



Dipl.-Ing. Florian Lottersberger

**Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik
Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und
zur Steigerung der Energieeffizienz**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Jodin
Institut für Technische Logistik, Technische Universität Graz

Zweitgutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking
Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present doctoral dissertation.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Meiner Familie gewidmet.

Vorwort, Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Logistik (Technische Universität Graz) in den Jahren 2010 bis 2015.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Jodin, Leiter des Instituts, für die Möglichkeit als Projektmitarbeiter im Bereich der Energieeffizienz an Fördertechnik zu forschen und für die Unterstützung bei der Verfassung dieser Arbeit. Seine Betreuung, die vielen Ratschläge und die Bereitstellung der nötigen Freiräume für Forschung legten den Grundstein für eine erfolgreiche Dissertation. Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Karl-Heinz Wehking für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Besonders danke ich allen Mitarbeitern des Instituts, die durch ihre ständige Hilfsbereitschaft und Unterstützung einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen des Vorhabens beigesteuert haben. Hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang die unzähligen, fachlichen Diskussionen mit Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Norbert Hafner, denen ich viele wertvolle Anregungen zu verdanken habe. Auch ist Hrn. Dipl.-Ing. Alexander Ketter und Hrn. Dipl.-Ing. Michael Schadler zu danken, welche mit ihren verfassten Abschlussarbeiten im Rahmen der Forschungsarbeiten einen wesentlichen Teil zur Verifikation und Validierung der Bewertungsmethodik beigetragen haben. Weiters ist Hrn. Stefan Kügerl und Hrn. Stefan Kratochwill an dieser Stelle zu danken, die mit ihren Hilfestellungen im Werkstätten- und Laborbereich bei messtechnischen Arbeiten an Prüfständen einen maßgeblichen Beitrag geleistet haben.

Größten Dank schulde ich schlussendlich meiner Familie und meinen Freunden für die immerwährende Unterstützung, aber auch für die manchmal notwendige Motivation während schwieriger Phasen und bei der Erstellung dieser Arbeit.

Graz, Jänner 2016

Florian Lottersberger

Kurzfassung

Der automatisierte Warentransport in Materialflusssystemen der Intralogistik, wie bspw. in einem Distributionszentrum, wird durch Stetigfördertechnik für Stückgüter realisiert. Die zum Einsatz kommende Fördertechnik kann Gesamtlängen von mehreren Kilometern erreichen, entsprechend ist eine hohe Anzahl an elektrischen Antrieben erforderlich.

Aufgrund der sich damit ergebenden hohen installierten elektrischen Leistung führt der Betrieb der Fördertechnik zu großem Energiebedarf. Durch die stetig steigenden Kosten für Energie, aber auch das zunehmende Bewusstsein und die Sensibilisierung für ressourcenschonende, energiesparende Lösungen, ist Energieeffizienz bei Herstellern von Logistiksystemen ein relevantes Thema geworden.

Durch Weiterentwicklungen sind energiesparende Alternativ-Komponenten für den Einsatz an Fördertechnik verfügbar. Allerdings ist nicht gesichert, wie sich diese effizienten Komponenten im Gesamtsystem verhalten und ob die gewünschten Einspareffekte tatsächlich erreicht werden können. Es fehlen Grundlagen zur Bewertung der Energieeffizienz an Fördertechnik und die Identifikation der Potenziale, wo am sinnvollsten eingespart werden kann.

Dazu wird in dieser Arbeit die eine Bewertungsmethodik vorgestellt, um Geräte der Materialflusstechnik hinsichtlich ihrer Energieeffizienz beschreibbar und vergleichbar zu machen. Dies beinhaltet die Definition von Kennzahlen zur Beschreibung der Effizienz, sowie Prozessschritte zur Bestimmung der Kennzahlen unter vorgegebenen Randbedingungen, um eine neutrale Bewertung zu ermöglichen.

Zudem erfolgt die Untersuchung von Antriebssträngen gängiger Fördertechnik, um relevante Leistungsverluste zu bestimmen und so Optimierungspotenziale zur Steigerung der Energieeffizienz zu identifizieren. In dieser Arbeit werden Methoden und Messverfahren vorgestellt, wie die Leistungsverluste entlang des Antriebsstranges bestimmt werden können. Veränderungen durch Optimierungsmaßnahmen am Gerät werden anhand der Kennzahlen sichtbar gemacht und hinsichtlich ihrer Effektivität beurteilt.

Abstract

The automated transportation of goods in intralogistics material flow systems, such as a distribution center, is realized by continuous conveyor technology for unit loads. The used conveyor technology can reach a total length of several kilometers, resulting in a large number of required and installed electric drives.

Due to the resulting high amount of installed electrical power, logistics centers require a large demand of energy for the operation of the conveyor system. Because of the constantly rising costs of energy, but also the increasing awareness and sensitization to resource- and energy-saving solutions, energy efficiency has become a relevant issue for manufacturers of intralogistics systems. Further developments in the field of energy efficiency provide energy-saving alternative components for use on conveyors. However, no scientifically proved data is available, how these efficient components behave in the overall system and whether the targeted savings effects can be achieved. There are no basics for evaluating and benchmarking the energy efficiency of conveyor technology, nor for the identification of the major power losses and the most promising saving potentials. For this purpose an evaluation methodology is presented in this work to make energy efficiency of devices of material flow technology describe- and comparable. This includes the definition of indicators to describe the energy efficiency and process steps for determining the indicators to ensure a neutral rating under standardized conditions.

In addition, an investigation of the powertrains of commonly used conveyor technology is done in order to determine relevant power losses and so to identify potentials for optimization. In this work, methods and measurement procedures are presented, how the power losses can be determined along the powertrain. The activities carried out are then described and evaluated by the elaborated indicators of the evaluation methodology. Changes by the optimization tasks on the devices are then visualized by the indicators, and evaluated for their effectiveness.

Abkürzungen

TE	Transporteinheit, Stückguteinheit, Englisch: Load Unit (LU)
KLT	Kleinladungsträger
EEI	Energieeffizienz-Kennzahl, Englisch: Energy Efficiency Indicator
MP	Messpunkt, Stelle im Messstellenplan, an der die Messtechnik appliziert wird.

Weitere Abkürzungen und Bezeichnungen sind direkt im Text angegeben.

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
i	1	Laufvariable des Betriebszustands; $i = 1..4$
T_N	s	Betrachtungszeitraum des Referenzarbeitsspiels
T_i	s	Dauer des Betriebszustandes i
t_i	%	Dauer des Betriebszustandes i bezogen auf T_N
Λ	1/h	Durchsatz
T	s	Taktzeit zwischen geförderten Transporteinheiten
I_{St}	TE/h	Stückgutstrom
M_{St}	kg/h	Massenstrom
Λ_N	TE/h	Nenndurchsatz der Fördertechnik
Λ_i	TE/h	Durchsatz im Betriebszustand i
λ_i	%	Stückgutstrom im Betriebszustand i bezogen auf Λ_N
X_{ges}	1; Stk;	Anzahl der transportierten TE im Betrachtungszeitraum T_N
X_i	1; Stk;	Anzahl der transportierten TE im Betriebszustand i
M_{ges}	kg	Gesamte transportierte Masse im Betrachtungszeitraum T_N
M_N	kg/TE	Nennbeladung einer TE
M_i	kg	Transportierte Masse im Betriebszustand i
m_i	%	Transportierte Masse im Betriebszustand i bezogen auf M_N
v	m/s	Nenn-Fördergeschwindigkeit
v_i	%	Fördergeschwindigkeit im Betriebszustand i bezogen auf v
s_0	m	mittlerer Abstand zwischen den TE am Förderer
s_i	m	mittlerer Abstand der TE am Förderer im Betriebszustand i
L_F	m	Länge des betrachteten Förderers

Zeichen	Einheit	Bedeutung
P_{An}	W	Antriebsleistung des Förderers am Antriebselement (Trommel)
P_N	W	Erforderliche Nennleistung am Förderer (Nennleistung)
P_{JA}	W	Beschleunigungsleistung
P_L	W	Volllast-Beharrungsleistung
$p(t)$	W	Momentanwert der Leistung, elektrisch oder mechanisch
$\overline{p(t)}, P$	W	Mittlere Leistung, elektrisch („el“) oder mechanisch („mech“)
P_{zu}	W	Zugeführte Leistung, elektrisch oder mechanisch
P_{ab}	W	Abgeführte Leistung, elektrisch oder mechanisch
P_V	W	Verlustleistung, elektrisch oder mechanisch
W	Ws bzw. J	Arbeit
E_B	Ws bzw. J	Kinetische Energie
E_{rot}	Ws bzw. J	Rotatorische Energie
$E_{kin,ges}$	Ws bzw. J	Kinetische Gesamtenergie
W_{Reib}	Ws bzw. J	Reibungsarbeit
W_B	Ws bzw. J	Beschleunigungsarbeit
η	1	Wirkungsgrad
E_{eff}		Energieeffizienz
E_E	Ws bzw. J	Energieeinsatz bzw. Energieaufnahme
P_i	W	Elektrische Leistungsaufnahme im Betriebszustand i
W_L		Logistischer Ertrag (vgl. Logistische Leistung)
W_{L1}	TE · m	Logistischer Ertrag Definition 1
W_{L2}	kg · m	Logistischer Ertrag Definition 2
ec		spezifischer Energiebedarf
$ec_{(TE,s)}$	$\frac{Ws}{TE \cdot m}$	Effizienzkennzahl 1 (EEI 1), spezifischer Energiebedarf bezogen auf eine TE und L_F
$ec_{(M,s)}$	$\frac{Ws}{kg \cdot m}$	Effizienzkennzahl 2 (EEI 2), spezifischer Energiebedarf bezogen auf M_{ges} und L_F
P_{ges}	W	Gesamtleistungsaufnahme
P_{mech}	W	Mechanische Leistungsaufnahme
P_{el}	W	Elektrische Leistungsaufnahme
P_{nenn}	W	Nennleistung des Antriebsmotors

Zeichen	Einheit	Bedeutung
M	Nm	Drehmoment
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit am betrachteten Element
n_{nenn}	1/s	Nenn-Drehzahl Antriebsmotor
J_0	kgm ²	Massenträgheitsmoment
F	N	Kraft
F_R	N	Reibkraft
μ_G	1	Gleitreibungkoeffizient
n	1	Phasennummer 1, 2 oder 3
h	1	Ordnung der Harmonischen (Oberschwingung)
H	1	Anzahl der Harmonischen
\hat{u}_{nh}	V	Amplitudenwert der Spannung $u(t)$ aus FFT-Analyse
φ_{nh}	1°	Phasenverschiebungswinkel der Harmonischen aus FFT-Analyse
U_{nh}	V	Effektivwert der Spannung der betrachteten Phase und Harmonischen
U_n	V	Effektivwert der Spannung der gesamten Phase n
\hat{i}_{nh}	A	Amplitudenwert des Stromes $i(t)$ aus FFT-Analyse
I_{nh}	A	Effektivwert des Stromes der betrachteten Phase und Harmonischen
I_n	A	Effektivwert des Stromes der gesamten Phase n
P_{nh}	W	Elektrische Wirkleistung der betrachteten Harmonischen
P_n	W	Elektrische Wirkleistung einer Phase n
P_{ges}	W	Elektrische Wirkleistung des gesamten Signals
s_P	W	Schätzwert für die Standardabweichung σ der Messergebnisse

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	ii
Widmung	iii
Vorwort, Danksagung	iv
Kurzfassung, Abstract	v
Abkürzungen und Formelzeichen	vii
Inhaltsverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Globales Umfeld der Arbeit	1
1.2 Industrielles Umfeld der Arbeit	4
1.3 Problemstellung.....	6
1.4 Ziel der Arbeit – Forschungsfrage, Abgrenzung.....	8
1.5 Vorgehensweise	10
2 Problemanalyse - Stand von Wissenschaft und Technik	12
2.1 Wissenschaftliche Arbeiten zur Energieeffizienz	12
2.2 Politischer Hintergrund, Gesetzeslage zur Energieeffizienz.....	16
2.3 Grüne Logistik	18
2.4 Relevante Grundlagen der Fördertechnik	19
2.4.1 Aufgabe der Fördertechnik	19
2.4.2 Systematik der Fördertechnik für Stückgüter	20
2.4.3 Technologie der untersuchten Stetigfördertechnik	23
2.5 Berechnungsgrundlagen der Fördertechnik	31
2.5.1 Materialflusstechnische Berechnungen	31
2.5.2 Antriebsauslegung und energetische Betrachtungen	33
2.6 Energieeffiziente Alternativmöglichkeiten an Stetigfördertechnik.....	38
2.7 Notwendigkeit messtechnischer Untersuchungen.....	38
3 Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung und Bewertung der Energieeffizienz ...	41
3.1 Kennzahlen zur Energieeffizienz an Stetigfördertechnik	44
3.2 Energieeinsatz	46
3.2.1 Betriebszustände	46
3.2.2 Festgesetzte Lastzustände – das Referenzarbeitsspiel	49
3.2.3 Systemgrenzen	52
3.3 Logistischer Ertrag	54
3.4 Spezifischer Energiebedarf eines Stetigförderers	56

3.5	Prozessschritte zur Bestimmung der Kennzahlen	58
3.6	Prüfverfahren zur Kennzahlbestimmung	60
3.6.1	Planung	61
3.6.2	Messung	65
3.6.3	Auswertung	67
4	Maßnahmen zur Bestimmung von Leistungsverlusten im Antriebsstrang	68
4.1	Wie sieht der ideale Förderer aus?	68
4.2	Relevante Verluste an Komponenten des Antriebsstranges	71
4.3	Messtechnische Bestimmung relevanter Verluste	73
5	Experimentelle Bestimmung der Energieeffizienz	79
5.1	Prüfstände, Messmethoden und Messsystem	80
5.1.1	Versuchsaufbauten und Prüfstände	80
5.1.2	Messmethoden zur Leistungsmessung	85
5.1.3	Messsystem	90
5.2	Anwendung der Energieeffizienz-Bewertungsmethodik	93
5.2.1	Verifikation der Prozessschritte zur Kennzahlenbestimmung	93
5.2.2	Experimentelle Bestimmung der Gesamt-Leistungsaufnahmen	103
5.2.3	Berechnung der Kennzahlen zur Energieeffizienz	106
5.3	Bestimmung der Leistungsverluste im Antriebsstrang	107
5.3.1	Planung und Durchführung der Messreihen	107
5.3.2	Leistungsverluste im Antriebsstrang	108
5.3.3	Bewertete Optimierungsmaßnahmen unter Anwendung der Kennzahlen	112
6	Interpretation der Ergebnisse und Beurteilung	114
6.1	Kennzahlen-Bewertungsmethodik	114
6.1.1	Gegenüberstellung der untersuchten Förderer	114
6.1.2	Sichtbarmachung von Optimierungsmaßnahmen	115
6.1.3	Gegenüberstellung verschiedener Einsatzszenarien	117
6.1.4	Erkenntnisse durch Einführung der Bewertungsmethodik	120
6.2	Verluste im Antriebsstrang und der Mechanik	122
7	Zusammenfassung und Ausblick	126
8	Verzeichnisse	130
8.1	Literaturverzeichnis	130
8.2	Glossar	142
8.3	Abbildungsverzeichnis	144
8.4	Tabellenverzeichnis	147

1 Einleitung

1.1 Globales Umfeld der Arbeit

Auf die Verknappung der Ressourcen und den Klimawandel wird schon seit mehr als 40 Jahren hingewiesen (vgl. [MEA72]; [BAR80]). Diese Hinweise wurden durch die Gesellschaft lange Zeit kaum beachtet, die Energiepreise waren niedrig, Rohstoffe konnten weltweit günstig bezogen werden.

Nachweisliche Veränderungen am Klima (Klimawandel) und zunehmende Schäden durch Unwetter bewirken eine Sensibilisierung der Gesellschaft hin zum ressourcenschonenden Umgang mit der Umwelt und rücken das Thema immer stärker in den Mittelpunkt des öffentlichen Bewusstseins. Nicht erst durch die steigenden Energiepreise der letzten Jahre gehören Ressourceneffizienz und Umweltbewusstsein zu den Megatrends unserer Gesellschaft.

Seit Jahren ist ein kontinuierlicher Anstieg der Preise für Energie zu erkennen (vgl. [BDE13]; [JTL13a]). In der Logistik schlagen sich diese Kosten hauptsächlich im außerbetrieblichen Bereich für Treibstoff nieder, im innerbetrieblichen Bereich hauptsächlich für elektrischen Strom. Bei Betrachtung der Entwicklung des Industriestrompreises seit dem Jahr 2000 (Abbildung 1-1), zeigt sich eine Erhöhung um das 2,5-fache.

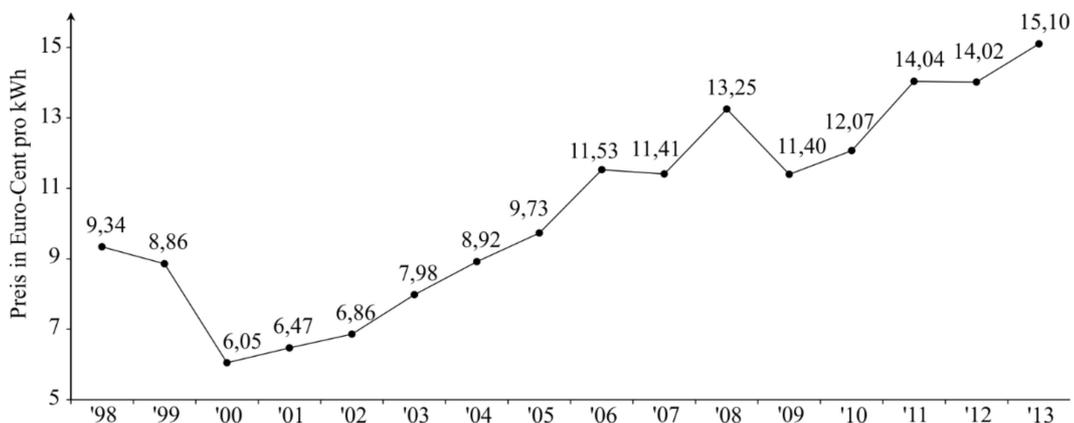


Abbildung 1-1: Entwicklung des Industriestrompreises in Deutschland (nach [BDE13], Abb. 22)

Anschaffungskosten rücken daher im Vergleich zu den laufenden Betriebskosten immer mehr in den Hintergrund. Es gilt also den Energieverbrauch zu senken, um die Aufwendungen für Strom zu reduzieren.

Der Preistreiber Energie ist für Logistikdienstleister zunehmend Grund dafür, sich für nachhaltige Logistiklösungen zu interessieren und energiesparende Lösungen im Logistikbereich zu suchen.

Effizienz und damit einhergehend Energieeffizienz wird zu einem immer größer werdenden Schwerpunkt für die Logistikbranche.

Die Industrie verpflichtet sich dabei immer mehr zu „grünen“ Lösungen. Das bedeutet nachhaltigere, energiesparende Lösungen in der Produktion und auch im Bereich der Warenverteilung. Energieeffiziente Technologien sind auf dem Vormarsch. Hersteller und Betreiber von Systemlösungen der gesamten Logistik sehen Energieeffizienz immer öfter als Qualitätskriterium an.

Die Europäische Union hat über Richtlinien verpflichtende Vorgaben zur Kennzeichnung des Energiebedarfs von Produkten, Gebäuden etc. eingeführt. In der Richtlinie 2006/32/EG [EUR06] beschreibt die Kommission der EU, dass alle EU-Mitgliedstaaten bis zum Jahr 2016 jeweils Endenergieeinsparungen in Höhe von neun Prozent im Vergleich zum durchschnittlichen Endenergieverbrauch der Jahre 2001 bis 2005 realisieren und nachweisen müssen. Sie definiert Energieeffizienz und Vorgaben sowie Regeln für die Kennzeichnung mittels Energielabels vor allem im Bereich der Haushaltsgeräte. Für Gebäude sind Energieausweise seit 2012 mittlerweile rechtlich vorgeschrieben [EUR02a].

Neben dem Thema Nachhaltigkeit steht die Logistik-Branche bei der Versorgung der Gesellschaft mit Waren und Gütern vor neuen Herausforderungen [GÜN09]. Durch das Aufkommen und die erhöhte Nutzung des E-Commerce bzw. Online-Handels ist eine Zunahme der Warenströme zu erkennen (vgl. [WIN15]; [GÜN15]). Um die Kundenzufriedenheit zu stärken, werden von den Anbietern immer kürzere Lieferzeiten garantiert [WIN15]. Dies bedeutet für die Logistik eine Zunahme der Intensität ihrer logistischen Prozesse, um einen ordnungsgemäßen, termingerechten und für die Kunden zufriedenstellenden Waren- und Materialfluss bereitzustellen. Materialflusssysteme müssen deshalb an die heutigen Anforderungen angepasst werden:

- Kurze Auftragsabwicklung bei zunehmender Artikelvielfalt
- Hohe Kommissionierleistungen
- Kurze Bearbeitungs- und Durchlaufzeiten für garantierte Lieferzeiten
- Ressourcenschonender und energiesparsamer Betrieb der gesamten Logistikkette

Dies führt zu einer Zunahme von Warentransporten im außerbetrieblichen Bereich (Straße, Flugzeug, etc.) wie auch zur Zunahme im innerbetrieblichen Bereich von bspw. Distributionszentren. Die Logistik gilt dabei als einer der Hauptverursacher an CO₂-Emissionen. Dies rührt hauptsächlich aus den außerbetrieblichen Transportaufgaben für Waren und Güter auf der Straße ([FRA11], S. 6).

Die Intralogistik beschreibt die innerbetrieblichen Waren- und Materialflüsse in Unternehmen ([CEM14]; [ARN06]). Auch hier müssen, um mit den erhöhten Durchsätzen umgehen zu können, die eingesetzten Materialflusssysteme, vom Warenein- bis zum Warenausgang, den neuen Herausforderungen angepasst werden [GÜT09]. Um den Anforderungen an höherer Artikelvielfalt und kurzen Cut-Off Zeiten gerecht zu werden, nehmen Anlagengrößen von Materialflusssystemen stetig zu [WIN15]. Damit einhergehend, steigt der Energiebedarf der Anlagen.

In der Logistik werden bereits gesamte Anlagen im Sinne einer nachhaltigen, ressourcenschonenden Auslegung gestaltet (vgl. [GÜH13b]; [HAU11]).

Das Thema Nachhaltigkeit und Energieeffizienz ist stark im Trend und somit auch für marktstrategische Zwecke zunehmend von Interesse. Fachmessen wie z. B. die CeMAT Hannover sind im Jahr 2011 unter dem Leitthema „Sustainability in Intralogistics“ ausgetragen worden. Auf der Logimat 2012, einer der größten Messen für Intralogistiksysteme, waren nachhaltige Lösungen zur Energieminderung und alternative Antriebskonzepte Leitthemen.

Dabei sind ressourcenschonende Themenstellungen auch vielfach in den Blickpunkt von strategischer Bedeutung getreten, und werden damit oftmals zu Marketingzwecken in Werbekampagnen der Unternehmen verwendet (vgl. [ABM12]; [BUR12]). Energieeffizienz ist somit auch zum Wettbewerbsfaktor geworden (vgl. [GSE+11]; [GHK11]).

Die Sensibilisierung zum Thema „ressourceneffizienter Technologien“ und die genannten neuen Herausforderungen an die Logistik rücken das Thema Energieeffizienz in der Technischen Logistik noch weiter in den Vordergrund. Dies hat dazu geführt, dass nun Forderungen an Systemhersteller zu nachhaltigeren Lösungen von zwei Seiten aufgetreten sind.

- Kunden bzw. Betreiber wünschen einen energiesparsamen Betrieb ihrer Logistikanlagen.
- Durch den Gesetzgeber sind Auflagen zur Energieeffizienz anhand von Richtlinien und Verordnungen zu erfüllen.

Die Themen Energie und Effizienz haben den Gesetzgeber bewegt, initiativ zu werden und gesetzliche Rahmenbedingungen zu schaffen, um Energieeffizienz geregelt voranzutreiben. Es entstanden Normen, Richtlinien und Verordnungen um Entwicklern von Systemen fundierte Grundlagen zur Anwendung bereitzustellen und den Zugang zur Energieeffizienz zu erleichtern. Als Beispiel sei hier die Vorgabe von Wirkungsgradklassen bei elektrischen Antriebsmotoren sowie Richtlinien zur Energieeffizienz von Gebäudeaufzügen genannt (vgl. [DIN12]; [DIN13a]; [DIN14]).

Diese Arbeit liefert nun einen Beitrag zur Energieeffizienz der Materialflusstechnik, am Beispiel der Stetigfördertechnik, einer der grundlegend notwendigen Komponente zur Realisierung des Warenflusses in einer automatisierten, innerbetrieblichen Materialflussanlage.

1.2 Industrielles Umfeld der Arbeit

Die zunehmende Bedeutung von energieeffizienten Geräten und Maschinen und der steigende Kostendruck in der Logistikbranche führen zu einem Umdenken bei Materialflusssystemen. Nicht allein die Leistungssteigerung, sondern vor allem die Senkung des Energieverbrauchs steht im Fokus. So entfallen auf den Bereich Intralogistik in einer Lieferkette circa die Hälfte der Energiekosten auf das Materialflusssystem mit Förder-, Lager- und Kommissioniertechnik (Abbildung 1-2). Als primärer Energielieferant dafür dient elektrischer Strom.

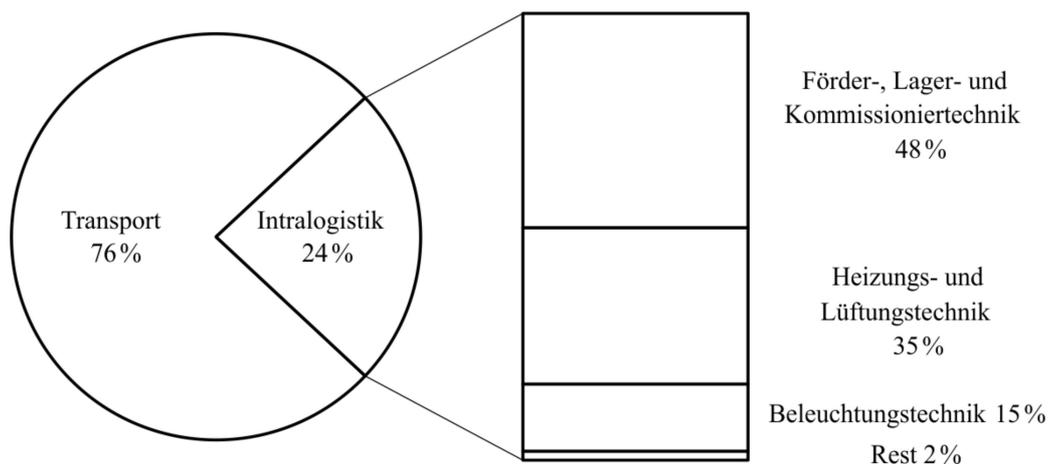


Abbildung 1-2: Energiekostenverteilung in der Lieferkette (nach [KRA08])

In der Verkehrslogistik oder bei den Logistikimmobilien treten seit längerer Zeit grüne Themen zunehmend in den Vordergrund. Technologien aus anderen Branchen (effiziente Fahrzeugantriebe, moderne Dämm- und Klimatechnik...) unterstützen diese Aktivitäten der Logistikbranche. In der Intralogistik kann weniger auf externe Technologien zurückgegriffen werden, die Technik wird durch die Unternehmen der Intralogistikbranche entwickelt und produziert. Mit energieeffizienten Motoren ([ABM12]; [NOR09]), „energiesparsamen“ Gurtbändern [FOR15] oder Energierückgewinnungskonzepten werden Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauches ergriffen und umgesetzt. Trotz der sicherlich nachweisbaren Anstrengungen und Innovationen halten die in den Medien, Firmenbroschüren und Webseiten stehenden plakativen Aussagen zu erreichten Effizienzsteigerungen in der Materialflusstechnik einer ingenieurwissenschaftlichen Überprüfung häufig kaum stand. Es fehlen Basiswerte, Vergleichsgrößen und Standards zur Berechnung. Der Anwender und Betreiber benötigt verlässliche Kriterien und Daten für Entscheidungen, wie er seine Anlagen auf Energieeffizienz optimieren soll.

Materialflusssysteme sind dabei vor allem für Branchen mit großen Artikelzahlen, wie bspw. in der Pharmabranche, durch einen hohen Grad an Automatisierung gekennzeichnet. Der Grad der

Automatisierung geht einher mit der installierten elektrischen Leistung im System. In Materialflusssystemen der Intralogistik werden teilweise über 20 km Fördertechnik verbaut [TRU15]. Diese Strecken sind gekennzeichnet durch eine hohe Anzahl an erforderlichen elektrischen Antrieben.

Typische Materialflusssysteme weisen daher installierte Leistungen im Bereich von mehreren hundert kW bis mehreren MW (Megawatt) auf [BUC12]. Da solche Anlagen vielfach rund um die Uhr bzw. im Schichtbetrieb im Einsatz sind, resultiert dies in einem hohen Energiebedarf für den Betrieb dieser Anlagen [JTL13a]. Die Senkung der Kosten für den Betrieb der Materialflussanlagen ist für Betreiber von großem Interesse. Weiters interessiert Kunden bereits vermehrt vorab, wie hoch der zu erwartende Energiebedarf für den Betrieb ihrer neu geplanten Anlagen sein wird.

Die erheblichen Kosten für den Betrieb von Materialflusssystemen führten zu einer Sensibilisierung zum Thema „Energieeffizienz“, sowohl bei Betreibern als auch bei Herstellern von Logistiksystemen. Diese Situation macht es für Systemhersteller von Materialflussanlagen unumgänglich, ihr gesamtes System, d. h. Anlagen, Prozesse, Produkte etc., hinsichtlich der Energieeffizienz zu untersuchen und zu optimieren. Dies führte auch dazu, dass Systemzulieferer in mehreren Bereichen energiesparende Komponenten entwickelten, welche mittlerweile am Markt erhältlich sind (bspw. Antriebstechnik).

Im Bereich von Materialfluss und Logistik sind verschiedene Untersuchungen, Ansätze, und Konzepte mit dem Ziel der Effizienzsteigerung bekannt (vgl. [GÜT09]; [HAU11]). Diese Untersuchungen fokussieren hauptsächlich auf Maßnahmen bei Gebäude- und Klimatechnik. Bei Materialflusssystemen bilden automatisierte Lagersysteme aufgrund der Möglichkeit der Energierückspeisung und Fahrstrategieanpassungen den Schwerpunkt der Untersuchungen (vgl. [EGF12]; [SMZ12]; [BLS+12]). Im Bereich der Fördertechnik sind hingegen nur punktuelle Untersuchungen bekannt (vgl. [HSN+11]; [INT13]). Dies war ausschlaggebend für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit.

Österreich ist ein bedeutender Standort der Technischen Logistik in Europa mit weltweit agierenden Hard- und Softwareherstellern wie auch Systemanbietern. Bezogen auf die Einwohnerzahl ist der Branchenumsatz deutlich überproportional, absolut liegt dieser bei über 1 Milliarde Euro pro Jahr. Der Standort Graz ist mit zwei vor Ort angesiedelten Herstellern von Komplettsystemen im automatisierten Lager- und Kommissionierbereich, welche international marktführende Unternehmen darstellen, im Bereich der Materialflusstechnik stark vertreten.

Im universitären Sektor wird an der TU Graz im Bereich der Technischen Logistik geforscht. Ein Schwerpunkt am Institut für Technische Logistik bildet dabei die energieeffiziente Materialflusstechnik.

Aufgrund der eingangs erläuterten aktuellen Situation, und um diesen speziellen Problemstellungen bestmöglich begegnen zu können, wurde zwischen dem Institut für Technische Logistik, und dem in Graz angesiedelten Industriepartner SSI Schäfer PEEM eine Kooperation eingegangen, und ein Forschungsprojekt zur energieeffizienten Materialflusstechnik gestartet. Das Projekt mit dem Titel „effMFS – Energieeffiziente Materialflusstechnik“ wurde im Zeitraum von 03/2011 bis 03/2014 bearbeitet und von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG gefördert.

Im Rahmen dieses Projektes wurde der Grundstein für die vorliegende Dissertation gelegt. Das Projekt wurde 05/2014 abgeschlossen und vom Projektpartner sowie dem Fördergeldgeber positiv evaluiert.

1.3 Problemstellung

Die Fördertechnik führt in den innerbetrieblichen Materialflusssystemen den Transport von Waren und Gütern in Form von Stückgütern durch. Die große Vielfalt an Fördertechnik, die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Realisierung der Technik und im speziellen der Antriebstechnik lässt einen einfachen Vergleich der Energieeffizienz nicht zu. Der reine Vergleich der aufgenommenen Energie ist keine seriöse Vergleichsgröße, da für die Effizienzaussage ein Nutzen zu definieren ist.

Bisherige Ansätze zur Optimierung gingen wesentlich in die elektrischen Antriebe. Hier wurden in den letzten Jahren durch die Motor- und Antriebssystemhersteller (z. B. SEW, Danfoss, Lenze, B&R) erhebliche Fortschritte bei der Energieeffizienz erreicht (vgl. [NOR09]; [ABM12]; [DFB03]). Weitestgehend unbeachtet blieb der mechanische Antriebsstrang bis zur Wirkebene mit dem Fördergut. Betrachtet man die einschlägigen Formeln zur Auslegung der Antriebsmotoren, erkennt man die große Abhängigkeit von verschiedenen physikalischen Größen, welche Energieverluste verursachen. Zu berücksichtigen sind z. B. Reibungs- und Walkenergie an allen relevanten Komponenten. Gerade hier benötigen die Hersteller Informationen über die Verluststellen im Antriebsstrang und deren relative Größe, sowie Lösungsansätze und deren Potenzial, um geeignete, nachhaltige konstruktive und materialtechnische Änderungen an ihren Geräten und Anlagen durchführen zu können.

Zulieferer von Systemkomponenten bieten in ihren Produktportfolios bereits energiesparende, hocheffiziente Alternativen an. Dabei bildet die Antriebstechnik den größten Bereich an neuen, effizienten Möglichkeiten. Darüber hinaus werden aber auch Produkte mit alternativen Werkstoffkombinationen angeboten, welche eine Reduktion der Verluste erreichen können [FOR15].

Diese oft als „grün“ betitelten Produkte werden herstellerseitig als hocheffizient und energiesparend beschrieben. Sämtliche Angaben zur Energieeffizienz in Firmenschriften haben aber eher Marketing-Charakter, als dass sie technisch-wissenschaftlich präzise, d. h. eindeutige und reproduzierbare Informationen enthielten. Somit ist nicht bekannt, wie sich diese neuen Komponenten beim Einsatz im Gesamtsystem verhalten.

Gekennzeichnet sind all diese effizienten Komponenten durch höhere Investitionskosten. Um diese Kosten zu rechtfertigen, sind Argumente erforderlich, wie sich jene Komponenten im Betrieb beim Einsatz im System verhalten. Bisher sind aber nur Untersuchungen der Hersteller unter optimalen Laborbedingungen vorhanden. Das Ausmaß der Einsparmöglichkeiten von Energie im realen System unter realistischen Belastungen ist vielfach nicht bekannt.

Dies führt bei Systemherstellern zu einer Unsicherheit und Hemmung beim Einsatz energiesparender Technologie in Materialflusssystemen. Es müssen daher Grundlagen geschaffen werden, um Energieeffizienz an Materialflusssystemen anschaulich greifbar und vergleichbar zu machen. Nur so können Systemhersteller ihre Produkte und Anlagen auf einen energiesparenden Betrieb optimieren.

Diese Unsicherheit war ausschlaggebend dafür, vertiefende Forschungsarbeiten sowohl auf Herstellerseite, als auch im wissenschaftlichen, universitären Bereich zu starten. Mit zunehmender Bedeutung der Energieeffizienz in Materialflusssystemen der Logistik steigt der Bedarf bei den Unternehmen nach vergleichbaren Kennwerten für Materialflusssysteme ähnlich der Energieausweise für Häuser oder Haushaltsgeräte ([EUR02a]; [EUR06]).

Es ist noch kein anerkannter wissenschaftlicher Ansatz zur Bestimmung der Energieeffizienz vorhanden, wie Energieeffizienz von Fördertechnik zu messen, zu berechnen und vergleichend zu bewerten ist. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus der Untersuchungen auf der Stetigförderertechnik für Stückgüter der Intralogistik, ausgeführt am Beispiel von Rollen- und Bandförderern.

1.4 Ziel der Arbeit – Forschungsfrage, Abgrenzung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung von wissenschaftlichen Grundlagen zur Ermittlung, dem Vergleich und der Steigerung der Energieeffizienz von Stetigförderern für Stückgüter.

Für eine Unterscheidung hinsichtlich der Effizienz der Produkte einzelner Hersteller fehlt bisher jegliche Basis. Einsparungsangaben waren deshalb bisher nicht vergleichbar. Als Grundlage zum Vergleich alternativer Fördertechnik muss ein greifbarer Wert existieren, welcher die unterschiedlichen Lösungen hinsichtlich Leistung und Energieverbrauch gegenüberstellt. Es muss auf einen Blick erkennbar sein, welches System für die Erbringung derselben logistischen Leistung effizienter und somit stromsparender arbeitet.

Anhand der erarbeiteten Grundlagen werden in der vorliegenden Arbeit folgende Fragen zur Energieeffizienz an Stetigfördertechnik der Intralogistik behandelt:

- Wie kann die Energieeffizienz bestimmt und gerechnet werden?
- Wie ist Energieeffizienz messtechnisch zu bestimmen?
- Welcher Typ Fördertechnik arbeitet am effizientesten?
- Wo fallen an Fördertechnik relevante Verluste an? – Identifikation von hohen Verluststellen und Optimierungspotenzialen
- Wie hoch ist die Größenordnung der mechanischen Verluste im Vergleich zu den elektrischen Antriebsverlusten?

Zur Beantwortung dieser Fragen liefert diese Arbeit deshalb einen umfassenden Beitrag und gliedert sich in zwei Kernthemen.

1. Es wird eine Methodik zur Bestimmung der Energieeffizienz an Stetigfördertechnik für Stückgüter mittels Kennzahlen entwickelt, inkl. aller Prozessschritte zur Bestimmung, mit Messverfahren und Messmethoden in Form eines Prüfverfahrens.
2. Zudem werden Untersuchungen präsentiert, wie die Verluste in den Antriebssträngen der Fördertechnik messtechnisch bestimmt werden können. Energetische Optimierungsmaßnahmen von Teil-Komponenten werden durchgeführt und anhand der Bewertungsmethodik evaluiert.

Die vorgestellte Methodik ermöglicht durch validierte Kennzahlen, Messtechniken und Messverfahren eine unabhängige Aussage zur Energieeffizienz an verschiedenen Fördermitteln. Dadurch wird ein energetischer Gerätevergleich möglich und es können Maßnahmen an der Technik im Vorher-Nachher Vergleich der Kennzahlen sichtbar gemacht werden. Die Kennzahlen sind unter

standardisierten Bedingungen zu ermitteln, um somit unabhängig und vergleichbar zu sein. Kennzahlenmodell und Kennwerte müssen unabhängig von der Lösungstechnologie, den Details der Systemlösung und den Spezifika der Systemhersteller sein. Die relevanten Einflussfaktoren und ggf. gegenseitigen Abhängigkeiten der Kennwerte sind transparent zu machen und zu dokumentieren.

Die Definitionen der Methodik werden derart allgemein ausgeführt, dass eine Übertragbarkeit auf andere Geräte der Materialflusstechnik in einfacher Weise erfolgen kann. Die Definition geeigneter Kennzahlen muss in Anbetracht der Anforderungen an praxistaugliche Kennzahlen erfolgen:

- Aussagekraft
- Vergleichbarkeit
- Praktizierbarkeit
- Manipulationssicherheit

Weiteres Ziel ist es, die Potenziale für Effizienzsteigerungen gegenüber zu stellen, um für den individuellen Anwendungsfall Hinweise für erfolgsversprechende Maßnahmen zu geben. Die Ergebnisse werden auch dahingehend ausgewertet, welche Förder- und Antriebsprinzipien hinsichtlich des Energieverbrauchs unter verschiedenen Belastungen Vor- und Nachteile aufweisen. Hieraus leiten sich zusätzliche Auslegungskriterien ab.

Die Verifikation und Validierung der wissenschaftlichen Ergebnisse erfolgt anhand ausgeführter Versuchsaufbauten. Zur Sicherstellung valider Messergebnisse ist, neben der Bestimmung der Spezifikationen an die Messtechnik, auch entsprechender Aufwand bei der Installation und Testung der Messtechnik sowie der zum Einsatz kommenden Messverfahren zu betreiben.

Für die Industrie werden umfassende, konkrete Grundlagen geschaffen und verifiziert, um die Energieeffizienz der eigenen Systeme anhand von Kennzahlen zu validieren, zu bewerten und zu optimieren. Die zunehmende Bedeutung energieeffizienter Anlagen in der Logistik für die Wettbewerbsfähigkeit wurde bereits eingangs dargelegt.

Dabei wird keine Einführung eines neuen „Energietags“ angestrebt. Die Bewertungsmethodik dient Entwicklern von Fördertechniklösungen und ermöglicht schließlich die praxistaugliche Gestaltung von energieeffizienter Fördertechnik. Zudem werden die Kennzahlen nicht nur im Bereich der Forschung und Entwicklung von Produkten zum Einsatz kommen. Es ist auch vorgesehen, bereits in der Planung von Materialflusssystemen, anhand der Kennzahlen die optimale Einsatzanwendung zu finden und dies mit Kunden und Betreibern zu diskutieren.

1.5 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise, um die gestellten Ziele in adäquater Weise erfüllen zu können, gliedert sich in folgende Arbeitspunkte:

- Erhebung des aktuellen Stands der Wissenschaft und Technik durch Recherche von wissenschaftlichen Arbeiten im Themenbereich. Zudem wird die aktuelle Technologie der Förder-technik dargestellt und notwendige Berechnungsgrundlagen zur Antriebsleistung angegeben.
- Die Definition von Energieeffizienzkennzahlen in dieser Arbeit erfolgt auf Basis allgemeingültiger, anerkannter Richtlinien und Verordnungen zu Energieeffizienz und Ökodesign von Produkten. Die zur Bestimmung der Kennzahlen notwendigen Teilkennwerte
 - Energiebedarf (Kapitel 3.2) und
 - erbrachter Nutzen in Form eines logistische Ertrags (Kapitel 3.3)werden im Kontext der Aufgabenstellung erarbeitet bzw. definiert und ihre Ermittlung ausführlich diskutiert. Um eine durchgängige Bewertungsmethodik eines umfassenden und flexiblen Kennzahlenmodells mit eindeutigen Werten zu schaffen, muss zusätzlich zu den Kennzahlen die systematische Definition
 - praktikabler Systemgrenzen (Schnittstellen),
 - relevanter Betriebszustände (Volllast, Teillast, ...),
 - Berechnungs- und Normierungsmodelle (Kapitel 3.4),
 - geeigneter Messstellen, Messmethoden, Messgeräte und Messdokumentationen,
 - Prozessschritte und Prüfverfahren zur unabhängigen, reproduzierbaren Ermittlung erfolgen (Kapitel 3.5, 3.6).
- Um das Effizienzpotenzial in den Antriebsträngen der Stückgut-Stetigförderer gesichert zu beurteilen, werden Laboruntersuchungen an exemplarischen Förderprinzipien (Rollen, Band) mit verschiedenen Antriebslösungen durchgeführt. Um die Leistungsverluste auf Komponentenebene messtechnisch zu bestimmen, müssen geeignete Messverfahren entwickelt bzw. adaptiert werden (Kapitel 4). Damit können relevante Verluste bestimmt sowie deren Auswirkungen untersucht und somit Hinweise auf Verbesserungspotenziale gegeben werden.
- Zur Vorbereitung von Laboruntersuchungen sind folgende Aufgabenpunkte (Kapitel 5.1) erforderlich:
 - Aufbau und Inbetriebnahme geeigneter Prüfstände und Versuchskreisläufe
 - Auswahl und Installation geeigneter Messtechnik für elektrische und mechanische Größen
 - Planen der Versuche und Testmessungen

- Die experimentelle Bestimmung der Leistungsaufnahmen bzw. -verluste in den Antriebssträngen erfolgt unter Anwendung der erarbeiteten Messverfahren (Kapitel 5.3).
 - Durchführung umfangreicher Messserien an den Versuchskreisläufen,
 - Aufbereitung und Auswertung der aus den Versuchen gewonnenen Messdaten und die
 - Zuordnung der Verluste zu Systemkomponenten.
- Zur Validierung der in dieser Arbeit eingeführten Bewertungsmethodik erfolgen experimentelle Untersuchungen an realer Fördertechnik (Kapitel 5.2). Dazu erfolgt unter Anwendung der festgelegten Prozessschritte die
 - Kennzahlbestimmung der untersuchten Stetigfördertechnik mit Gegenüberstellung.
 - Nach der Durchführung von Optimierungsmaßnahmen an Förderern, werden die erreichten Ergebnisse anhand der Kennzahlen sichtbar gemacht und bewertet.
- Aufarbeitung und Darstellung der Ergebnisse in geeigneter Form, um die jeweiligen gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf die vorliegende Problemstellung darzustellen. Damit kann eine abschließende Interpretation und Diskussion der Erkenntnisse erfolgen (Kapitel 6).

2 Problemanalyse - Stand von Wissenschaft und Technik

Im ersten Abschnitt des Kapitels wird ein Überblick über aktuelle wissenschaftliche Arbeiten gegeben, welche sich mit der Thematik und konkreten Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz im Kontext der Förder- bzw. Stetigfördertechnik beschäftigen. Zusätzlich wird die Gesetzeslage zur Energieeffizienz mit Richtlinien und Verordnungen erläutert sowie ein Überblick zum Stand der grünen Logistik gegeben.

Im zweiten Abschnitt werden die Grundfunktion, die Systematik der Fördermittel sowie die aktuelle Technologie und somit der Stand der Technik im Bereich der Fördertechnik für intralogistische Materialflusssysteme erläutert. Darin wird auch auf die konstruktive Ausführung der Antriebsstränge und auf die zum Einsatz kommende Antriebstechnologie eingegangen. Zudem werden die für diese Arbeit erforderlichen materialflusstechnischen und energetischen Berechnungsgrundlagen angeführt.

Im dritten Abschnitt wird ein Überblick gegeben, welche energieeffizienten Alternativen auf Komponentenebene der Fördertechnik derzeit am Markt erhältlich sind. Zudem wird auf die Notwendigkeit messtechnischer Untersuchungen an realer Fördertechnik eingegangen.

Wichtige grundlegende Begriffe zur Materialflusstechnik sowie der Energieeffizienz, die im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet werden, sind in einem Glossar unter Anhang 8.2 angeführt.

2.1 Wissenschaftliche Arbeiten zur Energieeffizienz

Zur einleitenden Betrachtung der Energieeffizienz von Stetigfördertechnik wird ein aktueller Stand der Wissenschaft zur Thematik gegeben. Die Ausgangssituation zur Energieeffizienz der Stetigfördertechnik ist in Kapitel 1.3 erläutert worden. Derzeit sind im wissenschaftlichen Bereich punktuelle Untersuchungen und Ansätze zur Themenstellung bekannt, wobei der Recherche-Schwerpunkt dieser Arbeit auf Stetigfördertechnik in der Intralogistik gelegt wurde.

Der Großteil der Untersuchungen beschäftigt sich dabei mit theoretischen Betrachtungen zur Energieeffizienz. Messtechnische Untersuchungen beschränken sich auf die Bestimmung der elektrischen Gesamtenergieaufnahme von Anlagen. Eine tiefgehende Detailbetrachtung zu Verlusten an Komponenten der Antriebsstränge erfolgte bisher nicht. Durchgeführte Untersuchungen basieren hauptsächlich auf Simulationen und Modellrechnungen. Zwar sind die Simulationsergebnisse oft validiert, können meist jedoch nur für die spezifische Aufgabenstellung angewandt werden.

Für die späteren experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit sind auch Erkenntnisse aus Beiträgen eingeflossen, welche sich mit Prüfständen, Messtechnik und Mess- und Auswerteverfahren zur Verlust- und Wirkungsgradbestimmung an Fördertechnik (auch Schüttgut) beschäftigen.

- In den Beiträgen zur Optimierung der Energieeffizienz von Intralogistikressourcen am Beispiel des Kettenförderers setzen sich Hoppe und Sommer ([HOW12]; [SOM11]) mit den Einflussgrößen auf die Energieeffizienz von Intralogistikressourcen am Beispiel des Tragkettenförderers auseinander (Universität Stuttgart – Institut für Fördertechnik und Logistik, Prof. Wehking). Es wird beleuchtet, durch welche Methoden der Energiebedarf und -verbrauch ermittelt werden kann und wie Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Einflussgrößen auf den Energieverbrauch bestimmt werden. Aus den Ergebnissen werden Maßnahmen abgeleitet, durch die der Energieverbrauch von Intralogistikressourcen reduziert werden kann. Zudem wird ein Ausblick auf Energieverbrauchserhöhungen durch die zeitliche Veränderung infolge von Verschleißerscheinungen gegeben.

Für die messtechnischen Untersuchungen setzt Hoppe neben der traditionellen Versuchsplanung, bei der immer nur eine Steuergröße verändert wird, auch Methoden der statistischen Versuchsplanung ein, das sogenannte Design of Experiments (DoE), um mögliche Wechselwirkungen zwischen den Steuergrößen zu ermitteln ([HOW12], S. 6–8).

- Ertl beschäftigt sich mit Kennzahlen zur Energieeffizienz von automatisierten Lagersystemen (TU München - Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Prof. Günthner), am Beispiel eines AKL-Systems ([ERG13a]; [ERG13b]; [ERG13c]; [ERG14]). Grundlage der Arbeit bildet die VDI-Richtlinie 4707 zur Energieeffizienz von Gebäudeaufzügen, welche von Ertl auf das AKL-System umgelegt wird. Dabei werden Energieeffizienzklassen für AKL-Systeme eingeführt und in Form eines Energielabels die Effizienzklasse für AKL festgelegt.

Dieser Ansatz ermöglicht die vergleichende Betrachtung der AKL-Geräte hinsichtlich ihrer Energieeffizienz. Angestrebt wird von Ertl, das vorgestellte Konzept in eine VDI-Richtlinie weiterzuentwickeln, um eine klare Regel im Sinne einer Norm bei der Beurteilung der Energieeffizienz von Regalbediengeräten für Betreiber und Hersteller zur Verfügung zu stellen.

Die Kennzahldefinitionen und Methodik der Richtlinie VDI 4707 war auch Grundlage für die Kennzahlensystematik zur Fördertechnik in dieser Arbeit, wobei aber in Definition und Methodik eine unterschiedliche Variante gewählt wurde.

- Habenicht und Ertl [HEG13] haben analytische Modelle zur Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs sowohl für Stetigförderanlagen als auch für Regalbediengeräte entwickelt. Insbesondere Simulationen und Messungen benötigen einen hohen Zeitaufwand bei ihrer Durchführung und eignen sich für den Einsatz in der Planungsphase nur bedingt [HAG13]. Analytische Berechnungsansätze weisen demnach hinsichtlich des zeitlichen Aufwands bei der Anwendung große Vorteile gegenüber der Simulation auf und führen zu ausreichend genauen Ergebnissen. Die Erkenntnisse sind im Forschungsbericht „Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs“ ([GÜH13a]; [HEG13], S. 13) angeführt.
- Ausgehend vom Verbund-Forschungsprojekt „Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln der Intralogistik“ wurde von Furmans und Braun (Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Prof. Furmans) u. a. für Stetigförderer eine detaillierte Analyse der Umweltaspekte durchgeführt ([SFB+12]; [BGF+13b]; [BGF+13a]). Die Quantifizierung des Energiebedarfs erfolgte auf unterschiedliche Vorgehensweisen. Neben der Messung an real existierenden Systemen wurden parameterbasierte, analytische Simulationsmodelle für vielfältige Fördermittel entwickelt und validiert. Zur Steigerung der Energieeffizienz konnten dabei anhand dieser Modelle und Messungen für die Industrie verschiedene Stellhebel zur Beeinflussung des Energiebedarfs identifiziert werden. Grundsätzlich sind diese in zwei Hauptkategorien zusammengefasst worden: die Einflussmöglichkeiten der Technik sowie der Einfluss im Betrieb der Fördermittel [FUR14].
- Die Energieeffizienz an Fördertechnik im 24-Volt-Bereich an Rollenförderern wurde 2013 von Braun und Linsel [BLF13] untersucht. Dabei wurden an einem Rollenförderer mit 24 V-Technik die Aufgaben des Transports im Dauer-, Aussetz- und Staubetrieb für ein jeweils identisches Vergleichslayout untersucht. Hieraus ergibt sich, dass im Aussetzbetrieb eines Rollenförderers mit 24 V-Förderrollen-Antrieb, über den ein Ladungsträger mit 50 kg transportiert wird, im Vergleich zur 400 V-Technik rund 30 % Energie eingespart werden kann. Bei Betrachtung der Staufunktion kann der Energiebedarf sogar um 50 % reduziert werden. Weiterhin können für kurze Förderstrecken bei Einsatz der 24 V-Technik die Anschaffungskosten reduziert werden.
- Im Beitrag ([NSB+10], S. 142) erläutert Nendel (TU Chemnitz - Professur für Fördertechnik, Prof. Nendel) den gegenwärtig zu hohen Energieverbrauch in Förder- und Verkettungssystemen, und er gibt einen Überblick über mögliche Ursachen, wie den Einbau von ineffizienten Elektromotoren und zu hohe Reibwerte in den Wirkpaarungen der Zug- und Tragmittel, etc. Als mögliches Ziel werden von Nendel 30 bis 40 % Energieeinsparung angegeben.

- In [NEM06] zeigen Nendel und Mitzschke 2006 Methoden zur Messung von Reibungswerten an Kunststoffgleitpaarungen in der Fördertechnik, basierend auf der Dissertation von Auerbach [AUE06]. An einem selbst entwickelten Prüfstand wurden Messungen durchgeführt. Sie zeigen neben den Abhängigkeiten des Reibbeiwertes von Geschwindigkeit und Normalkraft auf, dass praxisrelevante Reibwertmessungen als Dauerversuche durchgeführt werden müssen. In seiner Dissertation zur Dimensionierung von Fördersystemen beschreibt Dombeck [DOM13] einen Versuchsstand u. a. zur Durchführung von Reibwertanalysen an Staurollenketten.
- Von Sumpf wurden 2009 Untersuchungen zur „Rollenden Fördertechnik“ präsentiert [SUM09]. Dabei wird durch den Einsatz von Rollelementen an Ketten-, Band- oder Gurtförderern die Gleitreibung an Stützelementen durch Rollreibung ersetzt. Untersuchungen zeigen eine mögliche Reduktion der Reibwerte von 0,23..0,3 auf 0,02..0,03, wobei damit bis zu 80 % der Antriebsenergie eingespart werden kann.
Der Einsatz von reibungsarmen Komponenten wird auch im Rahmen dieser Arbeit untersucht, die rollende Fördertechnik stellt dabei eine mögliche Optimierungsmaßnahme dar.
- In den Arbeiten von Wennekamp und Falkenberg (Leibniz Universität Hannover - Institut für Transport- und Automatisierungstechnik, Prof. Overmeyer) werden messtechnische Untersuchungen und Optimierungsmaßnahmen an Bandförderern vorgestellt [FAW08].
Wennekamp [WEN08] beschäftigt sich in seiner Dissertation mit tribologischen und rheologischen Eigenschaften von Fördergurten und zeigt spezielle experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung des Eindrückrollwiderstandes mit Prüfständen und Feldversuchen auf. Die Dissertation von Falkenberg [FAL12] beschreibt Methoden und Versuchsanlagen zur Ermittlung von Reibungsverlusten an Bandförderanlagen. Dabei werden Ergebnisse von Reibwertbestimmungen präsentiert und deren Abhängigkeiten sowie Langzeitverhalten diskutiert.
Die aufgezeigten Möglichkeiten zur Bestimmung von Verlusten an Bandförderern, mit Prüfverfahren, Messtechnik und Messvorrichtungen zur Messung von Reibung und Rollwiderständen etc. zur Bestimmung des Energieverbrauches, sind auch für Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Anwendung gekommen.
- Einen Überblick über die analytische Bestimmung der Einzelwiderstände bzw. -verluste an Schlepplängsförderern zeigt die Dissertation von Schmidt [SCH82]. Eine Untersuchung zu trumbezogenen Bewegungswiderständen von Gurtförderanlagen und die Möglichkeiten zur messtechnischen Bestimmung liefert die Dissertation von Limberg [LIM88].

2.2 Politischer Hintergrund, Gesetzeslage zur Energieeffizienz

Nachfolgend wird ein Überblick über Richtlinien, Verordnungen, Gesetze, Normen im derzeit aktuellen Gesamtzusammenhang der Energieeffizienz gegeben.

Richtlinien

Die Richtlinie 1992/75/EWG „über die Angaben des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch Haushaltsgeräte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen“ [EUR92] ist im Zusammenhang der Ökodesignrichtlinie, Richtlinie 2005/32/EG [EUR05] zu sehen. In ihr wird eine Möglichkeit zur Bewertung und zum Vergleich unterschiedlicher Produkte gesetzlich festgelegt. Mit dem 1992 beschlossenen Energieverbrauchslabel werden heutzutage auch Produkte wie PKW oder Reifen versehen. Eine Betrachtung der Fördermittel der Intralogistik erfolgt in diesem Zusammenhang bisher nicht ([BGF+13a], S. 14–18).

Mit der EG-Richtlinie 2002/91/EG über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [EUR02b] kam der Begriff Energieeffizienz (Energy Performance) in den gängigen deutschen Sprachgebrauch. In österreichisches Recht umgesetzt wurde diese Richtlinie mit dem „Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden – Energieeffizienzgesetz (EEffG) und, darauf basierend, mit der Energieeinsparverordnung (EnEV), worin die Verbesserung der energetischen Eigenschaften zur verbesserten Energieeffizienz führt. Dabei ist der Endenergiebedarf als das Maß für die Energieeffizienz festgelegt.

Eine Möglichkeit Energieeffizienz einheitlich zu charakterisieren stellt die Richtlinie 2006/32/EG „über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistung“ dar [EUR06]. Die Richtlinie enthält Richtziele und sorgt für eine Förderung des Markts bei Energiedienstleistungen sowie für die Bereitstellung von anderen Energieeffizienzmaßnahmen beim Endverbraucher. Energieeffizienz wird hier als „das Verhältnis von Ertrag an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zum Energieeinsatz“ definiert ([BGF+13a], S. 14–18).

Die neue Energieeffizienz-Richtlinie 2012/27/EU vom 25. Oktober 2012 [EUR12] schreibt u.a. verpflichtende Energieeinsparungen vor, um das EU-Ziel von 20 % höherer Energieeffizienz gegenüber 2008 zu realisieren.

Verordnungen

Verordnungen, die von der europäischen Kommission erlassen werden, stellen eine detaillierte Beschreibung der Zusammenhänge zumeist aus Richtlinien dar. Als Beispiele sollen in diesem Kontext folgende Verordnungen vorgestellt werden:

Die „Verordnung 1061/2010 Kennzeichnung von Haushaltswaschmaschinen in Bezug auf den Energieverbrauch“ [EUR10] reguliert die umweltgerechte Kennzeichnung von Haushaltswaschmaschinen über ein einheitliches EU Label und definiert einen standardisierten Zyklus, mit Hilfe dessen die unterschiedlichen Geräte verschiedener Hersteller bewertet und miteinander verglichen werden können ([BGF+13a], S. 15).

Die „Verordnung 640/2009 Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren“ [EUR09] soll als ein Beispiel für die Umsetzung der in der Ökodesignrichtlinie geforderten umweltgerechten Gestaltung von ausgewählten Produktgruppen dienen ([BGF+13a], S. 15). Diese Verordnung löste die bis dahin auf freiwilliger Basis vereinbarte dreistufige EFF-Skala des CEMEP (European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics) ab. Mit dieser Verordnung sind die Effizienzklassen IE1 bis IE3 eingeführt worden. IE1 steht für Standardwirkungsgrad, IE2 für gehobenen Wirkungsgrad und IE3 für Premiumwirkungsgrad. Die Klassifizierungen sind im Anhang der Verordnung aufgelistet. Die Effizienzklasse IE1 entspricht etwa der alten EFF2. Die neuen Anforderungen an die Effizienz sind in einem Stufenplan festgelegt.

- Ab dem 16. Juni 2011 dürfen nur noch Motoren der Effizienzklasse IE2 eingesetzt werden.
- Zum 1. Jänner 2015 erfolgt eine weitere Verschärfung der Anforderungen. Ab diesem Zeitpunkt dürfen nur noch Motoren, die eine Nennleistung von 7,5 bis 375 kW haben, mit der Effizienzklasse IE3 eingesetzt werden. Werden Motoren mit der IE2 eingesetzt, müssen diese zusätzlich mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sein.
- Ab 1. Jänner 2017 wird diese Regelung auch auf Motoren von 0,75 bis 7,5 kW erweitert.

Auf die verschiedenen Energielabel bzw. die Kennzeichnung sowie die rechtliche Situation zur Ökobilanzierung und Methoden, um Umweltaspekte von Produkten und Produktsystemen zu analysieren, wird von Nendel im Beitrag ([NLW13], S. 4–9) eingegangen.

Normen

Eine umfassende Aufstellung von Normen, Richtlinien und Verordnungen zum Thema Energieeffizienz, Energielabel, Ökodesign, etc. wird im Forschungsbericht ([BGF+13b], S. 259 ff.) gegeben.

2.3 Grüne Logistik

Der Trend zu mehr Nachhaltigkeit und Energieeffizienz in der Intralogistik wurde eingangs erläutert, siehe Kapitel 1.2. Diese Produkteigenschaften werden nicht nur von Seite der Kunden gefordert, sondern Unternehmen der Branche nutzen diese Tendenz auch verstärkt zu Marketingzwecken. Vor allem im Bereich der Transportlogistik haben sich bereits einige Unternehmen zu mehr Umweltschutz in ihrem Bereich verpflichtet, z. B. die Deutsche Post DHL ([DHL11], S. 45 ff.).

Eine wissenschaftliche Untersuchung von Handlungsempfehlungen für eine grüne Logistik erfolgt bspw. von Günthner in der Studie „Change to Green - Wege zu einer energieeffizienten Logistik“ [GÜN09]. Zur Reduzierung der erzeugten Emissionen können nach Nendel prinzipiell drei Ansätze verfolgt werden: Substitution (von CO₂-erzeugenden Prozessen), Verbesserung der Effizienz (von energieverbrauchenden Prozessen) und Suffizienz (Reduzierung der energieverbrauchenden Prozesse). Insbesondere die Effizienz wird sowohl von der Industrie als auch von der Politik als ein wichtiger Faktor zur Reduzierung des Treibhauseffektes betrachtet ([NLW13], S. 4).

Allein durch die Logistik werden heute weltweit mehr als 5,5 % Prozent der Treibhausgasemissionen verursacht ([WOR11], S. 10). Die Logistik kann also einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten. Maßnahmen zur Emissionsminderung und „Grüne Logistik“-Produkte und Dienstleistungen können jedoch erst dann entwickelt werden, wenn die Emissionen logistischer Systeme und Prozesse einheitlich bestimmt und die emissionstreibenden Prozesse identifiziert worden sind. Eine „Grüne Logistik“ steht also übergeordnet für Umweltverträglichkeit und Ressourceneffizienz entlang der gesamten Logistikkette.

Die unterschiedlichen Ansätze, umweltgerechte und ressourceneffiziente Logistiksysteme zu realisieren, können in vier Bereiche untergliedert werden: Transport, Logistikimmobilie, Intralogistik sowie Planung und Strategie (vgl. [TEN11], S. 21). Der für diese Arbeit interessierende Bereich der Intralogistik zielt auf die Vermeidung von Leerlaufverbräuchen durch definierte Energiemodi oder effizientere Fördertechnik ab, letztere ermöglicht über 20 % Energieeinsparung [TEN11]. In seinem Vortrag im Fachforum der LogiMAT 2011 schlägt ten Hompel dazu folgende Ansatzpunkte zur Senkung des Energieverbrauchs in der Intralogistik vor [TEN11]:

- Ökologische Systemplanung
- Nutzung alternativer Energiequellen
- Einfluss der Immobilie (Bauart, Wärmedämmung)
- Effiziente Beleuchtung
- Energiesparende Antriebe in RBG, FTS oder Förderanlagen
- Konsequente Abschaltung von momentan nicht benötigten Einrichtungen

2.4 Relevante Grundlagen der Fördertechnik

In Abgrenzung zur Verkehrstechnik beschränkt sich die Fördertechnik im Wesentlichen auf den innerbetrieblichen Transport sowie den Warenumsatz auf Flughäfen, auf Bahnhöfen und in Lagern. Die Beschreibung einer fördertechnischen Aufgabe kann immer durch eine Aufteilung in die zu bewältigenden Förderstrecken, in die zu bewegenden Fördergüter sowie in die notwendigen Fördermittel erfolgen. Unter dem Oberbegriff „Fördermittel“ sind die in der Fördertechnik eingesetzten Geräte und Hilfsmittel zusammengefasst ([JÜS00], S. 94).

Fördergüter werden nach ihrer physikalischen Beschaffenheit unterteilt in Schüttgüter (z. B. Getreide, Kohle, Erze, Sand) und Stückgüter (z. B. Kartons, Kisten, Behälter). Sehr oft werden Stückgüter auf bzw. in sog. Ladehilfsmitteln (z. B. Paletten, Gitterboxen) zusammengefasst. Nachfolgend werden ausschließlich Stückgutförderer betrachtet, wobei darauf hingewiesen werden soll, dass auch in Gebinde (z. B. Flüssigkeitscontainer nach VDI 2383) abgefüllte Schüttgüter mit Hilfe von Stückgutförderern transportiert werden ([ARN08], S. 613).

2.4.1 Aufgabe der Fördertechnik

Die Grundfunktion der Fördertechnik stellt den Materialtransport zwischen vorgegebenen Orten, wie bspw. in einem Distributionszentrum, dar. Die Hauptaufgabe eines Stückgutförderers im Sinne des Materialflusses stellt somit das Fördern von Fördergütern in Form von Transporteinheiten zwischen einer Quelle Q und einer Senke S dar (vgl. Abbildung 2-1). Darüber hinaus kann ein Stückgutförderer noch die Aufgaben Zusammenführen, Stauen bzw. Puffern, Vereinzeln und Verteilen übernehmen ([ARN08], S. 614).

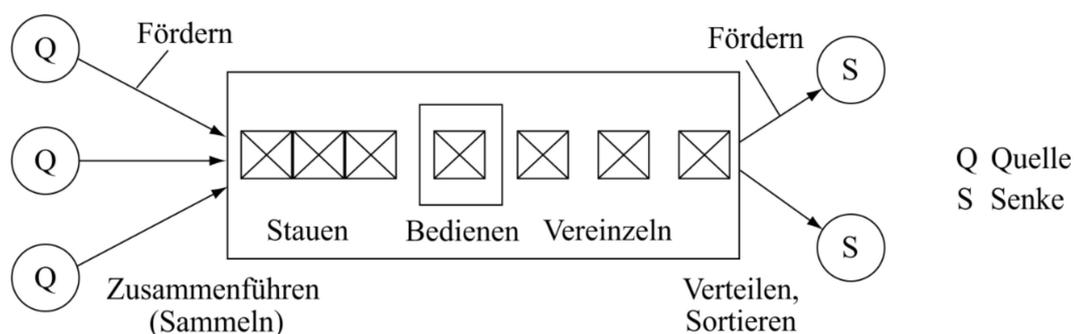


Abbildung 2-1: Materialflusstechnische Aufgaben von Stückgutförderern (nach [ARN08], S. 614)

Im einfachsten Fall lässt sich der Materialfluss durch eine einzelne Fließlinie beschreiben (vgl. Abbildung 2-2a). Der überwiegende Teil heutiger Materialflusssysteme lässt sich als Netzwerk abbilden (vgl. Abbildung 2-2b), da die Abläufe teilweise seriell und teilweise parallel angeordnet

sind. Dies beruht darauf, dass zum Beispiel verschiedenes Material in wechselnder Reihenfolge denselben Vorgang (V) beansprucht oder dass gleiches Material alternativ verschiedene Vorgänge durchlaufen kann. Je höher die Flexibilität des Systems ist, desto höher ist der Grad der Vernetzung [ARF09].

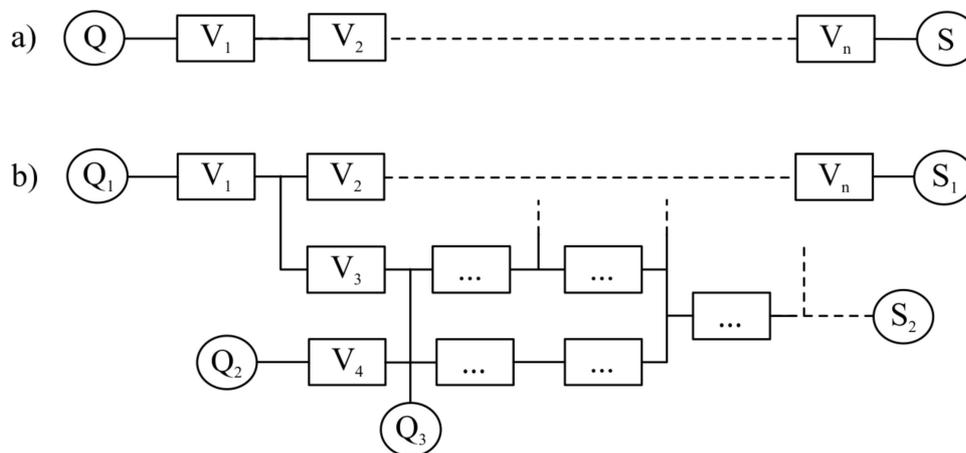


Abbildung 2-2: Fließlinienstruktur (a) und Netzwerkstruktur (b) in Materialflusssystemen mit Quellen (Q), Senken (S) und Vorgängen (V), (nach [ARF09], Abb. 1.1)

2.4.2 Systematik der Fördertechnik für Stückgüter

Ein wesentliches Kriterium zur Einteilung der Fördermittel stellt die Stetigkeit des Fördervorgangs dar. Es werden Förderer mit stetigen, quasistetigen und unstetigen Förderprozessen unterschieden. Stetige Fördermittel weisen eine kontinuierliche, quasistetige Förderer eine periodische Förderbewegung auf. Kennzeichnend für diese Gruppen ist die Möglichkeit, mehrere Stückgüter in einem vorgegebenen oder zufälligen Abstand zu transportieren, wobei zwischen zwei Stückgütern keine Rückkehr des Lastaufnahmemittels zurück in die Ausgangsposition erfolgen muss. Dadurch sind gegenüber Unstetigförderern trotz im Allgemeinen deutlich niedrigerer Fördergeschwindigkeiten meist weit höhere Durchsätze zu erzielen. Stetige und quasistetige Förderer werden neutral als Stetigförderer bezeichnet und somit hinsichtlich der Begriffsbestimmungen nicht weiter unterschieden ([ARN08], S. 613–614).

Im Gegensatz zu den Stetigförderern erzeugen Unstetigförderer einen unterbrochenen Fördergutstrom, wobei sie in einzelnen Arbeitsspielen mit definierten Spielzeiten arbeiten. Bei diesen Fördermitteln wechseln Zeitanteile für Lastfahrten, Leerfahrten, Anschlussfahrten und Stillstandzeiten unterschiedlicher Dauer einander ab. Unstetigförderer zeichnen sich im Vergleich zu stetiger Fördertechnik im Allgemeinen durch eine höhere Flexibilität aus.

Stetigförderer werden hingegen bevorzugt eingesetzt bei Systemen mit hoher Leistung, bekanntem Layout und standardisierten Ladehilfsmitteln ([JÜS00], S. 88). Sie erzeugen einen kontinuierlichen (Schüttgut) oder diskret kontinuierlichen (Stückgut) Fördergutstrom. Sie arbeiten über einen längeren Zeitabschnitt im stationären Dauerbetrieb. Die Be- und Entladung erfolgt während des Betriebs. Stetigförderer sind stets mit ortsfesten Einrichtungen, wie Führungen und Ständerwerk o. ä., ausgestattet. Dadurch ist ihre Flexibilität eingeschränkt, weshalb sie für andere Arbeitsmittel häufig ein Hindernis darstellen. Vorteilhaft ist jedoch, dass ein größerer Durchsatz als bei Unstetigförderern erreicht werden kann ([JÜS00], S. 88).

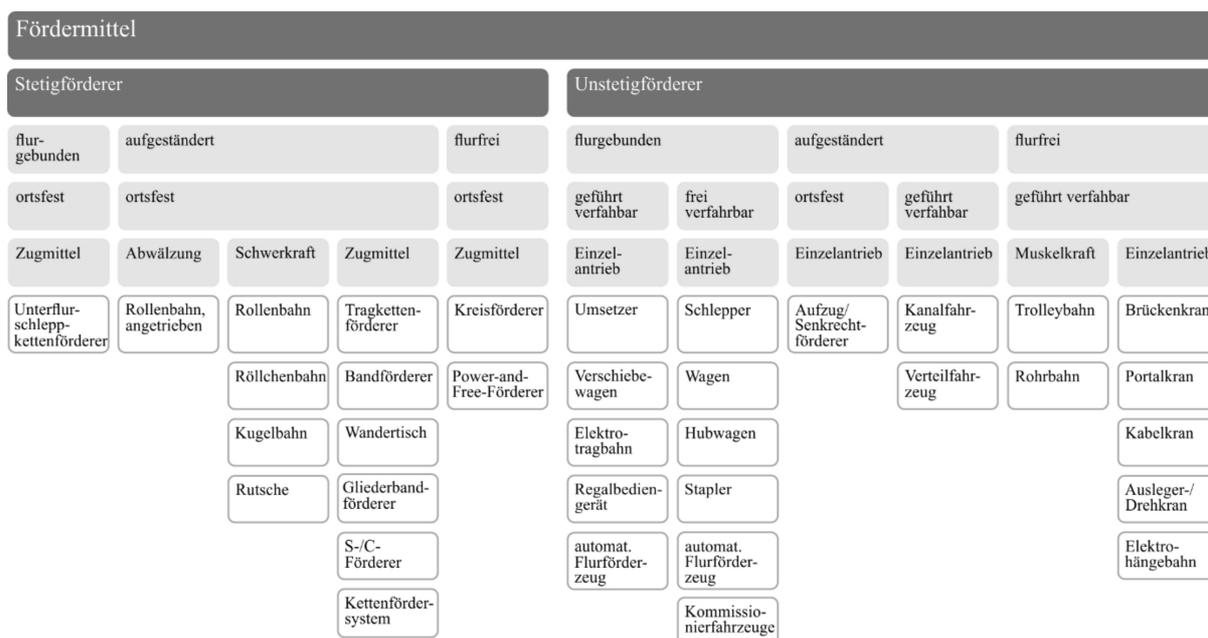


Abbildung 2-3: Systematik der Fördermittel für die Stückgutförderung (nach [JÜS00], S. 90)

Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Transportgütern sind unterschiedliche Typen von Stetigförderern im Einsatz (Abbildung 2-3). Die Auswahl auf einen spezifischen Förderertyp richtet sich nach der Charakteristik des zu transportierendem Förderguts, dort vor allem nach dem Gewicht des Fördergutes. In der Praxis haben sich folgende angetriebene Stetigförderer im Einsatz bewährt ([JÜS00], S. 96 ff.; [VDI07]):

- Unterflur-Schleppkettenförderer
- Angetriebene Rollenbahn
- Bandförderer, Gurtförderer
- Kettenförderer
- Tragkettenförderer
- Gliederbandförderer, Wandertische
- Skid-Fördertechnik
- S- und C-Förderer
- Kreisförderer
- Power-and-Free-Förderer

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt bei Energieeffizienzuntersuchungen an Fördermittel im Intralogistikbereich, daher erfolgt nur die Untersuchung angetriebener Stetigförderer für den Stückguttransport. Unstetigförderer, wie z. B. Hallenkräne oder Gabelstapler werden nicht betrachtet.

Als Förderhilfsmittel (Ladungsträger) werden vorwiegend Kleinbehälter und Kartons eingesetzt. Nach DIN EN 13 199-1 sind Kleinladungsträger (KLT) genormt und standardisiert. Die Kleinbehälter sind meist stapelbar, ineinander schachtelbar, schlag- und stoßfest sowie faltbar [MAR09]. Die Maße von KLT-Systemen müssen auf dem Flächenmodul 600 mm x 400 mm aufgebaut sein [DIN00].

Die Beladung von Kleinladungsträgern ist bei säulenstapelbaren KLT auf $m = 20$ kg und bei verbundstapelbaren KLT auf $m = 50$ kg (mit Ausnahme von KLT 3217 und 3214) beschränkt [DIN00]. Abhängig von der Charakteristik der zu transportierenden Waren, kommen je nach Anwendungsfall unterschiedliche Förderhilfsmittel (Transporteinheiten) zum Einsatz:

- Behälter aus Kunststoff oder Kartonagen (bis 50 kg)
- Paletten (bis 2500 kg)
- Tablare

Abhängig von den Transporteinheiten und den Nennbeladungen kommen in der Intralogistik dabei hauptsächlich folgende Typen von Stetigfördertechnik zum Einsatz (Abbildung 2-4):

- Rollenförderer
- Bandförderer
- Kettenförderer

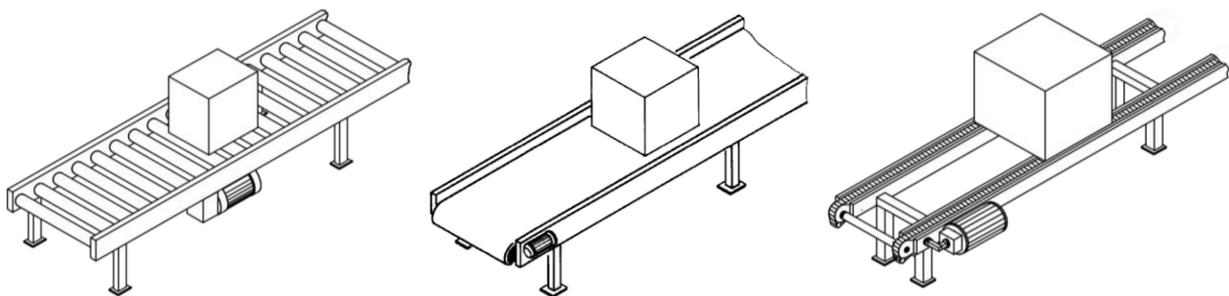


Abbildung 2-4: Gängige Fördertechniktypen der Intralogistik (nach [JÜS00])

Sind Niveauunterschiede im Förderweg aufwärts zu überwinden, sind einige Fördermittel wie Rollenförderer nicht in der Lage, den Transport durchzuführen.

2.4.3 Technologie der untersuchten Stetigfördertechnik

In den folgenden Kapiteln wird die aktuelle Technologie der in dieser Arbeit untersuchten Stetigfördertechnik beschrieben. Dabei kommen zwei Rollenförderer und ein Bandförderer unterschiedlicher Antriebstechnologie zum Einsatz. Die Beschreibungen beinhalten den konstruktiven Aufbau der Fördermittel, der Antriebsstränge sowie der eingesetzten Antriebstechnologie.

Konstruktiver Aufbau und Komponenten

Der Grundaufbau ist bei Rollen- und Bandförderern ähnlich. Ein oder mehrere Antriebseinheiten treiben die Fördererelemente des Systems an (Rollen, Bänder) und befördern so die Transporteinheiten. Jede angetriebene Stetigfördertechnik besteht dabei aus den folgenden Funktionseinheiten:

- Grundkonstruktion zur Aufnahme der Fördererelemente und Antriebseinheiten (Abbildung 2-5)
 - Tragkonstruktion aus Profilrahmen, Schienen, an denen die Fördererelemente befestigt sind
 - Bauelemente zur Abstützung umlaufender Fördererelemente (Stahlblech verzinkt)
 - Ständer zur Befestigung am Flur, ermöglichen Traglasten bis zu 100 kg/lfm
- Trag- bzw. Fördererelemente (Rolle, Band in dieser Arbeit, ansonsten Ketten, Riemen, etc.)
- Förderhilfsmittel (Behälter, max. 50 kg Beladung)
- Antriebsstrang mit Mechanik und Antriebsmotoren zur Leistungsübertragung. Die gesamte Einheit ist an der Grundkonstruktion befestigt und stellt über eine kraft- oder formschlüssige Verbindung den Leistungsfluss vom Antrieb zum Fördererelement her.
 - Energiewandler (Elektromotoren) inkl. Stellglieder, Leistungselektronik und Antriebssteuerung bzw. -regelungen
 - Energieübertragungselemente (Kupplungen, Wellen, Flachriemen, Rundriemen, etc.)
- Energieversorgung
 - Spannungsversorgung 400 V oder
 - Netzteile zur 24 V Bereitstellung
 - Druckluftversorgung (bei staudrucklosem Förderprinzip)
- Steuerung
 - SPS und Sensorik (Lichtschranken)
 - Stellglieder (Frequenzumrichter)
 - Steuermodule zum Betrieb elektrisch geregelter Antriebe (meist bei 24 V Antrieben)

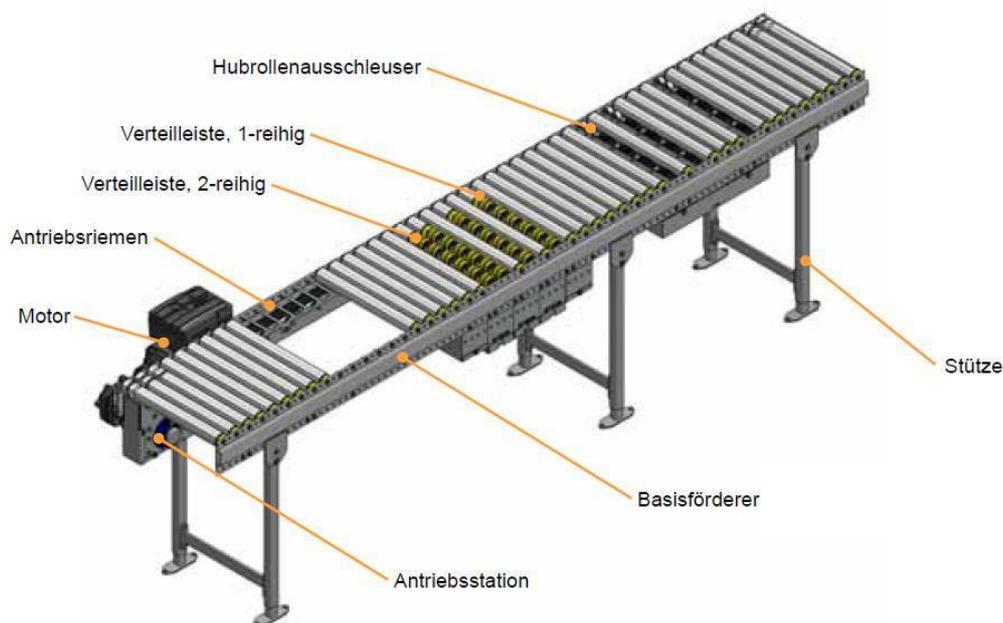


Abbildung 2-5: Konstruktiver Aufbau eines Förderers, Bildquelle: transnorm System GmbH

Die eingesetzte Antriebstechnologie kann je nach Einsatzfall variieren. Das bedeutet, dass sich die eingesetzten Geräte in unterschiedlichen Materialflusslayouts somit sehr ähnlich sind. Fördertechnikanlagen sind deshalb im Baukastensystem aufgebaut und bestehen in ihrer Grundkonstruktion deshalb aus Standardkomponenten. In der Fördertechnik haben sich daher Baukastenprinzip, Standardisierung und die Konstruktion von Erzeugnisreihen weitgehend durchgesetzt [BÖG09].

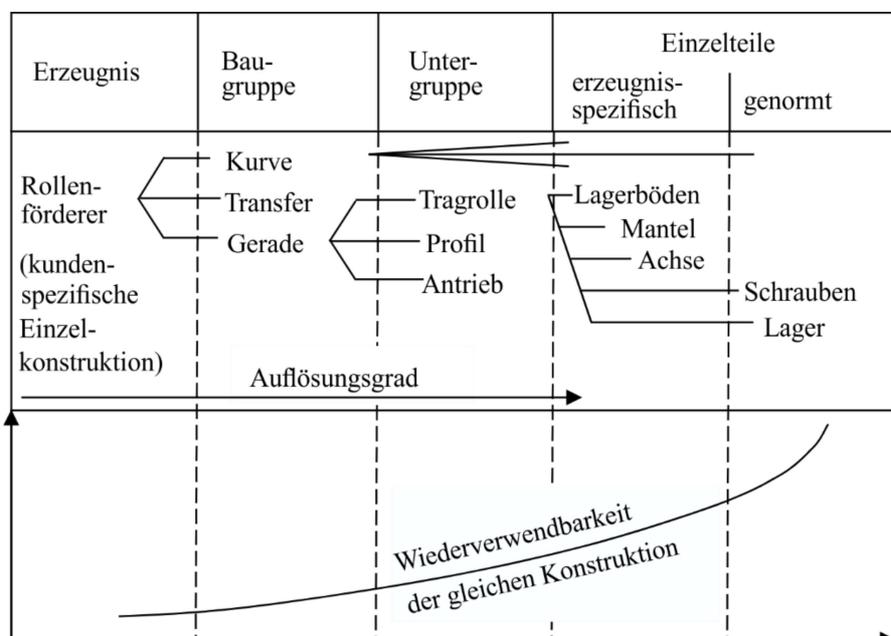


Abbildung 2-6: Auflösung eines Rollenförderers in Baugruppen (nach [BÖG09]; [WIE11], Abb. 19)

Baukastenprinzip heißt, dass ein Erzeugnis so lange nach Abbildung 2-6 in Baugruppen, Untergruppen und Einzelteile „aufgelöst“ wird, bis die Erzeugnisteile genügend oft verwendet und daher

in Serie gefertigt werden können. Natürlich müssen die einzelnen Baugruppen miteinander kombinierbar sein. Der Konstrukteur kann dann die vom Kunden gewünschte Lösung weitgehend aus vorhandenen „Bausteinen“ zusammensetzen ([BÖG09], S. K4).

Dem Baukastenprinzip eng verwandt ist das Arbeiten mit Komponenten. Komponenten sind in der Fördertechnik maschinenbauliche und elektrotechnische Bauteile und Baugruppen, die der Hersteller beziehen und für seine speziellen Zwecke einsetzen kann. So können z. B. Hersteller von Fördertechnik den Antrieb, bestehend aus speziell ausgelegtem Motor und Getriebe, komplett beziehen und einfach auf die Antriebswelle des mechanischen Antriebsstranges anflanschen. Der Anlagenhersteller konzentriert sich in diesem Fall auf kundenspezifische Auslegung, Konstruktion und Lieferung der neuen Gesamtanlage ([BÖG09], S. K5).

Betriebsarten

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Betriebsarten, mit denen Fördermittel der Stetigförder-technik betrieben werden können (vgl. [FIS11], S. 393 ff.), den Dauerbetrieb und den Aussetzbetrieb [BLF13].

- Der Dauerbetrieb charakterisiert sich durch Belastungen, die so lange andauern, bis der thermische Beharrungszustand, d. h. die Endtemperatur der Motor-Getriebe-Kombination, erreicht ist [FIS11]. Diese Betriebsart wird vor allem bei zentralen Antrieben meist mit einer Antriebsspannung von 400 V eingesetzt.
- Bei Förderaufgaben mit geringeren Durchsätzen wird ein Aussetzbetrieb verwendet. Hier erfolgt die konsequente Abschaltung der Fördertechnik im Leerlaufbetrieb, die Stillstandszeiten steigen. Diese Form erreicht den thermischen Beharrungszustand nicht [FIS11]. Der Einsatz des Aussetzbetriebes wird vor allem im Bereich der 24 V Antriebstechnik unter Verwendung einer dezentralen Steuerung eingesetzt [BLF13].

Je nach Wahl der Betriebsart ergeben sich unterschiedliche Leistungsaufnahmeverläufe. Im Dauerbetrieb muss bei Überfahrt des Ladungsträgers über das Fördersegment das zusätzliche Gewicht des Ladungsträgers überwunden werden. Daher steigt der Leistungsbedarf je nach Anzahl der transportierten Ladungsträger an und wieder ab. Die aus dem Netz bereitgestellte Grundleistung wird dazu verwendet, die Fördertechnik betriebsbereit zu halten [BLF13].

Im Aussetzbetrieb kann ein ähnlicher Leistungsverlauf bei der Überfahrt des Ladungsträgers erwartet werden. Da der Förderer allerdings in Wartezeiten abgeschaltet ist und aus dem Stillstand beschleunigt wird, müssen bei jedem Einschaltvorgang alle Trägheiten und Massen des gesamten Fördermoduls beschleunigt werden. Dies erfordert beim direkten Anfahren eine erhöhte Leistungsspitze, die für eine kurzzeitige Überlastung der Antriebssysteme sorgt [BLF13].

Antriebsstrang

Unter dem Antriebsstrang werden in dieser Arbeit alle Komponenten verstanden, die an der Fördertechnik die Leistung für den Antrieb generieren und bis an die Kontaktstelle zwischen Förderelement und Förderhilfsmittel (Transporteinheit) übertragen. Einen allgemeingültigen schematischen Aufbau, sowie die erforderlichen Komponenten im Antriebsstrang der untersuchten Fördermittel, zeigt Abbildung 2-7.

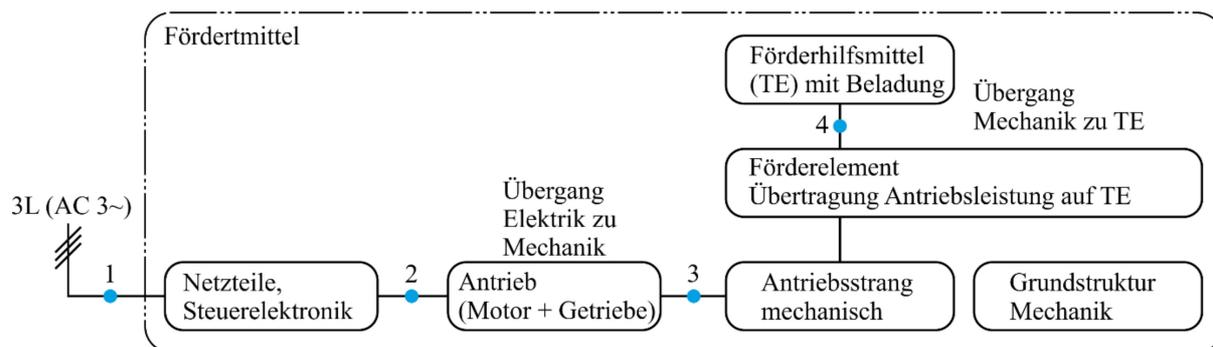


Abbildung 2-7: Schematischer Aufbau von Antriebssträngen der Fördermittel

Die Stetigfördertechnik kann mit unterschiedlichen Antriebsspannungen betrieben werden. Eine oft genutzte Variante stellen derzeit zentrale Getriebe-Motor-Kombinationen, die mit 400 V Antriebsspannung versorgt werden, dar. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Stetigfördertechnik mit 24 V Antriebsspannung zu versorgen.

Beide Antriebssysteme können zentral oder dezentral betrieben werden. Die Prinzipien unterscheiden sich hauptsächlich darin, ob die Motor-Getriebe-Kombination extern an der Förderstrecke angebracht oder in das Fördersegment integriert ist. Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 zeigen die theoretische Umsetzung der beiden Möglichkeiten [BLF13].

Beim zentralen System befinden sich alle erforderlichen Antriebselemente, die für eine bestimmte Anzahl an Förderrollen zentral außerhalb des Förderers positioniert werden, an einem zentralen Ort [MAR09].

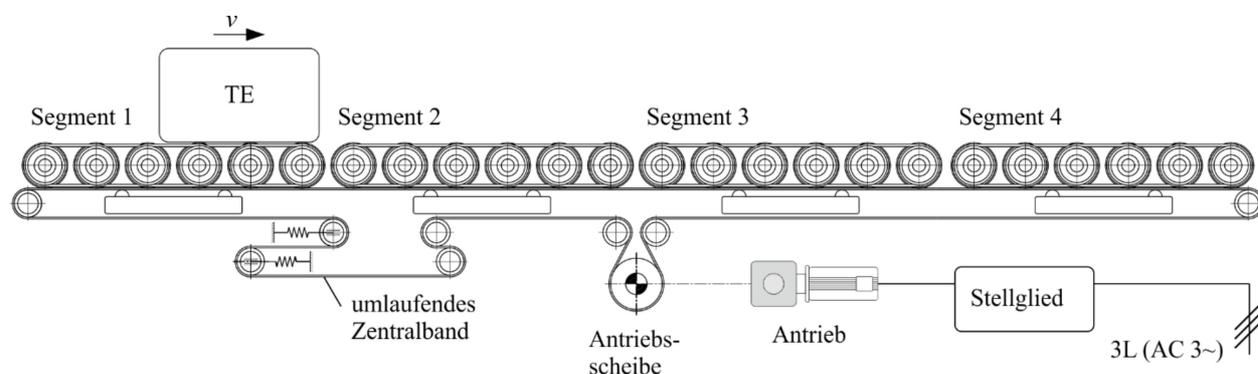


Abbildung 2-8: Prinzipdarstellung der Realisierung einer zentralen Antriebseinheit (400 V)

Bei dezentralen Antriebseinheiten werden Antriebselemente direkt in ein einzelnes Fördersegment oder Fördermodul integriert. Bei Rollenfördersystemen kommen in zentralen Antriebssystemen vor allem 400 V Antriebstechniken zum Einsatz, wohingegen in dezentralen, kürzeren Systemen die 24 V Technik häufig zur Anwendung kommt [BLF13].

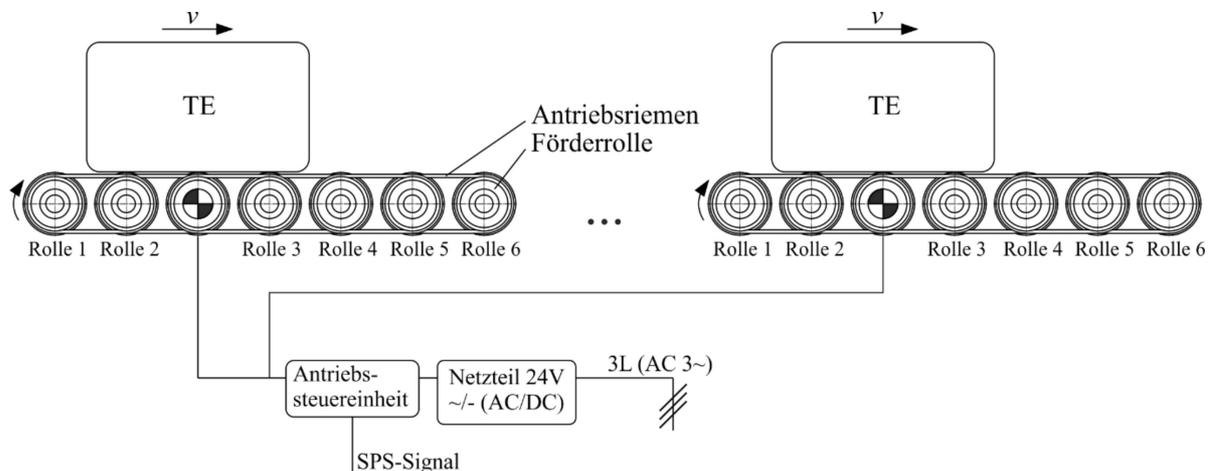


Abbildung 2-9: Prinzipdarstellung der Realisierung von dezentralen Antriebseinheiten (24 V)

Mechanik

Im Antriebsstrang der 400 V Antriebstechnik können zur Realisierung des Transportprozesses verschiedene Übertriebsmittel verwendet werden, die die Kraft des zentralen Antriebs auf die weiteren Förderelemente übertragen [MAR09]:

- Reibschlüssige Kraftübertragung mittels Flach- oder Keilriemen, die unter den Förderrollen entgegen der Transportrichtung laufen (siehe Abbildung 2-8)
- Formschlüssige Kraftübertragung mit Hilfe von Ketten und den dazugehörigen Tragrollen
- Zentralwelle mit Rundriemen zur Leistungsübertragung, etc.

Flachriemen werden unterhalb der Förderrollen montiert und ermöglichen damit den gleichzeitigen Antrieb aller Förderrollen des Segments. Mit Hilfe von Andruckröllchen erfolgt bei Andrücken des Flachriemens an die Förderrolle eine Drehmomentübertragung (Abbildung 2-8).

Neben der Übertragung der Antriebskraft auf die Rollen, ist die Übertragung der Leistung auf alle weiteren Tragrollen innerhalb eines jeweiligen Fördersegments relevant. Dies kann über verschiedene Übertriebsmittel realisiert werden. Bei Rollenförderern wird grundsätzlich zwischen Zahnriemen, Rollenketten oder Rund- und Keilrippenriemen unterschieden. Mit Keilrippenriemen ist eine gute Drehmomentübertragung möglich, die für kurze Beschleunigungs- und Bremswege, z. B. bei Staurollenförderern, eingesetzt werden kann [BLF13].

Die im weiteren Verlauf betrachteten Rollenförderer sind alle mit Keilrippenriemen ausgestattet (Abbildung 2-10). Beim Bandförderer erfolgt die Leistungsübertragung über das Förderband, welches gleichzeitig als Zug- und Lastträger fungiert.

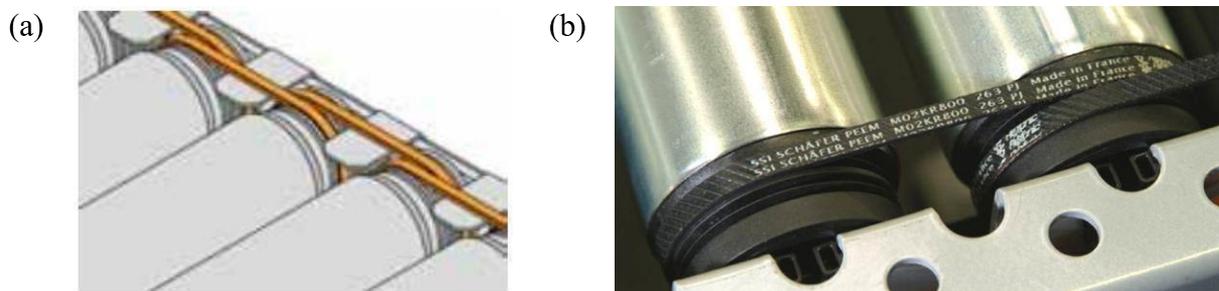


Abbildung 2-10: Übertriebsmittel Keilrippenriemen (a) Prinzipdarstellung (b) Ausführung am Förderer, Bildquellen: transnorm System GmbH, SSI Schäfer PEEM GmbH

Um die Förderaufgabe mit Hilfe eines Motors realisieren zu können, muss die Winkelgeschwindigkeit des Motors auf die des Förderprozesses übersetzt werden. Getriebe in der Stückgutförderer-technik werden als Untersetzungsgetriebe, die zwischen Antriebsmotor und Arbeitsmaschine eingesetzt sind, verwendet. Hierfür können verschiedene Arten von Getrieben, z. B. Stirnrad-, Schnecken- oder Kegelradgetriebe, mit verschiedener Übersetzung eingesetzt werden [BLF13].

Der Antriebsstrang der 24 V Antriebstechnik ist ähnlich gestaltet wie der Antriebsstrang der 400 V Antriebstechnik. Zur Übertragung der Kraft auf die weiteren Förderrollen des Fördersegmentes werden die gleichen Übertriebsmittel wie bei Rollensegmenten der 400 V Technik eingesetzt. Neben Zahnriemen und Rundriemen finden Keilrippenriemen Verwendung.

Der dezentrale Antrieb wird meist bei 24 V Antriebsspannung eingesetzt, d. h., die Getriebe-Motor-Kombination wird in die Tragrolle für den sogenannten Tragrollen- oder Motorrollenantrieb integriert. Als Motortypen werden Gleichstrommotoren eingesetzt.

Antriebsmotoren

Die Aufgabe eines Antriebes in der Stetigförderertechnik ist das Anfahren, Treiben und Bremsen von mechanischen Elementen wie Ketten, Rollen, Fahrwerken, etc. [VDI00]. Die unterschiedlichen Einsatzbedingungen an Förderern und die mittlerweile erreichte Vielfalt von Systemen und Systemkomponenten ergeben ein breites Anforderungsspektrum für Antriebseinheiten. [VDI00]. Für Steuer- bzw. Überwachungsfunktionen sind je nach Antriebsart und Anforderungen weitere Hilfseinrichtungen wie Steuer-/Regelgeräte, Signal-/Messwertgeber, Stellglieder, etc. erforderlich. Ihr Umfang, auf den an dieser Stelle hingewiesen werden soll, hängt von der gewählten Antriebstechnik ab [VDI00].

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die in der KLT-Fördertechnik gängig eingesetzten Motoren inklusive der Zuordnung des Einsatzbereiches und erforderlicher Zusatzkomponenten.

Tabelle 2-1: Übersicht gängiger Antriebsmotoren an Stetigfördertechnik der Intralogistik

Motortyp	Einsatzbereich zentral/dezentral	Leistungselektronik Steuermodule	Zusatzkomponenten für Betrieb
Drehstromasynchronmotoren ASM (400 V)	zentral	mit/ohne möglich	Getriebe erforderlich
Drehstromsynchronmotoren SM (400 V)	zentral/dezentral	erforderlich	mit/ohne Getriebe möglich
Gleichstrommotoren GM (24 V)	dezentral	erforderlich	Netzteile und Ge- triebe erforderlich

Aufgrund der hohen Energiedichte neuer Magnetmaterialien finden permanenterregte Synchronmaschinen bei Antrieben der Fördertechnik zunehmend Anwendung. Diese Maschinen weisen je nach Anwendung ca. 30 % weniger Verluste als herkömmliche Asynchronmotoren auf [TEI13]. Ein Selbstanlaufen ist mit Synchronmotoren nicht möglich. Der Aufwand für Steuerungselektronik kann dabei als ähnlich eingeschätzt werden wie bei Asynchronmotoren. Werden die Übertragungsglieder in die Förderrolle integriert, so wird von einem Trommelmotor gesprochen. Hier können ebenfalls Getriebe sowie Asynchronmotoren und auch Synchronmotoren eingesetzt werden. Diese Form der Trommelmotoren wird allerdings vermehrt bei Band- oder Gurtförderern verwendet ([FIS11]; [TEI13]; [BLF13]).

Als zusätzliches Antriebsglied werden derzeit Frequenzumrichter im Antriebsstrang der 400 V Antriebstechnik eingesetzt. Sie können Änderungen der Rollengeschwindigkeit und Rollenrichtung für mehrere Systeme realisieren. Mit Hilfe von variablen Frequenzen lassen sich durch sie Anlauf- und Umkehrdrehmoment für einen intermittierenden Start-Stopp Betrieb und Umkehrfunktionen optimieren ([TEI13]; [MRW08]).

In der 24 V Antriebstechnik kommen Gleichstrommotoren (GM) in bürstenloser Variante zum Einsatz. Ihr Aufbau ist ähnlich einer ungedämpften, permanenterregten Synchronmaschine, bei der die Bürsten durch eine elektrische Schaltung ersetzt wurden. Damit besitzen bürstenlose Gleichstrommaschinen neben der Vermeidung des Bürstenfeuers die weiteren Vor- und Nachteile eines Synchronmotors ([BIN12]; [SCH07]).

Neben der Leistungselektronik zur Ansteuerung der Motoren (Steuerungseinheiten) müssen auch eigenständige Netzteile zur Energieversorgung von Geräten oder Baugruppen im Antriebsstrang

eingesetzt werden, die andere Spannungen und Ströme benötigen als die vom Stromnetz bereitgestellten. In der Fördertechnik werden zum Großteil Schaltnetzteile eingesetzt. Sie werden dabei mit höheren Frequenzen als der Netzfrequenz betrieben. Dies ermöglicht bei gleicher Leistung den Einsatz kleinerer und leichter Transformatoren und steigert damit den Wirkungsgrad des Systems. Schaltnetzteile liefern eine Gleichspannung oder einen geregelten Gleichstrom [TEI13].

Die Antriebsstränge der speziell in dieser Arbeit untersuchten Förderer sind folgend aufgebaut:

- Rollenförderer mit Zentralbandantrieb (zentral, 400 V Asynchronmotor): Die einzelnen Rollen sind an den Stirnseiten tangential mit Riemen verbunden (Poly-V Keilrippenriemen). Unterhalb der Förderrollen wird das Drehmoment von einem motorgetriebenen Flachriemen über Andrückrollen in das Rollensystem eingeleitet und über die Verbindungsriemen zu den anderen Rollen verteilt (vgl. Abbildung 2-8).
- Rollenförderer mit Motorrollenantrieb (dezentral, 24 V Gleichstrommotor): Der Rollenförderer besteht aus einzelnen Rollensegmenten. Ein Rollensegment besteht aus einer Motorrolle und Förderrollen, verbunden über Keilrippenriemen. Die Motorrolle besitzt in ihrem Inneren einen eigenen elektrischen Antrieb und kann daher unabhängig bewegt werden (Trommelmotor). Pro Motorrolle können bis zu 11 Förderrollen angetrieben werden (vgl. Abbildung 2-9).
- Bandförderer (zentral, 400 V Asynchronmotor): Das Förderband wird von zwei an beiden Enden befindlichen Rollen geführt. Der Antrieb erfolgt über eine eigene Antriebstrommel in der Mitte des Bandes. Um eine gesicherte Kraftübertragung zu gewährleisten, ist eine Spannvorrichtung erforderlich, welche die notwendige Bandvorspannung herstellt. Das Förderband wird im Lasttrum durch verzinkte Stahlbleche abgestützt.

Die technische Beschreibung und Konfiguration der untersuchten Förderer erfolgt in Kapitel 5.1.1.

Typische Spezifikationen von Stetigfördertechnik im KLT-Bereich bis 50 kg sind:

- Fördergeschwindigkeit: 0,3 m/s – 1,2 m/s
- Erreichbarer Durchsatz: bis 2400 TE/h
- Mögliche Beladung: 50 kg (eben), max. 35 kg (18°)
- Maximale Neigung: 18° (Bandförderer)
- maximale Länge: 26 m
- Antriebsleistung: bis 1,5 kW/Förderer

2.5 Berechnungsgrundlagen der Fördertechnik

Bei der Auslegung von Stetigförderern stellen die zu transportierende Fördermenge und die für den Transport erforderliche Antriebsleistung, bei gegebener Streckenführung und Bauart, die beiden wesentlichen fördertechnischen Ausgangsdaten dar [MRW08].

2.5.1 Materialflusstechnische Berechnungen

Die Menge ist ein Maß für die Gesamtheit aller Güter, die in einem Materialflusssystem transportiert, umgeschlagen oder gelagert werden. Die Mengenangabe ist in den Dimensionen

- Masse in kg und
- Stück in Transporteinheiten (TE) üblich.

Da Förderer den Warentransport durchführen, sind so zu auszulegen, dass eine vorgegebene Transportmenge innerhalb des Materialflusssystem in geforderter Zeit durchgeführt werden kann. Der geforderte Gesamtdurchsatz eines Materialflusssystem und das Layout des Systems sind somit maßgebend für die Auslegung der Fördergeschwindigkeit. Typischerweise wird die Fördergeschwindigkeit bei der Planung des Gesamtdurchsatzes einer Anlage festgelegt. Sie ist im gesamten System gleich und wird nicht verändert (Ausnahme bei langen Verbindungsstrecken zwischen Bereichen des Materialflusssystem).

Auf einer Förderstrecke der Länge L_F bewegen sich Transporteinheiten (TE) unbehindert mit der Geschwindigkeit v von einer Quelle zu einer Senke (Abbildung 2-11). Sogenannte aktive Förderstrecken (z. B. Bandförderer) zeichnen sich durch eine konstante Fördergeschwindigkeit v aus.

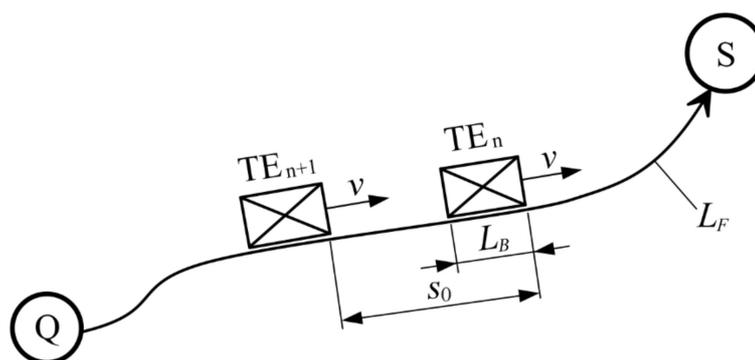


Abbildung 2-11: Transporteinheiten auf einer Förderstrecke (nach [ARF09], S. 615)

Die Fördertechnik transportiert also eine gewisse Menge (Anzahl von Transporteinheiten TE) pro Zeiteinheit. Der Durchsatz Λ einer Förderstrecke berechnet sich somit im einfachsten Fall aus der Geschwindigkeit v und dem Abstand s_0 der Fördereinheiten:

$$\Lambda = \frac{v}{s_0} \text{ in } \frac{1}{s} \quad (2.1)$$

Der maximale Durchsatz wird erreicht, wenn die Transporteinheiten lückenlos, einander berührend die Förderstrecke passieren. Dies ist aber nur sehr selten möglich. Sicherheitsabstände zur Schonung der Transporteinheiten oder steuerungstechnische Restriktionen mindern den Durchsatz ([ARF09], S. 12). Die theoretisch maximale Förderleistung eines Stetigförderers wird als „Grenzleistung“ bezeichnet ([JÜS00], S. 96).

Beim Stückguttransport werden nur zu diskreten Zeitpunkten Objekte am Beobachtungspunkt registriert. Die Änderung der Durchflussmenge erfolgt sprunghaft. Die Leistungsfähigkeit bei stetiger und intermittierend arbeitender Förderung wird durch den Fördergutstrom gekennzeichnet. Der Fördergutstrom gibt die je nach Zeiteinheit bewegte Gutmenge (Gutdurchsatz) an. Er wird je nach Fördergut und Förderverfahren als Stückgutstrom oder Massenstrom angegeben [VDI98b]. Die Definition des Stückgutstroms bei konstanter Fördergeschwindigkeit und gleichbleibendem bzw. gemitteltem Abstand zwischen den TE zeigt (2.2).

$$I_{St} = 1 \text{ Stück} \cdot \frac{v}{s_0} \text{ wobei } T = \frac{s_0}{v} \text{ und } \Lambda = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Der Kehrwert des Durchsatzes Λ stellt die Taktzeit T zwischen den Transporteinheiten dar. Bei der Berechnung des Massenstromes wird ein mittleres Gewicht pro TE angenommen [MRW08]. In realen Anlagen kann der tatsächliche Massendurchsatz anhand aufgezeichneter Log-Files des Auftragsverwaltungssystems bestimmt werden.

$$M_{St} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{v}{s_0} \text{ wobei } T = \frac{s_0}{v} \text{ und } \Lambda = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

Anhand dieser Gleichungen lässt sich bei vorgegebenem Massen- bzw. Stückstrom das zu planende fördererische System hinsichtlich der Fördergeschwindigkeit und eventuell erforderlicher paralleler Förderstrecken auslegen.

Anmerkung: In den VDI Richtlinien 4480-1 sowie 3978 wird die Zeichenfolge „TE“ für Angaben des Durchsatzes verwendet, bspw. Durchsatz von 120 TE/h ([VDI98a]; [VDI98b]). Die Transporteinheit, abgekürzt TE (LU in Englisch) stellt keine SI-Einheit dar. Trotzdem wird in dieser Arbeit als Einheit der Transporteinheit die Zeichenfolge „TE“ gewählt, um aussagekräftige Einheiten bei Berechnungen zu erhalten und Missverständnisse zu vermeiden.

2.5.2 Antriebsauslegung und energetische Betrachtungen

Für die Antriebsauslegung bzw. energetische Betrachtung an Fördertechnik werden nun die Definitionen der dafür notwendigen physikalischen Leistungsgrößen angeführt und die mathematischen Zusammenhänge erläutert. Die Berechnungsgrundlagen werden im folgenden Kapitel behandelt.

In Kapiteln zur Bewertungsmethodik (3 und 5.2) wird vorrangig von Energieeinsätzen bzw. Energiebedarfen gesprochen, da die Bewertung anhand zeitlicher Betrachtungsräume erfolgen muss. In Kapiteln, welche sich mit der Bestimmung von Verlusten im Antriebsstrang beschäftigen (Kapitel 4, 5.1 und 5.3), wird vorrangig von Leistungsaufnahmen bzw. Leistungsverlusten gesprochen, da untersuchte Komponenten bzgl. ihres Wirkungsgradverhaltens ohne zeitlichen Bezug dargestellt werden.

Elektrische Leistung, Arbeit und Energie

Für alle Komponenten im Antriebsstrang der Fördertechnik, von Spannungsversorgung bis hin zur Wandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie, d. h. an der Stelle des Antriebs, gelten folgende Zusammenhänge. Der Augenblickswert der elektrischen Leistung ergibt sich aus den Momentanwerten von Spannung und Strom.

$$p_{el}(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2.4)$$

Die Wirkleistung P_{el} stellt die tatsächlich umgesetzte Energie pro Zeit dar. Dabei ist T bei statistischen Vorgängen eine hinreichend lange Zeit.

$$P_{el} = \overline{p_{el}(t)} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) dt \quad (2.5)$$

Die im Zeitintervall verrichtete elektrische Arbeit ergibt sich mit (2.4) zu

$$W = \int_{t_0}^{t_1} p_{el}(t) dt \quad (2.6)$$

bzw. die von System aufgenommene Energie

$$E = \int_{t_0}^{t_1} u(t) \cdot i(t) dt. \quad (2.7)$$

Mechanische Leistung, Arbeit und Energie

Die mechanische Leistung eines Körpers berechnet sich bei translatorischen Bewegungen mit der Kraft F und Geschwindigkeit v .

$$P_{mech} = F \cdot v \quad (2.8)$$

Bei rotatorischen Bewegungen ergibt sich die Leistung mit dem Drehmoment M und der Winkelgeschwindigkeit ω .

$$P_{mech} = M \cdot \omega \quad (2.9)$$

Zum Beschleunigen eines beliebigen Körpers muss stets mechanische Arbeit verrichtet werden. Der Körper wird dadurch in einen neuen Zustand versetzt und ist dabei in der Lage, seinerseits Arbeit verrichten zu können. Dieser Zustand wird durch die physikalische Größe "Energie" beschrieben. Um einen Körper auf einer waagrechten Ebene gleichförmig zu bewegen, muss der Reibungskraft eine gleich große Gegenkraft entgegenwirken. Die dabei verrichtete Reibungsarbeit W_{Reib} ist proportional zur Reibungskraft F_R und zur zurückgelegten Wegstrecke s :

$$W_{Reib} = F_R \cdot s \quad (2.10)$$

Beim gleichzeitigen Auftreten mehrerer Reibungskräfte (z. B. Rollreibung, Reibung zwischen mechanischen Komponenten, Luftwiderstand, etc.) entspricht F_R der Summe aller auftretenden Reibungskräfte. Gemeinhin sind alle Reibungskräfte als Verluste anzusehen. Deshalb wird an Förder-technik vorwiegend von Bewegungswiderständen gesprochen.

Berechnung der Antriebsleistung eines Stetigförderers

Zur Auslegung des Antriebs ist die erforderliche Antriebsleistung zu berechnen. Die Antriebsleistung eines Förderers für den Beharrungszustand wird über den Gesamtwiderstand F_W und die Fördergeschwindigkeit v bestimmt. Der Gesamtwiderstand F_W bildet nach (2.11) die Summe aller Reibungs- und Steigungswiderstände, die vom Antrieb im stationären Betrieb zu überwinden sind.

$$F_W = F_R + F_{St} \quad (2.11)$$

Reibungswiderstände entstehen zum Beispiel durch Reibung in den Lagern der Tragrollen, durch die Kontaktreibung zwischen Förderband und Bandabstützung oder der Gutaufgabe.

Der Steigungswiderstand entsteht bei der Förderung eines Massenstromes entlang einer Steigung mit dem Winkel α auf die Höhe H .

Bei horizontal ausgeführten Stetigförderern wird der Steigungswiderstand zu null („+“ bei Aufwärtsförderung, „-“ bei Abwärtsförderung).

$$F_{St} = \pm H \cdot m_{IG} \cdot g = L_F \cdot m_{IG} \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2.12)$$

Der Gesamtreibungswiderstand setzt sich aus dem Hauptwiderstand (z. B. Laufwiderstand von Tragrollen, Walkwiderstände, Schwingbiegung, etc.), dem Nebenwiderstand (z. B. Trägheitswiderstände, Reibung an der Gutaufgabe, Gurtbiegung, Trommellagerreibung, etc.) und Sonderwiderständen zusammen, vgl. DIN 22101 bei der Berechnung von Bandförderern [DIN11b].

$$F_R = F_H + F_N + F_S \quad (2.13)$$

Bei der „Gesamtwiderstandsmethode“ wird der gesamte Reibungswiderstand überschlägig mit Hilfe einer empirisch ermittelten Gesamtreibungszahl μ_{ges} bestimmt. Die Gesamtreibungszahl μ_{ges} kann je nach Bauart des betreffenden Stetigförderers erheblich schwanken, siehe [DIN11b].

Der Gesamtreibungswiderstand F_R wird mit Hilfe der Gesamtreibungszahl wie folgt berechnet:

$$F_R = \mu_{ges} \cdot L_{ho} \cdot g \cdot (m_{IF} + m_{IG}) \quad (2.14)$$

L_{ho} Horizontalprojektion der Förderlänge

m_{IF} Längenbezogene Eigenmasse der Bauteile, die Reibungskräfte erzeugen (z. B. in kg/m).

m_{IG} Metergewicht des Fördergutes (Streckenlast)

g Erdbeschleunigung

Zur exakten Ermittlung des Reibungswiderstandes kommt die „Einzelwiderstandsmethode“ zur Anwendung. Hier muss die Förderstrecke in gerade Strecken, Umlenkungen des Last- und Leertrums sowie der Gutaufnahme- und Gutabgabestellen unterteilt werden. Die aus jedem einzelnen Teilstück mit gesonderten Reibungszahlen errechneten Widerstände ergeben bei Addition den gesamten Reibungswiderstand.

Der Gesamtwiderstand F_W eines Stetigförderers ergibt sich also nach (2.11) aus Hub- und Reibungswiderstand mit (2.12) und (2.14) zu:

$$F_W = F_U = \mu_{ges} \cdot L_{ho} \cdot g \cdot (m_{IF} + m_{IG}) \pm H \cdot m_{IG} \cdot g \quad (2.15)$$

Der Gesamtwiderstand F_W entspricht der Umfangskraft F_U , die durch den Antrieb des Förderers aufzubringen ist ([MRW08], S. 179).

Dabei ist bei unterschiedlichen Förderprinzipien zu unterscheiden:

- Für den Gesamtwiderstand eines Bandförderers, auch bei geneigter Ausführung, kann Gleichung (2.15) angewendet werden.
- Für den Gesamtwiderstand von Rollenförderern (ohne Zugmittel) entfällt in Gleichung (2.15) der Ausdruck für den Steigungswiderstand, da Rollenförderer in der Regel nur in horizontaler Richtung fördern.

Damit ergibt sich die erforderliche Antriebsleistung P_{An} des Förderers an der Antriebstrommel bzw. Antriebsscheibe mit der Fördergeschwindigkeit v zu

$$P_{An} = F_W \cdot v \quad (2.16)$$

Für die Auslegung des Antriebsmotors eines Förderers ist die Nennleistung P_N maßgebend. Diese berechnet sich mit dem Gesamtwirkungsgrad des Antriebes η_M nach folgender Gleichung:

$$P_N \triangleq P_L = \frac{P_{An}}{\eta_M} = \frac{F_W \cdot v}{\eta_M} \quad (2.17)$$

Allgemein kann die Nennleistung P_N des Antriebsmotors gleich der Volllastbeharrungsleistung P_L gewählt werden. Bei stark belasteten und schnell laufenden Stetigförderern ist die Anlaufleistung P_A zu überprüfen. Der Anteil für Beschleunigung bzw. Verzögerung P_{JA} berücksichtigt alle am Antriebssystem beteiligten Massen, welche beim Anfahren bzw. Abbremsen der Fördertechnik translatorisch und rotatorisch zu überwinden sind. Bei bekannten geometrischen Parametern können sämtliche Anteile berechnet werden.

$$P_{JA} = \frac{m_B \cdot v^2}{t_A \cdot \eta_M} + \frac{M_T \cdot \omega_N}{\eta_M} \quad (2.18)$$

m_B Eigenmasse des Förderers und des Fördergutes, welche transl. beschleunigt werden muss

t_A Anlaufzeit des Förderers

M_T Beschleunigungsmoment der rotierenden Massen an der Motorwelle

ω_N Winkelgeschwindigkeit an der Motorwelle

Die Anlaufleistung P_A für den Betrieb der Fördertechnik ergibt sich aus dem Anteil für den stationären Volllastbeharrungszustand P_L und dem Anteil für die Beschleunigung P_{JA} [DIN11b].

$$P_A = P_L + P_{JA} \quad (2.19)$$

Die Widerstandskräfte sind für den Betrieb somit permanent zu überwinden und verursachen an den einzelnen Komponenten entsprechende Verlustleistungen. Im stationären Fall erfolgt dabei eine Energieaufnahme entsprechend der Betriebsdauer t_1 bis t_2

$$E_F = P_L \cdot (t_2 - t_1) \quad (2.20)$$

Ist zum Betrieb des Antriebsmotors ein Frequenzumrichter im Einsatz oder werden Steuerelemente zum Betrieb von 24 V Antrieben eingesetzt, erfordern diese im Antriebsstrang entsprechende Eigenverbräuche und verursachen zusätzliche Verluste. Der Wirkungsgrad von modernen Frequenzumrichtern erreicht im Nennpunkt über 96 %, im unteren Lastbereich verschlechtern sich die Wirkungsgrade auf bis zu 82 % ([THH+08], S. 5).

Einflussparameter auf die Energieaufnahme

Anhand der dargestellten Berechnungsgrundlagen wird die Abhängigkeit folgender Parameter auf die Energieaufnahme, bei unveränderlicher längenbezogener Fördergutmasse, ersichtlich:

- Fördergeschwindigkeit
- Gesamtreibungszahl
- Längenbezogene Eigenmasse des Förderers, welche Reibungskräfte erzeugt, z. B. Gewichte der oberen und unteren Tragrollen, des Förderbandes, etc.
- Einsatzzeit bzw. Betriebsdauer
- Wirkungsgrade der Komponenten im Antriebsstrang (Antriebsmotor, Frequenzumrichter, etc.)

Diese Parameter geben somit bereits Aufschluss über mögliche Ansatzstellen bzw. Stellhebel zur möglichen Reduzierung der Gesamtverlustleistung des Förderers (vgl. [NSB+10], S. 143).

Die Bestimmung der Verluste an Rollen- und Bandförderer stellt einen Schwerpunkt dieser Arbeit dar, welche in den Kapiteln 4 und 5 theoretisch und experimentell durchgeführt wird.

2.6 Energieeffiziente Alternativmöglichkeiten an Stetigfördertechnik

Von Zulieferunternehmen sind am Markt bereits Komponenten zur Energieeinsparung der Fördertechnik verfügbar. Der Einsatz der Komponenten verspricht lt. Herstellern Einsparungen, diese sind jedoch nicht wissenschaftlich fundiert untersucht und quantitativ nachgewiesen. Nach Recherche der Marktsituation kann gezeigt werden, dass hauptsächlich im Bereich der Antriebstechnik Alternativ-Möglichkeiten vorhanden sind. Darüber hinaus sind im Bereich der Bandfördertechnik Komponenten mit reibungsreduzierenden Werkstoffkombinationen verfügbar. Verfügbare Alternativkomponenten der Technik für Energieeffizienz an Fördertechnik sind:

- Hocheffiziente Antriebstechnik
 - Alternative Motortechnologie (Synchronmotortechnik, reibungsarme Getriebe)
 - Getriebelose Ausführungen als Direktantrieb
 - Verlustarme Stellglieder (Frequenzumrichter), Netzteile
- Verlustarme Komponenten zur Leistungsübertragung
 - Förderbänder mit reibungsreduzierter Bandunterseite
 - Alternative Werkstoffe zur Abstützung von Förderbändern
 - Rollelemente zur Vermeidung von Gleitreibung durch Rollreibung

2.7 Notwendigkeit messtechnischer Untersuchungen

Warum sind messtechnische Untersuchungen an realer Fördertechnik notwendig? Die Identifikation von Optimierungspotenzialen am Antriebssystem kann mit theoretischen Überlegungen aufgrund von idealisierten Annahmen nur eingeschränkt geschehen. Informationen von Komponenten-Herstellern zu Einzeluntersuchungen von Komponenten, bestimmt unter optimalen Bedingungen im Labor der Hersteller, lassen keine ausreichenden Aussagen zu, wie das Gesamtsystem im Endeffekt beeinflusst wird. Meist sind nur Informationen zu Wirkungsgrad und Leistungsaufnahme von Teilkomponenten im Nennpunkt bekannt. Auf diesen Punkt wurden die Komponenten ausgelegt, folglich lassen die Werte darauf schließen, dass der Einsatz entsprechend erfolgreiche Energieeinsparungen ermöglicht.

Simulationsmodelle können komplexe Antriebsstränge abbilden, allerdings sind die Ergebnisse qualitativ nur so ansprechend, wie der Grad der Modellbildung und die Verwendung geeigneter Parameter um valide Simulationsergebnisse zu erhalten. Die Vielzahl an Einzelkomponenten im Gesamtsystem Fördertechnik mit Wirkungsgradinformationen und allen entsprechenden Abhängigkeiten ist allerdings schwer modellierbar. Die gegenseitige Beeinflussung einzelner Komponenten muss dabei berücksichtigt werden. Simulationsmodelle müssen an Prüfständen validiert

werden, teilweise sind Simulationsparameter extrem schwierig zu bestimmen. Zudem lässt sich die Exaktheit eines Simulationsergebnisses oft durch Fehlerfortpflanzungen von messtechnisch bestimmten Simulationsparametern, hinsichtlich einer statistischen Absicherung anzweifeln.

Um den Weg über aufwändige Simulationen zur Verlustbestimmung zu umgehen, müssen Messungen mit getesteter und validierter Messtechnik an realer Fördertechnik durchgeführt werden (vgl. [MSZ10]). So kann das Zusammenspiel aller Komponenten im Einsatzzustand unter realen Lastszenarien untersucht werden. Die messtechnische Bestimmung von Energie bzw. Leistungsgrößen kann dabei auf zwei verschiedenen Möglichkeiten erfolgen (vgl. [KDO+12]):

- Top-Down Betrachtung
- Bottom-Up Betrachtung

Diese Betrachtungen unterscheiden dabei die Formen der Messdatenbereitstellung bzw. –beschaffung und unterscheiden auch den Aufwand zur Bestimmung der Größen ([KDO+12], S. 74–75). Bei der Top-Down Betrachtung werden die Leistungsdaten aus Anlagenkomponenten wie Leitrechnern, Steuerungen, und Statusanzeigen von Regelungen bzw. Frequenzumrichtern ausgelesen. Die so bereitgestellten Werte können dann anhand der Anlagenkonfiguration auf Teilkomponenten im Sinne einer hierarchischen Struktur nach unten weiter aufgegliedert werden.

Bei der Bottom-Up Betrachtung erfolgt die Leistungsbestimmung durch den Einsatz geeigneter Messtechnik direkt an den Einzelkomponenten. Diese Werte werden dann zur Gesamtanlage hochskaliert. Der Aufwand für die Bestimmung durch den Einsatz von Messtechnik ist durch die Arbeiten zur Realisierung des Messaufbaus und der Messdurchführung natürlich höher. Allerdings sind die Auflösung und Qualität der Messergebnisse bei der Bottom-Up Methode größer, und somit ist sie für wissenschaftlich gesicherte Untersuchungen anzustreben.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind somit der Bottom-Up Methode zuzurechnen, weil validierte Ergebnisse der Teilkomponenten der Antriebsstränge gefordert werden. Dabei wird bewusst an Versuchsaufbauten realer Fördertechnik gemessen, nicht an Sonderprüfständen für Einzelkomponenten, welche eine Abbildung der realen Lastverhältnisse erschweren.

Demnach sind die im Kapitel 5 durchgeführten experimentellen Untersuchungen an Versuchsaufbauten folgenden Kategorien gemäß Abbildung 2-12 zuzuordnen:

- Kategorie I Betriebsversuch: Prüfung und Untersuchung originaler kompletter Systeme unter originalen Betriebs- und Beanspruchungsbedingungen („Betriebs- bzw. Feldversuch“)
- Kategorie II Prüfstandsversuch: Prüfung und Untersuchung originaler kompletter Systeme unter praxisnahen Betriebsbedingungen auf einem Prüfstand.

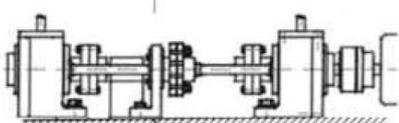
Kategorie	Mess- und Prüftechnik		System, Baugruppe, Modell
I	Betriebsversuche und betriebsähnliche Versuche: Original-Systemstruktur, Beanspruchung vereinfacht	Betriebsversuch	
II		Prüfstandsversuch	
III		Aggregatversuch	
IV		Bauteilversuch	
V	Modell- Struktur und einfache Beanspruchung	Probekörperversuch	
VI		Modellversuch	

Abbildung 2-12: Kategorien der Prüftechnik (nach [CZH10], S. 194)

3 Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung und Bewertung der Energieeffizienz

Im Kapitel 3 werden die eigenen theoretischen Ansätze zur Behandlung des Themas Energieeffizienz an Stetigfördertechnik durch die Einführung einer Bewertungsmethodik zum energetischen Gerätevergleich von Fördermitteln beschrieben.

- Dazu werden Kennzahlen und sämtliche erforderliche Teilkennwerte entwickelt und diskutiert. Betriebszustände sowie Systemgrenzen an Stetigfördertechnik werden erarbeitet.
- Prozessschritte zur Bestimmung der Kennzahlen werden festgelegt.
- Zur Bestimmung der Kennzahlen unter standardisierten Bedingungen wird eine Messprozedur in Form einer Prüfvorschrift erarbeitet.

Die eingeführte Bewertungsmethodik kommt im Kapitel 5.2 zur experimentellen Anwendung, um die Methodik anhand realer Versuchsanlagen zu validieren und die Energieeffizienz unterschiedlicher Fördertechnik quantitativ zu beschreiben. Durchgeführte Optimierungsmaßnahmen werden damit hinsichtlich ihrer endgültigen Auswirkung anhand der Kennzahlen beschreiben.

Das folgende Kapitel beschreibt den umfassenden Ansatz der in dieser Arbeit entwickelten Bewertungsmethodik. Es werden Effizienzkennzahlen und deren mathematische Definition entwickelt sowie der Einfluss verschiedener Betriebszustände erläutert. Um die Vergleichbarkeit und Unabhängigkeit der Kennzahlen in ihrer Bestimmung und Auswertung sicherzustellen, erfolgt neben der Definition auch die Vorgabe von Randbedingungen zur Bestimmung:

- Definierter Belastungszyklus – das Referenzarbeitsspiel
- Messaufbauten, Prüfbedingungen, Umgebungsbedingungen
- Prozessschritte zur Bestimmung der Kennzahl anhand einer Messvorschrift

Anforderungen, Betrachtungsbereich

Zielsetzung ist die Bewertung eines Stetigförderers bezüglich seiner Energieeffizienz. Eine dementsprechende Bewertung ist nicht bekannt und wird daher in dieser Arbeit für Stetigfördertechnik eingeführt. Sie liefert gültige Informationen zum Vergleich des Energieverbrauchs und kann auch Hilfsmittel für F&E-Entscheidungen sein. Die Lösung muss unabhängig von Größe und Lösungstechnologie sein und somit eine Betrachtung und Bewertung der Fördertechnik erlauben. Einen

Überblick über die in der Aufgabenstellung geforderte Anforderungen, die Grundaussage, und den Nutzen der Kennzahlen bzw. der Bewertungsmethodik liefert Abbildung 3-1.

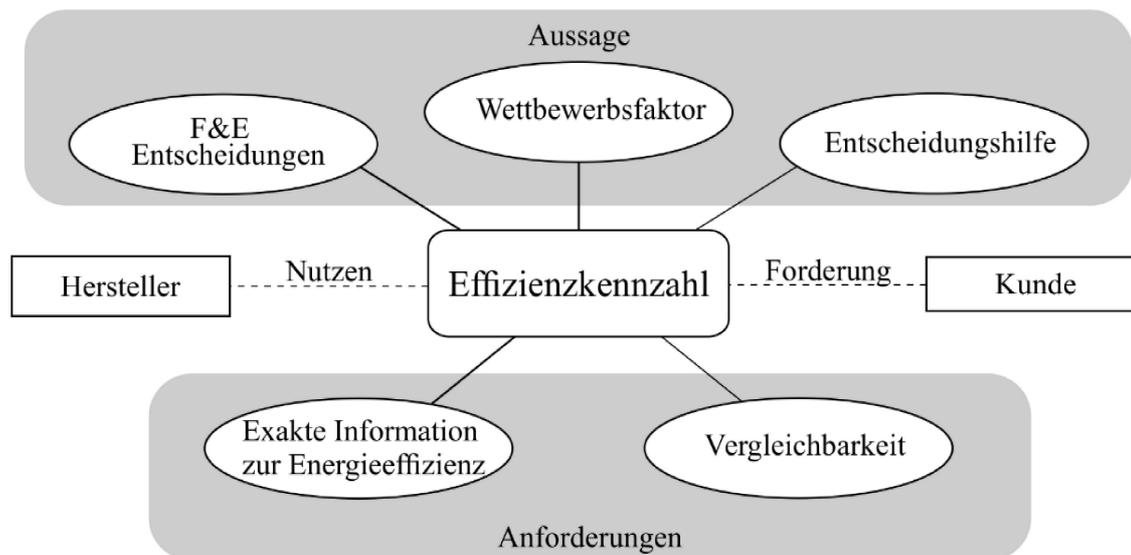


Abbildung 3-1: Anforderungen, Aussage und Nutzen der Effizienzkennzahlen

Der umfassende Ansatz des Kennzahlensystems erfolgt unter Betrachtung von drei klassifizierten Ebenen von Materialflusssystemen, siehe Abbildung 3-2. Der Anlagenebene, der Geräteebene und der Komponentenebene. Dabei werden unterschiedliche Detailgrade berücksichtigt. In der Anlagenebene werden die notwendigen Prozesse für den Materialfluss abgebildet. Die Geräteebene stellt die einzelnen Elemente dar, welche zur Ausführung der Materialflussprozesse notwendig sind. Fördermittel werden der Geräteebene zugeordnet.

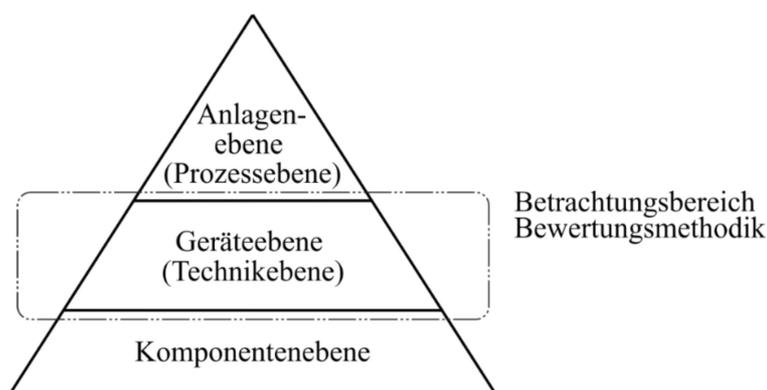


Abbildung 3-2: Betrachtungsebenen der Kennzahlen (nach [HAL12], Abb. 15)

Die Prozessebene bildet Vorgänge ab, welche aus mehreren Geräten gebildet werden, z. B. ein Kommissionierprozess eines Verteilzentrums, wo Fördertechnik in Verbindung mit einem automatisierten Lagersystem und Kommissionierarbeitsplätzen stehen, repräsentiert also die gesamte örtliche Anlage. Die Elemente der untersten Ebene, der Komponentenebene, sind nicht explizit

Teil der Untersuchungen zur Bewertungsmethodik, werden aber als Bausteine der Geräteebene unter Kapitel 4 bei der Bestimmung der Leistungsverluste betrachtet.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Bewertungsmethodik ist der Geräteebene zuzuordnen, der Untersuchungsschwerpunkt ist auf die Stetigförderertechnik gelegt worden. Die Gebäudetechnik (Licht, Klima, etc.) wird beim Energieverbrauch nicht berücksichtigt, detaillierte Betrachtungen zu Systemgrenzen werden im Kapitel 3.3 erläutert.

Technikbeschreibung und Klassifizierung

Die Gültigkeit dieser Bewertungsmethodik beschränkt sich auf die Stetigförderertechnik für Stückgüter, im Speziellen auf Rollen- und Bandförderer. Die Antriebstechnologie kann dabei frei gewählt werden. Die gebräuchlichsten Technologien in dieser Gruppe sind im Kapitel 2.4.2 dargestellt, wobei andere Technologien ebenso bewertet werden können.

Die Stetigförderer werden in drei Nennlastklassen unterteilt. Als Unterscheidungswert dient die Nennbelastung einer Transporteinheit. Innerhalb dieser Gruppen lassen sich dann die Förderer hinsichtlich ihrer Energieeffizienz beziehungsweise ihres Energieverbrauchs unterscheiden.

- Klasse 1: bis 50 kg
- Klasse 2: 50 kg – 200 kg
- Klasse 3: 200 kg – 2500 kg

Die Untersuchungen in dieser Arbeit beschränken sich auf Förderer der Klasse 1 mit einem maximalen Gewicht einer Transporteinheit von 50 kg (Nennbelastung). Typische Spezifikationen der zu beschreibenden Fördermittel sind dabei:

- Fördergeschwindigkeit: 0,3 m/s – 1,2 m/s
- Mögliche Beladung: max. 50 kg (horizontal), max. 35 kg (18°)
- Maximale Neigung: 18° (Bandförderer)
- maximale Länge: 26 m

3.1 Kennzahlen zur Energieeffizienz an Stetigfördertechnik

Kennzahlen dienen der Quantifizierung von Sachverhalten und sollen sachliche und neutrale Bewertungen und Vergleiche ermöglichen (vgl. [DIN13a]; [VDI02]).

Man unterscheidet zunächst absolute Kennzahlen wie Durchlaufzeit, Lagerfüllgrad oder Reichweite und relative Kennzahlen wie Kosten pro Pickposition oder Zeilen pro Auftrag, die sich auf einen zweiten Wert beziehen. Kennzahlen zur Energieeffizienz sind relativ, da sie die in das System hinein- und herausgehenden Größen zueinander ins Verhältnis setzen.

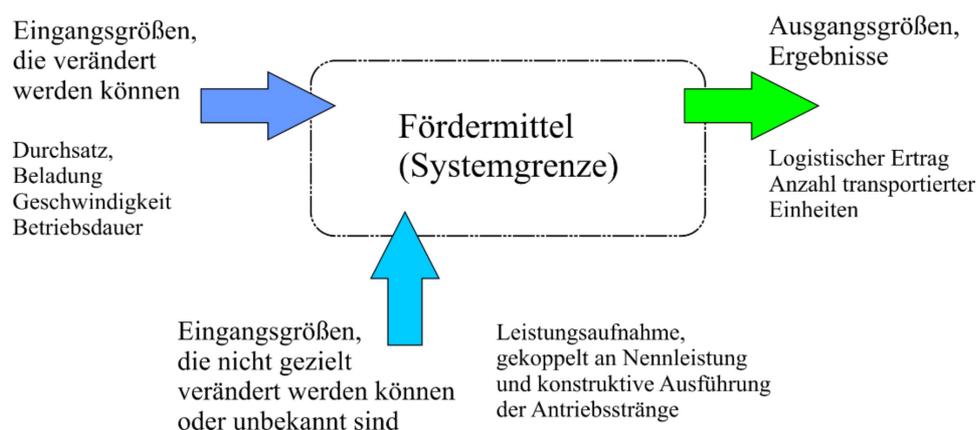


Abbildung 3-3: Systembetrachtung zur Energieeffizienz an Fördermitteln der Stetigfördertechnik

Effizienz ist festgelegt als das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand und entspricht dem in der Technik verwendeten Begriff des Wirkungsgrades ([PEH10], S. 2 ff.). Dabei beziehen sich die Größen Nutzen und Aufwand auf das zu betrachtende System (Abbildung 3-3).

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (3.1)$$

Bei der Energieeffizienz E_{eff} wird diese Definition erweitert. Sie beschreibt das Verhältnis einer allgemein definierbaren Größe als Nutzen, abhängig von der betrachteten Anwendung, zur eingesetzten bzw. zugeführten Energie. Die Definition der Energieeffizienz laut EU-Richtlinie ([EUR06], S. L 114/67) setzt den herauskommenden Ertrag an Leistung, Waren, Dienstleistung oder Energie mit dem dazu notwendigen energetischen Einsatz ins Verhältnis. Die eingesetzte Energie entspricht dem Energiebedarf der Anwendung oder des betrachteten Prozesses.

$$E_{eff} = \frac{\text{Ertrag an Leistung, Waren oder Energie}}{\text{Energieeinsatz}} \quad (3.2)$$

In technischen Anwendungen werden Kennzahlen üblicherweise spezifisch angegeben, d. h. die interessierende Größe (Aufwand für einen Prozess) wird in Bezug zu einer Referenzgröße, wie z. B. Masse, Länge oder Fläche, gesetzt.

Im Fall der Fördertechnik wird in dieser Arbeit eine Kombination mehrerer Bezugsgrößen als Referenz vorgeschlagen. Diese Kombination wird als „Logistischer Ertrag“ bezeichnet und beschreibt den Nutzen (Output) eines logistischen Prozesses. Als Effizienz-Kennzahl wird ein „Spezifischer Energiebedarf“ eingeführt. Dieser spezifische Energiebedarf bezieht die zugeführte Energie auf den logistischen Ertrag eines logistischen Prozesses – dem Fördern. Formal bildet sich der spezifische Energiebedarf aus dem Reziprokwert der Energieeffizienz (3.2), wie folgt

$$e_C = \frac{1}{E_{eff}} = \frac{E_E}{W_L} \quad (3.3)$$

e_C Spezifischer Energiebedarf des Prozesses (Förderung)

E_E Energieeinsatz bzw. Energiebedarf (Input)

W_L Logistischer Ertrag (Output)

Bei Bedarf kann formal die Energieeffizienz abschließend als Kehrwert hieraus berechnet werden. Der spezifische Energiebedarf wird im Umfeld von Energieeffizienzuntersuchungen bereits in der Gebäudetechnik (Aufzüge) als Kennzahl genutzt [VDI09], basiert aber nicht auf der in dieser Arbeit verwendeten Definition der Energieeffizienz lt. EU-Richtlinie ([EUR06], S. L 114/67).

Für die Bestimmung des spezifischen Energiebedarfes im Umfeld der Technischen Logistik sind nun zwei Werte zu ermitteln:

1. **Der erforderliche elektrische Energieeinsatz:** Die Ermittlung des hierzu erforderlichen Energieeinsatzes ist im Wesentlichen eine messtechnische Aufgabe. Für eine orts- und zeitunabhängig vergleichbare Messung des Energieeinsatzes ist jedoch ein dokumentierter Messablauf mit festgelegten Messverfahren und Rahmenbedingungen erforderlich. Dieser wird in dieser Arbeit im Zusammenhang mit der Ermittlung von Verlusten im Antriebsstrang entwickelt und validiert.
2. **Der erreichte logistische Ertrag** kann je nach Betrachtungsebene unterschiedlich sein: Auf der Geräteebene z. B. als Transport einer Transporteinheit über eine definierte Entfernung, auf der Systemebene die Kommissionierung eines Auftrag oder einer Auftragszeile oder auf der Strukturebene der Durchsatz von Gütern in einem Logistiknetzwerk.

In den folgenden beiden Kapiteln erfolgt die systematische Erarbeitung bzw. Definition der zu ermittelnden Größen Energieeinsatz und logistischer Ertrag in geeigneter Form für die Anwendung an Stetigfördertechnik.

3.2 Energieeinsatz

Zur Bestimmung des erforderlichen Energiebedarfs muss die elektrische Gesamtleistungsaufnahme P_{el} nach Gleichung (2.5) ermittelt werden. Multipliziert mit der entsprechenden Betriebszeit Δt ergibt sich dann der Gesamtenergiebedarf E_E , vgl. Gleichung (2.7).

$$E_E = P_{el} \cdot \Delta t \quad \text{in Ws} \quad (3.4)$$

Der Energiebedarf ist vom Typ der untersuchten Fördertechnik abhängig und gibt an, wieviel Energie notwendig ist, um die Transportaufgabe zu erfüllen. Die momentane Leistungsaufnahme des Förderers ist dabei abhängig vom Betriebszustand und kann je nach Belastung stark unterschiedlich sein. Deshalb sind zuerst alle relevant auftretenden Betriebszustände zu bestimmen.

3.2.1 Betriebszustände

Der Leistungsbedarf eines Stetigförderers berechnet sich im stationären Zustand aus der Summe der Bewegungswiderstände multipliziert mit der Fördergeschwindigkeit. Die Widerstände ihrerseits resultieren aus der mechanischen Belastung durch die Transporteinheiten auf den bewegten Elementen (Rollen, Bänder, Ketten), die sich aus dem Produkt aus Masse der Transporteinheiten und Gutdichte auf dem Förderer ergibt. Die Gutdichte entspricht dem Kehrwert des mittleren Abstands der Transporteinheiten. Eine bestimmte Belastung kann sich also entweder durch leichte Transporteinheiten mit geringem Abstand oder durch schwere Güter mit großem Abstand ergeben. Die für die Bewegungswiderstände relevante Belastung ist daher der Mittelwert der längenbezogene Masse in kg/m.

Diese Belastung ist trotz des Dauerbetriebs von Stetigförderern nicht konstant (Abbildung 3-4). So entsteht die Frage, unter welcher Belastung der Energiebedarf ermittelt werden soll. Nur ausschließlich Volllastbetrieb ist sicherlich ebenso unrealistisch wie lastfrei.

Ähnlich wie beim NEFZ-Fahrzyklus für PKW zur Messung von Verbrauch und CO₂-Ausstoß [EUR70] berücksichtigt, ändert sich auch bei Fördermitteln der Energiebedarf mit unterschiedlichen Belastungen und wechselnden Geschwindigkeiten. Eine dem Fahrzyklus analoge Darstellung der Betriebsbelastung in der Technik allgemein und der Materialflusstechnik im Speziellen sind Lastkollektive, welche als probates Mittel bei der Berechnung und Dimensionierung von förder-technischen Komponenten, wie beispielsweise den Hubwerken und Seiltrieben in den entsprechenden Berechnungen nach DIN 15020, verwendet wird [DIN74].

Dieser Ansatz lässt sich idealerweise auf die Berechnung der Energieaufnahme zur Effizienzkennzahlenermittlung übertragen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit einer Effizienzkennzahl und zur Untersuchung der Systeme außerhalb des optimalen Nennzustands ist es notwendig, die verschiedenen, praktisch auftretenden Betriebszustände zu definieren. Daraus wird dann im folgenden Abschnitt ein Lastkollektiv gebildet, also die zeitliche Aufteilung der Betriebszustände, festgelegt.

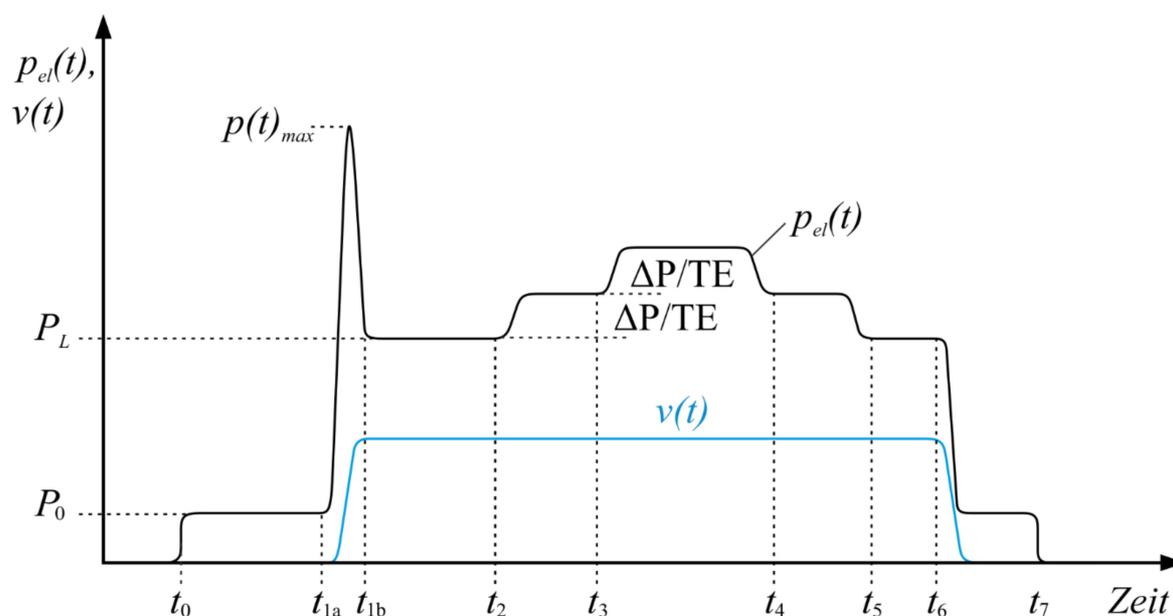


Abbildung 3-4: Typische Lastkurve eines Förderers (elektrischer Leistungsverlauf, qualitativ)

Abbildung 3-4 zeigt den typischen Verlauf der elektrischen Leistung eines Förderers bei der Beförderung von zwei Transporteinheiten. Anhand der Lastkurve lassen sich die Betriebszustände identifizieren, die Bewegung des Förderers ist durch die Fördergeschwindigkeit $v(t)$ abgebildet.

- Stillstand ($t_0 - t_{1a}$ und $t_6 - t_7$)
- Leerlaufbetrieb ($t_{1b} - t_2$ und $t_5 - t_6$)
- Nennlast und Teillast ($t_2 - t_5$)
- Instationäre Betriebszustände: Anfahren ($t_{1a} - t_{1b}$), Stillstand (t_6) der Fördertechnik

Um den Energiebedarf von Stetigfördertechnik repräsentativ zu erfassen, müssen daher alle relevanten Betriebszustände mit betrachtet werden. Durch umfangreiche Leistungsmessungen an den in dieser Arbeit untersuchten Förderern sind die einzelnen Betriebszustände hinsichtlich ihrer Häufigkeit und Größenordnung untersucht ([HAL12]; [HAL13a]; [KET13]) worden. Anhand der Erkenntnisse ist deren erforderliche Berücksichtigung im Lastkollektiv festgesetzt worden. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die verschiedenen stationären Betriebszustände bzw. deren Parameter, welche diese Zustände auf Geräteebene charakterisieren.

Tabelle 3-1: Übersicht der stationären Betriebszustände am Stetigförderer

	Betriebszustände	Parameter
Geräteebene	Nennbetrieb	- Anzahl Transporteinheit (TE)
	Teillastbetrieb	- Beladung der TE (Gutmasse)
	Leerlaufbetrieb	- Fördergeschwindigkeit
	Stillstand (Standby)	

Im Bereich der KLT Stückgutfördertechnik bis 26 m Länge sind im Gegensatz zu Schüttgutförderern (bis mehrere km Länge) die Anfahrvorgänge zeitlich sehr kurz, da aufgrund der vergleichsweise geringen Gutmasse sehr schnell angefahren werden kann. Der Spitzenlastanteil bei Stetigfördertechnik im Aussetzbetrieb liegt nur im Sekundenbereich, der energetische Mehranteil ist deswegen sehr gering und wird nicht berücksichtigt. Die exemplarische Auswertung der aufgenommenen elektrischen Leistung einer Messung im Teillastbereich, mit Stillständen und Anfahr- und Abschaltvorgängen, zeigt Abbildung 3-5 in Form einer Leistungs-Zeitdauer-Analyse.

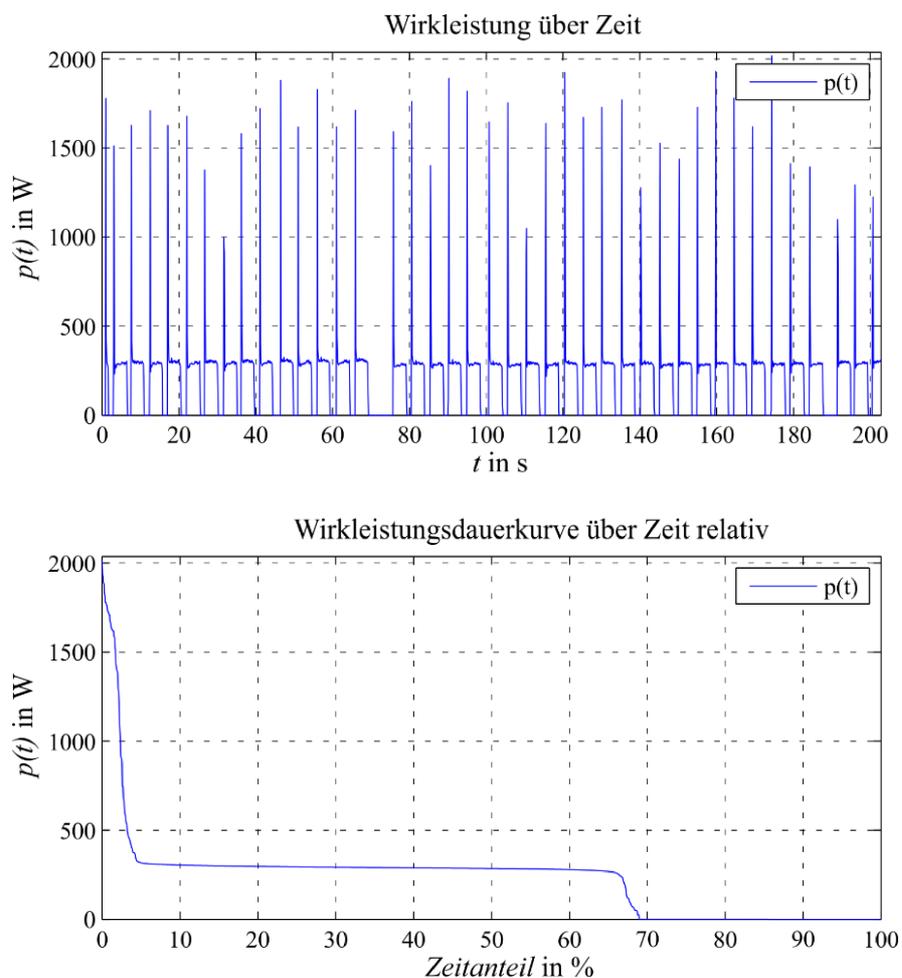


Abbildung 3-5: Zeitdauerkurve eines Förderers im Aussetzbetrieb über 200 s

Anhand der Zeitdauerkurve ist ersichtlich, dass sich der Förderer im betrachteten Zeitraum ca. 32 % der Zeit im Stillstand befindet, es wird keine Leistung aufgenommen. Mit ca. 62 % der Gesamtzeit wird der Förderer bei ca. 300 W elektrischer Leistungsaufnahme im stationären Förderzustand betrieben. Der Spitzenlastanteil durch Anfahrvorgänge liegt bei unter 4 % der gesamten Messaufzeichnung. Es erfolgt deshalb ausschließlich die Betrachtung von stationären Betriebszuständen mit Berücksichtigung von An- und Ablaufen neuer Behälter in Förderstrecke. Startvorgänge werden in dieser Methodik nicht berücksichtigt.

Zur Vermeidung einer Vielzahl an unübersichtlichen Einzelkennwerten wurden für die weitere Betrachtung folgende Kenngrößen isoliert. Diese sind in Gruppen zusammengefasst und dienen als Basisgrößen zur Ermittlung der Kennzahlen.

- Energetische Kenngrößen:
 - elektrische Leistung P in Watt
 - Energiebedarf E in Joule bzw. Wattsekunde
- Materialflusstechnische Kenngrößen:
 - Durchsatz Λ in TE pro Stunde
 - Fördergeschwindigkeit v in Meter pro Sekunde
 - Beladung m in Kilogramm
- Anlagenkenngrößen:
 - Gesamtlänge Fördertechnik L_F in Meter

3.2.2 Festgesetzte Lastzustände – das Referenzarbeitsspiel

Zur Ermittlung bzw. Messung des Energieeinsatzes zur Kennzahlenbildung wird ein Standardbelastungsprofil - in Form eines Lastkollektivs - vorgegeben (Abbildung 3-6), welches sich anteilig aus den vorher identifizierten Betriebszuständen zusammensetzt:

- Nennlast
- Teillast
- Leerlauf
- Stillstand

Dieses Kollektiv stellt einen repräsentativen Betrieb eines Stetigförderers dar und wird als standardisiertes Referenzarbeitsspiel für weitere Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet. Zur Überführung der Betriebszustände in ein Lastkollektiv muss noch zusätzlich der zeitliche Anteil festgelegt werden. Über die gesamte Betrachtungsdauer T_N teilen sich vier Betriebszustände auf.

Für jeden Zustand ist ein Zeitanteil T_i und die Höhe der Belastung definiert. Die Belastungen B_i als Funktion der längenbezogenen Masse und dem Durchsatz (implizit die Fördergeschwindigkeit) sowie deren Zeitanteile T_i für einen Referenzzeitraum T_N bilden somit ein Lastkollektiv.

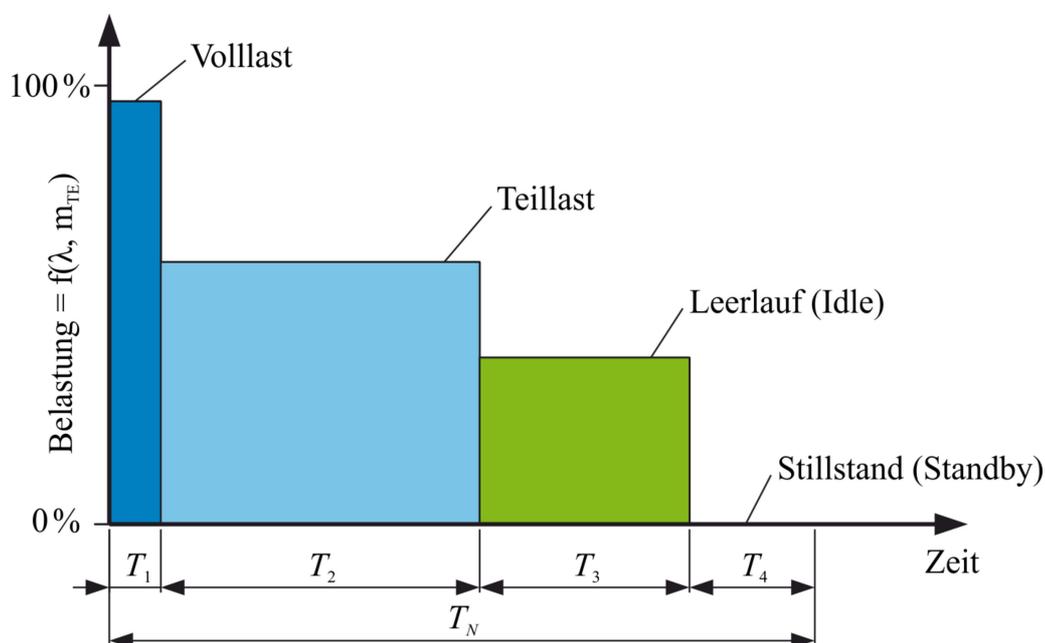


Abbildung 3-6: Exemplarisches Lastkollektiv für vier Belastungen

Abbildung 3-6 zeigt eine exemplarische Darstellung mit der minimalen Anzahl zu berücksichtigender Belastungen von der Volllast bis zum Stillstand. Im Stillstand werden der Grund-Energieverbrauch von Netzteilen, Stellgliedern und Steuermodulen berücksichtigt (Grundlast).

Somit wird ein äquivalenter Lastzustand einer Anlage über einen gewissen Zeitraum beschrieben. Dieses Lastkollektiv kann nun als Grundlage für Vergleiche verwendet werden und bildet somit also das Referenzarbeitsspiel.

Grundsätzlich muss der Erhebungsaufwand für die Kennzahlen niedrig bleiben. Im definierten Lastkollektiv werden mit den vier berücksichtigten Belastungen alle prinzipiell auftretenden Betriebszustände berücksichtigt. Die optionale Einführung einer weiteren Teillast ist denkbar, für die einführenden Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ist dies aber nicht erforderlich.

Unter diesen vorgegebenen Belastungszuständen werden dann Energie- bzw. Leistungsaufnahmen messtechnisch ermittelt. Die Gesamtdauer der Referenzbelastung wird mit T_N vorgegeben und ist mit einer Stunde (bzw. 3600 s) definiert.

$$T_N = 3600 \text{ s} \quad (3.5)$$

Die Angabe der Koeffizienten des Referenzarbeitsspiels erfolgt aus Gründen der Anschaulichkeit als Relativwerte. Die Zeitanteile T_i der einzelnen Betriebszustände errechnen sich mit den relativen Zeitanteilen t_i .

$$T_i = t_i \cdot T_N \quad \text{in s} \quad (3.6)$$

Die Gesamtdauer setzt sich aus den einzelnen Zeitanteilen aller Betriebszustände zusammen.

$$T_N = \sum_{i=1}^n T_i \quad \text{in s} \quad (3.7)$$

Die Berücksichtigung der unterschiedlich hohen Durchsätze in den jeweiligen Belastungszuständen wird über die Gewichtung λ_i in Prozent erreicht. Die belastungsabhängigen Durchsätze Λ_i im jeweiligen Betriebszustand werden über den Nenndurchsatz der Stetigfördertechnik berechnet.

$$\Lambda_i = \lambda_i \cdot \Lambda_N \quad \text{in } \frac{\text{TE}}{\text{h}} \quad (3.8)$$

Gleiches gilt auch für die jeweilige Beladung. Die Beladung m hat ebenfalls einen Einfluss auf jeden Belastungszustand. Die Fördergeschwindigkeit ist, sofern nicht der Stillstand untersucht wird, immer als Nenngeschwindigkeit v festgelegt worden, da die Geschwindigkeit bei der Planung einer Materialflussanlage festgelegt und anschließend nicht mehr verändert wird.

Eine repräsentative Belastung einer durchschnittlichen Förderanlage muss als Vergleichsreferenz vorgegeben werden. Nach Diskussionen mit Experten aus der Industrie sind in Tabelle 3-2 Koeffizienten festgelegt worden, welche die anteilige Gewichtung der Belastungszustände des Referenzarbeitsspiels beschreiben und als exemplarische Festlegung im Rahmen dieser Arbeit vorgeben. Unter diesen Bedingungen muss der Energiebedarf des Förderers bestimmt werden.

Tabelle 3-2: Koeffizienten der Referenzbelastung (relativ)

i	Zustand	Zeitanteile t_i	Durchsatz λ_i	Beladung m_i	Geschw. v_i
1	Nennlast	20 %	90 %	90 %	100 %
2	Teillast	50 %	50 %	50 %	100 %
3	Leerlauf	20 %	0 %	0 %	100 %
4	Stillstand	10 %	-	-	-

Die konkrete zeitliche Verteilung der Belastungszustände ergibt sich realistisch erst zum Einsatzzeitpunkt der Förderer im Materialflusssystem. Für Vergleichsbetrachtungen muss die Kennzahl

allerdings unter einer eindeutigen zeitlichen Verteilung ermittelt werden (d. h. für alle Betrachtungen gelten vorgegebene Zeitanteile t_i)!

Zur Bestimmung des erforderlichen Energiebedarfs müssen die gemittelten Teil-Leistungsaufnahmen P_i eines jeden Betriebszustandes $i = 1..4$, wie im Referenzarbeitsspiel abgebildet, ermittelt werden. Multipliziert mit den entsprechenden Zeitanteilen T_i aus dem Lastkollektiv ergibt dies die Teilenergiebedarfe, welche dann zum Gesamtenergiebedarf E_E aufsummiert werden. Der Energiebedarf ist vom Typ der untersuchten Fördertechnik abhängig. Er gibt, an wieviel Energieeinsatz notwendig ist, um die Transportaufgabe entsprechend dem Referenzarbeitsspiel zu erfüllen.

$$E_E = \sum_{i=1}^n P_i \cdot T_i = T_N \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i \quad \text{in Ws} \quad (3.9)$$

Zur Bestimmung der Energieeffizienzkennzahlen muss unter Berücksichtigung der Vorgaben des Referenzarbeitsspiels der Energiebedarf des gesamten Förderersystems an einem vorgegebenen Messpunkt messtechnisch ermittelt werden. Dabei ist die messtechnische Erfassung der elektrischen Gesamtleistungsaufnahme für alle Betriebszustände ausreichend. Die Mindestanforderungen an die Messtechnik können unter anderem aus der VDI-Richtlinie 4707 [VDI09] abgeleitet werden, und sie werden zudem im Kapitel 3.6 spezifiziert. Die Bestimmung der erforderlichen Messwiederholungen und Vergleichsmessungen für aussagefähige und statistisch abgesicherte Messwerte ist in diesem Zusammenhang Teil der Forschung dieser Arbeit im Kapitel 5.2.

3.2.3 Systemgrenzen

Nicht alle Komponenten, die elektrische Energie verbrauchen, sind für die Ertragserbringung erforderlich. Daher sind Systemgrenzen zu definieren und geeignete Messpunkte zu bestimmen. Die Systemgrenzen und ein damit eindeutiger Messpunkt werden, je nach Ausführung im Hinblick auf Vergleichbarkeit und Messbarkeit, allgemeingültig für jedes Förderer-Funktionsprinzip festgelegt.

Die Festlegung wird am Beispiel von Rollenförderern erläutert. Während ein Zentralbandförderer ohne Drehzahlregelung direkt am Netz betrieben wird, sind für Motorrollenförderer noch Netzteile (24 V) und eventuell weitere Komponenten erforderlich. Die Netzteile sind also innerhalb der Systemgrenze zu berücksichtigen. Ein Netzteil versorgt üblicherweise mehrere Motorrollen. Sind mehrere Netzteile für den Betrieb des untersuchten Förderers notwendig, sind alle beteiligten Netzteile, evtl. anteilig, zu berücksichtigen.

Steuerungen, Sensoren und Schaltschrankkomponenten sind zwar grundsätzlich für die Funktion erforderlich, aber unabhängig vom Funktionsprinzip des Förderers. Da eine Steuerung eine Vielzahl an Fördertechniksegmenten steuert, ist eine anteilige Zuordnung nur erschwert möglich. Zudem ist die Energieaufnahme der Steuerung (SPS) im Vergleich zu den installierten Antriebsleistungen gering. Daher werden sie zur Vereinfachung der Messungen nicht berücksichtigt.

Für andere Fördermittel sind die Systemgrenzen analog zu bestimmen. Sollten beispielsweise Frequenzumrichter, Fremdlüfter oder spezielle Motorsteuerungen erforderlich sein, sind sie zu berücksichtigen.

Für die konkreten Untersuchungen ergibt sich der entsprechende Messpunkt für die elektrische Energieaufnahme nach Abbildung 3-7. Betrachtet wird die benötigte Fördertechnik inkl. Antriebsstrang und (falls vorhanden) entsprechende Stellglieder sowie Motorsteuerungskomponenten, welche zum Befördern von Stückgütern erforderlich sind.

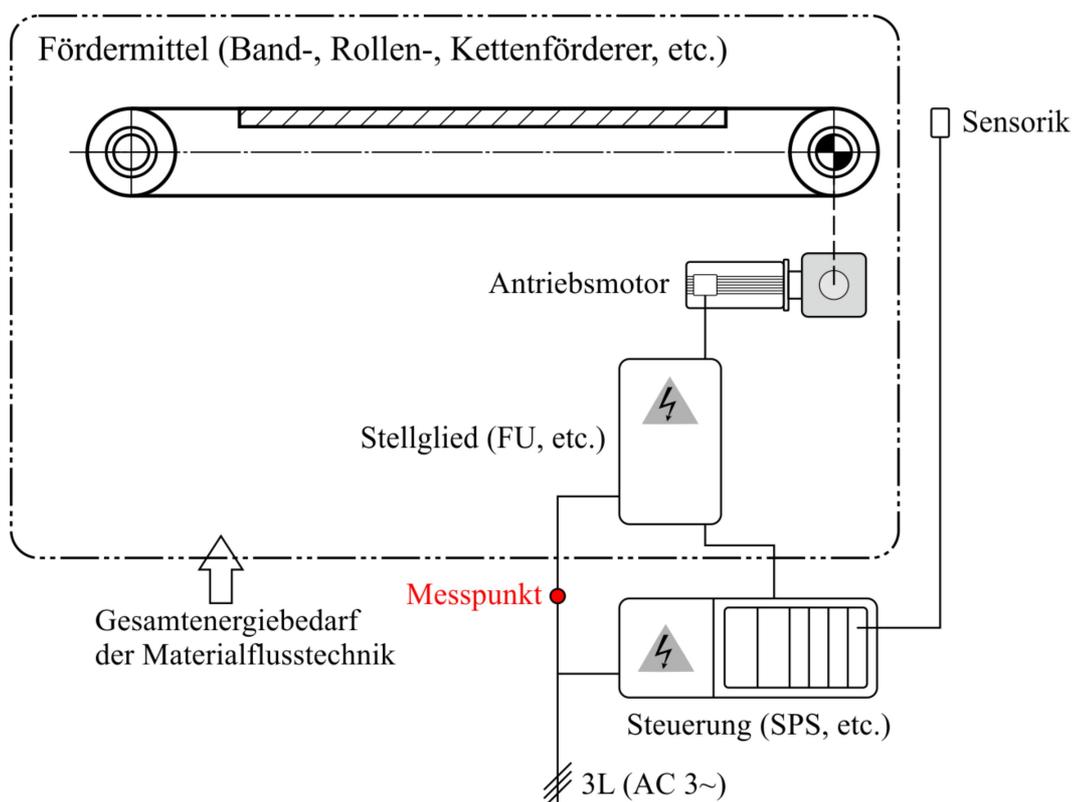


Abbildung 3-7: Systemgrenzen für die Stetigfördertechnik (nach [LHJ13], Abb. 5)

Bei Fördertechnik, welche z. B. für einen staudrucklosen Betrieb eine Druckluftversorgung erfordert, kann wiederum keine anteilige Zuordnung erfolgen, und die Druckluftbereitstellung wird deshalb nicht mit berücksichtigt.

3.3 Logistischer Ertrag

Im Vergleich zur komplexen Systemebene mit Transport-, Lager-, Umschlag-, Sortier- und Kommissionieranlagen in Distributionszentren, Umschlagzentren und Verkehrsknoten, erscheint die Definition des Ertrags auf der Geräteebene relativ einfach. In dieser Arbeit werden dazu zwei Formen des logistischen Ertrags definiert.

Logistischer Ertrag – Definition 1

Der Nutzen (Output) kann auf Geräteebene vergleichsweise einfach, entsprechend der betrachteten Anwendung, definiert werden. Die Grundfunktion eines Förderers ist der Transport von Ladungsträgern von einer Quelle zu einer Senke, wobei die Ladungsträger dabei die Distanz L_F zurücklegen. Somit wäre der logistische Ertrag im einfachsten Fall die Länge des Förderers (bzw. die zurückgelegte Distanz). Die fördertechnische Leistung eines Stetigförderers definiert sich über dessen Durchsatz Λ , der sich aus der Anzahl der an einem Messpunkt in einem Betrachtungszeitraum gezählten Transporteinheiten X_i ergibt. Im logistischen Kontext ist der Ertrag deshalb durch die Berücksichtigung der Anzahl der transportierten Einheiten aussagekräftiger.

$$X_{ges} = \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{in TE} \quad (3.10)$$

Der logistische Ertrag W_L ist dann formal gegeben durch das Produkt aus Länge L_F und der Summe der transportierten Einheiten X_{ges} . Er repräsentiert im logistischen Sinn eine Arbeit, die vom Förderer in der betrachteten Zeit erbracht wird (Transportarbeit). Das Gewicht der transportierten Einheiten, welches natürlich einen Einfluss auf den logistischen Ertrag hat, bleibt vorerst unberücksichtigt. Die Definition 1 des logistischen Ertrags W_{L1} eines Stückgutförderers lautet somit

$$W_{L1} = X_{ges} \cdot L_F = \sum_{i=1}^n X_i \cdot L_F \quad \text{in TE} \cdot \text{m}. \quad (3.11)$$

Die Anzahl der transportierten Einheiten kann praktisch durch Zählen aller TE bestimmt werden, welche einen Messpunkt in der Zeit T_i des entsprechenden Belastungszustandes i passieren. Darüber hinaus kann die Gesamtanzahl aus den Teildurchsätzen Λ_i der Belastungszustände berechnet werden.

Die Teildurchsätze multipliziert mit der zeitlichen Gewichtung (Zeitanteil T_i) aus dem Referenzarbeitspiel ergeben die Anzahl der transportierten Einheiten.

$$X_i = \Lambda_i \cdot T_i \quad \text{in TE} \quad (3.12)$$

Der logistische Ertrag ergibt sich damit unter Anwendung von (3.6), (3.8) und (3.12) zu

$$W_{L1} = \sum_{i=1}^n \Lambda_i \cdot T_i \cdot L_F = \Lambda_N \cdot T_N \cdot L_F \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t_i \quad \text{in TE} \cdot \text{m} . \quad (3.13)$$

Logistischer Ertrag – Definition 2

Die vorhergehende Definition des logistischen Ertrags (3.13) berücksichtigt nicht das Gewicht der transportierten Ware in den Transporteinheiten. Für Stetigförderer ist aber auch das im Betrachtungszeitraum transportierte Gesamtgewicht ein signifikanter Kennwert für die Transportleistung.

$$M_{ges} = \sum_{i=1}^n X_i \cdot M_i \quad \text{in kg} \quad (3.14)$$

Deshalb bietet sich für die Definition 2 des logistischen Ertrags die Kombination aus gesamter transportierter Masse M_{ges} und Länge L_F des Förderers an.

$$W_{L2} = M_{ges} \cdot L_F = \sum_{i=1}^n X_i \cdot M_i \cdot L_F \quad \text{in kg} \cdot \text{m} \quad (3.15)$$

Andererseits kann die Berechnung wiederum auch unter Berücksichtigung des Nenndurchsatzes Λ_N des Förderers erfolgen. Der logistische Ertrag W_{L2} ergibt sich damit mit (3.6) und (3.8) zu

$$W_{L2} = \sum_{i=1}^n \Lambda_i \cdot T_i \cdot M_i \cdot L_F = \Lambda_N \cdot T_N \cdot M_N \cdot L_F \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t_i \cdot m_i \quad \text{in kg} \cdot \text{m} . \quad (3.16)$$

Diese Referenzgröße für die spezifische Energieaufnahme bietet sich vor allem bei Stetigförderern für Schüttgüter aufgrund der Fördergutcharakteristik und durchgehende Gutaufgabe an.

Damit sind zwei Varianten des logistischen Ertrags entwickelt worden, um die aufgenommene Energiemenge als spezifischen Wert darzustellen. Eine dritte Möglichkeit wäre die Einführung des logistischen Ertrags in der Form "TE·kg·m", aus Gründen mangelnder Aussagekraft bzw. Anschaulichkeit wird aber darauf verzichtet. An Stückgutförderern eignet sich die Definition W_{L1} optimal für die Darstellung des logistischen Ertrages. Interessiert haupttränging das transportierte Gewicht, so bietet sich die Definition W_{L2} an, bspw. bei der Anwendung an Schüttgutförderern.

3.4 Spezifischer Energiebedarf eines Stetigförderers

Mit den in den vorherigen Kapiteln entwickelten mathematischen Ausdrücken für den Energiebedarf E_E und den logistischen Ertrag W_L , kann der spezifische Energiebedarf als Effizienzkennzahl nach Gleichung (3.3) definiert werden. Durch die zwei erarbeiteten Varianten des logistischen Ertrags können auch zwei unterschiedliche Kennzahlen definiert werden.

Anmerkung: Der Energieeinsatz und der jeweilige logistische Ertrag werden jeweils für die Betrachtungsdauer T_N von einer Stunde bestimmt. Damit sind beide Kennwerte auf gleicher Zeitbasis und können damit zu einer Kennzahl zusammengesetzt werden.

Effizienzkennzahl 1 (EEI 1)

Als logistischer Ertrag W_{L1} wurde das Produkt aus Anzahl transportierter Einheiten X_{ges} und Länge L_F gewählt. Dies führt zur ersten Effizienzkennzahl EEI 1:

$$e_{C/(TE,s)} = \frac{E_E}{W_{L1}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\Lambda_N \cdot L_F \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t_i} \quad \text{in} \quad \frac{\text{Ws}}{\text{TE} \cdot \text{m}} \quad (3.17)$$

Diese Kennzahl beschreibt den spezifischen Energiebedarf eines Förderers bezogen auf eine Transporteinheit und einen Meter des untersuchten Förderers.

Effizienzkennzahl 2 (EEI 2)

Die im Betrachtungszeitraum gesamte transportierte Masse M_{ges} sowie die Länge L_F bilden den logistischen Ertrag W_{L2} . Somit ergibt sich die zweite Effizienzkennzahl EEI 2:

$$e_{C/(M,s)} = \frac{E_E}{W_{L2}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i}{\Lambda_N \cdot M_N \cdot L_F \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot t_i \cdot m_i} \quad \text{in} \quad \frac{\text{Ws}}{\text{kg} \cdot \text{m}} \quad (3.18)$$

Diese Kennzahl beschreibt den spezifischen Energiebedarf bezogen auf die gesamte transportierte Masse sowie bezogen auf einen Meter der Fördertechnik.

Da die Gesamtdauer T_N sowohl in den Nenner als auch in den Zähler bei der Berechnung der Kennzahl einfließt, ist diese zeitunabhängig und liefert somit eine relative Aussage. Zur expliziten Berechnung des Energieeinsatzes (3.4) und des logistischen Ertrags (3.13) bzw. (3.16) wird sie

jedoch benötigt. Die Betrachtungen beziehen sich auf den stationären Betriebszustand eines Steigförderers. Die erforderlichen Nennwerte für die Berechnung ergeben sich aus der technischen Spezifikation der zu untersuchenden Förderer:

- Länge der Fördertechnik L_F
- Fördergeschwindigkeit v
- Durchsatz Λ_N
- Nennbeladung M_N
- Abmessung der TE: Länge L_B , Breite B_B

Auf Grund der schwankenden Dichte von Stückgütern (vgl. leerer Karton/beladener Karton) stellt der Massenstrom keine aussagekräftige Größe für die Vorgabe der zu fördernden Mengen bzw. für die Angabe der Leistungsfähigkeit von Stückgutförderern dar. Besser geeignet und deshalb üblich ist die Angabe der pro Zeiteinheit geförderten Ladeeinheiten, dem Durchsatz ([ARN08], S. 615). In der Intralogistik interessieren also die erreichbaren Durchsätze der eingesetzten Materialflusstechnik, um eine geforderte Auftragsanzahl in vorgegebener Zeit zu erreichen. Das transportierte Gewicht ist von zweitrangigem Interesse. Deshalb erfolgt im weiteren Verlauf dieser Arbeit nur die Auswertung und Diskussion anhand der Effizienzkennzahl 1 (Kapitel 5.2).

Die Verifikation der Kennzahlen bedeutet den Nachweis der formal richtigen Umsetzung der Spezifikationen lt. Aufgabenstellung. Zusammenfassend können im Sinne einer formalen Verifikation der Kennzahlen folgende Aussagen getroffen werden:

- Mathematische Richtigkeit des Kennzahlenmodells: Die mathematische Definition des Kennzahlenmodells aus Kapitel 3.2 und 3.3 ist durchgängig. Der Nenner der Kennzahl (logistischer Ertrag) kann per Definition nicht gegen Null gehen, damit ergeben sich in jedem Betriebszustand mathematisch sinnvolle bzw. anschaulich handhabbare Kennzahl-Werte.
- Die Kennzahlen beschreiben den Energiebedarf für das Referenzarbeitsspiel.
- Eine korrekte Implementierung aller relevanten Betriebs- und Lastzustände ist erfolgt.
- Erfüllung der Aussagekraft der Kennzahlen durch Berücksichtigung des logistischen Ertrages.
- Die Vergleichbarkeit ist durch transparente mathematische Kennzahldefinition und Vorgabe von zeitlich gewichteten Lastzuständen in Form eines Referenzarbeitsspiels gewährleistet.

Die Validierung der Kennzahlen bzw. der Bewertungsmethodik muss an realer Fördertechnik erfolgen. Dazu sind Prüfstände und geeignete Messtechnik sowie Messmethoden notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit werden die erforderlichen Methoden zur Leistungsmessung erarbeitet und im Kapitel 5.2.1 an Versuchsständen durch Anwendung der Bewertungsmethodik am Beispiel von Band- und Rollenförderern durchgeführt.

3.5 Prozessschritte zur Bestimmung der Kennzahlen

Der Prozess zur Bestimmung der Kennzahlen ist in drei Hauptarbeitspunkte unterteilt in

- Vorbereitende Arbeiten,
- Messtechnische Arbeiten,
- Auswertung (Berechnung, Bewertung), Dokumentation.

Alle notwendigen Schritte zur Bestimmung sind in Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 dargestellt. Zudem ist der Informationsfluss dargestellt, welche Kennwerte in den einzelnen Prozessschritten erforderlich sind, welche Teilkennwerte generiert werden und wie die Zusammenführung zur endgültigen Energieeffizienz-Kennzahl erfolgt.

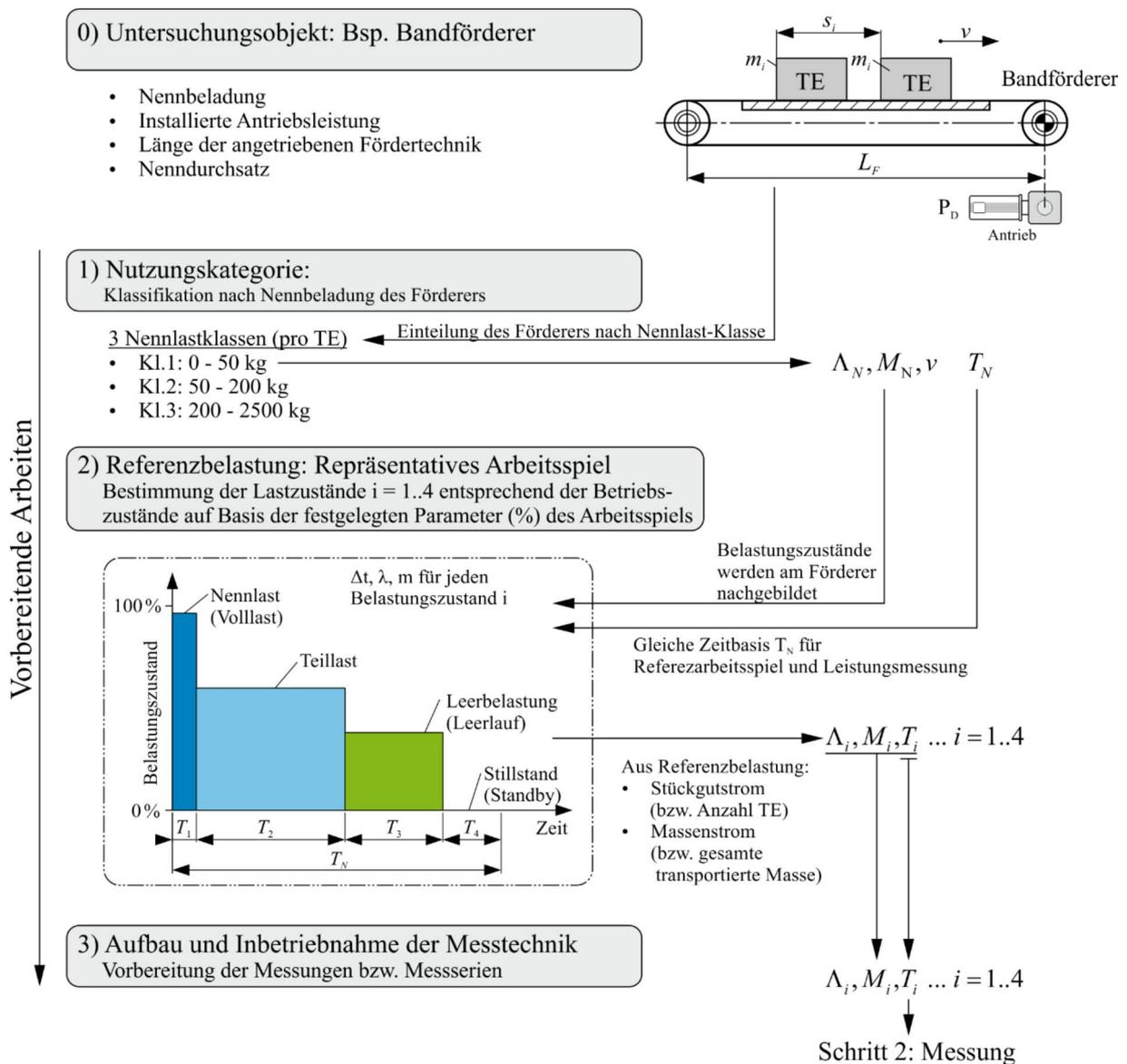


Abbildung 3-8: Prozessschritt „Vorbereitende Arbeiten - Planung“ zur Kennzahlbestimmung

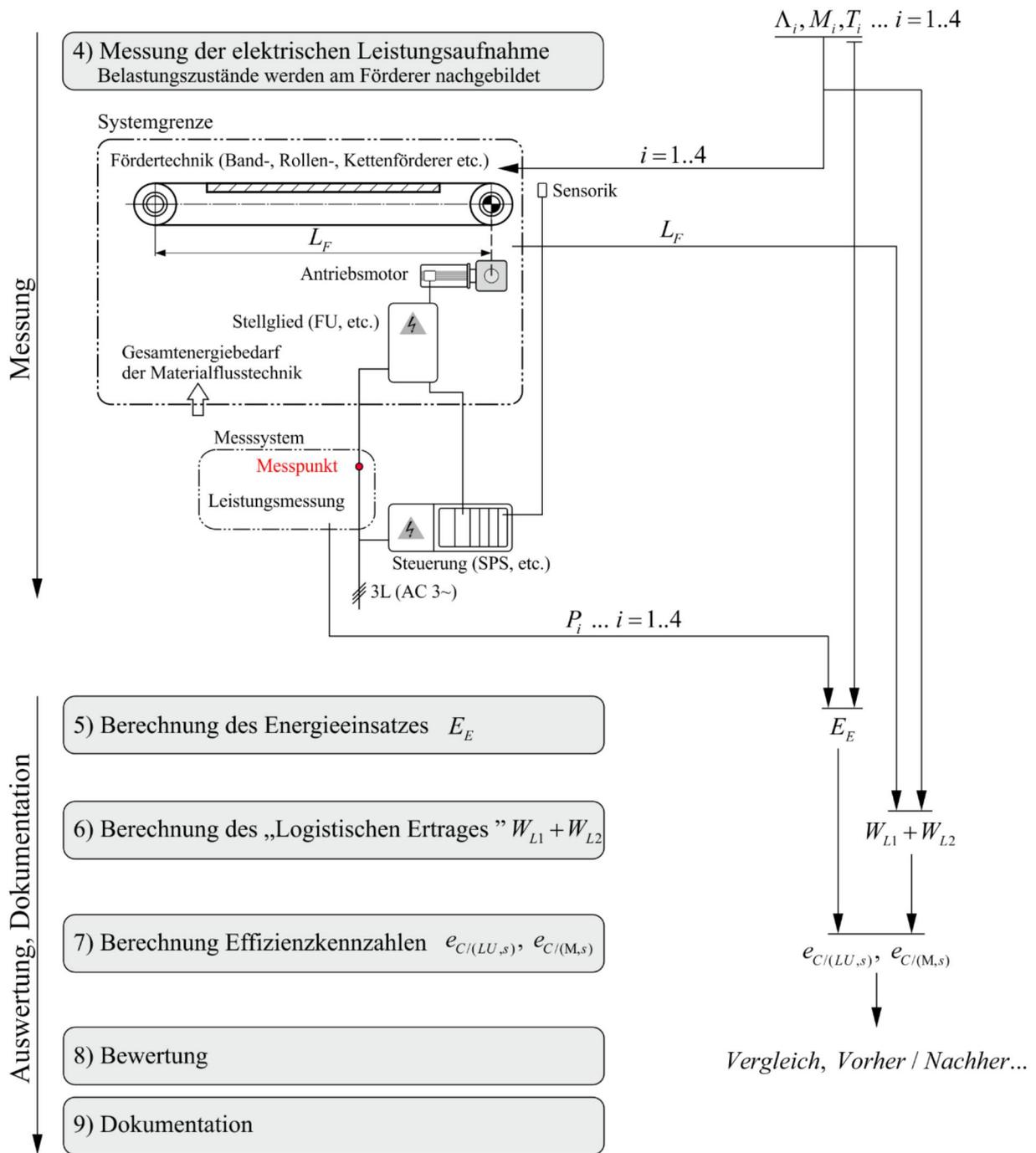


Abbildung 3-9: Prozessschritte „Messung“ und „Auswertung“ zur Kennzahlbestimmung

Zusätzlich sind für eine vollständige und aussagekräftige Aussage zur Energieeffizienz Bewertungs- und Dokumentationsschritte angegeben. Die Kennzahlen werden unter standardisierten Bedingungen ermittelt. Dies wird durch die Vorgabe von Spezifikationen der verwendeten Messtechnik erreicht. Gleiche Belastungszustände am Förderer werden durch Anwendung des Referenzarbeitsspiels erzielt. Die Betriebszustände lt. Arbeitsspiel werden am Förderer abgebildet und die Leistungswerte messtechnisch ermittelt. Somit ist sichergestellt, dass vergleichbare Ergebnisse generiert werden, unabhängig von Hersteller oder Prüfer.

3.6 Prüfverfahren zur Kennzahlbestimmung

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung des vollständig erarbeiteten Prüfverfahrens und der dazu erforderlichen Messvorschrift zur Ermittlung der Kennzahlen. Dafür werden alle notwendigen Schritte zur Durchführung des Prüfverfahrens festgelegt. Die Festlegungen basieren auf den Prozessschritten gemäß den festgelegten Vorgaben des vorigen Kapitels (Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9). Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der ermittelten Kennzahl sind alle Vorgaben einzuhalten und die Parameter zu dokumentieren. Das Prüfverfahren gliedert sich in drei Abschnitte: Planung, Messung und Auswertung (Abbildung 3-10).

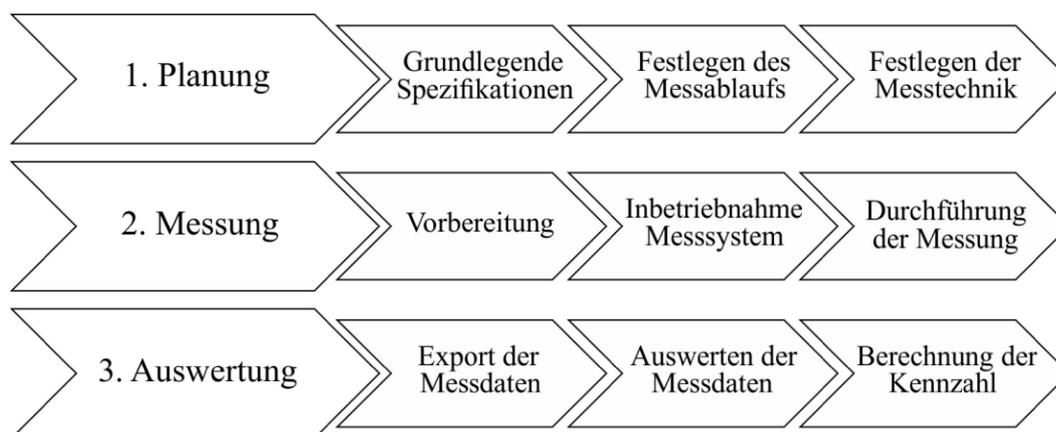


Abbildung 3-10: Übersicht über die Prozessschritte des Prüfverfahrens

Diese Prüfvorschrift dient der Erfassung der Leistungsaufnahme während eines definierten Belastungskollektivs zur Ermittlung der Kennzahlen aus Kapitel 3.4. Sie legt die detaillierten Abläufe fest und dient einer strukturierten und reproduzierbaren Vorgangsweise. Die Prozessschritte sind unabhängig vom Hersteller sowie der Technologie und somit allgemeingültig definiert. Die Prüfvorschrift gilt für Stetigförderer innerhalb unter der Kapitel 3 eingangs erläuterten Spezifikationen.

Das Prüfverfahren beschränkt sich auf Förderer, deren Länge eine stationäre Fahrt von Transporteinheiten von mindestens einer Sekunde gewähren kann, um eine statistisch gesicherte Auswertung mit Mittelwertbildungen der zu messenden Leistungswerte zu garantieren.

$$T_{Stationör} \geq 1s \quad (3.19)$$

3.6.1 Planung

Es werden alle vorbereitenden Schritte festgelegt, um die Messung durchführen zu können.

Spezifikation des Fördermittels und der Rahmenbedingungen

Die technischen Nenndaten des Fördermittels sind zu erfassen und zu dokumentieren. Sie dienen zur Berechnung der Parameter für die Durchführung der Messung. Die Rahmenbedingungen regeln alle Parameter, welche während der Prüfung nicht einen festgelegten Toleranzbereich verlassen dürfen. Die externen Parameter betreffen Einstellungen an oder außerhalb der Systemgrenze, zum Beispiel die Stromversorgung. Als interne Parameter werden alle Einstellungen innerhalb der Systemgrenze definiert, zu diesen zählt zum Beispiel der Warmlauf der Fördertechnik.

- **Leistungsversorgung:** Die Versorgung muss entsprechend Punkt 7 „Elektrische Betriebsbedingungen“ von IEC 60034-1 „Drehende elektrische Maschinen“ sein [DIN11a]. Die Frequenz muss sich während der Messungen innerhalb von $\pm 0,3\%$ der vorgeschriebenen Frequenz von 50 Hz befinden.
- **Umgebungsbedingungen:** Die Umgebungstemperatur muss sich im Bereich von $20\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$ befinden. Die relative Luftfeuchtigkeit darf 80 % nicht überschreiten.
- **Einstellungen:** Parameter, welche aus dem Kennzahlenmodell auf den angegebenen Wert einzustellen sind, müssen sich innerhalb einer bestimmten Toleranz befinden. Bei Bandförderern ist die Vorspannung des Bandes auf den empfohlenen Wert des Herstellers einzustellen. Vor Beginn der Messungen muss ein Warmlauf des Förderers von mindestens 90 min erfolgen.

Tabelle 3-3: Zusammenfassung der geforderten Rahmenbedingungen

Allgemein	Leistungsversorgung	nach IEC 60034-1
	Frequenz	50 Hz $\pm 0,3\%$
	Temperatur	$20\text{ °C} \pm 4\text{ °C}$
	Luftfeuchtigkeit	$\leq 80\%$
Untersuchungsobjekt (Förderer)	stationärer Messbereich	$\geq 1\text{ s}$
	Warmlauf	$\geq 90\text{ min}$
Messgeräte	Fehlerklasse	0,5 nach IEC 60051
	Messbereich	$\pm 400\text{ V}$
Messwandler	Abtastrate	$\geq 10\text{ kHz}$
	Auflösung	$\geq 12\text{ Bit}$
Beladung der TE	Masse	$\pm 0,25\%$

Festlegen des Messablaufs

Nachdem die grundlegenden Spezifikationen erfüllt werden, sind die Parameter für den Messablauf zu festzulegen. Als Abschluss muss ein Dokument vorliegen, das alle Aufgaben der Messung darstellt und somit als Leitfaden für die Vor-Ort-Messungen dient.

1. **Ermittlung der Betriebszustände:** Für das Lastkollektiv des Kennzahlenmodells sind die einzelnen Parameter der Betriebszustände zu berechnen. Sie ergeben sich aus der Berechnungsvorschrift aus Kapitel 3.2-3.4 und den technischen Nenndaten des Fördermittels. Diese Parameter sind am Objekt einzustellen und dabei die Messungen durchzuführen.

Das Einstellen von Durchsatz und Beladung an einem Fördersegment für die Durchführung des Messablaufes kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

- Transporteinheiten in entsprechendem Abstand an einem Umlaufförderer, um Durchsatz mit Beladung zu erreichen (Taktung mit Sicherstellung eines kontinuierlichen Fördergutstroms erforderlich), oder
- Ermittlung einer äquivalenten Belastung durch Transporteinheiten, welche in Summe dem Durchsatz und der Beladung lt. Referenzarbeitsspiel äquivalent sind.

2. **Ermittlung der äquivalenten Belastung:** Ist es aufgrund der Bauweise des Untersuchungsobjektes nicht möglich, die berechneten Werte der Betriebszustände exakt einzustellen, ist eine Vergleichsbelastung zu ermitteln, mit der dann die Messungen durchgeführt werden. In Kapitel 4.2 wird dazu die Bestimmung der äquivalenten Belastung \overline{M}_i untersucht und als Ergebnis eingeführt. Sie berechnet sich für Stetigförderer gemäß der Definition des Massenstroms.

$$\overline{M}_i = M_i \cdot \frac{L_F}{s_i} \quad \text{in kg} \quad (3.20)$$

M_i	Belastung des Betriebszustands lt. Tabelle
L_F	Länge des Förderers
s_i	Abstand der Boxen im jeweiligen Betriebszustand i

3. **Bereitstellung der Transporteinheiten:** Zur Abbildung der Referenzbelastung werden Transportbehälter benötigt. Die Anzahl und Beladung ist zu ermitteln und für die Messung bereit zu stellen. Wird die Nennlast einer Ladungseinheit bei der Berechnung der äquivalenten Belastung überschritten, ist diese entsprechend auf mehrere Boxen aufzuteilen. Bei der Messung müssen diese ohne Abstand angeordnet werden, um eine Ladungseinheit zu bilden. Die Boxen können auch miteinander verbunden werden.

4. **Bilden von Messwiederholungen:** Die gemessenen Leistungsverläufe der Einzelmessungen werden arithmetisch gemittelt, siehe Abbildung 3-11. Zur gesicherten Mittelwertbildung der Endergebnisse sind dabei in jedem Betriebszustand 20 Messwiederholungen durchzuführen.

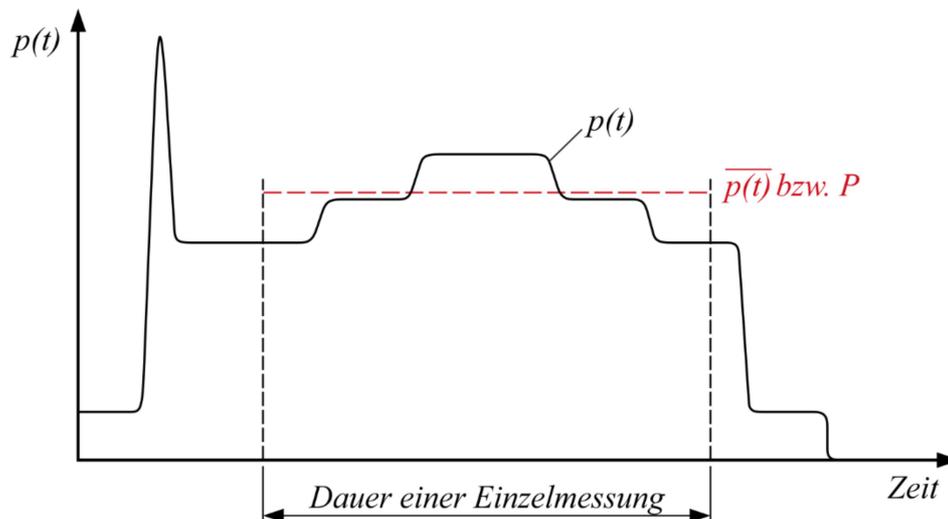


Abbildung 3-11: Mittelwertbildung einer Einzelmessung (exemplarisch)

Im Rahmen von Testmessungen an den Versuchsständen wurden Mehrfachmessungen unterschiedlicher Anzahl durchgeführt. Dabei zeigte sich anhand der Streuung der Messergebnisse (Standardabweichung), dass 20 Messwiederholungen eine ausreichend große Anzahl für ein repräsentatives Ergebnis darstellen. Diese werden bei der Auswertung erneut gemittelt, um Schwankungen in der Messung auszugleichen und eine statistische Sicherheit zu erhalten.

Die praktische Durchführung der Messwiederholungen gestaltet sich bei Stetigförderern schwierig, da die Ladungseinheiten am Ende der Förderstrecke zurückgeführt werden müssen. Die möglichen Rückführungen wurden in Kapitel 4.4 untersucht und gegenübergestellt. Daraus ergeben sich für Stetigförderer folgende Varianten der Messdurchführung:

- Kreislauf: Der zu messende Förderer befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf, wodurch eine Rückführung der Transporteinheiten gewährleistet ist.
- Richtungsumkehr: Durch einen Richtungsumschalter kann die Drehrichtung des Antriebsmotors geändert und so eine Rückfahrt ermöglicht werden.
- Manuelle Rückführung: Die Boxen müssen manuell an den Beginn der Messstrecke zurückgeführt werden, dies kann einerseits mit Hilfe eines Kranes oder durch Personen erfolgen.

Festlegungen an die Messeinrichtungen

Für alle Werte, die im Rahmen dieses Prüfverfahrens gemessen werden, gelten für die Sensoren und Messgeräte die folgenden Vorschriften. Die angegebene Fehlerklasse darf für eine gültige Messung nicht überschritten werden. Folgende Anforderungen werden gestellt:

- Messgeräte für elektrische Größen erfordern mind. eine Fehlerklasse von 0,5 nach IEC 60051.
- Messwandler müssen folgende Anforderungen erfüllen:
 - Messbereich: ± 400 V
 - Abtastrate: ≥ 10 kHz
 - Auflösung: ≥ 12 Bit
- Die Messgeräte zur Temperaturmessung müssen eine Genauigkeit von ± 1 °C aufweisen.

Zur Erfassung der Leistungsaufnahme müssen geeignete Messgeräte vorhanden sein. Basierend auf der Kennzahldefinition ergeben sich die zu ermittelnden physikalischen Größen, welche anschließend für die Berechnung notwendig sind. In den meisten Fällen ist dies die angelegte Spannung und der fließende Strom, und zwar für jede Phase separat. Bei der Auswahl sind die Anforderungen an die Genauigkeit, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, zu beachten.

Kleine Stillstandsleistungen und hohe Beschleunigungsleistungen mit keineswegs idealen sinusförmigen Strömen stellen hohe Anforderungen an das Messsystem. Die Richtlinie VDI 4707 legt Anforderungen zur Leistungsberechnung fest [VDI09]:

- Bildung der 3-Phasen-Wirkleistung mit minimal drei Werten pro Sekunde.
- Berücksichtigen von Oberwellen, wie sie von Frequenzumrichtern erzeugt werden.
- Genügender Messbereich für Beschleunigung und Stillstand.
- Die Leistung wird vom Messgerät aus den Effektivwerten der Spannung und des Stroms bestimmt.
- Die Effektivwerte müssen lückenlos zwischen zwei Abtastungen gebildet werden.
- Aufzeichnung der Leistungswerte während der Referenzfahrt (Diagramm: Leistung als Funktion der Zeit).
- Die Messung zurückgespeicherter Energie muss möglich sein.

Hinweise zur Durchführung der Messungen werden in DIN EN ISO 25745-1 gegeben [DIN13a].

Die Systemgrenzen aus Kapitel 3.2 legen genau fest, an welcher Stelle die Messungen zu erfolgen haben. Basierend auf dieser Festlegung sind die Messstellen am realen Untersuchungsobjekt umzusetzen. Es ist zu überprüfen, ob die gewählten Sensoren am Antriebsstrang des Förderers appliziert werden können. Die gewählten Messstellen sind in einem Schaltplan einzutragen.

Zur Vergleichbarkeit der Messungen der Effizienz Kennzahlen ist es unerlässlich, bei allen messtechnischen Untersuchungen unter Einhaltung der festgelegten Bedingungen nach Tabelle 3-3 immer die gleichen Schritte durchzuführen.

3.6.2 Messung

Vorbereitung

1. **Bereitstellung des Messsystems:** Alle erforderlichen Komponenten der Messtechnik, wie im Punkt Planung festgelegt, müssen für den Einsatz vorbereitet werden.
2. **Bereitstellung der Belastung:** Für die Messung in verschiedenen Belastungszuständen ermittelten Beladungen müssen vorbereitet werden. Wird die Messung mit Transporteinheiten durchgeführt, dann ist ebenfalls die notwendige Anzahl an TE bereitzustellen. Bei der Beladung der Transporteinheiten ist zu beachten, dass die Last ausreichend fixiert ist. Die Beladung darf eine maximale Schwankung von $\pm 0,25$ % der Nennlast aufweisen.
3. **Aufbau des Untersuchungsobjekts:** Einerseits beinhaltet dieser Schritt den Aufbau des Untersuchungsobjektes selbst, andererseits müssen alle zusätzlichen Elemente, die zu einem messtechnischen Betrieb notwendig sind, montiert werden.
4. **Versorgung des Untersuchungsobjekts:** Ist die zu untersuchende Fördertechnik aufgebaut, gilt es, diese mit allen für den Betrieb notwendigen Versorgungen zu verbinden. In erster Linie ist dies die Stromversorgung. Die Toleranzen, wie in Tabelle 3-3 vorgegeben, sind dabei einzuhalten. Ziel ist die Sicherstellung der Betriebsbereitschaft der zu untersuchenden Anlage.

Inbetriebnahme des Messsystems

1. **Applikation der Sensorik:** Basierend auf dem Messstellenplan sind die Sensoren an den entsprechend Stellen am Antriebsstrang des Fördermittels zu applizieren. Sollte eine Montage nicht möglich sein, ist der Förderer in der Art zu modifizieren, dass im Sinne des Messstellenplans und der Systemgrenzen die Sensoren angebracht werden können.
2. **Aufbau und Inbetriebnahme des Messsystems:** In diesem Schritt sind alle notwendigen Messgeräte aufzubauen und anschließend alle Verknüpfungen der Messhardware herzustellen. Den Abschluss dieses Schrittes bildet ein voll funktionsfähiges Untersuchungsobjekt, bei dem alle notwendigen Messungen durchgeführt werden.

3. **Sicherstellung der Betriebsbereitschaft und Konfiguration des Messsystems:** Zur Sicherstellung der Betriebsbereitschaft des Messsystems sind alle notwendigen Schritte der Konfiguration durchzuführen. Die Einrichtung des Systems zur korrekten Erfassung aller notwendigen physikalischen Größen muss erledigt werden. Die genauen Werte, zum Beispiel die erforderliche Abtastrate, sind nach der entsprechenden Vorschrift einzustellen.
4. **Testmessung:** Zur Sicherstellung der Korrektheit und Vollständigkeit der gemessenen Werte ist eine Validierung durchzuführen. Mit Hilfe einer Testmessung soll festgestellt werden, ob die gemessenen Werte plausibel sind und ob das System bereit für die Durchführung der Messung ist.

Durchführung der Messung

1. **Messbedingungen:** Zur Sicherstellung der Wiederhol- und Vergleichbarkeit gilt es, reproduzierbare Messbedingungen herzustellen. Als Beispiel sei der Warmlauf der Anlage erwähnt. Die tatsächlich vorhandenen Bedingungen sind dann zu erfassen und im Messprotokoll zu vermerken.
2. **Abbildung der Referenzbelastung und Durchführung der Messungen:** Die laut Referenzarbeitsspiel festgelegten Belastungen sind am Förderer abzubilden und anschließend die verschiedenen Messungen mit der entsprechenden Zeitdauer durchzuführen. Entsprechend der Vorgabe ist die notwendige Anzahl an Messwiederholungen durchzuführen. Die Ergebnisse sind jeweils zu speichern bzw. zu dokumentieren.
3. **Aufbereitung der gemessenen Daten:** Bietet das Messsystem die Möglichkeit, die aufzeichneten Daten bereits entsprechend aufzubereiten, dann sollte dies an dieser Stelle durchgeführt werden. Denkbar ist zum Beispiel die automatische Mittelwertbildung der Messgrößen über den Messzeitraum. Dabei müssen aber die Einzelmessungen (Ergebnisse) verfügbar bleiben.

3.6.3 Auswertung

Nachdem die Leistungswerte am Untersuchungsobjekt erfasst wurden, müssen diese exportiert und aufbereitet werden. Nach der Bildung eines Mittelwertes kann die Kennzahl berechnet werden und eine Klassifizierung und Bewertung erfolgen. Abschließend muss über die Ermittlung eine Dokumentation erstellt werden.

1. Export der Messdaten

2. Auswerten der Messdaten

- a. Prüfen der Daten: Die exportierten Daten müssen auf ihre Plausibilität überprüft werden: Ist die Größenordnung der Messwerte richtig, weichen einzelne Messwerte grundlegend von der Gesamtheit ab oder fehlen Werte in der Aufzeichnung?
- b. Aufbereitung der Daten: Vor der eigentlichen Analyse der Daten müssen diese dafür aufbereitet werden. Vor allem bei hohen Aufzeichnungsraten ist es notwendig, die Messwerte zu reduzieren, um eine einfache Verarbeitung zu ermöglichen.
- c. Bilden des Mittelwerts: Sind die Daten entsprechend gefiltert und aufbereitet, muss aus den einzelnen Messwerten der 20 Wiederholungen ein Mittelwert gebildet werden. Dieser Leistungswert wird anschließend für die Berechnung der Kennzahl verwendet.

3. Berechnung der Kennzahl:

Aus den erhaltenen Mittelwerten lässt sich die Effizienzkennzahl des Untersuchungsobjektes berechnen. Einerseits kann dies einzeln über die logistischen Erträge nach Gleichung (3.13) und dem Energieeinsatz nach Gleichung (3.9) erfolgen, oder aber auch direkt über die entsprechende Formel für die Kennzahl nach Gleichung (3.17).

4. Dokumentation:

Die Dokumentation enthält alle notwendigen Daten, die zur Nachvollziehbarkeit der ermittelten Kennzahl dienen. Die einzelnen Punkte der Dokumentation müssen bereits bei der eigentlichen Durchführung erfasst werden. Abschließend sind diese in einem vollständigen Abschlussbericht zusammenzuführen. Dieser muss folgende Punkte enthalten:

- a. Messbedingungen, Umgebungsbedingungen
- b. Messergebnisse
- c. Auswertung (gemessene Werte, Diagramme)
- d. Berechnete Kennzahlen

4 Maßnahmen zur Bestimmung von Leistungsverlusten im Antriebsstrang

In diesem Kapitel erfolgt die Entwicklung von Maßnahmen zur Bestimmung von Verlusten an Antriebssträngen der Stetigfördertechnik. Ausgehend von einer taxativen Auflistung der auftretenden Verluste, erfolgt eine theoretische Erarbeitung von Maßnahmen zur messtechnischen Bestimmung der Verluste. Es werden Methoden und Messverfahren zur Bestimmung der Verluste adaptiert und aufbereitet, um im Kapitel 5.3 unter Anwendung dieser Methoden die Teilverluste an den Antriebssträngen realer Fördertechnik experimentell zu bestimmen.

Die Kennzahlenmethodik dient als Hilfsmittel zur Bestimmung der Energieeffizienz und zur Bewertung von Optimierungsmaßnahmen an Fördertechnik. Gesicherte Maßnahmen zur Optimierung von Verlustleistungen am Antriebsstrang müssen allerdings erst gefunden werden.

Für die Bestimmung der Energieeffizienz-Kennzahlen aus der vorher beschriebenen Bewertungsmethodik ist nur die Gesamtenergieaufnahme des Förderers erforderlich, einschließlich aller in Betracht zu ziehenden Komponenten gemäß der Systemgrenzen aus Kapitel 3.2. Die Kennzahl bildet einen Indikator, wie energieeffizient das Fördermittel im Vergleich zu anderen Gerätetypen arbeitet. Sie stellt jedoch nur einen Indikator dar, zeigt aber nicht, an welcher Stelle und mit welchen Maßnahmen die Effizienz der Fördermittel gesteigert werden kann.

Dazu sind tiefgehende Untersuchungen am Antriebssystem notwendig, um die anfallenden Leistungsverluste zu bestimmen. Durch die Bestimmung der Größenordnung der anfallenden Verluste können relevante Optimierungspotenziale identifiziert und Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz abgeleitet werden. Um die Vorher-Nachher Auswirkungen von Geräteänderungen hinsichtlich der Energieeffizienz zu beurteilen, können die Energieeffizienz-Kennzahlen wieder zur Beurteilung herangezogen werden.

4.1 Wie sieht der ideale Förderer aus?

Die grundlegende Aufgabe eines Förderers ist der Transport von Waren und Gütern. Dazu muss der Förderer Arbeit verrichten, über den Zeitraum der Beförderung ist dafür ein Energieeinsatz aufzuwenden. Im theoretischen Idealfall würde der Förderer nur Energie für den eigentlichen Transport der TE benötigen.

Für den Förderprozess ist jedoch immer mehr Energie aufzuwenden, da durch Leistungsverluste im System Energie in Form von dissipativen Verlusten an die Umgebung abgegeben wird.

Aus energetischer Sichtweise werden folgende Leistungszustände an der Fördertechnik unterschieden:

- Anfahren/Abbremsen
- Stationärer Betriebszustand
 - Stillstand der Fördertechnik – „Wartebereitschaft“
 - Leerlauf der Fördertechnik sowie
 - Transporteinheiten in Förderstrecke (haben die Fördergeschwindigkeit erreicht)
- Situation des Auf- bzw. Ablaufens von Transporteinheiten. Transporteinheiten müssen beschleunigt und auf Geschwindigkeit gebracht werden.

Für einen typischen Fördervorgang von zwei Transporteinheiten sieht der Verlauf der erforderlichen elektrischen Leistung qualitativ wie in Abbildung 4-1 aus. Die dazu notwendige Energieaufnahme kann als Fläche unter der elektrischen Leistungskurve $p_{el}(t)$ interpretiert werden.

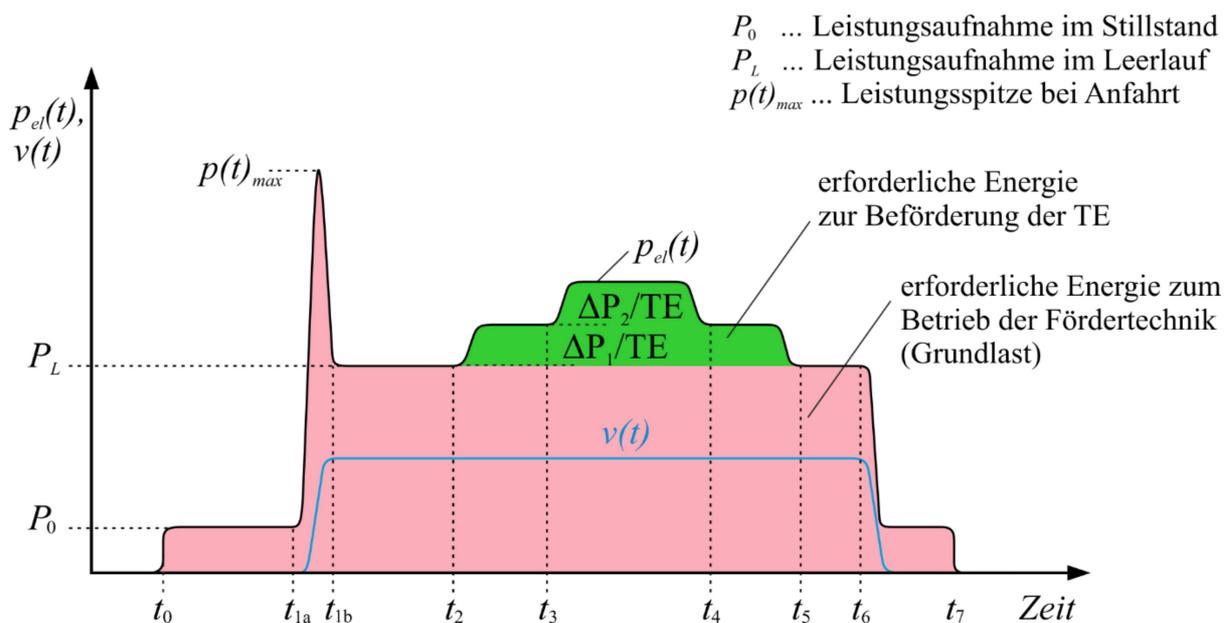


Abbildung 4-1: Typischer elektrischer Leistungsverlauf eines Förderers

In Abbildung 4-1 kennzeichnet die grüne Fläche die für den Transport von zwei TE erforderlichen Energieeinsatz. Der Energiebedarf zum Betrieb der Komponenten des Antriebsstranges und zur Überwindung der Reibungsverluste ist als rote Fläche dargestellt. Der ideale Förderprozess ergibt sich somit bei gegebener Aufgabe, nämlich der Beförderung von TE, mit der für den Prozess notwendigen Energie, unter Minimierung der Verluststellen (rote Fläche). Natürlich unterscheidet sich die Größe der grünen Fläche stark zwischen den zum Einsatz kommenden Wirkprinzipien (Rolle, Band, etc.).

Die Verlustleistungen fallen an allen Stellen des Antriebsstranges des Förderers an, an denen Leistung übertragen wird (Abbildung 4-2). Dabei ist es unerheblich, ob es sich um elektrische oder mechanische Leistung handelt. Die Aufteilung der Verluste kann über Leistungsflussdiagramme (Sankey-Diagramme) dargestellt werden.

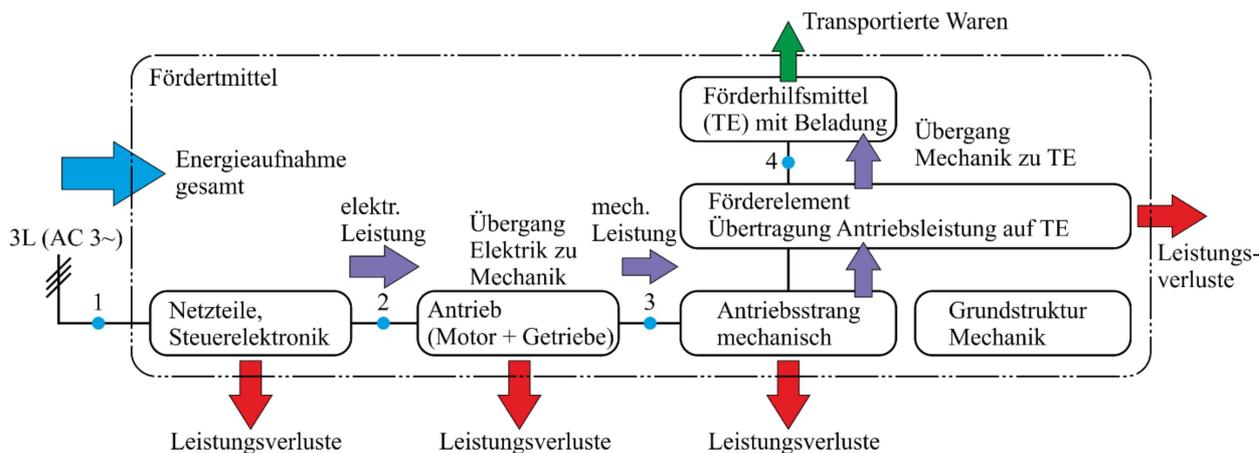


Abbildung 4-2: Leistungs- bzw. Energiebetrachtung am Antriebsstrang

Am Betrachtungspunkt 1 in Abbildung 4-2 erfolgt die Versorgung der gesamten Fördertechnik. Dabei wird die elektrische Leistung vom Versorgungsnetz aufgenommen. Über die betrachtete Zeitdauer ergibt sich daraus die gesamte aufgenommene Energie der betrachteten Fördertechnik nach (2.7). Die zum Betrieb notwendigen Komponenten der Antriebstechnik wie Netzteile, Steuerelektronik und Stellglieder (FU, Reglereinheiten), benötigen für deren Eigenbetrieb Versorgungsenergie. Diese Energieanteile tragen zum Nutzen, d. h. dem Fördern, keinen Anteil bei und sind als Verluste anzusehen (Grundlast).

Zwischen Punkt 2 und 3 erfolgt durch den elektrischen Antrieb der verlustbehaftete Übergang von elektrischer Energie in mechanische Energie. Die Verluste des Antriebsmotors können bei bekanntem Wirkungsgrad der Antriebseinheit und aufgenommener elektrischer Motorleistung bestimmt werden. Ist der Gesamtwirkungsgrad nicht bekannt, muss messtechnisch die zu- und abgeführte Leistung bestimmt werden. Die messtechnische Bestimmung der elektrischen und mechanischen Leistung wird ebenfalls im Kapitel 5.1 erarbeitet und durchgeführt.

Am Betrachtungspunkt 3 steht die mechanische Leistung des Antriebs zur Verfügung. Diese wird, je nach konstruktiver Ausführung des Antriebsstranges, über sämtliche verlustbehaftete Teilkomponenten bis zum Förderer transferiert. Im Betrieb der Fördertechnik müssen permanent alle Reibungswiderstände bzw. Verluste überwunden werden. Zudem sind bei Start und Stopp der Förderung die Trägheitswiderstände für die Beschleunigung bzw. Verzögerung sämtlicher beteiligter Komponenten des Systems zu überwinden.

Die jeweilige konstruktive Ausführung der Antriebsstränge führt nun zu unterschiedlichen Charakteristika hinsichtlich der auftretenden Verluste. Im folgenden Kapitel werden relevante Leistungsverluste in den gängig vorkommenden Antriebssträngen von Fördertechnik der Intralogistik angeführt und Methoden vorgestellt, um diese Verluste messtechnisch zu bestimmen.

4.2 Relevante Verluste an Komponenten des Antriebsstranges

Ausgehend von der allgemeinen Darstellung des Antriebsstranges als Blockschaltbild wird ein Antriebsstrang mit zentralem 400 V Antrieb in mehreren Detailebenen strukturiert aufgegliedert. Dies ermöglicht die Anführung und Zuordnung sämtlicher Leistungsverluste an den Komponenten. Der Antriebsstrang in 24 V Ausführung besitzt kein Riemensystem nach Abbildung 4-3, alle anderen Komponenten sind allerdings ebenso in der folgenden Aufgliederung enthalten. Deshalb wird auf eine gesonderte Aufgliederung des 24 V Antriebsstranges an dieser Stelle verzichtet.

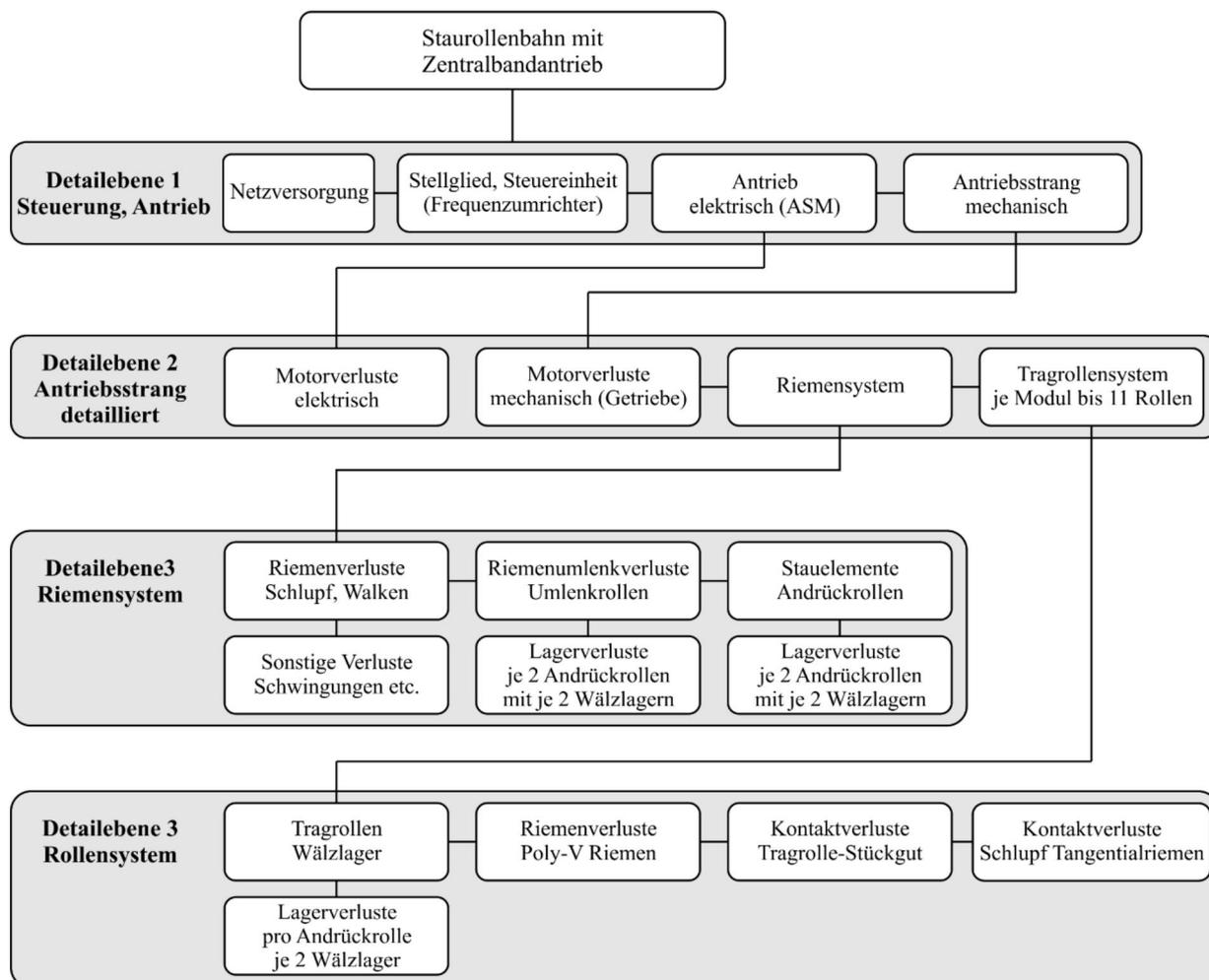


Abbildung 4-3: Schematisch in mehreren Detailebenen aufgegliederter Antriebsstrang

Nach Ort im Antriebsstrang können folgende Verluste zugeordnet werden (Abbildung 4-3).

- Elektrische Leistungsverluste
 - Verluste in Netzteilen (24 V Bereitstellung für Steuerung, Sensorik, Motorenbetrieb)
 - Verluste in Stellgliedern: Schütz, Umrichter (FU), Steuermodule
 - Verluste in Antriebsmotoren: Eisen- und Kupferverluste, Luftspaltverluste, Magnetfeldverluste, etc.
 - Verluste in Leitungen und Kontakten
- Mechanisch Leistungsverluste
 - Verluste im Getriebe: Reibung an Wälzpaarungen
 - Verluste in Wälzlagerungen: Lager in Motoren, Wälzlagerungen im Getriebe, an Umlenkrollen, an Tragrollen, an Antriebsstrommeln, etc.
 - Verluste im Antriebsriemen: Umlenkverlust, Walkverlust, Schlupf
 - Verluste an Riemen-Übertragungselementen (Rundriemen, Keilrippenriemen, etc.): Umformarbeit (Walken), Schlupf.
 - Verluste an der Kontaktstelle zum Wirkelement (Fördermittel): Schlupf, Reibung, Rollreibung. Bsp. Flachriemen tangential angeordnet zu Förderrollen; Bandunterseite des Förderbandes zur Bandabstützung; Förderrollen zu Transporthilfsmittel etc.

Natürlich interessiert eine möglichst vollständige Angabe der Verluste. Allerdings können Verluste wie Reibung im Getriebe, Reibung in Wälzlager, Walkverluste, etc. nur mit erheblichem, messtechnischem Aufwand an Sonderprüfständen bestimmt werden. Trotzdem erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Bestimmung der Verluste an Fördertechnik-Versuchsständen von:

- Antriebsmotoren
- Mechanik im Antriebsstrang
 - Riemen und Umlenkverluste
 - Förderrolle und Keilrippenriemen als leistungsübertragende Elemente.

4.3 Messtechnische Bestimmung relevanter Verluste

Die Fördertechnik, welche nach dem Baukastenprinzip aufgebaut ist, besteht aus Standardkomponenten, welche nicht optimal aufeinander abgestimmt sind. Das Verhalten dieser Komponenten im Gesamtverbund ist schwer vorhersagbar, speziell die auftretenden Verluste an realer Fördertechnik sind nicht bekannt.

Für wissenschaftliche Untersuchungen sind deshalb valide Messverfahren für die messtechnische Bestimmung der Verluste an realer Fördertechnik erforderlich. Basierend auf aufgeschlüsselten Antriebssträngen (Abbildung 4-3) können im Sinne eines Messstellenplans Messpunkte gemäß Kapitel 5.1.2 gesetzt werden. Dabei wird ersichtlich, mit welchen Messpunkten die Verluste von Teilkomponenten im Antriebsstrang, wie z. B. Stellglieder, Antriebseinheiten, Mechanik, Fördererelementen, Förderriemen, etc., bestimmt werden können. An dieser Stelle wird ein für die Untersuchung an Fördertechnik adaptiertes Messverfahren vorgestellt, um die Bestimmung von Verlusten aller relevanten Komponenten im Antriebsstrang zu ermöglichen.

Strip-Down-Methode

Das Strip-Down Verfahren ist im Bereich der Verbrennungskraftmaschinen zur Bestimmung der Reibungsverluste von Teilkomponenten in Verbrennungsmotoren (vgl. [AFG96]; [FAS12]) bekannt. Das Verfahren beruht auf der Messung der Gesamtleistungsaufnahme eines Verbrennungsmotors im Schleppbetrieb, d. h. der Motor ist nicht in Betrieb sondern wird durch einen externen Antrieb „gezogen“. Dabei erfolgt die Messung der Leistungsaufnahme für das Antreiben der Kolben, Ventile, etc. Anschließend werden einzelne Komponenten sukzessive aus dem Verbund entfernt, mit anschließender mechanischer Leistungsmessung. Aus der Differenzbildung der Messwerte kann dann auf die Leistungsbedarfe der zuvor entfernten Komponente gerechnet werden.

Dieses Messverfahren ist im Rahmen dieser Arbeit für den Einsatz an Fördertechnik adaptiert worden. Anhand der Messpunkte im Antriebsstrang (Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5) ist es möglich, durch sukzessives Entfernen einzelner Teilkomponenten wie Förderrollen und Riemen die jeweiligen Leistungsaufnahmen P_{SD} im Strip-Down entsprechend zu messen. Aus der Differenzbildung können dann die Verluste ΔP_{V_i} ermittelt werden.

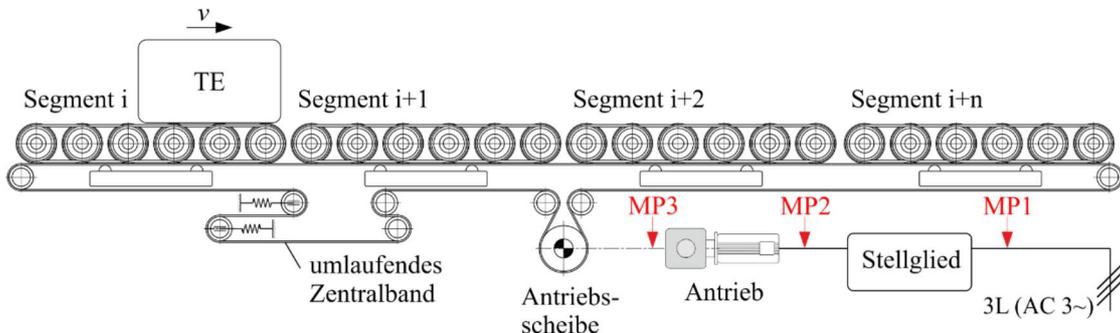
$$\Delta P_{V_i} = P_{SD_n} - P_{SD_{n+1}} \quad \text{in W} \quad (4.1)$$

Dabei wurde das Strip-Down an der Fördertechnik zur Bestimmung der Leistungsverluste von

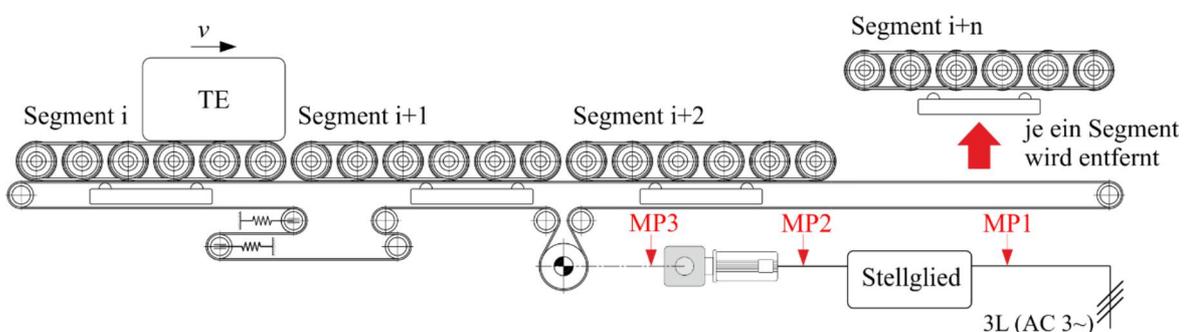
- Rollensegmenten (Förderrollen welche über Riemen verbunden sind),
- wie auch für einzelne Förderrollen angewendet.

Im ersten Schritt sind jeweils gesamte Rollensegmente (bis zu elf angetriebene Rollen) aus dem Verbund entfernt worden. Die Differenzbildung der Messergebnisse liefert die Leistungsaufnahme für das entsprechende Rollensegment.

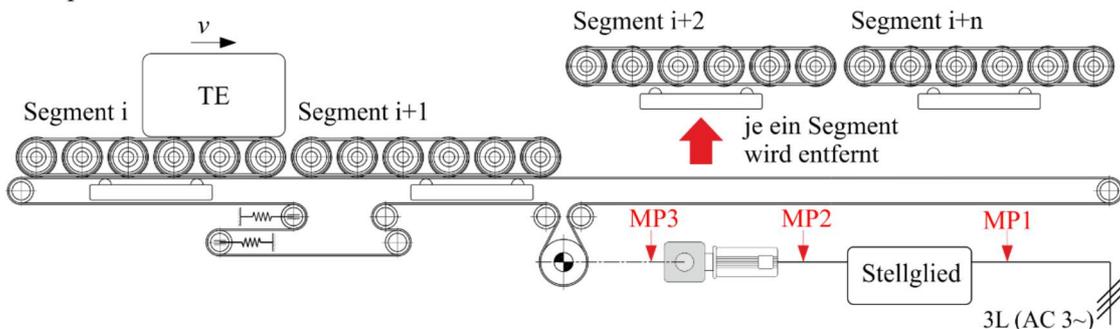
Ausgangssituation, Rollenförderer mit Zentralbandantrieb



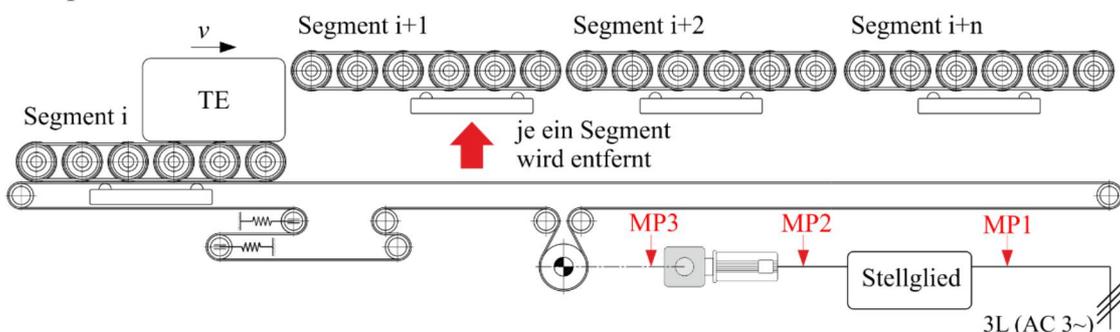
Strip-Down Schritt 1



Strip-Down Schritt 2



Strip-Down Schritt 3



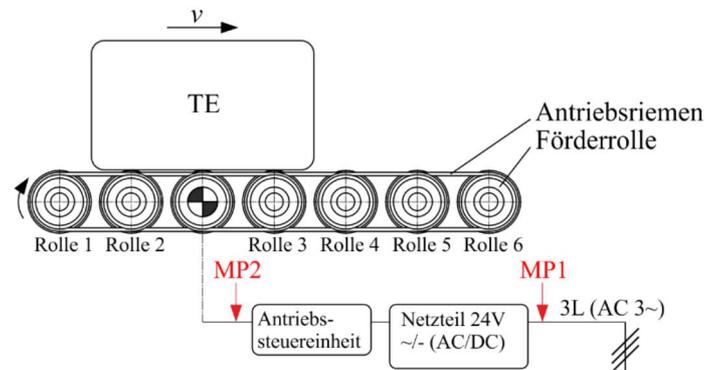
Strip-Down n-Wiederholungen, bis alle zu untersuchenden Komponenten entfernt sind

Abbildung 4-4: Strip-Down zur Bestimmung der Verluste von Rollensegment und Riemensystem

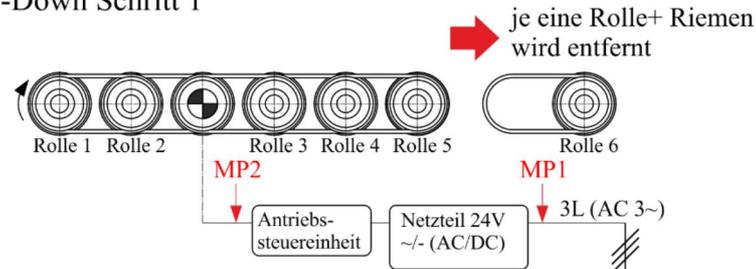
Durch den Abbau aller Rollensegmente aus dem Gesamtverbund kann die Leistungsaufnahme der Mechanik, d. h. der Umlenkrollen und des Zentralbandantriebs, bestimmt werden.

In einem weiteren Schritt wird nur mehr ein Rollensegment untersucht, wobei einzelne Rollen aus dem Verbund entfernt werden.

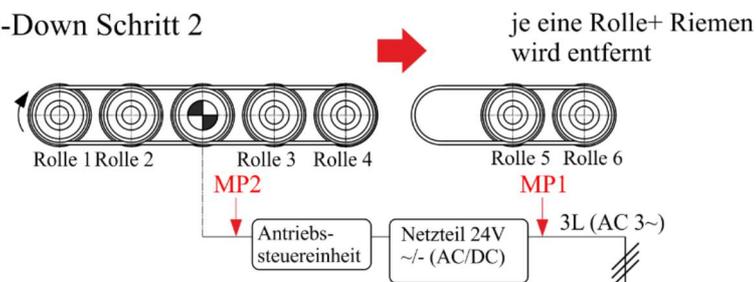
Ausgangssituation, Rollenförderersegment mit Trommelmotorantrieb



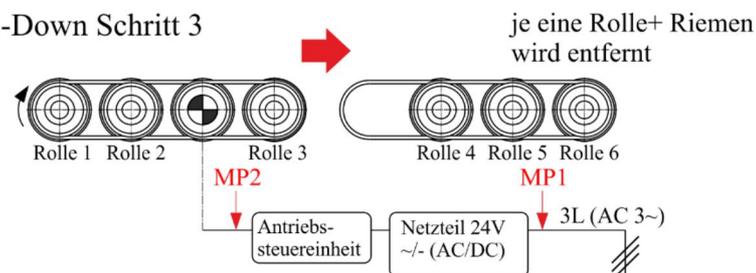
Strip-Down Schritt 1



Strip-Down Schritt 2



Strip-Down Schritt 3



Strip-Down n-Wiederholungen,
bis alle zu untersuchenden Komponenten entfernt sind

Abbildung 4-5: Strip-Down zur Bestimmung der Verluste einzelner Förderrollen inkl. Riemen

Das sukzessive Entfernen einzelner Rollen mit entsprechender Leistungsmessung erlaubt die quantitative Bestimmung der Leistungsaufnahme einer Rolle inkl. des antreibenden Keilrippenriemens, da dieses Element bei jeder Rolle mit entfernt werden muss. Da der Keilrippenriemen natürlich selbst Leistungsverluste verursacht, kann hier mit diesem Messverfahren somit also nur eine Angabe zum Leistungsverlust einer Förderrolle inkl. eines Keilrippenriemens angegeben werden.

Das Strip-Down Messverfahren kommt in dieser Arbeit an zwei Rollenförderern zur Anwendung. Die Messergebnisse werden anhand von Vergleichsmessungen und Rechnungen verifiziert. Allerdings unterliegt das Messverfahren Einschränkungen in der Durchführung. Dem Vorteil der einfachen Anwendbarkeit an realer Fördertechnik stehen folgende Nachteile gegenüber:

- Durch den Ausbau von Teilkomponenten wird das mechanische Gesamtsystem verändert. Wird die Änderung der mechanischen Leistung gemessen, erhält man korrekte Messwerte, da die Messung direkt an der Entstehungsstelle erfolgt. Wenn die Änderung der elektrischen Leistung z. B. vor dem Antriebsmotor gemessen wird, kann durch das veränderte mechanische System der Antrieb in einen anderen Teillastbereich kommen und daher aufgrund der nichtlinearen Wirkungsgradcharakteristik des Antriebs verfälschte Leistungswerte liefern.
- Zudem kann natürlich bei zunehmender Demontage von Rollensegmenten der einwandfreie Betrieb der Fördertechnik mit beladenen Transportbehältern teilweise nicht mehr aufrechterhalten werden. Abhilfe liefert z. B. das Eingliedern fremdangetriebener Rollensegmente über Motorrollentechnik (z. B. über Trommelmotoren), die dann einen Betrieb der Fördertechnik ermöglichen. Dies ist bei der Anwendung im Rahmen dieser Arbeit erfolgt, da Leistungsmessungen bei unterschiedlichen Beladungen erfolgten.

Der Nachteil, dass nur eine Förderrolle inkl. Riemen entfernt werden kann, also keine Aufteilung der Leistungsverluste auf Rolle und Riemen erfolgen kann, ist bereits erwähnt worden. Mit Messverfahren der Auslauf-Methode können aber auch die Verluste einzelner Komponenten bestimmt werden. Zudem sind die Messergebnisse des Strip-Down Messverfahrens anhand der Auslaufmethode durch Vergleichsmessungen verifiziert worden.

Auslauf-Methode

Die Auslaufmethode ist eine speziell in der Antriebstechnik angewandte Methode zur messtechnischen Verlustbestimmung und Parameteridentifikation von Antrieben und Getrieben ([DIN15], S. 62–69). Das Verfahren beruht darauf, dass das zu untersuchende System auf eine Drehzahl n_0

gebracht wird. Anschließend erfolgt das Abstellen bzw. Abkoppeln des Antriebsmoments bei t_0 und das System verzögert frei bis zum Stillstand t_A (Abbildung 4-6). Bei bekanntem Gesamt-Trägheitsmoment kann aus der negativen Steigung des Drehzahlverlaufs auf die Reibung bzw. die Verlustleistung bei Betriebsdrehzahl n' des Systems gerechnet werden.

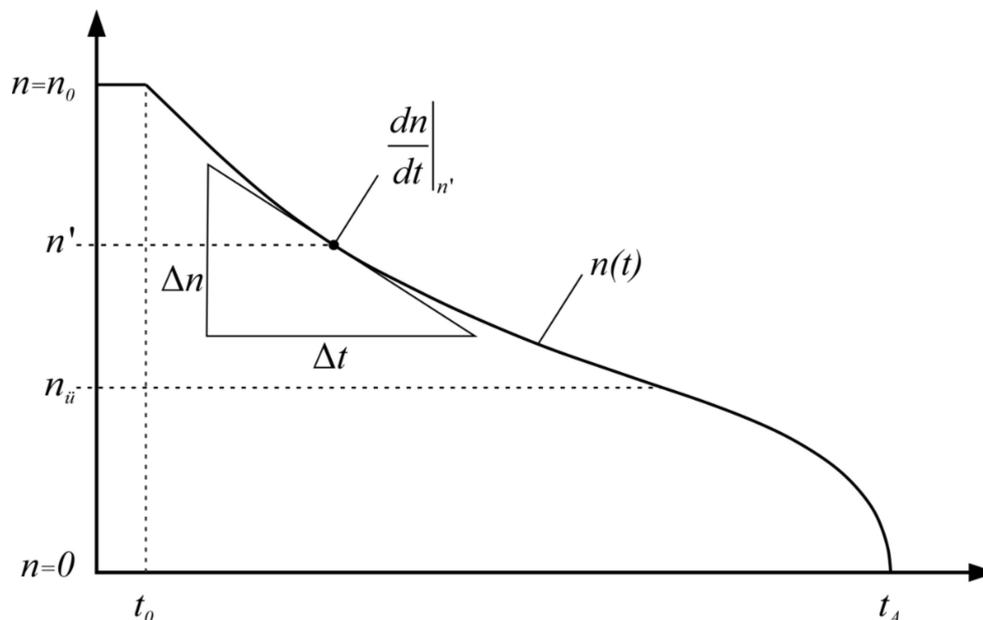


Abbildung 4-6: Auslaufversuch mit Drehzahlverlauf über Zeit bis zum Stillstand des Systems

Den Ausgangspunkt beim Auslaufversuch bildet der Drallsatz für ein mechanisches System, bezüglich des zu betrachtenden Kontrollquerschnittes, mit

$$\sum M = J_0 \cdot \dot{\omega} \quad \text{wobei} \quad \ddot{\varphi} = \dot{\omega} = \frac{d\omega}{dt} \text{ ist.} \quad (4.2)$$

Die Momentenbilanz (4.3) ergibt, da kein Antriebsmoment M_{An} vorhanden ist, dass nur mehr Reibmomente M_{Vr} als Verluste wirksam sind und damit das mechanische System verzögern.

$$\sum M = J_0 \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{An} + M_{Vr}, \quad M_{An} = 0 \quad (4.3)$$

Mit der Beziehung zwischen Winkelgeschwindigkeit ω und der Frequenz bzw. Drehzahl n

$$\omega = 2\pi f = 2\pi n, \quad (4.4)$$

kann nun die Bewegungsgleichung aus (4.3) in folgender Form geschrieben werden

$$2\pi J_0 \cdot \frac{dn}{dt} = M_{Vr}(n). \quad (4.5)$$

Das Reibmoment kann somit in Abhängigkeit der Drehzahl n , bei bekanntem Massenträgheitsmoment J_0 und negativem Anstieg der Auslaufkurve $n=n(t)$, für jeden Punkt bestimmt werden.

$$M_{Vr}(n) = 2\pi J_0 \cdot \left. \frac{dn}{dt} \right|_n \quad (4.6)$$

Die Verluste des zu untersuchenden Systems berechnen sich mit (4.6) und (4.4) entsprechend zu

$$P_{Vr}(n) = M_{Vr}(n) \cdot \omega = 4\pi^2 \cdot n \Big|_{n=n'} \cdot J_0 \cdot \left. \frac{dn}{dt} \right|_{n=n'}. \quad (4.7)$$

Im Versuch wird die Drehzahl messtechnisch erfasst und als Funktion der Zeit aufgezeichnet, vgl. Abbildung 4-6. Dies ermöglicht mit dem Grenz-Sekante- bzw. Sehnenverfahren ([DIN15], S. 62–69) die Bildung der Ableitung dn/dt bzw. des Quotienten $\Delta n/\Delta t$. Unter Anwendung der Gleichung (4.7) erfolgt so die Berechnung der Verluste bei bestimmter Drehzahl n' (Betriebsdrehzahl).

Die Verlustleistung in Gleichung (4.7) entspricht der Summe aller auftretenden Verluste am zu untersuchenden System. In der vorliegenden Anwendung werden damit an den Förderelementen

- Reibungsverluste der Förderrollen-Wälzlager,
- Schlupf- und Umformverluste der Keilrippenriemen bei der Kraftübertragung und
- Verluste durch Luftwiderstand bzw. Reibung des Umgebungsmediums an den Außenflächen der zu untersuchenden Komponenten gemessen.

Das Trägheitsmoment von Förderrolle und Riemen ist durch Gewichtsmessung und die bekannte Geometrie bestimmbar. Dieses Verfahren eignet sich nun zur Bestimmung der Verluste von

- Rollensegmenten, bestehend aus Förderrollen und Keilrippenriemen (Gesamtreibung) sowie
- einzelner Förderrollen (Reibmoment der Wälzlager).

Nach Vermessung und anschließender statistischer Auswertung von einzelnen Förderrollen sowie von Rollensegmenten mit unterschiedlicher Anzahl von Förderrollen, kann wiederum durch Anwendung der Strip-Down-Methode auf die Verluste einzelner Keilrippenriemen (Verbindung zwischen Förderrollen zur Leistungsübertragung) gerechnet werden. Allerdings ist das Verfahren nur für Bestimmung ohne Belastung der Rollen geeignet. Trotz dieser Einschränkungen eignet sich die Methode, um mit einfachen Messaufbauten hinreichend genaue Ergebnisse zu erreichen und damit eine Einschätzung der Größenordnung der Verlustanteile bzw. deren wertmäßige Aufteilung zu erreichen. In Kapitel 5.3 werden zur Bestimmung der Verluste Betriebsversuche an realer Fördertechnik gemäß Klassifizierung (Abbildung 2-12 I bzw. II) durchgeführt, ohne Beeinflussung der Verluste durch applizierte Messtechnik im Antriebsstrang.

5 Experimentelle Bestimmung der Energieeffizienz

Die im Kapitel 3 und 4 erarbeiteten theoretischen Grundlagen zur Bestimmung der Energieeffizienz werden in diesem Kapitel an realer Fördertechnik experimentell angewendet und validiert. Die beiden Schwerpunkte

- Bewertungsmethodik zur Energieeffizienz und
- Bestimmung von Verlusten im Antriebsstrang

werden an vorwiegend in Industrie eingesetzter, dem Stand der Technik entsprechender Fördertechnik unter Einbeziehung geeigneter Messtechnik und Messverfahren untersucht.

Notwendigerweise erfolgte in Kapitel 4.1 zuerst die technische Beschreibung und Konfiguration

- der für die Untersuchungen verwendeten Versuchsaufbauten (Prüfstände),
- der angewendeten Messmethoden zur Leistungsmessung und
- des verwendeten Messsystems.

Unter 5.2 erfolgt die Anwendung der Bewertungsmethodik anhand der gemäß Kapitel 3.5 festgelegten Prozessschritte an Versuchsaufbauten mit entsprechender Validierung der Methodik.

Im letzten Teil des Kapitels wird die messtechnische Bestimmung der relevanten Verlustleistungen an den Komponenten im Antriebsstrang durchgeführt, um Optimierungspotenziale zu identifizieren und exemplarische Maßnahmen zur Energieminimierung zu setzen. Es erfolgt die Anwendung der unter Kapitel 4.3 beschriebenen Messverfahren, um die Leistungsverluste im Antriebsstrang der Fördertechnik zu bestimmen.

Dabei wurde darauf Wert gelegt, dass möglichst alle Komponenten im laufenden Betrieb an unveränderter Fördertechnik vermessen werden, ohne beeinflussende, konstruktive Eingriffe am Antriebsstrang tätigen zu müssen. So wird gewährleistet, dass die bestimmten Verlustleistungen an Komponenten unter real auftretenden Lastszenarien erfasst werden und somit eine Aussage über das tatsächlich erreichbare Optimierungspotenzial ermöglichen. Exemplarisch durchgeführte Optimierungsmaßnahmen an Antriebssträngen werden anhand der Bewertungsmethodik beurteilt.

5.1 Prüfstände, Messmethoden und Messsystem

5.1.1 Versuchsaufbauten und Prüfstände

Die Anwendung der unter Kapitel 3 erarbeiteten Grundlagen zur Energieeffizienz erfolgt an drei Prüfständen. Dabei kommen

- Zwei Rollenförderer unterschiedlicher Antriebstechnologie (400 V und 24 V) und ein
- Bandförderer (400 V) zum Einsatz,

wie sie typischerweise in Anlagen der Intra- und Distributionslogistik zum Einsatz kommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur minimale Veränderungen an den Untersuchungsobjekten durchgeführt, um die notwendigen Anbauten der Messtechnik zu ermöglichen, aber den Leistungsfluss im Antriebsstrang nicht zu verändern.

Die Versuche werden gemäß Abbildung 2-12 als Betriebsversuche an real eingesetzter, nicht veränderter Fördertechnik klassifiziert (keine Beeinflussung durch Messtechnik).

Die Prüfstände sind als Umlaufförderer ausgeführt. Damit sind ein kontinuierlicher Testbetrieb und eine ausreichende Anzahl von Messwiederholungen möglich. Alle Förderer haben eine Nennbelastung von 50 kg und Fördergeschwindigkeiten von 0,3 – 0,9 m/s. Befördert werden typische KLT-Standardbehälter, mit einer Dimension von 600 x 400 mm bzw. 400 x 300 mm.

Rollenförderer mit Zentralbandantrieb

Die Prüfstandsordnung des staufähigen Rollenförderers mit Zentralbandantrieb veranschaulicht Abbildung 5-1 und zeigt auch die Hauptkomponente der Messausrüstung, einem für Umrichterbetrieb geeigneten Leistungsmesssystem.



Abbildung 5-1: Rollenförderer mit Zentralbandantrieb inkl. Messsystem

Abbildung 5-2 zeigt schematisch den mechanischen Aufbau des Zentralbandförderers mit den drei Hauptbaugruppen: Drehstrom-Getriebemotor mit Stellglied, gemeinsamer Antriebsstrang für die Staurollensegmente mit zentral angetriebenem Flachriemen und zuschaltbare Staurollensegmente (hier drei dargestellt, mit je 6 Rollen).

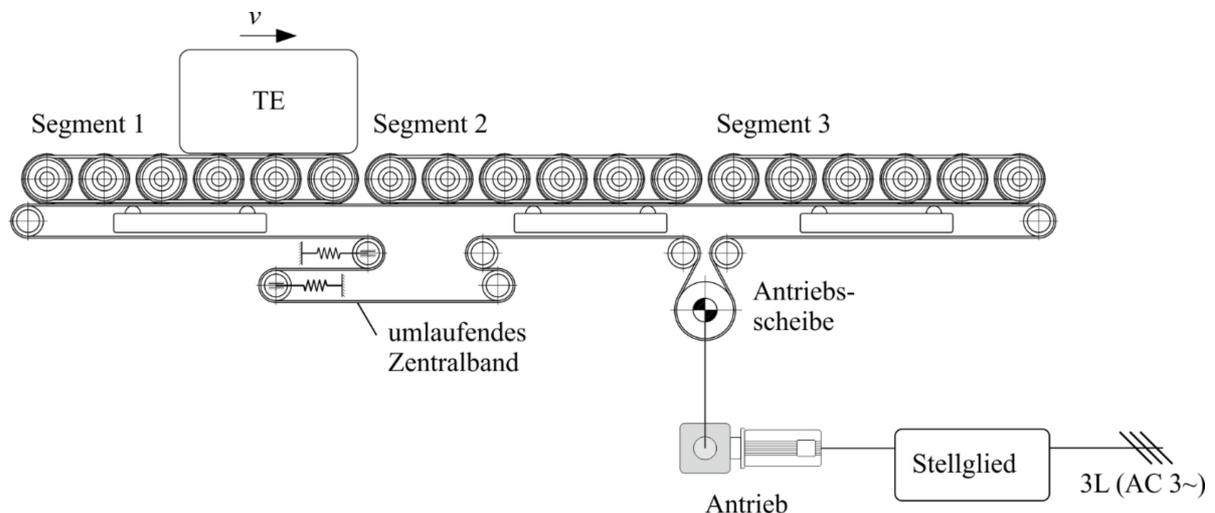


Abbildung 5-2: Prinzipskizze des Rollenförderers mit Zentralbandantrieb

Die technischen Daten des Prüfstandes sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Tabelle 5-1: Technische Beschreibung - Versuchsaufbau Rollenförderer mit Zentralbandantrieb

Geometrische Konfiguration (konstruktiv)	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtlänge = 3.280 mm; • Riemenübersetzer an den Enden der Förderstrecken
Materialflusstechnische Konfiguration	<ul style="list-style-type: none"> • Nenndurchsatz: 2.400 TE/h; • Fördergeschwindigkeit: 0,6 m/s; 0,9 m/s (gestuft) • Behälterdimension: 400 x 300 mm • Beladung Transporteinheiten: max. 50 kg Fördergut
Elektrische Konfiguration der Antriebstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsversorgung AC3~; 3x400 V AC • separate Druckluftversorgung erforderlich • Stellglieder, Leistungselektronik: Nicht vorhanden, Betrieb direkt am Versorgungsnetz • Antriebstyp: Getriebemotor (Asynchronmotor) • Installierte Antriebsleistung: Nennleistung: 0,37 kW

Rollenförderer mit Motorrollenantrieb

Der Prüfstand besteht aus zwei parallel angeordneten, gegenläufigen Einzelförderstrecken. An den Enden befinden sich Übersetzer zum Wenden von Stückgütern. Somit wird ein Kreislauf gebildet in dem Stückgüter (TE) durchgehend im Umlauf befördert werden können (Abbildung 5-3).



Abbildung 5-3: Rollenförderer mit Motorrollenantrieb

Abbildung 5-4 zeigt den Aufbau des Motorrollenförderers mit den Hauptbaugruppen: Netzteil zur 24 V Spannungsversorgung, Motorsteuerungsmodul und Motorrollenantriebe innerhalb der Förderrollen zum dezentralen Betrieb der Rollensegmente. (hier zwei dargestellt, mit je sechs Rollen). Die Tragrollen innerhalb eines Fördersegmentes (Abschnittes innerhalb des Rollenförderers) sind zur Leistungsübertragung über Poly-V Keilrippenriemen miteinander verbunden.

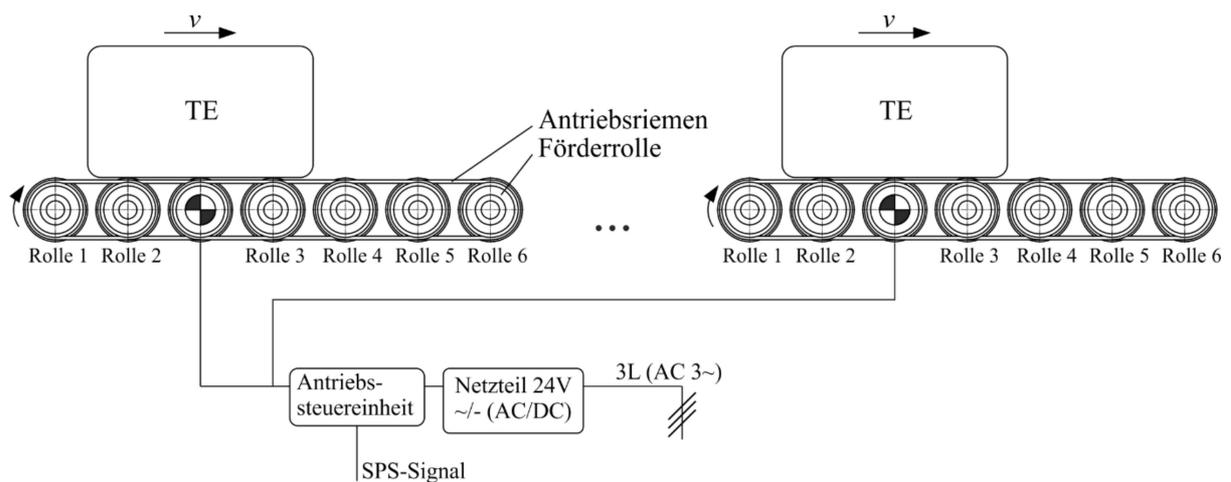


Abbildung 5-4: Prinzipskizze des Motorrollenförderers

Die technischen Daten des Prüfstandes sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Tabelle 5-2: Technische Beschreibung - Versuchsaufbau Rollenförderer mit Motorrollenantrieb

Geometrische Konfiguration (konstruktiv)	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtlänge = 2.880 mm; • Länge eines Rollensegmentes = 540 mm (1 Motorrolle + 6 angetriebene Förderrollen) • An den Enden der Förderstrecken sind Riemenübersetzer angeordnet
Materialflusstechnische Konfiguration	<ul style="list-style-type: none"> • Nenndurchsatz: 2.400 TE/h; • Fördergeschwindigkeit: 0,3 m/s; 0,6 m/s; 0,9 m/s • Behälterdimension: 600 x 400 mm (Kunststoff-Behälter LTF 6280) • Beladung Transporteinheiten: max. 50 kg Fördergut
Elektrische Konfiguration der Antriebstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsversorgung AC3~; 3x400 V AC • Elektronisches Netzteil 24 V DC ebmPapst PS 320-24-2 (24 V Gleichspannung) • Leistungselektronik: Interroll Rollerdrive 39.06 • Antriebstyp: Getriebemotor DC Motor (ebmPapst ECI 42.40) mit Planetengetriebe • Installierte Antriebsleistung: Nennleistung: 50 W

Bandförderer

Der Prüfstand besteht aus zwei nebeneinander angeordneten Bandförderstrecken. An den Enden befinden sich Kurvenstücke zur Umkehr der Stückgüter. Somit wird ein umlauffähiger Kreislauf gebildet, in dem Stückgüter (Transporteinheiten TE) durchgehend im Umlauf befördert werden können. Abbildung 5-5 zeigt den untersuchten Bandförderer.

**Abbildung 5-5: Bandfördererprüfstand mit Messsystem**

Der schematische Grundaufbau in Abbildung 5-6 stellt die Hauptkomponenten Antrieb und Antriebsstrang-Förderband dar.

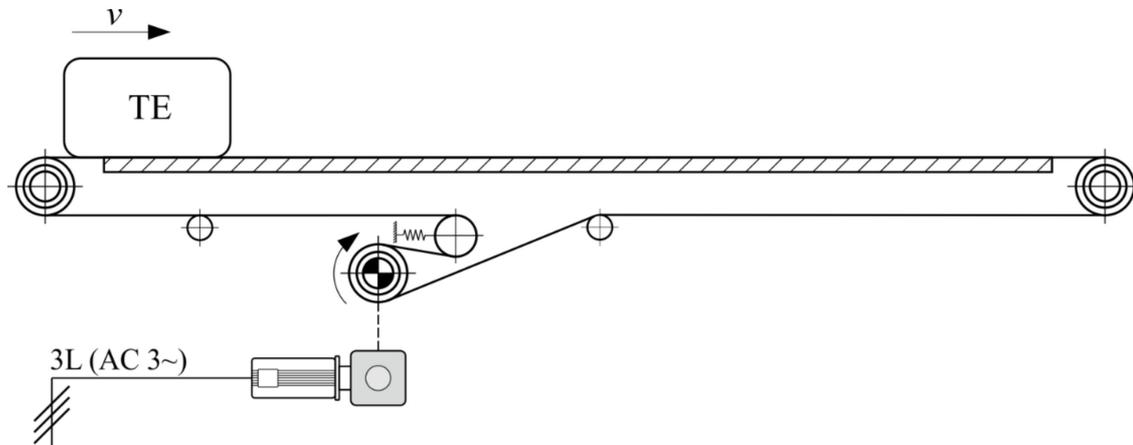


Abbildung 5-6: Prinzipskizze des Bandförderers

Die Bandförderanlage wird über einen Getriebemotor angetrieben. Der Getriebemotor befindet sich direkt an der Antriebswelle der Bandtrommel und wird über eine Drehmomentstütze an der Struktur des Bandförderers befestigt. Im Gegensatz zum Rollenförderer mit Zentralbandantrieb (Abbildung 5-2) ist die mechanische Struktur des Bandförderers durch einen vergleichsweise einfach gestalteten Antriebsstrang geprägt. Die technischen Daten des Prüfstandes sind in folgender Tabelle aufgelistet:

Tabelle 5-3: Technische Beschreibung - Versuchsaufbau Bandförderer

Geometrische Konfiguration (konstruktiv)	<ul style="list-style-type: none"> • Gesamtlänge = 3.740 mm; • An den Enden der Förderstrecken sind Umkehrbänder angeordnet, separat angetrieben
Materialflusstechnische Konfiguration	<ul style="list-style-type: none"> • Nenndurchsatz: 2.400 TE/h; • Fördergeschwindigkeit: 0,9 m/s • Behälterdimension: 600 x 400 mm (Kunststoff-Behälter LTF 6280) • Beladung Transporteinheiten: max. 50 kg Fördergut
Elektrische Konfiguration der Antriebstechnik	<ul style="list-style-type: none"> • Spannungsversorgung AC3~; 3x400 V AC • Stellglieder, Leistungselektronik: Nicht vorhanden, Betrieb direkt am Versorgungsnetz • Antriebstyp: Getriebemotor (Asynchronmotor) • Installierte Antriebsleistung: Nennleistung: 0,75 kW

Für Detailuntersuchungen an Antriebsmotoren und reibungsarmen Alternativkomponenten sind Sonderprüfstände zum Einsatz gekommen (Motor- und Reibungsprüfstand). Auf die detaillierte Erklärung wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Literatur verwiesen ([HAL13b]; [HAL15b]).

5.1.2 Messmethoden zur Leistungsmessung

Zur Bestimmung der elektrischen und mechanischen Leistungen werden in diesem Kapitel die erforderlichen Messmethoden und Messgeräte beschrieben.

Da die Antriebsstränge im ersten Abschnitt auf elektrischer Technologie aufbauen (Netzteile, Stellglieder, Steuermodule, Motoren) und im zweiten Abschnitt aus mechanischen Komponenten aufgebaut sind, müssen abhängig von der zu untersuchenden Komponente

- elektrische Leistungsmessungen im ersten Teil des Antriebsstranges und
- mechanische Leistungsmessungen im zweiten Teil durchgeführt werden.

Durch Differenzbildung der Leistungswerte können dann sowohl

- die Leistungsverluste als auch die
- Wirkungsgrade der untersuchten Komponenten bestimmt werden.

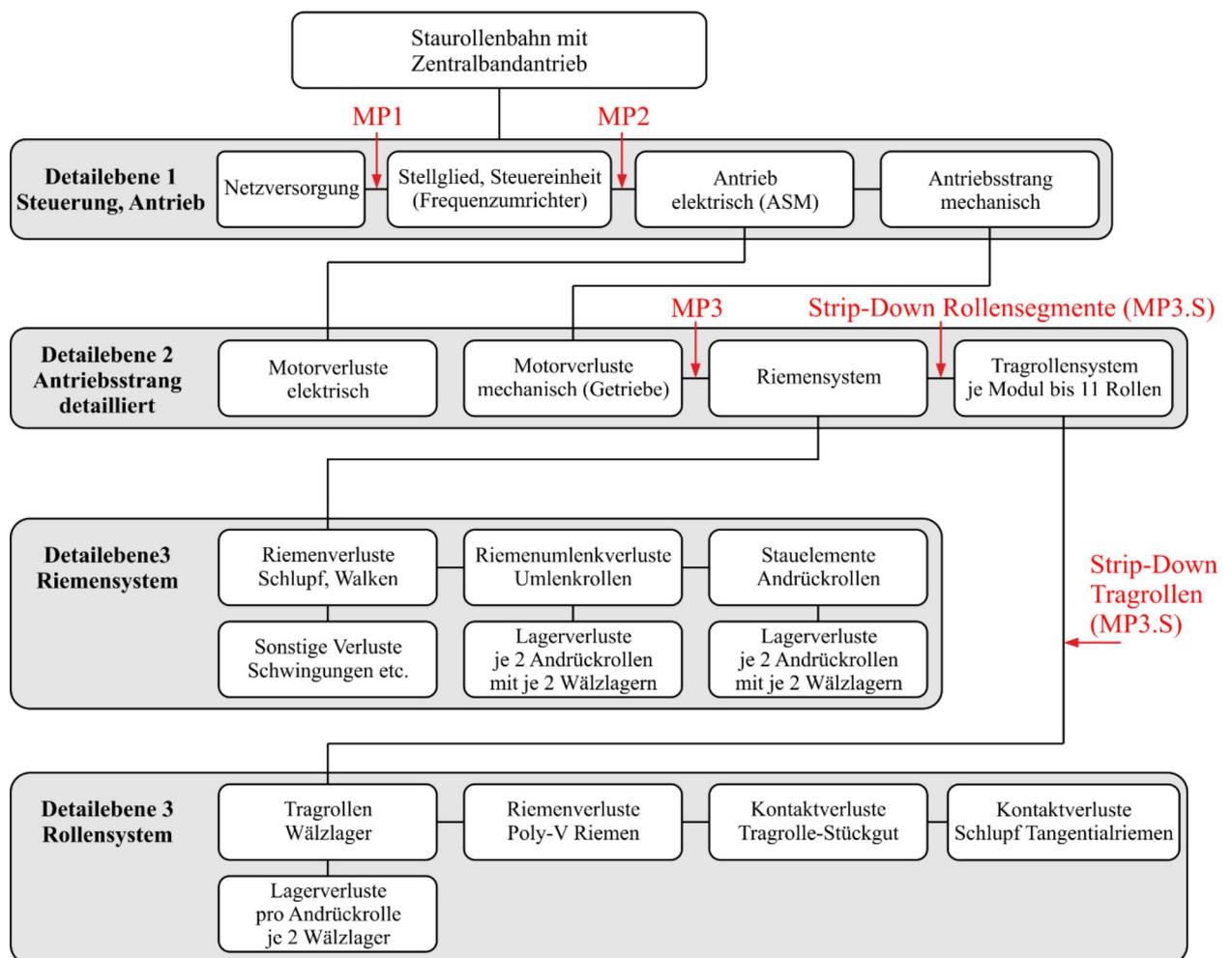


Abbildung 5-7: Festlegung der Messpunkte (MP) im Messstellenplan

Bestimmung der elektrischen Gesamtleistungsaufnahme zur Kennzahlbestimmung der Energieeffizienz-Bewertungsmethodik:

Im Kapitel 3.2 wurde die Systemgrenze zur Betrachtung der Fördertechnik definiert. Daraus resultiert, dass der Messpunkt für die Bestimmung des Gesamtenergiebedarfs an der Spannungsversorgung liegt (Abbildung 3-7), siehe MP1 in Abbildung 5-7. Somit bildet der Messpunkt zur Bestimmung der Gesamtenergieaufnahme immer eine elektrische Leistungsmessung, vorwiegend im Dreiphasen-Wechselspannungssystem. Am Versorgungspunkt müssen je drei Spannungsgrößen sowie drei Stromgrößen messtechnisch bestimmt werden. Dies erfolgt mit einem Messsystem gemäß der Forderungen aus dem Prüfverfahren nach Kapitel 3.6. Die Konfiguration des Messsystems und die technologischen Daten sind im Kapitel 5.1.3 spezifiziert. Zudem wird in selbigem Kapitel die Leistungsberechnung der Messsoftware erläutert.

Die Bestimmung der elektrischen Gesamt-Leistungsaufnahmen, als notwendige Teilkennwerte für die Kennzahlenberechnung, ist mit vergleichsweise geringem Aufwand durchführbar. Da die elektrischen Spannungsgrößen durch Tastköpfe, und die elektrischen Strommessgrößen durch den Einsatz von Strommesszangen ohne Veränderung der elektrischen Installation im Schaltschrank abgegriffen werden, ist die Messung an unveränderter Standardfördertechnik möglich. Somit erfüllt dieses Messverfahren im Sinne eines einfachen, schnellen und transparenten Prüfverfahrens die Anforderungen welche im Kapitel 1.4 gefordert werden.

Bestimmung von einzelnen Leistungsverlusten im Antriebsstrang

Zur Bestimmung von Leistungsverlusten einzelner Komponenten im Gesamtverbund des Antriebsstranges müssen an mehreren Stellen elektrische und mechanische Leistungswerte bestimmt werden.

Im Kapitel 4.2 sind Antriebsstränge gängiger Fördertechnik hinsichtlich der Einzelkomponenten und zugeordneten Verlusten strukturiert aufgegliedert worden. Anhand der systematischen Gliederung können nun Messstellen bzw. Messpunkte festgelegt werden, um systematisch die Verluste von Komponenten zu bestimmen. Es wird ein Überblick ermöglicht, an welchen Messpunkten elektrische bzw. mechanische Leistungen bestimmbar sind und welche Komponenten durch Differenzbildung der Leistungsmesswerte untersucht werden können, siehe MP2 und MP3 im Messstellenplan in Abbildung 5-7.

Für die Bestimmung der mechanischen Leistung sind allerdings Adaptionen an der Fördertechnik notwendig, um Anbauten der Messtechnik an den vorgesehenen Messpunkten zu ermöglichen.

Messpunkte zur Erfassung der physikalischen Größen

Die Festlegung der benötigten Messpunkte zeigt Abbildung 5-7, anhand des schematischen Aufbaus am Beispiel des Rollenförderers mit Zentralbandantrieb. In drei Detaillierungsebenen sind die Komponenten des erläuterten Aufbaus und die benötigten Messpunkte dargestellt. Messpunkte mit der Endung „S“ bezeichnen keine physischen Messpunkte sondern bilden zur besseren Orientierung „gedachte“ Messpunkte bei der Anwendung der Strip-Down Methode. Die Leistungswerte werden beim Strip-Down dabei ebenso an den in Tabelle 5-4 genannten realen Messpunkten bestimmt.

Tabelle 5-4 enthält die Benennung, die qualitativen Messgrößen und die wesentlichen Anforderungen zu den Messpunkten MP1, MP2 und MP3 an den Antriebssträngen lt. Abbildung 5-7.

Tabelle 5-4: Messpunkte, Messgrößen und deren Anforderungen

Messpunkte			
MP	Benennung	Messgrößen	Anforderungen
1, 2	Elektrische Leistungsaufnahme am Umrichter (MP1) bzw. am Antriebsmotor (MP2)	3 x Spannung 3 x Strom	Spannung 0 – 400 V Stromstärke 0 – 10 A Bandbreite 0 – 300 kHz
3	Mechanische Leistungsaufnahme am Getriebeausgang (Antriebsausgang)	1 x Drehmoment 1 x Drehzahl	0 – 10 Nm 0 – 3000 min ⁻¹

Messpunkt - Elektrische Leistung (MP1, MP2)

Zur Bestimmung der elektrischen Leistung am Fördersystem ist die messtechnische Ermittlung der Spannungs- und Stromgrößen im dreiphasigen Versorgungssystem erforderlich. Die Messgrößen Spannung und Strom werden für den Messpunkt 1 (MP1) am Eingang des Stellglieds (z. B. Frequenzumrichter) abgegriffen, der Messpunkt 2 befindet sich zwischen Stellglied und dem gespeisten Antriebsmotor (Drehstrommotor), siehe Abbildung 5-7. Die Spannungen werden direkt abgegriffen. Die Ströme werden mittels Strommesszangen erfasst bzw. je nach Messbereich auch durch die Verwendung von Shunts.

Abbildung 5-8 zeigt ein beispielhaftes Messergebnis, für die Beförderung eines Stückgutes mit 25 kg bei einer Fördergeschwindigkeit von 0,6 m/s. Dabei verdeutlicht Abbildung 5-8(a) die auf-

genommene elektrische Motorleistung und die abgegebene mechanische Leistung an der Motorwelle. Abbildung 5-8(b) zeigt den Augenblickswert des Zeigerdiagramms der drei Phasen (Spannung und Strom).

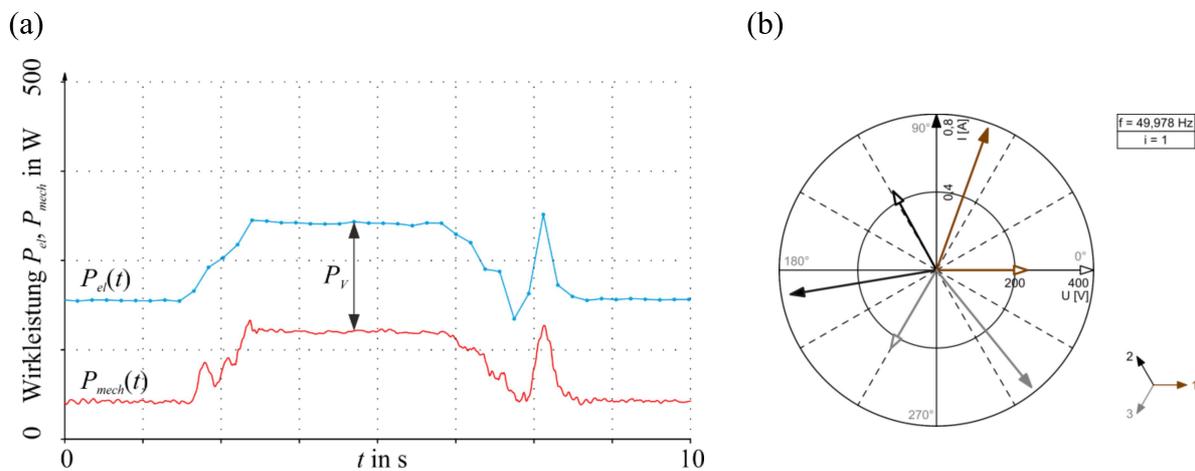


Abbildung 5-8: Leistungsmessung exemplarisch- (a) Verlauf der Wirkleistung MP2 und MP3, (b) Zeigerdiagramm MP2

Auf die Berechnung der elektrischen Leistung am Messsystem wird in Kapitel 5.1.3 eingegangen.

Messpunkt – Mechanische Leistung (MP3, Strip-Down)

Um den Leistungsbedarf des mechanischen Anlagenteils ohne Antriebseinheit zu bestimmen, ist es notwendig, die mechanische Leistung an der Abtriebswelle der Antriebseinheit zu erfassen (Getriebe oder Direktantrieb) - Messpunkt MP3 lt. Abbildung 5-7. Zur Leistungsberechnung sind am Messsystem die Messgrößen Drehmoment und Drehzahl entsprechend zu bestimmen.

$$P_{mech} = M \cdot \omega = F \cdot r \cdot \omega \quad (5.1)$$

P_{mech} mechanische Leistung

M Drehmoment

F Kraft

r wirksamer Hebelarm des Kraftangriffspunktes

ω Winkelgeschwindigkeit

Aufgrund des konstruktiven Aufbaus der Standard-Förderer sind entsprechende Anpassungsvorgänge an den Prüfständen notwendig. Konstruktiv befinden sich die Getriebemotoren entweder starr befestigt an einer Konsole oder direkt an der Abtriebswelle (Getriebe mit Hohlwelle). Bei der

Hohlwellenausführung wird die Aufnahme des Reaktionsdrehmomentes mittels Drehmomentstütze realisiert. Die Drehzahlerfassung erfolgt direkt an der Getriebeausgangswelle des Antriebsmotors. Zum Einsatz kommen Tachogeneratoren oder alternativ inkrementelle Drehgeber. Jedenfalls muss der konstruktive Anbau den Ausgleich von Achs- und Winkelfehlern zulassen (Metallbalgkupplung).

Die Bestimmung des Drehmomentes wird abhängig von der Anbausituation mittels zweier Varianten durchgeführt, abhängig vom verfügbaren Bauraum.

- Variante 1: Durch Einsatz eines Drehmomentenaufnehmers, Abbildung 5-9 links. Wenn dies konstruktiv möglich ist, kann die Messgröße vorteilhaft direkt erfasst werden.
- Variante 2: Der Einsatz eines Kraftaufnehmers als Drehmomentenstütze, Abbildung 5-9 rechts, erfordert die korrekte Berücksichtigung der Reaktionskraft infolge des Motoreigengewichts. Über den wirksamen Normalkraftabstand wird das Reaktionsdrehmoment bestimmt.

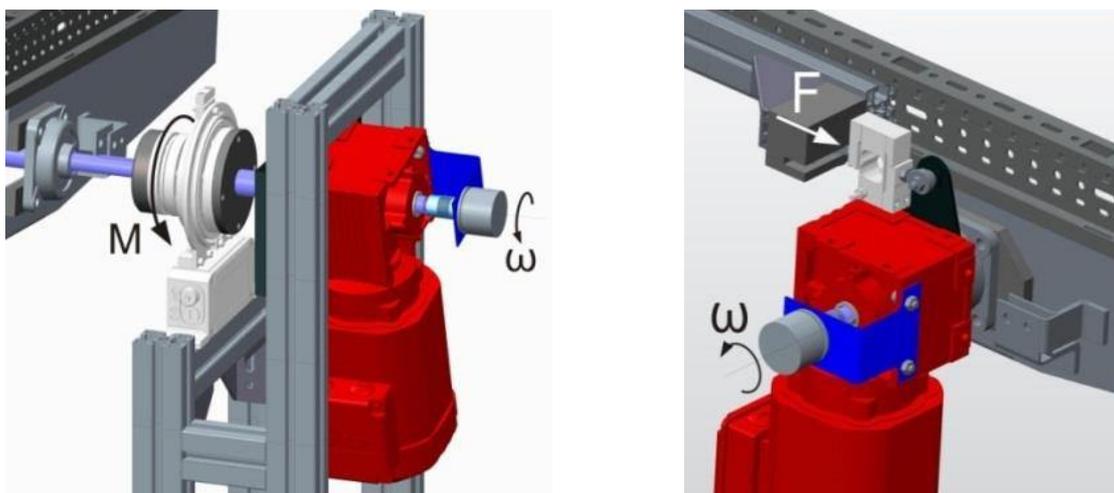


Abbildung 5-9: Messaufbau zur Bestimmung der mechanischen Leistung - links Variante 1 und rechts Variante 2

5.1.3 Messsystem

Das Messsystem als Ganzes ist durch elektrische und mechanische Messgrößen gekennzeichnet. Für den Fall, dass die Motoren mittels Umrichter drehzahlgesteuert bzw. geregelt betrieben werden, bestehen für die eingesetzte Sensorik, die Verstärker-, Wandler- und Auswerteeinheit hohe Anforderungen. Die Spezifikationen aller Messkomponenten werden in den nachfolgenden Unterkapiteln erläutert.

Spezifikation der Messtechnik-Komponenten

Die nachfolgende Tabelle 5-5, listet alle Komponenten der einzelnen Messketten (Sensor, Wandler, Verstärker) auf. Zu den einzelnen Messgrößen werden die benötigten Anzahlen und die zugeordneten Messpunkte angegeben. Ebenso werden die Typen und die Messgrößen spezifiziert.

Tabelle 5-5: Spezifikation der Messkomponenten

Spezifikation der Messkomponenten				
Messgröße	Anzahl	MP	Typen-Spezifikation	Spezifikation der Messwerte
Spannung	3	1, 2	Hochspannungsmessverstärker Dewetron DAQP-HV	Spannungseingang bis ± 1400 V bis zu 300 kHz Bandbreite
Strom	3	1, 2	Strommesszange Dewetron PROSyS CP300 (an Niederspannungsmessverstärker Dewetron) oder Shunt Dewetron DAQ-SHUNT-4 (Messwiderstand)	Strom bis 300 A, DC oder AC_{pk} Strom ± 20 mA bis ± 5 A mit externem Shunt 300 kHz Bandbreite
Drehmoment	1	3	Drehmomentaufnehmer HBM T10F (mit Messverstärker HBM PME 60 an Messverstärker DAQP-LV)	Nenn Drehmoment 50 Nm Genauigkeitsklasse 0,1
Kraft	1	3	Kraftaufnehmer HBM S2 (mit Messverstärker HBM KWS 3073 an Messverstärker DAQP-LV)	Zug-/Druckkraftaufnehmer Nennkraft 500 N Genauigkeitsklasse 0,05
Drehzahl	1	3	Tachogenerator Baumer KTD B14 (direkt an Messverstärker DAQP-LV)	Drehzahlbereich ± 1500 min ⁻¹ Spannungsausgang ± 15 V

Spezifikation des Gesamtmesssystems und der Auswerteeinheit

Um alle in Tabelle 5-5 genannten Messgrößen zu erfassen, kommt das universell einsetzbare Auswertesystem DEWE-800 der Fa. Dewetron® zum Einsatz [DEW14]. Das modular aufgebaute Messsystem ermöglicht durch den Einsatz des A/D-Wandlers Dewetron® DEWE-ORION-1616-500 die Abtastung der Messsignale mit bis zu 500 kHz pro Kanal auf gemeinsamer Zeitbasis. Bis zu 16 Kanäle können flexibel mit den benötigten Wandler/Verstärkermodulen ausgestattet werden. Die verwendeten Messverstärkermodule sind speziell für die Messung elektrischer und mechanischer Leistungen ausgewählt, wie sie sich aus den Anforderungen ergeben.

Die PC-basierte, leistungsfähige Messauswertesoftware bietet die Möglichkeit, Auswertungen online oder offline durchzuführen. Mathematische Verknüpfungen sind einfach zu realisieren und rasch grafisch darzustellen.

Die Anforderungen an Messtechnik und Messsoftware zur Berechnung der elektrischen Leistung sind bei Umrichterbetrieb sehr hoch (vgl. [VDI09]; [DIN13b]). An den Messpunkten 1 und 2 treten Spannungs- und Stromverläufe auf, welche durch einen nicht-sinusförmigen Verlauf gekennzeichnet sind (Abbildung 5-10). Die Schaltfrequenzen von Umrichtern liegen im Bereich von mehreren kHz. Diese hochfrequenten Signalanteile können einen wesentlichen Anteil an der Gesamtleistungsaufnahme verursachen und sind daher in geeigneter Form zu berücksichtigen. Die eingesetzten Messverstärkermodule ermöglichen Abtastraten bis zu 300 kHz an jedem Kanal.

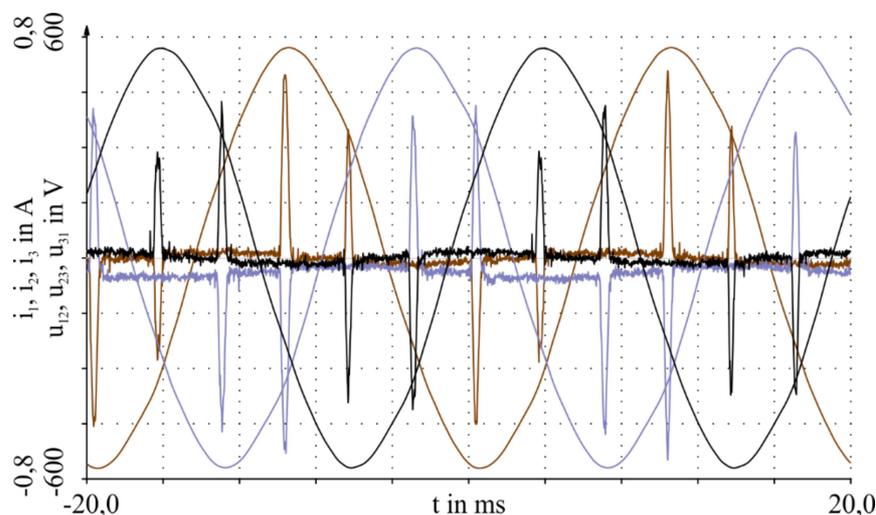


Abbildung 5-10: Gemessene Spannungs- und Stromverläufe an einem Netzteil zur 24 V Bereitstellung

Auf Basis einer Leistungsmesssoftware werden die Werte für Wirkleistung (bei Bedarf auch Schein- und Blindleistung) aus den Effektivwerten von Strom und Spannung berechnet.

Dabei wird sichergestellt, dass auch hochfrequente Signalanteile bei der Leistungsberechnung mit berücksichtigt werden. Zur Ermittlung der Effektivwerte wird über ein Periodenfenster (typ. 10 Perioden) eine Fast-Fourier-Transformationsanalyse (FFT-Analyse) der gemessenen Spannungs- und Stromverläufe $u(t)$ und $i(t)$ durchgeführt. Dies liefert die Harmonischen des jeweiligen Messsignals, mit Frequenz, den zugehörigen Amplitudenspitzenwerten und den Phasenverschiebungen.

$$\hat{u}_{nh}, \hat{i}_{nh}, \varphi_{nh} \dots \text{ aus FFT} \quad (5.2)$$

Diese Informationen sind somit für jede Phasennummer n (1-3) und Harmonische h (Oberschwingung) verfügbar. Damit werden zuerst die entsprechenden Effektivwerte U_{nh} der betrachteten Harmonischen für Spannung und Strom gemäß (5.3) berechnet.

$$U_{nh} = \frac{\hat{u}_{nh}}{\sqrt{2}} \quad (5.3)$$

Der Gesamteffektivwert U_n wird dann unter Berücksichtigung der Grundharmonischen, wie auch der Oberwellenanteile, nach (5.4) gebildet.

$$U_n = \sqrt{\sum_{h=1}^H U_{nh}^2} \quad (5.4)$$

Für die Stromanteile I_n gelten die Gleichungen (5.3) – (5.4) in identischer Form.

Die Wirkleistung P_{nh} jeder Harmonischen h ermittelt sich anschließend nach Gleichung (5.5).

$$P_{nh} = U_{nh} \cdot I_{nh} \cdot \cos \varphi_{nh} \quad (5.5)$$

Durch Summierung über alle in Betracht zu ziehenden Harmonischen (5.6) bestimmt sich die gesamte Wirkleistung einer Phase.

$$P_n = \sum_{h=1}^H P_{nh} \quad (5.6)$$

Der Vorgang ist im Dreiphasenspannungsnetz entsprechend für alle drei Phasen anzuwenden. Die Gesamtleistung am System setzt sich aus der Summe der drei Teilleistungen nach (5.7) zusammen.

$$P_{ges} = \sum_{n=1}^3 P_n \quad (5.7)$$

5.2 Anwendung der Energieeffizienz-Bewertungsmethodik

Das in Kapitel 3 erarbeitete Bewertungsverfahren wird an drei Versuchsständen angewandt und validiert. Dabei werden sämtliche Prozessschritte gemäß Kapitel 3.5, die zur endgültigen Kennzahlermittlung notwendig sind, unter Berücksichtigung des Prüfverfahrens aus Kapitel 3.6 durchgeführt und hinsichtlich der Anwendbarkeit und der validen Resultate untersucht.

5.2.1 Verifikation der Prozessschritte zur Kennzahlenbestimmung

Zur Verifizierung der Prozessschritte und der festgelegten Kennzahlen werden Messungen an den drei Versuchsaufbauten durchgeführt. Am Beispiel des Bandförderers erfolgt die Darstellung des verwendeten Versuchsaufbaus und der durchgeführten Untersuchungen, wobei zuerst der Ablauf der Messungen untersucht und abschließend eine erste beispielhafte Messung zur Ermittlung der Kennzahl durchgeführt wird. Die Durchführung des Prüfverfahrens an den beiden Rollenförderern ist in gleicher Weise erfolgt und wird an dieser Stelle deshalb nicht explizit angeführt.

Versuchsaufbau

In Abbildung 5-11 ist der verwendete Prüfstand dargestellt, vgl. Abbildung 5-5. Er besteht aus zwei entgegengesetzt laufenden Bandfördererstrecken. An den beiden Enden befinden sich jeweils zwei unabhängig angetriebene Förderbänder mit einer darüber angebrachten Kurvenführung.

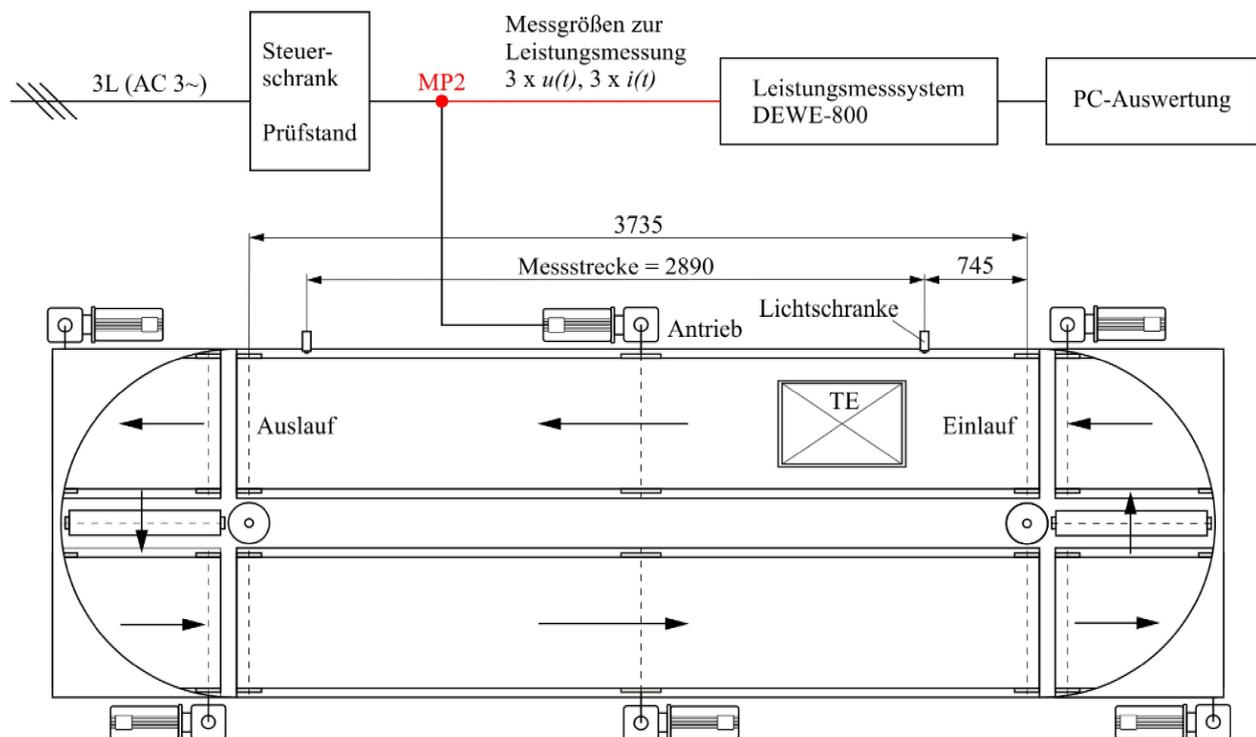


Abbildung 5-11.: Bandförderer-Prüfstand mit messtechnischem Prüfaufbau

Die technischen Daten des Fördermittels sind in der Grundkonfiguration in Tabelle 5-3 angeführt.

Alle Messungen wurden mit einem computerbasierten Messsystem der Firma Dewetron® durchgeführt (Kapitel 5.1.3). Die Abnahme der elektrischen Größen erfolgte basierend auf den in Kapitel 3.2 definierten Systemgrenzen, siehe Messpunkt 2 in Abbildung 5-11. Zur Erfassung der aufgenommenen elektrischen Leistung wurden die anliegende Spannung und der geflossene Strom in allen drei Phasen erfasst. Die Spannung konnte direkt abgegriffen und über Hochspannungsmessverstärker gemessen werden. Der Strom wurde über Strommesszangen erfasst und mittels Niederspannungsmessverstärkern aufgenommen (Abbildung 5-11). Ergänzend ist das Signal der beiden Lichtschranken und die Drehzahl des Tachogenerators am Getriebemotor erfasst worden.

- 2x Lichtschranke Sick WT27-P610 inkl. Netzgerät Thurlby PL320
- Tachometer: Thalheim KTD 2-1,5 B14 (bei 1.000 min^{-1} und 1 mA : $\pm 15 \text{ VDC}$)

Alle Kanäle wurden mit einer Aufzeichnungsrate von 10 kHz/Kanal abgetastet und gespeichert. Aus den Werten für Spannung und Strom wurde in der Messsoftware die elektrische Leistung als Mittelwert über 10 Zyklen berechnet. Dadurch ergibt sich für die Leistung eine Speicherrate von $5 \text{ Samples/Sekunde}$. Über verschiedene Trigger zur Berechnung der mittleren Leistung konnten, je nach Anforderung, die notwendigen Werte ermittelt werden:

- P_{AVE} : Mittelwert über die gesamte Aufzeichnungsdauer, Verwendung bei der Leerlaufmessung
- P_{Licht} : Root Mean Square (RMS Effektivwert) der Leistung zwischen den beiden Lichtschranken (Abstand 2.890 mm), Verwendung für Messungen im Kreislauf
- P_{v_pos} : Ausgabe von P nur bei positiver Bandgeschwindigkeit, Verwendung bei Messungen mit Richtungsumschalter
- P_{Trig} : Zur Messung mit Richtungsumschalter, RMS über Filterzeitraum, Filterung der Leistungsspitze beim Einschalten, Messung bis zum Abfallen der Leistung (siehe Abbildung 5-12)

Bei der abgebildeten Filterung der Leistung P_{Trig} , welche für die meisten späteren Messungen verwendet wurde, startet die Mittelwertbildung 500 ms , nachdem ein Drehzahlwert beim Anfahren von 136 rpm überschritten wurde (Nennzahl = 144 rpm). Gestoppt wird die Bildung 2.250 ms nach dem Überschreiten dieser Schranke, womit sich eine Messdauer von 1.750 ms ergibt. Die Zeitpunkte ergeben sich aus der Dauer der Beschleunigung und der Länge des Bandförderers. Sie wurden durch mehrere Versuche ermittelt.

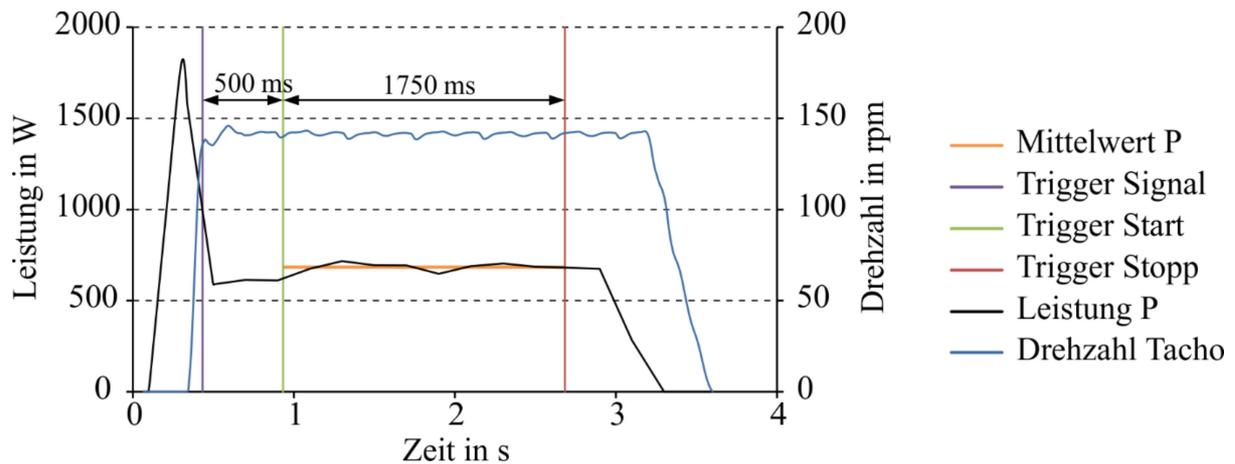


Abbildung 5-12: Gemessener Leistungs- und Drehzahlverlauf mit Triggermarkierungen zur Filterung der Anfahrspitzen (P_{Trig})

Die Filterung wurde in mehreren Messungen überprüft und dabei einer manuellen Auswertung des Mittelwertes gegenüber gestellt. Es zeigte sich keine Abweichung zwischen den beiden Werten. Die automatische Berechnung erfolgte somit zuverlässig.

Bei der Aufzeichnung wurden durch die Messsoftware immer die beiden grundlegenden Werte (Spannung und Strom) mit der festgelegten Abtastrate gespeichert. Somit war es auch nach der Messung noch möglich, die Daten aufzubereiten (Filterung) und Berechnungen durchzuführen. Die Leistungswerte wurden abschließend aus der Messsoftware exportiert und in Tabellen oder Diagrammen aufbereitet. Die Mittelwerte über mehrere Messwerte wurden im Tabellenkalkulationsprogramm immer als arithmetischer Mittelwert berechnet.

Abbildung der Betriebszustände

1. Vorbemerkungen

Die Einstellung des geforderten Durchsatzes lt. Tabelle 3-2 ist in der Praxis nicht ohne weiteres möglich. Wird, wie im Versuchsaufbau am Bandförderer, ein einfacher Förderkreislauf verwendet, lassen sich nur Durchsatzwerte einstellen, die sich aufgrund der Länge und einer geraden Anzahl an Boxen ergeben. Zwischenwerte sind nicht möglich. Es wäre jedoch denkbar, die Boxen durch eine Takteinrichtung jeweils im richtigen Abstand auf die Förderstrecke zu geben. Die Umsetzung wäre aber sehr aufwendig und würde einfache Messungen ohne umfangreiche Steuerung unmöglich machen. Bei der Abbildung der Betriebszustände gemäß Referenzarbeitsspiel sind nun zwei Fälle zu unterscheiden:

- Fall1: es sind Förderer in ausreichender Länge vorhanden, um die Betriebszustände so abzubilden, dass keine nennenswerte Beeinflussung durch auf- und ablaufende TE entsteht. Der geforderte Durchsatz muss durch eine Takteinrichtung einstellbar sein!

- Fall2: sind Förderer nicht ausreichend lang und werden die Messergebnisse durch Dynamik der auflaufenden TE beeinflusst, kann eine äquivalente Belastung ermittelt werden. Diese Belastung bildet mit einer oder zwei TE den Durchsatz durch ein gemittelttes Gewicht am Förderer nach.

2. Äquivalente Belastung

Um den geforderten Durchsatz für den jeweiligen Betriebszustand abbilden zu können, wurde daher eine äquivalente Belastung errechnet. Sie entspricht der mittleren Belastung des Förderers. Dadurch wurde es möglich, mit Hilfe von nur einer Box, welche mit der äquivalenten Beladung beladen ist, den Förderer im geforderten Betriebszustand zu betreiben. Die mittlere Belastung ergibt sich aus der Länge des Förderers L_F und dem Abstand s_i zwischen den einzelnen Behältern. Dieser Abstand ist durch die Fördergeschwindigkeit v_i und den erforderlichen Durchsatz Λ_i lt. Tabelle 3-2 eindeutig festgelegt und berechnet sich folgend:

$$s_i = \frac{v_i}{\Lambda_i} \quad \text{in m} \quad (5.8)$$

Auf Grund dieser unterschiedlich auftretenden Belastungszustände muss eine mittlere Belastung berechnet werden, damit die Betriebszustände mit Hilfe einer Box nachgebildet werden können.

$$\overline{M}_i = M_i \cdot \frac{L_F}{s_i} \quad \text{in kg} \quad (5.9)$$

Vergleicht man die mittlere Belastung aller möglichen Fördersituationen aus Kapitel 4.1 mit denen aus der äquivalenten Belastung, dann zeigt sich, dass diese genau übereinstimmen. Eine reale Abbildung der Betriebszustände über die äquivalente Belastung ist daher möglich und wurde im Weiteren auch durchgeführt.

Laut Herstellern beträgt die maximale Belastung eines Stückgutes 50 kg und pro Laufmeter Förderer 100 kg. Deshalb wurde bei Messungen, bei denen die äquivalente Belastung die maximale Beladung eines Stückgutes überschritt, mit mehreren Boxen gearbeitet. Diese wurden dicht hintereinander angeordnet und miteinander verbunden, damit sie eine Ladungseinheit darstellten.

Warmlaufverhalten – Temperaturabhängigkeit des Systems

Aufgrund des thermischen Verhaltens ergab sich mit fortlaufendem Betrieb eine Veränderung der Leistungsaufnahme. Sowohl der Antriebsmotor als auch der Antriebsstrang, das Förderhilfsmittel sowie das gesamte Gestell erwärmten sich. Damit dieser Effekt keine Auswirkung auf die Messergebnisse hatte, musste ein definierter Warmlauf erfolgen, sodass sich vor Beginn der Messungen das System in einem stationären Zustand befand.

Obwohl das Warmlaufverhalten von Elektromotoren bekannt ist, ließ sich daraus nur schwer auf das Zusammenspiel mit dem Förderband und der Auflage schließen. Die verfügbaren Untersuchungen bezogen sich nur auf den Elektromotor selbst. Für das Zusammenspiel mit dem Getriebemotor und der Antriebseinheit gab es keine Erfahrungen. Zur Festlegung eines Zeitraums für den erforderlichen Warmlauf war es deshalb notwendig, diesen am realen System darzustellen. Mit verschiedener Beladung wurde das Warmlaufverhalten aufgezeichnet und in den Abbildung 5-13 und Abbildung 5-14 dargestellt. Die Messwerte sind in Grau eingezeichnet, die schwarze Kurve ist die entsprechende Ausgleichskurve.

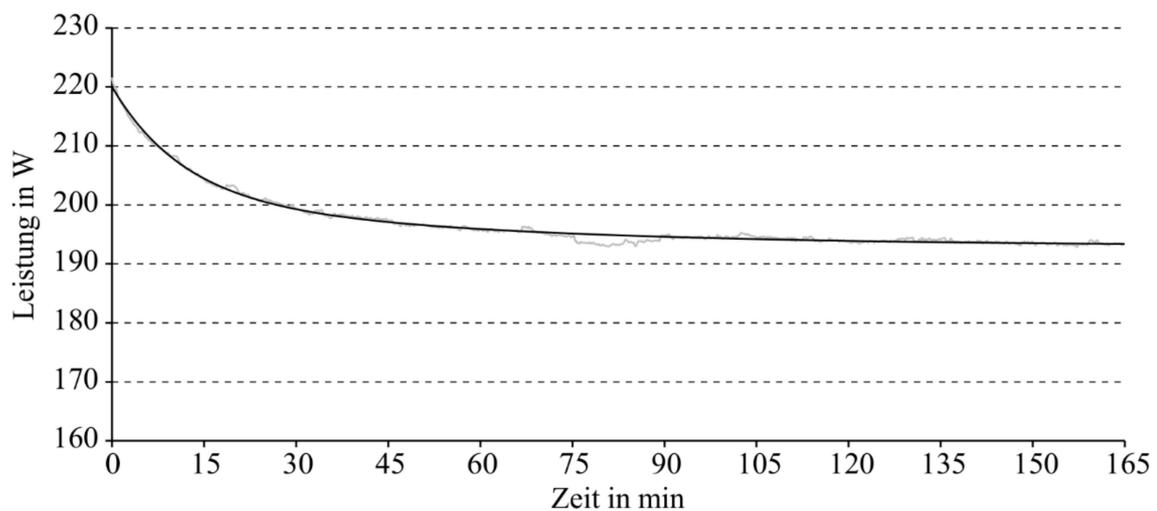


Abbildung 5-13: Leistungsverlauf Einlaufphase Leerlauf, Messung Nr. 03

Bei der Untersuchung des Leistungsverlaufs nach dem Einschalten im Leerlauf (Abbildung 5-13) zeigte sich ein näherungsweise exponentieller Abfall der Leistung über die Zeit. Beginnend bei 220 W, pendelte sich der Wert nach einer Dauer von ca. 90 min auf 193 W ein.

In Abbildung 5-14 traten während der Messung einige Ausreißer auf, welche deutlich über den umliegenden Messwerten lagen. Sie wurden für die Ausgleichskurve herausgefiltert und sind in der Abbildung rot gekennzeichnet. Sie treten, wie festgestellt wurde, dann auf, wenn sich der Behälter genau auf der Verbindungsstelle des Bandes befindet.

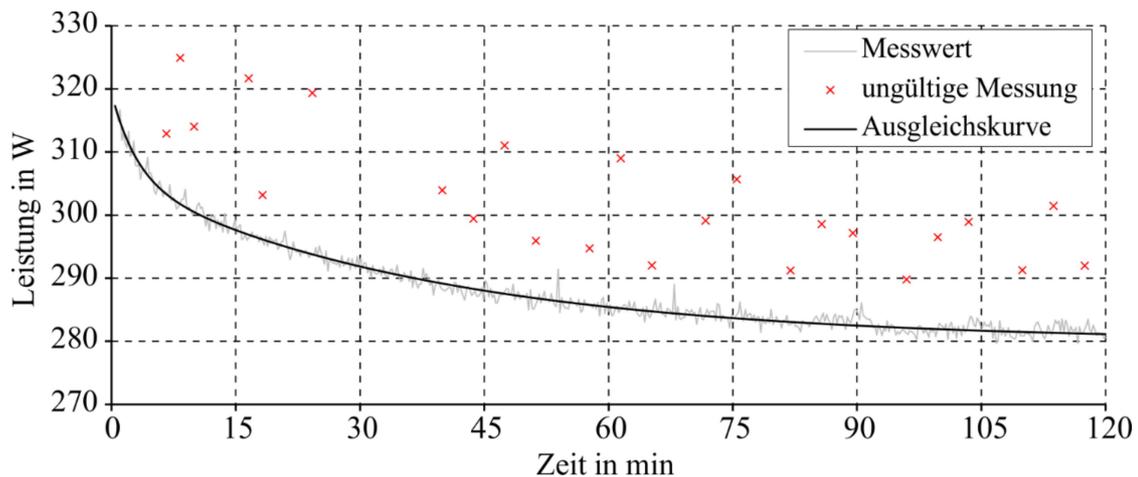


Abbildung 5-14: Leistungsverlauf in der Einlaufphase mit 25kg Beladung

Die Ausgleichskurve zeigt, wie bei der Messung im Leerlauf, einen näherungsweise exponentiellen Abfall. Auch hier begann sich der Wert ab 90 min zu stabilisieren.

Aus diesen Messungen ergab sich der Wert von mindestens 90 min für den Warmlauf, welcher dann für die Vorgaben des Prüfverfahrens in Kapitel 3.6 festgelegt wurde.

Untersuchung der Messdurchführung

Die Gestaltung einer kontinuierlichen Messdurchführung zeigte sich in der Praxis problematisch. Die Boxen, die den Förderer passiert haben, müssen wieder zum Ausgangspunkt, also zum Anfang des Bandförderers zurückgelangen. Ein Kreislauf böte zwar die grundsätzliche Möglichkeit eines Rücklaufes und würde auch die repräsentativsten Werte liefern, jedoch kann dieser nicht bei jeder Prüfung vorausgesetzt werden. Zur Findung der Messdurchführung wurden daher mögliche Varianten überlegt, gemessen und einander gegenübergestellt. Daraus leitet sich ab, welche Arten der Messdurchführung für die Kennzahl zulässig sind.

Zur Untersuchung der Messdurchführung wurde der Belastungszustand Teillast gewählt. Für diesen Betriebszustand ließen sich die folgenden Varianten am verwendeten Prüfstand durchführen:

- Behälter werden im Kreislauf endlos gefördert
- Rückfahrt des Behälters durch Umschalten der Drehrichtung
- Manueller Rücktransport des Behälters durch zwei Personen

Bei jeder Variante wurden 20 Durchläufe erfasst. Da sich bei der Messung des Kreislaufs zeigte, dass trotz des erfolgten Warmlaufs ein Abfall der Leistung über der Zeit stattfand, wurde die Messung in zwei unterschiedliche Varianten aufgespaltet. Variante 1 mit Warmlauf des Förderers im

Leerlauf und Variante 2 mit Warmlauf des Förderers unter Belastung. Daher ergaben sich diese vier Varianten:

- Variante 1: Kreislauf, Warmlauf im Leerlauf (Messungen Nr. 11 & 15)
- Variante 2: Kreislauf, Warmlauf unter Teillast (Messungen Nr. 13 & 16)
- Variante 3: Rückfahrt des Behälters mittels Richtungsumschalter (Messungen Nr. 12 & 17)
- Variante 4: manueller Rücktransport (Messungen Nr. 14 & 18)

Für alle vier Möglichkeiten wurde zur Absicherung der Messergebnisse und Überprüfung der Reproduzierbarkeit zweimal die mittlere Leistung gemessen und in der Abbildung 5-15 und der Abbildung 5-16 dargestellt. Bei Variante 1 und 2 erfolgte die Messung der Leistung zwischen den beiden Lichtschranken (P_{Licht}). Bei Variante 3 und 4 wurde die eine stationäre Messung durch Anwendung des Filters P_{Trig} erreicht.

In Abbildung 5-15 sind die Messwerte der ersten Untersuchungsreihe dargestellt. Bei Betrachtung von Messung Nr. 11 zeigt sich ein deutlich höherer Wert. Außerdem lässt sich ein leicht abfallender Trend erkennen. Eine weitere Beobachtung der Leistung nach der Messung zeigte eine noch weitere Verringerung. Das thermische Gleichgewicht hat sich also nach der Einlaufphase im Leerlauf noch nicht eingestellt. Zum Vergleich wurde die Leistungsaufnahme in Messung 13 mit einer Einlaufphase unter Teillast von 60 min ermittelt. Die notwendige Leistung verringerte sich dabei deutlich. Obwohl die Erwärmungszeitkonstante bei Motoren dieser Größenordnung im Bereich von 10min ([ROC96], S. 2.18) liegt und bereits ein Warmlauf von 90 min erfolgte, lag zu Beginn der Teillastmessung im Kreislauf kein stationärer Temperaturzustand vor.

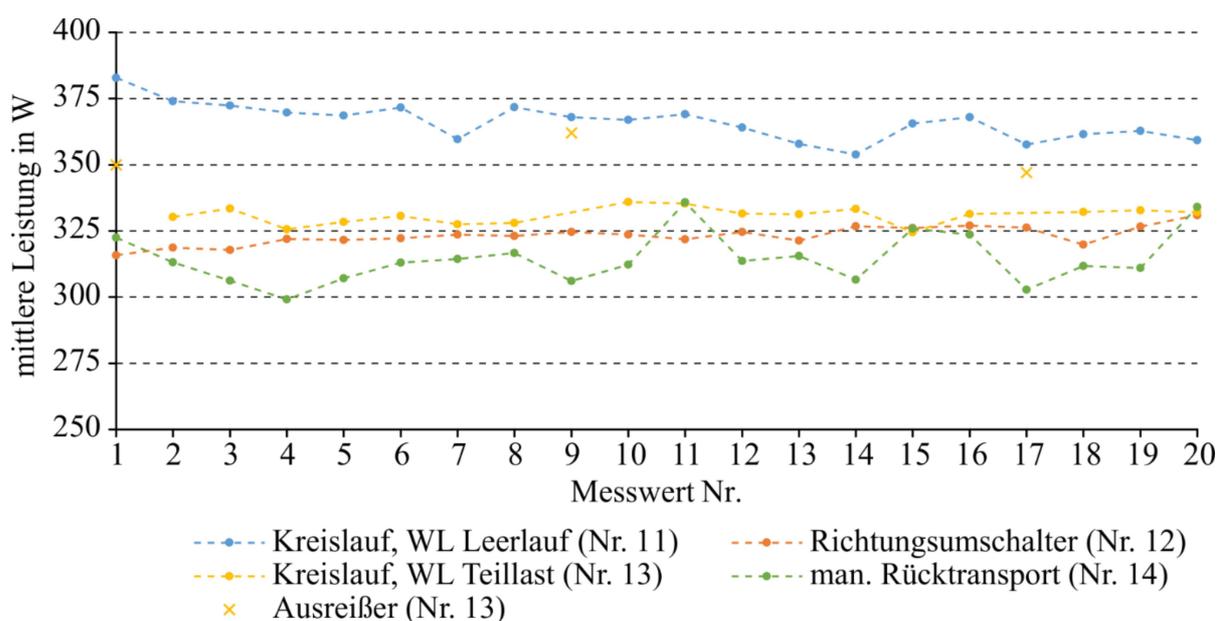


Abbildung 5-15: Leistungsverlauf Messungen Nr. 11-14

Die Werte von Messung 12 (Richtungsumkehr) und Messung 14 (manueller Rücktransport) liegen beide im Bereich der stationären Teillastmessung. Bei Messung Nr. 14 traten etwas größere Schwankungen auf, bedingt durch die sich ändernden Positionen der Behälter am Förderband.

In einer zweiten Untersuchungsreihe wurden zur Verifizierung der Ergebnisse alle vier Zustände noch einmal erfasst. Die Lastbedingungen blieben dabei gleich wie bei den Messungen 11-14, nur die Reihenfolge der Messungen wurde etwas verändert. Die Ergebnisse dieser Messreihe sind in Abbildung 5-16 dargestellt.

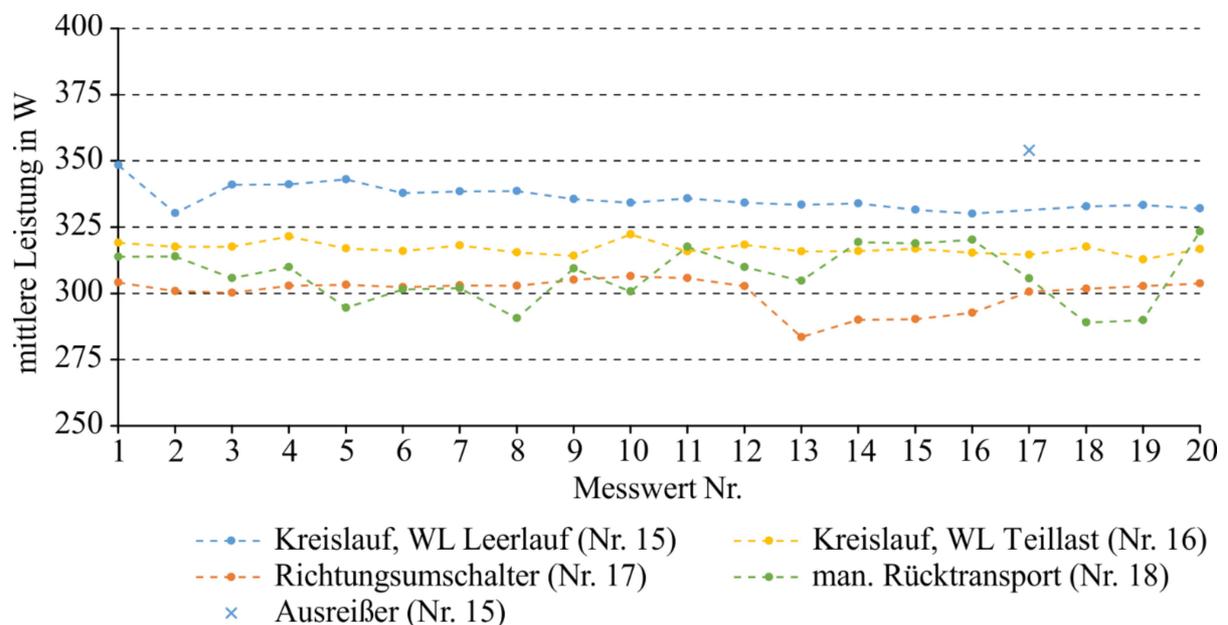


Abbildung 5-16: Leistungsverlauf Messungen Nr. 15-18

Auch bei der zweiten Messreihe war die Leistung bei Warmlauf im Leerlauf deutlich höher als bei Warmlauf mit Teillast. Die Werte der drei anderen Varianten befinden sich im selben Bereich, wobei die Schwankungen bei der Messung mit Richtungsumschalter etwas größer waren als bei Messung Nr. 12.

Alle acht Messungen wurden statistisch aufbereitet und sind in Abbildung 5-17 dargestellt. Bei der Auswertung wurden die in den Abbildungen gekennzeichneten Ausreißer nicht berücksichtigt. Die statistische Auswertung zeigt deutlich die bereits erwähnte höhere Leistung bei den Messungen 11 und 15, wobei in Messung 11 die höchste Leistung gemessen wurde. Eine mögliche Erklärung ist die lange Standzeit, die der Bandförderer vor dieser Messung hatte. Abgesehen von den 90 Minuten Warmlauf war dieser zuvor 1,5 Monate lang nicht in Betrieb. Bei den Messungen mit Richtungsumschalter (12, 17) und im Kreis nach Warmlauf unter Belastung (13, 16) sind die Schwankungen gering. Bei der manuellen Rückführung der Behälter (14, 18) streuen die Werte

mehr, jedoch befinden sich die Mittelwerte im Bereich der anderen Messungen. Bei Messung 17 zeigen sich Schwankungen nach unten, welche auch in Abbildung 5-16 gut zu erkennen sind.

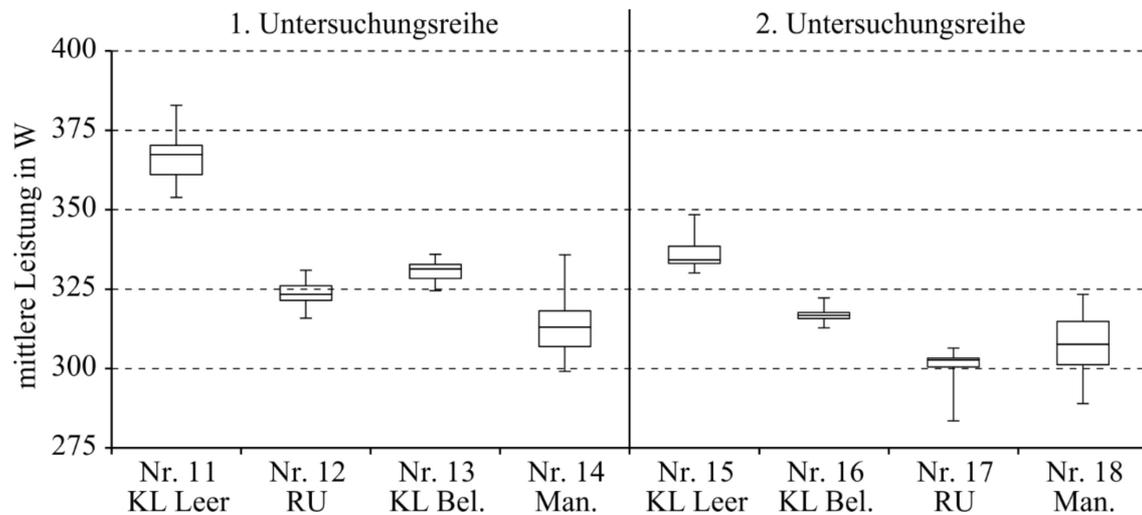


Abbildung 5-17: Boxplot Messungen Nr. 11-18

Zur Absicherung der Mittelwerte, berechnet aus den 20 Einzelmesswerten, wurden diese mit den Erkenntnissen aus zwei Langzeitversuchen verglichen. In Messung Nr. 05 erfolgte eine Teillast-Messung im Kreislauf über 30 min. Es zeigte sich, dass die Werte aus den relevanten Messungen (12-14 und 16-18) im Bereich des Mittelwertes von 312,1 W liegen.

Abbildung 5-18 zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren Leistung bei einem mit Nennlast belasteten Förderer. Die Rückfahrt erfolgte dabei durch Umschalten der Drehrichtung.

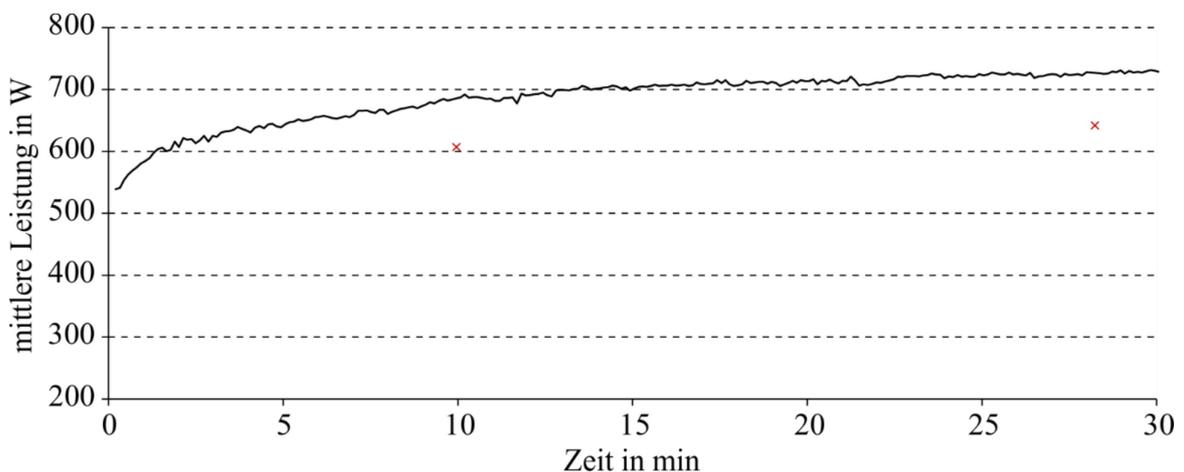


Abbildung 5-18: Leistungsverlauf Nennlast mit Richtungsumschalter

Da sich die Box während dieser Messung immer an derselben Stelle des Förderbandes befand, erhöhte sich auf Grund der fehlenden Abkühlzeit die Temperatur deutlich. In Messung Nr. 10 wurden zu Beginn an der Bandoberfläche 26,6 °C gemessen, am Ende betrug die Temperatur unter der Box 39,6 °C. Die Erklärung des Anstiegs der Leistung liegt also in einer erhöhten Reibung

zwischen Band und Auflage, bedingt durch die gestiegene Temperatur. Dieser Trend lässt sich in geringem Maß auch bei Messung Nr. 12 beobachten, wo die Messung genau im instationären Bereich liegt.

Folgerungen

Berechnet man die Schwankungen der Mittelwerte der Messungen Nr. 12-14 und 16-18, dann ergibt sich ein Wert von $\pm 4,9\%$. Aufgrund der Größenordnung der Mittelwertschwankungen wurde festgelegt, dass diese drei Varianten für die Durchführung der Messung zulässig sind. Die Messung der Leistung muss im stationären Förderzustand erfolgen. Bei einer Kreislauf-Messung im Leerlauf war dies nur bedingt gewährleistet. Die Schwankungen der Leistungswerte müssen permanent überprüft werden und dürfen die Grenze von $\pm 10\%$ nicht überschreiten. Zusätzlich ist der Trend der Leistungswerte beim Warmlauf zu beobachten, um einen stationären Betriebszustand zu gewährleisten.

Alle weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden daher nach folgendem Schema durchgeführt:

1. Warmlauf mindestens 90 min im Leerlauf
2. Messung Leerlauf: Mittelwert der Leistung über 5 min
3. 20 Messzyklen Teillast: Mittelwert der Leistung während der stationären Fahrt
4. 15 min Leerlauf
5. 20 Messzyklen Nennlast: Mittelwert der Leistung während der stationären Fahrt

Sollte die maximale Stillstandszeit des Bandes von 2 min während des Zyklus überschritten oder die Messung generell unterbrochen worden sein, dann ist wieder eine Warmlaufphase von 90 min durchzuführen.

5.2.2 Experimentelle Bestimmung der Gesamt-Leistungsaufnahmen

Zur Berechnung der Kennzahlen ist die elektrische Gesamt-Leistungsaufnahme der zu untersuchenden Fördertechnik erforderlich. Der Messpunkt ist nach der in Kapitel 3.2 vorgegebenen Systemgrenze nach der Spannungsversorgung aber vor dem elektrischen Stellglied bzw. Netzteil festgelegt. In Kapitel 3.2 wurde das für Stetigförderer definierte Lastkollektiv eingeführt.

Mit diesen Werten und den technischen Daten des untersuchten Bandförderers lassen sich nun die Werte der einzelnen Zustände berechnen. Tabelle 5-6 zeigt die vier Betriebszustände und die berechneten Werte, welche bei den Messungen einzustellen sind. Die Zeitanteile werden für die Rechnung nicht in absoluten Zahlen benötigt. Die Geschwindigkeit ist für alle Zustände gleich der Nenngeschwindigkeit. Beide Parameter wurden daher nicht explizit berechnet.

Tabelle 5-6: Betriebszustände (Referenzbelastung) am Förderer

i Zustand	Zeitanteile t_i	Durchsatz λ_i	Beladung m_i	Geschw. v_i	Durchsatz Λ_i	Beladung M_i
1 Nennlast	20 %	90 %	90 %	100 %	2.160 TE/h	45 kg
2 Teillast	50 %	50 %	50 %	100 %	1.200 TE/h	25 kg
3 Leerlauf	20 %	0 %	0 %	100 %	0 TE/h	0 kg
4 Stillstand	10 %	-	-	-	-	-

Wie im Prüfverfahren festgelegt, werden am Förderer die laut Referenzarbeitsspiel geforderten Beladungen der Behälter vorbereitet. Sind die Messstrecken zu kurz, um einen entsprechenden Durchsatz abzubilden, so kann gemäß Kapitel 3.6 auch ein Behälter mit äquivalenter Beladung eingesetzt werden, der bezogen auf die gesamte Fördererlänge im Mittel die geforderte Beladung auf den Förderer ausübt.

Die 20 Messzyklen pro Betriebszustand wurden durch Rückfahrt der Box mit Hilfe eines Richtungsumschalters realisiert. Der Ablauf ergab sich daher aus den Erkenntnissen von Kapitel 5.2.1.

Nach dem Warmlauf der Fördertechnik erfolgen die Messfahrten mit Aufzeichnung am Messsystem zu den jeweiligen Betriebszuständen. Nachdem 20 Messungen durchgeführt worden sind, erfolgt die Bildung eines arithmetischen Mittelwertes der Leistungen zum endgültigen Leistungsbedarf der Fördertechnik im entsprechend abgebildeten Betriebszustand gemäß Referenzarbeitsspiel.

Am Beispiel des Bandförderers erfolgte nach einer Warmlaufzeit von 150 min ohne Belastung die Messung des Leistungswertes für den Leerlauf. Der Mittelwert über 5 min wurde direkt in der Messsoftware gebildet, eine zusätzliche Auswertung war daher nicht notwendig. Anschließend wurden die Leistungswerte für Teil- und Nennlast über den Filter P_{Trig} ermittelt. Abbildung 5-19 zeigt die mittlere Leistung in W der Messung des Betriebszustandes Teillast (Nr. 20).

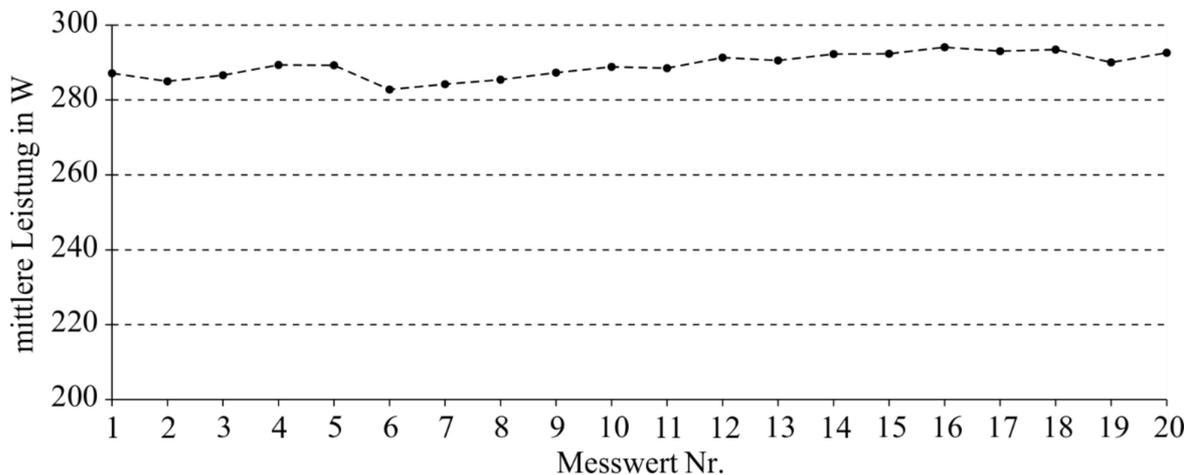


Abbildung 5-19: Messwerte Betriebszustand Teillast

Für den Betriebszustand Nennlast (Messung Nr. 21) ist die mittlere Leistung der Messwerte in Abbildung 5-20 dargestellt. Es zeigt sich zwar ein leichter Anstieg der Leistung über die Zeit, dieser ist auf die im vorherigen Kapitel beschriebene Erwärmung zurückzuführen.

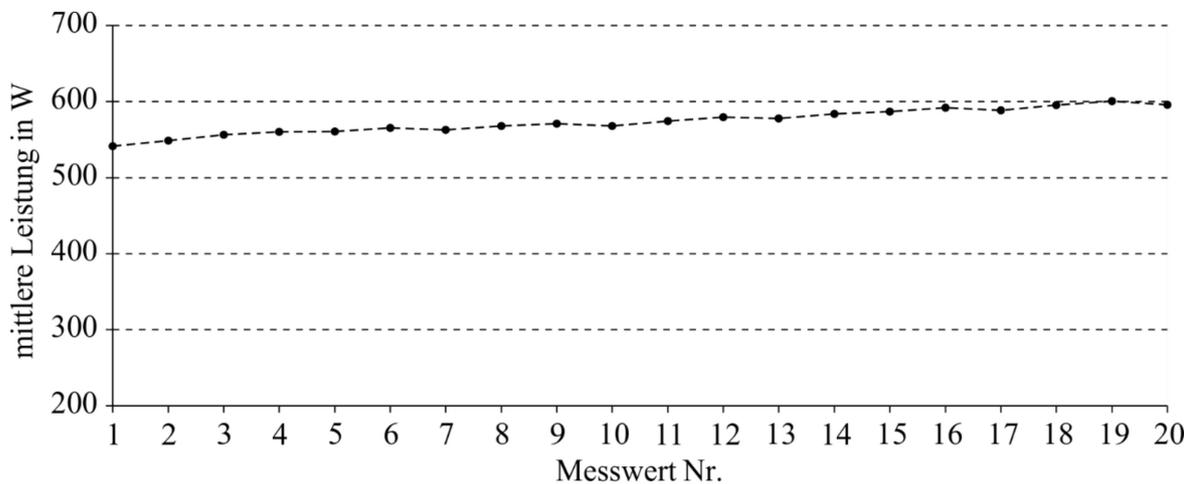


Abbildung 5-20: Messwerte Betriebszustand Nennlast

Nach dem Export der Messdaten und der Bildung der Mittelwerte über die 20 Messwerte, ergaben sich die Leistungen für die Betriebszustände (Tabelle 5-7)

Das Prüfverfahren wurde in weiterer Folge auch an beiden Rollenförderern durchgeführt. Durch die allgemeingültige Vorgabe der Prüfbedingungen konnte das Verfahren in gleicher Weise durchgeführt und die zur Kennzahlberechnung erforderlichen Leistungswerte gemessen werden. An den Rollenförderern wurden keine relevanten thermischen Effekte beobachtet – bzw. die daraus resultierenden instationären Bereiche bei den Leistungswerten – wie am Bandförderer.

Die gemittelten Leistungswerte (arithmetischer Mittelwert P) und den Schätzwert s_P (Streuung) der Standardabweichung σ aller untersuchten Förderer zeigt zusammenfassend Tabelle 5-7:

Tabelle 5-7: Ermittelte Leistungswerte der Förderer (Mittelwert und Streuung)

Betriebs- zustand	Elektrische Leistungsaufnahme					
	Rollenförderer Zentralbandantrieb		Rollenförderer Motorrollenantrieb		Bandförderer	
	P	s_P	P	s_P	P	s_P
Nennlast	215,3 W	15,37 W	46,20 W	2,98 W	569,8 W	17,37 W
Teillast	184,7 W	14,52 W	20,31 W	1,13 W	288,4 W	4,52 W
Leerlauf	171,0 W	0,52 W	19,48 W	1,08 W	187,8 W	2,24 W
Stillstand	0,0 W	0,0 W	6,95 W	0,23 W	0,0 W	0,0 W

Über die zeitlichen gewichteten Anteile der Betriebszustände gemäß Tabelle 5-6 im einstündigen Referenzarbeitsspiel kann nun mit Gleichung (3.13) der gesamte erforderliche Energieeinsatz im Referenzarbeitsspiel bestimmt werden.

Tabelle 5-8: Ermittelte Energieeinsätze gemäß Referenzarbeitsspiel der Förderer

Betriebszustand	Energieaufnahme E_E unter Belastung im Referenzarbeitsspiel		
	Rollenförderer Zentralbandantrieb	Rollenförderer Motorrollenantrieb	Bandförderer
	Nennlast	155.001,6 Ws	33.264,0 Ws
Teillast	332.424,0 Ws	36.558,0 Ws	519.030,0 Ws
Leerlauf	123.120,0 Ws	14.025,6 Ws	135.230,4 Ws
Stillstand	0,0 Ws	2.502,0 Ws	0 Ws
Gesamt	610.545,6 Ws	86.349,6 Ws	1.064.530,8 Ws

5.2.3 Berechnung der Kennzahlen zur Energieeffizienz

Gemäß Referenzarbeitsspiel und der tabellarisch festgelegten Zustandsparameter für die einzelnen Betriebszustände erfolgt die Berechnung der logistischen Erträge der einzelnen Förderer unter Anwendung der Gleichungen (3.13) und (3.16), basierend auf ihrem Nenndurchsatz. Für alle Förderer ist ein Nenndurchsatz von 2.400 TE/h vorgegeben worden.

Tabelle 5-9: Logistische Erträge im Referenzarbeitsspiel

	Logistische Erträge im Referenzarbeitsspiel
	Logistischer Ertrag 1 (W_{L1})
Rollenförderer mit Zentralbandantrieb	3.385,0 TE·m
Rollenförderer mit Motorrollenantrieb	557,3 TE·m
Bandförderer	3.854,5 TE·m

Damit ist es nun möglich, die Kennzahlen, d. h. den spezifischen Energiebedarf, gemäß der Gleichungen (3.17) und (3.18) der drei untersuchten Förderer zu berechnen.

Tabelle 5-10: Effizienzkennzahlen der untersuchten Förderer

	Spezifischer Energiebedarf
	Effizienzkennzahl 1 (EEI 1)
Rollenförderer mit Zentralbandantrieb	180,4 $\frac{W_s}{TE \cdot m}$
Rollenförderer mit Motorrollenantrieb	154,9 $\frac{W_s}{TE \cdot m}$
Bandförderer	276,2 $\frac{W_s}{TE \cdot m}$

Die Interpretation und Diskussion der bestimmten Kennzahlen erfolgt in Kapitel 6.1.

5.3 Bestimmung der Leistungsverluste im Antriebsstrang

Neben der Gesamtleistungsaufnahme zur Berechnung der Effizienz-Kennzahlen war das Untersuchungsziel die experimentelle Erfassung der Teilverluste an den Antriebssträngen der drei untersuchten Förderer, um relevante Verluste im jeweiligen Gesamtsystem zu ermitteln. Dazu sind die Prüfstände mittels Messanbauten ausgerüstet worden, um Messpunkte gemäß Kapitel 5.1.2 zu realisieren. Das Messsystem und die Messmethoden zur Bestimmung der elektrischen und mechanischen Leistung sind im Kapitel 5.1.2 und 5.1.3 beschrieben. Als Messverfahren kamen die in Kapitel 4.3 vorgestellten Messverfahren Strip-Down und der Auslaufversuch zur Anwendung.

Die Ergebnisse aus den Versuchsaufbauten bilden die Grundlage, um auf allgemeingültige Aussagen zu Leistungsverlusten bzw. Optimierungen zu schließen.

5.3.1 Planung und Durchführung der Messreihen

Die erforderlichen Messreihen werden anhand eines vorher erstellten Mess- und Versuchsplans durchgeführt. Die Fördergeschwindigkeit wird fest vorgegeben und während der Versuchsreihen nicht verändert. Die für die Versuchsdurchführung zu verändernden Parameter, um den Durchsatz einzustellen, sind die Anzahl und die Beladung der Transporteinheiten. Die folgende Tabelle 5-11 zeigt die Struktur der Testsequenzen. Ausgewählte Tabellenelemente in Klammern (x) bedeuten, dass aufgrund von Einschränkungen an der Fördertechnik (Messstrecken der Versuchsaufbauten zu kurz) bzw. der Messverfahren nicht alle Untertests durchführbar waren.

Tabelle 5-11: Struktur der Testsequenzen

Anzahl an Transporteinheiten TE	Beladung (%) der Behälter (Nennbeladung 50 kg)		
	0 %	50 %	100 %
0 - Leerlaufmessung	-	-	-
1	x	x	x
2	x	x	(x)

Die Akquisition und Aufbereitung der Messdaten stellt eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Grund dafür sind das dynamische Verhalten der Versuchsaufbauten sowie die Eigenschaften von Komponenten, welche hochfrequente Signalanteile in das System bringen. Neben Start-Stopp-Vorgängen werden dynamische Anteile beim Einlauf einer Transporteinheit auf den jeweiligen Förderer eingebracht. Deshalb werden die Messstrecken so festgelegt, dass keine Anlaufbeeinträchtigungen am Messsystem erkennbar sind. Die Leistungsgrößen werden im eingeschwungenen Zustand bestimmt.

5.3.2 Leistungsverluste im Antriebsstrang

Die relative Auswertung der Einzelverluste erlaubt es, jene Gerätekomponenten zu selektieren, welche die größten Einsparungspotenziale beinhalten. Im Anschluss werden entsprechende konkrete Verbesserungsmöglichkeiten beurteilt und verifiziert, teilweise auch umgesetzt und validiert. Für die Beurteilung der energetischen Verbesserungspotenziale sind generell nur die relativen Verhältnisse von Bedeutung. In dieser Arbeit werden alle Ergebnisse relativ dargestellt und auf absolute Werte verzichtet.

Auf Basis der in den folgenden Abbildungen dargestellten Messpunkte, wurden durch Vergleichsmessungen, bei systematischem Abbau von Teilkomponenten (Strip-Down-Verfahren nach Kapitel 4.3), alle relevanten Teilverluste bestimmt (Abbildung 5-22, Abbildung 5-26 und Abbildung 5-24). Bei zunehmender Demontage war dies teilweise nur im Leerlauf möglich. Dennoch sind ausreichend gültige Schlüsse auf die relativen Verhältnisse möglich. In den folgenden Abbildungen werden jeweils die Messergebnisse für den Nennlastbetrieb dargestellt, auf die gesonderte Behandlung der Ergebnisse im Teillast- und Leerlaufbetrieb wird verzichtet. Die Darstellung der Leistungsaufnahmen in den verschiedenen Lastzuständen wird gesondert in für alle untersuchten Förderertypen vergleichend gegenüber gestellt (Abbildung 6-8).

Rollenförderer – Antrieb mittels Zentralband und Getriebemotor (zentral, 400 V)

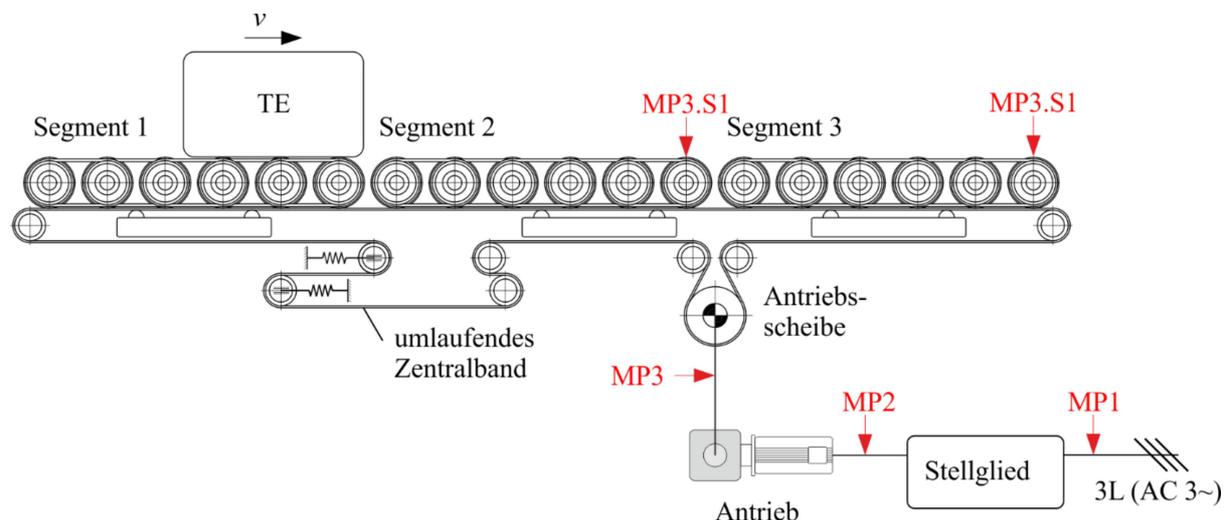


Abbildung 5-21: Schematische Darstellung des Rollenförderers mit Messpunkten

Die Auswertung sämtlicher Messdaten erlaubt die Erstellung eines Sankey-Diagramms. Folgende Abbildung 5-22 zeigt die Situation der Leistungsaufnahme sowie die Aufteilung zwischen Getriebemotor und mechanischem Antriebssystem für ein Stückgut mit 50 kg Beladung.

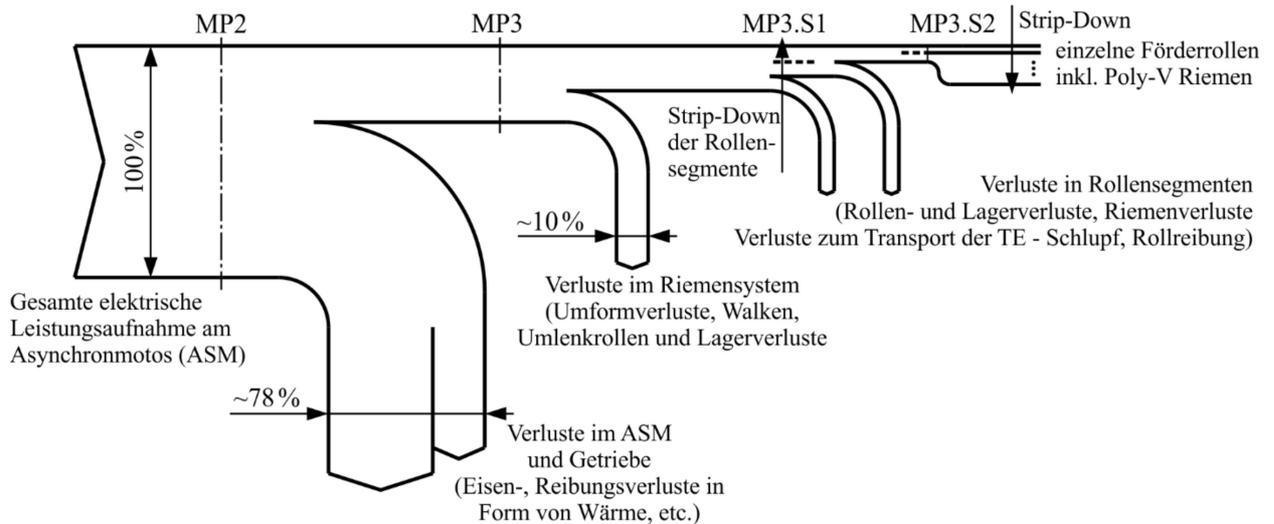


Abbildung 5-22: Leistungsverluste am Rollenförderer mit Zentralbandantrieb bei 50 kg Beladung

Sofort ersichtlich ist der große Leistungsverlust des Getriebemotors. Im Vergleich dazu wird für die restliche Mechanik des Antriebsstranges nur 22 % der zugeführten elektrischen Leistung aufgewendet. Zudem verursacht die Mechanik nur geringe Leistungsverluste im Vergleich zum Antrieb. Die Rollensegmente und Förderrollen wurden durch die Strip-Down Methode bestimmt. Messungen an Sonderprüfständen zur Untersuchung der Getriebemotoren zeigten, dass die verwendeten Getriebemotoren im Betrieb einen relativ schlechten Gesamtwirkungsgrad von ca. 20-42 % aufweisen. Die erarbeiteten Erkenntnisse zeigen das Potenzial auf, welches an Antriebseinheiten im Bereich der Fördertechnik möglich ist.

Rollenförderer – Antrieb mittels Motorrollen (Trommelmotor, dezentral, 24 V)

Eine andere Situation ist beim Rollenförderer mit Motorrollenantrieb erkennbar. Die Größenordnung der Grundlast durch Netzteile und Steuermodule ist verhältnismäßig gering im Vergleich zu den Verlustanteilen bei den 400 V Getriebemotoren.

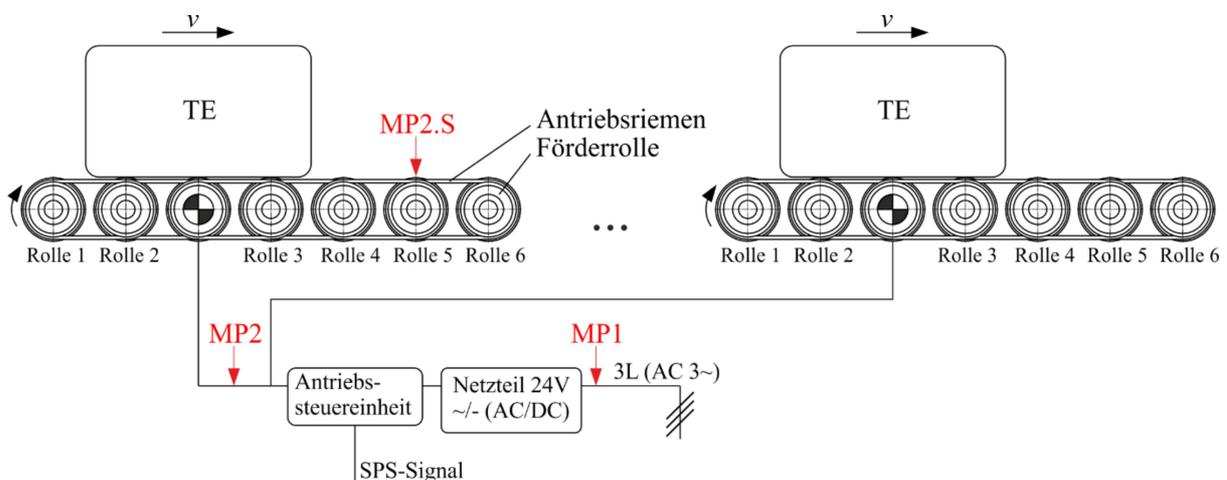


Abbildung 5-23: Schematische Darstellung des Motorrollenförderers mit Messpunkten

Die relativen Leistungsverluste der Komponenten des Antriebsstranges mit einer detaillierten Aufschlüsselung eines Rollensegmentes sind in Form eines Sankey-Diagrammes dargestellt.

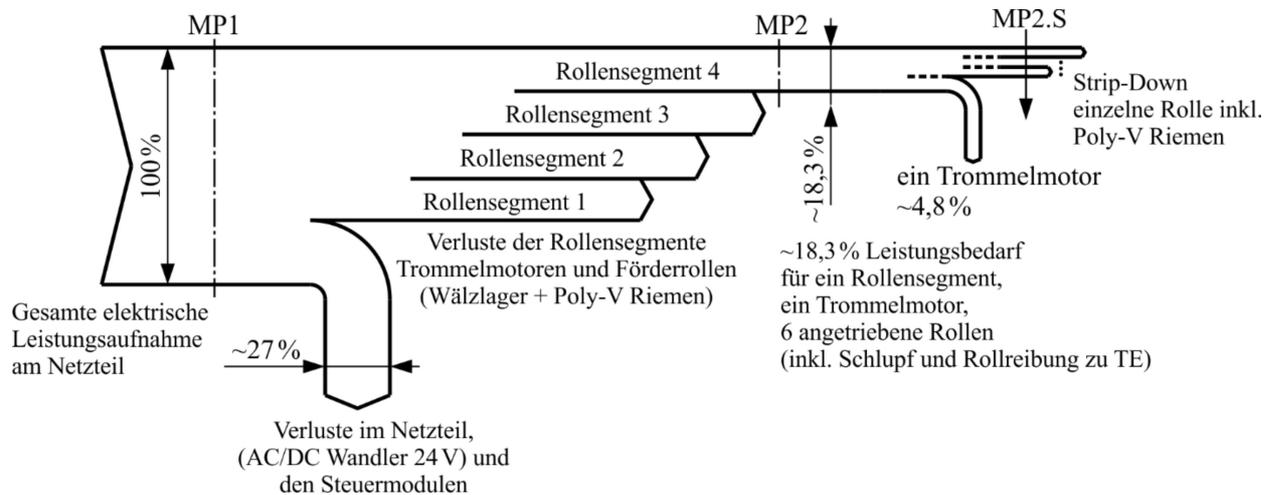


Abbildung 5-24: Leistungsverluste am Motorrollenförderer bei 50 kg Beladung

Es ist ersichtlich dass 27 % der gesamten elektrischen Leistungsaufnahme für den Betrieb des 24 V Netzteses inklusive der Steuermodule der Antriebe erforderlich ist. Die vier angetriebenen Rollensegmente benötigen also 73 % der aufgenommenen elektrischen Leistung. Durch Anwendung der Strip-Down Methode kann die Leistungsaufnahme der einzelnen Rollensegmente bestimmt werden. 18,3 % beträgt die Leistungsaufnahme eines einzelnen Rollensegmentes zum Befördern der Transporteinheiten. 4,8 % der aufgenommenen gesamten Leistung sind dabei für den Betrieb eines Trommelmotors erforderlich.

Durch Anwendung der Strip-Down Methode innerhalb eines Rollensegmentes konnte der Teilleistungsbedarf bis hin zu einer einzelnen Förderrolle (Verfahrensbedingt eine Rolle inkl. Poly-V Keilrippenriemen) bestimmt werden. Die Größenordnung der Leistungsverluste liegt dabei im einstelligen Wattbereich. Bezogen auf die Gesamtleistungsaufnahme beträgt der Leistungsbedarf pro Förderrolle und Riemen 0,4 % und stellt damit kein relevantes Optimierungspotenzial dar.

Bandförderer - Antrieb mittels Getriebemotor (zentral, 400 V)

Beim Bandförderer in Abbildung 5-25 stellt ebenfalls der Getriebemotor die Einheit mit dem größten Verlustanteil dar (Abbildung 5-26). Hier tragen nun aber auch die Reibungsverhältnisse zwischen dem Förderband und der Bandabstützung einen relevanten Verlustanteil bei.

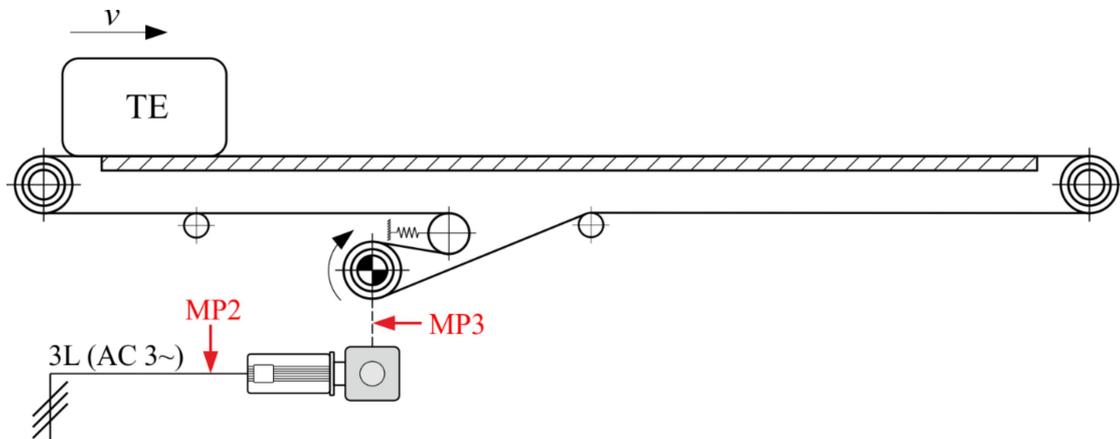


Abbildung 5-25: Schematische Darstellung des Bandförderers mit Messpunkten

Die am MP3 bestimmte Leistung stellt die abgegebene Leistung an der Antriebsstrommel dar. Den Hauptanteil der nachfolgend anfallenden Verluste bildet, neben Lager- und Umlenkverlusten, die Reibung des Förderbandes. Damit sind die beiden signifikanten Bandförderer-Verbesserungsoptionen identifiziert: Der Getriebemotor und das Band bzw. die Bandabstützung des Förderbandes.

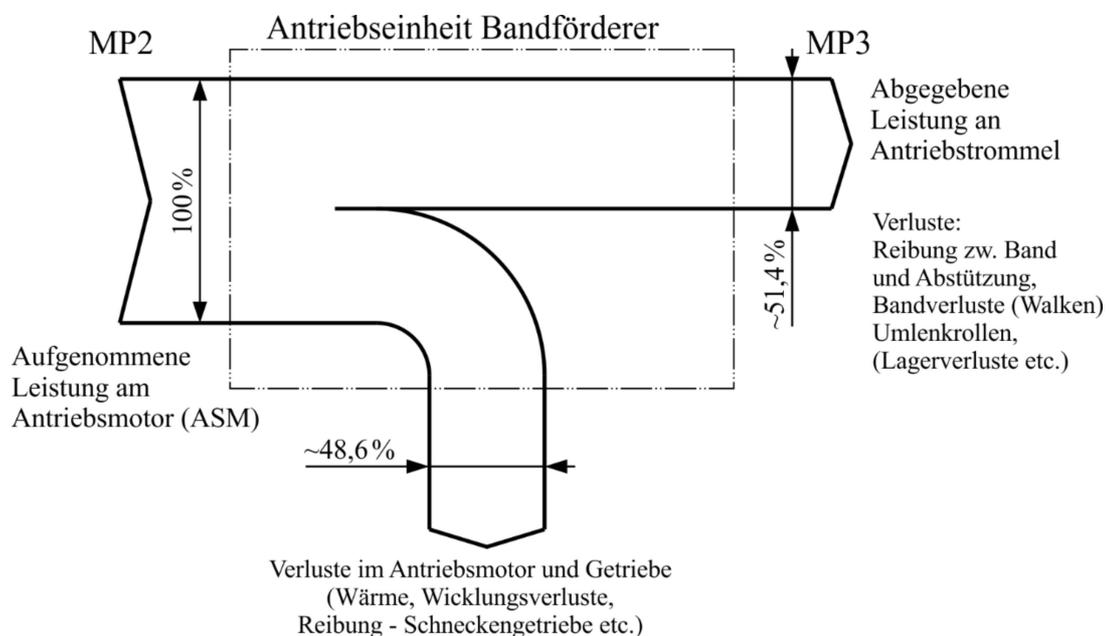


Abbildung 5-26: Leistungsverluste am Bandförderer bei 50 kg Beladung

Für beide untersuchten Förderertypen mit 400 V-Technologie (Bandförderer und Rollenförderer mit Zentralbandantrieb) zeigt sich eindeutig, dass der Getriebemotor relativ die größten Verluste verursacht. Dies wurde zwar vermutet aber nicht in der nachgewiesenen Dominanz erwartet.

5.3.3 Bewertete Optimierungsmaßnahmen unter Anwendung der Kennzahlen

Die Untersuchungen im Kapitel 5.3.2 zeigten deutlich das hohe Einsparpotenzial im Bereich der Antriebstechnik an zentral betriebener Fördertechnik. Die Mechanik der Antriebsstränge an den Rollenförderern ist im Vergleich zu den Leistungsaufnahmen der Antriebe gering und somit als Optimierungsmaßnahme von geringerem Interesse. Am Bandförderer ist eine andere Situation gegeben. Konstruktionsbedingt nimmt die Mechanik relativ zum Antrieb höhere Leistungen auf. Dabei stellt die Kontaktstelle zwischen Förderband und Bandabstützung den Ort der größten Leistungsverluste dar. Im Kapitel 1.3 wurden bereits am Markt erhältliche energiereduzierende Alternativkomponenten aufgelistet.

Am Bandförderer werden nun Maßnahmen durchgeführt und durch erneute Bestimmung der Kennzahl gegenüber gestellt. Der Fokus der Untersuchungen liegt dabei bei drei unterschiedlichen Maßnahmen zur Verlustoptimierung am Antriebsstrang.

- Einsatz einer energieeffizienten Alternativkomponente: Förderband mit reibungsarmer Bandunterseite – „Energiesparband“. Herstellerangaben zeigen beim Einsatz von Energiesparbändern ein hohes Einsparpotenzial von bis zu 50 % auf ([FOR15], S. 3). Im Rahmen dieser Arbeit selbst durchgeführte Messungen an einem Reibungsprüfstand zeigen eine mögliche Reduktion des Gleitreibungskoeffizienten von bis zu 26 % [HAL15b].
- Einsatz einer alternativen Werkstoffkombination zur Bandabstützung: Reduktion der Reibungsverluste zwischen Band und Abstützung. Messungen am Reibungsprüfstand zeigen eine Reduktion des Gleitreibungskoeffizienten von bis zu 20 % auf [HAL15b].
- Konstruktive Maßnahme: Ersatz der Bandabstützung mittels Stahlblechen durch Tragrollen. Damit wird die gesamte Fläche des Reibkontaktes entfernt, an den Tragrollen ist nur mehr Rollreibung zu überwinden.

Tabelle 5-12: Szenarien für Untersuchungen zur Optimierung am Bandförderer

	Konfiguration des Bandförderers	
	Förderband	Bandabstützung
Szenario 1 (Referenz)	Standardband (Zustand eingelaufen)	Standard-Bandabstützung (Stahlblech verzinkt, eingelaufen)
Szenario 2	Energiesparband	Standard-Bandabstützung (Stahlblech verzinkt, eingelaufen)
Szenario 3	Standardband	Pertinax Bandabstützung
Szenario 4	Standardband	rollende Bandabstützung (Rollenteilung 180 mm)

Durch Anwendung des Prüfverfahrens aus Kapitel 3.6 der Bewertungsmethodik sind für alle Szenarien am Bandförderer die gemittelten Leistungsaufnahmen bestimmt worden (Tabelle 5-13).

Tabelle 5-13: Leistungsaufnahmen am Bandförderer, unterschiedliche Szenarien

Betriebszu- stand	Leistungsaufnahme am Bandförderer						
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3		Szenario 4		
	P	P	s_P	P	s_P	P	s_P
Nennlast	569,8 W	511,3 W	3,4 W	496,2 W	3,1 W	218,2 W	7,2 W
Teillast	288,4 W	284,2 W	3,7 W	285,6 W	1,0 W	191,0 W	4,0 W
Leerlauf	187,8 W	185,0 W	3,2 W	184,3 W	2,9 W	184,2 W	2,5 W
Stillstand	0,0 W	0,0 W		0,0 W		0,0 W	

Basierend auf den Leistungsaufnahmen sind die Energieaufnahmen der Förderer im Referenzarbeitspiel berechnet worden (Tabelle 5-14).

Tabelle 5-14: Ermittelte Energieaufnahmen am Bandförderer, unterschiedliche Szenarien unter Referenzbelastung

Betriebszustand	Energieaufnahme E_E am Bandförderer			
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4
Nennlast	410.270,4 Ws	368.150,4 Ws	357.292,8 Ws	157.096,8 Ws
Teillast	519.030,0 Ws	511.614,0 Ws	513.990,0 Ws	343.800,0 Ws
Leerlauf	135.230,4 Ws	133.228,8 Ws	132.724,8 Ws	132.624,0 Ws
Stillstand	0,0 Ws	0,0 Ws	0,0 Ws	0,0 Ws
	1.064.530,8 Ws	1.012.993,2 Ws	1.004.007,6 Ws	633.520,8 Ws

Der logistische Ertrag W_{L1} des Bandförderers hat sich aufgrund des unveränderten Durchsatzes und der gleichen Fördergeschwindigkeit nicht verändert. Damit kann der spezifische Energiebedarf für die betrachteten Szenarien berechnet werden (Tabelle 5-15).

Tabelle 5-15: Effizienzkennzahlen der Optimierungsmaßnahmen am Bandförderer

	Spezifischer Energiebedarf	
	Effizienzkennzahl 1 (EEI 1)	
Szenario 1	276,2	$\frac{W_s}{TE \cdot m}$
Szenario 2	262,8	$\frac{W_s}{TE \cdot m}$
Szenario 3	260,5	$\frac{W_s}{TE \cdot m}$
Szenario 4	164,4	$\frac{W_s}{TE \cdot m}$

6 Interpretation der Ergebnisse und Beurteilung

In diesem Kapitel werden die präsentierten Ergebnisse aus den Kapiteln 5.2 und 5.3 interpretiert, um die in Kapitel 1.4 gestellten Fragestellungen beantworten zu können. Dabei wird in Kapitel 6.1 zuerst die Bewertungsmethodik zur Bestimmung der Energieeffizienz anhand der Kennzahlen behandelt. In Kapitel 6.2 werden allgemeingültige Aussagen zum Thema Verlustleistungsbestimmung und Identifikation von Optimierungsmaßnahmen an Antriebssträngen diskutiert.

6.1 Kennzahlen-Bewertungsmethodik

Die Ergebnisse aus Kapitel 5.2 erlauben nun eine Gegenüberstellung des spezifischen Energiebedarfs unterschiedlicher Fördertechnik. Die untersuchten Fördertypen unterscheiden sich in ihrem konstruktiven Aufbau, der Antriebstechnologie und der installierten Leistungen. Trotzdem wird mit jedem der Förderer der Nenndurchsatz von 2400 TE/h realisiert. Durch Anwendung der Bewertungsmethodik mit standardisierten Vorgaben zur Bestimmung dürfen nun die spezifischen Energiebedarfsgrößen miteinander verglichen werden.

6.1.1 Gegenüberstellung der untersuchten Förderer

Der Bandförderer besitzt mit $276,2 \text{ Ws} \cdot \text{TE}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ den größten spezifischen Energiebedarf aller untersuchten Förderer. Wie im Kapitel 5.3.2 dargestellt ist der in einem schlechten Betriebspunkt betriebene Getriebemotor ein Hauptfaktor für den hohen spezifischen Energiebedarf. Andererseits ist beim Bandförderer die Mechanik des Antriebsstranges, mit der großen Kontaktfläche des Förderbandes an der Bandabstützung und der damit einhergehenden Reibung ausschlaggebend für die vergleichsweise höhere Leistungsaufnahme.

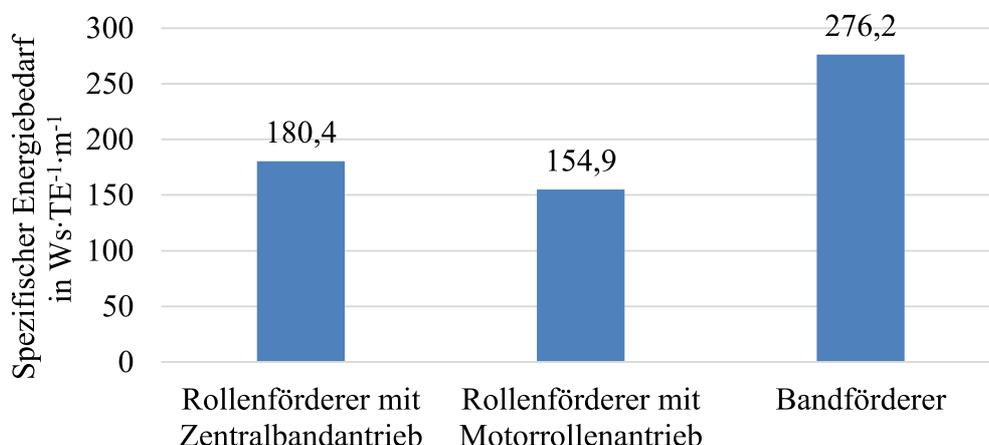


Abbildung 6-1: Gegenüberstellung des spezifischen Energiebedarfes der drei untersuchten Förderer

Der zentral betriebene Rollenförderer hat mit $180,4 \text{ Ws} \cdot \text{TE}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ einen um 35 % geringeren spezifischen Energiebedarf als der Bandförderer. Es konnte messtechnisch gezeigt werden, dass Mechanik beim Zentralband-Rollenförderer eine im Vergleich zum Antrieb sehr geringe Leistungsaufnahme verursacht. Dies kann aufgrund der Tatsache, dass beim Rollenförderer nur Rollreibung an der Kontaktstelle zum Transporthilfsmittel zu überwinden ist, als allgemeingültig angesehen werden. Zudem wurde gezeigt, dass die Leistungsaufnahme der eingesetzten Förderrollen und die zur Leistungsübertragung verwendeten Riemen eine nicht relevante Größenordnung der Verluste im Vergleich zu den Antrieben besitzen.

Der Rollenförderer mit Motorrollenantrieb besitzt den konstruktiv am einfachsten gestalteten Antriebsstrang aller betrachteten Förderer. Zudem erlaubt der Betrieb an 24 V Gleichspannung den Einsatz von geringen Antriebsleistungen, dafür ist für den Betrieb der gleichen Fördererlänge eine höhere Anzahl an Antrieben notwendig. Trotz der zum Betrieb notwendigen Netzteile zur Gleichspannungsversorgung und der Steuermodule für die Antriebe besitzt der untersuchte Motorrollenförderer mit $154,9 \text{ Ws} \cdot \text{TE}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ den geringsten spezifischen Energiebedarf (44 % geringer als der Bandförderer). Hinsichtlich der Energieaufnahme ist also der Motorrollenförderer am effizientesten, allerdings zeichnet sich der Motorrollenförderer durch die eben genannten zusätzlich erforderlichen Komponenten wie Netzteile, Steuermodule, etc. durch höhere Anschaffungskosten aus. Der energetische Gerätevergleich konnte somit erfolgreich an drei Förderertypen durchgeführt werden.

6.1.2 Sichtbarmachung von Optimierungsmaßnahmen

Die im Kapitel 5.3.2 gefundenen Optimierungspotenziale des Bandförderers wurden im Kapitel 5.3.3 exemplarisch ausgeführt und wiederum die spezifischen Energiebedarfe anhand der Bewertungsmethodik ermittelt. Den Überblick über die Szenarien der Untersuchung gibt Tabelle 5-12.

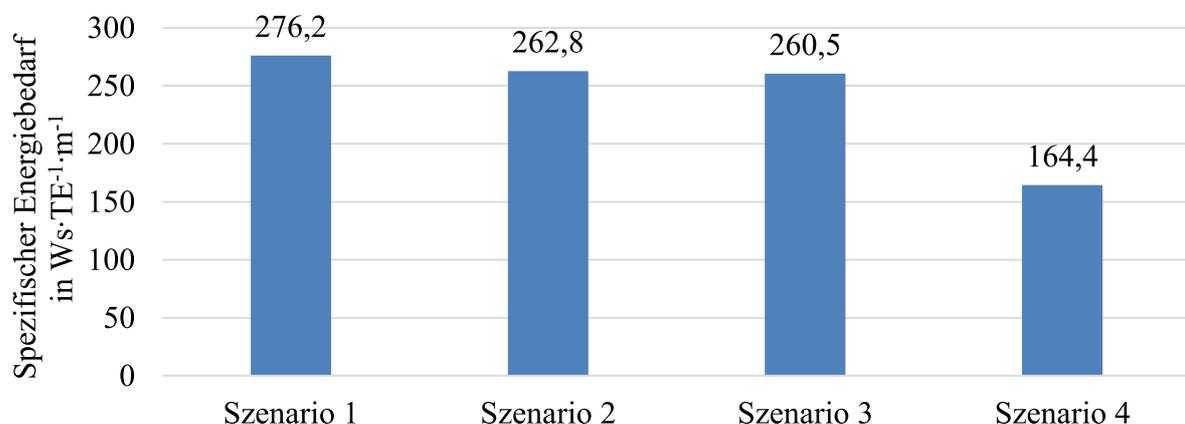


Abbildung 6-2: Sichtbarmachung von Optimierungsmaßnahmen am Bandförderer

Der Einsatz eines Energiesparbandes mit reibungsarmer Bandunterseite im Szenario 2 versprach eine verringerte Energieaufnahme. Im Vergleich zu einem Standard-Förderband ist der an einem Sonderprüfstand messtechnisch bestimmte Gleitreibungskoeffizient um 26 % geringer. Dieses erhoffte Einsparpotenzial konnte allerdings nicht anhand des spezifischen Energiebedarfes von $262,8 \text{ Ws} \cdot \text{TE}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ bestätigt werden. Der spez. Energiebedarf konnte im Vergleich zum Betrieb mit Standard-Förderband also nur um 4,8 % verringert werden. Der geringe Rückgang kann nun anhand zweier Fakten argumentiert werden

- Die Reibkraft ist nach Coulomb proportional zur Normalkraft, d. h. je höher die Normalkraft bzw. die Beladung der Transporteinheiten, desto größer wird die Reibkraft bzw. der daraus resultierende Verlustanteil. In Bereichen mit geringerer Belastung (Teillast- und Leerlaufbetrieb) reduziert sich der Einfluss der Reibkraft ([FOR15], S. 5). Im Referenzarbeitsspiel wird der Nennlastanteil zeitlich nur gering gewichtet. Somit ist der Einfluss der Reduktion der Reibung stark lastabhängig und führt im vorliegenden Szenario nicht zur Reduktion des spezifischen Energiebedarfes.
- Der untersuchte Förderer ist mit einer Länge von 3,7 m bezogen auf mögliche Förderlängen bis zu 26 m relativ kurz ausgeführt. Deshalb befinden sich während der Leistungsmessungen nur wenige Transporteinheiten in der Messstrecke, welche entsprechende Reibungsverluste an der Bandunterseite verursachen.

Im Szenario 3 beim Einsatz eines alternativen Werkstoffes zur Bandabstützung (Hartpapier Auflage aus Pertinax) konnten ebenso nur geringe Einspareffekte bemerkt werden. Der spezifische Energiebedarf wurde um 5,7 % reduziert. Nachdem die Maßnahme auf dem gleichen Prinzip der Reibungsreduktion basiert wie Szenario 2, gilt hier die gleiche Argumentation wie in Szenario 2.

Nur im Szenario 4, beim Ersatz der Bandabstützung aus verzinkten Stahlblechen durch Förderrollen, gelang es, den spezifischen Energiebedarf relevant zu reduzieren, im Vergleich zum Standardszenario 1 um 40,5 % auf $164,4 \text{ Ws} \cdot \text{TE}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Durch Tausch der gleitenden Elemente durch Rollen zur Bandabstützung wird der Bandförderer konstruktiv ähnlich zu einem Rollenförderer mit umschlungenem Förderband. Der Vergleich mit den bestimmten Kennzahlen der Rollenförderer (Zentralbandantrieb $180,4 \text{ Ws} \cdot \text{TE}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ und Motorrollenantrieb $154,9 \text{ Ws} \cdot \text{TE}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) zeigt eine ähnliche Größenordnung und bestätigt somit wiederum die Gültigkeit der Kennzahlen.

6.1.3 Gegenüberstellung verschiedener Einsatzszenarien

Der Rollenförderer mit Zentralbandantrieb wird im Beispiel mit zwei unterschiedlichen Lastszenarien betrieben, Szenario A und B. Anschließend wird der Antrieb fiktiv gegen einen energiesparenden Antrieb getauscht und dann beide Varianten wieder in den jeweils unterschiedlichen Situationen eingesetzt. Es ergeben sich also insgesamt vier Situationen, für die im vorliegenden Beispiel die jeweiligen Kennzahlwerte ermittelt und gegenüber gestellt werden (Abbildung 6-3).

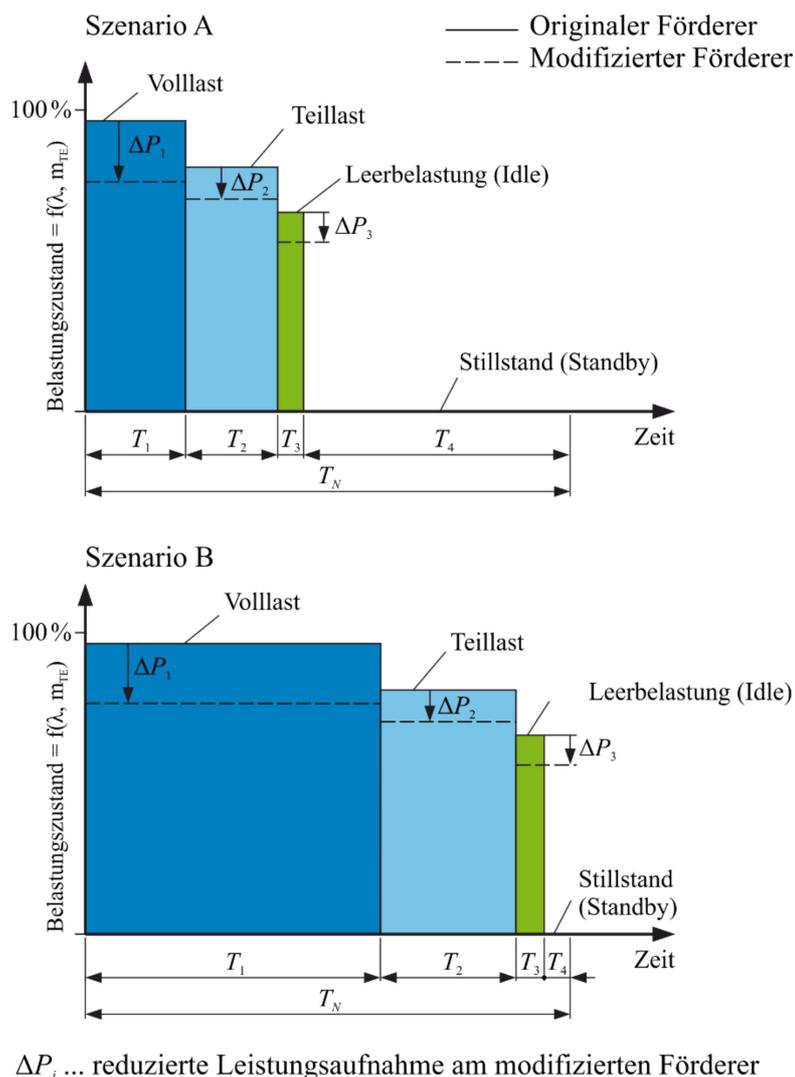


Abbildung 6-3: Szenarien für die Kennzahlbestimmung in unterschiedlichen Einsatzbereichen

Tabelle 6-1 zeigt die zeitlichen Verteilungen der jeweiligen Betriebszustände, gemäß dem Referenzarbeitspiel, für zwei in diesem Beispiel frei gewählte Szenarien A und B.

Tabelle 6-1: Relative Betriebszeiten unterschiedlicher Einsatzszenarien

	Volllast t_1	Teillast t_2	Leerlauf t_3	Stillstand t_4
Szenario A	20 %	20 %	5 %	55 %
Szenario B	60 %	30 %	5 %	5 %

Der ursprünglich im Förderer eingesetzte Antriebsmotor besitzt einen Gesamtwirkungsgrad von ca. 30 %, siehe Kapitel 5.3.2. Die modifizierten Werte bei Einsatz des energiesparsamen Alternativantriebs sind Abschätzungen gemäß der Wirkungsgradangaben von Herstellern ([ABM12]; [NOR09]). Dabei wird abhängig von der Lastsituation ein Gesamtwirkungsgrad von 50-60 % angenommen, siehe Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: Leistungswerte zur Berechnung (Anm.: Relativwerte)

	Volllast P_1	Teillast P_2	Leerlauf P_3	Stillstand P_4
Original (gemessen)	100 %	85,7 %	79,4 %	0 %
Modifiziert	75 % (-25 %)	72,8 % (-15 %)	67,5 % (-15 %)	0 %

Der Originalförderer wird entsprechend der Betriebszustände belastet und die zugehörigen Leistungswerte gemessen, zur Übersichtlichkeit werden die folgenden Werte normiert dargestellt (Tabelle 6-2).

Mit den Nenn- und Messdaten ergeben sich folgende berechnete Kennzahlen lt. Abbildung 6-4:

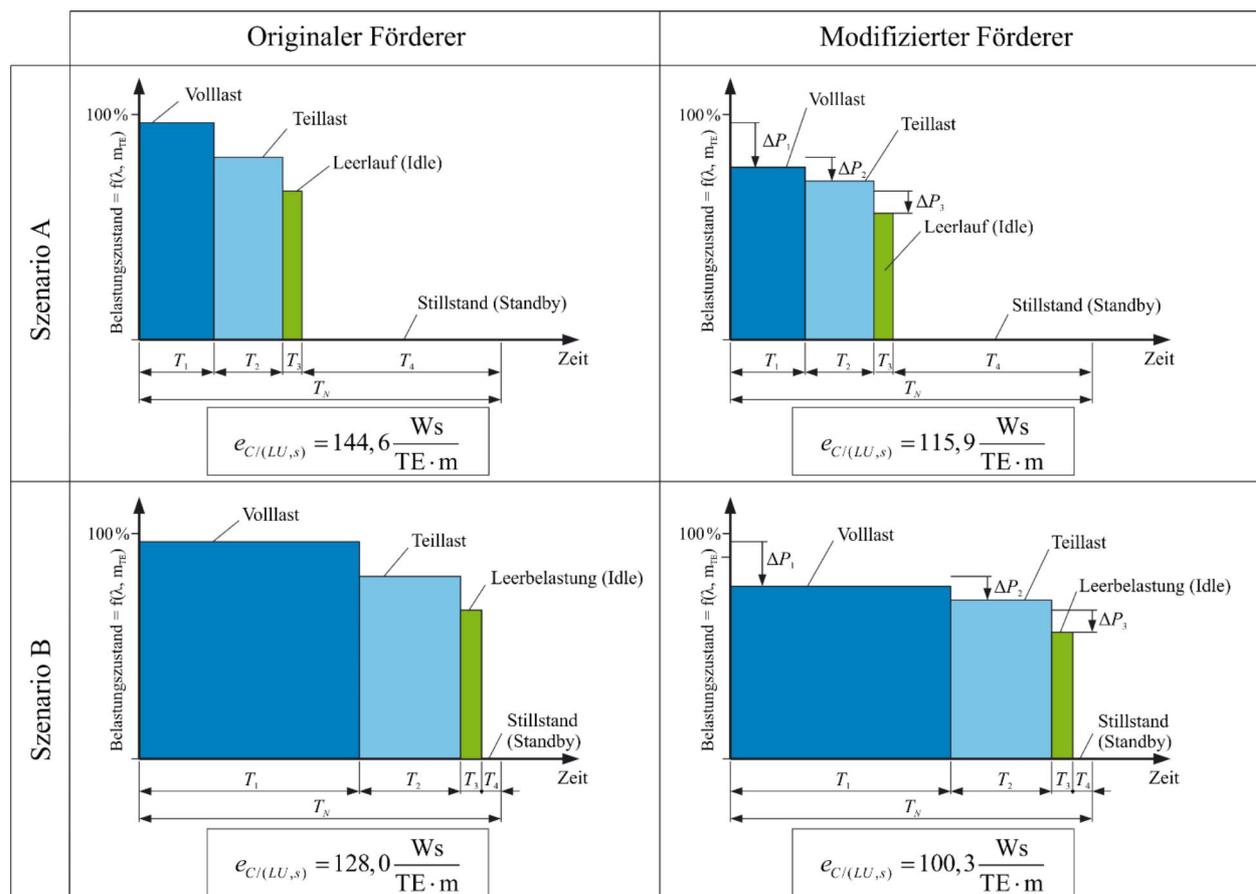


Abbildung 6-4: Ermittelte spezifische Energiebedarfe in unterschiedlichen Einsatzbereichen

Die berechneten spezifischen Energiebedarfe ermöglichen nun eine Gegenüberstellung und Diskussion der Ergebnisse aus den Szenarien.

Unterschiedliche Einsatzfälle (originaler Förderer)

Man erkennt, dass der spezifische Energiebedarf beim Szenario B niedriger ist, obwohl die Betriebsbelastung des Förderers durch längere Volllast- und Teillastzeitanteile deutlich höher ist. Der Stetigförderer im Szenario B hat einen weitaus höheren Energiebedarf. Diese Erkenntnis ist natürlich aufgrund der höheren zeitlichen Gewichtung von Voll- und Teillast im Kollektiv B trivial. Allerdings nun den Schluss zu ziehen, er sei weniger effizient, ist falsch. Der Förderer im Szenario B erbringt nämlich einen entsprechend höheren logistischen Ertrag, er transportiert im gleichen Betrachtungszeitraum bedeutend mehr Transporteinheiten als der im Szenario A (1.656 TE in B anstelle 672 TE in A). Mit der Belastung steigt automatisch der logistische Ertrag. Dieser Sachverhalt wird nun über die Anzahl der transportierten Einheiten im spezifischen Energieverbrauch mit berücksichtigt. Deshalb ist der spezifische Energiebedarf von System B um ca. 11,48 % geringer als im Szenario A. Daran bestätigt sich auch die Vermutung, dass sich durch die zweistufige Betrachtung für bestimmte Einsatzszenarien günstigere und ungünstigere Geräte ergeben, was bei einem anderen Szenario durchaus umgekehrt aussehen kann.

Tendenziell ist natürlich ein Minimum des spezifischen Bedarfs anzustreben, d. h. der Energieeinsatz ist zu minimieren, der logistische Ertrag hingegen zu maximieren! Im vorhandenen Beispiel ist der logistische Ertrag in B weitaus größer als der entsprechend erforderliche Energiebedarf, deshalb ergibt sich der Rückgang im spezifischen Energiebedarf im Vergleich zu A.

Modifizierter Förderer

Neben dem anlagenabhängigen Vergleich kann mit den Kennzahlen auch ein Vorher-Nachher-Vergleich angestellt werden, wenn z. B. bei Entwicklungsaufgaben der Einsatz von hocheffizienten Komponenten zur Diskussion steht (hier am Beispiel eines energiesparenden Antriebsmotors erläutert).

Die neu berechnete Kennzahl gibt nun Aufschluss über die tatsächlich erreichte Energieeinsparung. Aufgrund der höheren Anteile von Voll- und Teillast werden die Einsparpotenziale am Szenario B höher als im Szenario A vermutet. Tatsächlich wird in B der spezifische Energiebedarf um ~21,69 % verringert. Hier würde sich der Einsatz der effizienteren Antriebskomponente rechtfertigen. Allerdings lässt sich auch im Szenario A ein ähnlich hoher Einspareffekt erzielen, der vorher nicht angenommen wurde. Der tatsächliche Einspareffekt zum Standardförderer schlägt sich hier

mit ~19,86 % zu Buche. Somit ist in beiden Systemen ein ähnlicher Einspareffekt möglich, trotz der unterschiedlichen Lastkollektive. Der spezifische Energiebedarf besitzt im Szenario B mit effizienter Komponente den Minimalwert aller betrachteten Situationen, was formal die höchste Effizienz bedeutet. Dies wird eindeutig ersichtlich, weil durch die effiziente Komponente der Energiebedarf reduziert wird und im Vergleich zu A ein höherer Durchsatz vorhanden ist.

Die Betrachtung der Szenarien zeigt die anschauliche Gegenüberstellung der spezifischen Energieeinsätze bzw. deren Effizienz mit Hilfe der Kennzahl.

6.1.4 Erkenntnisse durch Einführung der Bewertungsmethodik

Die Bewertungsmethodik konnte also, neben der Verifikation der Effizienz-Kennzahlen in Kapitel 6.1.3, durch die Anwendung und Verifikation der erarbeiteten Prozessschritte und des eingeführten Prüfverfahrens auch an realer Fördertechnik erprobt werden. Dabei erfolgte nicht nur die Gegenüberstellung unterschiedlicher Förderertypen sondern es wurden auch exemplarische Optimierungsmaßnahmen am Bandförderer anhand der Kennzahlen sichtbar gemacht.

Durch Anwendung der Bewertungsmethodik an realer Fördertechnik konnten die spezifischen Energiebedarfe an allen Geräten bestimmt werden. Gemäß der Aufgabenstellung aus Kapitel 1.4 besitzen die Kennzahlen die geforderte Eignung zur Darstellung der Energieeffizienz anhand der Kennzahlen mit ansprechender Aussagekraft. Durch die Berücksichtigung der logistischen Erträge der Förderer in der Kennzahl wird nicht nur der rein energetische Bedarf der Fördertechnik betrachtet, sondern auch der Einfluss von materialflusstechnischen Kenngrößen wie Fördergeschwindigkeit und Durchsatz mit in die Betrachtung einbezogen.

Durch die Belastung der Förderer unter dem Referenzarbeitsspiel aus Kapitel 3.2 erfolgt zudem die Berücksichtigung aller relevant auftretenden Lastzustände am Gerät. Diese Berücksichtigung von Betriebs- und Lastzuständen wird repräsentativ wiedergegeben. Die Berücksichtigung unterschiedlicher logistischer Erträge wird ebenso anschaulich wiedergegeben und geht weit über klassische Wirkungsgradbetrachtungen am Gerät hinaus.

Veränderungen an den Geräten sind ebenfalls mit den Kennzahlen erfolgreich sichtbar gemacht worden. Damit ist der Nachweis gelungen, dass Kennzahlen bzw. die gesamte Bewertungsmethode im Sinne einer Validierung für ihren lt. Kapitel 1.4 gestellten Einsatzzweck geeignet ist und die in Kapitel 3 eingangs gestellten Anforderungen erfüllt.

Es werden also neben anschaulichen Vergleichen somit auch Entscheidungshilfen möglich, die über den Einsatz energieeffizienter Komponenten, wie z. B. Antriebsmotoren der neuen Wirkungsgradklassen EN 60034-30 [DIN14], alternative Antriebstechnologien, energiesparende Förderbänder, etc. Aufschluss geben.

Wie in Kapitel 3.2 angemerkt, ergibt sich die konkrete zeitliche Verteilung der Belastungszustände realistisch erst zum Einsatzzeitpunkt. Ein Rollenförderer in einem Kommissioniersystem wird möglicherweise seltener unter Volllast betrieben als der gleiche Förderer im Zulauf zu einem Sortiersystem oder einer verbindenden Förderstrecke zwischen Betriebsbereichen. Ebenso variieren die anderen Zeitanteile je nach Einsatzbereich. Daraus ermöglicht sich eine zeitlich, örtlich und organisatorisch getrennte, zweistufige Berechnungsgrundlage für den Energiebedarf:

1. Basierend auf den für den Förderer typischen Belastungshöhen werden vom Hersteller oder einem Prüfinstitut die elektrischen Leistungsbedarfsgrößen auf Basis allgemein gültiger Messmethoden ermittelt und im Datenblatt des Förderers dokumentiert.
2. Beim Einsatz des Förderers werden durch den Planer, Systemintegrator oder Aufsteller die dem Einsatzfall entsprechenden Zeitanteile zugeordnet und in der Anlagendokumentation festgehalten. Hierbei sollten zur Vereinfachung und Transparenz Verteilungen aus einem allgemeingültigen Katalog verwendet werden.

Diese Zweistufigkeit des Energieeinsatzes hat verschiedene Aspekte:

- Die Bewertung der Geräte ist nicht von vornherein eindeutig energetisch schlecht oder gut. Die Förderer haben für verschiedene, im späteren Betrieb mögliche Belastungen ihre bauart- und konstruktionsbedingten Leistungsbedarfe.
- Geräte können hinsichtlich des Energieverbrauchs zukünftig anwendungsorientiert ausgewählt, adaptiert oder auch entwickelt werden.
- Durch die organisatorische Unabhängigkeit der beiden Stufen ist die Manipulationsmöglichkeit geringer, dadurch steigen Transparenz und Akzeptanz der Kennzahl.

6.2 Verluste im Antriebsstrang und der Mechanik

Die durchgeführten Experimente aus Kapitel 5.3.2 zeigen die Einsparpotenziale der Komponenten des Antriebsstranges auf. Bei beiden untersuchten Förderertypen Band- und Rollenförderer treten mit Abstand die größten Verluste in der Getriebemotoreinheit auf. Abhängig von den konkreten Fördererlängen sind die Wirkungsgrade des Getriebemotors, im stationären Betrieb, teilweise deutlich unter 50 Prozent. Die wesentlichen Ursachen können eindeutig benannt werden.

Der Antriebsmotor der Förderer arbeitet weit außerhalb seines optimalen Wirkungsgradbereiches (80-100 % Nennlast), sondern im stationären Betriebspunkt bei nur ca. 20 % seiner Nennlast. Die Wirkungsgrade bei geringer Belastung sinken bei Asynchronmotoren deutlich ([RUW08], S. 200). Zusätzlich kommt hier der Sachverhalt zu Tage, dass Asynchronmotoren mit kleinerer Nennleistung ein schlechteres Wirkungsgradverhalten $\eta = f(P_N)$ als Motoren höherer Nennleistung besitzen (Abbildung 6-5).

Für die von Herstellern angebotenen bzw. eingesetzten Getriebe (kleiner Leistung) gilt, dass bisher Verlustbetrachtungen hersteller- und kundenseitig keine Rolle spielten und damit weitgehend nur Herstellungs- bzw. Anschaffungskosten berücksichtigt wurden.

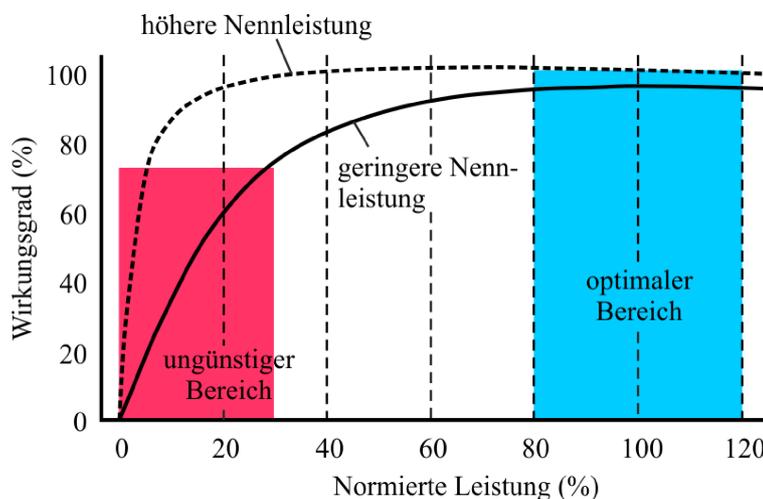


Abbildung 6-5: Wirkungsgradverlauf von Asynchronmotoren (nach [RUW08], Abb. 5.30)

Natürlich kann nicht von Überdimensionierung gesprochen werden. Die Antriebe müssen auch ein Anfahren bei Volllastzustand immer gewährleisten können. Zudem kommen bei den Antriebsmotoren immer Standardbaureihen aus vorhandenen Systembaukästen zum Einsatz, somit kann keine beliebig kleine Antriebsleistung gewählt werden. Die Verwendung von Standardkomponenten, vgl. Kap. 2.4.3, wirkt sich somit stark nachteilig aus.

Da die funktionalen Zusammenhänge bei allen eingesetzten Asynchronmotoren mit Getrieben ähnlich sind, können die an den konkreten Prüfaufbauten ermittelten Wirkungsgradverläufe und

Größenordnungen als allgemeingültig angesehen werden, unabhängig von Geräteherstellern ([RUW08], Abb. 5.30). Die Ursachen liegen in der allgemein gültigen Charakteristik von Standard-Asynchronmotoren kleiner Leistung ([RUW08], S. 201 ff.), belegt durch im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Wirkungsgraduntersuchungen der eingesetzten Getriebemotoren an einem Sonderprüfstand für Motoren. Abbildung 6-6 zeigt die Wirkungsgradverläufe zweier ASM-Getriebeeinheiten unterschiedlicher Nennleistung (0,37 kW und 0,75 kW).

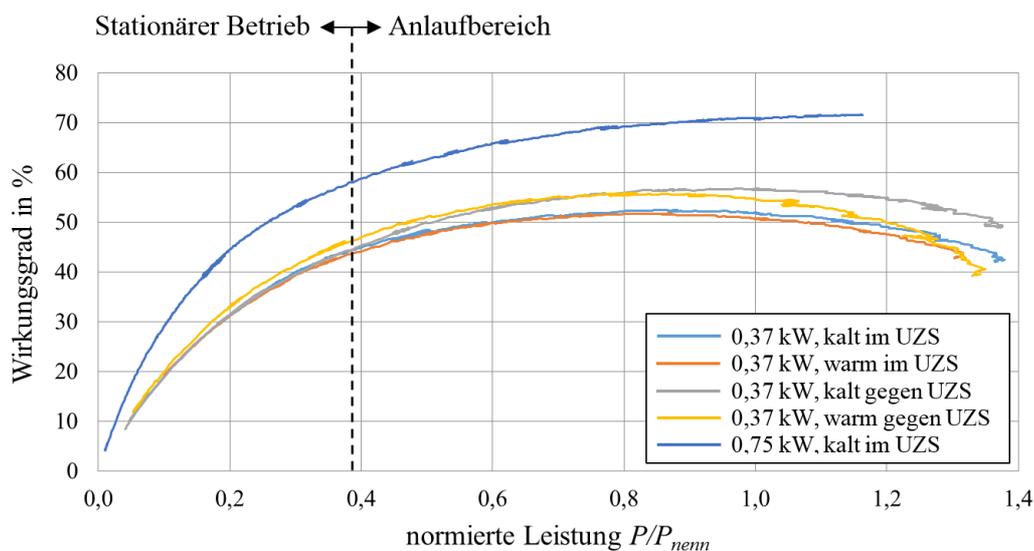


Abbildung 6-6: Wirkungsgradkurven aus Messungen von Getriebemotoren, 0,37 kW + 0,75 kW

Abbildung 6-7 verdeutlicht einen Lösungsansatz, die Verwendung von Sondermotortypen ohne Getriebe, deren Wirkungsgradverläufe auf Teillast-Betriebspunkte optimiert sind.

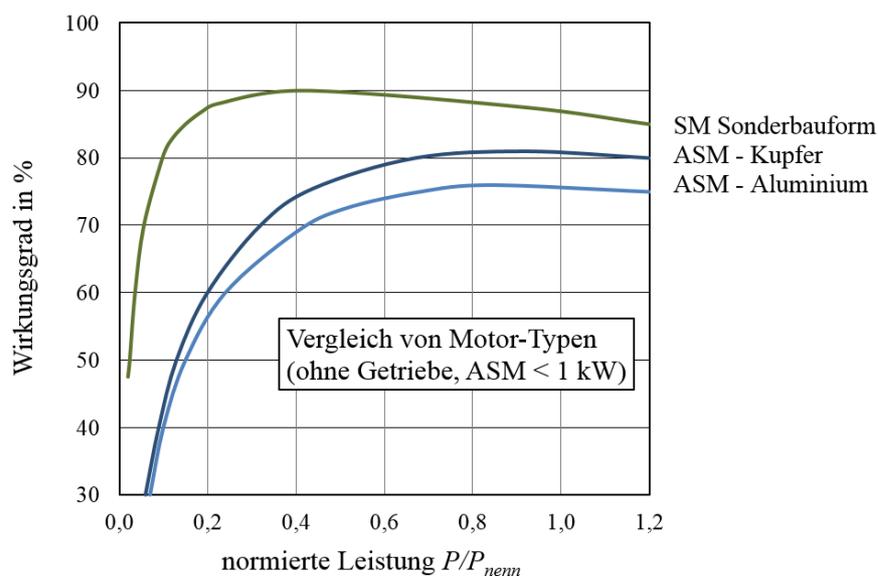


Abbildung 6-7: Wirkungsgradverläufe verschiedener Motortypen [ABM12]

Die Energieeinsparungspotenziale für den stationären Betriebspunkt liegen im Bereich 10–50 %, in Abhängigkeit der Motorauslegung für den Anlaufvorgang. Es ist offensichtlich, dass in vielen

Anwendungsfällen ein geeigneter ROI und eine deutliche Verbesserung der Lebenszykluskosten (LCC) erreichbar sind.

Die Teilverluste aller anderen mechanischen Komponenten sind wesentlich geringer. Alle weiteren Komponenten enthalten beim Zentralband- und Motorrollenförderer somit energetisch kein relevantes Verbesserungspotenzial. Aus den umfassenden Untersuchungen von Teillastszenarien der Förderer lässt sich eindeutig ableiten, dass im Zusammenhang mit leerlaufenden und teilbeladenen Förderern bedeutende Verbesserungen möglich sind. Da die konstruktive Gestaltung der Antriebsstränge bei allen Herstellern ähnlich ist, können diese Ergebnisse qualitativ wiederum als allgemeingültig eingestuft werden.

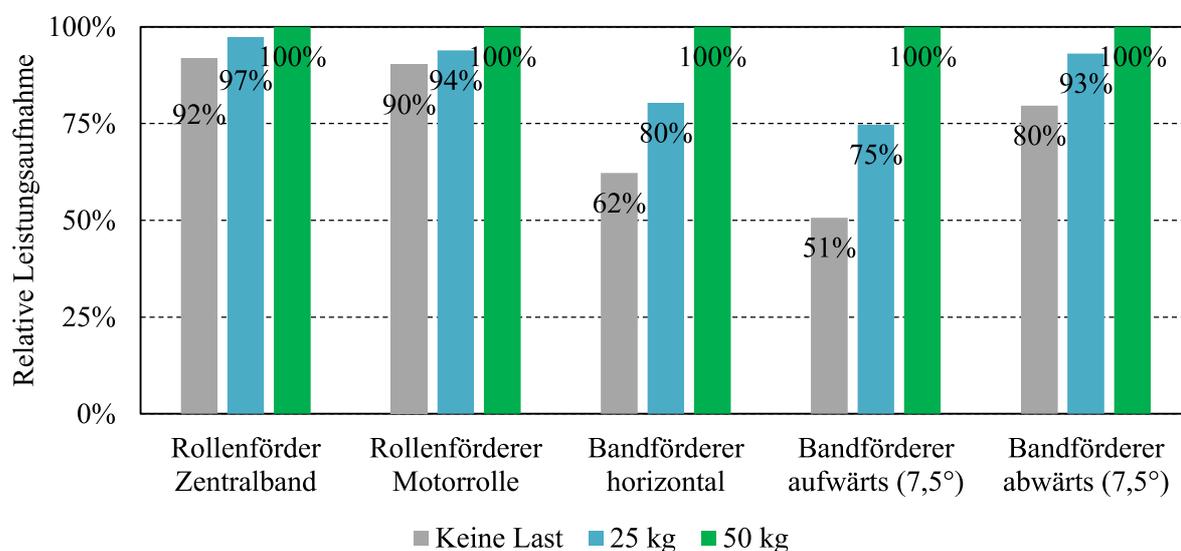


Abbildung 6-8: Relative Leistungsaufnahmen als Funktion der Last, bezogen auf Nennbelastung 50 kg

Die hohen relativen Leistungsaufnahmen im Leerlauf veranschaulicht Abbildung 6-8, für beide untersuchten Förderertypen. Für den Bandförderer sind auch Ergebnisse für eine geneigte Anordnung dargestellt (Auf-/Abwärtsförderung). Es zeigt sich eine Leistungsaufnahme im Leerlauf im Bereich von 51 % bis 92 % der Nennbelastung. Es kann somit gesagt werden, dass sich in vielen Anlagen Investitionen in Steuerungsmaßnahmen kaufmännisch rechnen werden (ROI und LCC), um leerlaufende Förderer (Abschnitte) konsequent in den Stillstand versetzen zu können.

Natürlich ist die Motorauslegung und Dimensionierung unter Berücksichtigung der Gesamtbeurteilung zu diskutieren. Das bedeutet, dass nicht immer ein Standardantrieb für unterschiedliche Anwendungen und Systemvarianten eingesetzt wird, sondern Antriebe spezifisch für den Einsatz an Fördertechnik ausgelegt und dimensioniert werden müssen.

Alternative Antriebstechnologien verlangen höhere Investitionskosten. Eine umfassende Betrachtung der Lebenszykluskosten und ROI-Berechnungen von Antrieben wurde in [JTL13b] durchgeführt. Es wird gezeigt, dass die Energiekosten für den Betrieb der Motoren den überwiegenden

Anteil darstellen. Die Mehrkosten für die Anschaffung werden durch die Kosteneinsparung für den reduzierten Energiebedarf in kurzer Zeit kompensiert. Der ROI für energieeffiziente Antriebe liegt dabei teilweise unter 6 Monaten.

Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen:

- Das Maß der Leistungsaufnahmen bzw. -verluste verschiedener Förder- und Antriebstechnologien unterscheidet sich vor allem aufgrund der zur Anwendung kommenden Wirkprinzipien. Rollenförderer zeichnen sich durch geringere Leistungsbedarfe als Bandförderer aus. Bei Rollenförderern ist an der Kontaktstelle von Wirkelement und Transporteinheit lediglich Rollreibung zu überwinden. Die dabei entstehenden Verluste sind geringer als beim Bandförderer, da sich bei diesem die Reibungsverluste entlang der Bandunterseite stärker auswirken.
- Der Energieverbrauch im Leerlauf beträgt bis zu 90 Prozent des Verbrauchs unter Volllast, insbesondere bei den Rollenförderern. Strategien zur konsequenten Abschaltung im Leerlauf ermöglichen also signifikante Energieeinsparungen. Rollenförderer zeigen nur eine geringe Lastabhängigkeit, während am Bandförderer der Energiebedarf unter Volllast erheblich steigt.
- Am Rollenförderer verursacht die Mechanik im Antriebsstrang vom Getriebeausgang bis zum Wirkelement im Vergleich zu den Getriebemotoren nur geringe Leistungsverluste. Die größten Verluste entstehen in der Getriebemotor-Einheit, teilweise treten Gesamtwirkungsgrade von weniger als 30 Prozent auf. In Standardfördertechnik eingesetzte Elektromotoren erreichen im Betrieb nur geringe Wirkungsgrade, da sie weit außerhalb ihres Nennbetriebspunktes betrieben werden. Zudem vermindern Verluste in Getrieben den Gesamtwirkungsgrad der Getriebemotoren zusätzlich. Der alternative Einsatz von Synchronmotortechnik ermöglicht höhere Wirkungsgrade und kurzzeitige Überlastungen für Anfahrvorgänge. Zudem können diese Antriebsmotoren getriebeles ausgeführt werden und vermeiden die durch Getriebe bedingten Verluste. Nachteilig ist die für ihren Betrieb erforderliche, verlustbehaftete Steuerelektronik.
- Der Vorteil von 24 Volt-Antrieben besteht in der geringeren Leistungsaufnahme pro Motor. Allerdings erfordert diese Technik eine höhere Gesamtanzahl an Antrieben und zusätzliche verlustbehaftete Netzteile und Steuermodule, was sich nachteilig in höheren Investitionskosten niederschlägt.
- Alternative Werkstoffkombinationen an Bandförderern (Förderband, Bandabstützung) können Reibungsverluste deutlich reduzieren, sind aber stark einsatzabhängig. Einflussparameter sind der Durchsatz und die durchschnittliche Beladung des Förderers. So zeigt der Einsatz von reibungsarmen Bauteilen seine Vorteile hauptsächlich bei großen Fördererlängen und häufigen Volllastzuständen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Bereich der Intralogistik waren zu Energieeffizienz und erforderlichem Leistungsbedarf von Stetigfördertechnik nur punktuelle Untersuchungen bekannt. Es existierten keine fundierten Grundlagen (Stand 2010), wie Energieeffizienz gemessen, gerechnet und vergleichend bewertet werden kann. Es waren keine vergleichbaren und herstellerunabhängigen Aussagen möglich. Die Logistik-Branche forderte deshalb die Erarbeitung von Grundlagen zur vergleichenden Energieeffizienzbetrachtung. Damit werden Unsicherheiten und Investitionshemmungen beim Einsatz neuer, energiesparsamer Alternativkomponenten vermieden.

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur Bestimmung und Bewertung der Energieeffizienz an Stetigfördertechnik entwickelt, validiert und exemplarisch angewendet. Die quantitative Darstellung der Energieeffizienz geschieht anhand von Kennzahlen. Basierend auf der Grunddefinition der Energieeffizienz der EU [EUR06] erfolgte die Definition eines spezifischen Energiebedarfes. Dieser setzt sich aus dem für die zu untersuchende Fördertechnik erforderlichen Energiebedarf und dem logistischen Ertrag zusammen. Anhand dieser Kennzahl erfolgt in dieser Arbeit die Quantifizierung der Energieeffizienz. Aufgrund unterschiedlicher Definitionen für den logistischen Ertrag sind mehrere Kennzahlvarianten eingeführt und gegenübergestellt worden.

Der Energieeinsatz wird dabei nicht ausschließlich unter Nennlastbedingung ermittelt. Für diesen Zustand sind Komponenten zwar dimensioniert, das Verhalten der Komponenten außerhalb des Nennlastbereiches kann jedoch wesentlich ungünstiger sein. Um diesen Sachverhalt zu berücksichtigen, wurde ein Referenzarbeitsspiel festgelegt, welches neben Nennlastzuständen auch Teillastbereiche, Leerlast- und Stillstands-Bereiche der Fördertechnik mit berücksichtigt. Jeder Lastzustand ist dabei in einer Kombination aus Durchsatz und durchschnittlicher Beladung der Transporteinheiten gekennzeichnet und wertemäßig so festgelegt, dass über den Betrachtungszeitraum eine typische, reale Anlagenbelastung abgebildet wird. Unter Kapitel 3.2 wird auch auf eine mögliche, sinnvolle Erweiterung des Referenzarbeitsspiels und Einführung von weiteren Betriebszuständen und Belastungsklassen eingegangen.

Bei der Festlegung des logistischen Ertrages sind zwei Definitionen eingeführt, gegenüber gestellt und bewertet worden. Dabei erfolgte die Definition als Kombination aus geometrischer und logistischer Referenzierung anhand der beiden Teilkennwerte:

- „Länge der betrachteten Fördertechnik“ mit Normierung auf einen Laufmeter des Förderers
- „Anzahl transportierter Einheiten“ oder alternativ „Anzahl der transportierten Masse“.

Sämtliche Berechnungsvorschriften und mathematischen Modelle zur Kennzahlbestimmung sind festgelegt worden.

Um die Vergleichbarkeit der Kennzahlen sicherzustellen, sind standardisierte Vorgaben zur Bestimmung notwendig. Dazu wurden sämtliche Prozessschritte zur Bestimmung der Kennzahlen, Randbedingungen für Prüfstandsversuche, Anforderungen an Messsysteme und die anzuwendenden Messverfahren festgelegt und durch experimentelle Untersuchungen verifiziert und validiert. Im Kapitel 3.5 erfolgte die Festlegung aller Prozessschritte zur Bestimmung der Kennzahlen, um die Kennzahlen standardisiert zu ermitteln. Zudem erfolgte die systematische, taxative Festlegung aller Randbedingungen und Vorgaben für das Prüfverfahren im Sinne eines anzuwendenden Regelwerkes (Kapitel 3.6). Dies beinhaltet spezifischen Detailforderungen

- an die zu untersuchende Fördertechnik als Prüfobjekt,
- an den notwendigen Messaufbau inkl. Vorgabe von Umgebungsbedingungen am Prüfobjekt,
- an die Spezifikationen der Messtechnik und
- an die anzuwendenden Messverfahren.

Nach der Einführung der theoretischen Grundlagen erfolgte im Kapitel 5.2 die Bestimmung der Kennzahlen für drei unterschiedliche Förderertypen mit vergleichender Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse. Es steht somit eine Methodik zur Verfügung, um die Energieeffizienz der Fördertechnik in unterschiedlichster Konfiguration zu ermitteln, unabhängig von Förderertyp, Antriebstechnologie und Hersteller bzw. Prüfer.

Die Kennzahlen können in weiterer Folge für unterschiedlichste Konfigurationen von Fördertechnik bestimmt werden, wie z. B. auch Fördertechnik mit Kurvenabschnitten, Abschnitte mit Überschiebern bzw. Ein- und Ausschleusebereichen, etc.

Neben dem direkten Vergleich der Energieeffizienz unterschiedlicher Fördertechnik werden die Kennzahlen zusätzlich verwendet, um Optimierungsmaßnahmen an Förderern im Vorher/Nachher-Vergleich anhand der Kennzahlen sichtbar zu machen. In Kapitel 2.6 wurde ein Überblick über derzeit mögliche energieeffizienzsteigernde Alternativlösungen durch gerätetechnische Maßnahmen im Bereich des Antriebsstranges der Fördertechnik gegeben. Allerdings sind der tatsächliche Einspareffekt und das Verhalten im späteren Fördertechnik-Einsatz vielfach nicht bekannt. Deshalb sind im Kapitel 4.2 die Antriebsstränge gängiger Fördertechnik betrachtet und systematisch aufgegliedert worden. Dabei erfolgte eine Zuordnung aller auftretender Leistungsverluste an Komponenten, welche am Leistungsfluss im Antriebsstrang beteiligt sind. Im Kapitel 5.3 sind an realer Fördertechnik in umfassenden Prüfstandsversuchen die relevant anfallenden Leistungsverluste an Komponenten des Antriebsstranges bestimmt worden. Dazu sind Messverfahren speziell

für den Einsatz an Fördertechnikprüfständen adaptiert worden. Zur Anwendung kam ein Strip-Down Verfahren, um Leistungsverluste aller am Antriebsstrang beteiligten Komponenten zu bestimmen. Somit war es möglich, für alle untersuchten Fördermittel die anfallenden Leistungsverluste in Experimenten an vorhandenen Prüfständen messtechnisch zu bestimmen. Zudem konnten die Messergebnisse für alle drei untersuchten Förderer in Form von Leistungsflussdiagrammen (Sankey-Diagramme) abgebildet werden.

Es konnte gezeigt werden, dass ein Großteil der Leistungsverluste im elektrischen Antriebssystem auftritt. Die Leistungsverluste von elektronischen Netzteilen sowie Steuereinrichtungen sind ebenfalls, bezogen auf die Gesamtleistungsaufnahme, teilweise erheblich groß. Die Mechanik in den Antriebssträngen verursacht im Vergleich zur Elektrik relativ geringe Leistungsverluste, bezogen auf die Gesamtleistungsaufnahme. Aus den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen konnten im Kapitel 5.3.2 Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden. Im Rahmen der Arbeit erfolgte die exemplarische Durchführung von Optimierungsmaßnahmen am Bandförderer:

- Einsatz eines Energiesparbandes
- Einsatz einer alternativen Werkstoffkombination als Bandabstützung
- Ersatz der Bandabstützung aus Stahlblech durch Tragrollen mit vorgegebener Rollenteilung

Die anschließende Anwendung der Bewertungsmethodik lieferte die Kennzahlen und ermöglichte so den Vorher/Nachher-Vergleich und die Bewertung der durchgeführten Optimierungsmaßnahmen. Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Optimierungsmaßnahmen am Antriebsstrang lieferten weitere grundlegende Aussagen zu tatsächlichen Potenzialen und Möglichkeiten der Effizienzsteigerung durch Tausch zu sparsamen Alternativkomponenten.

Dabei konnten drei unterschiedliche Arten von Verbesserungsmaßnahmen klassifiziert werden.

- Maßnahmen, welche sich unabhängig vom Belastungszustand der Fördertechnik auf die aufgenommene Grundlast auswirken.
 - Konstruktive Maßnahmen wie z. B. die rollende Bandabstützung (Kapitel 6.1, Seite 114)
 - Reduktion von Versorgungsbauteilen, wie Netzteilen und Steuermodulen (Kapitel 5.3.2)
 - Konsequente Abschaltung von Fördertechnik im Leerlaufbetrieb (Kapitel 6.2, Seite 123)
- Maßnahmen, welche nur unter Volllast relevante Einspareffekte erzielen: hier sind reibungsarme Förderbänder sowie alternative Werkstoffkombinationen an Bauteilen, welche die Kontaktreibung reduzieren, zu nennen (Kapitel 6.1, Seite 114).
- Maßnahmen, welche im gesamten Lastbereich Einspareffekte erzielen: dazu gehören hocheffiziente Antriebstechnik und alternative Motortechnologie (SM) mit Wirkungsgradsteigerungen über den gesamten Lastbereich, siehe Kapitel 6.2, Seite 121 ff.

Die Ergebnisse der Untersuchungen stellen auch den Sachverhalt dar, dass die eingangs oft als effizient geltenden alternativen Komponenten trotz vielversprechender Laboruntersuchungen der Hersteller sich im Gesamtsystem oftmals nicht bewähren. Dies resultiert aus der starken Einsatzabhängigkeit und Lastabhängigkeit der Effizienz von Komponenten im Antriebsstrang.

Die Bewertungsmethode liefert valide Kennzahlen, vergleichbar und unabhängig, und sie zeigt die tatsächlichen Einsparpotenziale von sparsamen Komponenten nach dem Einbau in das Gesamtsystem Fördertechnik auf. Mit Hilfe der Methodik kann die Wirksamkeit einer Optimierungsmaßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz über den gesamten Lastbereich beurteilt werden. Damit können nicht wirksame Optimierungen identifiziert und vermieden werden.

Bei der Entwicklung der Methodik wurde darauf geachtet, dass sämtliche Grunddefinitionen, Prozessschritte und standardisierte Randbedingungen derart allgemeingültig formuliert sind, dass eine Übertragung der Methodik auf andere Geräte der Materialflusstechnik in einfacher Weise erfolgen kann. Exemplarisch ist dies für vollautomatische Lagersysteme bereits erfolgt. Auf Basis der Grundlagen dieser Arbeit wurden bestehende Bewertungsmethoden für vollautomatische Lagersysteme verglichen, erweitert und neu eingeführt ([SCH15]; [HAL15a]).

Die gesamte Bewertungsmethodik hat den Anspruch, als Grundlage einer Standardisierung in Form eines normativen Regelwerks bzw. einer Richtlinie zu dienen.

Das Ziel der Schaffung einer unabhängigen, vergleichbaren Bewertungsmethodik konnte im Rahmen dieser Arbeit erreicht werden. Zudem sind relevante Leistungsverluststellen an den Antriebssträngen gängiger Fördertechnik identifiziert worden. Dies erlaubt Systemherstellern, gezielt Produkte für den geforderten Lastbereich einzusetzen und Bauteile für den energieeffizienten Einsatz an Fördermitteln der innerbetrieblichen Materialflusstechnik optimiert zu entwickeln.

Im Hinblick auf Aussagen zur Umweltbelastung von Logistikzentren ist die Energieeffizienz der darin zum Einsatz kommenden kompletten Materialflusstechnik zu bestimmen. Die zukünftigen Forschungsarbeiten müssen dazu in zwei Richtungen erfolgen. Einerseits auf Geräteebene, wo eine Übertragung der erarbeiteten Grundlagen auf weitere Geräte der Materialflusstechnik erfolgt. Andererseits müssen auf Anlagenebene Materialflussprozesse hinsichtlich ihrer Effizienz vergleichend bewertbar gemacht werden, um Aussagen zur Gesamt-Energieeffizienz von Materialflusssystemen zu ermöglichen.

Das Thema Energieeffizienz ist im Jahr 2015 nicht mehr stark als Trendthema im medialen Blickfeld präsent, trotzdem genießen Fragestellungen rund um die Energieeffizienz von Materialflussanlagen nach wie vor – sowohl im wissenschaftlichen als auch im industriellen Umfeld – hohe Priorität (vgl. [GÜN15]).

8 Verzeichnisse

8.1 Literaturverzeichnis

- [ABM12] ABM Greiffenberger Antriebstechnik: *Motoren und Getriebe für Lagerlogistik - Energieeffizient, Kompakt, Nachhaltig*. Fact Sheet. 2012. – Fact Sheet
- [AFG96] AFFENZELLER, Josef; GLÄSER, Heinz: *Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren*. Wien, New York : Springer, 1996 (Die Verbrennungskraftmaschine n.F., Bd. 8). – ISBN 3-211-82577-0.
- [ARF09] ARNOLD, D.; FURMANS, K.: *Materialfluss in Logistiksystemen*. 6. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009.
- [ARN06] ARNOLD, Dieter: *Intralogistik - Potentiale, Perspektiven, Prognosen*. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag GmbH, 2006 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-29658-4.
- [ARN08] ARNOLD, Dieter: *Handbuch Logistik*. 3., neu bearbeitete Aufl. Berlin : Springer, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-72928-0.
- [AUE06] AUERBACH, Peter: *Zur Beanspruchung und Lebensdauer raumgängiger Gleitketten aus Kunststoffen*. Dissertation, TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Fördertechnik, 2006. URL <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2006/0039> – Abrufdatum: 2015-09-17.
- [BAR80] BARNEY, Gerald O.: *The global 2000 report to the President of the U.S., entering the 21st century - A report*. New York : Pergamon Press, 1980 (Pergamon policy studies on policy, planning, and modeling). – ISBN 978-0080246161.
- [BDE13] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: *BDEW Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken 2013*. Forschungsbericht. URL [https://www.bdew.de/inter-net.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/\\$file/Energieinfo_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf](https://www.bdew.de/inter-net.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/$file/Energieinfo_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf) – Abrufdatum: 2015-12-10.
- [BIN12] BINDER, Andreas: *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2012. – ISBN 978-3-540-71849-9.
- [BÖG09] BÖGE, A.: *Handbuch Maschinenbau - Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. 19. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner-Verlag, 2009.
- [BLF13] BRAUN, Meike; LINSEL, Peter; FURMANS, Kai: *24-Volt-Antriebstechnik in der Steigtördertechnik*. URL <http://www.interroll.com/de/interroll-gruppe/downloads/whitepapers/24-v-drive-technology/kit-studie-2013.php> – Abrufdatum: 2015-07-13.

- [BLS+12] BRAUN, Meike; LINSEL, Peter; SCHÖNUNG, Frank; FURMANS, Kai: *Energiebetrachtung beim Lager- und Kommissioniervorgang*. In: *Logistics Journal Proceedings* (2012)
- [BGF+13a] BRUNS, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.; FURMANS, Kai; SCHILLING, Timo, et al.: *Analyse und Quantifizierung der Umweltaspekte von Fördermitteln in der Intralogistik - [Forschungsbericht]*. Teil 1. URL http://www.fem-ur.com/data/File/Teil_1_Forschungsbericht_Umweltauswirkungen_Intralogistik.pdf – Abrufdatum: 2015-11-26.
- [BGF+13b] BRUNS, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.; FURMANS, Kai; SCHILLING, Timo, et al.: *Analyse und Quantifizierung der Umweltaspekte von Fördermitteln in der Intralogistik - [Forschungsbericht]*. Teil 2. URL http://www.fem-ur.com/data/File/Teil_2_Forschungsbericht_Umweltauswirkungen_Intralogistik.pdf – Abrufdatum: 2015-11-26.
- [BUC12] BUCHMANN, R.: *Carbon Footprint für Logistikcenter*. Vortrag: Logistikwerstatt Graz 2012, Veranstalter: Institut für Technische Logistik, TU Graz. Graz, 22.06.2012
- [BUR12] BURGHARDT, Michael: *Energieeinsparung bei Einsatz von drehzahlgeregelten Antrieben*. Vortrag: Topmotors Workshop. 26.01.2012. URL http://www.topmotors.ch/_data/5_burghardt_topmotors_workshop_26012012.pdf – Abrufdatum: 2015-06-10.
- [CEM14] CeMAT: *Intralogistics - a Definition - Industry of true innovative Power*. URL <http://www.cemat.de/en/about-the-trade-show/facts-figures/profile/intralogistics-a-definition> – Abrufdatum: 2014-02-14.
- [CZH10] CZICHOS, Horst; HABIG, Karl-Heinz: *Tribologie-Handbuch - Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik ; mit 123 Tabellen*. 3., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg + Teubner, 2010 (Studium). – ISBN 9783834800176.
- [DFB03] DEALMEIDA, Aníbal T.; FONSECA, Paula; BERTOLDI, Paolo: *Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies*. In: *Energy* 28 (2003), Nr. 7, S. 673–690.
- [DEW14] Dewetron GmbH: *DEWE-800*. URL <http://www.dewetron.com/products/instruments/mainframes/dewe-800/> – Abrufdatum: 2015-01-22.
- [DHL11] DHL - Deutsche Post: *Bericht zur Unternehmensverantwortung 2011*. URL https://www.dpdhl.com/content/dam/dpdhl/dpdhl/verantwortung/downloads/Bericht-zur-Unternehmensverantwortung-2011/DPDHL_Bericht_Unternehmensverantwortung_2011.pdf – Abrufdatum: 2015-09-08.

- [DIN74] NORM, DIN 15020-1:1974-02: *Hebezeuge; Grundsätze für Seiltriebe, Berechnung und Ausführung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 1974, 1974-02.
- [DIN94] NORM, DIN 15201-1:1994-04: *Stetigförderer; Benennungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth, 1994, 1994-04.
- [DIN00] NORM, DIN EN 13199-1:2000-10: *Verpackung - Kleinladungsträgersysteme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfverfahren*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 2000, 2000-10.
- [DIN11a] NORM, DIN EN 60034-1:2011-02: *Drehende elektrische Maschinen Teil 1*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth, 2011, 2011-02.
- [DIN11b] NORM, DIN 22101:2011-12: *Stetigförderer - Gurtförderer für Schüttgüter - Grundlagen für die Berechnung und Auslegung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 2011, 2011-12.
- [DIN12] NORM, DIN EN 16212:2012-11: *Energieeffizienz- und -einsparberechnung - Top-Down- und Bottom-Up-Methoden; Deutsche Fassung EN 16212:2012*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 2012, 2012-11.
- [DIN13a] NORM, DIN EN ISO 25745-1:2013-02: *Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 1: Energiemessung und Überprüfung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 2013, 2013-02.
- [DIN13b] NORM, DIN EN ISO 25745-1:2013-02: *Energieeffizienz von Aufzügen, Fahrtreppen und Fahrsteigen - Teil 1: Energiemessung und Überprüfung (ISO 25745-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 25745-1:2012*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 2013, 2013-02.
- [DIN14] NORM, DIN EN 60034-30-1:2014-12; VDE 0530-30-1:2014-12: *Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code) (IEC 60034-30-1:2014)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 2014, 2014-12.
- [DIN15] NORM, DIN EN 60034-2-1; VDE 0530-2-1:2015-02: *Drehende elektrische Maschinen - Teil 2-1: Standardverfahren zur Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades aus Prüfungen (ausgenommen Maschinen für Schienen- und Straßenfahrzeuge) (IEC 60034-2-1:2014); Deutsche Fassung EN 60034-2-1:2014*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. : Beuth Verlag, 2015, 2015-02.

- [DOM13] DOMBECK, Uwe: *Beitrag zur Dimensionierung von Fördersystemen mit Staurohlenketten*. Dissertation, TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Fördertechnik, 04.04.2013. URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109852> – Abrufdatum: 2015-09-17.
- [ERG13a] ERTL, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.: *Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte - Teil 1*. In: *f+h - Materialfluss, Warenwirtschaft und Logistik-Management* (2013), Nr. 12, S. 8–10.
- [ERG13b] ERTL, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.: *Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil 1*. In: *f+h - Materialfluss, Warenwirtschaft und Logistik-Management* (2013), Nr. 6, S. 12–14.
- [ERG13c] ERTL, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.: *Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen - Teil 2*. In: *f+h - Materialfluss, Warenwirtschaft und Logistik-Management* (2013), 7-8, S. 12–15.
- [ERG14] ERTL, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.: *Energieeffizienzklassen für AKL-Regalbediengeräte - Teil 2*. In: *f+h - Materialfluss, Warenwirtschaft und Logistik-Management* (2014), 1-2, S. 10–13.
- [EGF12] ERTL, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.; FISCHER, Gabriel: *Energieeffiziente Intra-logistik auf Geräteebene am Beispiel des Regalbediengeräts*. In: *Magdeburger Logistiktage*. Stuttgart : Fraunhofer Verlag, 2012, S. 65–72.
- [EUR70] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT, RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *RICHTLINIE 2006/32/EG - Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Abgase von Kraftfahrzeugmotoren mit Fremdzündung* (1970-03-20), S. L 76/1 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31970L0220&from=de>
- [EUR92] EUROPÄISCHE GEMEINSCHAFT, RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: *RICHTLINIE 92/75/EWG - Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch Haushaltsgeräte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen* (1992-09-22). URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31992L0075:de:HTML>
- [EUR02a] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Richtlinie 2002/91/EG - Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden* (2002-12-16), S. L 1/65 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091&from=DE> – Abrufdatum: 2015-06-05.

- [EUR02b] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *RICHTLINIE 2002/91/EG über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden* (2002-12-16), S. L 1/65 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0091&from=DE>
- [EUR05] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *RICHTLINIE 2005/32/EG zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte*. 2005 (2005-07-06), S. L 191/29 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32005L0032&from=DE>
- [EUR06] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *Richtlinie 2006/32/EG - Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen* (2006-04-05), S. L 114/64 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32006L0032> – Abrufdatum: 2014-05-17.
- [EUR09] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *VERORDNUNG (EG) Nr. 640/2009 - Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren* (2009-07-22), S. L 191/26 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:191:0026:0034:DE:PDF>
- [EUR10] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 1061/2010 DER KOMMISSION zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Kennzeichnung von Haushaltswaschmaschinen in Bezug auf den Energieverbrauch* (2010-09-28), S. L 314/47 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:314:0047:0063:DE:PDF>
- [EUR12] EUROPÄISCHES PARLAMENT, RAT DER EUROPÄISCHEN UNION: *RICHTLINIE 2012/27/EU zur Energieeffizienz* (2012-10-25), S. L 315/1 ff. URL <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:DE:PDF>
- [FAW08] FALKENBERG, S.; WENNEKAMP, T.: Doping of conveyor belt materials with nanostructured fillers to adapt innovative performance characteristics. In: *2008 IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, 2008, S. 1526–1533.
- [FAL12] FALKENBERG, Sascha: *Untersuchungen zum Reibungs- und Verschleißverhalten an Gurtförderern für den innerbetrieblichen Materialfluss*. Garbsen : PZH Produktionstechnisches Zentrum, 2012 (Berichte aus dem ITA / Institut für Transport- und Automatisierungstechnik 2012,1). – ISBN 978-3-943104-79-0.

- [FAS12] FASCH, Stephan Elias: *Reibungs- und Kennfelduntersuchungen an einem aufgeladenen PKW-Ottomotor*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, 2012.
- [FIS11] FISCHER, Rolf: *Elektrische Maschinen*. 15., aktualisierte Aufl. München [u.a.] : Hanser, 2011. – ISBN 978-3446425545.
- [FOR15] Forbo Movement Systems: *Amp Miser - Die neue Generation energiesparender Transportbänder*. URL <http://www.forbo.com/movement/de-de/produkte/transportbaender/siegling-transilon/amp-miserm-2-0/pz492h> – Abrufdatum: 2015-11-26.
- [FRA11] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund, Abteilung Umwelt und Ressourcenlogistik: *Klimaschutz liefern - Logistikprozesse klimafreundlich gestalten*. Kurzstudie 05.2011. URL http://www.iml.fraunhofer.de/content/dam/iml/de/documents/OE%20310/2Grad_Bericht_080611.pdf – Abrufdatum: 2015-11-26.
- [FUR14] FURMANS, Kai: *Energieverbrauch von Lagersystemen - Einfluss der Technik und Einfluss des Betriebs*. Vortrag: Logistikwerkstatt Graz 2014. Technische Universität Graz, 27.05.2014
- [GHK11] GLADYSIEWICZ, Lech; HARDYGORA, Monika; KAWALEC, Witold: *A METHOD OF DETERMINING THE PRIMARY RESISTANCE OF A BELT CONVEYOR WITH A PARTICULAR CONSIDERATION OF BELT PROPERTIES*. In: *IMHC International Materials Handling Conference Beltcon 14* (2011), S. 1–10.
- [GÜN09] GÜNTNER, Willibald A.: *Change to Green - Wege zu einer energieeffizienten Logistik*, Veranstalter: Technische Universität. München, 05.05.2009. URL <http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Change%20to%20Green%20-%20Wege%20zu%20einer%20energieeffizienten%20Logistik%20Vortrag.pdf> – Abrufdatum: 2013-11-21.
- [GÜN15] GÜNTNER, Willibald A.: *Visionen von morgen für die Herausforderungen von heute - Intralogistik intelligent automatisieren*. Vortrag: Logistikwerkstatt Graz 2015, Veranstalter: Institut für Technische Logistik, TU Graz. Graz, 20. Mai 2015 – Abrufdatum: 2015-05-28.
- [GÜH13a] GÜNTNER, Willibald A.; HABENICHT, Sebastian: *Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energieverbrauchs*. München : Fml, TUM, 2013 (Forschungsbericht / Fml, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik, Technische Universität München). – ISBN 978-3-941702-36-3.

- [GÜH13b] GÜNTNER, Willibald A.; HAUSLADEN, G.: *Das CO₂ - neutrale Logistikzentrum - Entwicklung von ganzheitlichen Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Logistikzentren*. Ergebnisse Online-Umfrage: Energieeffizienz-Benchmarking für Logistikzentren. URL http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Forschung/Das%20CO2-neutrale%20Logistikzentrum/Umfrage_Energieeffizienz-benchmarking_Logistikzentren.pdf – Abrufdatum: 2015-06-15.
- [GSE+11] GÜNTNER, Willibald A.; SCHIPPLICK, Michael; ERTL, Rainer; HAHN-WOERNLE, Paul: *Wettbewerbsfaktor Energieeffizienz - Teil 1*. In: *f+h - Materialfluss, Warenwirtschaft und Logistik-Management* (2011), Nr. 6, S. 2–5. URL http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/FUH_FB_Technische%20Universit%C3%A4t%20M%C3%BCnchen%20Lehrstuhl%20fml_Energieeffizienz%20Regalbedienger%C3%A4te_Teil_01.pdf
- [GÜT09] GÜNTNER, Willibald A.; TENEROWICZ, Peter: *Wege zu einer energieeffizienten Intralogistik - Handlungsfelder und Stellhebel*. In: *Brauwelt* (2009), Nr. 27, S. 773–775. URL http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/Brauwelt_Wege%20zu%20einer%20energieeffizienten%20Intralogistik.pdf – Abrufdatum: 2013-11-21.
- [HEG13] HABENICHT, Sebastian; ERTL, Rainer; GÜNTNER, Willibald A.: *Analytische Energiebedarfsbestimmung von Intralogistiksystemen in der Planungsphase*. In: *Logistics Journal* 2013 (2013), Nr. 10. URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-14-37732>
- [HAG13] HABENICHT, Sebastian; GÜNTNER, Willibald A.: *Energiebedarfsermittlung in der Grobplanungsphase - Welche Ansätze eignen sich?* In: *Hebezeuge Fördermittel* 53 (2013), Nr. 3, S. 128–130. URL http://www.fml.mw.tum.de/fml/images/Publikationen/2013_Habenicht_G%C3%BCntner-Energiebedarfsermittlung%20in%20der%20Grobplanungsphase.pdf – Abrufdatum: 2014-02-13.
- [HAL12] HAFNER, Norbert; LOTTESBERGER, Florian: *Energy Efficiency in Material Flow Systems (effMFS)*. In: *FME Transactions* Vol. 40 (2012), Nr. 4, S. 181–186.
- [HAL13a] HAFNER, Norbert; LOTTESBERGER, Florian: *Energieeffizienzsteigerungen - Potentiale automatisierter Intralogistikanlagen*. In: FREY, Georg; SCHUMACHER, Walter; VERL, Alexander (Hrsg.): *sps ipc drives 2013 : Elektrische Automatisierung - Systeme und Komponenten, Internationale Fachmesse und Kongress, Nürnberg, 26. - 28.11.2013, Tagungsband*. neue Ausg. Berlin : VDE VERLAG, 2013, S. 379–388.
- [HAL13b] HAFNER, Norbert; LOTTESBERGER, Florian: *Messsystem zur Verbesserung der Energieeffizienz in automatisierten Materialflusssystemen*. In: *3. Tagung Innovation Messtechnik* 2013 (2013), S. 8–13.

- [HAL15a] HAFNER, Norbert; LOTTERSBERGER, Florian: Intralogistics Systems - Optimization of Energy Efficiency. In: BOŠNJAK, Srđan (Hrsg.): *XXI Triennial International Conference on Material Handling, Constructions and Logistics - MHCL'15, 23 -25 September 2015, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering*. Belgrade, 2015, S. 145–150.
- [HAL15b] HAFNER, Norbert; LOTTERSBERGER, Florian: *Sonderprüfstand zur messtechnischen Bestimmung von Haft- und Gleitreibungskoeffizienten*. In: *4. Tagung Innovation Messtechnik 2015* (2015), S. 31–35.
- [HSN+11] HALLO, Sindy; SUMPFF, Jens; NENDEL, Klaus; DRECHSLER, Florian: *Energieeffizienz - Kennzeichen zukünftiger Fördertechnik - Anforderungen und Entwicklungstrends*. In: *Hebezeuge Fördermittel Berlin 51* (2011), Nr. 10, S. 502–505.
- [HAU11] HAUTH, Michael: *Green Logistics. Vortrag: 4. Logistikkongress Baden-Württemberg*. Stuttgart, 10.11.2011. URL http://www.logistik-bw.de/fileadmin/BENUTZERDATEN/Dateien-fuer-Seiten/Veranstaltungen/Logistikkongress2011/forum1_2_hauth_michael_pso_hsmannheim.pdf – Abrufdatum: 2013-11-21.
- [HOW12] HOPPE, Alexander; WEHKING, Karl-Heinz: *Optimierung der Energieeffizienz von Intralogistikressourcen am Beispiel des Kettenförderers*. In: *Logistics Journal Proceedings* (2012)
- [INT13] INTERROLL: *Warum effiziente Förderlösungen immer wichtiger werden*. Industry Fact Sheet. URL http://www.interroll.at/fileadmin//user_upload/PDF/02_Industry_Fact_Sheet_web.pdf. – Aktualisierungsdatum: Februar 2013 – Abrufdatum: 2015-11-26.
- [JTL13a] JODIN, Dirk; TINELLO, Daniel; LOTTERSBERGER, Florian: *Kostenfalle oder Investition in die Zukunft? - Teil 1*. In: *f+h - Materialfluss, Warenwirtschaft und Logistik-Management* (2013), Nr. 4, S. 12–13.
- [JTL13b] JODIN, Dirk; TINELLO, Daniel; LOTTERSBERGER, Florian: *Kostenfalle oder Investition in die Zukunft? - Teil 2*. In: *f+h - Materialfluss, Warenwirtschaft und Logistik-Management* (2013), Nr. 5, S. 12–17.
- [JÜS00] JÜNEMANN, R.; SCHMIDT, T.: *Materialflusssysteme – Systemtechnische Grundlagen*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2000.
- [KDO+12] KELLENS, Karel; DEWULF, Wim; OVERCASH, Michael; HAUSCHILD, Michael Z.; DUFLOU, Joost R.: *Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description*. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 17 (2012), Nr. 1, S. 69–78.

- [KET13] KETTER, Alexander: *Energieeffizienz von Materialflusssystemen - Untersuchungen am Bandförderer*. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Technische Logistik, 2013.
- [KRA08] KRAMM, Matthias: *Der Energieausweis für Distributionszentren*. In: *Tagungsband Energieeffizienz im Lager, Köln (2008)*
- [LIM88] LIMBERG, Helmut: *Untersuchung der trumbezogenen Bewegungswiderstände von Gurtförderanlagen*. Dissertation, Universität Hannover, Fakultät für Maschinenwesen, 1988.
- [LHJ13] LOTTERSBERGER, Florian; HAFNER, Norbert; JODIN, Dirk: Efficiency Indicators for Benchmark and Improvement of Energy Efficiency on Automated Material Flow Systems, Volume 8, Issue 1. In: *Proceedings in Manufacturing Systems, 2013*, S. 199–204.
- [MAR09] MARTIN, H.: *Transport- und Lagerlogistik - Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. 7. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner-Verlag, 2009.
- [MRW08] MARTIN, H.; RÖMISCH, P.; WEIDLICH, A.: *Materialflusstechnik - Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik*. 9. Auflage. Wiesbaden : Vieweg-Verlag, 2008.
- [MEA72] MEADOWS, Dennis L.: *The limits to growth*. New York : Universe Books, 1972. – ISBN 3-421-02633-5.
- [MSZ10] MONECKE, Jörg; SCHULZ, Robert; ZADEK, Hartmut: *Mobile Messeinrichtungen zur Prozessdiagnose in Stückgutförderanlagen*. In: *Logistics Journal Proceedings (2010)*
- [NLW13] NENDEL, Klaus; LÜDEMANN, Lynn; WEISE, Sebastian: *Energieeffizienzbetrachtungen logistischer Systeme*. In: *Logistics Journal 2013 (2013)*, Nr. 10. URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-14-37717>
- [NEM06] NENDEL, Klaus; MITZSCHKE, Frank: *Kunststoffgleitpaarungen in der Fördertechnik - Methoden zur Messung von Reibungswerten*. In: *Logistics Journal nicht-referierte Veröffentlichungen (2006)*. URL <https://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2006/9/614>
- [NSB+10] NENDEL, Klaus; SUMPF, Jens; BERBIG, Ingo; STROBEL, Jens, et al.: *Energieeffizienz und Leichtbau in der Fördertechnik*. In: *Tagungsband zum 4. Fachkolloquium InnoZug (22./23.09.2010)*, 2010, S. 139–151.

- [NOR09] NORD Drivesystems: *Effiziente Antriebstechnik - Für eine optimale Energiebilanz*. Industry Fact Sheet. URL http://catalogue.nord.com/nord/Flyer_Effiziente-Antriebstechnik_DE.pdf – Abrufdatum: 2015-11-26.
- [PEH10] PEHNT, Martin: *Energieeffizienz - Ein Lehr- und Handbuch*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. – ISBN 978-3-642-14250-5.
- [ROC96] Rockwell Automation: *Grundlagen für die Praxis - Drehstromasynchronmotoren*. Aarau., 1996.
- [RUW08] RUDOLPH, Manfred; WAGNER, Ulrich: *Energieanwendungstechnik - Wege und Möglichkeiten zur Optimierung der Energietechnik*. 1. Aufl. Berlin : Springer Berlin, 2008 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-79022-8.
- [SCH15] SCHADLER, Michael: *Energieeffizienz von Materialflusssystemen - Untersuchungen von vollautomatischen Lagersystemen*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, Institut für Technische Logistik, 2015.
- [SFB+12] SCHILLING, Timo; Frenkel Alexander; BRUNS, Rainer; AMBERGER, Matthias, et al.: *Analyse und Quantifizierung der Umweltaspekte von Fördermitteln in der Intralogistik*. In: *Logistics Journal Proceedings* (2012-10-11)
- [SCH82] SCHMIDT, Detlev: *Berechnung von Schleppkreisförderern nach vorgegebenen Optimierungskriterien*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Fachbereich Konstruktion und Fertigung, 1982.
- [SCH07] SCHRÖDER, Dierk: *Elektrische Antriebe - Grundlagen - Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben*. 3., erw. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (Springer-Lehrbuch). – ISBN 978-3-540-72764-4.
- [SMZ12] SCHULZ, Robert; MONECKE, Jörg; ZADEK, Hartmut: *Der Einfluss kinematischer Parameter auf den Energiebedarf eines Regalbediengerätes*. In: *Logistics Journal* 2012 (2012), Nr. 01. URL <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-14-34321>
- [SOM11] SOMMER, Tobias: *Messung und Optimierung der Energieeffizienz von Fördermitteln*, Veranstalter: Universität. Stuttgart, 10.11.2011. URL http://www.logistik-bw.de/fileadmin/BENUTZERDATEN/Dateien-fuer-Seiten/Veranstaltungen/Logistik-kongress2011/forum1_4_sommer_tobias_unis.pdf – Abrufdatum: 2013-11-21.
- [SUM09] Sumpf, Jens, Rasch, Frank, Nendel, Klaus, De Angelis, Marco: *Rollende Förder-technik mit Optimierungspotenzial - Neue Module ermöglichen höhere Energieeffizienz*. In: *Hebezeuge Fördermittel* 49 (2009), Nr. 10, S. 476–478. URL https://www.tu-chemnitz.de/projekt/Gleitketten/KZT/doc/2009-10_hf_rft.pdf – Abrufdatum: 2015-09-17.

- [TEI13] TEIGELKÖTTER, Johannes: *Energieeffiziente elektrische Antriebe*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2013. – ISBN 978-3-8348-1938-3.
- [TEN11] TEN HOMPEL, Michael: *Sinn und Unsinn grüner Intralogistik. Vortrag: LogiMat Fachforum 2011*, Veranstalter: LogiMAT Internationale Fachmesse für Distribution, Material- und Informationsfluss. Stuttgart, 8.-10. Februar 2011
- [TJN+07] TEN HOMPEL, Michael; JÜNEMANN, Reinhardt; NAGEL, Lars; SCHMIDT, Thorsten: *Materialflusssysteme - Förder- und Lagertechnik*. 3., völlig neu bearbeitete Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007 (VDI-Buch). – ISBN 978-3-540-73235-8.
- [THH+08] TIESTE, Karl-Dieter; HANNE, Robert; HILFERT, Sven; KIEL, Edwin: Energieeffizienz von Getriebemotoren mit Frequenzumrichter. In: VERL, Alexander (Hrsg.): *SPS IPC DRIVES 2008 : Elektrische Automatisierung, Systeme und Komponenten ; Fachmesse & Kongress 25. - 27. Nov. 2008, Nürnberg ; mit CD-ROM ; [Tagungsband]*. Berlin, Offenbach : VDE-Verl., 2008.
- [TRU15] TRUMMER, Wolfgang: 100%!? - Verfügbarkeit und Anlagengröße. In: JODIN, Dirk (Hrsg.): *Intralogistik 4.0?! : Logistikwerkstatt Graz 2015, 19. - 20. Mai 2015*. Graz : Verl. der Techn. Univ. Graz, 2015, S. 151–170.
- [VDI98a] RICHTLINIE, 4480-1: *Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen*. VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik : Beuth Verlag, 1998, 1998-02.
- [VDI98b] RICHTLINIE, 3978: *Durchsatz und Spielzeiten in Stückgut-Fördersystemen*. VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik : Beuth Verlag, 1998, 1998-08.
- [VDI00] RICHTLINIE, VDI 4421:2000-10: *Antriebstechniken in der Stückgutfördertechnik - Übersicht und Auswahl*. VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik : Beuth Verlag, 2000, 2000-10.
- [VDI02] RICHTLINIE, VDI 4400 Blatt 3:2002-07: *Logistikkennzahlen für die Distribution*. VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik : Beuth Verlag, 2002, 2002-07.
- [VDI07] RICHTLINIE, VDI 4440:2007-03 Blatt 3: *Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut - Rollen- und Kugelbahnen*. VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluß Logistik : Beuth Verlag, 2007, 2007-03.
- [VDI70] RICHTLINIE, VDI 2411: *Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik : Beuth Verlag, 1970, 1970-06.
- [VDI09] RICHTLINIE, 4704-1: *Aufzüge Energieeffizienz*. VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung : Beuth Verlag, 2009, 2009-03.

- [WEN08] WENNEKAMP, Tobias: *Tribologische und rheologische Eigenschaften von Fördergurten*. Garbsen : PZH, Produktionstechn. Zentrum, 2008 (Berichte aus dem ITA 2008, Bd. 01). – ISBN 978-3-939026-99-0.
- [WIE11] WIECZOREK, Dorothee: *Empirische Entwicklung von Prognosemodellen für die Auslegung von Rollenfördermodulen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2011.
- [WIN15] WINKLER, Max: *Grenzen des Wachstums für Distributionszentren*. Vortrag: Logistikwerstatt Graz 2015, Veranstalter: Institut für Technische Logistik, TU Graz. Graz, 20. Mai 2015 – Abrufdatum: 2015-05-28.
- [WOR11] World Economic Forum: *Logistics & Supply Chain Industry Agenda Council - Final Report 2010-2011*. URL http://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC_LogisticsSupplyChain_Report_2010-11.pdf – Abrufdatum: 2015-11-26.

8.2 Glossar

Materialflusssysteme: *„Materialflusssysteme erbringen die zentralen logistischen Funktionen, Dinge zu lagern, zu transportieren, zusammenzuführen und zu verteilen.“* [TJN+07]. In Materialflusssystemen bewegen sich Objekte entlang von Verbindungselementen von einer Quelle zu einer Senke und nutzen auf diesem Weg materialflusstechnische Ressourcen. Objekte können Güter, Transportmittel oder Ladehilfsmittel sein, die Verbindungselemente sind zum Beispiel Förderbänder [TJN+07].

Intralogistik: *„Die Intralogistik umfasst die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlages in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen.“* ([ARN06], S. 1) Intralogistik ist also ein Begriff, der den innerbetrieblichen Materialfluss wie z. B.: Stückgut, Schüttgut oder Flüssigkeiten und die unternehmensinterne Logistik beschreibt. Zu diesem Bereich gehören Lager- sowie Puffertechnik, mechanische und pneumatische Förderer, Hebezeuge, Flurförderzeuge, Puffertechnik, Stetigförderer, Krane, Telematik, Aktorik, Sensorik, Robotik, Logistik-Software, Steuerungs-, Identifikations-, Bildverarbeitungs-, Sortier-, Kommissionier-, Palettier-, mechanische und pneumatische Förderer, Verpackungs- und Datentechnik bis hin zu Anbietern von Komplettsystemen.

Fördern: *„Nach der VDI-Richtlinie 2411 ist Fördern das Fortbewegen von Arbeitsgegenständen in einem System.“* [VDI70]

Fördertechnik: *„Die Technik des Fortbewegens von Gütern in beliebiger Richtung über begrenzte Entfernungen durch technische Hilfsmittel, einschließlich der Lehre über die Fördermittel und ihrer durch sie aufgebauten Systeme.“* [VDI70]

Fördermittel: *„Hiermit werden die jeweiligen technischen Transportmittel beschrieben, die innerhalb von örtlich begrenzten und zusammenhängenden Betriebsbereichen das Fördern bewerkstelligen. Transportmittel dienen nach DIN 30781 zur Ortsveränderung von Gütern oder Personen.“*

Förderanlage: *„Dabei handelt es sich um Anlagen unterschiedlicher Komplexität mit örtlich begrenztem Arbeitsbereich, in denen Fördermittel gleicher oder verschiedener Ausführung die systemspezifischen Aufgaben erfüllen.“* [VDI70]

Stetigförderer: *„Stetigförderer sind mechanische, pneumatische und hydraulische Fördereinrichtungen, bei denen das Fördergut auf festgelegtem Förderweg von Aufgabe- zu Abgabestelle stetig, mit wechselnder Geschwindigkeit oder im Takt bewegt wird. Sie werden ortsfest, fahrbar, tragbar oder rückbar ausgeführt und zu Förderungen von Schüttgut oder Stückgut eingesetzt.“* [DIN94]

Bandförderer: *„Stetigförderer mit endlosem umlaufenden Band (z. B. Gurt, Riemen, Seil) als Trag- und Zugorgan. Das Band wird von Tragrollen oder gleitend auf glatter Unterlage getragen.“* [DIN94]

Rollenbahn: *„Stetigförderer mit quer zur Förderrichtung angeordneten Rollen als Tragorgan. Form und Anordnung können dem Fördergut angepasst werden. Durch entsprechende Stellung der Achsen und mit geteilten oder kegeligen Rollen entsteht eine Kurvenrollbahn.“* [DIN94]

Rollenförderer (angetriebene Rollenbahn): *„Rollenbahn mit angetriebenen Rollen. Antrieb über Ketten, Gurt, Riemen, Zahnräder oder dergleichen.“* [DIN94]

Energieeffizienz: *„Das Verhältnis von Ertrag an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zu Energieeinsatz.“* [EUR06]

Energieeffizienzverbesserung: *„Die Steigerung der Endenergieeffizienz durch technische, wirtschaftliche und/oder Verhaltensänderungen.“* [EUR06]. Dabei wird unter Endenergie jener Teil der Primärenergie verstanden, der nach Übertragungs- und Umwandlungsverlusten übrig bleibt.

8.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung des Industriestrompreises in Deutschland (nach [BDE13])	1
Abbildung 1-2: Energiekostenverteilung in der Lieferkette (nach [KRA08])	4
Abbildung 2-1: Materialflusstechnische Aufgaben von Stückgutförderern (nach [ARN08], S. 614)	19
Abbildung 2-2: Fließlinienstruktur (a) und Netzwerkstruktur (b) in Materialflusssystemen mit Quellen (Q), Senken (S) und Vorgängen (V), (nach [ARF09] Abb. 1.1)	20
Abbildung 2-3: Systematik der Fördermittel für die Stückgutförderung (nach [JÜS00], S. 90) ..	21
Abbildung 2-4: Gängige Fördertechniktypen der Intralogistik (nach [JÜS00])	22
Abbildung 2-5: Konstruktiver Aufbau eines Förderers, Quelle: transnorm System GmbH	24
Abbildung 2-6: Auflösung eines Rollenförderers in Baugruppen (nach [BÖG09]; [WIE11])	24
Abbildung 2-7: Schematischer Aufbau von Antriebssträngen der Fördermittel	26
Abbildung 2-8: Prinzipdarstellung der Realisierung einer zentralen Antriebseinheit (400 V)	26
Abbildung 2-9: Prinzipdarstellung der Realisierung von dezentralen Antriebseinheiten (24 V) ..	27
Abbildung 2-10: Transporteinheiten auf einer Förderstrecke (nach [ARF09], S. 615)	31
Abbildung 2-11: Kategorien der Prüftechnik (nach [CZH10], S. 194)	40
Abbildung 3-1: Anforderungen, Aussage und Nutzen der Effizienzkennzahlen	42
Abbildung 3-2: Betrachtungsebenen der Kennzahlen (nach [HAL12], Abb. 15)	42
Abbildung 3-3: Systembetrachtung zur Energieeffizienz an Fördermitteln der Stetigfördertechnik	44
Abbildung 3-4: Typische Lastkurve eines Förderers (elektrischer Leistungsverlauf, qualitativ) ..	47
Abbildung 3-5: Zeitdauerkurve eines Förderers im Aussetzbetrieb über 200 s	48
Abbildung 3-6: Exemplarisches Lastkollektiv für vier Belastungen	50
Abbildung 3-7: Systemgrenzen für die Stetigfördertechnik (nach [LHJ13], Abb. 5)	53
Abbildung 3-8: Prozessschritt „Planung“ zur Kennzahlbestimmung	58
Abbildung 3-9: Prozessschritte „Messung“ und „Auswertung“	59
Abbildung 3-10: Übersicht über die Prozessschritte des Prüfverfahrens	60
Abbildung 4-1: Typischer elektrischer Leistungsverlauf einer Fördertechnik	69
Abbildung 4-2: Leistungs- bzw. Energiebetrachtung am Antriebsstrang	70
Abbildung 4-3: Schematisch in mehreren Detailebenen aufgegliederter Antriebsstrang	71
Abbildung 4-4: Strip-Down zur Bestimmung der Verluste von Rollensegment und Riemensystem	74
Abbildung 4-5: Strip-Down zur Bestimmung der Verluste einzelner Förderrollen inkl. Riemen	75

Abbildung 5-1: Rollenförderer mit Tangentialriemenantrieb inkl. Messaufbau.....	80
Abbildung 5-2: Prinzipskizze des Tangentialriemenförderers.....	81
Abbildung 5-3: Rollenförderer mit Motorrollenantrieb.....	82
Abbildung 5-4: Prinzipskizze des Motorrollenförderers.....	82
Abbildung 5-5: Bandfördererprüfstand mit Messsystem.....	83
Abbildung 5-6: Prinzipskizze des Bandförderers.....	84
Abbildung 5-7: Festlegung der Messpunkte (MP) im Messstellenplan.....	85
Abbildung 5-8: Leistungsmessung - (a) Verlauf der Wirkleistung MP2 und MP3, (b) Zeigerdiagramm MP2.....	88
Abbildung 5-9: Messaufbau zur Bestimmung der mechanischen Leistung - links Variante 1 und rechts Variante 2.....	89
Abbildung 5-10: Gemessene Spannungs- und Stromverläufe an einem Netzteil zur 24 V Bereitstellung.....	91
Abbildung 5-11.: Bandförderer-Prüfstand mit messtechnischem Prüfaufbau.....	93
Abbildung 5-12: Gemessener Leistungs- und Drehzahlverlauf mit Triggermarkierungen zur Filterung der Anfahrsitzen (P_{Trig}).....	95
Abbildung 5-13: Leistungsverlauf Einlaufphase Leerlauf, Messung Nr. 03.....	97
Abbildung 5-14: Leistungsverlauf in der Einlaufphase mit 25kg Beladung.....	98
Abbildung 5-15: Leistungsverlauf Messungen Nr. 11-14.....	99
Abbildung 5-16: Leistungsverlauf Messungen Nr. 15-18.....	100
Abbildung 5-17: Boxplot Messungen Nr. 11-18.....	101
Abbildung 5-18: Leistungsverlauf Nennlast mit Richtungsumschalter.....	101
Abbildung 5-19: Messwerte Betriebszustand Teillast.....	104
Abbildung 5-20: Messwerte Betriebszustand Nennlast.....	104
Abbildung 5-21: Schematische Darstellung des Rollenförderers mit Messpunkten.....	108
Abbildung 5-22: Leistungsverluste am Rollenförderer mit Zentralbandantrieb bei 50 kg Beladung	109
Abbildung 5-23: Schematische Darstellung des Motorrollenförderers mit Messpunkten.....	109
Abbildung 5-24: Leistungsverluste am Motorrollenförderer bei 50 kg Beladung.....	110
Abbildung 5-25: Schematische Darstellung des Bandförderers mit Messpunkten.....	111
Abbildung 5-26: Leistungsverluste am Bandförderer bei 50 kg Beladung.....	111
Abbildung 6-1: Gegenüberstellung des spezifischen Energiebedarfes der drei untersuchten Förderer.....	114

Abbildung 6-2: Sichtbarmachung von Optimierungsmaßnahmen der drei untersuchten Förderer	115
Abbildung 6-3: Szenarien für die Kennzahlbestimmung in unterschiedlichen Einsatzbereichen	117
Abbildung 6-4: Szenarien mit ermittelten spezifischen Energiebedarfen.....	118
Abbildung 6-5: Wirkungsgradverlauf von Asynchronmotoren ([DFB03]).....	122
Abbildung 6-6: Wirkungsgradkurven aus Messungen von Getriebemotoren, 0,37 kW + 0,75 kW	123
Abbildung 6-7: Wirkungsgradverläufe verschiedener Motortypen ([ABM12]).....	123
Abbildung 6-8: Relative Leistungsaufnahmen als Funktion der Last, bezogen auf Nennbeladung 50 kg.....	124

8.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übersicht gängiger Antriebsmotoren der Intralogistik	29
Tabelle 3-1: Übersicht der stationären Betriebszustände am Stetigförderer	48
Tabelle 3-2: Koeffizienten der Referenzbelastung (relativ).....	51
Tabelle 3-3: Zusammenfassung der geforderten Rahmenbedingungen	61
Tabelle 5-1: Technische Beschreibung - Versuchsaufbau Rollenförderer mit Zentralbandantrieb	81
Tabelle 5-2: Technische Beschreibung - Versuchsaufbau Rollenförderer mit Motorrollenantrieb	83
Tabelle 5-3: Technische Beschreibung - Versuchsaufbau Bandförderer	84
Tabelle 5-4: Messpunkte, Messgrößen und deren Anforderungen.	87
Tabelle 5-5: Spezifikation der Messkomponenten	90
Tabelle 5-6: Betriebszustände (Referenzbelastung) am Förderer	103
Tabelle 5-7: Ermittelte Leistungswerte der Förderer (Mittelwert und Standardabweichung)	105
Tabelle 5-8: Ermittelte Energieeinsätze gemäß Referenzarbeitsspiel der Förderer	105
Tabelle 5-9: Logistische Erträge im Referenzarbeitsspiel	106
Tabelle 5-10: Effizienz Kennzahlen der untersuchten Förderer	106
Tabelle 5-11: Struktur der Testsequenzen.....	107
Tabelle 5-12: Szenarien für Untersuchungen zur Optimierung am Bandförderer	112
Tabelle 5-13: Leistungsaufnahmen am Bandförderer, unterschiedliche Szenarien	113
Tabelle 5-14: Ermittelte Energieaufnahmen am Bandförderer, unterschiedliche Szenarien unter Referenzbelastung	113
Tabelle 5-15: Effizienz Kennzahlen der Optimierungsmaßnahmen am Bandförderer	113
Tabelle 6-1: Relative Betriebszeiten unterschiedlicher Einsatzszenarien	117
Tabelle 6-2: Leistungswerte zur Berechnung (Anm.: Relativwerte)	118