

# Analytische Energiebedarfsbestimmung von Intra-logistiksystemen in der Planungsphase

Analytical determination of the energy demand of intra-logistics systems in the planning phase

**Sebastian Habenicht**  
**Rainer Ertl**  
**Willibald A. Günthner**

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  
Technische Universität München

**D**ie Energieeffizienz von Intralogistiksystemen ist aus ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Gründen ein wichtiges Thema. Der Energiebedarf des intralogistischen Gesamtsystems wird bereits in der Planung maßgeblich festgelegt. Um eine Einbeziehung des Energiebedarfs bei der Auswahl der Planungsvariante zu ermöglichen, muss dieser aufwandsarm zu ermitteln sein. Dazu werden analytische Modelle zur Bestimmung des jährlichen Energiebedarfs sowohl für Stetigförderanlagen als auch für Regalbediengeräte entwickelt.

[Schlüsselwörter: Energieeffizienz, Grüne Logistik, Stetigförderanlagen, Regalbediengeräte]

**E**nergy efficiency of intralogistical systems is an important issue for reasons of ecology, economy and society. The energy demand of the whole intralogistical system is already decisively determined in the planning. To allow inclusion of the energy demand in the variant selection during the planning phase, this demand has to be identified with low expenditure. For this purpose, analytical models are developed to determine the annual energy requirement for both continuous conveyor systems and stacker cranes.

[Keywords: energy efficiency, green logistics, continuous conveyor systems, stacker crane]

## 1 EINLEITUNG

Hohe Energiekosten, politische Entscheidungen und die wachsende Bedeutung der Nachhaltigkeit als Image-träger rücken die Energieeffizienz auch für Planer von intralogistischen Anlagen stärker in den Fokus. Eine Kernfrage, die sich dabei jeder Betrachter stellt, ist die nach der Höhe des Energiebedarfs des Geräts, der Anlage oder des gesamten Systems. Um diesbezüglich Aussagen treffen zu

können, bestehen verschiedene Ansätze zur Energiebedarfsermittlung. Eine Bestimmung kann durch Schätzungen, Berechnungen, Simulationen oder Messungen erfolgen. Insbesondere die letztgenannten Möglichkeiten benötigen allerdings einen hohen Zeitaufwand bei ihrer Durchführung und eignen sich für den Einsatz in der Planungsphase nur bedingt [Hab13]. Analytische Berechnungsansätze weisen hinsichtlich des zeitlichen Aufwands bei der Anwendung große Vorteile gegenüber der Simulation auf und führen zu ausreichend genauen Ergebnissen [Ert13].

Am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München werden analytische Berechnungsmodelle für die Energiebedarfsermittlung in der Planungsphase von verschiedenen intralogistischen Anlagen entwickelt, die auch eine Abbildung ganzer Intralogistiksysteme ermöglichen. Aufgrund der großen Verbreitung werden Stetigförderanlagen und Regalbediengeräte untersucht.

## 2 ENERGIEBEDARFSERMITTLUNG VON STETIGFÖRDERANLAGEN

Stetigförderanlagen für Großladungsträger (GLT) sind ein wesentlicher Bestandteil von Intralogistiksystemen und in einer großen Anzahl verbaut. Demzufolge ist der Energiebedarf dieser Anlagen bei der Systembetrachtung nicht zu vernachlässigen. Insbesondere Tragkettenförderer werden aufgrund ihrer robusten Bauweise, der Möglichkeit zum Quertransport der Fördereinheiten und wegen Kostenvorteilen gegenüber Rollenförderern häufig eingesetzt. Sie besitzen jedoch aufgrund der Kettenreibung einen hohen Energiebedarf [Som11]. Auch die Stetigfördertechnik für Kleinladungsträger (KLT) umfasst nicht selten mehrere 100 Meter an Fördertechnik, was zu einer hohen aufsummierten Antriebsleistung sowie hohen Energiekosten führt [Hop13].

Die bisherigen Analysen des Energiebedarfs von Stetigförderern erfolgen durch messtechnische Untersuchungen. Zum einen werden Tragkettenförderer (GLT) analysiert, zum anderen werden Versuche an verschiedenen Ausführungsformen von angetriebenen Rollenförderern (KLT) durchgeführt [Hop13]. Im Fokus der Energiebedarfsmessungen am Tragkettenförderer steht der Einfluss der identifizierten Nutzungsfaktoren auf den Energiebedarf [Hop12]. Ziel der Messung von Rollenförderern ist unter anderem die Untersuchung verschiedener Antriebskonfigurationen hinsichtlich des Energiebedarfs [Jod12]. Mittels der gewonnenen Erkenntnisse erfolgt das Aufzeigen von Energieeinsparpotenzialen bei der Wahl des Antriebes durch den Vergleich der Lebenszykluskosten verschiedener Varianten [Jod13]. Die jährlichen Energiekosten werden auf Basis der jährlichen Betriebsstunden ermittelt. Eine detailliertere Bestimmung in Abhängigkeit des Durchsatz erfolgt nicht und wird von keinen der Autoren vorgestellt.

Stetigfördermittel, die zur Förderung von Stückgütern eingesetzt werden, weisen häufig eine zyklische Betriebsweise auf, wodurch der jährliche Energiebedarf durch die Summierung des Energiebedarfs je Zyklus ermittelt werden kann. Ein Zyklus besitzt eine feste Anzahl an Fördereinheiten, die transportiert werden. Diese Anzahl wird auch häufig als Blockgröße oder Pulklänge bezeichnet. Der Beginn eines Zyklus stellt entweder das Beschleunigen des Fördermittels ohne Beladung oder das Eintreffen der ersten Fördereinheit des Zyklus dar. Durch das Verzögern des Fördermittels bis auf  $v=0$  oder die Ankunft der ersten Fördereinheit des nächsten Zyklus endet dieser Zyklus.

Der Verlauf der elektrischen Leistung innerhalb eines beispielhaften Zyklus für einen Kettenförderer ist Abbildung 1 zu entnehmen. In diesem Diagramm sind auf der Sekundärachse zusätzlich die Anzahl der sich auf dem Förderer befindenden Fördereinheiten, die alle die gleiche Masse besitzen, dargestellt. Im betrachteten Fall werden zwei Fördereinheiten in einem Zyklus gefördert. Der Energiebedarf des Zyklus ergibt sich aus dem Integral der elektrischen Leistung über die Zeit und stellt somit die Fläche unterhalb der grauen Linie dar.

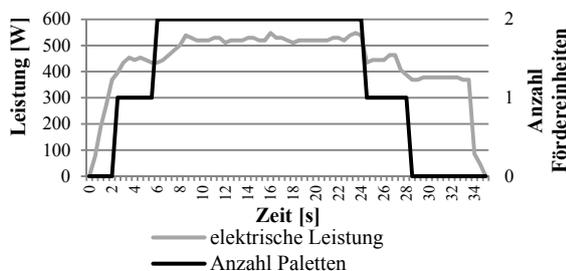


Abbildung 1. Zeitlicher Verlauf eines Zyklus

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die elektrische Leistung über der Zeit nicht konstant ist. Unter der

Berücksichtigung der Anzahl an Fördereinheiten, die sich zu den jeweiligen Zeitpunkten auf dem betrachteten Förderer befinden, lassen sich folgende Beobachtungen formulieren:

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

Durch eine reine Betrachtung der Laufzeit zur Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs würden die unterschiedlichen Zustände hinsichtlich der Anzahl an Fördereinheiten und folglich die unterschiedlichen elektrischen Leistungen unberücksichtigt bleiben. Folglich erscheint es zielführend, den jährlichen Energiebedarf zyklusabhängig zu modellieren. Um den Energiebedarf eines Zyklus bestimmen zu können, erfolgt die Diskretisierung des Leistungsverlaufs in Abhängigkeit von der Anzahl an Fördereinheiten, die sich auf dem Förderer befinden (vgl. Abbildung 2).

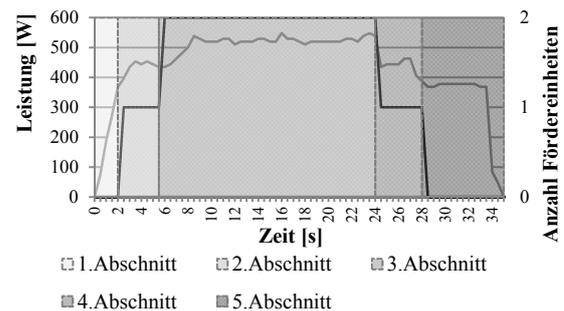


Abbildung 2. Abschnitte eines Zyklus

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

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

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

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

$$E_{\text{Jahr}} = \sum_{i=1}^m n_i \cdot E_i \quad (2)$$

## 2.1 MODELLIERUNG DER ELEKTRISCHEN LEISTUNG

Für die Modellierung der elektrischen Leistung muss in einem ersten Schritt Kenntnis über die Komponenten eines Fördermittels sowie deren Einflussgrößen gewonnen werden. Um dieses Ziel zu erreichen, erfolgt die Systemanalyse des Stetigförderers. Die Inputgrößen stellen Steuerungssignale sowie der Strom vom Versorgungsnetz dar. Der Strom gelangt über einen Umrichter oder direkt zu einem Motor. Letzterer transformiert die elektrische Leistung in mechanische Leistung, welche mittels Getriebe- und anderer Übertragungselemente auf die Trag- und Zugmittel übertragen wird.

Jedes der aufgeführten Elemente weist Verluste auf, wodurch die elektrische Leistung am Systemeingang beeinflusst wird. Diese werden durch Wirkungsgrade berücksichtigt. Um diese zu bestimmen, erfolgt analog zum Vorgehen bei der Motordimensionierung die Ermittlung der mechanischen Leistung an der Motorwelle (vgl. [SEW13, Tor97]). Unter Berücksichtigung der Wirkungsgrade vom Motor sowie des Umrichters kann die elektrische Leistung des Fördermittels bestimmt werden:

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

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

Im Folgenden wird am Beispiel des Tragkettenförderers dargestellt, wie die Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten ermittelt werden können.

### 2.1.1 FREQUENZUMRICHTER

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

Der Wirkungsgrad aktueller Frequenzumrichter liegt über 96 % [Wol13]. Messungen an einer für Fördertechnik typischen Antriebskonfiguration zeigen, dass der betrachtete Frequenzumrichter einen Eigenverbrauch von 15 Watt besitzt und für den Betrieb im Nennpunkt 50 Watt aufnimmt [Tie13]. Dies entspricht im untersuchten Fall einem Wirkungsgrad von ca. 95 %.

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

## 2.1.2 MOTOR

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

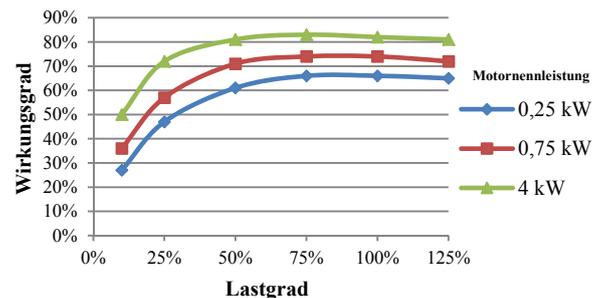


Abbildung 3. Wirkungsgrade verschiedener Drehstrom-Asynchronmotoren [Rud08]

Insbesondere bei kleinen Motornennleistungen ( $P_{\text{Nenn}} \leq 1,1 \text{ kW}$ ), die eine typische Motorgröße in der Stetigfördertechnik darstellen, ist eine starke Abhängigkeit zwischen Wirkungsgrad und Lastgrad zu erkennen. Da Stetigförderer häufig im Teillast-Betrieb arbeiten ist eine Abbildung der aufgezeigten Abhängigkeiten unumgänglich, um die elektrische Leistung zu modellieren. Dafür muss zuerst die an der Motorwelle anliegende mechanische Leistung bestimmt und daraus der Lastgrad ermittelt werden. Durch die Interpolation innerhalb der Wirkungsgrad-Kennlinien kann der tatsächliche Wirkungsgrad bestimmt werden.

### 2.1.3 GETRIEBE UND ANDERE ÜBERTRAGUNGSELEMENTE

Die mechanische Leistung des Motors wird über ein Getriebe und verschiedene Übertragungselemente auf das Zug-/ Tragmittel transformiert. Abbildung 4 zeigt schematisch die verschiedenen mechanischen Elemente eines Tragkettenförderers. Dazu zählen unter anderem Getriebe, die Kettenübersetzung sowie die Tragkette.

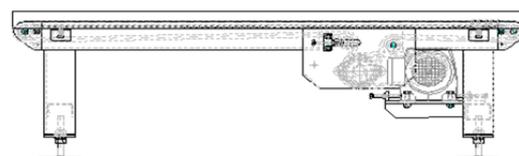


Abbildung 4. Schematische Darstellung eines Kettenförderers (Quelle: <http://www.tls-web.de>)

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

- Stirnradgetriebe
- Kegelradgetriebe
- Flachgetriebe
- Schneckengetriebe
- Planetengetriebe

Diese Getriebearten besitzen Wirkungsgrade von 50 Prozent (Schneckengetriebe mit einer hohen Übersetzung) bis zu 99 Prozent (Planetengetriebe) je Getriebestufe [Nie83]. Die Wirkungsgrade sind im betrachteten Bereich größtenteils lastunabhängig und können somit als konstant abgebildet werden.

Beim betrachteten Tragkettenförderer dienen Ketten als Zug- und Tragmittel, welche auf Schienen (aus Stahl oder Kunststoff) gleiten oder auf ihren Gelenken rollen [Hom07]. Die resultierende Reibkraft  $F$  kann mittels folgender Formel berechnet werden:

$$F = m_{ges} \cdot g \cdot \mu \quad (4)$$

mit  $g$  für die Erdbeschleunigung,  $\mu$  für den Reibbeiwert und  $m_{ges}$  für die bewegte Masse aus den Gewichten der Fördereinheiten sowie des Kettengewichts.

Die Reibwerte variieren in Abhängigkeit der Materialbeschaffenheit der Schiene sowie der Schmierung (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1. Reib-/Rollbeiwert für Tragketten [Rex13]

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

Aus der berechneten Reibkraft  $F$  kann unter der Berücksichtigung der Geschwindigkeit  $v$  des Förderers die mechanische Leistung an der Motorwelle  $P_{mechanisch}$  bestimmt werden:

$$P_{mechanisch} = F \cdot v / \eta \quad (5)$$

mit  $\eta$  für den Wirkungsgrad aus Getriebe, Übertragungselementen sowie Trag- und Zugmittel.

## 2.2 MODELLIERUNG DER LAUFZEIT

Nachdem im vorherigen Abschnitt ein Modell für die Bestimmung der elektrischen Leistung in Abhängigkeit des Fördergewichts aufgezeigt werden konnte, werden im Folgenden Möglichkeiten zur Bestimmung der Zyklus-

häufigkeit und der Zeitanteile der einzelnen Zyklusabschnitte dargestellt.

### 2.2.1 ERMITTLUNG DER ZYKLUSHÄUFIGKEIT

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

Der zeitliche Abstand zwischen zwei Fördereinheiten wird durch die Quelle, die den Systemeingang darstellt, vorgegeben. Quellen können mittels Verteilungen der Zwischenankunftszeiten beschrieben werden. Die wichtigste Verteilung in diesem Zusammenhang stellt die um den Mindestabstand verschobene Exponentialverteilung dar [Arn09, Mei06]. Ein Beispiel zu einer Ankunftsverteilung inkl. eingezeichnetem Abrisskriterium von 20 s zeigt Abbildung 5.

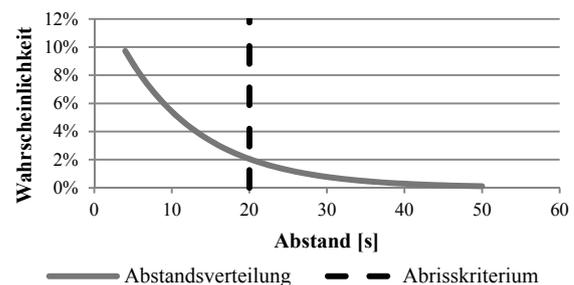


Abbildung 5. exponential verteilte Abstände einer Quelle

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

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

$$n_i = M \cdot q \cdot (1 - q)^{i-1} / i \quad (6)$$

mit  $M$  für die Anzahl Fördereinheiten im Jahr.

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

$$n_N = M \cdot (1 - q)^{N-1} / N \quad (7)$$

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

### 2.2.2 LAUFZEITEN JE ZYKLUS

Wie bereits in Abbildung 2 gezeigt werden konnte, kann die Fördermittellaufzeit für einen Zyklus durch die Summierung der einzelnen Zeitanteile der Abschnitte bestimmt werden. Für die Ermittlung der einzelnen Zeitabschnitte des Zyklus erfolgt die Abstrahierung der Fördereinheiten zu Punktmassen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Punktmasse im Flächenmittelpunkt der Fördereinheit befindet. Im Idealfall stellt der Flächenmittelpunkt auch den Massenschwerpunkt dar.

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

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

$$t_j = 2 \cdot (l_F + l_A) / v \quad (8)$$

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

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

$$t_j = [l - (J - 1) \cdot l_F - (J - 1) \cdot l_A] / v \quad (9)$$

mit  $l$  für die Länge des Förderers.

## 2.3 ZUSAMMENFÜHRUNG DER MODELLE

In den letzten beiden Abschnitten konnten Modelle aufgestellt werden, die zum einen die elektrische Leistung von Stetigförderern modellieren und zum anderen die Laufzeit abbilden. Die Kombination und die Reihenfolge der einzelnen Modelle mit dem Ziel, den jährlichen Energiebedarf zu ermitteln, zeigt Abbildung 6.

Mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes ist es möglich, den jährlichen Energiebedarf unter der Berücksichtigung der Blockgröße sowie eines Abrisskriteriums zu bestimmen. Vereinfachungen werden hinsichtlich der Abbildung des Massenspektrums sowie bei der detaillierten Abbildung der elektrischen Leistung getroffen. Auch bleibt unberücksichtigt, wie sich die Zykushäufigkeit innerhalb einer Stetigförderanlage, beispielsweise durch Verteil- oder Zusammenführungselemente, verändert. Insbesondere letztgenanntes soll durch zukünftige Forschungsarbeiten näher untersucht werden, mit dem Ziel eine analytische Abbildung des Energiebedarfs einer Stetigförderanlage zu ermöglichen.

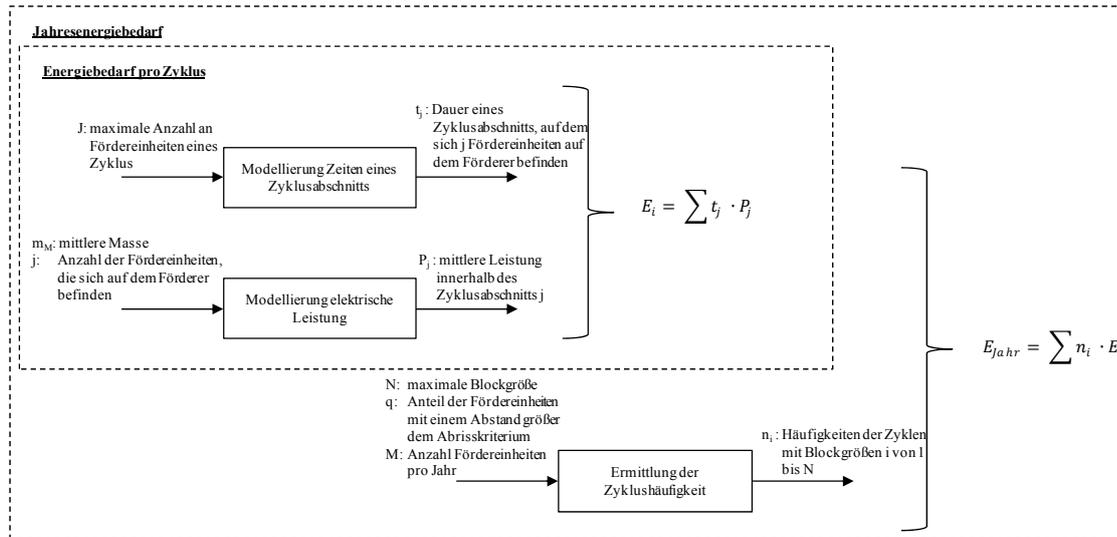


Abbildung 6. Ablauf bei der Ermittlung des jährlichen Energiebedarfs

### 3 ENERGIEBEDARFSERMITTLUNG FÜR REGALBEDIENGERÄTE

Regalbediengeräte in automatischen Kleinteilelagern und Paletten-Hochregallagern sind oftmals das Herzstück von Intralogistiksystemen. Bedingt durch ständige Beschleunigungs- und Bremsvorgänge bei gleichzeitig großen bewegten Massen haben Regalbediengeräte in Intralogistiksystemen ebenfalls einen großen Anteil am Energieverbrauch.

#### 3.1 EINFLUSSGRÖßEN AUF DEN ENERGIEBEDARF

Der Energiebedarf für den automatischen Betrieb von Lagern mit Regalbediengeräten ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. Diese lassen sich entsprechend Abbildung 7 in vier Kategorien strukturieren, nämlich in Lagerbewirtschaftungsstrategien, Lagerkonfiguration, Antriebskonfiguration und Verfahrsstrategien.

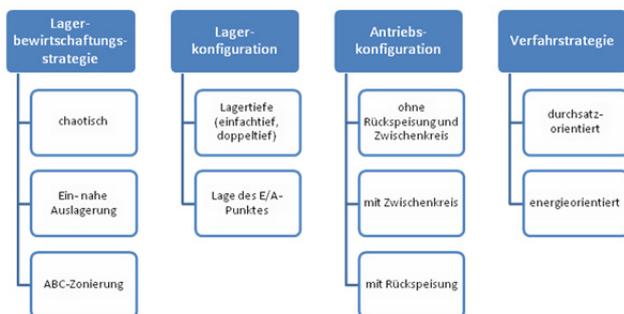


Abbildung 7. Einflussgrößen auf den Energiebedarf von Regalbediengeräten

Da sich die Ausprägungsformen aus diesen Kategorien praktisch beliebig kombinieren lassen, ergibt sich ein breites Spektrum an Modifikationen, die den Energiebedarf von automatischen Lagern mit Regalbediengeräten prägen. Dies macht es unabdingbar, bei der Beschreibung eines Energiemodells für solche Systeme entsprechende Annahmen zu treffen.

#### 3.2 ANNAHMEN FÜR DAS ENERGIEBEDARFSMODELL

Es ist folglich nicht möglich eine geschlossene analytische Berechnungsformel für den Energiebedarf mit Berücksichtigung sämtlicher Einflussgrößen zu entwickeln. Deshalb ist es für die analytische Berechnung notwendig Annahmen bezüglich der verschiedenen Einflussgrößen zu treffen. Im vorliegenden Fall wird für die vier aufgeführten Einflussklassen exemplarisch folgende Konfiguration betrachtet:

- Lagerbewirtschaftungsstrategie: Chaotische Lagerung
- Lagerkonfiguration: Einfachtiefe Lagerung; E/A-Punkt auf unterster Lagerebene
- Antriebskonfiguration: mit Rückspeisung
- Verfahrsstrategie: durchsatzorientiert

Für diese Betrachtungsebene gilt es im Folgenden einen Ansatz zur analytischen Berechnung des mittleren Energiebedarfs eines Regalbediengerätes zu entwickeln.

### 3.3 MODELLIERUNG DES ENERGIEBEDARFS

Im verwendeten Modellansatz wird zunächst der Energiebedarf für eine einzelne Bewegung ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ) in der Regalwand (vgl. Abbildung 8) beschrieben. Die verwendeten Größen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Der Parameter  $x_0$  entspricht derjenigen Fahrstrecke, die zum Beschleunigen auf Maximalgeschwindigkeit  $v_x$  und zum unmittelbar anschließenden Abbremsen bis zum Stillstand benötigt wird:

$$x_0 = \frac{v_x^2}{a_x} \quad (10)$$

Rotatorische Energieanteile zur Überwindung von Massenträgheitsmomenten werden in diesem analytischen Berechnungsansatz vernachlässigt. Die bei der Antriebskonfiguration „mit Rückspeisung“ vorhandene Zwischenkreis Kopplung zwischen Hub- und Fahrtrieb ist bei den nachfolgenden energetischen Grundgleichungen nicht berücksichtigt.

Folgende Energieanteile sind somit für die einzelne Bewegung zu unterscheiden:

- Kinetische Energie des Fahrtriebs

- für  $|\Delta x| < x_0$ :

$$E_{x,kin} = \frac{1}{\eta_x} \cdot \frac{1}{2} \cdot M \cdot a_x \cdot |\Delta x| \quad (11)$$

- für  $|\Delta x| \geq x_0$ :

$$E_{x,kin} = \frac{1}{\eta_x} \cdot \frac{1}{2} \cdot M \cdot v_x^2 \quad (12)$$

- Reibungsenergie des Fahrtriebs

- für  $|\Delta x| < x_0$ :

$$E_{x,r} = \frac{1}{\eta_x} \cdot w_x \cdot \frac{1}{2} \cdot M \cdot g \cdot |\Delta x| \quad (14)$$

- für  $|\Delta x| \geq x_0$ :

$$E_{x,r} = \frac{1}{\eta_x} \cdot w_x \cdot M \cdot g \cdot \left( |\Delta x| - \frac{x_0}{2} \right) \quad (15)$$

- Rückspeisefähige Energie des Fahrtriebs

- für  $|\Delta x| < x_0$ :

$$E_{x,R} = -\eta_R \eta_x \cdot \frac{1}{2} \cdot M \cdot (a_x - w_x g) \cdot |\Delta x| \quad (16)$$

- für  $|\Delta x| \geq x_0$ :

$$E_{x,R} = -\eta_R \cdot \eta_x \cdot \frac{1}{2} \cdot M \cdot (v_x^2 - w_x \cdot g \cdot x_0) \quad (17)$$

- Potenzielle Energie des Hubtriebs

- für  $\Delta y > 0$ :

$$E_{y,pot} = \frac{1}{\eta_y} \cdot m \cdot g \cdot \Delta y \quad (18)$$

- für  $\Delta y \leq 0$ :

$$E_{y,pot} = 0 \quad (19)$$

- Reibungsenergie des Hubtriebs

- für  $\Delta y > 0$ :

$$E_{y,r} = \frac{1}{\eta_y} \cdot w_y \cdot m \cdot g \cdot \Delta y \quad (20)$$

- für  $\Delta y \leq 0$ :

$$E_{y,r} = 0 \quad (21)$$

- Rückspeisefähige Energie des Hubtriebs

- für  $\Delta y > 0$ :

$$E_{y,R} = 0 \quad (22)$$

- für  $\Delta y \leq 0$ :

$$E_{y,R} = -\eta_R \cdot \eta_y \cdot (1 - w_y) \cdot m \cdot g \cdot |\Delta y| \quad (23)$$

- Grundlastverbrauch

$$E_{GL} = P_{GL} \cdot t_f \quad (23)$$

Tabelle 2. Verwendete Parameter für die Energieanteile

$\Delta x$	Fahrstrecke [m]
$\Delta y$	Hubstrecke [m]
M	Gesamtmasse [kg]
m	Hubmasse [kg]
$m_N$	Nutzlast [kg]
g	Erdbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]
$a_x$	Fahrbeschleunigung / -verzögerung [m/s <sup>2</sup> ]
$v_x$	Maximale Fahrgeschwindigkeit [m/s]

$w_x$	Widerstandsbeiwert des Fahrtrieb [-]
$w_y$	Widerstandsbeiwert des Hubtriebs (Umrechnung des Beiwerts notwendig für Bezug auf Gewichtskraft) [-]
$\eta_x$	Gesamtwirkungsgrad des Fahrtriebs [-]
$\eta_y$	Gesamtwirkungsgrad des Hubtriebs [-]
$P_{GL}$	Grundlast [W]
$t_f$	Fahrzeit [s]
$\eta_R$	Wirkungsgrad Energierückgewinnung [-]

Nach der Beschreibung der Grundformeln für die einzelnen Energieanteile eines Verfahrensvorgangs erfolgt im Folgenden die Herleitung von Bestimmungsgleichungen für beliebige Einzelspiele von Regalbediengeräten.

### 3.4 ANSATZ ZUR ANALYTISCHEN BERECHNUNG DES ENERGIEBEDARFS FÜR EIN EINZELSPIEL

Zur Herleitung einer Berechnungsformel für den Energiebedarf bei einem beliebigen Einzelspiel muss die Regalwand entsprechend Abbildung 8 in die Bereiche B1 bis B4 unterteilt werden. Hierbei zeigt Abbildung 8 die Unterteilung exemplarisch für ein System mit kritischem (Regalwand-)Faktor  $f_w > 1$  ( $f_w$  gemäß [VDI3561]).

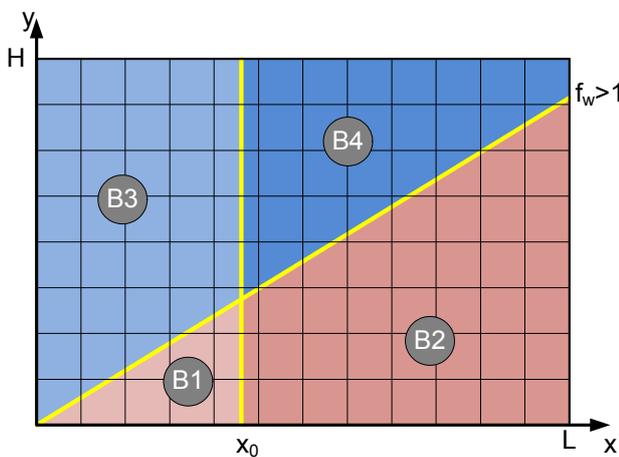


Abbildung 8. Einteilung der Regalwandfläche in Bereiche (für  $f_w > 1$ )

Die Unterteilung ist notwendig, da die Berechnungsformel in den vier Bereichen jeweils eine unterschiedliche analytische Form annimmt.

So ist der Energieverbrauch aus der Grundlast  $E_{GL}$  von der (fach-)individuellen Fahrzeit  $t_f(x,y)$  abhängig. Die Bestimmungsgleichung der Fahrzeit  $t_f$  richtet sich nach der Lage des Zielfaches im hubzeit- oder im fahrzeitkritischen Bereich der Regalwandfläche. Nach [Arn09] werden diese beiden Bereiche durch die Gerade

$y = \frac{\bar{v}_y}{\bar{v}_x} \cdot x$  getrennt ( $\bar{v}_y$  mittlere Hubgeschwindigkeit,  $\bar{v}_x$  mittlere Fahrgeschwindigkeit). In Abbildung 8 liegt der hubzeitkritische Bereich oberhalb, der fahrzeitkritische Bereich unterhalb dieser Geraden.

Ferner ist der Term für die kinetische Energie  $E_{x,kin}$  von der (fach-)individuell erreichbaren Maximalgeschwindigkeit  $\hat{v}_x(x)$  abhängig. Insofern muss in Abbildung 8 zusätzlich noch eine vertikale Grenzgerade  $x = x_0$  eingeführt werden. Im rechten Bereich bezüglich dieser Geraden erreicht der Fahrtrieb stets die Maximalgeschwindigkeit  $v_x$ .

Bei Betrachtung eines (Einlagerungs-)Einzelspiel setzt sich das Arbeitsspiel nun aus folgenden Zeitanteilen zusammen:

- $t_{E/A}$ : Zeitbedarf zur Aufnahme einer Ladeinheit beim Lagerwandursprung E/A
- $t_f$ : (Hin-)Fahrdauer von E/A zum Einlagerungspunkt P1 (beladen)
- $t_{E/A}$ : Einlagerungsvorgang bei P1
- $t_f$ : (Rück-)Fahrdauer von P1 nach E/A (unbeladen)

Werden nun die Gleichungen (in Kapitel 3.3) für die Energieanteile bei einem vollständigen Einzelspiel (ES) mit Einlagerung angewendet, so resultiert zum Beispiel für den Bereich B1 mit dem Definitionsbereich  $x \in [0; \frac{v_x^2}{a_x}]$  und  $y \in [0; \frac{\bar{v}_y}{\bar{v}_x} \cdot x]$  folgender Berechnungsansatz:

$$\begin{aligned}
 E_{ES,B1}(x,y) &= \frac{1}{\eta_y} \cdot m \cdot g \cdot (1 + w_y) \cdot y - \eta_R \cdot \eta_y \\
 &\cdot (1 - w_y) \cdot (m - m_N) \cdot g \cdot y + \frac{1}{\eta_x} \cdot \frac{1}{2} \\
 &\cdot (2 \cdot M - m_N) \cdot (a_x + w_x \cdot g) \cdot x - \eta_R \\
 &\cdot \eta_x \cdot \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot M - m_N) \cdot (a_x - w_x \cdot g) \cdot x \\
 &+ P_{GL} \cdot (2 \cdot t_f + 2 \cdot t_{EA}) + \bar{P}_{EA} \cdot 2 \cdot t_{EA}
 \end{aligned} \quad (24)$$

Obige Gleichung berücksichtigt auch einen Energieanteil für das Ein-/Auslagern, der vereinfacht über die mittlere Leistung  $\bar{P}_{EA}$  beim Ein-/Auslagern und der hierfür notwendigen Zeit  $t_{EA}$  abgebildet wird.

Für den Fall, dass sich die Zielregalfächer in den anderen Bereichen B2 bis B4 befinden, ist bei der Herleitung der Gleichungen zur Berechnung des Energiebedarfs für ein individuelles Arbeitsspiel analog vorzugehen. Auf Basis der Gleichungen für sämtliche vier Bereiche B1 bis B4 können nunmehr Überlegungen zur Ermittlung des mittleren Energieverbrauchs pro Einzelspiel angestellt werden.

### 3.5 BERECHNUNG DES MITTLEREN ENERGIEBEDARFS FÜR EINZELSPIELE

Den Erwartungswert des Energiebedarfs für ein Einzelspiel zwischen dem Ein-/ Auslagerpunkt und allen n Lagerplätzen des Regals wird wie folgt ermittelt:

$$E(E_{ES}) = \bar{E}_{ES} = \sum_{i=1}^n E_{ES,i} \cdot p_i \quad (25)$$

Dabei ist  $p_i$  die Wahrscheinlichkeit, mit der ein i-ter Lagerplatz angefahren wird. Sofern man für  $p_i$  eine diskrete Gleichverteilung über alle n Lagerplätze annimmt, so gilt:

$$\bar{E}_{ES} = \sum_{i=1}^n \frac{E_{ES}}{n} \quad (26)$$

Im Hinblick auf die angestrebte analytische Berechnung sind neben den Abmessungen L und H der Regal-

$$\begin{aligned} \bar{E}_{ES,E} = & \frac{1}{2} \\ & \cdot \left[ \frac{1}{\eta_y} \cdot (1 + w_y) \cdot m \cdot g \cdot H - \eta_R \cdot \eta_y \cdot (1 - w_y) \cdot (m - m_N) \cdot g \cdot H + \frac{1}{\eta_x} \cdot (2 \cdot M - m_N) \right. \\ & \cdot \left( v_x^2 \cdot \left( 1 - \frac{x_0}{2 \cdot L} \right) + w_x \cdot g \cdot \left( L - x_0 + \frac{x_0^2}{2 \cdot L} \right) \right) - \eta_R \cdot \eta_x \cdot (2 \cdot M - m_N) \cdot v_x^2 \cdot \left( 1 - \frac{g}{a_x} \cdot w_x \right) \\ & \cdot \left. \left( 1 - \frac{x_0}{2 \cdot L} \right) \right] + 2 \cdot (P_0 + P_{EA}) \cdot t_{EA} + P_0 \cdot \frac{L}{v_x} \cdot \left( f_w + \frac{1}{3 \cdot f_w} \right) \end{aligned} \quad (28)$$

Eine analoge Vorgehensweise kann angewendet werden, wenn das Regalbediengerät Doppelspiele als Arbeitsspiele durchführt.

### 3.6 BERECHNUNG DES MITTLEREN ENERGIEBEDARFS FÜR DOPPELSPIELE

Beim nun betrachteten Doppelspiel mit Einlagerungspunkt P1 und Auslagerungspunkt P2 setzt sich das Arbeitsspiel jeweils aus folgenden Teilvorgängen zusammen:

- Aufnahme einer Ladeinheit bei E/A
- Einlagerungsfahrt von E/A nach P1 (beladen)
- Einlagerungsvorgang bei P1
- Fahrt von P1 nach P2 (unbeladen)
- Auslagerungsvorgang bei P2
- Auslagerungsfahrt von P2 nach E/A (beladen)
- Abgabe einer Ladeinheit bei E/A

wand die Lagerwandfläche  $A = L \cdot H$  und ein Lagerwandflächenelement  $\Delta A = \Delta x \cdot \Delta y$  einzuführen. Somit gilt für die Anzahl n der Lagerfächer:

$$n = \frac{A}{\Delta A} = \frac{L \cdot H}{\Delta x \cdot \Delta y} \quad (26)$$

Setzt man diese Größen in die obige Summenformel für  $\bar{E}_{ES}$  ein und führt den differenziellen Übergang durch, so resultiert folgender Integralansatz:

$$\bar{E}_{ES} = \frac{1}{A} \int_0^H \int_0^L E_{ES}(x, y) dx dy \quad (27)$$

Durch Auflösen der Doppelintegrale für die vier Bereiche in Abbildung 8 resultiert schließlich folgende Bestimmungsgleichung zur Berechnung des mittleren Energieverbrauchs für eine Einlagerung ( $f_w > 1$ ):

Die Ermittlung des mittleren Energieverbrauchs für die Ein- und Auslagerungsfahrt bedarf keiner weiteren Untersuchung, da die Lösung von der Problemstellung des Einzelspiels übernommen werden kann. Einer gesonderten Betrachtung wird beim Doppelspiel die unbeladene Fahrt vom Einlagerungspunkt P1 zum Auslagerungspunkt P2 unterzogen, zumal hier nicht nur der Zielpunkt P2, sondern auch der Startpunkt P1 dieser Bewegung jeweils beliebig wählbar ist. Dies erhöht drastisch den Komplexitätsgrad der Aufgabe, eine Bestimmungsgleichung für den mittleren Energieverbrauch bei diesem Teilvorgang herzuleiten. In diesem Fall resultiert letztendlich ein Vierfachintegral wie folgt:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{DS,P1P2} &= \frac{1}{A^2} \int_0^H \int_0^L \int_0^H \int_0^L E_{DS}(x_1, y_1, x_2, y_2) dx_2 dy_2 dx_1 dy_1 \\ & \quad (29) \end{aligned}$$

Die Vorgehensweise und der Aufwand zur Lösung des vorgenannten Integrals werden im Folgenden exemp-

larisch nur für den Energieanteil der kinetischen Energie aufgezeigt. In Abbildung 9 wird die Fallkonstellation vorgestellt, dass sich der Einlagerungspunkt  $P_1$  im (Start-)Bereich  $B_1$  befindet, während der Auslagerungspunkt  $P_2$  wahlweise in den (Ziel-)Gebieten  $G_1$ ,  $G_2$  oder  $G_3$  liegt. Das Gebiet  $G_2$  mit der konstanten Breite  $x_0$  verändert seine Lage in Abhängigkeit von der Position von  $P_1$ .

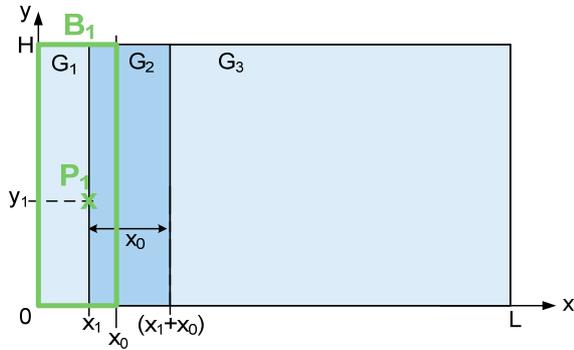


Abbildung 9. Exemplarische Unterteilung der Regalwand in Bereiche (für  $P_1$ ) und Gebiete (für  $P_2$ )

Allein für diese Konstellation resultieren somit drei unterschiedliche Vierfachintegrale, die zunächst aufzustellen und sodann analytisch zu lösen sind. Für den Fall, dass  $P_1$  in Bereich  $B_1$  liegt, ergibt sich folgende Integraldarstellung:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{DS,P1P2,B1,kin} &= \frac{1}{A^2} \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\eta_x} - \eta_R \eta_x \right) (M - m_N) \\ &\cdot \left( a_x \left( \int_0^{x_0} \int_0^H \int_0^{x_1} \int_0^H (x_1 - x_2) dy_2 dx_2 dy_1 dx_1 \right. \right. \\ &+ \left. \int_0^{x_0} \int_0^H \int_{x_1}^{x_1+x_0} \int_0^H (x_2 - x_1) dy_2 dx_2 dy_1 dx_1 \right) \\ &+ \left. v_x^2 \int_0^{x_0} \int_0^H \int_{x_1+x_0}^L \int_0^H dy_2 dx_2 dy_1 dx_1 \right) \end{aligned} \quad (30)$$

Ähnliche Berechnungsschritte mit Analyse und Definition von unterschiedlichen Startbereichen  $B_i$  und Zielgebieten  $G_i$ , dem Aufstellen und Lösen der entsprechenden Vierfachintegrale sind für sämtliche weiteren Energieanteile durchzuführen. Als Gesamtergebnis für den mittlere Energiebedarf eines Doppelspiels ergibt sich schließlich für  $f_W > 1$  der Zusammenhang nach Formel (31). Mit Hilfe der Berechnungsformeln für die mittlere Energie von Einzel- und Doppelspiel kann nun sehr schnell und einfach auch schon in der Planungsphase der Energiebedarf von Regalbediengeräten ermittelt werden.

$$\begin{aligned} \bar{E}_{DS} &= \frac{1}{\eta_y} \left( (1 + w_y) - \eta_R \eta_y^2 (1 - w_y) \right) \left( \frac{2}{3} m - \frac{1}{6} m_N \right) gH \\ &+ \frac{w_x}{\eta_x} MgL \left( \frac{4}{3} + (1 - \eta_R \eta_x^2) \cdot \left( -\frac{3x_0}{2L} + \frac{x_0^2}{L^2} - \frac{x_0^3}{6L^3} \right) \right) - \frac{1}{3} \frac{w_x}{\eta_x} m_N gL \\ &\cdot \left( 1 + (1 - \eta_R \eta_x^2) \cdot \left( -\frac{3x_0}{2L} + \frac{3x_0^2}{2L^2} - \frac{x_0^3}{2L^3} \right) \right) + \left( \frac{1}{\eta_x} - \eta_R \eta_x \right) \\ &\cdot v_x^2 \left( M \left( \frac{3}{2} - \frac{x_0}{L} + \frac{1}{6} \frac{x_0^2}{L^2} \right) - m_N \left( \frac{1}{2} - \frac{x_0}{2L} + \frac{x_0^2}{6L^2} \right) \right) + P_0 \frac{L}{v_{x,m}} \left( f_W + \frac{1}{3 f_W} \right) + \frac{1}{60} P_0 \frac{L}{\bar{v}_x} \\ &\cdot (-2 f_W^{-2} - 30 f_W^{-1} + 80 f_W^0 - 35 f_W^1 + 25 f_W^2 - 10 f_W^3) + 4(P_0 + P_{EA}) t_{EA} \end{aligned} \quad (31)$$

### 3.7 BERECHNUNG DES MITTLEREN ENERGIEBEDARFS PRO JAHR

Nachdem die Energiebedarfe pro Arbeitsspiel für Einzel- und Doppelspiel bekannt sind, kann schließlich der Energiebedarf pro Jahr wie folgt berechnet werden.

$$\begin{aligned} \bar{E}_{RBG} &= \frac{\bar{E}_{ES,E}}{\bar{t}_{ES}} \cdot T_{ES,E} + \frac{\bar{E}_{ES,A}}{\bar{t}_{ES}} \cdot T_{ES,A} + \frac{\bar{E}_{DS}}{\bar{t}_{DS}} \cdot T_{DS} \\ &+ P_{GL} \cdot T_{BR} \end{aligned} \quad (32)$$

Die hierbei verwendeten Parameter sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Tabelle 3. Verwendete Parameter für die Berechnung des Gesamtenergiebedarfs eines RBG pro Jahr

$\bar{E}_{RBG}$	Mittlerer Energiebedarf je RBG pro Jahr [J]
$\bar{t}_{ES}$	Mittlere Spielzeit eines Einzelspiels [s]
$T_{ES,E}$	Einzelspielbetrieb (Einlagern) im Jahr [s]
$\bar{E}_{ES,E}$	Mittlere Energie pro Einzelspiel (Einlagern) [J]
$T_{ES,A}$	Einzelspielbetrieb (Auslagern) im Jahr [s]

$\bar{E}_{ES,A}$	Mittlere Energie pro Einzelspiel (Auslagern) [J]
$\bar{t}_{DS}$	Mittlere Spielzeit eines Doppelspiels [s]
$T_{DS}$	Doppelspielbetrieb im Jahr [s]
$\bar{E}_{DS}$	Mittlere Energie pro Doppelspiel [J]
$P_{GL}$	Grundlastleistung [W]
$T_{BR}$	Brachzeit pro Jahr [s]

#### 4 EXEMPLARISCHE ANWENDUNG AN EINEM INTRALOGISTISCHEN SYSTEM

Nachdem in den vorherigen Abschnitten die Berechnungsgrundlagen aufgezeigt sind, wird nun exemplarisch an einem Intralogistiksystem die analytische Berechnung des jährlichen Energiebedarfs vorgenommen.

##### 4.1 AUFBAU UND PARAMETER

Für die beispielhafte Anwendung wird ein automatisiertes Hochregallager (HRL) inkl. der Lagervorzone ausgewählt. Das Hochregallager besteht aus zwei Regalbediengeräten, die die geforderten Ein- und Auslagerungen von 60 Fördereinheiten pro Regalbediengerät bewerkstelligen. Die Lagervorzone besteht aus Kettenfördersegmenten sowie Eckumsetzern. Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung des betrachteten intralogistischen Systems. Es besteht aus den Subsystemen „Regalbediengeräte“ sowie der „Stetigförderanlage“.

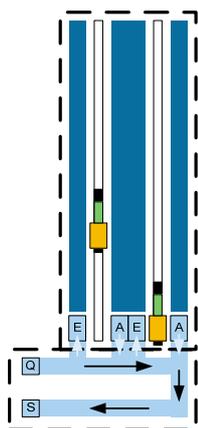


Abbildung 10. Schematische Darstellung des betrachteten intralogistischen Systems

Die Quelle des Systems stellt der Aufsetzpunkt der Stetigförderanlage dar. Innerhalb eines Jahres gelangen 120.000 Fördereinheiten in das System und werden zu gleichen Teilen auf die zwei Lagergassen verteilt. Im Laufe des Jahres erfolgen genauso viele Ein- wie Auslagerungen durch die Regalbediengeräte. Somit werden pro Re-

galgasse 60.000 Einheiten ausgelagert, die das System über die Senke verlassen. Abbildung 11 zeigt die Stetigförderanlage in Form eines Graphen.

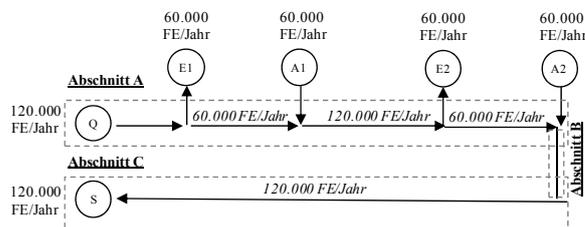


Abbildung 11. Graph der Stetigförderanlage inkl. der zuzufördernden Fördereinheiten pro Jahr

Die Stetigförderanlage besteht aus sechs Eckumsetzern und Kettenförderern sowohl für den Längs- als auch für den Quertransport der Fördereinheiten. Die Fördereinheiten werden ausgehend von der Quelle längs transportiert. Folglich werden die Paletten in die Regale quer eingelagert. Innerhalb des Abschnitts A und B werden die Fördereinheiten einzeln auf den Kettenförderern gefördert. Im Abschnitt C findet eine Bildung von 2er-Blöcken statt. Die weiteren wichtigsten zur Berechnung benötigten Parameter können der Tabelle 4 entnommen werden.

Tabelle 4. Wichtigste Parameter der Stetigförderanlage

$v$	0,3 [m/s]
$m$	500 [kg]
$l_F$	Quertransport: 0,8 [m] Längstransport: 1,2 [m]
$l_A$	0,2 [m]
$q$	20 %

Das Hochregallager besteht aus zwei Gassen mit je einem Regalbediengerät und wird in chaotischer, einfacher Lagerung betrieben. Die E/A-Punkte befinden sich auf der untersten Lagerebene. Die Regalbediengeräte sind mit Rückspeiseeinheiten ausgerüstet und werden durchsatzorientiert betrieben. Die wichtigsten zur Berechnung angesetzten Parameter für das Hochregallager sind in Tabelle 5 aufgezeigt.

Tabelle 5. Wichtigste Parameter des Hochregallagers

$M$	10,7 [t]
$m$	2,2 [t]
$m_N$	500 [kg]
$H$	22 [m]
$L$	50 [m]

$v_x$	160 [m/min]
$v_y$	55 [m/min]
$a_x$	0,5 [m/s <sup>2</sup> ]

Für das Subsystem Paletten-Hochregallager wird angenommen, dass je zur Hälfte Einzelspiel- und Doppelspielbetrieb erfolgt. Außerdem wird von einem Einschichtbetrieb an 250 Arbeitstagen ausgegangen.

Für einen Einzelspielbetrieb ergibt sich pro Regalbediengerät ein Durchsatz von 66 Ein-/Auslagerungen pro Stunde, für einen Doppelspielbetrieb ein Durchsatz von Ein-/Auslagerungen 43 pro Stunde. Für den Einzelspielbetrieb wird hierbei angenommen, dass 33 Einlager- und 33 Auslagervorgänge stattfinden.

Unter Einbeziehung der Anforderung von insgesamt 30 Einlagerungen und 30 Auslagerungen pro Regalbediengerät pro Stunde ergibt sich mit den gegebenen Anteilen zwischen Einzelspiel- und Doppelspielbetrieb eine Brachzeit von 20 % der Betriebszeit. Auf Basis dieser Daten kann die Energiebedarfsermittlung erfolgen.

## 4.2 ENERGIEBEDARFSERMITTLUNG

### 4.2.1 STETIGFÖRDERER

Unter der Verwendung des vorgestellten Ansatzes für die analytische Energiebedarfsermittlung von Stetigförderanlagen ergibt sich ein jährlicher Energiebedarf von 3.244 [kWh]. Der Gesamtbedarf ergibt sich aus den Bedarfen der einzelnen Abschnitte:

- Abschnitt A: 1.621 [kWh]
- Abschnitt B: 432 [kWh]
- Abschnitt C: 1.191 [kWh]

Die Ermittlung der Zyklushäufigkeit sowie der einzelnen Zeitanteile erfolgt am Beispiel eines Kettenfördersegments aus dem Abschnitt C. Das Segment besitzt eine Länge von 2,8 [m] und fördert die Paletten in Längsrichtung. Mit der Systemlast von 120.000 [FE/Jahr] und der Annahme, dass bei 20 % der Fördereinheiten der Abstand zur vorherigen Fördereinheit größer als das Abrisskriterium ist ergibt sich nach den Formel (6) und (7) die Häufigkeiten der einzelnen Zyklen. Innerhalb eines Jahres werden 24.000 Zyklen mit einer einzelnen Fördereinheit und 48.000 Zyklen mit zwei Fördereinheiten durchgeführt.

Bei einem 2er-Block ergeben sich in Abhängigkeit vom Beladungszustand des Förderers fünf Abschnitte, wobei die Dauer des zweiten Abschnitts gleich der Dauer vom dritten Abschnitt ist (vgl. Abbildung 2). Die Dauer für den Zyklusabschnitt, indem sich eine Fördereinheit auf

dem Segment befindet, ergibt sich nach Formel (8) zu 9,33 [s]. Mittels der Formel (9) wird die Dauer mit der maximalen Anzahl an Fördereinheiten bestimmt, die im betrachteten Fall 4,47 [s] beträgt. Die Gesamtzeit für einen Zyklus mit Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen beträgt 17,8 [s].

### 4.2.2 HOCHREGALLAGER

Unter Anwendung der Berechnungsformeln nach Kapitel 3.5 und 3.6 ergeben sich folgende mittlere Energien pro Einzel- bzw. Doppelspiel für die Regalbediengeräte:

- $\bar{E}_{ES,ein} = 0,1321$  [kWh]
- $\bar{E}_{ES,aus} = 0,1028$  [kWh]
- $\bar{E}_{DS} = 0,1784$  [kWh]

Die zugehörigen mittleren Spielzeiten für Einzel- und Doppelspielbetrieb betragen:

- $\bar{t}_{ES,ein} = 54,59$  [s]
- $\bar{t}_{ES,aus} = 54,59$  [s]
- $\bar{t}_{DS} = 84,60$  [s]

Schließlich kann der durchschnittliche Energiebedarf des gesamten Palettenhochregallagers pro Jahr bestimmt werden zu:

$$\bar{E}_{HRL} = 26.938 \text{ [kWh]}$$

Die Anteile am Energiebedarf des Hochregallagers von Einzelspiel-, Doppelspielbetrieb und Brachzeit sind in Abbildung 12 dargestellt.

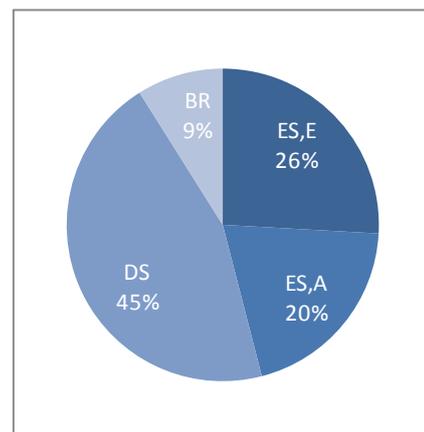


Abbildung 12. Energieanteile für das Hochregallager (BR = Energiebedarf für Brachzeit, ES,E = Energiebedarf für Einlager-Einzelspiele, ES,A = Energiebedarf für Auslager-Einzelspiele, DS = Energiebedarf für Doppelspiele)

### 4.3 ERGEBNISSE DER ENERGIEBEDARFSERMITTLUNG

Mit den Ergebnissen der analytischen Energiebedarfsberechnungen für die Stetigförderer und das Hochregallager kann nun der Gesamtenergiebedarf für das exemplarische Intralogistiksystem angegeben werden zu jährlich 30.182 [kWh]. Es ergibt sich ein Anteil von 89 % des Gesamtbedarfs für das Hochregallager und 11 % für die Stetigförderanlage.

Nimmt man vereinfachend einen konstanten Strompreis von 0,16 [€/kWh] an, so ergeben sich Energiekosten von 4.829 € pro Jahr.

### 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der dargelegte analytische Ansatz zur Energiebedarfsermittlung ermöglicht eine schnelle und einfache Möglichkeit zur Bestimmung des Energiebedarfs von Intralogistiksystemen bestehend aus Stetigfördersystemen und automatischen Hochregallagern. Besonders in der Planungsphase hat der analytische Ansatz enorme Vorteile, da nun sehr schnell Variantenvergleiche für den Energiebedarf möglich sind. Dies ist ein entscheidender Vorteil zu aufwendigen numerischen Berechnungen mittels Simulation, die aufgrund enormer notwendiger Rechenzeiten keine schnellen Variantenvergleiche ermöglichen.

Der analytische Ansatz wurde zudem im Rahmen des Projekts „Erweiterte Logistiksystemplanung und Einbeziehung des Energieverbrauchs“ in ein Rechnerwerkzeug für Planer von Logistiksystemen implementiert. Dieses führt die analytischen Berechnungen automatisiert durch, stellt die Ergebnisse kompakt dar und zudem eine Visualisierung zur Verfügung.

In einem nächsten Schritt werden künftig noch Ansätze für Regalbediengeräte mit Zwischenkreiskopplung ermittelt. Zudem besteht die Möglichkeit, den Ansatz für weitere Lagerplatzzuordnungen anzupassen. Hinsichtlich der weiteren Betrachtung von Stetigförderern ist angedacht, die Auswirkungen von Verteil- oder Zusammenführungselementen auf die Zyklushäufigkeit zu untersuchen.

Die Ansätze wurden bisher an mehreren Einzelmessungen überprüft. Eine umfangreiche Validierung der Modelle durch Messungen über längere Zeiträume ist ebenfalls geplant.

### LITERATUR

- [Arn09] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer, Berlin u.a.: 2009.
- [Ert13] Ertl, Rainer; Günthner, Willibald A.: Schnell zu aussagekräftigen Werten gelangen. In: f+h Fördern und Heben, 6/2013, S. 12-14.
- [Hab13] Habenicht, Sebastian; Günthner, Willibald A.: Energiebedarfsermittlung in der Grobplanungsphase. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 53 (2013) Nr. 3, S. 128-130.
- [Hom07] ten Hompel, Michael; Schmidt, Thorsten; Nagel, Lars: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik. Springer u.a.: 2007.
- [Hop12] Hoppe, Alexander; Wehking, Karl-Heinz: Optimierung der Energieeffizienz von Intralogistikressourcen am Beispiel des Kettenförderers. In: Tagungsband 8. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 27. September 2012.
- [Hop13] Hoppe, Alexander; Lottersberger, Florian; Wehking Karl-Heinz; Jodin, Dirk: Verbesserte Energieeffizienz von Stetigförderanlagen 2/2. In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 53 (2013) Nr. 3, S. 124-127.
- [Jod12] Jodin, Dirk: Grundlagen zum Effizienzvergleich in der Materialflusstechnik. In: Tagungsband Logistikwerkstatt Graz – Ressourceneffizienz in der Technischen Logistik, Technische Universität Graz, 21.+22.Juni 2012.
- [Jod13] Jodin, D.; Tinello, D.; Lottersberger, F.: Kostenfalle oder Investition in die Zukunft. In: Fördern und Heben, 2013, Nr.5, S. 14-17.
- [Mei06] Meinhardt, Ingolf; Marquardt, Hans-Georg: Offenes Baukastensystem zur effizienten Dimensionierung von Materialflusssystemen. Forschungsbericht: Institut für Fördertechnik, Baumaschinen und Logistik, Technische Universität Dresden. 2006.

- [Nie83] Niemann, Gustav; Winter, Hans: Maschinenelemente - Entwerfen, Berechnen und Gestalten im Maschinenbau. Springer, Berlin u.a.: 1983.
- [Rex13] Rexnord: Die Auslegung des Kettentriebes.  
[http://www.rexnord.eu/fileadmin/Rexnord\\_Kette/PDF/Catalogue\\_Flyer/Auslegung\\_Kettentrieb\\_D.pdf](http://www.rexnord.eu/fileadmin/Rexnord_Kette/PDF/Catalogue_Flyer/Auslegung_Kettentrieb_D.pdf), Download am 05.08.2013.
- [Rud08] Rudolpf, Manfred; Wagner, Ulrich: Energieanwendungstechnik. Wege und Techniken zur effizienteren Energienutzung. Springer, Berlin u.a.: 2008.
- [SEW13] SEW Eurodrive: Praxis der Antriebstechnik, 2001. URL: <http://www.seweurodrive.de/download/pdf/10522905.pdf>, Download am 05.08.2013.
- [Som11] Sommer, Tobias: Messung und Optimierung der Energieeffizienz von Fördermitteln. Vortrag zum 4. Logistik-Kongress Baden-Württemberg, Stuttgart, 10.11.2011.
- [Tie13] Tieste, Karl-Dieter; Hanne, Robert; Hilfert, Sven; Kiel, Edwin: Energieeffizienz von Getriebemotoren mit Frequenzumrichter.  
[https://www.ostfalia.de/export/sites/default/de/pws/tieste/tieste\\_alt/fue/SPS2008-Tieste.pdf](https://www.ostfalia.de/export/sites/default/de/pws/tieste/tieste_alt/fue/SPS2008-Tieste.pdf), Download: 08.05.2013
- [Tor97] Torke, H.-J.; Zebisch, H.-J.: Innerbetriebliche Materialflußtechnik - Funktion und Konstruktion förder technischer Einrichtungen und Geräte. Würzburg: Vogel, 1997.
- [VDI 3561] VDI-Richtlinie 3561: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. Berlin: Beuth-Verlag 1973.
- [VDI 4421] VDI 4421:2000: Antriebstechniken in der Stückgutförder techniek – Übersicht und Auswahl. Berlin: Beuth-Verlag 2000.
- [Wol13] Wollstadt, Harald: Marktübersicht Frequenzumrichter. <http://www.all-electronics.de/texte/anzeigen/43224/> Marktuebersicht-Frequenzumrichter; Aufruf am 05.08.2013.

---

**Dipl.-Ing. Sebastian Habenicht**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, Technische Universität München.

**Dipl.-Ing. Rainer Ertl**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, Technische Universität München.

**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner**, chairholder of the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, Technische Universität München.

Address:

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,  
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15,  
85748 Garching, Germany,  
Phone: +49 (89) 289-15921, Fax: +49 (89) 289-15922,  
E-Mail: [kontakt@fml.mw.tum.de](mailto:kontakt@fml.mw.tum.de)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

*Das IGF-Vorhaben 17168 N / 1 „Erweiterte Logistiksystemplanung unter Einbeziehung des Energiebedarfs“ der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.*