3er-Blocks und 1.280 Zyklen mit der maximalen Blockgröße durchgeführt.

Laufzeiten je Zyklus

Wie bereits in Abbildung 3-10 gezeigt, kann die Fördermittellaufzeit für einen Zyklus durch die Summierung der einzelnen Zeitanteile der Abschnitte bestimmt werden. Für die Ermittlung der einzelnen Zeitabschnitte des Zyklus erfolgt die Abstrahierung der Fördereinheiten zu Punktmassen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Punktmasse im Flächenmittelpunkt der Fördereinheit befindet.

Die Abschnitte eines Zyklus unterscheiden sich hinsichtlich der Anzahl an Fördereinheiten, die sich auf dem betrachteten Förderer befinden, was im Folgenden als Zustand bezeichnet wird. In Abhängigkeit von der Blockgröße können Abschnitte zusammengefasst werden, weil sich die Zustände am Anfang und Ende eines Zyklus wiederholen. Lediglich der Zyklusabschnitt, in dem die Beladung des Förderers der maximalen Blockgröße entspricht, und die Leerlaufzeit sind einmal innerhalb eines Zyklus vorhanden.

Die Dauer eines Zyklusabschnitts t_j , bei dem sich j Fördereinheiten auf dem Element befinden und j nicht der maximalen Anzahl J an Fördereinheiten des Zyklus entspricht, ergibt sich durch folgende Formel:

$$t_j = 2 \cdot (l_F + l_A) / v \quad (3-11)$$

mit l_F für die Länge der Fördereinheit, l_A für den minimalen Abstand zwischen zwei Fördereinheiten und v für die Fördergeschwindigkeit.

Die Dauer t_J , in der sich die maximale Anzahl J an Fördereinheiten des Zyklus auf dem Förderer befindet, berechnet sich für Blockgrößen größer eins durch folgende Formel:

$$t_J = [l - (J - 1) \cdot l_F - (J - 1) \cdot l_A] / v \quad (3-12)$$

mit l für die Länge des Förderers.

3.6.4 Zusammenführung der Modelle

In den letzten beiden Abschnitten konnten Modelle aufgestellt werden, die zum einen die elektrische Leistung von Stetigförderern modellieren und zum anderen die Laufzeit abbilden. Die Kombination und die Reihenfolge der einzelnen Modelle mit dem Ziel, den jährlichen Energiebedarf zu ermitteln, zeigt Abbildung 3-17.

Die Eingangsgrößen in das Modell sind:

- die maximale Blockgröße,
- der Anteil der Fördereinheiten mit einem Abstand größer dem Abrisskriterium,
- die Anzahl Fördereinheiten pro Jahr,

3 Modellierung des Energiebedarfs

- sowie die mittlere Masse der Fördereinheiten.

Die Anzahl der Fördereinheiten, die sich auf dem Förderer befinden, ergibt sich durch die Diskretisierung des Zyklus (vgl. Abbildung 3-10). Teilergebnisse stellen der Energiebedarf für verschiedene Blockgrößen sowie die Häufigkeiten der einzelnen Blockgrößen dar, woraus sich der jährliche Energiebedarf berechnet.

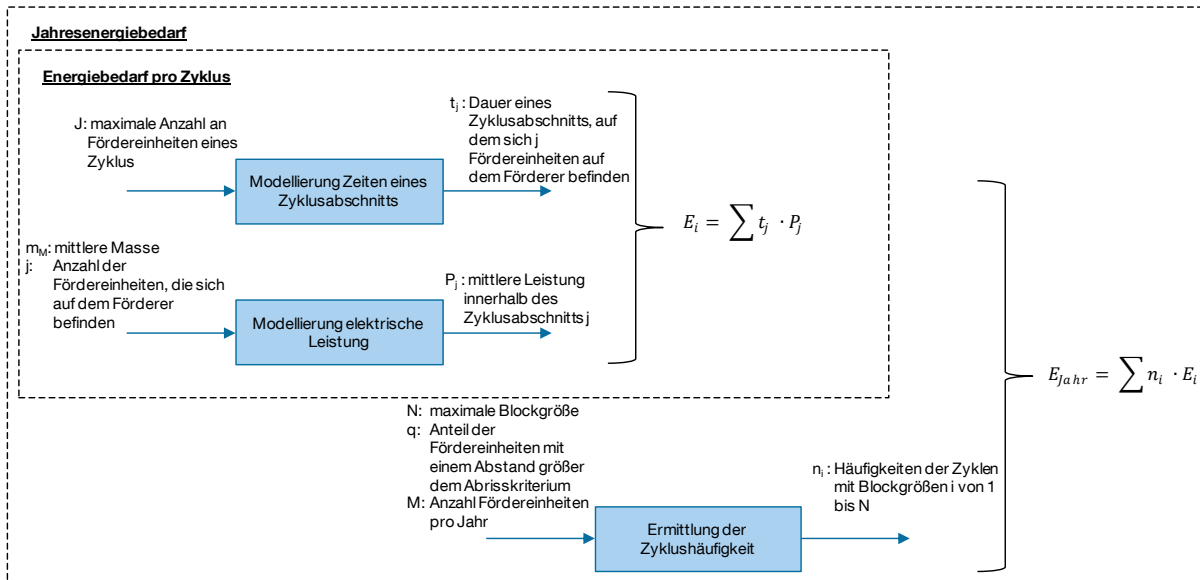


Abbildung 3-17: Ablauf bei der Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs

Mithilfe des vorgestellten Ansatzes ist es möglich, den jährlichen Energiebedarf unter Berücksichtigung der Blockgröße sowie eines Abrisskriteriums zu bestimmen. Vereinfachungen werden hinsichtlich der detaillierten Abbildung der elektrischen Leistung getroffen. Auch bleibt unberücksichtigt, wie sich die Zyklushäufigkeit innerhalb einer Stetigförderanlage, beispielsweise durch Verteil- oder Zusammenführungselemente, verändert.

3.6.5 Validierung

Die Validierung des aufgestellten Modells erfolgt anhand der durchgeführten Messungen, wobei die Validierung der modellierten elektrischen Leistung im Vordergrund steht.

Im vorgestellten Modell besteht der in Abbildung 3-9 gezeigte Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung und dem ermittelten Energiebedarf eines Zyklus. Der Nachweis, dass das Modell die geforderten +/- 20 Prozent Genauigkeit (vgl. Ab-

schnitt 3.1) besitzt, wird durch den Vergleich der gemessenen elektrischen Leistung zur berechneten Leistung erfolgen.

Tragkettenförderer

Für die Validierung des Modells der Energiebedarfsermittlung von Tragkettenförderern werden Messungen an Geräten verschiedener Hersteller durchgeführt. Es erfolgt auch die Bestimmung der Komponenten, wodurch eine Ermittlung der benötigten Eingangsdaten für das Modell möglich ist. Der Modelleingangsparameter, der den größten Wertebereich besitzt, stellt die Fördermasse dar. Abbildung 3-18 zeigt die Validierung für einen Tragkettenförderer der Länge 2,9 m. Es zeigt sich, dass über den gesamten möglichen Bereichen der Fördermassen die Abweichungen deutlich unterhalb der 20-Prozent-Grenze liegen.

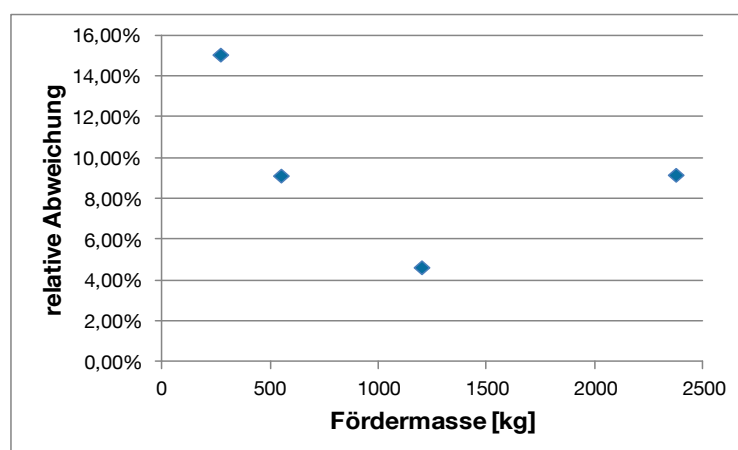


Abbildung 3-18: Relative Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten der elektrischen Leistung bei einem Tragkettenförderer

Rollenförderer

Bei der Validierung des Modells für den Rollenförderer wird analog zum Tragkettenförderer vorgegangen. Abbildung 3-19 zeigt die Ergebnisse für einen Rollenförderer der Länge 2,9 m. Im Projekt konnte nur die Leistungsaufnahme für Fördergewichte im Bereich 270 kg sowie im Bereich 1200 kg gemessen werden. Insgesamt ist die Abweichung in einem für den Anwendungsfall akzeptablen Bereich unter 20 Prozent.

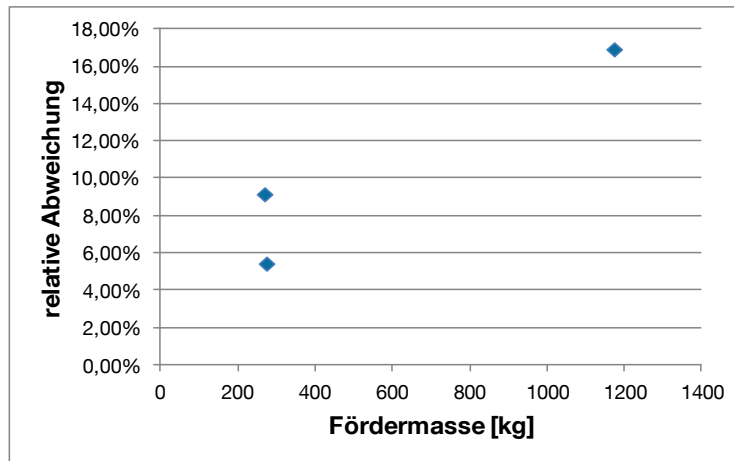


Abbildung 3-19: Relative Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten der elektrischen Leistung bei einem Rollenförderer

3.7 Energiebedarf von Regalbediengeräten

Nachdem im vorherigen Abschnitt ein Modell zur Energiebedarfsermittlung von Steigt Förderanlagen vorgestellt wurde, soll nachfolgend eine Möglichkeit zur Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs von Regalbediengeräten (RBG) entstehen. Dafür wird in einem ersten Schritt das RBG hinsichtlich der Komponenten und des Aufbaus unter energetischen Gesichtspunkten analysiert.

Die vorgestellten Modelle zur Ermittlung des mittleren Energiebedarfs pro Einzelspiel bzw. pro Doppelspiel werden von *Günthner* und *Ertl* entwickelt und veröffentlicht [Gün-2013b, Gün-2013c, Hab-2013]. Diese Modelle werden im Abschnitt 3.7.3 in ein Modell zur Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs von Regalbediengeräten integriert.

3.7.1 Analyse von Regalbediengeräten

Regalbediengeräte stellen gleisgebundene Flurförderzeuge dar und werden in automatischen Hochregallagern bzw. Kleinteilelagern eingesetzt. Den Aufbau sowie die wesentlichen Komponenten sind in Abbildung 3-20 dargestellt.

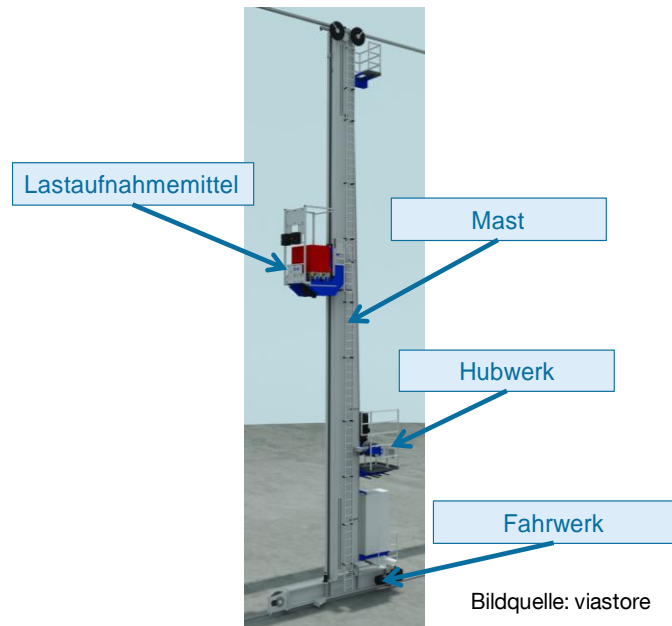


Abbildung 3-20: Komponenten eines Regalbediengeräts

Der Mast eines Regalbediengeräts wird mittels des Fahrwerks in der Horizontalen bewegt. An ihm befestigt ist das Hubwerk sowie das Lastaufnahmemittel (LAM). Die vertikale Fortbewegung des LAM geschieht durch das Hubwerk. Das Lastaufnahmemittel dient zur Ein- und Auslagerung von Lagereinheiten aus den Regalfächern.

Die Komponenten, die elektrische Energie aufnehmen, stellen das LAM sowie das Hub- und Fahrwerk dar. Für Letztgenanntes bestehen verschiedene elektrische Antriebskonfigurationen (vgl. Abbildung 3-21), die den Energiebedarf deutlich beeinflussen [Gün-2011c]. Für die Antriebe werden Drehstrommotoren mit Frequenzumrichtern oder Servomotoren mit Servoverstärkern eingesetzt [Gün-2011b].

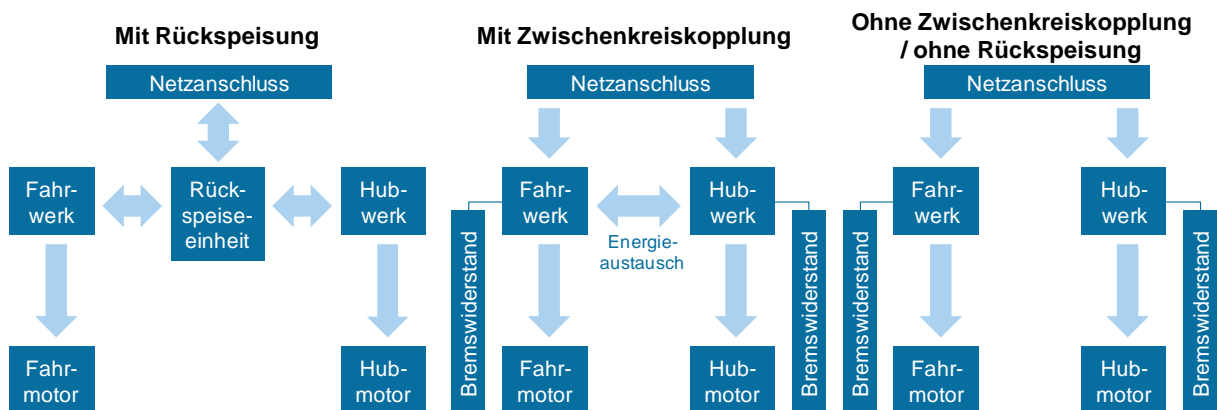


Abbildung 3-21: Antriebskonfiguration von Fahr- und Hubwerk (in Anlehnung an [Gün-2011b])

Neben der Antriebskonfiguration wird der Energiebedarf auch durch die eingesetzten Betriebsstrategien sowie die Lagerkonfiguration beeinflusst. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in Abschnitt 4.2.

Die Antriebskonfiguration „ohne Zwischenkreiskopplung“ besitzt aus technischer Sicht einen einfachen Aufbau. Hierbei sind sowohl das Hubwerk als auch das Fahrwerk separat an das Versorgungsnetz angeschlossen. Die durch Verzögerungen oder den Senkvorgang zurückgewonnene Energie wird mittels Bremswiderstände in Wärme umgewandelt. Bei einer Antriebskonfiguration mit Zwischenkreiskopplung besteht die Möglichkeit, dass die zurückgewonnene Energie im jeweils anderen Antrieb eingesetzt werden kann, wodurch weniger Energie in den Bremswiderständen umgewandelt werden muss. Die Antriebskonfiguration „mit Rückspeisung“ bietet ebenso wie die Antriebskonfiguration „mit Zwischenkreiskopplung“ die Möglichkeit, Energie zwischen den Antrieben auszutauschen. Zusätzlich kann Energie in das Versorgungsnetz zurückgespeist werden.

In den nächsten Abschnitten erfolgt die Bestimmung des Energiebedarfs für die Antriebskonfigurationen „Mit Rückspeisung“ sowie „Ohne Zwischenkreiskopplung“.

3.7.2 Energiebedarf je Verfahrenspiel

Günthner und *Ertl* entwickelten an der durchführenden Forschungsstelle ein Modell zur analytischen Berechnung des mittleren Energiebedarfs je Einzel- bzw. Doppelspiel, welches langwierige Simulationen ersetzen kann [Gün-2013b, Gün-2013c, Hab-2013]. Nachfolgend wird dieses Modell vorgestellt.

Die Modellierung basiert auf der Ermittlung der Energie für ein Spiel, welches beliebige Fächer enthält. Dafür wird zum einen die Regalwand unterteilt und zum anderen werden die Energieterme bestimmt. Die Energieterme bilden die Reibungsarbeit und rückspeisefähige Energie sowohl vom Fahr- als auch vom Hubwerk, sowie die kinetische Energie des Fahrwerks und die potenzielle Energie des Hubwerks ab. Der letzte Term bestimmt den Energiebedarf der Grundlast. Bei der Grundlast handelt es sich um die Leistung des RBG, die benötigt wird, sobald es eingeschaltet ist. Die Unterteilung der Regalwand ist erforderlich, da innerhalb der einzelnen Bereiche unterschiedliche Formeln zur Energieberechnung eingesetzt werden. Hierbei stellt eine Grenze der sogenannte Wandparameter b dar. Dieser bildet das Verhältnis zwischen den maximalen Hub- und Fahrgeschwindigkeiten zu den Abmessungen der

Regalwand ab [Lip-2003]. Im betrachteten Fall wird für die energetische Betrachtung die mittleren Hub- bzw. Fahrgeschwindigkeiten verwendet:

$$b = \frac{v_{xm}}{v_{ym}} \cdot \frac{H}{L} \quad (3-13)$$

mit v_{xm} für die mittlere Fahrgeschwindigkeit, v_{ym} für die mittlere Hubgeschwindigkeit, H entspricht dem maximalen Hubweg und L dem maximalen Fahrweg.

Die zweite Grenze zur Unterteilung der Regalwand stellt die senkrechte Gerade bei x_0 dar. Die Fahrstrecke, die zur Beschleunigung auf die maximale Fahrgeschwindigkeit und zum anschließenden Abbremsen erforderlich ist, ergibt x_0 :

$$x_0 = \frac{v_x^2}{a_x} \quad (3-14)$$

mit v_x für die maximale Fahrgeschwindigkeit a_x für die Fahrbeschleunigung bzw. – verzögerung.

Durch die Überführung des Modells in ein Doppelintegral und der Auflösung für die einzelnen Bereiche (vgl. Abbildung 3-22) ergibt sich eine analytische Formel zur Berechnung der mittleren Energie eines Einzelspiels.

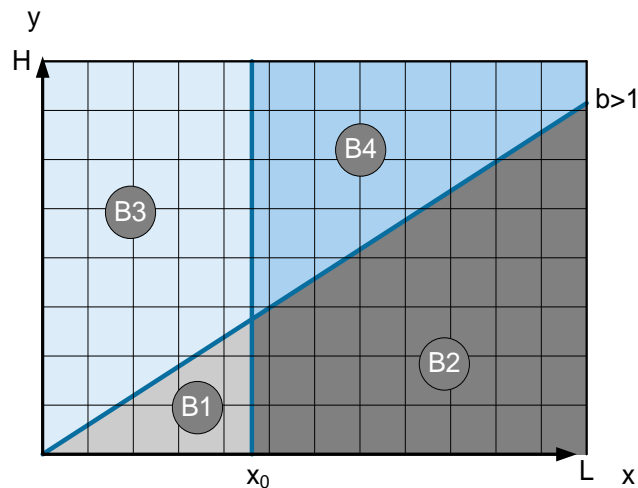


Abbildung 3-22: Einteilung der Regalwandfläche in vier Bereiche (für $b > 1$) [Hab-2013]

Es wird zwischen einem Regalwandparameter von $b > 1$ und $b < 1$ sowie einer Ein- oder Auslagerung unterschieden. Für einen Wandparameter $b > 1$ und einer Einlagerung ergibt sich der Energiebedarf E_{ESE} :

$$\begin{aligned}
 E_{ESE} = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{1}{\eta_y} \cdot (1 + w_y) \cdot m_H \cdot g \cdot H - \eta_R \cdot \eta_y \cdot (1 - w_y) \right. \\
 \cdot (m_H - m_N) \cdot g \cdot H + \frac{1}{\eta_x} \cdot (2 \cdot M_G - m_N) \\
 \cdot \left(v_x^2 \cdot \left(1 - \frac{x_0}{2 \cdot L} \right) + w_x \cdot g \cdot \left(L - x_0 + \frac{x_0^2}{2 \cdot L} \right) \right) - \eta_R \\
 \cdot \eta_x \cdot (2 \cdot M_G - m_N) \cdot v_x^2 \cdot \left(1 - \frac{g}{a_x} \cdot w_x \right) \\
 \left. \cdot \left(1 - \frac{x_0}{2 \cdot L} \right) \right] + 2 \cdot (P_G + P_{LAM}) \cdot t_{EA} + P_G \cdot \frac{L}{v_{xm}} \\
 \cdot \left(b + \frac{1}{3 \cdot b} \right)
 \end{aligned} \tag{3-15}$$

die benötigten Parameter zeigt Tabelle 3-7.

Tabelle 3-7: Parameter zur Bestimmung des mittleren Energiebedarfs je Einzelspiel

Parameter	Bezeichnung	Parameter	Bezeichnung
η_y	Wirkungsgrad Hubwerk	m_H	Hubmasse
η_x	Wirkungsgrad Fahrwerk	m_N	Nutzlast
w_y	Widerstandsbeiwert des Hubwerks	M_G	Gesamtmasse
w_x	Widerstandsbeiwert des Fahrwerks	η_R	Wirkungsgrad der Energierückgewinnung
P_G	Grundlast	P_{LAM}	mittlere Leistung des Lastaufnahmemittels
t_{EA}	Zeit zum Ein-/Auslagern		

Durch die Leerfahrt bei einem Doppelspiel vom Einlagerungspunkt P1 zum Auslagerungspunkt P2 erhöht sich die Komplexität, da die Koordinaten beider Punkte variabel sind [Hab-2013]. Um das sich ergebene Vierfachintegral zu lösen wird die Regalwand in Bereiche für P1 und Gebiete für P2 unterteilt. Für die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten erfolgt dann eine Bestimmung des Energiebedarfs. Die daraus resultierende Formel für ein Regalwandparameter $b > 1$ lautet:

$$\begin{aligned}
 E_{DS} = & \frac{1}{\eta_y} \left((1 + w_y) - \eta_R \eta_y^2 (1 - w_y) \right) \left(\frac{2}{3} m_H - \frac{1}{6} m_N \right) gH \\
 & + \frac{w_x}{\eta_x} M_G gL \left(\frac{4}{3} + (1 - \eta_R \eta_x^2) \cdot \left(-\frac{3x_0}{2L} + \frac{x_0^2}{L^2} - \frac{x_0^3}{6L^3} \right) \right) \\
 & - \frac{1}{3} \frac{w_x}{\eta_x} m_N gL \\
 & \cdot \left(1 + (1 - \eta_R \eta_x^2) \cdot \left(-\frac{3x_0}{2L} + \frac{3x_0^2}{2L^2} - \frac{x_0^3}{2L^3} \right) \right) \\
 & + \left(\frac{1}{\eta_x} - \eta_R \eta_x \right) \\
 & \cdot v_x^2 \left(M_G \left(\frac{3}{2} - \frac{x_0}{L} + \frac{1}{6} \frac{x_0^2}{L^2} \right) - m_N \left(\frac{1}{2} - \frac{x_0}{2L} + \frac{x_0^2}{6L^2} \right) \right) \\
 & + P_G \frac{L}{v_{xm}} \left(b + \frac{1}{3b} \right) + \frac{1}{60} P_G \frac{L}{v_{xm}} \\
 & \cdot (-2b^{-2} - 30b^{-1} + 80b^0 - 35b^1 + 25b^2 \\
 & - 10b^3) + 4(P_G + P_{LAM})t_{EA}
 \end{aligned} \tag{3-16}$$

Eine exemplarische Überprüfung des Ansatzes anhand eines an Messungen evaluierten Simulationsmodells zeigt Abweichungen von unter einem Prozent [Gün-2013c].

3.7.3 Modell für die Bestimmung des Jahresenergiebedarfs

Mittels der vorgestellten Modelle für die Berechnung des mittleren Energiebedarfs je Einzel- bzw. Doppelspiel kann der Jahresenergiebedarf eines Regalbediengeräts bestimmt werden. Dafür erfolgt die Unterscheidung zwischen Standby-Zeit und Zeit, in der das RBG Aufträge durchführt (Lastzeit). Diese Unterscheidung wird benötigt, da Regalbediengeräte auch in inaktiven Zeiten Energie aufnehmen. Die elektrische Leistung, die ein RBG im Stillstand aufnimmt wird als Grundlast bezeichnet (vgl. Abschnitt 3.7.2). Für die Ermittlung der Standby-Zeit wird zum einen die Betriebszeit T_B und zum anderen die Gesamtlaufzeit T_L benötigt. Die Standby-Zeit T_S ergibt sich durch:

$$T_S = T_B - T_L \tag{3-17}$$

Die Betriebszeit entspricht der Arbeitszeit, beziehungsweise der Zeit, in der das Regalbediengerät eingeschaltet ist. Die Berechnung der Gesamtlaufzeit ist unter der

Berücksichtigung der Anzahl an Einzelspielen N_{ES} und Doppelspielen N_{DS} im Jahr sowie der mittleren Spielzeit pro Einzelspiel t_{ES} bzw. Doppelspiel t_{DS} möglich:

$$T_L = N_{ES} \cdot t_{ES} + N_{DS} \cdot t_{DS} \quad (3-18)$$

Nach [Lip-2003] berechnet sich die mittlere Spielzeit für ein Einzelspiel t_{ES} durch:

$$t_{ES} = t_0 + 2 \cdot t_{LAM} + \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \left(1 + \frac{1}{3} b^2 \right) \cdot \frac{L}{v_x} \quad (3-19)$$

mit t_0 für die Totzeit, t_{LAM} entspricht der Spielzeit des LAM und b dem Regalwandparameter.

Nach [Lip-2003] berechnet sich die mittlere Spielzeit für ein Doppelspiel t_{DS} durch:

$$t_{DS} = t_0 + 4 \cdot t_{LAM} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \left(\frac{4}{3} + \frac{b^2}{2} - \frac{b^3}{30} \right) \cdot \frac{L}{v_x} \quad (3-20)$$

Für die Berechnung des jährlichen Energiebedarfs muss zwischen der Anzahl an Einzelspielen pro Jahr für Einlagerungen N_{ESE} und Einzelspielen für Auslagerungen N_{ESA} unterschieden werden:

$$E = T_S \cdot P_G + N_{ESE} \cdot E_{ESE} + N_{ESA} \cdot E_{ESA} + N_{DS} \cdot E_{DS} \quad (3-21)$$

Somit kann der jährliche Energiebedarf mittels analytischer Formeln bestimmt werden.

3.8 Energiebedarf von Hochregalstaplern

Für die Untersuchung des mittels Hochregalstapler bedienten Lagers des Szenarios „manuell vs. automatisch“ muss ein Modell für die Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs entwickelt werden. Hierbei kann auf eine Datenbasis zurückgegriffen werden, die für einzelne Zustände (z. B. Beschleunigung, Konstantfahrt, Heben, usw.) die aufgenommene elektrische Leistung enthält. Für die Ermittlung des Energiebedarfs auf Basis von Zuständen eignet sich der Einsatz der Methode Simulation [Sch-2011b]. Bei der Erstellung des Simulationsmodells wird die typische Vorgehensweise bei Simulationsprojekten verwendet [Kud-2000]:

- Systemanalyse: Untersuchung des betrachteten Systems anhand der Zieldefinition.

- Modellierung: Reduktion und Abstraktion des zu untersuchenden Systems sowie Ermittlung der benötigten Daten.
- Implementierung: Umwandlung des abstrahierten Modells in ein Rechnermodell.
- Verifikation und Validierung: Überprüfung der Funktionalität des Simulationsmodells (Verifikation) und der Übereinstimmung mit dem Ausgangssystem (Validierung).

Die Ergebnisse der einzelnen Teilschritte werden nachfolgend zusammengefasst.

Die Systemanalyse rückt die verschiedenen Zustände sowie die höhenabhängige Fahrgeschwindigkeit des Fördermittels in den Vordergrund. Hochregalstapler führen einzelne Arbeitsspiele aus. Innerhalb dieser Arbeitsspiele können anhand der Unterscheidung, ob die Geschwindigkeit konstant bleibt oder eine Verzögerung bzw. Beschleunigung stattfindet, verschiedene Zustände identifiziert werden (vgl. Tabelle 3-8). Unter der Berücksichtigung, ob das Fördermittel beladen ist, ergeben sich somit zehn Zustände.

Tabelle 3-8: Identifizierte, energiebedarfsrelevante Zustände eines Hochregalstaplers

Zustand	Beschreibung
Fahren	Konstante Fahrgeschwindigkeit
Beschleunigen	Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit
Abbremsen	Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit
Heben	Anheben der Hubvorrichtung
Senken	Senken der Hubvorrichtung

Bei der Betrachtung einzelner Lagerspiele ist die höhenabhängige Fahrgeschwindigkeit abzubilden (vgl. Abbildung 3-23 links). Ab einer Höhe H_1 wird die Fahrgeschwindigkeit kontinuierlich mit zunehmender Hubhöhe bis auf den Geschwindigkeitswert v_2 reduziert. Bei der Geschwindigkeit v_2 handelt es sich um die maximale Fahrgeschwindigkeit ab der Hubhöhe H_2 . Unter der Berücksichtigung dieses Zusammenhangs ergeben sich drei Geschwindigkeitsbereiche (vgl. Abbildung 3-23 rechts).

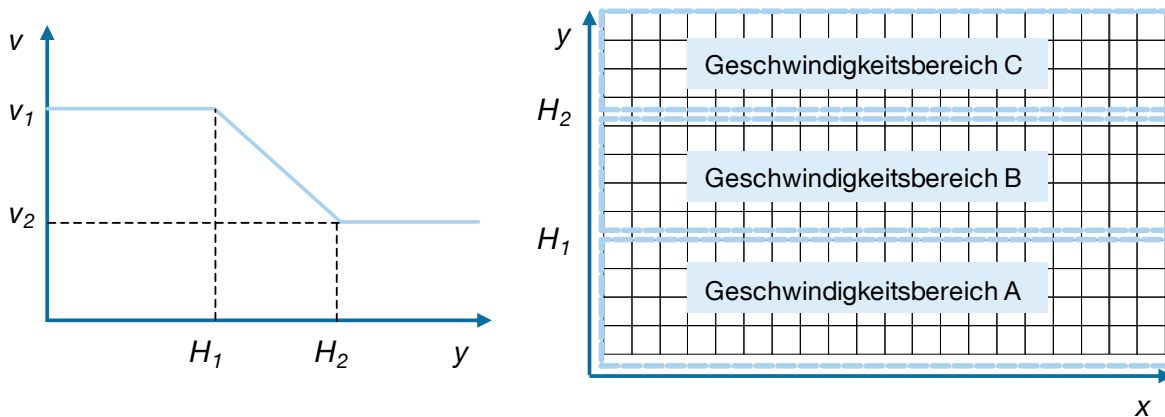


Abbildung 3-23: höhenabhängige Fahrgeschwindigkeit (links) und resultierende Geschwindigkeitsbereiche (rechts)

Innerhalb der Modellierungsphase wird das System in ein abstraktes, gedankliches Modell überführt [Kud-2000]. Im betrachteten Fall ist die Zielsetzung an das Modell, die Energiebedarfsermittlung eines manuellen Lagers zu ermöglichen. Um das Ziel zu erreichen, erfolgt die Ermittlung des Energiebedarfs für einzelne Arbeitsspiele, wobei die Start- und Zielkoordinaten bekannt sind. Hierbei wird zuerst die Fahrbahn von Start- zum Zielpunkt unter der Berücksichtigung, dass die Fahrbahn gewählt wird, die die minimalste Spielzeit ermöglicht, abgebildet. Grundlage der Modellierung ist eine Fallunterscheidung in Abhängigkeit der y -Koordinaten vom Start- und Zielpunkt (Beeinflussung der maximalen Fahrgeschwindigkeit) sowie von den x -Koordinaten. Der horizontale Abstand zwischen Start- und Zielpunkt führt zu einer Beeinflussung des Geschwindigkeitsverlaufs. Hierbei wird prinzipiell zwischen einem trapezförmigen Verlauf (Zustände: Beschleunigen, Fahren, Abbremsen) und einem Dreiecksverlauf (Zustände: Beschleunigen, Abbremsen) unterschieden. Für die identifizierten Fälle erfolgt die Entwicklung von Formeln für die Bestimmung der einzelnen Zustandsdauern. Der gesamte Energiebedarf eines Arbeitsspiels ergibt sich durch:

$$E_{\text{Spiel}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i \quad (3-22)$$

mit P_i für die elektrische Leistung innerhalb eines Zustands i sowie t_i für die Zustandsdauer bei n Zuständen eines Arbeitsspiels.

Die Verifikation des Modells erfolgt durch die Simulation eines Versuchsplanes, der alle identifizierten Fälle abdeckt. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit

den für die einzelnen Fälle manuell zu berechnenden Werten kann eine Überprüfung des Modells erfolgen.

4 Entwicklung und Evaluierung effizienter Betriebsstrategien

Die Energieeffizienz bestehender Fördermittel kann durch die Auswahl von Betriebsstrategien beeinflusst werden (vgl. Abschnitt 3.2). Jedoch besteht Unklarheit über die Höhe der Auswirkungen auf den Energiebedarf durch den Einsatz von Strategien für die verschiedenen Fördermittel. Nachfolgend werden für Stetigförderanlagen sowie Regalbediengeräte verschiedene energieeffiziente Betriebsstrategien erarbeitet und mittels geeigneter Simulationsmodelle untersucht. Ziel ist es, Kenntnisse über den Einfluss der unterschiedlichen Betriebsstrategien der einzelnen Fördermittel auf den Energiebedarf von logistischen Systemen zu erhalten und darauf aufbauend Handlungsempfehlungen zu generieren.

4.1 Energieeffiziente Betriebsstrategien für Stetigförderanlagen

Die Untersuchungen basieren auf selbst durchgeführten Messungen, auf Erkenntnissen anderer Forschungsstellen, denen Versuchsstände zur Verfügung stehen, sowie auf einem selbst erstellten Ablaufsimulationsmodell.

Der Energiebedarf von Maschinen kann zustandsbasiert dargestellt werden [Die-2008]. Bei Stetigförderern kann in Anlehnung an Clénet [Clé-2010] zwischen vier Betriebszuständen unterschieden werden:

- Lastzustand (es befindet sich eine Fördereinheit auf dem Förderer und das Fördersegment ist aktiv),
- Leerlaufzustand (der Förderer ist aktiv, aber unbeladen),
- Stopp-Zustand (der Förderer ist inaktiv, jedoch benötigt die Steuerungselektronik Energie)
- Aus-Zustand (der Förderer ist inaktiv und benötigt keine Energie).

Ziel von energieeffizienten Betriebsstrategien muss es sein, den Energiebedarf innerhalb der Zustände (Last + Stopp) und den zeitlichen Anteil bestimmter Zustände (Leerlaufzustand + Stopp) zu reduzieren.

Prinzipiell kann zwischen zyklusspezifischen und zyklusübergreifenden Betriebsstrategien unterschieden werden (vgl. Abbildung 4-1).

Merkmal	Ausprägung				
zyklusspezifische Betriebsstrategien					
Geschwindigkeitsanpassung	Ja		Nein		
reduzierte Nachlaufzeit	Ja		Nein		
zyklusübergreifende Betriebsstrategien					
Betriebsweise	kontinuierlich		intermittierend		
Definierte Auftragsblöcke (Zyklen)	Ja		Nein		
Anzahl Fördereinheiten (FE) in einem Zyklus	1	2	3	4	n
Abrisskriterium	Ja		Nein		

Abbildung 4-1: Morphologischer Kasten möglicher Betriebsstrategien

Zyklusspezifische Betriebsstrategien beeinflussen jeden Zyklus, wohingegen zyklusübergreifende Betriebsstrategien erst die Ausprägung der einzelnen Zyklen (z. B. Anzahl an Fördereinheiten eines Zyklus) festlegen. Zyklusspezifische Strategien stellen die Geschwindigkeitsanpassung sowie die Reduzierung der Leerlaufzeit am Ende eines Zyklus dar. Bei zyklusübergreifenden Strategien kann unter anderem zwischen einem kontinuierlichen Betrieb und einem Run-on-Demand-Betrieb (intermittierend) unterschieden werden. Werden bei einem Run-on-Demand-Betrieb definierte Auftragsblöcke gebildet, so ist zum einen die Anzahl an Fördereinheiten je Zyklus und zum anderen von Bedeutung, ob ein sogenanntes Abrisskriterium eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 3.6.3). Durch den Einsatz der Blockbildung kann die gesamte Laufzeit eines Fördermittels reduziert werden.

Die technischen Voraussetzungen für den Einsatz der Betriebsstrategien zeigt Tabelle 4-1. Jede identifizierte Betriebsstrategie benötigt für die Umsetzung die Verwendung von Sensortechnik. Zum einen um zu erkennen, dass die Fördereinheit das Fördermittel betreten bzw. verlassen hat und zum anderen um die Position der Fördereinheit zu bestimmen, was für die Blockbildung benötigt wird. Ebenfalls besteht eine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Betriebsstrategien und der Bereichs-

steuerung. Die Bereichssteuerung steuert den Transportablauf der einzelnen Fördermittel einer Anlage [VDMA 15276].

Tabelle 4-1: Technische Voraussetzungen der einzelnen Betriebsstrategien

Betriebsstrategie	Technische Voraussetzungen / Wechselwirkungen		
	Sensorik	Frequenzumrichter	Bereichssteuerung
Geschwindigkeitsanpassung	x	x	x
reduzierte Nachlaufzeit	x		x
Betriebsweise	x		x
Blockbildung	x		x

4.1.1 Zyklusspezifische Betriebsstrategien

Betriebsstrategien, die jeden Zyklus beeinflussen, stellen die Geschwindigkeitsanpassung sowie die Reduzierung der Nachlaufzeit dar.

Messtechnische Untersuchungen an einem Kettenförderer haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Fördergeschwindigkeit den Energiebedarf reduziert [Hop-2012]. Die Messungen zeigen, dass Energieeinsparungen bis zu 15,63 Prozent möglich sind. Dies kann unter anderem durch die höhere benötigte mechanische Leistung, die zu einem besseren Motorwirkungsgrad führt, begründet werden. Die Erhöhung der Geschwindigkeit setzt jedoch den Einsatz von durch Frequenzumrichter gesteuerte Antriebe voraus.

Die Auswertungen verschiedener im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Messungen zeigen, dass der Leerlauf-Zustand auch bei einer intermittierenden Betriebsweise einen bedeutenden Beitrag am Gesamtenergiebedarf eines Förderzyklus besitzt. Ein Bestandteil des Leerlauf-Zustands stellt die Nachlaufzeit dar. Abbildung 4-2 veranschaulicht dies an einem gemessenen Zyklus von einem Rollförderer.

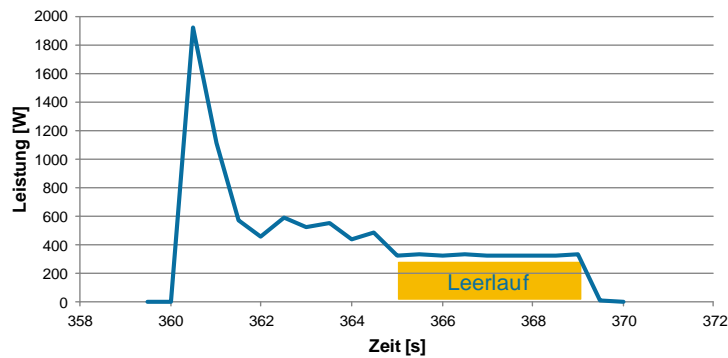


Abbildung 4-2: Leistungsverlauf bei einem Rollenförderer

Im betrachteten Fall ergibt sich eine Nachlaufzeit von über vier Sekunden. Zu beachten bei der Reduzierung der Nachlaufzeit ist, dass aus steuerungstechnischen Gründen eine gewisse Zeitspanne benötigt wird. Zum einen soll damit sichergestellt werden, dass die Fördereinheit den Förderer verlassen hat und zum anderen, dass ein Abbremsen des Förderers und ein kurz darauffolgender Wiederanlauf aufgrund des Eintreffens einer weiteren Fördereinheit vermieden wird. Dies wird auch durch Untersuchungen von Clénet [Clé-2010] bestätigt.

4.1.2 Zyklusübergreifende Betriebsstrategien

Die zyklusübergreifenden Betriebsstrategien stellen die Betriebsweise (kontinuierlich / intermittierend) sowie die Blockbildung dar. Aus energetischer Sicht sollte nach Möglichkeit immer eine intermittierende Betriebsweise eingesetzt werden, da dadurch unnötige Leerlaufzeiten reduziert werden können. Eine Besonderheit stellen dabei Rollenförderer mit einem hohen Durchsatz dar, die einen erheblichen Energiebedarf für Beschleunigungsvorgänge benötigen. Hierbei müssen detailliertere Analysen zeigen, ob ein kontinuierlicher Betrieb ohne zahlreiche Beschleunigungsvorgänge sinnvoll ist.

Blockbildung ermöglicht die Reduzierung der Laufzeit je Fördereinheit (vgl. Abbildung 4-3); zusätzlich entsteht aufgrund der höheren Beladung eine höhere mechanische Leistung was somit zu besseren Motorwirkungsgraden führt. Die Höhe der Einsparung durch die Einführung einer Blockbildung hängt unter anderem von der Länge des Fördermittels ab. Je länger ein Fördermittel, umso stärker wird die Laufzeit pro Fördereinheit bei einem 4er-Block gegenüber einer einzelnen Betriebsweise reduziert.

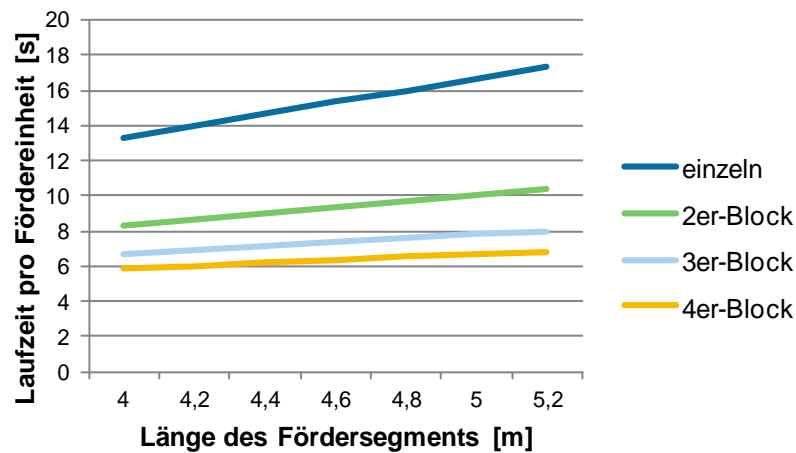


Abbildung 4-3: Laufzeiten je Fördereinheit in Abhängigkeit von der Blockgröße sowie der Länge des Fördersegments

Die Beschreibung der Laufzeiten innerhalb eines Zyklus kann analytisch erfolgen (vgl. Abschnitt 3.6.3). Unklar ist jedoch die Häufigkeit der gefahrenen Blockgrößen, wenn ein Abrisskriterium eingesetzt wird. Des Weiteren besitzt die Einführung von Blockgrößen Einfluss auf die Durchlaufzeiten der Fördereinheiten, was somit auch einen Untersuchungsgegenstand darstellt. Da die Fördereinheiten mit statistisch verteilten Abständen an der Quelle in die Förderanlage gelangen und somit der Blockbildungsprozess nur bedingt analytisch zu untersuchen ist, soll nachfolgend für die Untersuchungen auf die Ablaufsimulation zurückgegriffen werden.

Für die Untersuchung des Verhaltens einer Stetigförderanlage hinsichtlich der Laufzeit der einzelnen Fördermittel erfolgt die Erstellung eines Simulationsmodells im Werkzeug Plant Simulation. Für eine umfassende Abbildung wurden die Systemelemente Quelle, Senke, Fördermittel und Verteilelemente als Klassen erstellt. Insbesondere bei der Klasse „Fördermittel“ können so auf Basis der Parameter Länge, Mindestabstand und weiterer Größen aufwandsarm verschiedene Fördermitteltypen (z. B. Tragkettenförderer) und verschiedene Ausprägungen (z. B. Fördermittellängen) abgebildet werden. Die Validierung des Simulationsmodells wird anhand der analytischen Formeln zur Berechnung der Laufzeiten in Abhängigkeit der Blockgröße durchgeführt.

Abbildung 4-4 zeigt das Layout der untersuchten Förderanlage.

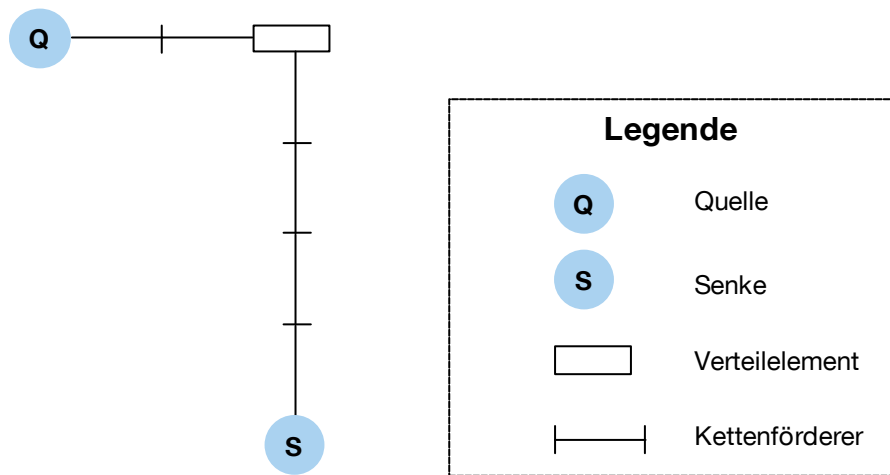


Abbildung 4-4: Layout der untersuchten Förderanlage

Für die Untersuchung werden Szenarien gebildet, anhand derer die verschiedenen Betriebsstrategien untersucht werden. Die Szenarien unterscheiden sich zum einen hinsichtlich des Erwartungswerts bzgl. des Mindestabstands der Quelle (18 s, 36 s, 72 s) und zum anderen, ob nach dem Verteilelement eine Blockbildung stattfindet oder ob die durch das Verteilelement vereinzelt Förderereinheiten bis zur Senke einzeln gefördert werden. Für die Modellierung wird von einem exponentialverteilten, um den Mindestabstand verschobenen, Ankunftsstrom ausgegangen (vgl. [Mei-2006]). Die untersuchten Blockbildungsstrategien setzen sich aus der Blockgröße sowie die Höhe des Abrisskriteriums zusammen. Auszüge der Simulationsexperimente zeigen Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6.

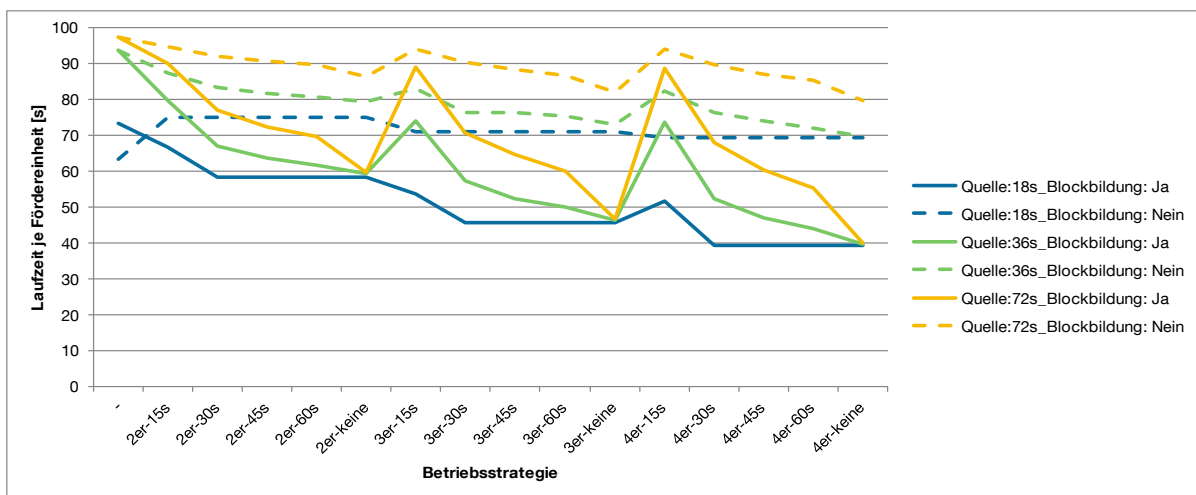


Abbildung 4-5: Mittlere Laufzeit je Fördereinheit

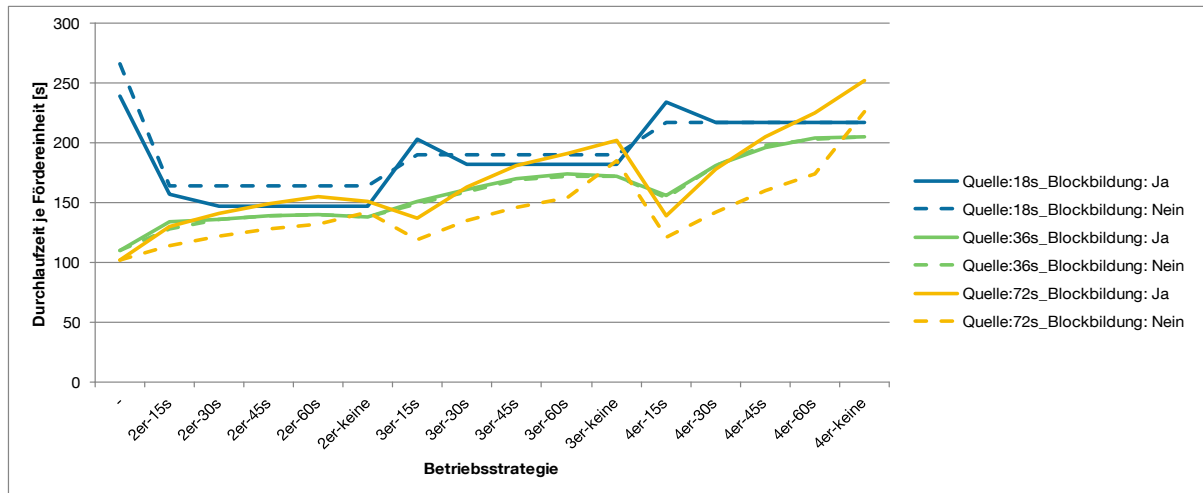


Abbildung 4-6: Mittlere Durchlaufzeit je Fördereinheit

Die Simulation bestätigt den bereits an den analytischen Formeln gezeigten Zusammenhang, dass je größer die Blockgröße wird, umso kleiner die mittlere Laufzeit je Fördereinheit ist. Auch die Erhöhung des Abrisskriteriums bzw. auch ein nicht vorhandenes Abrisskriterium führt zu einer Laufzeitreduzierung. Ebenso ist relevant, ob nach dem Verteilelement eine Blockbildung erfolgt. Dies besitzt Auswirkungen sowohl auf die Laufzeit als auch auf die Durchlaufzeit. Bei einer Blockbildung nach dem Verteilelement wird die durchschnittliche Laufzeit geringer, die Durchlaufzeit erhöht sich jedoch bei den Szenarien mit einer geringen Systemlast.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Einführung einer Blockbildung zu geringeren Laufzeiten und höheren Durchlaufzeiten führt. Insbesondere ist dies bei der Einführung einer Blockbildung nach einem Verteilelement in einer Anlage mit einer geringen Systemlast zu beachten.

4.2 Energieeffiziente Betriebsstrategien für Regalbediengeräte

Der Energiebedarf von Regalbediengeräten wird von mehreren wechselseitig wirkenden Parametern beeinflusst. Hierbei kann zwischen Einflussgrößen auf der physikalischen Ebene und der strategischen Ebene unterschieden werden (vgl. Abbildung 4-7). Auf strategischer Ebene liegen Ansatzpunkte für eine verbesserte Energieeffizienz im Eingriff auf die Lagerplatzzuweisung sowie bei der Festlegung der Ein- und Auslagerreihenfolge (sogenannte Lagerbewirtschaftungsstrategien) sowie bei der Durchführung einzelner Verfahrensvorgänge (Verfahrenstrategien). Eine Beschreibung der unterschiedlichen Ausprägungen von Antriebskonfigurationen und Lagerkonfigurationen auf den Energiebedarf erfolgt in Abschnitt 3.7.1. Nachfolgend wer-

den energieeffiziente Lagerbewirtschaftungsstrategien sowie Verfahrsstrategien vorgestellt. Deren Untersuchung stützt sich zum einen auf Literaturwerte (Lagerbewirtschaftungsstrategien), zum anderen werden Untersuchungen anhand eines mechanischen Simulationsmodells (Verfahrsstrategie) durchgeführt. Es ist zubeachten, dass die Wahl der Betriebsstrategie sowohl Auswirkung auf den Energiebedarf als auch auf den Durchsatz hat. Somit muss dieser Zusammenhang bei der Untersuchung berücksichtigt werden. Da umfangreiche Untersuchungen zu Lagerbewirtschaftungsstrategien vorliegen, werden die Ergebnisse dargestellt und der Fokus im Rahmen des Forschungsvorhabens auf die energieeffizienten Verfahrsstrategien gelegt.

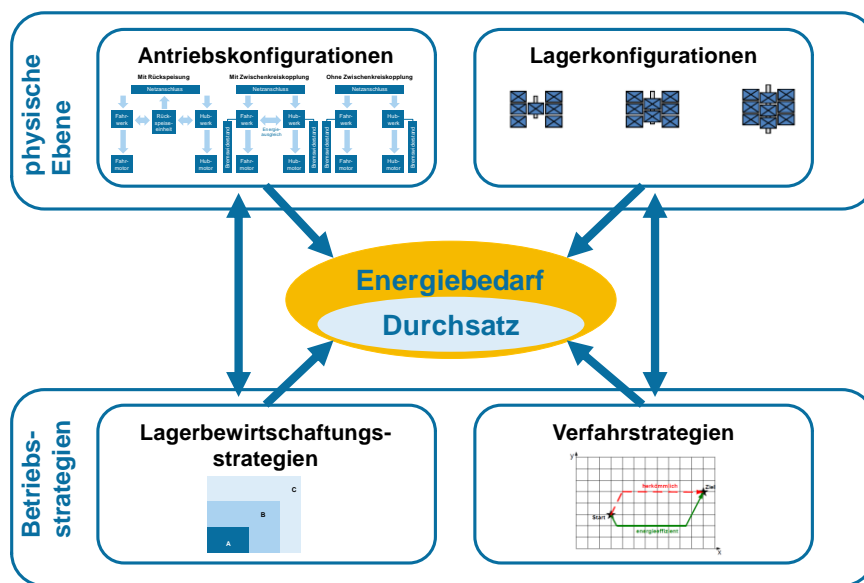


Abbildung 4-7: Wirkzusammenhänge für energieeffiziente Betriebsstrategien bei Regalbediengeräten

4.2.1 Energieeffiziente Lagerbewirtschaftungsstrategien

Energieeffiziente Lagerbewirtschaftungsstrategien waren bereits Gegenstand zahlreicher simulativer Untersuchungen. Es wurden sowohl automatische Kleinteilelager als auch Hochregallager untersucht.

Die Lagerbewirtschaftungsstrategien können weiter in Lagerplatzvergabestrategien und Ein- und Auslagerungsstrategien untergliedert werden [Hom-2007]. Zu den Lagerplatzvergabestrategien gehören unter anderem [Hom-2007]:

- Festplatzlagerung (feste Zuweisung von Artikeln zu Lagerplätzen),

- Zonierung (Zuweisung von Artikeln zu Lagerplatzbereichen),
- Querverteilung (Zuweisung von Artikeln auf mehrere Gassen) sowie
- chaotische Lagerung (freie Zuweisung von Artikeln zu Lagerplätzen).

Die für die Steigerung der Energieeffizienz relevanteste Ein- und Auslagerungsstrategie stellt die Spielart dar. Bei der Spielart wird zwischen reinen Ein- bzw. Auslagerspielen sowie kombinierten Ein- und Auslagerspielen (sogenannte Doppelspielen) unterschieden [Gün-2011a].

Die durchgeführten Untersuchungen zu energieeffizienten Lagerbewirtschaftungsstrategien in Abhängigkeit von der Lagerkonfiguration zeigt Tabelle 4-2. Die chaotische Lagerung stellt in den untersuchten Fällen das Referenzszenario für die Untersuchung von einer Zonierung sowie der Strategie „Einlagerung nahe Auslagerung“ dar (vgl. [Sch-2012c, Gün-2011c]). Wird die Strategie „Einlagerung nahe Auslagerung“ eingesetzt, so wird ein Einlagerfach nahe der nächsten auszulagernden Lager-einheit gewählt. Diese Strategie ermöglicht sowohl im AKL als auch im HRL Energieeinsparungen bis zu 16 Prozent [Gün-2011c]. Die Einführung einer ABC-Zonierung führt sogar zu einer Reduzierung von 17 bis 18 Prozent [Gün-2011c]. Auch Untersuchungen von *Schulz et al.* [Sch-2013] zeigen erhebliche Einsparungspotenziale durch die Einführung einer Zonierung auf. Hierbei erfolgten messtechnische Untersuchungen anhand eines AKL, bei dem zusätzlich die maximale Fahrgeschwindigkeit sowie die Antriebskonfiguration (mit bzw. ohne Netzurückspeisung) variiert wurden. Die Untersuchungen zeigen, dass durch die Einführung einer ABC-Zonierung bei einem RBG ohne Rückspeiseeinheit der durchschnittliche Energiebedarf eines Einzelspiels um 30 bis 43 Prozent und bei einem RBG mit Rückspeiseeinheit sogar um 35 bis 50 Prozent gesenkt werden kann [Sch-2013]. Ein weiterer Ansatz liegt in der Berücksichtigung der Fördergewichte bei der Einführung einer Zonierung, was Gegenstand aktueller Untersuchungen ist. Hierzu liegen jedoch noch keine Ergebnisse vor [Bra-2012].

Tabelle 4-2: Untersuchungen zu energieeffizienten Lagerbewirtschaftungsstrategien

Lagerbewirtschaftungsstrategien	Lagerkonfiguration	
	Automatisches Kleinteilelager	Hochregallager
Chaotische Lagerung	[Sch-2012c], [Sch-2013], [Gün-2011c]	[Gün-2011c]
Zonierung	[Sch-2012c], [Sch-2013], [Gün-2011c]	[Gün-2011c]
Einlagerung nahe Auslagerung	[Gün-2011c]	[Gün-2011c]
Spielart	[Sch-2012c], [Sch-2012a]]	[Sch-2012b]

Bei dem Vergleich von Einzelspielen mit Doppelspielen nach der VDI-Richline 3561 [VDI 3561] sowie der FEM-Richline 9.851 [FEM 9.851] ergeben sich bei der Untersuchung der jeweiligen Referenzspiele deutliche Einsparmöglichkeiten. Für das untersuchte AKL liegen für das FEM-Referenzspiel das Einsparpotenzial bei 18,6 Prozent und für das VDI-Spiel bei 21,3 Prozent [Sch-2012a].

Der Einsatz einer Zonierung sowie von Doppelspielen bieten für alle Antriebskonfigurationen sowie Lagertypen energetische Einsparungspotenziale. Aufgrund der Steigerung des möglichen Durchsatzes eines Lagers sollten diese Strategien verfolgt werden.

4.2.1 Energieeffiziente Verfahstrategien

Um die Energieeffizienz von einzelnen Fahrvorgängen zu steigern, bestehen die Möglichkeiten der veränderten Bahnplanung sowie die Veränderung der kinematischen Parameter der Antriebe. Die Bahnplanung legt den Fahrweg pro Spiel in Abhängigkeit vom Start- und Endpunkt fest, wobei fünf verschiedene Fälle unterschieden werden. Das erste Unterscheidungsmerkmal ist die Einteilung in hubzeit- und fahrzeitkritische Bewegungen. Hubzeitkritisch bedeutet, dass der Hubvorgang mehr Zeit benötigt als der Fahrvorgang. Bei fahrzeitkritischen Bewegungen dauert der Fahrvorgang länger als der Hubvorgang. Das zweite Unterscheidungsmerkmal stellt die Differenzierung zwischen Hub- und Senkvorgang dar. Ein Sonderfall sind die fahrzeitkritischen Bewegungen mit Hubvorgang, bei denen noch zusätzlich zwischen einem langen Hubvorgang und einem kurzen Hubvorgang unterschieden wird (vgl. Abbildung 4-8).

Die Möglichkeit, durch die Verwendung von veränderten Bahnbewegungen eine höhere Energieeffizienz zu erreichen, hängt von der eingesetzten Antriebskonfiguration ab. Die in Abbildung 4-8 dargestellten angepassten Bewegungen wurden für Regalbediengeräte mit einer Zwischenkreiskopplung entwickelt [Ert-2013]. Bei hubzeitkritischen Bewegungen mit Hub- bzw. Senkvorgängen kann durch die Reduzierung der Geschwindigkeit des Fahrwerks eine höhere Energieeffizienz ohne Spielzeitverlängerung erreicht werden. Die energieeffizienten Bahnbewegungen bei fahrzeitkritischen Vorgängen basieren auf Energieaustausch zwischen Hub- und Fahrwerk über die Zwischenkreiskopplung. Bei einem Senkvorgang wird die durch das Hubwerk gewonnene Energie für die Beschleunigung des Fahrwerks genutzt und sogar unter die Zielhöhe abgesenkt, um auch die Energie, die beim Abbremsen des Fahrwerks entsteht, für den Hubvorgang zu nutzen. Bei fahrzeitkritischen Bewegungen mit einem Hubvorgang werden zwei Fälle unterschieden. Bei einem langen Hubvorgang wird die durch den Abbremsvorgang frei werdende Energie des Fahrwerks genutzt. Ist die Abbremszeit des Fahrwerks kürzer als die benötigte Hubzeit, erfolgt bei einer fahrzeitkritischen Bewegung mit kurzem Hubvorgang am Beginn des Verfahrvorgangs ein Senken des Hubwerks mit dem Ziel, die frei werdende Energie für die Beschleunigung des Fahrwerks einzusetzen.

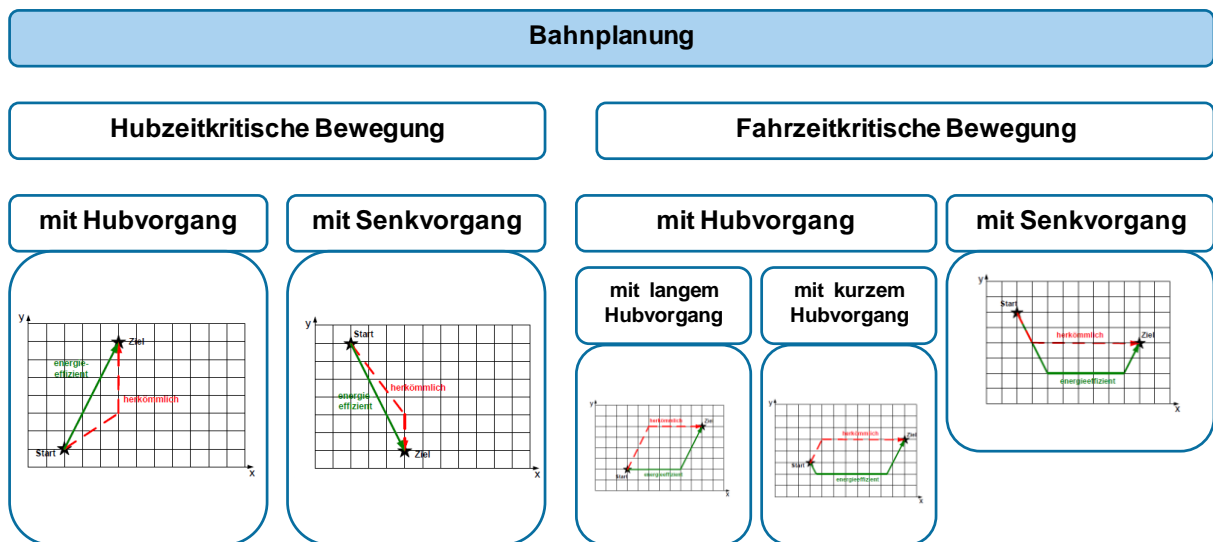


Abbildung 4-8: Fallunterscheidung bei der Bahnplanung (in Anlehnung an [Ert-2013])

Eine weitere Eingriffsmöglichkeit in die Verfahstrategien stellt die Veränderung der kinematischen Parameter der Antriebe dar. Es können sowohl die maximalen Beschleunigungs- als auch Geschwindigkeitswerte von Fahr- und Hubwerk reduziert werden. Hierbei ist zu beachten, dass die Durchsatzleistung beeinflusst wird. Untersuchungen zu dieser Betriebsstrategie bestehen bereits durch reale Versuche [Sch-

2012a, Mah-2013]. Darüber hinaus wurden auch im Rahmen des Forschungsvorhabens Untersuchungen mittels eines bereits entwickelten und validierten Simulationsmodells (vgl. [Gün-2011b]) durchgeführt.

Die Untersuchungen zeigen, dass nur die Reduzierung der maximalen Geschwindigkeit des Fahrtriebs einen bedeutenden Einfluss auf den Energiebedarf hat [Sch-2012a]. Die Maximalgeschwindigkeit kann jedoch nicht beliebig herabgesetzt werden, da zum einen Regalbediengeräte einen sogenannten Grundlastverbrauch besitzen und somit ab einem gewissen Punkt der Anteil der Grundlast die Ersparnis durch die Geschwindigkeitsreduzierung übersteigt. Zum anderen würde eine beliebige Reduzierung der Maximalgeschwindigkeit des Fahrwerks zu erheblichen Durchsatzeinbußen führen.

Um die Auswirkungen der verschiedenen Strategien auf den Energiebedarf zu untersuchen, erfolgte eine Simulationsstudie anhand eines mechatronischen Simulationsmodells. Die wichtigsten Parameter der Regalbediengeräte für das AKL und HRL zeigt Tabelle 4-3. Es wurden 1.000 Doppelspielen bei einer chaotischen Lagerung simuliert.

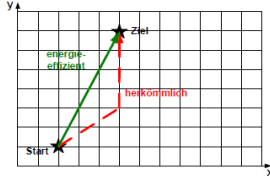
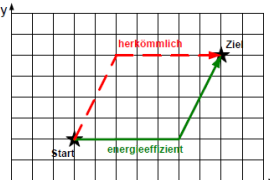
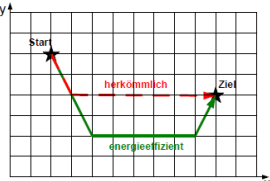
Tabelle 4-3: Simulations-Eingangsparameter

Parameter	Wert AKL	Wert HRL	Bezeichnung
$v_{x_{max}}$	$6 \frac{m}{s}$	$3 \frac{m}{s}$	max. Fahrgeschwindigkeit
$a_{x_{max}}$	$3 \frac{m}{s^2}$	$0,5 \frac{m}{s^2}$	max. Fahrbeschleunigung
$v_{y_{max}}$	$3 \frac{m}{s}$	$1 \frac{m}{s}$	max. Hubgeschwindigkeit
$a_{y_{max}}$	$3 \frac{m}{s^2}$	$0,7 \frac{m}{s^2}$	max. Hubbeschleunigung
M_G	2.000 kg	17.000 kg	Gesamtmasse
m_H	300 kg	3.200 kg	Hubmasse
m_n	100 kg	1.200 kg	Nutzlast

Die Tabelle 4-4 veranschaulicht die durch den Einsatz der beschriebenen Strategien möglichen Einsparpotenziale für die verschiedenen Antriebskonfigurationen sowohl für AKL als auch HRL. Die angegebenen Werte geben die Einsparung gegenüber den herkömmlichen, rein spielzeitorientierten Betriebsstrategien wieder und stellen die Simulationsergebnisse dar. Zu beachten ist, dass die zuletzt aufgeführte Strategie

gie „v_x: energieeffizient“ zu einer Verlängerung der Fahrzeit um bis zu 40 Prozent führt.

Tabelle 4-4: Simulationsergebnisse für Verfahrensstrategien

Strategie	AKL – Antriebskonfiguration		HRL – Antriebskonfiguration			
	ohne Zwischenkreis- kopplung [%]	mit Zwischenkreis- kopplung [%]	mit Rückspeiseeinheit [%]	ohne Zwischenkreis- kopplung [%]	mit Zwischenkreis- kopplung [%]	mit Rückspeiseeinheit [%]
v _x : durchsatzorientiert 	0,3	0,2	0,1	2,7	0,5	0,8
Hubzeitverzögerung 	-0,3	6,9	0,4	0,0	3,3	0,2
Badewanne 	-2,2	2,6	-0,1	-3,9	-1,0	-1,6
v _x : energieeffizient	33,7	30,6	6,6	15,5	6,9	3,8

Die Ergebnisse zeigen ein differenziertes Bild für AKL und HRL. Der Einsatz der Strategie „Badewanne“ führt im HRL für alle Antriebskonfigurationen sowie bei dem AKL mit Ausnahme der Antriebskonfiguration „mit Zwischenkreiskopplungen“ zu einer Erhöhung des Energiebedarfs.

Auch die Strategie „Hubzeitverzögerung“ besitzt lediglich für die Regalbediengeräte mit einer Gleichstrom-Zwischenkreiskopplung Vorteile.

Fazit

Es kann festgehalten werden, dass durch den Einsatz von energieeffizienten Fahrstrategien große Energieeinsparungen möglich sind. Insbesondere die Reduzierung der maximalen Fahrgeschwindigkeit bietet erhebliches Potenzial sowohl bei HRL als auch bei AKL. Allerdings ergeben sich dadurch beim untersuchten Fall Durchsatzeinbußen von bis zu 40 Prozent. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass bei der Auswahl der Fahrstrategien sowohl die Lagerkonfiguration als auch die Antriebskonfiguration zu berücksichtigen sind.

5 Implementierung eines Softwarewerkzeugs zur Bestimmung des Energiebedarfs

Für eine zielgerichtete und praxistaugliche Entwicklung eines Werkzeugs, welches in der Planungsphase von Logistiksystemen mit der Zielsetzung, den Energiebedarf zu senken, eingesetzt werden soll, setzt eine Aufnahme der Anforderungen und die Festlegung des Funktionsumfangs voraus. Die Aufnahme der Anforderungen sowie Festlegung des Funktionsumfangs erfolgt im Rahmen einer Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses. Es werden folgende Anforderungen ermittelt:

- Die Untersuchung verschiedener Planungsvarianten hinsichtlich des Energiebedarfs erfolgt auf Anlagenebene.
- Das Werkzeug richtet sich an Planer von logistischen Anlagen.
- Eine Genauigkeit von +/- 20% bei der Energiebedarfsermittlung wird als ausreichend genau angesehen.
- Bei der Umsetzung soll auf ein anwenderfreundliches Front-End Wert gelegt werden.
- Darüber hinaus gelten die Anforderungen an die Energiebedarfsermittlung in der Planungsphase (vgl. Abschnitt 3.1).

Das Werkzeug soll folgende Funktionsumfänge besitzen:

- Die Berechnung des jährlichen Energiebedarfs stellt die wichtigste Funktionalität dar.
- Das Werkzeug enthält Handlungsempfehlungen zur energieeffizienten Gestaltung.
- Für die Analyse der Planungsvarianten besteht die Möglichkeit zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen des Strompreises auf die jährlichen Energiekosten.
- Vorhandene Messwerte werden in das Werkzeug integriert.

5 Implementierung eines Softwarewerkzeugs zur Bestimmung des Energiebedarfs

Aus Gründen der einfachen Bedienung sowie der weiten Verbreitung erfolgt die Implementierung des Werkzeugs in Microsoft Excel unter Verwendung der Programmiersprache Visual Basic.

5.1 Struktur des Werkzeugs

Durch die Implementierung des Werkzeugs in Microsoft Excel erfolgt die Ein- und Ausgabe von Daten mittels verschiedener Tabellenblätter. Beim Starten des Werkzeugs wird das Tabellenblatt „Start“, das in Abbildung 5-1 zu sehen ist, aufgerufen. Der Aufbau des Tabellenblatts ist zweigeteilt. Auf der rechten Seite befinden sich Verlinkungen zu den als pdf-Dateien hinterlegten Handlungsempfehlungen der einzelnen Handlungsfelder (vgl. Kapitel 6). Um den Installationsaufwand gering zu halten erfolgt die Integration der pdf-Dateien in die Excel-Datei. Über die sich auf der linken Seite befindlichen Buttons werden die Tabellenblätter zur Energiebedarfsermittlung von Stetigförderanlagen bzw. Regalbediengeräten aufgerufen.

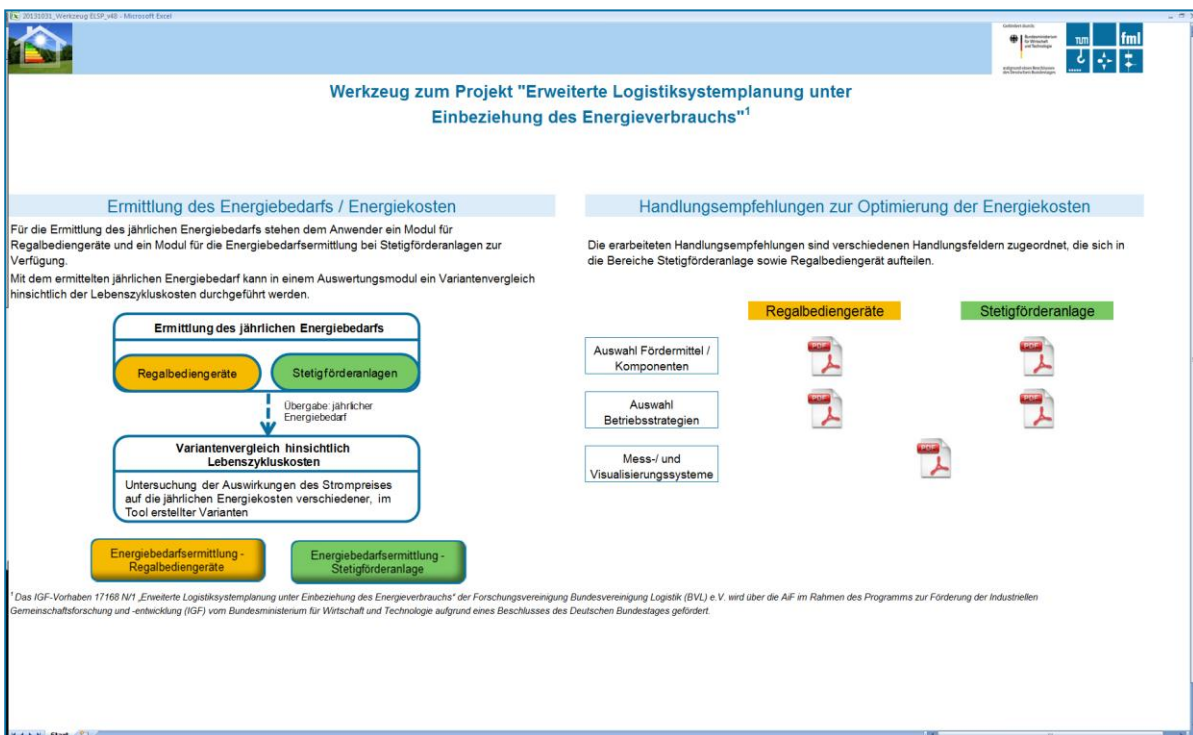


Abbildung 5-1: Tabellenblatt „Start“

Die Energiebedarfsermittlung findet separat auf weiteren Tabellenblättern statt, sowohl für Stetigförderanlagen als auch für Regalbediengeräte. Beide Abschnitte bestehen aus den Blättern „Eingabe“ sowie „Ergebnisse“. Sobald ein Blatt für die Eingabe einer Planungsvariante geöffnet wird, erfolgt das Ausblenden der nicht benö-

tigten Tabellenblätter. Die Blätter „Ergebnisse“ enthalten zum einen die berechneten Werte für den jährlichen Energiebedarf der untersuchten Anlage, zum anderen ermöglichen sie einen Variantenvergleich hinsichtlich der zu erwartenden jährlichen Energiekosten bei sich verändernden Strompreisen.

5.2 Energiebedarfsermittlung von Stetigförderanlagen

Um den Energiebedarf von komplexen Stetigförderanlagen aufwandsarm ermitteln zu können, muss das System abstrahiert werden. Dafür wurden bereits die Elemente Quelle, Senke, Fördersegment, Verteil- sowie Zusammenführungselemente eingeführt (vgl. Abschnitt 3.6.1). Da innerhalb einer Stetigförderanlage aus Kostengründen der Einsatz von möglichst wenigen unterschiedlichen Fördermitteln angestrebt und umgesetzt wird, bietet sich eine Klassenbildung für eine aufwandsarme Modellierung an. Der in Abbildung 5-2 dargestellte Förderabschnitt besteht beispielsweise aus drei gleichen Kettenförderern mit der Länge 3,6 m. Um diesen Förderabschnitt abzubilden, wird somit nur eine Klasse (Kettenförderer 3,6 m) benötigt.



Abbildung 5-2: Beispielhafte Förderanlage inkl. einzelner Fördersegmente

Die im Werkzeug hinterlegten Klassen sind in Abbildung 5-3 inklusive der jeweiligen Attribute dargestellt. Die Attribute können durch den Nutzer festgelegt werden. Bei einigen energiebedarfsspezifischen Attributen (wie z. B. Getriebetyp) wird dem Anwender bereits ein Wert vorgeschlagen, um Nutzer, die ein geringes Fachwissen im Bereich der Energieeffizienz besitzen, zu unterstützen.

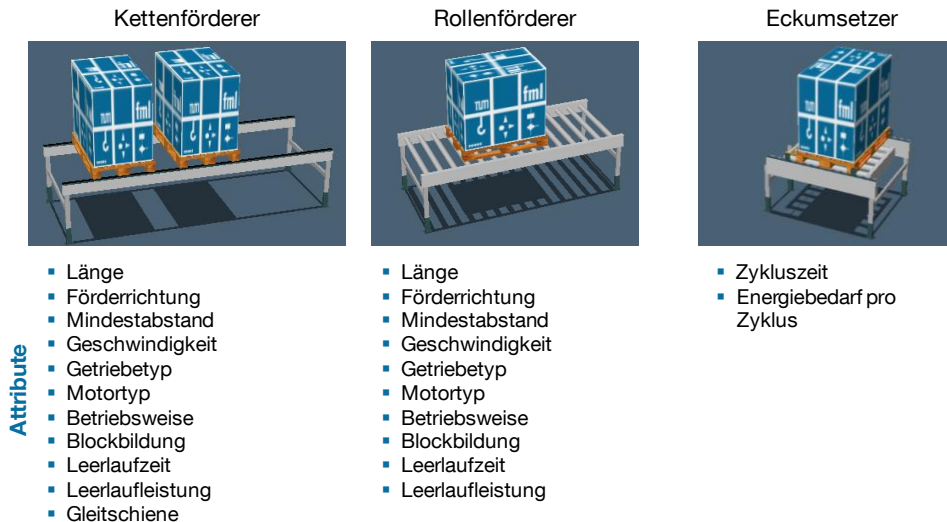


Abbildung 5-3: Implementierte Klassen mit den jeweiligen Attributen

Die Eingabe der benötigten Parameter für die Energiebedarfsermittlung von Stetigförderanlagen erfolgt auf dem Tabellenblatt „Eingabe“ (Abbildung 5-4). Das Tabellenblatt unterteilt sich in die drei Bereiche „Allgemeine Daten“, „Fördermittel“ sowie „Fördersystem“ und ist von oben nach unten vom Nutzer zu bearbeiten. Die Reihenfolge ist wie folgt:

1. Eingabe der Basisdaten wie z. B. die Abmessungen der Fördereinheiten und die Betriebszeiten sowie die Abbildung der Quellen der Stetigförderanlage (*Allgemeine Daten*).
2. Anlegen der in der Stetigförderanlage verwendeten Fördermittel wie z. B. die Klasse „Kettenförderer der Länge 3,6 m“ (*Fördermittel*).
3. Abbilden der Stetigförderanlage unter Verwendung der erstellten Quellen und Fördermittel (*Fördersystem*).

Energiebedarfsermittlung - Stetigförderanlage

Auf diesem Tabellenblatt kann der Energiebedarf einer Stetigförderanlage ermittelt werden. Um auch verschiedene Varianten hinsichtlich des Energiebedarfes zu vergleichen besteht die Möglichkeit die Varianten zu speichern und zu laden. Bitte füllen Sie die Tabelle von oben nach unten aus.

Berechnung Variante: Variante 2

Buttons: Neue Variante erstellen, Variante laden, Variante speichern, Variante entfernen

Allgemeine Daten

Abmessungen Fördereinheit

Länge Fördereinheit [m]	1,2
Breite Fördereinheit [m]	0,8

Betriebszeiten

Arbeitstage pro Jahr	200
Betriebsdauer pro Tag	8

Quellenverhältnis

ID	Berechnung	Schwachlast		durchschnittliche Last		Hochlast		Masseverteilung
		Fördereinheiten pro Jahr	%Anteil über Abszissenraum	Fördereinheiten pro Jahr	%Anteil über Abszissenraum	Fördereinheiten pro Jahr	%Anteil über Abszissenraum	
1	Quelle_1	20.000	10%	10.000	20%	10.000	30%	500
2	Quelle_2	60.000	10%	10.000	20%	10.000	30%	500

Fördermittel

ID	Berechnung	Fördermitteltyp	Länge [m]	Zykluszeit [s]	Betriebsweise		Kinematik			Leerlauf		Antriebssystem			Fördermittel hinzufügen
					Förderrichtung	Mündenzustand [m]	Geschwindigkeit [m/s]	Beschleunigungsdauer [s]	Leerlaufzeit [s]	Leerlaufleistung [W]	Getriebetyp	Motor	Kraftübertragung		
1	KF_4,4	Kettenförderer	4,4	quer	0,2	0,3	1	2	250	Schnecke	Asynchron_0_75_v1	Gleitschiene Kunststoff	Fördermittel hinzufügen		
2	RF_3,6	Rollenförderer	3,6	längs	0,2	0,3	1	2	270	Stirnrad	Asynchron_0_75_v1	Gleitschiene Stahl	Fördermittel entfernen		
3	Ecksummförderer		5	quer	0,2	0,3	1	2	300	Flachsummen	Asynchron_4_v1	Gleitschiene Stahl	Standard		
4	KF_2,2	Kettenförderer	2,2	quer	0,2	0,3	1	2	300	Flachsummen	Asynchron_4_v1	Gleitschiene Stahl			

Fördersystem

ID	Typ	Berechnung	Vorgänger	Fördermittel	Betriebsstrategie		Bereich leeren
					Betriebsweise	Blockbildung	
1	Quelle	Quelle_1					
2	Förderabschnitt	1101_KF	Quelle_1	KF_4,4	intermittierend	3er-Block	
3	Förderabschnitt	1102_KF	1101_KF	KF_4,4	intermittierend	3er-Block	
4	Förderabschnitt	1103_KF	1102_KF	KF_4,4	intermittierend	3er-Block	
5	Förderabschnitt	1104_KF	1103_KF	KF_4,4	intermittierend	3er-Block	
6	Quelle	Quelle_2					
7	Förderabschnitt	2101_RF	Quelle_2	RF_3,6	intermittierend	2er-Block	
8	Förderabschnitt	2102_RF	2101_RF	RF_3,6	intermittierend	2er-Block	
9	Zusammenführung	3101	1104_KF				

Buttons: Energiebedarfsermittlung starten, Zwischenergebnisse

Abbildung 5-4: Tabellenblatt „Eingabe“

Die durch Messungen ermittelten Daten sind in der Hilfe für die Eingabe im Bereich „Fördermittel“ hinterlegt und unterstützen den Nutzer bei der Eingabe der Attribute Leerlaufleistung sowie Leerlaufdauer.

Die Abbildung des gesamten Fördersystems erfolgt durch die Wahl des Fördermittels und der Festlegung der Abhängigkeiten zueinander (vgl. Abbildung 5-5). Mittels der Wahl des entsprechenden Vorgängers kann die Abhängigkeit beschrieben werden. Zusätzlich muss für jedes Fördersegment die Betriebsstrategie festgelegt werden. Dazu muss zum einen die maximale Anzahl an Fördereinheiten (FE) je Förderzyklus (Blockgröße) bestimmt werden, zum anderen muss entschieden werden, ob zwischen den einzelnen Förderzyklen das Fördersegment abgebremst wird oder ob ein kontinuierlicher Betrieb stattfinden soll. Im dargestellten Fall besitzen alle drei Kettenförderer die gleiche Länge und können somit aus einer Klasse abgeleitet werden.



Abbildung im Werkzeug

Layoutposition / Bezeichnung	Fördermittel	Vorgänger	Betriebsweise
1101_KF	KF_3,6 m	Quelle	3er-Block
1102_KF	KF_3,6 m	1101_KF	3er-Block
1103_KF	KF_3,6 m	1102_KF	3er-Block

Abbildung 5-5: Abbildung einer Stetigförderanlage im Werkzeug

Die Berechnung erfolgt mittels des in den Abschnitten 3.6.2 bis 3.6.4 erarbeiteten Modells und gliedert sich in die folgenden Schritte auf:

1. Berechnung der absoluten Häufigkeiten für die einzelnen Betriebsweisen.
2. Berechnung der Zykluszeiten.
3. Berechnung der elektrischen Leistung für jede Belastung.
4. Berechnung des Energiebedarfs pro Zyklus.
5. Berechnung des gesamten Energiebedarfs je Fördererelement.

Bei der Berechnung des Energiebedarfs wird auf verschiedene fördermitteltypspezifische Parameter zurückgegriffen, deren Ermittlung für Logistikplaner aufwendig ist. Diese Parameter sind in dem Tabellenblatt „Stammdaten“ hinterlegt. Bei den Default-Werten handelt es sich um Literaturangaben. Die Quellen sind unterlegt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Minimal- und Maximalwerte anzugeben, wodurch die untere und obere Grenze bei der Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs betrachtet werden kann.

5.3 Energiebedarfsermittlung von Regalbediengeräten

Die Ermittlung des Energiebedarfs von Regalbediengeräten erfolgt mittels zweier Tabellenblätter. Das erste Tabellenblatt dient der Eingabe der benötigten Daten, mittels des zweiten Blatts kann der berechnete Energiebedarf analysiert und ein Variantenvergleich hinsichtlich der Energiekosten vorgenommen werden.

Für die Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs von Regalbediengeräten wird das im Abschnitt 3.7.3 vorgestellte analytische Berechnungsmodell eingesetzt. Somit beruht die Berechnung auf dem mittleren Energiebedarf pro Einzel- bzw. Doppelspiel und setzt eine freie Lagerplatzzuordnung voraus. Der Standby-Verbrauch wird durch die Berechnung der mittleren Spielzeit ebenfalls berücksichtigt.

Die gesamten benötigten Parameter können im Tabellenblatt „EingabeRBG“ festgelegt werden (vgl. Abbildung 5-6). Für eine übersichtliche Darstellung sind die einzelnen Parameter in die Gruppen Betriebsdaten, Konstruktionsparameter, Lagergeometrie sowie Parameter des Antriebssystems angeordnet. Jede Gruppe besitzt ein Hilfe-Fenster, in dem die Bedeutung der einzelnen Parameter erklärt wird.

Energiebedarfsermittlung - Regalbediengeräte - Eingabe

Auf diesem Tabellenblatt kann der Energiebedarf von Regalbediengeräten ermittelt werden. Um auch verschiedene Varianten hinsichtlich des Energiebedarfes zu vergleichen besteht die Möglichkeit die Varianten zu speichern und zu laden. Bitte füllen Sie die Tabelle von oben nach unten aus.

Bezeichnung Variante:

Neue Variante erstellen | Variante laden | Variante speichern | Varianten entfernen

Betriebsdaten

Anzahl Einzelspiele pro Jahr	80.000
Anzahl Doppelspiele pro Jahr	300.000
Arbeitslage pro Jahr	280
Betriebsdauer pro Tag	24

Lagergeometrie

Gassenlänge [m]	39	Anzahl Regalbediengeräte	7
Gassenhöhe [m]	11		

Konstruktionsparameter Regalbediengeräte

kinematische Parameter		Massenangaben	
max. Geschw. in x-Richtung [m/s]	5	Gesamtmasse RBG [kg]	1774
max. Geschw. in y-Richtung [m/s]	4	Huldmasse [kg]	270
max. Beschl. in x-Richtung [m/s ²]	3	Nutzlast [kg]	100
max. Beschl. in y-Richtung [m/s ²]	4		
Zeit für Aufnahme/Abgabe [s]	3,6		

Parameter des Antriebssystems

Wirkungsgrade		elektrische Leistungsangaben	
Wirkungsgrad (Fahrantrieb)	0,86	Grundlast [W]	1100
Wirkungsgrad (Hubantrieb)	0,93	Mittlere Leistung für E/A [W]	600
Widerstandsbeiwert (Fahrantrieb)	0,030		
Widerstandsbeiwert (Hubantrieb)	0,003		
Wirkungsgrad (Energierückgew.)	0		

Energiebedarfsermittlung starten

Abbildung 5-6: Tabellenblatt „EingabeRBG“

Das Werkzeug liefert Ergebnisse zu Energiebedarfen und Laufzeiten. Die berechneten Laufzeiten unterteilen sich in die Gesamtlaufzeit sowie in die Standby-Zeit pro Jahr h. Für die ermittelten Energiebedarfe werden zum einen die mittleren Energie-

bedarfe pro Einzel- bzw. Doppelspiel, zum anderen die Energiebedarfe für das gesamte Jahr sowie für die Last- bzw. Standby-Zeit ausgegeben.

5.4 Variantenvergleich hinsichtlich Energiekosten

Für die berechneten Varianten kann zum einen eine Analyse der sich aus dem jährlichen Energiebedarf ergebenden Energiekosten erfolgen, zum anderen ist auch ein Vergleich verschiedener Varianten hinsichtlich der jährlichen Energiekosten möglich (vgl. Abbildung 5-7).

Der Nutzer kann mit Hilfe eines Drop-Down-Menüs zwei Varianten, deren Energiebedarf bereits berechnet wurde, für den Variantenvergleich auswählen. Zusätzlich kann für die einzelnen Varianten ein Beschaffungspreis angegeben werden, wodurch eine Untersuchung der Gesamtkosten möglich ist.

Der Strompreis ist starken Schwankungen unterworfen und wird durch Gesetze und Verordnungen beeinflusst [Kon-2009]. Aus diesem Grund ist es zielführend, einen Vergleich der Varianten mit unterschiedlichen Strompreisentwicklungen zu ermöglichen. Deswegen kann der Strompreis pro kWh entweder über den Betrachtungszeitraum konstant gewählt werden, mit einer konstanten jährlichen Steigerung oder für jedes Jahr einzeln angegeben werden.

Zur grafischen Aufbereitung der Ergebnisse werden durch das Werkzeug automatisch zwei Diagramme erzeugt. Das linke Diagramm dient der Darstellung der jährlichen Energiekosten der einzelnen Variante innerhalb des betrachteten Zeitraums. Mittels des zweiten Diagramms werden die sich aus dem Beschaffungspreis und den aufsummierten, jährlichen Energiekosten ergebenden Gesamtkosten aufgezeigt. Mittels des Diagramms ist eine Bestimmung des Zeitraums möglich, ab der eine energieeffizientere, aber unter Umständen teurere Variante lohnenswert ist.

5.4 Variantenvergleich hinsichtlich Energiekosten

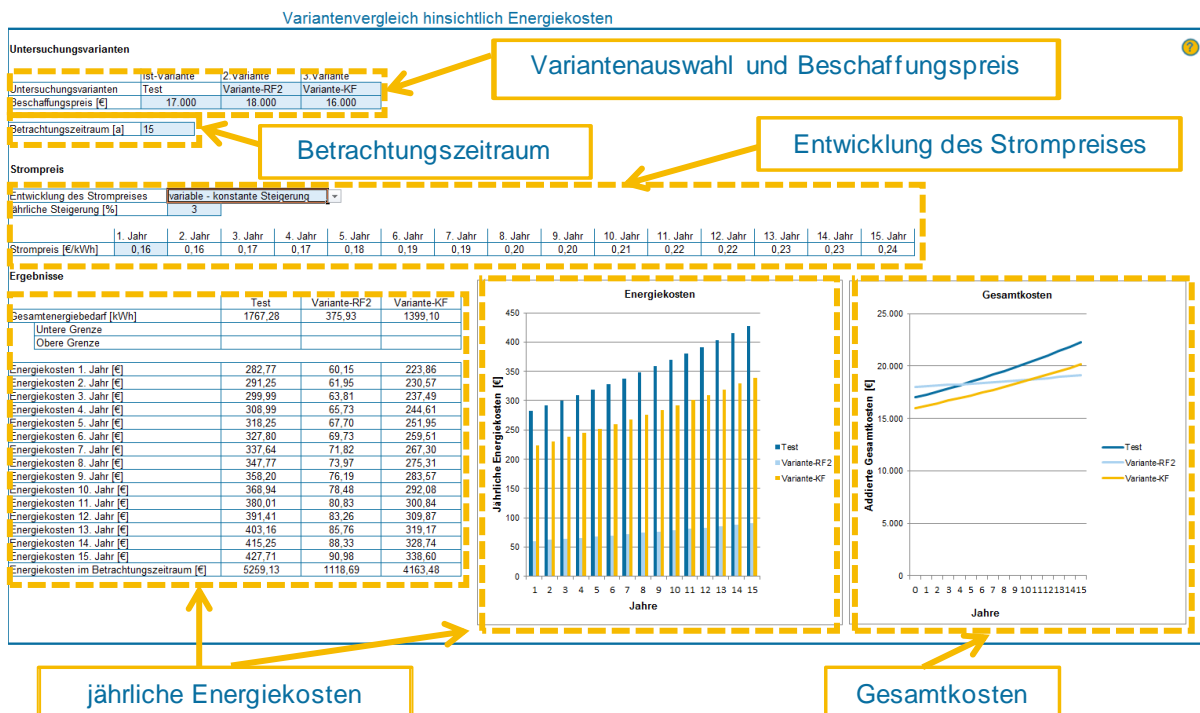


Abbildung 5-7: Variantenvergleich hinsichtlich Energiekosten

6 Einsparpotenziale und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Mit dem Ziel, die Vorteile einer Berücksichtigung der Energiekosten bei der Planung von Logistiksystemen zu untersuchen, erfolgt im Folgenden das Aufzeigen von Einsparungspotenzialen innerhalb der gewählten Szenarien (vgl. Abschnitt 3.3.2). Hierfür ist eine Untersuchung der Kostenstruktur und der Bedeutung der Energiekosten an den Gesamtkosten relevant.

Zusätzlich werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens in Handlungsempfehlungen überführt, damit diese den Planern von logistischen Anlagen aufwandsarm zur Verfügung stehen.

6.1 Aufzeigen von Einsparpotenzialen

Durch die Energiebedarfsermittlung sowie der Analyse der Auswirkung von Betriebsstrategien auf den Energiebedarf verschiedener logistischer Anlagen können Aussagen über die benötigte Energie von intralogistischen Systemen in der Nutzungsphase getroffen werden. Hierbei ist von besonderem Interesse, welchen Anteil die Energiekosten an den gesamten Kosten innerhalb der Verwendungsdauer der Anlage besitzen. Für diese Fragestellung stellt die Analyse der Lebenszykluskosten einer logistischen Anlage ein geeignetes Vorgehen dar. Mittels Lebenszykluskosten findet eine Untersuchung der gesamten innerhalb eines Betrachtungszeitraums entstehenden Kosten [Bün-2008], wozu auch die Energiekosten zählen, statt [VDI 2884]. Energiekosten setzen sich aus verschiedenen Bestandteilen zusammen und sind unternehmensspezifisch [Mül-2009]. Aus diesem Grund erfolgt eine detailliertere Betrachtung von Energiekosten.

Für die einzelnen definierten Untersuchungsszenarien werden verschiedene Varianten generiert und deren Energiebedarf innerhalb der Nutzungsphase bestimmt. Zusätzlich wird die Ermittlung der Kostenbestandteile durchgeführt, die für eine Analyse der Lebenszykluskosten benötigt werden.

6.1.1 Lebenszykluskosten

Lebenszykluskostenrechnungen ermöglichen eine Betrachtung aller während der Nutzungsphase von Produkten, Geräten oder Anlagen entstehenden Kosten [VDI 2884, Bod-2011]. Somit ist sowohl eine monetäre Bewertung des Energiebedarfs von verschiedenen Varianten als auch eine Untersuchung der gesamten Kostenstruktur möglich.

Aktuell besteht eine Vielzahl an Lebenszykluskostenansätzen [Bün-2008], als Beispiel seien das Modell des *Verein Deutscher Ingenieure* [VDI 2884] sowie des *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau* [VDMA 34160] genannt.

Die in der Abbildung 6-1 dargestellte Struktur der Phasen und Kostenbestandteile unterscheidet sich je nach Modell.

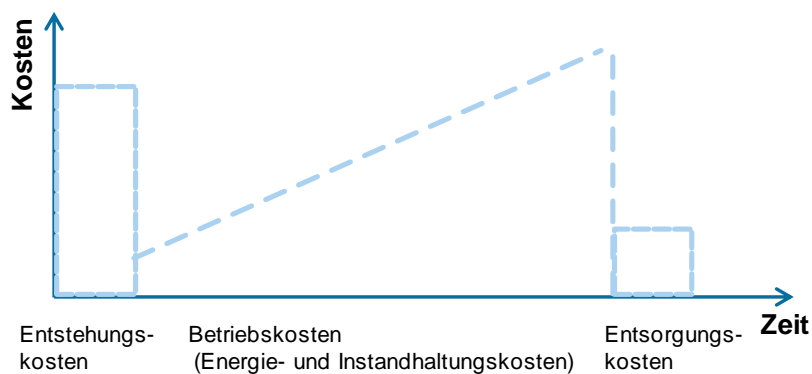


Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der entstehenden Lebenszykluskosten [Tay-1981]

Innerhalb der VDI-Richtlinie 2884 werden diese Phasen als „vor der Nutzung“, „während der Nutzung“ sowie „nach der Nutzung“ bezeichnet. Das VDMA Einheitsblatt 34160 spricht von der Entstehungs-, Betriebs- und Verwertungsphase. Den einzelnen Phasen können Kostenelemente zugeordnet werden, die hierarchisch in verschiedene Detaillierungsebenen aufgebaut sind [Bod-2011]. Innerhalb des Forschungsvorhabens werden für die einzelnen Szenarien folgende Kosten betrachtet:

- Entstehungskosten,
- Betriebskosten (Energiekosten / Instandhaltungs- und Wartungskosten).

Innerhalb des Forschungsprojekts ist eine Ermittlung der Entsorgungskosten nicht möglich.

6.1.2 Energiekosten

Da es sich bei den betrachteten Fördermitteln um elektrisch betriebene Geräte handelt, stellt der Strompreis einen bedeutenden Bestandteil der Energiekosten dar. Die wichtigsten Komponenten des Strompreises sind [Kon-2009]:

- Preis für die Stromlieferung,
- Netznutzungsentgelt,
- Verrechnungsentgelt (Messung und Abrechnung) und
- Steuern, Abgaben und Umlagen.

Der Preis für die Stromlieferung wird an den Stromproduzenten gezahlt und soll die Stromgestehungskosten der entsprechenden produzierenden Kraftwerke abdecken. Die Stromgestehungskosten stellen die Kosten für die Stromerzeugung dar und sind somit abhängig von den Brennstoffpreisen. Im liberalisierten Energiemarkt bestimmt sich der Preis jedoch nicht allein auf der Basis von Kosten, sondern ergibt sich aus dem Gesetz von Angebot und Nachfrage. Das Netznutzungsentgelt fasst die Entgelte für den Transport und die Verteilung der elektrischen Energie zusammen und wird von den Netzbetreibern erhoben. Es setzt sich aus einem Arbeits- und einem Leistungspreis zusammen. Der Arbeitspreis basiert auf der bezogenen elektrischen Energie und wird in Cent pro Kilowattstunde abgerechnet. Der Leistungspreis basiert auf der mittleren genutzten Leistung, die sich aus Messungen in Viertelstunden-Intervallen ergibt. Der höchste Viertelstundenwert innerhalb eines Abrechnungszeitraums wird für die Berechnung mit dem Leistungspreis (€/kW) herangezogen [Hes-2008]. Das Verrechnungsentgelt für Messstellenbetrieb, Messung und Abrechnung wird entweder pauschal oder in Abhängigkeit der Anzahl an Messstellen von den Netzbetreibern erhoben. Die Steuern, Abgaben und Umlagen bilden einen bedeutenden Teil der Energiekosten, der jedoch aufgrund diverser Befreiungsmöglichkeiten (Stromsteuer und EEG-Umlage) und kommunalen Unterschieden (Konzessionsabgaben) zwischen den Unternehmen große Abweichungen besitzt [Kon-2009]. Die Preispanne reichte im Jahr 2012 von 10,1 bis 16,8 Cent/kWh [Deu-2012]. Tabelle 6-1 zeigt die Gründe für die unterschiedlichen Strompreise in der Industrie.

Tabelle 6-1: Gründe für unterschiedliche Strompreise in der Industrie [Deu-2012]

	Unternehmensbezogene Gründe	Standortbezogene Gründe
Gründe für unterschiedliche Strompreise	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bezugsmenge/ Marktmacht ▪ Benutzungsstunden ▪ Bezugsspitze(n) ▪ Spannungsebene ▪ Sonder- und Ausnahmeregelungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Übertragungsnetzgebiete mit unterschiedlichen Kosten ▪ Verteilnetzgebiete mit unterschiedlichen Kosten

Die beschriebenen Komponenten hängen ab von der bezogenen Energie (Preis für die Stromlieferung; Steuern, Abgaben und Umlagen, Netznutzungsentgelt-Arbeitspreis), vom höchsten Viertelstundenwert (Netznutzungsentgelt-Leistungspreis) oder sind fix (Verrechnungsentgelt). Durch die vielzahligen Bestandteile des Strompreises und deren unterschiedlichen Abhängigkeiten handelt es sich um einen komplexen Betrachtungsgegenstand, der für das Hauptziel, die Ermittlung der jährlichen Energiekosten, eine Abstrahierung erforderlich macht. Aus diesem Grund wird von Energiekosten ausgegangen, die nur eine Abhängigkeit von der bezogenen Energie besitzen.

6.1.3 Einsparpotenziale im Szenario „Stetigförderanlage“

Im ersten Schritt der Untersuchung erfolgt die Bildung zweier Varianten (vgl. Abbildung 6-2). Die Variante „Kettenförderer“ besitzt im ersten Abschnitt sieben Tragkettenförderer (Segmente mit drei Plätzen) für den Quertransport von Gitterboxen oder Paletten. Anstelle der Tragkettenförderer-Segmente werden in der zweiten Variante Rollenförderer mit drei Plätzen für den Längstransport untersucht. Durch den Längstransport kann die Anzahl an benötigten Fördermitteln auf sechs reduziert werden. Um den Weitertransport durch Rollenförderer untersuchen zu können, muss in der zweiten Variante ein Drehtisch eingesetzt werden.

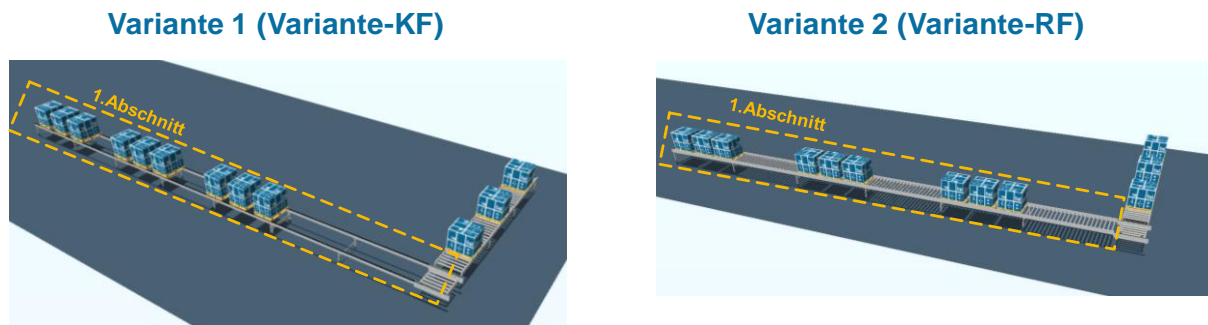


Abbildung 6-2: Varianten des Untersuchungsszenarios „Stetigförderanlage“

Mittels Expertengespräche erfolgt die Ermittlung der relevanten Kosten. Im betrachteten Fall sind die Beschaffungskosten von Kettenförderer-Segmenten mit drei Plätzen um ca. 15 Prozent geringer als bei Rollenförderer-Segmenten mit der gleichen Anzahl an Plätzen. Zusätzlich wurden die Wartungskosten und Kosten für Ersatzteile ermittelt. Die Wartungshäufigkeit ist abhängig von der Anlagennutzung. Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage an fünf Tagen pro Woche sowie in einem 2-Schicht-Betrieb eingesetzt wird. Für die Ermittlung der jährlichen Energiebedarfe und somit der Energiekosten wird das implementierte Werkzeug verwendet. Die Eingangsdaten zeigt Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: Eingangsdaten für das Szenario „Stetigförderanlage“

Eingabegröße	Wert	Eingabegröße	Wert (KF/RF)
Masse Fördereinheit [kg]	250	Segmentlänge [m]	3,6 / 4,2
Fördereinheiten pro Jahr	25.000	Förderrichtung	quer / längs
Überschreiten des Abrisskriteriums	0 %	Geschwindigkeit [m/s]	0,3 / 0,3
Mindestabstand [m]	0,2	Leerlaufleistung [W]	350 / 250
Betriebsweise	3er-Block		

Die Berechnung des Werkzeugs ergibt einen um 47,51 Prozent geringeren Jahresenergiebedarf für die Variante „Rollenförderer“ als für die Variante „Kettenförderer“. Für Stetigförderanlagen, die in einem 2-Schicht-Betrieb eingesetzt werden, kann nach *Gudehus* [Gud-2010] eine Abschreibungszeit von 15 Jahren angenommen werden. Aus diesem Grund wird der Betrachtungszeitraum für die Untersuchung der Lebenszykluskosten auf 15 Jahre festgelegt. Experten rechnen mit steigenden Strompreisen in den nächsten Jahren [Kno-2012, Zen-2013]. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen wird von einer jährlichen Steigerung von drei Prozent aus-

gegangen. Als Ausgangsstrompreis wird der vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft [BDE-2013] analysierten durchschnittlichen Industriestrompreis für das Jahr 2013 von 14,87 Cent pro kWh verwendet. Die Lebenszykluskosten der Varianten zeigt Tabelle 6-3.

Tabelle 6-3: Lebenszykluskosten des Szenarios „Stetigförderanlage“

	Kettenförderer		Rollenförderer		relative Abweichung
	Absolutwerte ¹	Anteile an Lebenszykluskosten	Absolutwerte ¹	Anteile an Lebenszykluskosten	
Entstehungskosten	17.751 €	88,76 %	17.840 €	89,88 %	0,50 %
Betriebskosten	2.248 €	11,24 %	2.007 €	10,11 %	-10,72 %
Instandhaltungs- und Wartungskosten	1.741 €	8,71 %	1.741 €	8,77 %	0,00 %
Energiekosten	507 €	2,53 %	266 €	1,34 %	-47,51 %
Lebenszykluskosten (Summe)	20.000 €	100 %	19.848 €	100 %	-0,76 %

Das Ergebnis der Lebenszykluskostenbetrachtung zeigt die Vorteilhaftigkeit der energiesparenderen Variante auf. Im betrachteten Einsatzfall ergeben sich über den Betrachtungszeitraum Einsparungen von ca. 0,8 Prozent bezogen auf die gesamten Lebenszykluskosten der Variante Kettenförderer. Die berechneten Energiekosten besitzen im betrachteten Fall mit 2,53 Prozent (Variante „Kettenförderer“) bzw. 1,34 Prozent (Variante „Rollenförderer“) einen geringen Anteil an den gesamten Lebenszykluskosten der einzelnen Variante. Der größte Anteil an den Betriebskosten entfällt auf die Instandhaltungs- und Wartungskosten mit jeweils einem Anteil zwischen acht und neun Prozent an den Lebenszykluskosten. Ein Grund für die geringe Bedeutung der Energiekosten im betrachteten Szenario stellt die geringe Systemlast von 25.000 Fördereinheiten pro Jahr dar. Abbildung 6-3 zeigt die Anteile der einzelnen Kostenbestandteile für einen Anwendungsfall mit 100.000 Fördereinheiten pro Jahr. Für diesen Fall besitzen die Energiekosten bereits eine größere Bedeutung als die Wartungs- und Instandhaltungskosten.

¹ Absolutwerte entsprechen nicht den realen Kosten

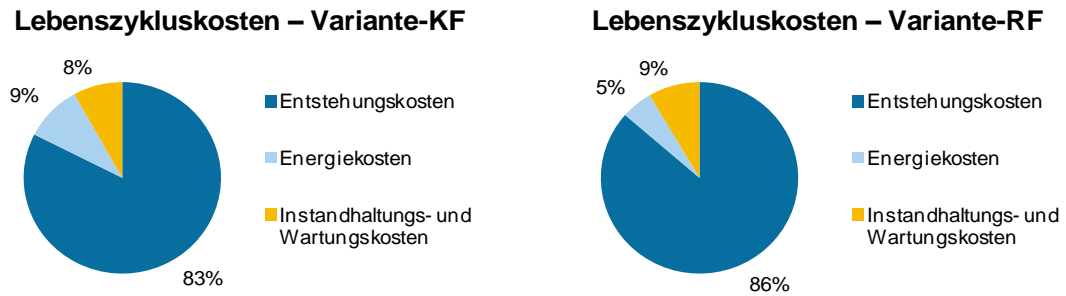


Abbildung 6-3: Kostenstruktur der Varianten für 100.000 Fördereinheiten pro Jahr

Fazit

Für das untersuchte Szenario besitzen die Energiekosten einen Anteil von 1,3 bis 2,5 Prozent an den Lebenszykluskosten einer Stetigförderanlage. Erfolgt eine Erhöhung der Systemlast, werden die Energiekosten immer stärker in den Vordergrund gerückt. Insgesamt kann jedoch festgehalten werden, dass erst die Betrachtung der Energiekosten zur Auswahl der Variante mit den geringsten Lebenszykluskosten führt. Bei einer reinen Betrachtung der Entstehungskosten würde die Variante mit Kettenförderern ausgewählt werden, welche die Variante mit den höchsten Lebenszykluskosten ist.

6.1.4 Einsparpotenziale im Szenario „Erweiterung AKL“

Aufgrund der Klassifikation der Verbraucher erfolgt im Szenario „Erweiterung AKL“ eine Fokussierung auf die Regalbediengeräte. Es soll die Verwendung der verschiedenen Antriebskonfigurationen untersucht werden. Somit ergeben sich eine Variante mit Netzurückspeisung und eine Variante ohne Rückspeiseeinheit sowie ohne Zwischenkreiskopplung. Beide Varianten besitzen die gleichen Instandhaltungs- und Wartungskosten pro Jahr und weisen einen geringen Unterschied bei den Entstehungskosten auf (vgl. Tabelle 6-4).

Für die Berechnung der Energiekosten wird davon ausgegangen, dass das Regalbediengerät durchgängig an 365 Tagen im Jahr aktiv ist und insgesamt 200.000 Ein- und Auslagerungen erfolgen. Der Betrachtungszeitraum wird analog zur Abschreibungszeit bei einem 2-Schicht-Betrieb mit 10 Jahren gewählt (vgl. [Gud-2010]). Darüber hinaus wird wie im vorherigen Szenario von jährlichen Strompreissteigerungen von drei Prozent sowie einen Basisstrompreis von 14,87 Cent pro kWh ausgegangen. Die berechneten Lebenszykluskosten zeigt Tabelle 6-4.

Tabelle 6-4: Lebenszykluskosten des Szenarios „Erweiterung AKL“

	Regalbediengerät mit Bremswiderständen		Regalbediengerät mit Rückspeiseeinheit		relative Abweichung
	Absolutwerte ²	Anteile an Lebenszykluskosten	Absolutwerte ²	Anteile an Lebenszykluskosten	
Entstehungskosten	131.020 €	65,51 %	132.561 €	66,90 %	1,18 %
Betriebskosten	68.980 €	34,49 %	65.572 €	33,10 %	-4,94 %
Instandhaltungs- und Wartungskosten	47.784 €	23,89 %	47.784 €	24,12 %	0,00 %
Energiekosten	21.196 €	10,6 %	17.788 €	8,98 %	-16,07 %
Lebenszykluskosten (Summe)	200.000 €	100 %	198.134 €	100 %	-0,93 %

Die Betrachtung der Lebenszykluskosten führt zur Wahl der Antriebsvarianten mit Rückspeiseeinheit, die im Betrachtungszeitraum zu Ersparnissen von ca. einem Prozent bezogen auf die gesamten Lebenszykluskosten führen. Im betrachteten Fall besitzen die Energiekosten einen Anteil von 8,98 bis 10,6 Prozent an den gesamten Lebenszykluskosten. Im Gegensatz zur reinen Betrachtung der Entstehungskosten, führt innerhalb des Szenarios „Erweiterung AKL“ erst die detaillierte Untersuchung der Energiekosten, zur optimalen Lösung in Bezug auf die gesamten Lebenszykluskosten.

6.1.5 Einsparpotenziale im Szenario „Manuell vs. Automatisch“

Bei dem Szenario „Manuell vs. Automatisch“ werden ein mittels Hochregalstapler bedientes Lager mit einem automatischen Hochregallager (HRL) hinsichtlich des jährlichen Energiebedarfs verglichen. Die Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs für das HRL erfolgt mit Hilfe des implementierten Softwarewerkzeugs. Für das manuell bediente Lager wird auf das im Abschnitt 3.8 erstellte Modell zurückgegriffen.

Für beide Szenarien gelten folgende Annahmen:

- Chaotische (freie) Lagerplatzzuordnung über alle Regale,
- Ein- und Auslagerungen sind auf alle Regalgassen gleichverteilt.

² Absolutwerte entsprechen nicht den realen Kosten

Das gesamte Vorgehen für die Energiebedarfsermittlung des mittels Hochregalstapler bedienten Lagers veranschaulicht Abbildung 6-4.

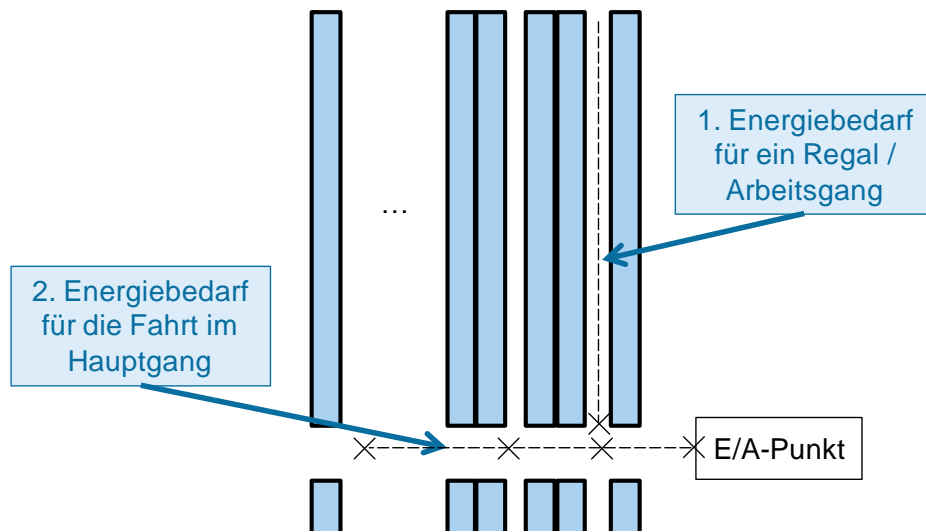


Abbildung 6-4 : Vorgehen bei Ermittlung des Energiebedarfs für das mit Hochregalstaplern bediente Lager

Die Energiebedarfsermittlung für das mit Hochregalstaplern bediente Lager beruht auf einer vollständigen Enumeration für ein Regal. Im ersten Schritt wird für alle Fächer einer Regalwand der Energiebedarf für ein Einzelspiel für Ein- bzw. Auslagerungen mit dem im Abschnitt 3.8 vorgestellten Ansatz bestimmt. Auf Basis dessen kann der mittlere Energiebedarf für eine Ein- bzw. Auslagerung und im nächsten Schritt der gesamte jährliche Energiebedarf des Flurförderzeugs innerhalb der Arbeitsgänge $E_{Arbeitsgang}$ ermittelt werden.

$$E_{Arbeitsgang} = N_{ESE} \cdot E_{ESE} + N_{ESA} \cdot E_{ESA} \quad (6-1)$$

mit den bereits im Abschnitt 3.7 eingeführten Bezeichnungen.

Danach erfolgt die Bestimmung der benötigten Energie für ein Spiel entlang des Hauptganges vom E/A-Punkt zu den einzelnen Kreuzungen zwischen Arbeitsgang und Hauptgang. Der jährliche Energiebedarf für die Förderung entlang des Hauptganges $E_{Hauptgang}$ berechnet sich durch:

$$E_{Hauptgang} = \sum_{r=1}^R \frac{(N_{ESE} + N_{ESA}) \cdot E_r}{R} \quad (6-2)$$

mit E_r für den Energiebedarf eines Spiels vom E/A-Punkt zum Arbeitsgang r und R für die Anzahl an Arbeitsgängen. Der Gesamtenergiebedarf berechnet sich dann unter der Berücksichtigung des Wirkungsgrads für die Batterieladung η_{Ladung} durch:

$$E_{Gesamt} = \frac{E_{Arbeitsgang} + E_{Hauptgang}}{\eta_{Ladung}} \quad (6-3)$$

Für die Berechnung der Energiekosten wird von einem 2-Schicht-Betrieb und 200 Arbeitstagen ausgegangen. Innerhalb des Szenarios werden 210.000 Lagerspiele pro Jahr betrachtet. Insgesamt ergibt sich für dieses Szenario ein Energiebedarf von 47.048 kWh.

Die Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs für das HRL erfolgt mithilfe des implementierten Softwarewerkzeugs. Das Lager besitzt drei Regalbediengeräte und eine Kapazität von 15.000 Stellplätzen. Das analytische Berechnungsmodell ermittelt einen jährlichen Energiebedarf von 45.265 kWh, was einer Abweichung von 3,8 Prozent verglichen mit dem Energiebedarf des staplerbedienten Systems entspricht.

Das Ergebnis lässt keine Aussage über die energetische Vorteilhaftigkeit einer Variante zu, da die Abweichung im Unschärfe-Bereich der Untersuchung liegt. Im Gegensatz zu den anderen Untersuchungen werden in diesem Fall unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet. Um allgemeingültige Aussagen treffen zu können zeigt sich, dass weitere detaillierte Untersuchungen erfolgen müssen.

6.2 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die im Rahmen des Forschungsprojekts erarbeiteten Ergebnisse sollen in eine für den Logistikplaner nutzbare Form umgesetzt werden, was durch die Erstellung von Handlungsempfehlungen ermöglicht wird. Die abgeleiteten Handlungsempfehlungen sind im Softwarewerkzeug in Form von pdf-Dokumenten integriert, so dass dem Nutzer die Gesamtergebnisse des Projekts zur Verfügung stehen.

Bevor Handlungsempfehlungen entwickelt werden können, muss das Ziel der jeweiligen Handlungsempfehlung festgelegt werden. Dafür erfolgt die Identifikation von Handlungsfeldern, denen entsprechende Handlungsempfehlungen zugeordnet werden. Sowohl für Regalbediengeräte als auch für Stetigförderanlagen können folgende Handlungsfelder identifiziert werden:

- Auswahl Fördermittel / Komponenten,
- Auswahl Betriebsstrategien.

Ein weiteres Handlungsfeld, für das eine Handlungsempfehlung entwickelt wird, stellt die Implementierung von Mess- und Visualisierungssystemen dar.

6.2.1 Struktur der Handlungsempfehlungen

Jede Handlungsempfehlung besitzt eine einheitliche Struktur, die den Anwendern der Handlungsempfehlungen eine zielgerichtete und aufwandsarme Darstellung der Ergebnisse ermöglichen soll. Eine Handlungsempfehlung umfasst die Abschnitte Beschreibung des Handlungsfeldes, Aufzeigen der Gestaltungsmöglichkeiten innerhalb des Handlungsfelds sowie eine abschließende konkrete Handlungsempfehlung.

Der Abschnitt „Beschreibung des Handlungsfelds“ dient der Einführung sowie der Einordnung des Handlungsfelds in den gesamten Kontext. Nachfolgend werden die Gestaltungsmöglichkeiten innerhalb des entsprechenden Handlungsfeldes aufgezeigt. Dafür werden die durchgeführten Untersuchungen und erarbeiteten Ergebnisse im Rahmen des Forschungsprojekts sowie an anderen Forschungsstellen aufgezeigt und bewertet. Im abschließenden Abschnitt erfolgt die Nennung konkreter Empfehlungen für den spezifischen Einsatzfall. Dabei geschieht eine Berücksichtigung der technischen und betrieblichen Voraussetzungen. Diese Rahmenbedingungen werden unter anderem durch einen Strukturbaum beachtet, der dann für den konkreten Einsatzfall Handlungsempfehlungen gibt.

6.2.2 Komponentenwahl bei Regalbediengeräten

Für den Einsatz von Regalbediengeräten besteht prinzipiell die Wahl zwischen drei Antriebskonfigurationen, die einen erheblichen Einfluss auf den Energiebedarf besitzen. Bei der Wahl der Antriebskonfiguration bestehen aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens bei der Bahnplanung Wechselwirkungen mit den eingesetzten Betriebsstrategien eines Regalbediengeräts. Mittels eines mechatronischen Simulationsmodells erfolgte die Untersuchung der verschiedenen Antriebskonfigurationen ohne die Berücksichtigung der Verfahstrategien (vgl. Abbildung 6-5). Es zeigte sich, dass sowohl für AKL als auch für HRL die Antriebskonfiguration „mit Rückspeiseeinheit“ zu hohen Energieeinsparungen im Vergleich zu einer Antriebskonfiguration ohne Zwischenkreiskopplung bzw. ohne Zwischenkreiskopplung und ohne Netzurück-

speisung führt. Diverse Literaturquellen bestätigen dies [Bru-2012, Sch-2010, Muh-2011].

Somit ist aus energetischer Sicht ein Einsatz von Regalbediengeräten mit einer Netzurückspeiseeinheit, die die zurückgewonnene Energie durch Senk- oder Verzögerungsvorgänge nutzt, zielführend.

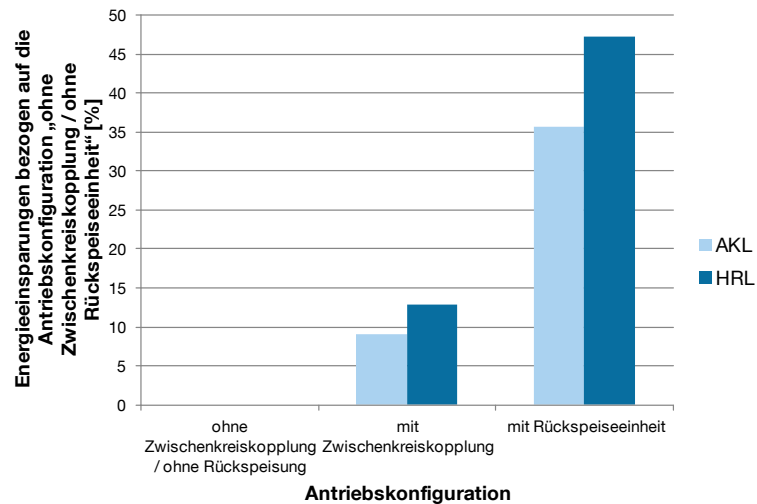


Abbildung 6-5: Energieeinsparungspotenzial auf Basis einer Simulation von 1000 Doppelspielen bei einer chaotischen Lagerung

6.2.3 Auswahl der Fördermittel / Komponenten bei Stetigförderanlagen

Die Planung von Stetigförderanlagen für Großladungsträger (GLT) umfasst unter anderem die Wahl des geeigneten Fördermittels. Für die horizontale Förderung von Großladungsträgern stehen im Allgemeinen angetriebene Rollenbahnen sowie Tragkettenförderer zur Verfügung. Diese können jeweils über Frequenzumrichter oder Motorstarter angetrieben und gesteuert werden (vgl. Abschnitt 3.6.2). In dieser Handlungsempfehlung sollen die möglichen Konzepte im Hinblick auf ihre Energieeffizienz verglichen und bewertet werden.

Sowohl Tragkettenförderer als auch angetriebene Rollenbahnen eignen sich für den horizontalen Transport von Großladungsträgern, jedoch muss bei angetriebenen Rollenbahnen auf eine ausreichende Auflagefläche geachtet werden. Aus diesem Grund kann der Transport von Paletten auf Rollenbahnen nur in Längsrichtung erfolgen.

Für die Untersuchung des Energiebedarfes von Tragkettenförderern und Tragrollenförderern wurden Messungen durchgeführt und analytische Modelle für die Ermitt-

lung des jährlichen Energiebedarfs entwickelt. Es zeigt sich, dass die Verwendung von Rollenförderern anstelle von Tragkettenförderern aufgrund der geringeren Reibverluste zu deutlich geringeren Energiebedarfen führt. *Muhlfinger* [Muh-2011] bestätigt dies für 3-Platz-Segmente. Mittels des implementierten Werkzeugs kann die ein-satzfallspezifische Differenz der jährlichen Energiebedarfe ermittelt werden.

Für die Ansteuerung der Antriebe von Stetigfördermitteln eignen sich Motorstarter und Frequenzumrichter. Abbildung 6-6 zeigt die durch Messungen ermittelten Leistungsverläufe von Frequenzumrichter und Motorstarter gesteuerte Tragkettenförderer. Durch die Verwendung eines Motorstarters entsteht eine deutliche Leistungsspitze, welche bei der Netzauslegung berücksichtigt werden muss.

Die durchschnittliche Beladung innerhalb von Lagersystemen beträgt meist nur ca. 20% der Maximallast, wodurch die Antriebe meist nur im Teillastbetrieb eingesetzt werden [Gry-2010]. Durch einen Frequenzumrichter kann dieser ineffiziente Teillastbetrieb mit extrem schlechten Wirkungsgraden durch Absenken der Motorspannung vermieden werden [Gry-2010].

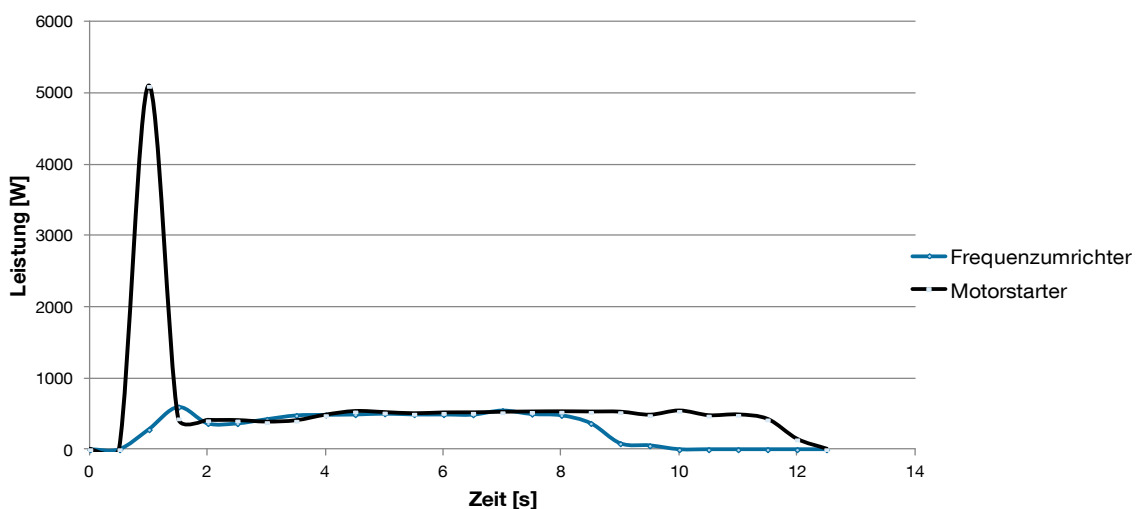


Abbildung 6-6: Leistungsverläufe von mittels Frequenzumrichter sowie Motorstarter angesteuerte Antrieben

Um einen energieeffizienten Betrieb einer Stetigförderanlage zu erreichen, können zusammenfassend folgende Empfehlungen gegeben werden:

Wenn eine Nutzung nicht durch andere Restriktionen verhindert wird, sollen aus energetischer Sicht angetriebene Rollenbahnen, Tragkettenförderern vorgezogen werden. Beim Beschleunigen werden durch Nutzung von Frequenzumrichtern kleinere Anlaufleistungen nötig und die Motoren werden in effizienteren Wirkungsgradbereichen betrieben.

6.2.4 Handlungsempfehlung für energieeffiziente Betriebsstrategien für Regalbediengeräte

Mittels Betriebsstrategien kann die Steuerung von Regalbediengeräten beeinflusst werden. Es ist kein Eingriff in der Komponentenebene nötig und die Umsetzung ist somit auch für bestehende Anlagen relevant. Bereits im Abschnitt 4.2 fand eine detaillierte Betrachtung von energieeffizienten Lagerbewirtschaftungs- und Verfahstrategien statt. Die Empfehlung für die Einführung einer Zonierung sowie den Einsatz von Doppelspielen gilt für alle Lagerkonfigurationen. Jedoch muss die Auswahl von Verfahstrategien in Abhängigkeit von den Kriterien Lagertyp, Antriebskonfiguration, Durchsatzanpassung erfolgen. Der daraus resultierende Strukturbaum zeigt Abbildung 6-7.

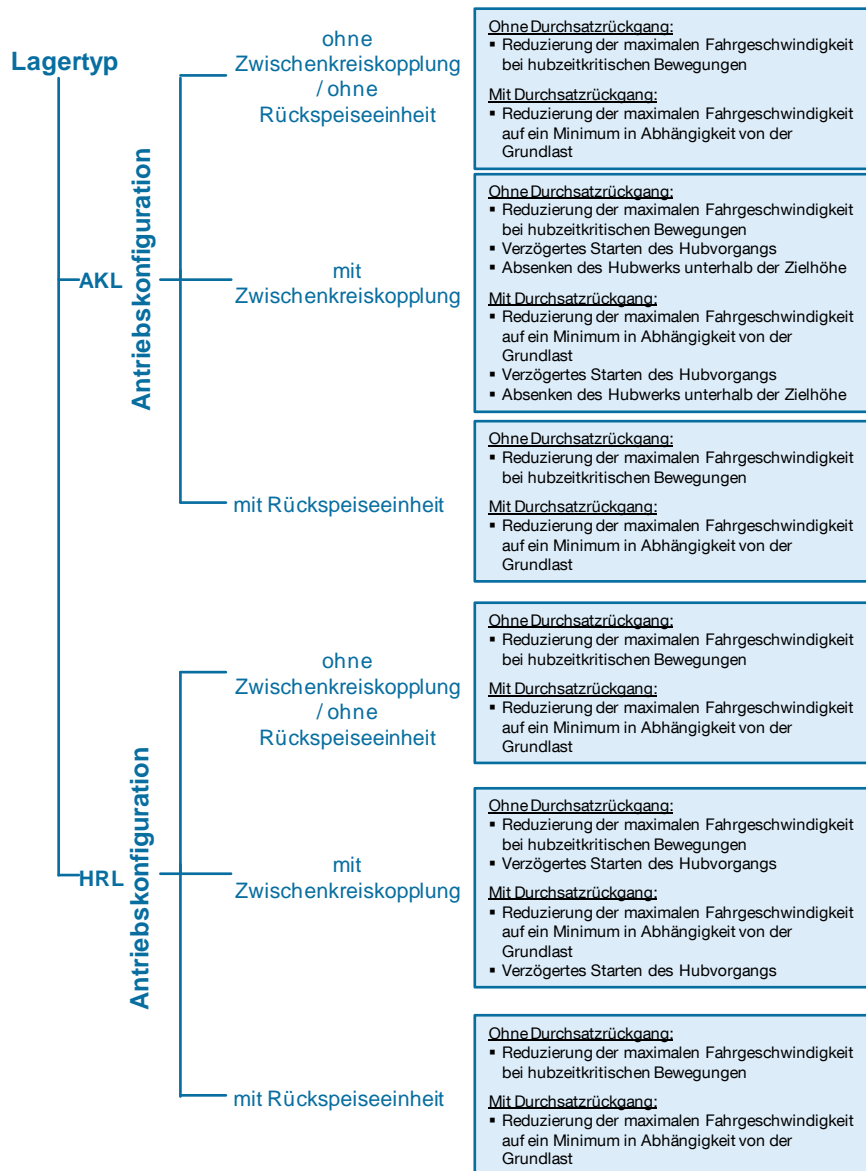


Abbildung 6-7: Handlungsempfehlung für energieeffiziente Verfahstrategien

6.2.5 Handlungsempfehlung für energieeffiziente Betriebsstrategien für Stetigförderanlagen

Die energieeffizienten Betriebsstrategien von Stetigförderern können in zyklusspezifische und zyklusübergreifende Betriebsstrategien unterteilt werden. Im Abschnitt 4.1 erfolgten ausführliche Untersuchungen dazu. Im Folgenden werden die Ergebnisse zusammengefasst:

- Es ist auf minimale Nachlaufzeiten von jedem einzelnen Fördersegment bei der Implementierung der Steuerung zu achten.
- Die Einführung einer Blockbildung reduziert die Laufzeit je Fördereinheit. Ein weiterer positiver Effekt der Blockbildung ist die Erhöhung der mechanischen Leistung durch die größere Fördermasse, was im Teillastbetrieb zu höheren Motorwirkungsgraden führt.
- Einen negativen Effekt der Blockbildung stellt die Erhöhung der Durchlaufzeiten der einzelnen Fördereinheiten dar. Dieser Sachverhalt muss insbesondere bei Anlagen mit einer geringen Systemlast beachtet werden.

6.2.6 Handlungsempfehlungen zur Implementierung von Mess- und Visualisierungssystemen

Für die Ermittlung des Energiebedarfs intralogistischer Systeme geeignete Messtechnik unterscheidet sich unter anderem hinsichtlich des Einsatzortes. Es können sowohl mobile als auch festinstallierte Messgeräte eingesetzt werden. Nachfolgend soll die Wahl der geeigneten Mess- und Visualisierungssysteme durch Empfehlungen unterstützt werden.

Abbildung 6-8 zeigt den Aufwand für die Installation sowie für die Datengenerierung im laufenden Betrieb für verschiedene Messsysteme und Hierarchieebenen (Gebäude-, Bereichs- und Betriebsmittelstruktur) auf.

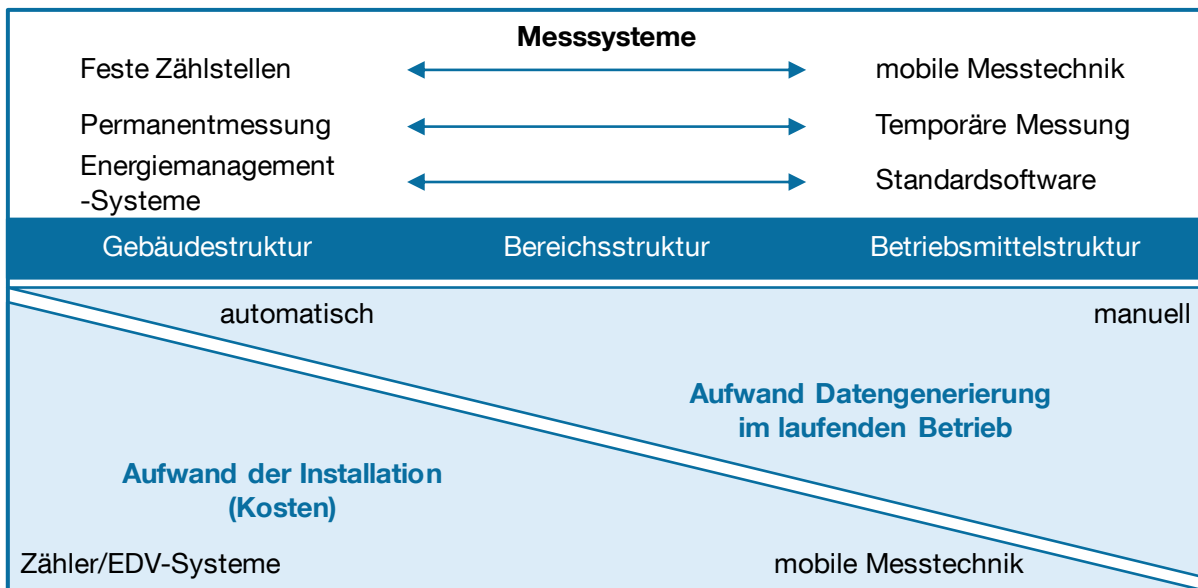


Abbildung 6-8: Aufwand und Eignung verschiedener Messsysteme [Eng-2009]

Daraus lässt sich ableiten, dass innerhalb von Logistiksystemen die Installation von festen Messgeräten nur für die größten Verbraucher erfolgen sollte. Zur Identifikation der größten Verbraucher ist eine Klassifikation denkbar (vgl. Abschnitt 3.3). Zusätzlich sollte bei der Einführung von Messsystemen die Kostenstellenstruktur Berücksichtigung finden [Hes-2012], um unter anderem die Energiekosten verursachergerecht zu verrechnen.

Wird eine feste Messtechnik installiert, so sollte auch die Implementierung eines Visualisierungssystems erfolgen. Dieses ermöglicht die automatische Aufbereitung und somit aufwandsarme Analyse der Energieverbraucher. Solche Systeme sind Bestandteile eines Lastmanagements, welches z. B. bei einer Limitüberschreitung des vorgegebenen Lastwertes warnt [Kle-1998]. Ebenso lässt sich anführen, dass ein optimales Energiemanagement die Visualisierung von Leistungsverläufen sowie die Zustände der Verbraucher voraussetzt [Jen-1998].

Soll eine detaillierte Untersuchung für die monetäre Vorteilhaftigkeit der Einführung von Mess- und Visualisierungssystemen erfolgen, ist eine einsatzfallspezifische wirtschaftliche Bewertung durchzuführen. Hierbei sei auf das Modell zur wirtschaftlichen Bewertung von Energiedatenerfassungssystemen von Müller, Buschmann und Wonneberger [Mül-2011a] verwiesen.

7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Energieeffizienz stellt aufgrund von ökonomischen, ökologischen und soziologischen Gründen einen aktuellen Trend dar, der auch für die Planung von Logistiksystemen von Bedeutung ist. Innerhalb des Forschungsvorhabens „Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs“ stehen Ansätze für die Bestimmung des Energiebedarfs und energieeffiziente Betriebsstrategien von logistischen Anlagen im Fokus. Ziel ist, die Berücksichtigung des Energiebedarfs bei der Auswahl von Planungsalternativen zu erleichtern oder erst zu ermöglichen.

In den Grundlagenuntersuchungen für die Energiebedarfsermittlung stehen die Einflussgrößen auf den Energiebedarf sowie mögliche Ansätze und Werkzeuge zur Ermittlung des Jahresenergiebedarfs im Mittelpunkt. Darüber hinaus werden Messungen an Komponenten im Betrieb durchgeführt. Es zeigt sich, dass bestehende Ansätze bzw. Werkzeuge den Anforderungen nicht gerecht werden.

Um den jährlichen Energiebedarf schnell, aufwandsarm und bereits in der Planungsphase von Logistiksystemen zu ermitteln, werden analytische Modelle für Stetigförderanlagen sowie Regalbediengeräte entwickelt. Die Energiebedarfsermittlung von Stetigförderanlagen basiert auf einer zyklusabhängige Modellierung, wodurch eine Berücksichtigung der Betriebsweise sowie des Jahresdurchsatzes möglich wird. Auch beim analytischen Modell für Regalbediengeräte wird der Energiebedarf durchsatzabhängig mittels der Anzahl an Einzel- bzw. Doppelspielen abgebildet. Für die einzelnen Spiele wird ein mittlerer Energiebedarf bestimmt. Zusätzlich werden die durch Stillstandszeiten verursachten Standby-Verluste berücksichtigt.

Beide Modelle werden in einem Softwarewerkzeug implementiert, welches eine praktikable Anwendung ermöglicht. Innerhalb des Werkzeugs können verschiedene Planungsvarianten angelegt, deren jährlicher Energiebedarf bestimmt und hinsichtlich der Energiekosten verglichen werden. Um das volatile Verhalten des Strompreises bei dieser Betrachtung zu berücksichtigen, können verschiedene Strompreisentwicklungen abgebildet werden.

Durch Betriebsstrategien kann der Energiebedarf verschiedener Fördermittel merklich reduziert werden. Energieeffiziente Betriebsstrategien von Regalbediengeräten können in Lagerbewirtschaftungs- und Verfahstrategien unterteilt werden. Die Untersuchungen von energieeffizienten Verfahstrategien zeigen die Vorteile auf. Die Abhängigkeit zwischen dem Lagertyp sowie der Antriebskonfiguration wird deutlich herausgestellt. Für Stetigförderanlagen stellt die Blockbildung eine Betriebsstrategie dar, die sowohl die Laufzeit als auch den Energiebedarf reduziert. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Handlungsempfehlungen für die Nutzung der Ergebnisse generiert. Auch die weiteren Projektergebnisse werden in Handlungsempfehlungen überführt und in das Softwarewerkzeug eingebunden.

Mittels Lebenszykluskostenuntersuchungen für verschiedene Szenarien kann die Bedeutung der Energiekosten herausgestellt werden. Die Energiekosten sind abhängig vom Strompreis, der einen komplexen Betrachtungsgegenstand darstellt. Dieser setzt sich aus einer Vielzahl an Komponenten zusammen und ist von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich, was eine Abstraktion bei der Betrachtung notwendig macht.

Mit den erarbeiteten Berechnungsansätzen und abgeleiteten Handlungsempfehlungen kann eine Berücksichtigung des Energiebedarfs in der Planungsphase von Logistiksystemen erfolgen.

7.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die Ergebnisse kommen in erster Linie jedem Betreiber von intralogistischen Systemen zu Gute. Ihnen werden neue Ansätze bei der Prozessoptimierung durch die verstärkte Fokussierung auf Energiekosten als Entscheidungskriterium in der Neu- und Umplanung geboten. Externen Beratern stehen die frei zugänglichen Forschungsergebnisse als Grundlage für die Konzipierung neuer Dienstleistungen (z. B. Energiecheck für logistische Anlagen) zur Verfügung.

Eine Planungsvorgehensweise, die auch die Energiekosten der Umsetzungsalternativen während der Nutzungsdauer verstärkt bei der Entscheidungsfindung mit einbezieht, kann einen deutlichen Wettbewerbsvorteil schaffen. Dieser Vorteil ergibt sich durch nachhaltigere Planungsergebnisse. Auch Hersteller innovativer und energieeffizienter intralogistischer Anlagen können von der Erweiterung der Logistiksystemplanung profitieren. Die Vorteile energieeffizienter Anlagen mit einem möglicherweise

höheren Anschaffungspreis kommen durch eine Betrachtung der Lebenszykluskosten stärker zum Tragen.

Das entwickelte Planungswerkzeug zur erweiterten Logistiksystemplanung inkl. Maßnahmenkatalog und Berechnungsmodellen steht den Unternehmen zur Verfügung und ermöglicht eine zielgerichtete und effiziente Anwendung der im Rahmen des Projekts erzielten Ergebnisse.

7.3 Ausblick

Durch das Forschungsprojekt „Erweiterte Logistiksystemplanung“ konnten Modelle für die Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs entwickelt und die Vorteilhaftigkeit durch die Berücksichtigung der Energiekosten bereits in der Planungsphase aufgezeigt werden. Die analytischen Modelle für die Bestimmung des Energiebedarfs wurden bisher an mehreren Einzelmessungen validiert. In Zukunft werden weitere Messungen über einen längeren Zeitraum erfolgen um eine umfangreichere Validierung sicherzustellen. Auch die Übertragung der Ergebnisse auf die Fördertechnik für Kleinladungsträger kann auf Basis der vorgestellten Modelle erfolgen.

Ein weiteres Handlungsfeld für die energieeffiziente Planung von Logistiksystemen stellt die Layoutplanung dar. Gerade für die energieeffiziente Gestaltung von Lager-systemen müssen noch ausführliche Untersuchungen erfolgen, deren Ergebnisse dann in Handlungsempfehlungen umgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [ABM-2013] ABM Greiffenberger: Vorteile / Anwendungsbeispiele.
http://www.abm-antriebe.de/1364_Vorteile_8200_Anwendungs_beispiele.html (Aufruf am 17.10.2013).
- [All-1999] Allgayer, F.: Computerunterstützte Planung von Materialflußsystemen auf Basis statischer Materialflüsse. Dissertation, München, Technische Universität München. 1999.
- [Arn-2009] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer, Berlin, Heidelberg. 2009.
- [Axm-2003] Axmann, N.: Stückgutförderer - Handbuch der Materialflusstechnik. Expert-Verl., Renningen. 2003.
- [BDE-2013] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Strompreisanalyse Mai 2013.
[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/\\$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/123176ABDD9ECE5DC1257AA20040E368/$file/13%2005%2027%20BDEW_Strompreisanalyse_Mai%202013.pdf) (Aufruf am 31.10.2013).
- [Bei-2010] Beitelschmidt, M.; Schimke, R.; Tempelhahn, C.; Müller, J.; Reiß, J.: Effiziente Energierückgewinnung in dieselelektrischen Hafenmobilkranen. In: Tagungsband zur 18. Internationale Kranfachtagung Bochum (2010), S. 167–179.
- [Ber-1989] Berents, R.; Maahs, G.: Handbuch der Kettentechnik. Arnold & Stolzenberg, Einbeck. 1989.
- [Ber-2012] Berger, U.; Wolff, D.; Kulus, D.: Einsatz digitaler Techniken zur Steigerung der Energieeffizienz in der Automobilindustrie. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 107 (2012) Nr.9, S. 587–590.
- [Bla-2009] Blasius, J.: Energieeffizienz im Fokus der Intralogistik. In: IT&PRODUCTION (2009) Nr.06, S. 1–2.
- [Bod-2011] Bode, M.; Bünting, F.; Geissdörfer, K.: Rechenbuch der Lebenszykluskosten - Ein Leitfaden mit Rechenmodell und Arbeitshilfen. VDMA-Verl., Frankfurt, M.. 2011.
- [Bög-2011] Böge, A.: Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden. 2011.

- [Bra-2012] Braun, M.; Schönung, F.; Furmans, K.: Energieeffizienz beim Lager und Kommissioniervorgang. In: ProductlvyTy Management, Jg. 17 (2012) Nr.4, S. 29–32.
- [Bra-2013] Braun, M.; Linsel, P.; Furmans, K.: 24-Volt-Antrieb in der Stetigförderertechnik - Antriebsspannung und Systembetrachtung. In: Logistik für Unternehmen (2013) Nr.10, S. 46–49.
- [Bru-2013] Bruns, R.; Günthner, W. A.; Furmans, K.; Schilling, T.; Amberger, M.; Braun, M.; Linsel, P.: Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik. Forschungsbericht, Hamburg, München, Karlsruhe, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg; Technische Universität München; Karlsruher Institut für Technologie. 2013.
- [Bun-1992] Bundesamt für Konjunkturfragen: Strom rationell nutzen. vdf Verlag der Fachvereine an den schweizerischen Hochschulen und Techniken, Zürich. 1992.
- [Bün-2008] Bünting, F.: Lebenszykluskostenbetrachtungen bei Investitionsgütern. In: Schweiger, S. (Hrsg.): Total Cost of Ownership. Betriebswirtschaftlicher Verlag Gabler, Wiesbaden: 2008, S. 35–50.
- [Clé-2010] Clénet, D.: Optimising energy efficiency of conveyors. <http://www.schneider-electric.us/documents/original-equipment-manufacturers/pdf/Energy-efficiency-of-conveyors.pdf> (Aufruf am 21.10.2013).
- [Con-2013] Control Techniques GmbH: Software. http://www.controltechniques.de/produkte/ac_drives/affinity/software.aspx (Aufruf am 10.10.2013).
- [Deu-2012] Deutscher Industrie- und Handelskammertag: Faktenpapier Strompreise in Deutschland, Berlin. www.dihk.de/presse/jahresthema-2012/faktenpapier-strompreise.pdf (Aufruf am 03.11.2013).
- [Die-2008] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. In: wt Werkstattstechnik online, Jg. 98 (2008) Nr.7/8, S. 640–645.
- [DIN 15201-1] DIN 15201-1, April 1994: DIN 15201 Teil 1: Stetigförderer - Benennungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [Dra-2003] Draganescu, F.; Gheorghe, M.; Doicin, C.: Models of machine tool efficiency and specific consumed energy. In: Journal of Materials Processing Technology (2003), S. 9–15.

- [Dür-2001] Dürrschmidt, S.: Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion. Dissertation, München, Technische Universität München. 2001.
- [Egg-2011] Eggert, J.: Empirische Entwicklung eines applikationsadaptiven Antriebskonzeptes am Beispiel eines intralogistischen Fördersystems. Dissertation, Dortmund, Technische Universität Dortmund. 2011.
- [Eng-2009] Engelmann, J.: Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken. Dissertation, Technische Universität Chemnitz. 2009.
- [Ert-2013] Ertl, R.; Günthner, W.: Energieeffiziente Bahnplanung von Regalbediengeräten - Zwischenkreis ermöglicht einen niedrigen Gesamtverbrauch. In: Hebezeuge Fördermittel (2013) Nr.1-2, S. 26–29.
- [Eur-2009a] Europäischen Union: VERORDNUNG (EG) Nr. 640/2009 DER KOMMISSION vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren - 640/2009, Europäischen Union. 2009.
- [Eur-2009b] Europäischen Union: 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, Europäischen Union. 2009.
- [FEM 9.851] FEM 9.851, 2001: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte, Federation Europeenne de la Manutention.
- [Fis-1983] Fischer, R.; Linse, H.: Elektrotechnik für Maschinenbauer. Teubner, Stuttgart. 1983.
- [Flu-2006] Fluke: 1735 Power Logger Bedienungshandbuch, Everett. 2006.
- [Fra-2008] Fraunhofer Gesellschaft: Energieeffizienz in der Produktion. http://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/forschungsthemen/energie/Studie_Energieeffizienz-in-der-Produktion.pdf (Aufruf am 31.10.2013).
- [Fra-2010] Fraunhofer IPA: TEEM - Total Energy Efficiency Management. 2010.
- [Fri-2006] Friedrich, F.: Beitrag zur Entwicklung von neuen Traglaschenketten in der Fördertechnik. Dissertation, Chemnitz, Technischen Universität Chemnitz. 2006.

- [Fur-2010] Furmans, K.; Mayer, S.; Berbig, D.; Stryja, C.: Abschlussbericht: Entwicklung eines flexiblen Fördersystems auf Basis baugleicher Einzelmodule, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie. 2010.
- [Geb-2013a] Gebhardt: Rollenförderer. http://www.gebhardt-foerdertechnik.de/fileadmin/gebhardt/media/310_01.pdf (Aufruf am 31.10.2013).
- [Geb-2013b] Gebhardt: Rollenförderer. http://www.gebhardt-foerdertechnik.de/fileadmin/gebhardt/media/510_01.pdf (Aufruf am 31.10.2013).
- [Geb-2013c] Gebhardt: Verfahrenswagen. http://www.gebhardt-foerdertechnik.de/fileadmin/gebhardt/media/552_01.pdf (Aufruf am 31.10.2013).
- [Gry-2010] Grytzka, A.: Drei Trends – ein Ziel. In: ANTREIBEN & BEWEGEN (2010) Nr.9, S. 42–44.
- [Gud-2010] Gudehus, T.: Logistik - Grundlagen - Strategien - Anwendungen. Springer, Berlin [u.a.]. 2010.
- [Gün-2009] Günthner, W. A.: Materialfluss und Fördertechnik. In: Klaus, P.; Krieger, W. (Hrsg.): GABLER LEXIKON LOGISTIK. Gabler Verlag / Springer Fachmedien, Wiesbaden: 2009, S. 419–422.
- [Gün-2011a] Günthner, W. A.; Atz, T.; Ulbrich, A.: Forschungsbericht: Integrierte Lagersystemplanung. Forschungsbericht, München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2011.
- [Gün-2011b] Günthner, W. A.; Schipplick, M.; Ertl, R.; Hahn-Woernle, P.: Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz – Teil I. In: f+h Report (2011) Nr.6, S. 276-279.
- [Gün-2011c] Günthner, W. A.; Schipplick, M.; Ertl, R.; Hahn-Woernle, P.: Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz – Teil II. In: f+h Report (2011) Nr.7-8, S. 326-329.
- [Gün-2013a] Günthner, W. A.: Planung technischer Logistiksysteme - Vorlesungsskriptum: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. 2013.
- [Gün-2013b] Günthner, W. A.; Ertl, R.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil I - Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: f+h - fördern und heben (2013) Nr.6, S. 12–14.
- [Gün-2013c] Günthner, W. A.; Ertl, R.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil II - Analytische Berechnung des mittleren Energiebedarfs

- von Regalbediengeräten mit Energierückspeisung. In: f+h - fördern und heben (2013) Nr.7-8, S. 12–15.
- [Hab-2013] Habenicht, S.; Ertl, R.; Günthner, W. A.: Analytische Energiebedarfsbestimmung von Intralogistiksystemen in der Planungsphase. In: Hompel, M. t. (Hrsg.): Tagungsband 9. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL), Technische Universität Dortmund, Dortmund, 17.+18. September 2013.
- [Hel-1998] Hellriegel, E.: Reduzierung des Energieverbrauchs von elektrischen Antrieben. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Innovationen bei der rationellen Energieanwendung, Verein deutscher Ingenieure, Dortmund, 3. + 4. März 1998.
- [Hes-2008] Hessel, V.: Energiemanagement. Publicis Publishing, Erlangen. 2008.
- [Hes-2012] Hesselbach, J.: Energie- und klimaeffiziente Produktion - Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Springer Vieweg, Wiesbaden. 2012.
- [Hof-2004] Hoffmann, K.; Krenn, E.; Stanker, G.: Maschinensätze, Fördermittel, Tragkonstruktionen. Oldenbourg, Wien. 2004.
- [Hom-2007] Hompel, M. t.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme - Förder- und Lagertechnik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 2007.
- [Hop-2012] Hoppe, A.; Wehking, K.-H.: Optimierung der Energieeffizienz von Intralogistikressourcen am Beispiel des Kettenförderers. In: Zadek, H. (Hrsg.): Tagungsband 8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V., Universität Magdeburg, Magdeburg, 26. und 27. September 2012.
- [Ind-2013] Industrie- und Handelskammer für München und Oberbayern: EDV-Tool. <http://www.ipp-bayern.de/catalogue/index.php?mode=getitem&CatID=4&NewsID=51¤tcat=17&item=514&lang=de> (Aufruf am 10.10.2013).
- [ISO 606] ISO 606, Juni 2012: Kurzgliedrige Präzisions-Rollen- und Buchsenketten, Befestigungslaschen und zugehörige Kettenräder, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Beuth Verlag GmbH,
- [Jen-1998] Jennert, O.; Schlücking, U.; Dubbel, A.: Energiebezugssteuerung bei einem Hüttenwerk. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Innovationen bei der rationellen Energieanwendung, Verein deutscher Ingenieure, Dortmund, 3. + 4. März 1998.
- [Jod-2012] Jodin, D.: Grundlagen zum Effizienzvergleich in der Materialflusstechnik. In: Tagungsband Logistikwerkstatt Graz 2012 (Hrsg.): Res-

- sourceneffizienz in der technischen Logistik, Technische Universität Graz, Graz, 21.06.2012.
- [Kie-2007] Kiel, E.: Antriebslösungen - Mechatronik für Produktion und Logistik. Springer, Berlin u.a. 2007.
- [Kle-1998] Kleinevoß, B.; Zartmann, P.: Der andere Trend - Die Leistungsspitze kappen. In: Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Innovationen bei der rationellen Energieanwendung, Verein deutscher Ingenieure, Dortmund, 3. + 4. März 1998.
- [Kno-2012] Knopf, B.; Pahle, M.; Edenhofer, Ottmar: Die Energiewende hängt vom Strompreis ab – aber noch fehlt eine robuste Energiestrategie. In: ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE TAGESFRAGEN, Jg. 62 (2012) Nr.6, S. 37–40.
- [Kon-2009] Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft - Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 2009.
- [Kud-2000] Kudlich, T.: Optimierung von Materialflußsystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. Dissertation, München, Technische Universität München. 2000.
- [Kuh-1988] Kuhnt, H.; Kurth, F.; Pajer, G.: Stetigförderer. Verl. Technik, Berlin. 1988.
- [Len-2013] Lenze AG: Drive Solution Designer.
http://download.lenze.com/TD/Drive%20Solution%20Designer__DS D%20%283.x%29__v3-1__DE.pdf (Aufruf am 10.10.2013).
- [Lip-2003] Lippolt, C.: Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung. Dissertation, Karlsruhe, Universität Karlsruhe. 2003.
- [Mah-2013] Mahrenholz, K.; Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Zusammenhang zwischen Durchsatzleistung und Energiebedarf eines Automatischen Kleinteilelagers. In: Wolf-Kluthausen (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2013. free beratung GmbH, Korschenbroich: 2013, S. 70–74.
- [Mar-2009] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden. 2009.
- [Mei-2006] Meinhardt, I.: Offenes Baukastensystem zur effizienten Dimensionierung von Materialflusssystemen. Forschungsbericht, Dresden: Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, Technische Universität Dresden. 2006.

- [Muh-2011] Muhlfinger, R.: Energieeffizienz in der Intralogistik. In: Zadek, H. (Hrsg.): Sustainable logistics. DVV Media Group, Hamburg: 2011, S. 104–118.
- [Mül-2009] Müller, E.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer Berlin, Berlin. 2009.
- [Mül-2011a] Müller, E.; Buschmann, M.; Wonneberger, K.-U.: Energiedatenerfassungssysteme - Wirtschaftliche Bewertung und Entscheidungsunterstützung. In: Industrie Management, Jg. 27 (2011) Nr.6, S. 34–37.
- [Mül-2011b] Müller, E.; Löffler, T.: Mess- und Automatisierungstechnik für die energieeffiziente Produktion. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Methoden der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung in der Produktionstechnik. Verl. Wiss. Scripten, Auerbach, Zwickau: 2011, S. 67–78.
- [Neu-2010] Neugebauer, R.: Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik, Technische Universität Chemnitz. 2010.
- [Nie-1983] Niemann, G.; Winter, H.: Maschinenelemente - Entwerfen, Berechnen und Gestalten im Maschinenbau; ein Lehr- und Arbeitsbuch. Springer, Berlin [u.a.]. 1983.
- [o. V.-2008] o. V.: (Energie) Sparen beim Fördern. In: Materialfluss (2008) Nr. Mai, S. 74–76.
- [o. V.-2011] o. V.: Asynchron- oder Synchronstechnik: wer arbeitet energieeffizienter? In: Konstruktion (2011) Nr.10, S. 2–4.
- [o. V.-2013] o. V.: e-SimPro.
<http://www.effizienzfabrik.de/sites/effizienzfabrik/files/Projektseiten%20e-simpro%20FINAL.pdf> (Aufruf am 31.10.2013).
- [Pro-2012] Projektbegleitender Ausschuss: 2. Projekttreffen zum Forschungsprojekt "Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs", Garching, 17.09.2012.
- [Ral-1998] Rall, B.: Analyse und Dimensionierung von Materialflußsystemen mittels geschlossener Warteschlangennetze. Dissertation, Karlsruhe. 1998.
- [Rex-2013] Rexnord: Die Auslegung des Kettentriebes.
http://www.rexnord.eu/fileadmin/Rexnord_Kette/PDF/Catalogue_Flyer/Auslegung_Kettentrieb_D.pdf (Aufruf am 16.10.2013).
- [Rie-2008] Riese, S.; Fräger, C.: Antriebslösungen - Formeln, Auslegung und Tabellen. Lenze AG, Aerzen. 2008.

- [Rud-2008] Rudolph, M.; Wagner, U.: Energieanwendungstechnik - Wege und Techniken zur effizienteren Energietechnik. Springer, Berlin. 2008.
- [Sch-2010] Schumacher, M.: Potentiale für die Energieeinspeisung am Beispiel RBG. Vortrag zur Tagung: VDMA: Infotag Lagertechnik, Frankfurt am Main, 10.06.2010.
- [Sch-2011a] Schönung, F.: Green Logistics - Bedeutung für die Intralogistik. Vortrag zur Tagung: 4. Logistikkongress Baden-Württemberg, Stuttgart, 10. November 2011.
- [Sch-2011b] Schmidt, T.; Schulze, F.: Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme, Logistics Journal,
- [Sch-2012a] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes. In: Zadek, H. (Hrsg.): Tagungsband 8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik e.V., Universität Magdeburg, Magdeburg, 26. und 27. September 2012.
- [Sch-2012b] Schumacher, M.: Energierückgewinnungspotentiale in der Intralogistik. Vortrag zur Tagung: Materialflusskongress, Garching, 30.03.2012.
- [Sch-2012c] Schulz, R.; Monecke, J.; Zadek, H.: Isoenergetische Fächer eines Automatischen Kleinteilelagers. In: Wolf-Kluthausen (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2012. free beratung GmbH, Korschbroich: 2012, S. 28–33.
- [Sch-2013] Schulz, R.; Mahrenholz, K.; Zadek, H.: Der Einfluss der Lagerbetriebsstrategie auf die Durchsatzleistung und den Energiebedarf von Regalbediengeräten. In: Schenk, M.; Zadek, H.; Müller, G. (Hrsg.): 18. Magdeburger Logistiktage, Magdeburg, 19. – 20. Juni 2013.
- [sch-2013] schweissaufsicht.ansa.ch: Lichtbogenhandschweissen. <http://schweissaufsicht.ansa.ch/lb/lb1.html> (Aufruf am 31.10.2013).
- [Sei-2006] Seidel, D.: Was Sie bei der Systemauswahl beachten sollten. In: f+h - fördern und heben (2006) Nr.6, S. 268–269.
- [SEW-2001] SEW Eurodrive: Praxis der Antriebstechnik. <http://www.sew-eurodrive.de/download/pdf/10522905.pdf> (Aufruf am 13.02.2012).
- [SEW-2011] SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG: Handbuch: SEW Workbench. 2011.
- [SEW-2013a] SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG: Energiereport. <http://energiesparen.sew-eurodrive.de/tools-energieeffizienz/energiereport.html> (Aufruf am 10.10.2013).

- [SEW-2013b] SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG: Energiesparrechner, 2013.
<http://www.ie-guide.de/de/energysavingscalculator> (Aufruf am 10.10.2013).
- [Sie-2013a] Siemens AG: Artgerechte Fördertechnik für jede Applikation.
<http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/drives/Docs/MC/Foerdertechnik-enriched-de.pdf> (Aufruf am 14.10.2013).
- [Sie-2013b] Siemens AG: Projektierungstool SIZER for Siemens Drives.
<https://www.automation.siemens.com/mcms/mc/de/software/antriebs-projektierungs-tool-sizer/Seiten/antriebsprojektierungstool-sizer.aspx> (Aufruf am 10.10.2013).
- [Sie-2013c] Siemens AG: SinaSave.
<http://www.industry.siemens.com/drives/global/de/projektierung-inbetriebnahme-software/sinasave/Seiten/Default.aspx> (Aufruf am 10.10.2013).
- [SSI-2013] SSI Schäfer Noell GmbH: Verschiebewagen mit Kettenförderer.
http://ssi-schaefer.cn/uploads/media/14_VW-KF_DVW-KF_DT_05.pdf (Aufruf am 31.10.2013).
- [Sta-2008] Statistisches Bundesamt: Güterverzeichnis für Produktionsstatistiken.
https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Verzeichnis/Gueterverzeichnis3200201099004.pdf?__blob=publicationFile (Aufruf am 12.10.2013).
- [Sum-1999] Sumpf, J.: Grenzbeanspruchung von Kunststoff-Führungsschienen für Rollenketten in der Fördertechnik. Dissertation, Chemnitz, Technische Universität Chemnitz. 1999.
- [Tay-1981] Taylor, W. B.: The use of life cycle costing in acquiring physical assets. In: Long Range Planning, Jg. 14 (1981) Nr.6, S. 32–43.
- [TGW-2009] TGW: Hoher Wirkungsgrad. In: LOG. (2009) Nr.4, S. 48.
- [Tie-2013] Tieste, K.-D.; Hanne, R.; Hilfert, S.; Kiel, E.: Energieeffizienz von Getriebemotoren mit Frequenzumrichter.
https://www.ostfalia.de/export/sites/default/de/pws/tieste/tieste_alt/fue/SPS2008-Tieste.pdf (Aufruf am 15.10.2013).
- [Top-2013] Topmotors: Wirkungsgrade.
http://www.topmotors.ch/_data/Merkblatt_Wirkungsgrade (Aufruf am 17.10.2013).
- [Tor-1997] Torke, H.-J.; Zebisch, H.-J.: Innerbetriebliche Materialflußtechnik - Funktion und Konstruktion fördertechnischer Einrichtungen und Geräte. Vogel, Würzburg. 1997.

- [Uni-2013a] Universität Magdeburg: Betriebsmittelbibliothek - Rollenbahn. https://ews.tu-dortmund.de/public/lecture/logedugate/public/bibliotheken/betriebsmittelbibliotheken/FT_Bibliothek/Rollenbahn/FT_03_Rollenbahn_Technische_Geraeteinformationen_08.htm (Aufruf am 31.10.2013).
- [Uni-2013b] Universität Magdeburg: Betriebsmittelbibliothek - Tragkettenförderer. https://ews.tu-dortmund.de/public/lecture/logedugate/public/bibliotheken/betriebsmittelbibliotheken/FT_Bibliothek/Tragkettenfoerderer/FT_03_Tragkettenfoerderer_Technische_Geraeteinformationen_06.htm (Aufruf am 31.10.2013).
- [Uni-2013c] Universität Stuttgart - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung: Messen von elektrischer Arbeit und Leistung. <http://www2.ier.uni-stuttgart.de/lehre/skripte/versuche/Messen/Messen.pdf> (Aufruf am 31.10.2013).
- [VDI 2198] VDI 2198, Juni 2011: VDI-Richtlinie 2198: Typenblätter für Flurförderzeuge, Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDI 2498-1] VDI 2498-1, April 2008: VDI-Richtlinie 2498 Blatt 1: Vorgehen bei einer Materialflussplanung - Grundlagen, Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDI 2693-1] VDI 2693-1, Januar 1996: VDI-Richtlinie 2693 Blatt 1: Investitionsrechnung bei Materialflußplanungen mit Hilfe statischer und dynamischer Rechenverfahren, Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDI 2884] VDI 2884, Dezember 2005: VDI-Richtlinie 2884: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC), Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDI 3561] VDI 3561, Juni 1973: VDI-Richtlinie 3561: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen, Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDI 4421] VDI 4421, Oktober 2000: VDI-Richtlinie 4421: Antriebstechniken in der Stückgutfördertechnik, Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.

- [VDI 4440-2] VDI 4440-2, März 2007: VDI-Richtlinie 4440 Blatt 2: Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Kettenförderer, Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDI 4440-3] VDI 4440-3, März 2007: VDI-Richtlinie 4440 Blatt 3: Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Rollen- und Kugelbahnen, Verein deutscher Ingenieure, Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDMA 15276] VDMA 15276, Juli 1994: VDMA-Einheitsblatt 15 276: Datenschnittstellen in Materialflußsteuerungen, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [VDMA 34160] VDMA 34160, 2006: VDMA-Einheitsblatt 34160: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- [Voß-2012] Voß, M.; Verl, A.: Konzepte zur energieeffizienten Steuerung von Regalbediengeräte. In: Brecher, C. (Hrsg.): Ressourceneffiziente Produktion. VDI Verlag, Düsseldorf: 2012, S. 34–48.
- [Wir-2013] WirthLogistik GmbH: Detaillierte Leistungsbeschreibung Wirth-SimTM Standard & Professional.
http://www.wirthsim.com/cms/upload/downloads/All_WirthSim_v1.4.2_german.pdf (Aufruf am 10.10.2013).
- [Wol-2013] Wollstadt, H.: Marktübersicht Frequenzumrichter. [http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/43224/ Marktuebersicht-Frequenzumrichter](http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/43224/Marktuebersicht-Frequenzumrichter) (Aufruf am 15.10.2013).
- [Zen-2013] Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung: Schwerpunkt Energiemarkt. <http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/zn/schwerpunkte/energiemarkt/Energiemarkt0713.pdf> (Aufruf am 02.11.2013).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Bestandteile eines Logistiksystems	8
Abbildung 2-2: Strukturierung der Fördertechnik [Gün-2013a]	9
Abbildung 2-3: Vorgehen bei der Planung von intralogistischen Systemen [Gün-2013a]	10
Abbildung 2-4: Spannungsverlauf von Gleich-, Wechsel- und Dreiphasenwechselstrom [sch-2013]	12
Abbildung 2-5: Sternschaltung und Dreiecksschaltung eines Drehstromverbrauchers [Uni-2013c]	12
Abbildung 2-6: Anschlussmöglichkeiten für die Messung der Energieaufnahme im Dreiphasenwechselstromnetz [Flu-2006]	15
Abbildung 2-7: Wirkungsgrad-Kennfeld einer Fräsmaschine [Dra-2003]	16
Abbildung 2-8: Klassifikation der Ansätze zur Energiebedarfsermittlung (in Anlehnung an [Sch-2011a, RaI-1998])	19
Abbildung 2-9: Ein- und Ausgabewerte des Werkzeugs Drive Solution Designer	22
Abbildung 3-1: Ursache-Wirkungsdiagramm Energiebedarf von Fördermitteln	27
Abbildung 3-2: Klassifikation anhand der Motornennleistung (Quellen: [Uni-2013b, Geb-2013a, Geb-2013b, Uni-2013a, SSI-2013, Geb-2013c, Kie-2007])	29
Abbildung 3-3: Leistungsverläufe eines Stetigförderers (Kettenförderer) sowie eines Unstetigförderers (RBG)	29
Abbildung 3-4: Szenario Stetigförderanlage	31
Abbildung 3-5: zentrale und dezentrale Steuerungskonzepte [Sie-2013a]	36
Abbildung 3-6: Auswertung einer Messung an zwei zusammenhängenden Fördersegmenten	37
Abbildung 3-7: Messgerät Fluke 1735 Power Logger sowie deren Anschluss	38
Abbildung 3-8: Beispielhafte Stetigförderanlage	41
Abbildung 3-9: Zeitlicher Verlauf eines Zyklus	42
Abbildung 3-10: Abschnitte eines Zyklus	43
Abbildung 3-11: Komponenten von Tragkettenförderer (links) sowie Rollenförderer (rechts)	44
Abbildung 3-12: Wirkungsgrade verschiedener Drehstrom-Asynchronmotoren [Rud-2008]	46
Abbildung 3-13: Wirkungsgrade der Effizienzniveaus für 4-polige Motoren [Top-2013]	47

Abbildung 3-14: Schematische Darstellung eines Kettenförderers (Bildquelle: http://www.tls-web.de)	48
Abbildung 3-15: Rollenkette auf einer Kunststoffschiene (in Anlehnung an [Sum-1999])	49
Abbildung 3-16: Exponential verteilte Abstände einer Quelle	52
Abbildung 3-17: Ablauf bei der Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs	54
Abbildung 3-18: Relative Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten der elektrischen Leistung bei einen Tragkettenförderer	55
Abbildung 3-19: Relative Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Werten der elektrischen Leistung bei einen Rollenförderer	56
Abbildung 3-20: Komponenten eines Regalbediengeräts	57
Abbildung 3-21: Antriebskonfiguration von Fahr- und Hubwerk (in Anlehnung an [Gün-2011b])	57
Abbildung 3-22: Einteilung der Regalwandfläche in vier Bereiche (für $b > 1$) [Hab-2013]	59
Abbildung 3-23: höhenabhängige Fahrgeschwindigkeit (links) und resultierende Geschwindigkeitsbereiche (rechts)	64
Abbildung 4-1: Morphologischer Kasten möglicher Betriebsstrategien	68
Abbildung 4-2: Leistungsverlauf bei einem Rollenförderer	70
Abbildung 4-3: Laufzeiten je Fördereinheit in Abhängigkeit von der Blockgröße sowie der Länge des Fördersegments	71
Abbildung 4-4: Layout der untersuchten Förderanlage	72
Abbildung 4-5: Mittlere Laufzeit je Fördereinheit	72
Abbildung 4-6: Mittlere Durchlaufzeit je Fördereinheit	73
Abbildung 4-7: Wirkzusammenhänge für energieeffiziente Betriebsstrategien bei Regalbediengeräten	74
Abbildung 4-8: Fallunterscheidung bei der Bahnplanung (in Anlehnung an [Ert-2013])	77
Abbildung 5-1: Tabellenblatt „Start“	82
Abbildung 5-2: Beispielhafte Förderanlage inkl. einzelner Fördersegmente	83
Abbildung 5-3: Implementierte Klassen mit den jeweiligen Attributen	84
Abbildung 5-4: Tabellenblatt „Eingabe“	85
Abbildung 5-5: Abbildung einer Stetigförderanlage im Werkzeug	86
Abbildung 5-6: Tabellenblatt „EingabeRBG“	87
Abbildung 5-7: Variantenvergleich hinsichtlich Energiekosten	89

Abbildung 6-1: Schematische Darstellung der entstehenden Lebenszykluskosten [Tay-1981]	92
Abbildung 6-2: Varianten des Untersuchungsszenarios „Stetigförderanlage“	95
Abbildung 6-3: Kostenstruktur der Varianten für 100.000 Fördereinheiten pro Jahr	97
Abbildung 6-4 : Vorgehen bei Ermittlung des Energiebedarfs für das mit Hochregalstaplern bediente Lager	99
Abbildung 6-5: Energieeinsparungspotenzial auf Basis einer Simulation von 1000 Doppelspielen bei einer chaotischen Lagerung	102
Abbildung 6-6: Leistungsverläufe von mittels Frequenzumrichter sowie Motorstarter angesteuerte Antrieben	103
Abbildung 6-7: Handlungsempfehlung für energieeffiziente Verfahstrategien	104
Abbildung 6-8: Aufwand und Eignung verschiedener Messsysteme [Eng-2009]	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Marktübersicht Werkzeuge zur Ermittlung des Energiebedarfs	20
Tabelle 3-1: Klassifikation Szenario „Stetigförderanlage“	32
Tabelle 3-2: Klassifikation Szenario „Erweiterung eines automatischen Kleinteilelagers“	33
Tabelle 3-3: Unterscheidung zwischen statischen und dynamischen Größen bei der Messung eines Stetigförderers	35
Tabelle 3-4: Gewichtung der Bewertungskriterien auf Grundlage des paarweisen Vergleichs	39
Tabelle 3-5: Bewertung der Methoden zur Energiebedarfsermittlung	40
Tabelle 3-6: Reib-/Rollbeiwert für Tragketten [Rex-2013]	49
Tabelle 3-7: Parameter zur Bestimmung des mittleren Energiebedarfs je Einzelspiel	60
Tabelle 3-8: Identifizierte, energiebedarfsrelevante Zustände eines Hochregalstaplers	63
Tabelle 4-1: Technische Voraussetzungen der einzelnen Betriebsstrategien	69
Tabelle 4-2: Untersuchungen zu energieeffizienten Lagerbewirtschaftungsstrategien	76
Tabelle 4-3: Simulations-Eingangsparameter	78
Tabelle 4-4: Simulationsergebnisse für Verfahstrategien	79
Tabelle 6-1: Gründe für unterschiedliche Strompreise in der Industrie [Deu-2012]	94
Tabelle 6-2: Eingangsdaten für das Szenario „Stetigförderanlage“	95
Tabelle 6-3: Lebenszykluskosten des Szenarios „Stetigförderanlage“	96
Tabelle 6-4: Lebenszykluskosten des Szenarios „Erweiterung AKL“	98