

# **Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs von Intralogistiksystemen** *(Analysis and evaluation of the energy consumption of intralogistics systems)*

Müller, E.<sup>1</sup>; Krones, M.<sup>1</sup>; Hopf, H.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TU Chemnitz, Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb

## **Abstract**

Aufgrund ökonomischer, ökologischer und politischer Rahmenbedingungen entwickelt sich Energieeffizienz zu einer wichtigen Zielgröße für Fabrik- und Logistiksysteme. Insbesondere in der Planungsphase wird der spätere Energiebedarf für den Betrieb wesentlich beeinflusst, weshalb energieeffizienzorientierte Planungsmethoden und -werkzeuge benötigt werden. Bestehende Hilfsmittel zur Ermittlung und Bewertung des Energieverbrauchs von Intralogistiksystemen basieren überwiegend auf Energieverbrauchsmessungen, ohne näher auf dessen Ursachen einzugehen. Ausgehend vom energieeffizienzorientierten Planungsprozess wurde ein systematisches Vorgehen zur Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs von Intralogistiksystemen entwickelt. Das Vorgehen ordnet sich in die Planungsaktivität Analyse des energieeffizienzorientierten Planungsprozesses ein und untersetzt diese bezüglich der Ermittlung von Energiedaten und -kennwerten. Die abgeleiteten Handlungsmaßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung fließen in die folgenden Planungsaktivitäten ein. Mithilfe dieses Ansatzes – als wichtiger Bestandteil der energetischen Bilanzierung – kann eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Intralogistiksystemen hergestellt und der Analyse- und Messaufwand reduziert werden.

*Due to the change of economic, environmental and political conditions, energy efficiency emerges as more and more relevant objective for the design of factory and logistics systems. In particular, the planning phase of such systems is vitally important because here the future energy demand is mainly determined here. Therefore, energy efficiency-oriented planning methods and tools are required. However, commonly, the existing tools for the identification and evaluation of the*

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013.  
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

*energy consumption of intralogistics systems are only based on measurements of energy consumption. They usually do not contain an investigation of the causes of the consumption. Based on the energy efficiency-oriented planning process, a systematic approach for analyzing and evaluating the energy consumption of intralogistics systems was developed. This approach belongs to the activity of analysis in the energy efficiency-oriented planning process and aims at the identification of energy data and key figures. The derived measures for increasing the energy efficiency can be used in the following planning activities. With this approach – as an important part of energy accounting –, the comparability between different intralogistics systems can be increased and the effort of the analysis and the measurement can be reduced.*

**Keywords:**

Intralogistiksysteme, Energieverbrauchsanalyse, energieeffizienzorientierter Planungsprozess

*intralogistics systems, energy analysis, energy efficiency-oriented planning process*

## **1 Einleitung**

Infolge steigender Energiepreise, ökologischer und politischer Zielsetzungen sowie eines zunehmenden öffentlichen Interesses wächst die Bedeutung der Zielgröße Energieeffizienz für industrielle Unternehmen stetig. Die Logistik nimmt am Energieverbrauch eines Unternehmens einen bedeutenden – wenn auch häufig unterschätzten – Anteil ein: In der Automobilzulieferindustrie wurde dieser beispielsweise mit 15 bis 35 % ermittelt [1]. Weitere branchenübergreifende Schätzungen kamen zu den Ergebnissen, dass 40 % der Energieverbräuche in der Produktion größtenteils durch logistische Prozesse verursacht werden [2] bzw. die Intralogistik einen Anteil von 25 % an den Energiekosten der gesamten Logistikkette einnimmt [3].

Dennoch existieren zur Steigerung der Energieeffizienz in der Intralogistik wenige wissenschaftliche Publikationen [4]. Die bisherigen Aktivitäten fokussieren hauptsächlich die anwendungsorientierte Verbesserung einzelner industrieller Prozesse bzw. seitens der Hersteller die konstruktive Gestaltung von Logistikmitteln zur Energieeffizienzsteigerung (z. B. [5]). Dabei werden das Zusammenwirken einzelner Logistikkomponenten und die Einsatzbedingungen im Fabrikumfeld jedoch kaum berücksichtigt. Beim Vergleich der Energieeffizienzpotenziale zwischen Planungs- und Betriebsphase zeigt sich, dass die größeren Einflussmöglichkeiten auf den Energieverbrauch in der Planungsphase liegen [6]. Dementsprechend existiert ein Bedarf an Methoden und Werkzeugen zur Unterstützung der energieeffizienzorientierten Logistikplanung.

Als methodischer Beitrag wurde ein systematisches Vorgehen zur Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs von Intralogistiksystemen entwickelt [7], dessen Weiterentwicklung im Folgenden dargestellt wird. Dazu werden zunächst theoretische Grundlagen zur Energieeffizienz von Intralogistiksystemen erläutert, um anschließend das Vorgehen theoretisch darzustellen sowie an einem ausführlichen Beispiel zu demonstrieren.

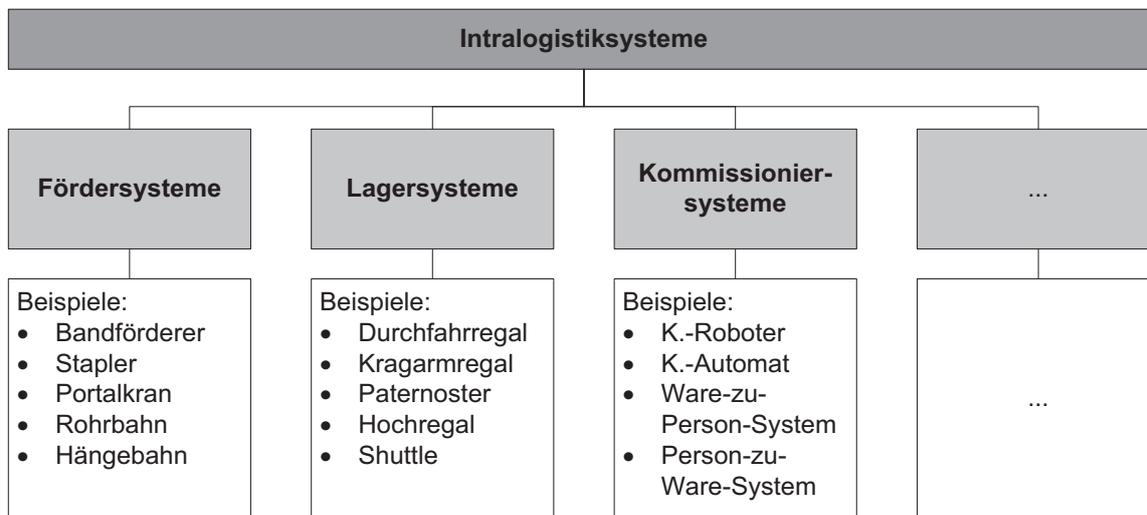
## **2 Theoretische Grundlagen zur Energieeffizienz von Intralogistiksystemen**

### **2.1 Logistik und Intralogistik**

Logistik hat die grundsätzliche Aufgabe, stoffliche Objekte bedarfsgerecht (richtiges Objekt, richtiger Ort und Zeitpunkt, richtige Menge, Qualität und Kosten) bereitzustellen und dabei die Grundfunktionen Transportieren, Umschlagen oder Lagern zu erfüllen. Dies wird als raumzeitliche Gütertransformation umschrieben [8]. Allgemein wird Logistik an ihrer Logistikleistung, bestehend aus Logistikservice und Logistikkosten, gemessen. Die Komplexität der Aufgaben wird an der interdisziplinären Verknüpfung von Wirtschafts-, Ingenieurwissenschaften und Informatik deutlich [9].

Die Unternehmenslogistik umfasst mehrere Bereiche (z. B. Beschaffungs- und Entsorgungslogistik) und teilt sich in innerbetriebliche und externe Logistik auf [10]. Der Untersuchungsschwerpunkt in diesem Artikel ist die Intralogistik, welche „die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschs in Industrie, Handel und öffentlichen Einrichtungen“ umfasst ([11], S. 1). Die Transformationsprozesse des Materialflusses bestehen im Verpacken/Montieren/Bearbeiten, Prüfen, Lagern, Fördern/Transportieren, Handhaben, Umschlagen, Bilden von Ladeeinheiten und Kommissionieren [12]. Als Intralogistiksysteme sind Förder-, Lager- und Kommissioniersysteme hervorzuheben (Bild 1).

Die Vielfalt an Funktionen und Systemen sowie die starke Vernetzung der Material- und Informationsflussprozesse unterstreichen die Komplexität logistischer Planungs- und Steuerungsaufgaben. Diese Vielfalt ist auch für Energieeffizienzsteigerungen im Allgemeinen sowie für Energieverbrauchsanalysen zu berücksichtigen. Für eine effiziente Analyse der verschiedenartigen Systeme ist daher ein einheitliches Vorgehen notwendig, um den Analyseaufwand zu minimieren und Energieeffizienzpotenziale systematisch zu erschließen.



**Bild 1:** Beispiele für Intralogistiksysteme

## 2.2 Ansätze zur Reduzierung des Energieverbrauchs von Intralogistiksystemen

Planungsunterstützende Hilfsmittel zur Steigerung der Energieeffizienz können allgemein entsprechend ihrer Schwerpunktsetzung in anwendungsorientierte Ratgeber, Energieeffizienz-Prinzipien und Energieeffizienz-Methoden unterschieden werden [13].

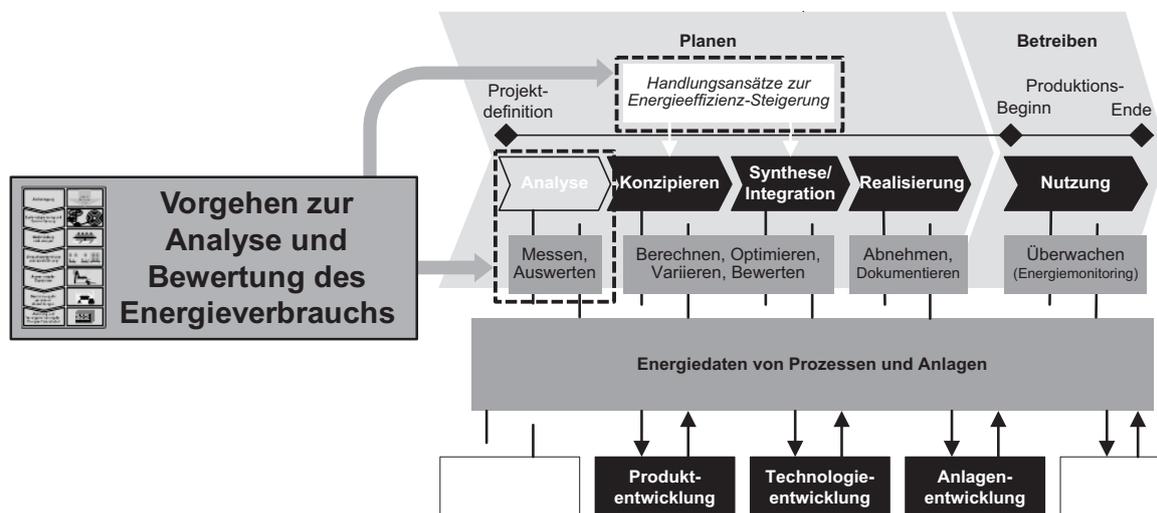
Anwendungsorientierte Ratgeber beinhalten Aufstellungen zur Umsetzung konkreter Maßnahmen, die sich im Bereich Intralogistik in zwei Felder unterteilen lassen: Verbesserungen können auf der einen Seite durch Veränderung der Technologie (z. B. Reibungsreduzierung) oder auf der anderen Seite durch einen energieoptimierten Betrieb (z. B. Transportaufwandsminimierung) realisiert werden. Während technologische Veränderungen meistens zusätzliche Kosten nach sich ziehen, sind Maßnahmen bezüglich des Betriebs häufig ohne Zusatzaufwendungen realisierbar. Beispiele zu Energieeffizienzmaßnahmen in der Praxis sind u. a. in [14-17] beschrieben. Energieeffizienz-Prinzipien entstehen aus der Verallgemeinerung von Maßnahmen.

Energieeffizienz-Methoden beschreiben systematische Vorgehensweisen zur Ableitung von Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung. Dabei können im Wesentlichen theoretische und empirische Ansätze unterschieden werden. Empirische Ansätze basieren auf Messungen des Energieverbrauchs von verschiedenen Betriebsvarianten. Theoretische Ansätze stützen sich hingegen auf physikalische Modelle zur Berechnung des Energiebedarfs [18-19]. Eine Verknüpfung der beiden methodischen Ansätze findet für intralogistische Systeme bislang kaum statt.

### 3 Vorgehen zur Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs

#### 3.1 Einordnung in den Planungsprozess

Der Planungsprozess wird prinzipiell in zeit- und detaillierungsorientierte Phasen sowie inhaltliche Schritte unterteilt. Der energieeffizienzorientierte (Fabrik-) Planungsprozess erweitert diese Herangehensweise durch die Integration von Energiedaten und zusätzlichen energierelevanten Planungsaktivitäten (Bild 2). Durch diese Erweiterung des Planungsumfangs und der Planungsinhalte werden neue Werkzeuge und Methoden erforderlich.

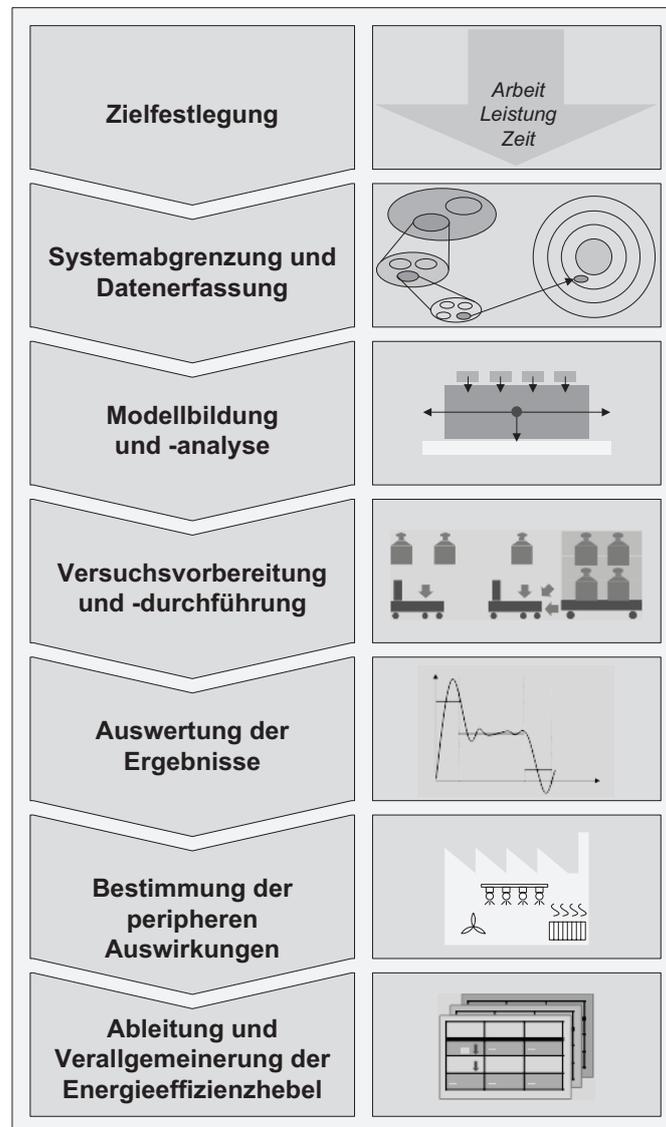


**Bild 2:** Einordnung des Vorgehens in den energieeffizienzorientierten Fabrikplanungsprozess nach Müller et al. [6]

Das entwickelte Vorgehen ordnet sich in die Aktivität „Analyse“ ein. Es unterstützt diese Aktivität bei der Abgrenzung des Betrachtungsobjekts, Erfassung vorhandener energierelevanter Daten sowie insbesondere bei der Ermittlung des Energieverbrauchs und der systematischen Beschreibung von dessen Einflussgrößen. Als zusätzliches Ergebnis werden allgemeine Handlungsansätze zur Energieeffizienzsteigerung abgeleitet, die im weiteren Verlauf der Planung zur Konzipierung und Integration des betrachteten Systems genutzt werden können. Das Vorgehen ist damit ein wichtiges Werkzeug der Analysephase.

#### 3.2 Vorgehensschritte

Das Ziel des Vorgehens besteht in der Ermittlung und Bewertung des Energieverbrauchs eines Intralogistiksystems und der Herleitung von Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung (Energieeffizienzhebel). Das Vorgehen ist in sieben Schritte



**Bild 3:** Vorgehen zur Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs

unterteilt, die nacheinander, teilweise aber auch iterativ durchlaufen werden (Bild 3). Das zu untersuchende System, das Ziel der Analyse und die Zielgrößen werden im ersten Schritt „Zielfestlegung“ definiert. Dies stellt die Grundlage für alle weiteren Vorgehensschritte dar.

Im zweiten Schritt, „Systemabgrenzung und Datenerfassung“, werden das System im Detail beschrieben und vorhandene Daten gesammelt. Das betrachtete System wird in Subsysteme, Elemente, Strukturen und Prozesse zerlegt und es werden Bilanzgrenzen gebildet. Mehrere Beschreibungsmodelle kommen hierfür zum Einsatz. Nach der Hierarchischen Ordnung wird das System durch die schrittweise Bildung von Subsystemen immer weiter detailliert. Durch die Periphere Ordnung wird die Beziehung zum Produktionsprogramm dargestellt [20]. Dadurch werden die

energetischen Wechselbeziehungen deutlich und Energiebedarfe können auf ihren Ursprung zurückgeführt werden. Nach der Einordnung und Zerlegung werden weitere benötigte Informationen, u. a. über eingesetzte Energieträger, auszuführende Prozesse oder zu bearbeitende Teile, erfasst. Elektroenergie ist der dominierende Energieträger bei Intralogistiksystemen. Daneben werden auch hydraulische und pneumatische Komponenten eingesetzt. Weiterhin ist zu prüfen, ob das System als Typenvertreter für andere gleichartige Systeme stehen kann, so dass die Analyseergebnisse auf diese übertragen werden können.

Ein wesentlicher Bestandteil des Vorgehens ist die „Modellbildung und -analyse“, bei der ein Modell des Systems erstellt wird, um Einflussgrößen auf die Zielgrößen zu identifizieren. Entsprechend der Systemabgrenzung werden die Größen, die das Systemverhalten funktional und energetisch beeinflussen, in Steuer- und Störgrößen unterteilt. Steuergrößen können innerhalb der Systemgrenzen variiert werden. Störgrößen können bei dieser Betrachtung nicht verändert werden. Die Einflussgrößen werden den Zielgrößen gegenübergestellt, so dass an dem erstellten Modell Einflussmöglichkeiten und deren Auswirkungen qualitativ und quantitativ aufgezeigt werden. Durch die theoretische Betrachtung können zum einen die Auswirkungen von Energieeffizienzhebeln untersucht werden, ohne das reale System in seinem Betrieb zu beeinträchtigen. Zum anderen können die praktischen Untersuchungen gezielt vorbereitet und damit der Messaufwand minimiert werden.

Im nächsten Schritt erfolgt die „Versuchsvorbereitung und -durchführung“, um die theoretischen Ansätze praktisch zu testen und den realen Energieverbrauch zu bestimmen. Die Messgrößen, -stellen und -geräte werden auf Basis der Ziel- und Einflussgrößen ausgewählt. Mögliche Messstellen für Intralogistiksysteme sind die Hauptanschlüsse (z. B. am Schaltschrank) oder die Anschlussstellen einzelner Komponenten (z. B. Motoren). Batterien oder Ladestationen eignen sich als Messstellen speziell für Flurförderfahrzeuge. Die Messgeräte können entsprechend der gewählten Messstelle stationär oder mobil sein. Die Prozessdatenerfassung und die Verknüpfung von Prozess- und Energiedaten stellt eine besondere Herausforderung dar. Nur durch die Gegenüberstellung des Energieverbrauchs und des erbrachten Nutzens (z. B. logistische Transportleistung) können Rückschlüsse auf die Energieeffizienz gezogen werden.

Die theoretischen und praktischen Untersuchungsergebnisse werden im Schritt „Auswertung der Ergebnisse“ zusammengeführt. Um verschiedene Gestaltungs- und Betriebsvarianten vergleichen zu können, werden Energiekennzahlen, wie z. B. der spezifische Energieverbrauch, gebildet. Neben der Energieflussdarstellung können die Messwerte auch in Form von Verbrauchsstrukturen oder Gang- und Dauerlinien dargestellt werden [6].

Der vorletzte Schritt, „Bestimmung der peripheren Auswirkungen“, ist von besonderer Bedeutung für die Fabrik- und Logistikplanung. Ein System verursacht während seiner Nutzung einen direkt zuordenbaren Energieverbrauch, der abhängig von der

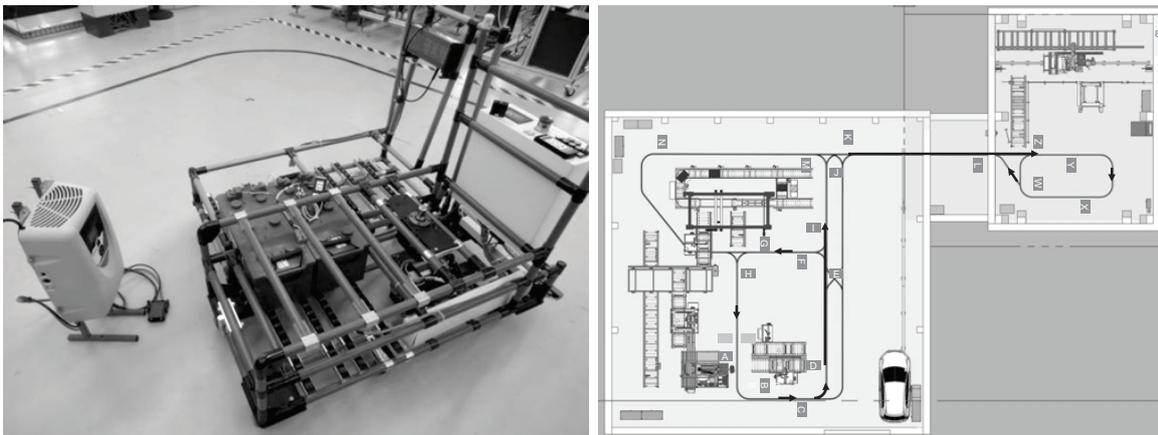
Systemgestaltung und dem Systembetrieb ist. Bei Energiemessungen wird oft nur dieser direkte Verbrauch erfasst. Daneben wird aber auch ein indirekter Energieverbrauch verursacht, weil das betrachtete System in einem übergeordneten System Fläche bzw. Raum benötigt. Der belegten Fläche ist ein Energiebedarf für Beleuchtung, Heizung, Kühlung und Lüftung zuzuordnen. Hierfür eignen sich Plankennzahlen oder ermittelte Jahresverbräuche. Zudem beeinflussen Verlustenergien (z. B. Wärme) das Systemumfeld. Gerade intralogistische Systeme, z. B. Flurförderfahrzeuge, nehmen oftmals einen großen Teil der Hallenfläche für Wegstrecken ein. Die indirekten Energiebedarfe sind folglich insbesondere bei der Layoutplanung zu berücksichtigen.

Mit der „Ableitung und Verallgemeinerung der Energieeffizienzhebel“ werden im letzten Schritt auf Basis der theoretischen und praktischen Untersuchungen Einflussgrößen, Schwach- und Verluststellen sowie Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt. Anhand dessen werden Handlungsempfehlungen für energieeffiziente Systeme abgeleitet. Abschließend ist nochmals zu prüfen, ob die Analyseergebnisse für andere Systeme angewendet werden können (Typenvertreter).

## 4 Beispiel Fahrerloses Transportsystem

### 4.1 Zielfestlegung

Das Vorgehen wurde exemplarisch am Fahrerlosen Transportsystem (FTS) Trilogiq „MOVE“ in der Experimentier- und Digitalfabrik der Professur Fabrikplanung und Fabrikbetrieb angewendet (Bild 4). Das Ziel der Untersuchungen bestand in der Ermittlung des Elektroenergieverbrauchs in Abhängigkeit von der Transportaufgabe und der Fahrzeugkonfiguration.

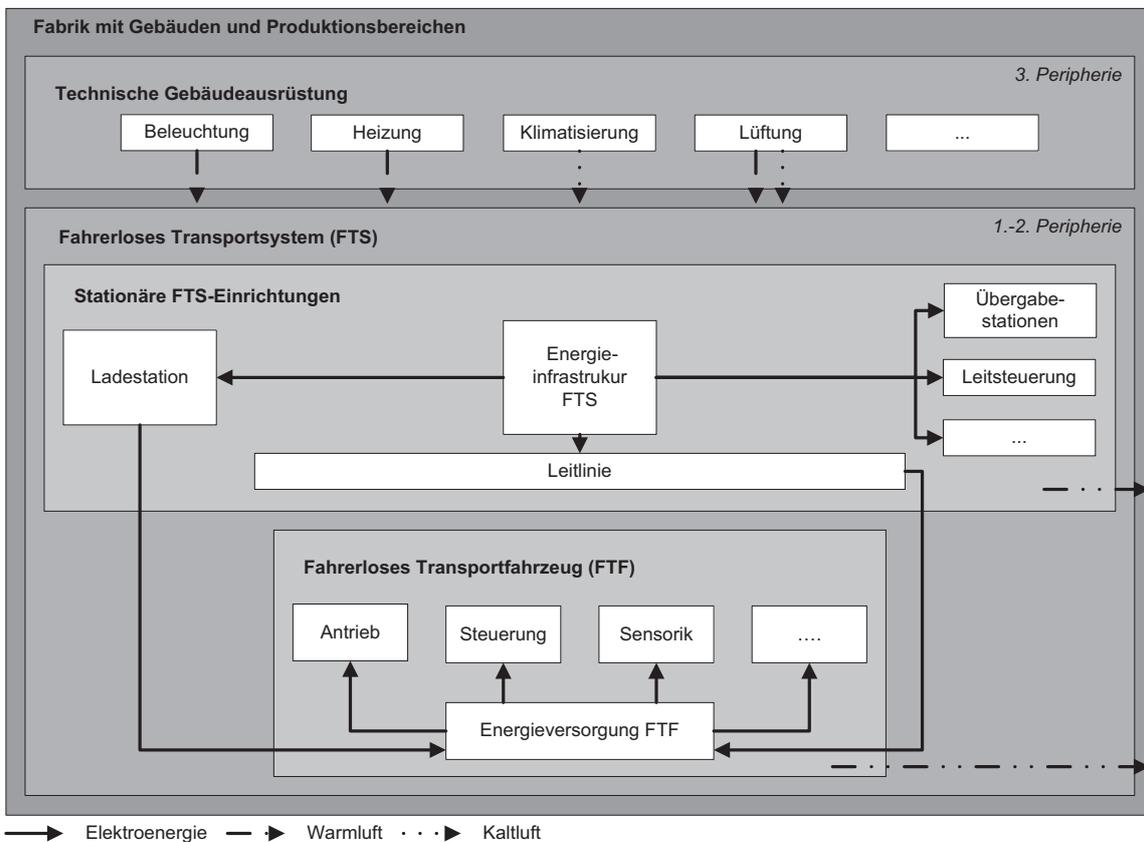


**Bild 4:** Untersuchtes FTS (links) und Fahrkurs in der Experimentier- und Digitalfabrik (rechts)

## 4.2 Systemabgrenzung und Datenermittlung

Bei der Systemabgrenzung bestehen bei einem FTS mehrere Möglichkeiten hinsichtlich der Wahl der Ausdehnung und des Detaillierungsgrades (Bild 5). Bezüglich der Ausdehnung ist festzulegen, ob lediglich das Fahrzeug selbst oder auch stationäre Einrichtungen, wie z. B. Materialübergabestationen oder Batterieladestationen, integriert werden. Im Hinblick auf den Detaillierungsgrad können die Elemente innerhalb des Systems in verschiedenen Aggregationsstufen abgebildet werden.

Mit Blick auf die Zielstellung des Anwendungsbeispiels wurde das betrachtete System auf das Fahrerlose Transportfahrzeug (FTF) abgegrenzt, d. h. die stationären Einrichtungen befinden sich in der Systemumgebung. Eine weitere Untergliederung in einzelne Fahrzeugbestandteile wäre möglich, soll hier aber nicht erfolgen, da sich der zu analysierende Gestaltungsspielraum auf den Betrieb des FTF bezieht. Als Energieträger wird nur Elektroenergie benötigt, die über zwei Blei-Gel-Batterien bereitgestellt wird. Das FTF fährt einen programmierten Fahrkurs ab und orientiert sich dabei an einer magnetischen Leitlinie. Die Transportgüter werden auf dem FTF getragen oder befinden sich bei der Schlepperkonfiguration in einem oder mehreren Anhängern.



**Bild 5:** Prinzipielle Systemabgrenzung von Fahrerlosen Transportsystemen

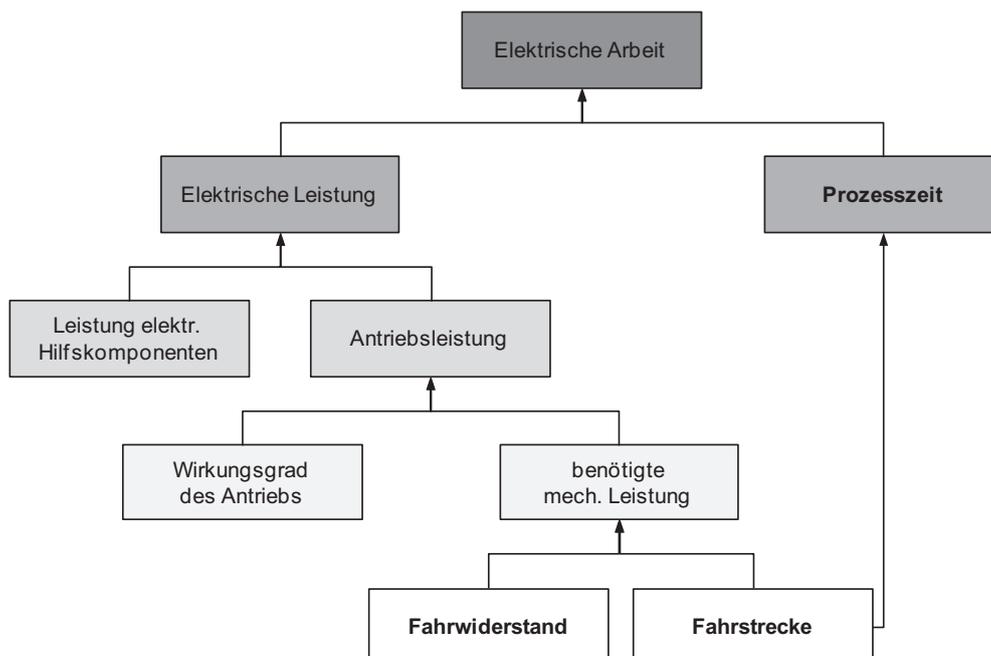
### 4.3 Modellbildung und -analyse

Für die physikalische Modellbildung existieren verschiedene Möglichkeiten: Zunächst ist eine Unterscheidung in makroskopische und mikroskopische Ansätze möglich [21]. Makroskopische Ansätze basieren auf globalen Annahmen, die für alle Betrachtungsobjekte zutreffen, während sich mikroskopische Ansätze auf ein konkretes Objekt beziehen. Für den vorgestellten Anwendungsfall bieten sich mikroskopische Ansätze an. Diese können wiederum in tabellen- und physikbasierte Modelle differenziert werden [21], wobei in diesem Schritt aufgrund noch nicht erfolgter Messungen nur physikbasierte Modelle in Frage kommen.

Als Ausgangspunkt zur physikalischen Modellierung kann der Grundsatz der Energieerhaltung herangezogen werden, wobei die zugeführte Energie zum einen in den gewünschten Prozessoutput  $W_{\text{Prozess}}$  und zum anderen in Verluste  $W_{\text{Verlust}}$  umgewandelt wird. Weiterhin kann „Hilfsenergie“  $W_{\text{Hilf}}$  zur Unterstützung des Prozesses davon abgegrenzt werden (vgl. [6]):

$$W_{\text{zu}} = W_{\text{Prozess}} + W_{\text{Hilf}} + W_{\text{Verlust}} \quad (1)$$

Im Fall des FTF entspricht die Prozessenergie der Energie für die Bewegung, während Hilfsenergie für die fahrzeugseitigen peripheren Einrichtungen wie Steuerung, Sensorik usw. benötigt wird. Als Verlustenergie tritt i. d. R. thermische Energie auf. Zur Identifikation von Einflussgrößen auf den Energieverbrauch wurden die energetischen Zusammenhänge schrittweise verfeinert (Bild 6).



**Bild 6:** Wesentliche Einflussfaktoren auf die Zielgröße Elektrische Arbeit (vereinfachte Darstellung)

Aus dieser Analyse können erste Einflussgrößen abgeleitet werden, die entsprechend ihrer Veränderbarkeit innerhalb der Systemgrenzen in Steuer- und Störgrößen eingeteilt werden (in Bild 6 sind Steuergrößen fett hervorgehoben). Für diese erfolgte eine detailliertere Untersuchung anhand physikalischer Gesetzmäßigkeiten. Die mechanische Arbeit, die für die Realisierung von Transportvorgängen benötigt wird, bestimmt sich nach dem zu überwindenden Roll-, Beschleunigungs- und Steigungswiderstand [22]. Für eine aus mehreren Abschnitten zusammengesetzte Bewegung auf einer ebenen Fläche setzt sich die zu verrichtende mechanische Arbeit  $W_{mech}$  aus der Rollwiderstandskraft  $F_R$  und der Fahrstrecke  $s_R$  (für die Anzahl Fahrabschnitte  $l$ ) sowie der Beschleunigungswiderstandskraft  $F_B$  und der Beschleunigungsstrecke  $s_B$  (für die Anzahl Beschleunigungsabschnitte  $n$ ) zusammen:

$$W_{mech} = \sum_{i=1}^l F_{R_i} \cdot s_{R_i} + \sum_{j=1}^n F_{B_j} \cdot s_{B_j}. \quad (2)$$

Unter Anwendung der Erdbeschleunigung  $g$ , der Fahrzeugmasse  $m_F$  sowie der Rollwiderstandskoeffizienten  $w_R$ , der Transportmassen  $m_G$  und der Fahrgeschwindigkeiten  $v$  in den jeweiligen Abschnitten ergibt sich nach mehreren Schritten:

$$W_{mech} = \sum_{i=1}^l w_{R_i} \cdot g \cdot (m_F + m_{G_i}) \cdot s_{R_i} + \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (m_F + m_{G_j}) \cdot v_j^2. \quad (3)$$

Die Auswirkungen einer Veränderung der Steuergrößen wurden anschließend mithilfe einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Darauf wird beim Vergleich von Messungen und Modellanalyse in Abschnitt 4.5 zurückgegriffen.

#### 4.4 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Die theoretischen Erkenntnisse aus der Modellanalyse können in zwei Richtungen genutzt werden: Zum einen ermöglicht die systematische Analyse der Einflussgrößen eine gezielte Vorbereitung der Messungen, indem die Definition geeigneter Versuche unterstützt wird. Zum anderen können die Auswirkungen durch Beeinflussung der Steuergrößen abgeschätzt werden, die anschließend mithilfe der Messungen erprobt werden.

Der definierte Fahrzyklus wurde basierend auf einem Ausgangszustand in den verschiedenen Parametern variiert und jeweils mehrmals vom FTF absolviert. Während des Versuchs wurden Prozessdaten hinsichtlich der Position des Fahrzeuges an definierten Marken sowie Energiedaten in Form der aktuellen Leistungsaufnah-

me erfasst. Als Messgerät diente der drahtlose Batteriecontroller EnerSys/Hawker Wi-IQ<sup>®</sup>, mit dessen zugehöriger Software die Messwerte erfasst wurden (Bild 7).



**Bild 7:** Batteriecontroller am FTF (links) sowie Messwerterfassung (rechts)

## 4.5 Auswertung der Ergebnisse

In einer anschließenden Auswertung wurden die Ergebnisse der Modellanalyse denen der Messungen gegenübergestellt. Dabei zeigten sich geringfügige Abweichungen bezüglich der Wirkungsintensität. Legt man bei der Modellanalyse nur die für die mechanische Bewegung benötigte Leistung zugrunde, entstehen größere Abweichungen. Beispielsweise führt – basierend auf dem rein mechanischen Modell – eine Senkung der Geschwindigkeit zu einer Reduzierung der mechanischen Arbeit. Allerdings nimmt dabei die elektrische Arbeit zu, weil sich die für den Fahrzyklus benötigte Zeit erhöht und damit die Leistung der elektrischen Hilfskomponenten über einen längeren Zeitraum abgerufen wird. Eine weitere Besonderheit ergibt sich bei dem FTF durch die geringe Eigenmasse, welche zur Folge hat, dass der spezifische Energieverbrauch bei steigender Transportmasse sinkt. Bei einer ähnlichen Untersuchung an einem Gabelstapler zeigte sich hingegen ein erhöhter spezifischer Energieverbrauch bei steigender Transportmasse.

## 4.6 Bestimmung der peripheren Auswirkungen

Das betrachtete FTF benötigt Transportwege sowie Flächen zur Be- und Entladung (ca. 28 % der Hallengrundfläche). Auch wenn für das FTF selbst keine Beleuchtung oder Heizung notwendig ist, müssen dem FTF trotzdem indirekte Energieverbräuche für die belegten Flächen zugerechnet werden. Ferner sind für Batterieladestationen im Allgemeinen geeignete Belüftungseinrichtungen vorzusehen, die aber für das untersuchte FTF nicht erforderlich sind.

Eine Reduzierung des Energieverbrauchs des Transportfahrzeuges kann sich ebenfalls positiv auf die Systemumgebung auswirken, indem seltenere Batterieladungen die Batterielebensdauer verlängern oder sogar Wechselbatterien bzw. Ladestationen eingespart werden können.

#### **4.7 Ableitung und Verallgemeinerung der Energieeffizienzhebel**

Als allgemeines Fazit können die eingangs mit dem Modell analysierten Handlungsansätze größtenteils in ihrer Wirkung bestätigt werden. Die größten Potenziale liegen im günstigen Verhältnis von Nutz- zu Eigenmasse, in der Bündelung von Transporten sowie in der Reduzierung der Anzahl an Beschleunigungsvorgängen begründet. Des Weiteren sind bei der Layoutplanung minimale Weg- und Bereitstellflächen anzustreben. Batterieladestationen sollten aufgrund ihres Belüftungsbedarfs zentral außerhalb des Produktionsbereiches platziert werden.

### **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Ausgehend von dem aufgezeigten Bedarf nach methodischer Unterstützung für die energieeffizienzorientierte Gestaltung von Logistikprozessen wurde ein Vorgehen zur Analyse und Bewertung des Energieverbrauchs von Intralogistiksystemen präsentiert und exemplarisch angewendet. Mithilfe der theoretischen Modellbildung werden Energieverbrauchsmessungen systematisch vorbereitet und in ihrer Aussagekraft gestärkt. Durch die Bildung von Energiekennzahlen wird ein energetischer Vergleich zwischen verschiedenen Gestaltungs- und Betriebsvarianten eines Intralogistiksystems möglich. Darauf aufbauend werden allgemeine Handlungsempfehlungen zur Energieeffizienzsteigerung abgeleitet.

Die erhobenen Energiedaten bilden eine wichtige Ausgangsbasis für die energetische Bilanzierung. Weiterführend können diese für die Zuordnung des Energieverbrauchs zu einem definierten Betriebszustand und damit zur Prozessmodellierung und -simulation sowie zur Energiebedarfsprognose genutzt werden.

In der Fortführung der Forschungsarbeit erfolgt eine Ausweitung des Anwendungsbereiches (z. B. auf Lagersysteme), deren Erkenntnisse in die Weiterentwicklung der Vorgehensweise einfließen. Die abgeleiteten Energieeffizienzhebel werden in den Forschungsschwerpunkt „Energieeffizienzmodell“ zur systematischen und ganzheitlichen Realisierung von Energieeffizienzpotenzialen überführt und im Energiekompetenzzentrum „Logistik und Fabrikplanung“ demonstriert [23].

## Acknowledgment

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



## Literaturangaben

- [1] Rinza, T.: Effizienter Materialfluss. In: *Automobil Industrie*, 2010, 55(4):46–47
- [2] Hellingrath, B.; Schürerer, S.: Energieeffizienz und Umweltbilanz von Supply Chains. In: ten Hompel, M.: *Software in der Logistik – Klimaschutz im Fokus*, Huss-Verlag, München, 2009, S. 16–21
- [3] Müller-Wondorf, R.: Sparsame Stapler stehen bei der Kundschaft hoch im Kurs. In: *VDI Nachrichten*, 2012, 66(12):11
- [4] Schmidt, T.; Schulze, F.: Simulationsbasierte Entwicklung energieeffizienter Steuerungsstrategien für Materialflusssysteme. In: Vojdani, N.: *7. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)*, Verlag Praxiswissen Service, Dortmund, 2011, S. 150–159
- [5] Seemann, A.: Wie Gabelstapler künftig noch effizienter werden. In: *Logistik für Unternehmen*, 2009, 23(6):54–55
- [6] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Strauch, J.: *Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- [7] Krones, M.; Hopf, H.; Strauch, J.; Müller, E.: Analysen zur Energieeffizienz in ausgewählten Systemen der Intralogistik zur Unterstützung des Planungsprozesses. In: Schenk, M.; Zadek, H.; Müller, G.; Richter, K.; Seidel, H.: *Tageband 17. Magdeburger Logistiktage „Sichere und Nachhaltige Logistik“*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2012, S. 73–81
- [8] Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 8. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010
- [9] Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K.: *Handbuch Logistik*, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008

- [10] Martin, H.: *Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*, 8. Aufl., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011
- [11] Arnold, D.: *Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [12] ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: *Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik*, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007
- [13] Müller, E.; Strauch, J.; Krones, M.: *Energieeffizienzpotenziale systematisch erkennen und erschließen – Konzept für ein planungsunterstützendes wissensbasiertes Energieeffizienzmodell*. In: Müller, E.; Spanner-Ulmer, B.: *Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Tagungsband zu den 14. Tagen des Betriebs- und Systemingenieurs (TBI'11)*, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Chemnitz, 2011, S. 67–76
- [14] Augustin, H.: *Im grünen Fluss*. In: *Logistik heute*, 2011, 33(6):48–49
- [15] Dullinger, K.-H.: *Modernisierung der Intralogistik zur Steigerung der Energieeffizienz*. In: Zadek, H.; Schulz, R.: *Nachhaltigkeit von Logistikzentren durch Emissionsbewertung, Ressourcenschonung und Energieeffizienz*, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2011, S. 123–131
- [16] Walz, M.: *Energiekosten systematisch erfassen – Präzise ausgelegte Antriebspakete als Schlüssel zu mehr Effizienz*. In: *Fördern+heben*, 2011, 61(4):124–126
- [17] Kramer, J.: *Energieeinsparpotenziale rund um das Flurförderzeug*. In: *Hebezeuge Fördermittel*, 2012, 52(4):186–188
- [18] Zhang, S.; Xia, X.: *Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors*. In: *Applied Energy*, 2011, 88(9):3061–3071
- [19] Ludwig, P.: *Energieeffiziente Materialflusssysteme – Potenziale und Praxis*. In: Neugebauer, R.: *Ressourceneffiziente Technologien für den Powertrain – Tagungsband zum International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC/2<sup>nd</sup> International Colloquium of the Cluster of Excellence eniPROD*, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Chemnitz, 2012, S. 413–426
- [20] Schenk, M.; Wirth, S.: *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2004
- [21] Treiber, M.; Kesting, A.: *Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010

- 
- [22] *Martin, H.; Römisch, P.; Weidlich, A.: Materialflusstechnik – Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen der Fördertechnik, 9. Aufl., Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008*
- [23] *Müller, E.; Krones, M.; Hopf, H.; Arndt, R.; Strauch, J.: Identifying and Responding to Energy Efficiency Improvement Opportunities in Factory Planning. In: Nylund, H.; Kantti, S.; Toivonen, V.; Torvinen, S.: Proceedings of 22<sup>nd</sup> Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM, 10.-13.06.2012, Helsinki & Stockholm), Tampere University of Technology, Tampere, 2012, S. 365-372*