

Lebenszykluskosten von elektrischen Antriebssystemen in intralogistischen Fördertechnikanlagen

An approach for predicting life-cycle costs of electric drives in conveyor systems

Jörn Dreier
Karl-Heinz Wehking

Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart

Insbesondere bei Antriebssystemen stehen die Energiekosten neben den Anschaffungskosten im Fokus. Jedoch bleiben weitere Folgekosten, die im Laufe des Betriebs eines Antriebssystems in einem Fördermittel entstehen, meist unberücksichtigt. Dieser Artikel beschreibt einen Ansatz, wie sich Lebenszykluskosten von Antriebssystemen in Stetigfördertechnik prognostizieren lassen. Mit Hilfe von allgemein bekannten Normen und Richtlinien kann der Lebenszyklus eines Antriebssystems von der Projektierung über die Herstellung bis zur Entsorgung nach dem Betrieb in Kostenarten eingeteilt und veranschaulicht werden. Unter Verwendung von direkter Verrechnung als auch der Kalkulation mit Prozesskosten wird eine hinreichende Genauigkeit anhand definierter Prozessketten erreicht. Auf Basis dieser Kostenkalkulationen kann ein mehrstufiges Prognosemodell gebildet werden. Somit konnten durch das entwickelte Modell Anlagenbeispiele untersucht und berechnet werden.

[Schlüsselwörter: Lebenszykluskosten, Stetigfördertechnik, elektrische Antriebssysteme, mehrstufiges Prognosemodell]

Especially in the case of electrical drive systems energy costs are firmly in focus of electrical drive systems. Many account approaches focus on energy costs and compare them with asset costs in order to find solutions for improved energy efficiency. Other follow-up costs during the life cycle of electrical drives in conveyor systems are often not analyzed or are not taken into account in the life-cycle. Using relevant engineering standards and guidelines this article describes an approach for calculating life-cycle costs over several periods of life from project planning to disposal. Direct costing and process cost calculations are performed with the help of process chains, resulting in precise cost predictions. Hence, a multi-stage model life-cycle cost model for conveyor systems can be developed and example conveyor systems can be analyzed and calculated.

[Keywords: life-cycle costs, conveyor systems, electrical drives, multistage prediction model]

1 EINLEITUNG

Der deutsche Produktionsstandort ist einem Wandel unterlegen. Im globalisierten Marktumfeld ist eine verstärkte Wettbewerbsfähigkeit nötig, um sich trotz zunehmenden Kostendrucks, sinkender Margen und steigender Qualitätsanforderungen weiter im internationalen Umfeld behaupten zu können. Investitionsentscheidungen werden häufig durch die Einkaufsabteilung des Unternehmens entschieden [Gel10]. Vor allem im Bereich der Fördertechnik ist für Kunden bzw. Anlagenbetreiber hauptsächlich der Verkaufspreis entscheidend. Technologische Unterschiede sind im Bereich der Standardfördertechnik kaum noch relevant [Weh12]. Jedoch ändern sich für Hersteller und Anbieter die Bedingungen für den unternehmerischen Erfolg. Während im letzten Jahrzehnt die Präsenz auf einem Wachstumsmarkt Umsatzwachstum erbrachte, ein hervorragendes Produkt Wettbewerbsbarrieren schuf und ein hoher Marktanteil Kostenvorteile sicherte, gelten diese Voraussetzungen nicht mehr uneingeschränkt [Sch09]. Hersteller und Betreiber agieren zunehmend in einem kooperativen statt kompetitiven Geschäftsumfeld. Somit sind Hersteller zunehmend angehalten, ihre Verkaufspositionen durch konsequente Problemlösungen ihrer Produkte hervorzuheben und das Aufzeigen des Kundennutzens zu verstärken [Sch09] [Kuh08]. Eine Möglichkeit diese Entwicklungen im Vertrieb umzusetzen, ist das Aufzeigen sämtlicher Kosten, um Transparenz zu schaffen. Durch Lebenszykluskosten (LZK) können Aussagen getroffen werden, welche Kosten in welcher Höhe bei welchem Geschäftsteilnehmer im Lebenszyklus des Produkts anfallen [Pfo02]. Dabei wird in vielen Fällen deutlich, dass Anschaffungskosten und Folgekosten einer Investition in großer Diskrepanz zueinander stehen können. Besonders bei Investitionen von langlebigen Gütern wird dieser Zusammenhang bedeutend [Bro79]. So lassen sich die Gesamtkosten einer Investition in Form einer LZK-Analyse als Eisberg darstellen. Die Spitze des Eisbergs ragt aus der Wasseroberfläche und stellt bekannte und berücksichtigte Kosten, beispielsweise die Anschaffungskosten, dar. Die Folgekosten, dargestellt als unter der Wasseroberfläche schwimmender Teil des Eisbergs,

bleiben in vielen Fällen unberücksichtigt, da diese entweder unbekannt sind oder in der Zukunft anfallen.

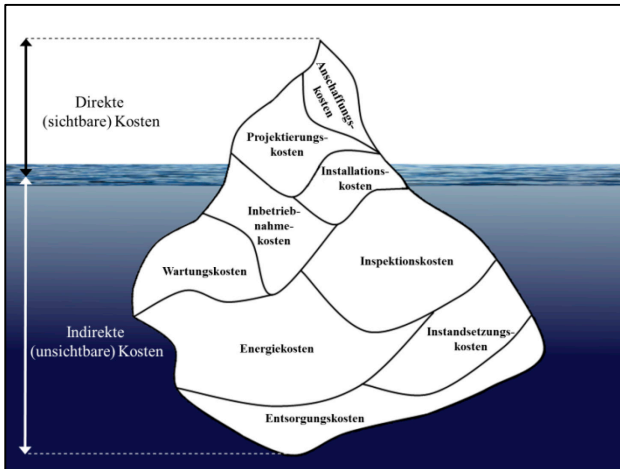


Abbildung 1. Darstellung der LZK als Eisberg [Wil10]

Um diese Folgekosten sichtbar zu machen, bedarf es an Normen und Richtlinien angepasste Modelle, um diese unbekannt oder nicht berücksichtigten Kosten für Antriebssysteme in Fördertechnik zu bestimmen.

2 URSPRÜNGE UND LZK-KONZEPTE

2.1 URSPRÜNGLICHE ANSÄTZE

Ansätze von LZK lassen sich in die ursprünglichen Strömungen des „Life-Cycle Costing“ (LCC) und des „Total Cost of Ownership“ (TCO) einteilen, die nah miteinander verwandt sind und im Prinzip die gleiche Idee beschreiben [Bod11]. Dabei konzentriert sich LCC hauptsächlich auf die Erkenntnis, dass neben dem Kaufpreis der Investition später auch weitere Kosten in Bezug auf die Investition während der Lebensdauer zu identifizieren sind [Coe09]. TCO wird als ein Werkzeug und eine Philosophie angesehen, das darauf ausgerichtet ist, die tatsächlichen Kosten abseits des Anschaffungspreises zu ermitteln [Eil95]. Der TCO-Ansatz ist damit breiter angelegt und umfasst die Vorverkaufskosten der Investition, die im Zusammenhang mit der Auswahl eines bestimmten Herstellers verbunden sind. Somit ist der LCC-Ansatz nicht deckungsgleich zum TCO-Ansatz, sondern stellt nur eine Teilmenge von TCO dar [Wou08].

2.2 KONZEPTE ALS LEITFÄDEN UND MODELLE

Mittlerweile existiert ein breites Spektrum an wissenschaftlichen und praxisbezogenen LZK-Konzepten, die sowohl den Lebenszyklus des Herstellers als auch des Kunden berücksichtigen [Der11]. Diese lassen sich in zwei Ansätze zur Berechnung einteilen: Zum einen existieren individuelle Berechnungsmodelle, die auf Basis von Fallstudien von Verbänden, Forschungsgruppen oder Unternehmen zur Ermittlung von spezifischen LZK bestimmter Produkte oder Produktgruppen erstellt wurden.

Zum anderen werden standardisierte Leitfäden herausgegeben, die eine Anleitung zum Aufbau eines individuellen LZK-Modells geben. [Gei10]. Standardisierte Leitfäden sind vor allem in den gegenwärtigen Normen und Richtlinien zu finden. Dabei gelten insbesondere die DIN EN 60300-3-3, die VDI 2884 und die VDMA 34160 als Standardwerke für LZK-Analysen, obwohl jeder Leitfaden andere Schwerpunkte setzt.

Insgesamt haben die betrachteten Normen und Richtlinien DIN EN 60300-3-3, VDI 2884 und VDMA 34160 gemeinsam, dass zunächst die Kostenarten identifiziert und strukturiert werden. Sie bieten somit umfangreiche Rahmenbedingungen für die LZK-Berechnung. Die Anzahl der Lebenszyklusphasen wird aber unterschiedlich interpretiert. Die Norm DIN EN 60300-3-3 gibt eine allgemeine Einführung in das Konzept der Ermittlung der LZK und betrachtet insbesondere die Kosten, die mit der Zuverlässigkeit des Produkts zusammenhängen. Außerdem wird die Entwurfsphase eines Produkts verstärkt betont. Für die quantitative Analyse der LZK existiert dennoch kein standardisiertes Instrumentarium. Die Entscheidung muss daher in der Regel individuell getroffen werden [DIN05]. Die VDI 2884 legt eine breite Kostenstruktur vor, die auf die LZK-Berechnung von Produktionsmitteln abgepasst ist. Hier werden neben den Instandhaltungskosten u. a. Raumkosten, Kosten der Ersatzteilbevorratung sowie Kosten für Betriebs- und Hilfsstoffe berücksichtigt. Außerdem wird die Bewertung der Kosten und Erlöse in der Nachnutzungsphase vorgenommen (d. h. Außerbetriebnahme- und Verwertungskosten) [VDI05].

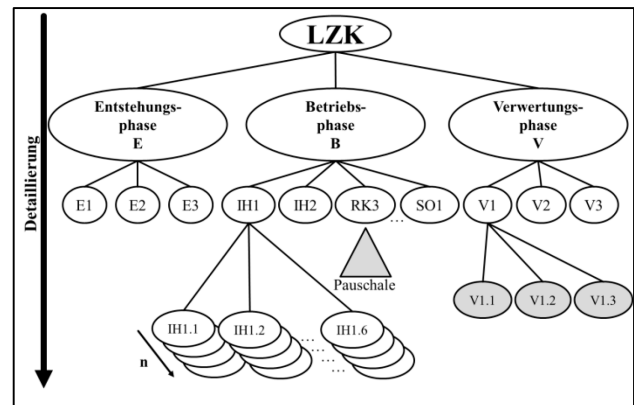


Abbildung 2. Struktur der VDMA 34160 [VDM06]

Die Kostenstruktur der VDMA 34160 basiert auf Anforderungen des Maschinen- und Anlagenbaus. Die Einschränkung und Spezialisierung auf diese Anwendungsgebiete beinhaltet eine standardisierte Vorgehensweise, die auf die Unterstützung der Investitionsentscheidung beim Maschinenkauf gerichtet ist. Hierfür werden die über den Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen anfallenden Kosten tabellarisch aufgezählt, indem sie in die Phasen Entstehung, Betrieb und Verwertung unterteilt werden. Allerdings bleiben der zeitliche Anfall der Kosten

sowie die Betrachtung der Leistungen unberücksichtigt [VDM06].

Durch die Anforderungen an die Qualität der Inputdaten entstehen jedoch Einschränkungen bei der Anwendung. So geben beispielsweise die Richtlinie VDI 2884 und das Einheitsblatt VDMA 34160 die Kostenstruktur in tabellarischer Form vor. Dies geschieht durch das Stellen von gewissen Anforderungen im Anwendungsfeld. DIN EN 60300-3-3 lässt noch viele Anwendungsspielräume zu, geht aber auf die Bewertungsansätze nicht näher ein. Jedes Anwendungsgebiet hat dabei unterschiedliche dominante Kostenfaktoren, die wiederum individuell variiert werden können. Insgesamt bieten die drei Normen und Richtlinien für eine LZK-Analyse eine Struktur und geben nützliche Hinweise, welche Kosten berücksichtigt werden können. Wie genau jedoch LZK ermittelt werden, geben diese jedoch nicht preis. Es existiert keine eindeutige Empfehlung, wie genau eine LZK-Analyse berechnet wird und welche Kostenrechnung somit eingesetzt werden soll. Aus den vorhandenen Normen und Richtlinien ist somit ein eigenes LZK-Modell zu gestalten.

Im Gegensatz zu den Leitfäden weisen die individuellen Berechnungsmodelle erhebliche Unterschiede auf, da verschiedene Kostenarten speziell analysiert oder auch ausgeschlossen werden und somit standardisierte Strukturen fehlen [Gei10]. Als individuelles Modell soll im Folgenden beispielhaft das bekannte M-TCO Modell der Daimler AG vorgestellt werden, das sich allein auf reaktive Instandsetzungsvorgänge konzentriert und somit nur einen kleinen Teil der gesamten LZK berücksichtigt. [Alb09]. Aus diesen Gründen ist auf Basis der vorhandenen Leitfäden ein Modell zur Berechnung von Antriebssystemen in der Fördertechnik zu erstellen. Recherchen belegen, dass ähnliche Modelle nicht bekannt sind und sich bisherige Ansätze allein Anschaffungskosten und Energiekosten vergleichen [Alm08].

3 METHODE UND MODELL

3.1 KALKULATIONSGRUNDLAGE

3.1.1 KLASSISCHE KOSTENKALKULATIONEN

Im Zuge dessen wird eine geeignete Kalkulationsart eruiert, wie die Kosten ganzheitlich berechnet werden können. Die Auswahl an klassischen Kostenkalkulationen verdeutlicht jedoch, dass der Fokus auf dem produzierenden Bereich liegt [Hor89]. Entscheidend sind die Einzelkosten in der Fertigung. Weitere Kosten werden als Gemeinkosten deklariert und beispielsweise mit Hilfe von indirekten Bezugsgrößen verrechnet [Fri10]. Im Laufe der letzten Jahrzehnte stieg jedoch der Gemeinkostenanteil in produzierenden Unternehmen, was zu einer Verzerrung der Bezugsgrößen und daher zu einer Verfälschung der Kalkulation durch fehlerhafte Gemeinkostenzuschläge führte [Rem05]. Dies resultierte in eine fehlende Kosten-

transparenz und zu einer nicht verursachungsgerechten Verrechnung des hohen Gemeinkostenanteils [Sch05]. Somit erfordert der gestiegene Gemeinkostenanteil eine differenziertere Betrachtung der Leistungsbereiche in Unternehmen. [Fri10].

3.1.2 RESSOURCENORIENTIERTE PROZESSKOSTEN

Diese differenzierte Betrachtung kann durch die ressourcenorientierte Prozesskostenrechnung (PKR) ermöglicht werden, die unabhängig von Kostenstellenrechnung sondern anhand von Prozessketten kalkuliert wird. Die Prozessketten müssen dabei auf Basis eines „Bottom-Up“ durch Prozessanalysen von Abläufen im Unternehmen gebildet werden [Sch95]. Dabei kann das Prozessketten-Instrumentarium nach Kuhn verwendet werden. Dieses ist in der Lage, komplexe Systeme abzubilden. Ebenso können Lieferanten-Kunden-Beziehungen modelliert werden. Dies geschieht über einen selbstähnlichen Aufbau mit gleichen Eigenschaften und gleichen Beeinflussungsmöglichkeiten, der sich über mehrere Hierarchiestufen immer wieder wiederholt. So birgt jedes Prozessketten-element in sich wieder eine feinere Prozesskette. Diese Prozessketten sind in der Lage, sich in beliebigen Detaillierungsgraden darzustellen. Die flexible Verknüpfung von Teilprozessen in eine Teilprozesskette erlaubt die Aggregation in übergeordnete Prozessketten [Kuh95]. Diese zugrundeliegende Prozessorientierung der ressourcenorientierten PKR führt zu einer Überwindung der Unternehmensstrukturen, zu einer verursachungsgerechten Verrechnung und somit zu einer verbesserten Transparenz der Unternehmensprozesse [Sch05].

Die Kalkulation der ressourcenorientierten PKR besteht im Wesentlichen aus drei Schritten. Diese sind die Prozessorientierung, das Ressourcenverfahren sowie die Ermittlung von Verbrauchs- und Kostenfunktionen. Die Prozessorientierung beinhaltet dabei die Ermittlung der zu bewertenden Geschäftsprozesse. Diese müssen idealerweise so weit unterteilt werden, bis Teilprozesse identifiziert worden sind, so dass deren Ressourcenverbrauch nur noch von einem Kostentreiber abhängig sind. Aggregierte Hauptprozesse und Prozesse hängen dann von mehreren Kostentribern ab, jedoch können auf diese Weise Aussagen über den Ressourcenverzehr unterschiedlichster Produktvarianten getroffen werden. Kostentreiber sind dabei innerhalb einer Prozesshierarchiestufe in Bezug auf das Mengengerüst der beschriebenen Leistungsmenge strukturiert. So enthalten die Kostentreiber die Anzahl der Teile, die Anzahl der Vorgänge und beschreiben somit die Vorgänge der Prozesswiederholungen. Der Ressourcenverzehr kann so in Abhängigkeit der Kostentreiber einmalig oder mehrmalig abgebildet werden. In einem zweiten Schritt werden über das Ressourcenverfahren Ressourcen identifiziert, die zur Wertschöpfung beitragen. Diese können den ermittelten Teilprozessen zugeordnet werden. Anschließend werden in einem dritten Schritt die Pro-

zessveränderungen zu Kostenprognosen durch Verbrauchsfunktionen bestimmt [Eve95] [Sch95].

Durch die benötigten Ressourcen für Prozesse kann ein Ressourcenmodell verwendet werden, das die umfassende Bewertung der Prozesse nach ihrem Ressourcenverbrauch ermöglicht. Mit dessen Hilfe können Ressourcen des Unternehmens auf Prozesse mit Hilfe einer Kostenfunktion kalkuliert werden. Dies geschieht mit dem jeweiligen Kostensatz der Ressource. Durch die Inanspruchnahme der Ressourcen in den Prozessen verursachen sie Kosten anhand des Ressourcenverzehr zu einem zuvor ermittelten Kostensatz. Mögliche Ressourcen können im direkten Leistungsbereich Fertigungsmaterial, Arbeitshilfsmittel und Arbeitsmittel sein. Vor allem im indirekten Leistungsbereich finden sich jedoch Arbeitshilfsmittel, Arbeitsmittel, Personal, elektronische Datenverarbeitung, Kommunikationselektronik oder Fahrzeuge [Fuc05].

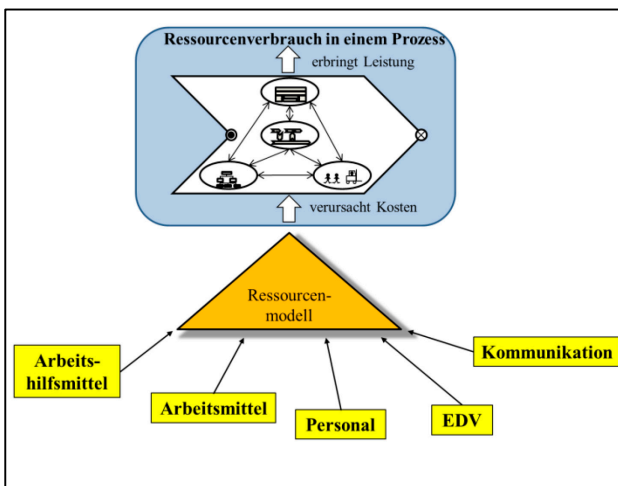


Abbildung 3. Ressourcenverzehr der PKR [Fuc05]

3.1.3 DIREKTE VERRECHNUNG

Durch diese Art der Gemeinkostenverrechnung lassen sich jedoch nicht sämtliche Prozessketten entlang des Lebenszyklus mit einem vertretbaren Aufwand darstellen. Insbesondere für die Prozesse, die sich am Anfang des Lebenszyklus befinden (wie beispielsweise Rohstoffgewinnung, Veredelung, Vorfertigung) und nicht unmittelbar das eigentliche Produkt betreffen, sind Tätigkeitsanalysen schwierig und aufwändig, da viele Prozesse in Bauteile oder Baugruppen und letztlich in das darzustellende Produkt einfließen. Vor allem bei vernetzten Produktionsstrukturen erweist sich eine solche Prozessdarstellung als zu komplex. Für die Berechnung der Kosten in den Produktionsvorlaufketten ist somit ein weiterer Ansatz nötig. Dieser besteht in der wertorientierten Betrachtung der Produkte, die Aussagen über Teilerzeugnisse der Produkte beinhaltet. Auf diese Weise können die Produkte als Einzelkosten kalkuliert werden. Bei der Planung kom-

plexer Produkte, wie bei Anlagen und Maschinen, werden Strukturstücklisten verwendet, die Informationen über den Aufbau der Produkte geben, indem sie aufzeigen, welche Komponenten und Baugruppen in diese einfließen. Diese Produktstruktur wird über die Beschreibung von Verbindungen zwischen Bauteilen und den dabei verwendeten Verbindungstechnologien sowie Vorrangbeziehungen zwischen den Bauteilen abgebildet. Das Aufzeigen der Produktstruktur setzt eine Produktanalyse voraus. In dieser werden zu betrachtende Objekte gewählt, Systemgrenzen festgelegt und Komponenten sowie Wechselwirkungen zwischen einzelnen Komponenten dargestellt [Kis01].

Neben den Produktstrukturen können noch weitere Kosten, die abseits der Prozessketten stehen (wie beispielsweise Energiekosten und Raumkosten) direkt verrechnet werden. Somit ist es mit Hilfe der ressourcenorientierten PKR möglich, die Gemeinkosten indirekt dem Kostenträger über Prozessketten zu verrechnen, während Einzelkosten direkt dem Kostenträger zugerechnet werden können.

3.2 KOSTENARTEN

Mit Hilfe der bestehenden Kostenträgerkalkulation ist es möglich, Kostenarten zu bestimmen und jeweils Anteile davon direkt oder indirekt über Prozesskosten zu verrechnen. Diese Kostenarten bzw. die hinterlegten Prozessketten wurden durch Literatur, durch Prozessanalysen und durch Expertengespräche erhoben. Die Kostenarten bilden den gesamten Lebenszyklus von der Projektierung bis zur Verschrottung eines Antriebssystems ab. Folgende Kostenarten wurden bei Antriebssystemen in der Förder-technik definiert:

- Projektierungskosten
- Bestellungskosten
- Anschaffungskosten
- Installationskosten
- Inbetriebnahmekosten
- Energiekosten
- Instandhaltungskosten
- Flächenkosten
- Entsorgungskosten

Neben diesen Kosten wurden zudem Erlöse im Lebenszyklus identifiziert. Nach den Entsorgungskosten treten etwa Verschrottungserlöse auf. Im Folgenden werden beispielhaft die Energiekosten und die Instandhaltungskosten näher vorgestellt.

3.2.1 ENERGIEKOSTEN

Kernstück vieler Fördermittel stellt das elektromotorische Antriebssystem dar, das den Leistungsbedarf des Fördermittels deckt. Der Grund liegt darin, dass Antriebssysteme Energiewandler sind, die elektrische Energie in mechanische Energie umwandeln [Rud08] [Mar09]. Der Energiebedarf und damit die resultierenden Energiekosten nehmen somit in der Fördertechnik eine zentrale Rolle ein. Unabhängig von der zu untersuchenden Maschine bzw. Anlage sind zwei Ansätze zur Bestimmung des Energiebedarfs bekannt. So wird zwischen dem Berechnungsansatz (engl.: „screening approach“) und der tiefergehenden Energiebedarfsanalyse (engl.: „in-depth approach“) unterschieden. Beim Berechnungsansatz werden Reihen von Gleichungen basierend auf den Regeln der Physik und des Ingenieurwesens sowie Datenblätter der Industrie eingesetzt. Der Energiebedarf der Arbeitsmaschine des Fördermittels lässt sich somit anhand der benötigten mechanischen Antriebsleistung ermitteln. Die tiefergehende Energiebedarfsanalyse ist detaillierter und führt zu präziseren Ergebnissen [Kel12].

Um die Energiekosten nach dem genannten Berechnungsansatz präzise ermitteln zu können, werden die entsprechenden Gleichungen für die Leistung benötigt. Dabei kann die Leistung bei Kreisbewegungen als Produkt von Drehmoment und Drehgeschwindigkeit definiert werden [Kie07]. Für die Ermittlung der mechanischen Leistung am Abtrieb werden die Bewegungsprozesse eines Fördermittels benötigt. Diese beschreiben, welche Massen mit welchen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen unter welchen Bedingungen wie bewegt werden müssen. Grundlage hierfür sind Fahrdiagramme (v-t-Diagramme), die sich aus den Spielzeiten der Fördermittel abbilden lassen [VDI94].

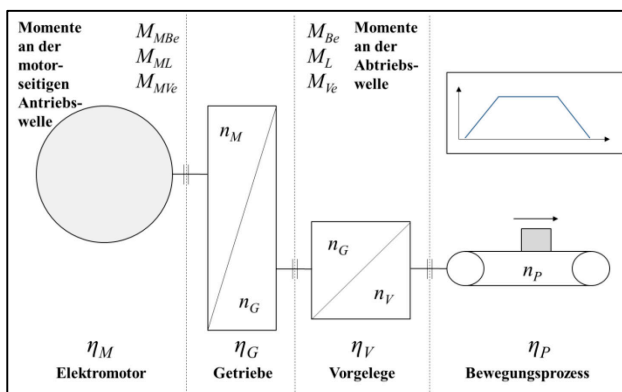


Abbildung 4. Ermittlung der Drehmomente am Antrieb

In den Fahrdiagrammen lassen sich neben der Bewegung pro Fahrabschnitt gleichzeitig auch die benötigten mechanischen Drehmomente darstellen. Dies geschieht durch die Berechnung der Motormomente der Fahrabschnitte durch das jeweilige Beschleunigungsmoment, das jeweilige Lastmoment und das jeweilige Bremsmoment. Durch Übersetzungen von Getrieben (inkl. eventuell auf-

tretenden Vorgelegen) und durch Wirkungsgrade können die Momente und die Drehzahlen an der Antriebswelle des Motors bestimmt werden. Die linearen Bewegungsgleichungen sowie Gleichungen für die Bestimmung der Drehmomente in den Fördermitteln sind dabei hinreichend bekannt.

Der Energiebedarf hängt dabei vom jeweiligen definierten Fördermittel (Rollenförderer, Kettenförderer usw.) und dem daraus resultierenden Lastspiel ab. Dieses Lastspiel wirkt sich auf den gewählten Elektromotor mit seiner spezifischen Wirkungsgradkennlinie in Abhängigkeit der Last aus. Hierbei werden allgemein bekannte Energieeffizienzklassen (IE1, IE2, IE3, IE4) berücksichtigt [IEC10]. Wie genau der Wirkungsgrad auf Basis der Energieeffizienzklassen individuell ansteigt, ist abhängig von der gegebenen Nennleistung des Motors und seiner spezifischen Lastwirkungskennlinie. Um einen optimalen Wirkungsgrad zu gewährleisten, kommt der Auswahl des richtigen Motors eine hohe Bedeutung zu. Daher ist bei der Projektierung das Einsatzgebiet des Antriebs zu identifizieren, um die optimale Nennleistung zu bestimmen und Parameter wie Einschaltdauer und Lastspitzen zu berücksichtigen. Hierbei ist zu beachten, dass der Wirkungsgrad eines Asynchronmotors in geringen Lastbereichen stark abfällt und bei Maximallast ebenfalls abflacht [Weh11]. Die folgende Abbildung stellt den Wirkungsgradverlauf einer exemplarischen Lastwirkungskennlinie in Abhängigkeit seiner Auslastung dar [Bin09].

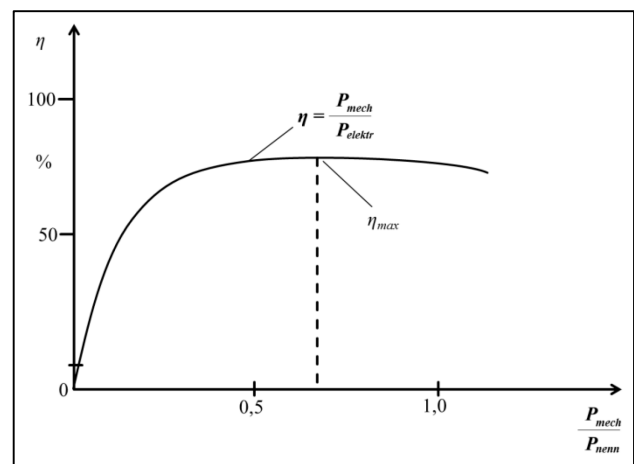


Abbildung 5. Wirkungsgrad zur Motorauslastung [Bin09]

Weiterhin wurden Getriebe und Frequenzumrichter individuell mit den jeweiligen Parametern und Gleichungen integriert.

3.2.2 INSTANDHALTUNGSKOSTEN

Die Instandhaltung leistet im Lebenszyklus einer Fördertechnikanlage einen entscheidenden Beitrag zur Nutzung, Verfügbarkeit und Werterhaltung [VDI03]. Die Aufgabe der Instandhaltung besteht somit darin, eine möglichst störungsfreie Nutzung von Maschinen und Anlagen zu gewährleisten [Str12]. Sie lässt sich in präventive und korrektive Instandhaltung aufteilen. Hierbei dient die präventive Instandhaltung der Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes sowie der Bewahrung des Soll-Zustandes von Anlagen, Geräten und Komponenten. Diese werden planmäßig zu vorher festgelegten Zeitpunkten oder periodisch und ohne Rücksicht auf den Zustand der Anlage, also ohne einen existierenden Ausfall, durchgeführt. Dies hat den Zweck, aufkommenden Störungen und Ausfällen vorzubeugen bzw. solche zu verhindern, die durch Verschleiß, Alterung, Korrosion und Verschmutzung entstehen [Ber04].

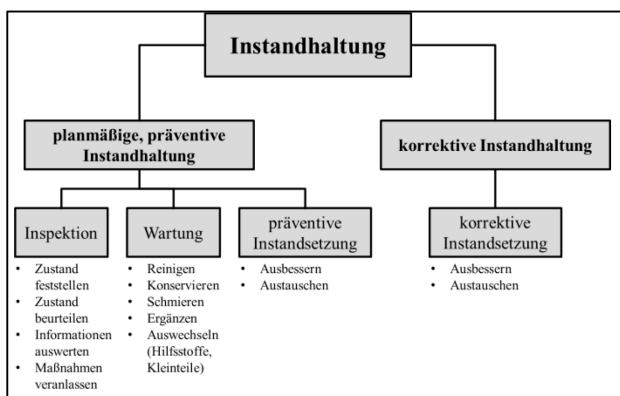


Abbildung 6. Instandhaltungsarten [Mat10]

Da im laufenden Betrieb Aktivitäten der präventiven Instandhaltung Aktivitäten der reaktiven Instandhaltung beeinflussen, ist es üblich, verschiedene Vorgänge der Aktivitäten in Instandhaltungsstrategien zusammenzufassen. Diese beschreiben, ob Maßnahmen durchzuführen sind und wenn ja wo, von wem, wie und wann erfolgen. Insgesamt können drei Instandhaltungsstrategien unterschieden werden:

- Ausfallstrategie
- Präventivstrategie
- Inspektionsstrategie

Da Antriebssysteme durch einen einfachen und robusten Aufbau kostengünstig, betriebssicher und nahezu wartungsfrei sind [Rud08], wird die Ausfallstrategie im Modell standardmäßig eingesetzt. Zum anderen ist die Anwendung der Inspektionsstrategie möglich. Auf Basis dieser Strategien können individuelle Prozessketten definiert werden, die dann mit Hilfe der ressourcenorientierten PKR verrechnet werden. Zusätzlich zu den Instandhal-

tungsprozessen müssen Einzelkosten berücksichtigt werden. Diese sind beispielsweise Materialkosten für Wartung, Reinigung und Instandsetzung, die nach entsprechendem Materialverbrauch (z. B. nach Anzahl der Wartungen bzw. Reinigungen oder nach Menge der Ersatzteile bei der Instandsetzung) kalkuliert werden. Zusätzlich zu den Materialkosten werden Lagerhaltungskosten auf Basis der eingelagerten Paletten (mit Ersatzteilen, Reinigungsmitteln oder Wartungsmitteln) berücksichtigt.

3.3 MODELLVORSTELLUNG

Durch die Kostenträgerverrechnung in definierten Kostenarten durch Prozesskosten und Einzelkosten lassen sich die LZK aufsummieren. Wie die einzelnen Informationen nacheinander verarbeitet und als Daten eingebettet werden, erfordert jedoch eine mehrstufige Modellstruktur. Mit Hilfe dieser Struktur ist es möglich, Eingabeinformationen und Berechnungen zu ordnen und die LZK-Prognose gezielt zu kalkulieren, indem Parameter nacheinander an die LZK-Kalkulation übergeben werden. Zudem hilft die Modellstruktur, in einer späteren Softwareumsetzung, entsprechende Eingabemasken für eine Umsetzung zu einem Demonstrator zu entwerfen, um den Anwender der Methodik zielgerichtet zu einer verlässlichen LZK-Prognose zu führen. Somit wurde ein Modell mit vier sich aufbauenden Ebenen zur Berechnung von LZK entwickelt, das in der Lage ist, von einer Fördertechnikanlage die spezifischen Fördermittel abzubilden und die nötige Antriebstechnik auszuwählen. Es besteht aus drei Definitionsebenen und einer LZK-Kalkulationsebene. Die folgende Abbildung stellt das Modell grafisch dar.

3.3.1 FÖRDERTECHNIKANLAGENEbene

Das Fundament des Modells ist die Fördertechnikebene. Hier werden grundlegende Einstellungen bezüglich des Kostenträgers als Fördertechnikanlage definiert. So ist zu bestimmen, welche Arten von Fördermitteln (Rollenförderer, Kettenförderer usw.) in der Anlage vorhanden sind. Ebenfalls werden die Betriebszeiten festgelegt. Diese implizieren die Laufzeit als Anzahl der Jahre, die betriebenen Tage im Jahr und die Stunden am Tag. Auf diese Weise können Schichtmodelle abgebildet werden. Zusätzlich wird an dieser Stelle bestimmt, welches Steuerungskonzept für die Fördertechnikanlage verwendet wird. Diese Eingabe hat Auswirkungen auf die aufbauenden Ebenen. Eine ähnliche Vorgehensweise wird bei der Wahl der Instandhaltungsstrategie angewandt. So werden bei der Ausfallstrategie andere Prozessketten für die Instandhaltung vorkonfiguriert als bei der Inspektionsstrategie.

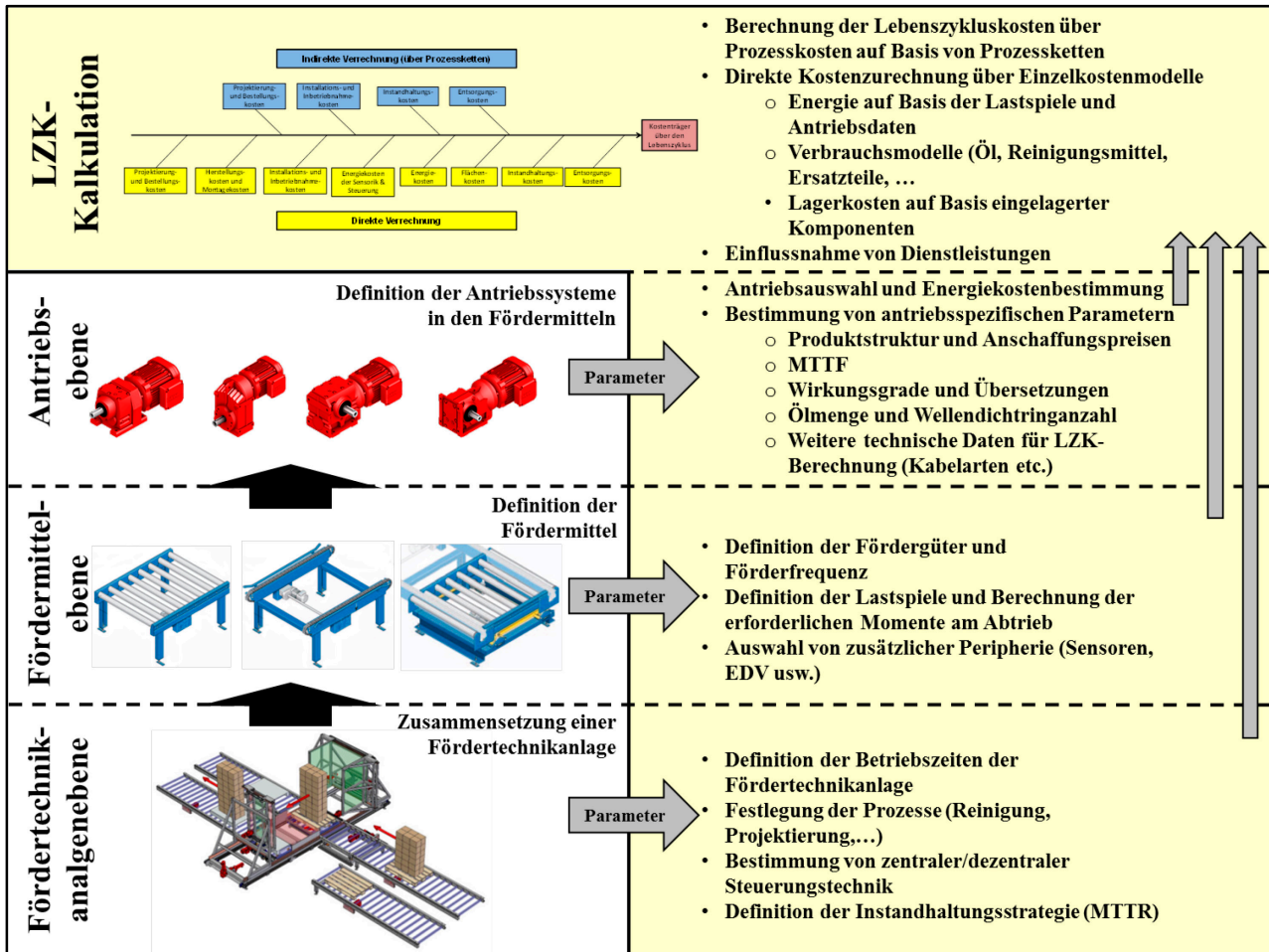


Abbildung 7. Vier-Ebenen-Modell zur Berechnung der LZK

3.3.2 FÖRDERMITTELEBENE

In einem zweiten Schritt werden die einzelnen Fördermittel genauer definiert. Die Art des Fördermittels bestimmt, wie viele Antriebssysteme in diesem vorhanden sind und welche Bewegungsart (lineare oder rotatorische Bewegung) diese durchführen. So besteht ein Rollenförderer aus einem Gestell mit montierten beweglichen Rollen, einer Verbindungskette zwischen den Rollen und einem elektrischen Getriebemotor als Antrieb, der die Rollen antreibt und die zu fördernden Waren linear bewegt. Ein Drehtisch dagegen benötigt zwei Antriebssysteme. Der eine Antrieb ist für die rotatorische Drehung der Tischplatte zuständig, der andere sorgt für eine lineare Aufnahme und Abgabe von Fördergütern. Dies geschieht beispielsweise durch eine Rollenbahn, die auf der Drehtischplatte montiert ist. Ebenso werden bei einem Hubtisch mit Rollenförderer zwei Elektroantriebe (für Horizontal- & Vertikalbewegung) eingesetzt. Aus diesem Grund müssen die benötigten Momente pro Antriebssystem in den Fördermitteln berechnet werden. Dieser errechnet sich jeweils aus einer Reihe mechanischer Gleichungen, die sich aus verschiedenen Grundmustern von Linear- sowie Rotationsbewegungen am Abtrieb zusam-

mensetzen. Hierzu werden Lastdaten wie Fördergutmassen, Massenträgheitsmomente, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Schalzhäufigkeiten, Betriebszeiten in Abhängigkeit der Betriebsarten und der Einschaltdauer ermittelt. Zudem wird ein Prozesswirkungsgrad der Kraftaufnahmemittel (Rolle, Kette) berücksichtigt. Auf Basis dieser Daten kann der benötigte mechanische Leistungsbedarf des Abtriebs berechnet werden.

Die Fördermittel können anhand ihrer Parameter beliebig verändert werden. So kann beispielsweise zwischen einem Zweistrang- und einem Dreistrang-Kettenförderer unterschieden werden, indem die Widerstandswerte und die Kettenmassen angepasst werden. Bei einem Rollenförderer können z. B. die Rollen beliebig variieren, so dass Hohlrollen oder Massivrollen in unterschiedlichen Größen zum Einsatz kommen können. Neben den Fördermitteln kann das Lastspiel beliebig angepasst werden. So können Fördergutmassen sowie Förderfrequenzen in jedem Fördermittel definiert werden.

3.3.3 ANTRIEBSEBENE

Sobald die benötigten Momente für die definierten Lastspiele in der Fördermittelebene identifiziert wurden, können die in Frage kommenden Elektromotoren zusammen mit Getrieben und Frequenzumrichtern ausgewählt werden. Die entsprechenden Kombinationen von Elektromotor, Getriebe und Frequenzumrichter lassen hierzu bestimmte Variationen zu, die vorab definiert werden müssen. Somit ist diesen Komponenten eine Vielzahl von Parametern zu hinterlegen. Neben den Preisen, Massen, Wirkungsgraden, Ausfallkennwerten, Wartungszeiten und spezifischen Energieeffizienzklassen kann ebenfalls die Produktstruktur gespeichert werden, um Aussagen über die Montage, Instandhaltung und Demontage sowie die Wertigkeiten von Komponenten des Produkts zu treffen. In Abhängigkeit vom gewählten Steuerungskonzept aus der Fördertechnikanebene werden zudem passende Frequenzumrichter vorgeschlagen. Auf diese Weise ist es möglich, dass für ein bestimmtes Fördermittel mit einem spezifischen Lastspiel zusammen mit den erforderlichen Momenten mehrere Antriebssysteme auswählbar sind, die bewertet und verglichen werden können. Somit wird eine Möglichkeit geschaffen, den Wirkungsgrad des Elektromotors und damit die Energiekosten durch die Auslastung, Getriebekombinationen oder eine verbesserte Energieeffizienzklasse zu beeinflussen.

3.3.4 LZK-KALKULATION

In der LZK-Kalkulation werden die Informationen der drei Definitions-Ebenen gespeichert, indem auf Basis von Parameterübergaben bestimmte Prozessketten und Antriebssysteme vorausgewählt werden. Anschließend werden die Kostenarten entlang des Lebenszyklus berechnet. Dies geschieht einerseits durch Prozesskosten entlang der Prozessketten, andererseits durch Einzelkosten auf Basis der erläuterten Gleichungen. Weitere anfallende Kosten, wie die Anschaffungskosten für die Verkabelung oder die Peripheriekosten werden direkt als Einzelkosten aufaddiert. Somit ist es im Modell möglich, durch die Definition von Parametern in den drei Definitions-Ebenen im vornherein einen Teil der Kosten zu beeinflussen. Somit ist neben der Variation von Prozessketten eine individuelle Auswahl und Zusammenstellung eines Antriebssystems für eine Fördertechnikanlage gegeben.

Mit Hilfe des Vier-Ebenen-Modells und der vollständigen Parametrisierung der Fördermittel, Antriebssysteme und der Fördergüter können unterschiedlichste Spezifikationen des Anlagenbetreibers berechnet und die LZK individueller Fördertechnikanlagen prognostiziert werden.

3.3.5 SOFTWARE-UMSETZUNG

Da die Methodik aus der aufgezeigten kombinierten Verrechnung vielschichtig ist, bedarf es eines EDV-gestützten Softwaretools, das in der Lage ist, sämtliche Rechenschritte des Modellaufbaus auszuführen. Aus diesem Grund wurde ein LZK-Softwaretool zur Ermittlung von LZK von Fördertechnikanlagen entwickelt. Dieses stellt eine instrumentelle Umsetzung des beschriebenen theoretischen Vier-Ebenen-Modells dar und ist in der Lage, die Prozesse der ressourcenorientierten PKR sowie direkte Verrechnungen durch den Zugriff auf unterschiedliche Datenbanken zu realisieren. Mit Hilfe des Tools können Fördertechnikanlagen durch Aneinanderreihung von Fördermitteln konfiguriert werden. Die benötigten Daten für die Fördermittel werden dazu aus einer Datenbank ausgelesen. Für die Umsetzung wurden Standardfördermittel aus der Palettenfördertechnik in das Tool integriert, indem Katalogdaten von Rollenförderern, Kettenförderern sowie Umsetzfördertechnik (beispielsweise Exzenterhubtische, Drehtische mit Rollenförderern und Drehtische mit Kettenförderern) eines Fördertechnik-Ausrüsters übernommen wurden.

Die folgende Abbildung stellt die Eingabemaske der Zusammenstellung einer Fördertechnikanlage mit der Auswahl an Fördermitteln im LZK-Tool dar.

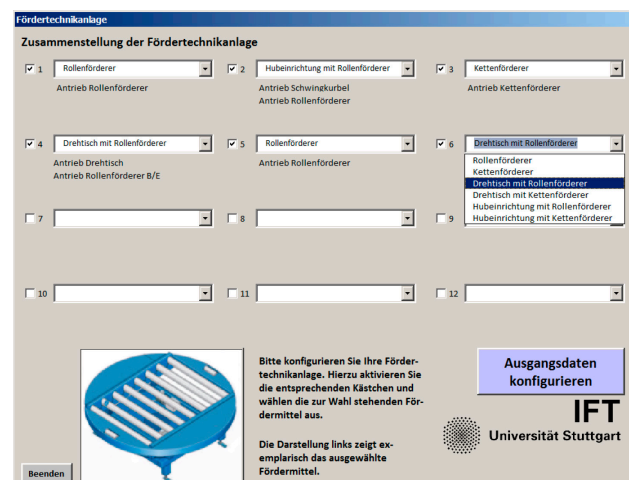


Abbildung 8. Software-Umsetzung des Modells

Durch die Berechnung der mechanischen Bewegungsfunktionen können die Lastspiele für jeden Antrieb in der Fördertechnikanlage individuell erstellt werden. Auf Basis der definierten Lastspiele kann als Antrieb ein passender Elektromotor verschiedener Energieeffizienzklassen mit Getriebe und passender Steuerungselektronik im Tool ausgewählt werden. Durch die Wahl des Antriebs werden die Herstellungskosten sowie die Anschaffungskosten definiert. In Kombination mit den errechneten Lastspielen lassen sich die Energiekosten jedes Antriebs berechnen. Mit Hilfe des hinterlegten Prozessmodells und weiterer Einzelkosten (Lagerkosten, Versandkosten usw.),

werden neben den Energiekosten zusätzlich weitere Kosten (Projektierung, Installation usw.) berechnet.

4 ÜBERPRÜFUNG UND ERGEBNISSE

4.1 VERIFIZIERUNG UND VALIDIERUNG

Zur Verifizierung von Antriebssystemen wurden Produktanalysen von einem Antriebshersteller auf Basis von CAD-Zeichnungen und Stücklisten durchgeführt. Des Weiteren wurden Produktdaten in Form von technischen Anleitungen und Katalogen bereitgestellt. Im Zuge der Produktanalysen wurden verschiedene Antriebssysteme aus den Drehstromasynchronmotoren verschiedener Energieeffizienzklassen mit Zahngetrieben und entsprechender Steuerungselektronik untersucht. Mit Hilfe von Produktanalysen ist es möglich, die Komponenten und Baugruppen in eigene Produktstrukturen nach ihren Stücklisten zu klassifizieren. Auf diese Weise konnten ermittelte Produktstrukturen aufgezeichnet, ausgewertet und in Datenbanken des Softwaretools eingepflegt werden.



Abbildung 9. Produktanalysen von Antriebssystemen

Herstellkosten der Produkte wurden über Materialpreise und gegebene Verarbeitungskosten berechnet. Die Summe der Materialpreise der Komponenten ergibt somit die Fertigungskosten des Produkts.

Für die ressourcenorientierte PKR sind Prozesszeiten essentiell. Diese können durch verschiedene Methoden verifiziert werden. So wird für Zeitermittlungen zwischen analytisch-experimentellen und analytisch-rechnerischen Methoden unterschieden. Für die Prozesszeitermittlung wurde soweit möglich die analytisch-rechnerische Methode „Methods Time Measurement“ (MTM) verwendet. Bei einem definierten Produktspektrum, bei dem verschiedene Varianten zum Einsatz kommen, wird das „Universelle Analysier System“ (UAS) von MTM herangezogen. Die UAS-Grundvorgänge sind ein verdichtetes Verfahren, welches auf den Grundbewegungen von MTM aufbaut.

Anhand der vorliegenden Produktstrukturen, die durch Demontagen und Montagen von Antriebssystemen ermittelt wurden, konnten Zeiten für Demontage- und Montageprozesse mittels MTM-UAS ermittelt werden. Außerdem wurden Zeiten für Inspektion, Wartung, Reini-

gung und Instandsetzung definiert. Aus den MTM-Grundbewegungen lassen sich neben dem MTM-UAS außerdem Standardvorgänge im Bereich Logistik abbilden. Vor allem logistische Tätigkeiten im Bereich Transport und Handling sind durch einen hohen Wiederholungscharakter geprägt, so dass Mitarbeiter eine Routine in ihren Tätigkeiten erwerben können. Ebenfalls stehen den Mitarbeitern optimierte Arbeitsplätze und Arbeitsmittel zur Verfügung. Somit ist es möglich, die logistischen Teilprozesse mit Hilfe von MTM-Logistik zu verifizieren. Für Prozesse, für die eine MTM-Analyse nicht geeignet ist, wurde eine Verifizierung mittels Experteninterviews durchgeführt.

Für die Validierung wurden mit Hilfe des Modells verschiedene Abschnitte von Förderanlagen aus der Praxis zur Validierung berechnet und vorgestellt. Insbesondere wurden Energiemessungen und Energieberechnungen verglichen.

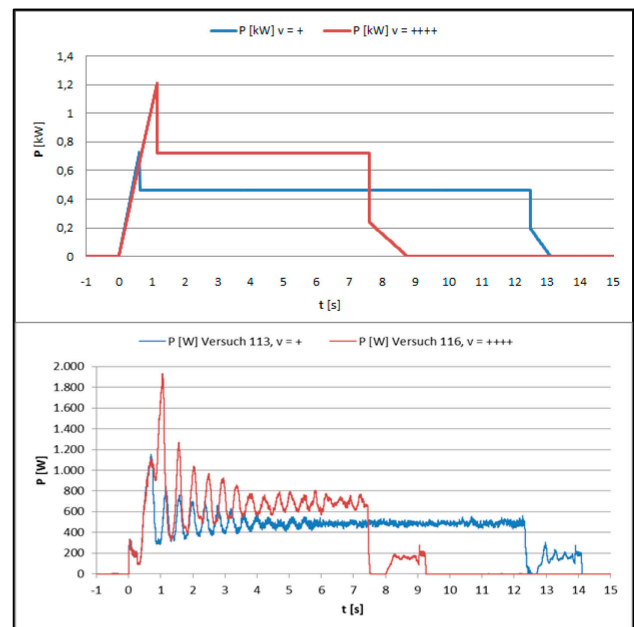


Abbildung 10. Berechnung und Messung des Energiebedarfs

4.2 ERGEBNISSE

Das Ergebnis der LZK-Prognosen durch das LZK-Tool lieferte insgesamt folgende Ergebnisse: Die Anschaffungskosten für die Fördermittel nehmen den Großteil der gesamten Kosten im Lebenszyklus ein. Sie bewegen sich bei allen untersuchten Anlagen um die 80 % aller Kosten im Lebenszyklus. Die restlichen 20 % der Gesamtkosten entfielen auf die Folgekosten. Hierbei fiel auf, dass die Energiekosten der Antriebssysteme einen relativ geringen Stellenwert einnehmen. Dies ist einerseits durch niedrige bzw. stark schwankende Fördergutmassen und andererseits durch eine niedrige Förderfrequenz der untersuchten Anlagen zu erklären. Durch die niedrigen durchschnittlichen Fördermassen wurde zudem festgestellt, dass

häufig die Getriebemotoren nicht im optimalen Lastpunkt arbeiten und somit überdimensioniert sind. Dies resultiert zusätzlich in einem schlechten Wirkungsgrad. Bei reduzierten Massen müssen diese jedoch deutlich kleinere Momente aufnehmen und benötigen dadurch auch weniger Energie. Weit höher als die Energiekosten fallen die Instandsetzungskosten aus. Dies ist damit zu begründen, dass mit den bereits verbauten Antriebssystemen zusätzlich Komponenten zur Vorhaltung beschafft werden müssen. So können diese bei einem Ausfall schnell ersetzt werden. Somit sind der Großteil der Instandsetzungskosten wieder Anschaffungskosten. Weitere Folgekosten des Betreibers sind Wartungskosten. Diese sind abhängig von der Anzahl der Antriebssysteme und damit von manuellen Getriebeöl- und Wellendichtringwechseln. Während der gesamten Betriebszeit sind bei sämtlichen Antriebssystemen die Wellendichtringe zu tauschen und das Getriebeöl muss einmal neu eingefüllt werden. Die manuellen

Wechselprozesse werden primär durch die Tätigkeiten in der PKR dominiert. Einzelkosten wie Ersatzwellendichtringe und Lagerkosten fallen bei den Wartungskosten kaum ins Gewicht. Außerdem fallen Projektierungskosten an, die vor der Realisierung der Fördertechnikanlage entstehen. Am Ende des Lebenszyklus kommen auf den Betreiber Entsorgungskosten zu, die durch das Herauslösen der Antriebssysteme aus den Fördermitteln und durch die Lagerauflösung anfallen. Weitere weniger signifikante Kosten des Betreibers sind Bestellungskosten, Installationskosten, Inbetriebnahmekosten, Reinigungskosten und Flächenkosten. Durch die Anwendung der Ausfallstrategie fallen zudem so gut wie keine Inspektionskosten an. Den Kosten gegengerechnet werden kann der Erlös der Antriebssysteme sowie der Verkabelung durch Verschrottung. Die folgende Abbildung stellt eine beispielhafte Betreibersicht eines Anlagenabschnitts in einem Unternehmen dar.

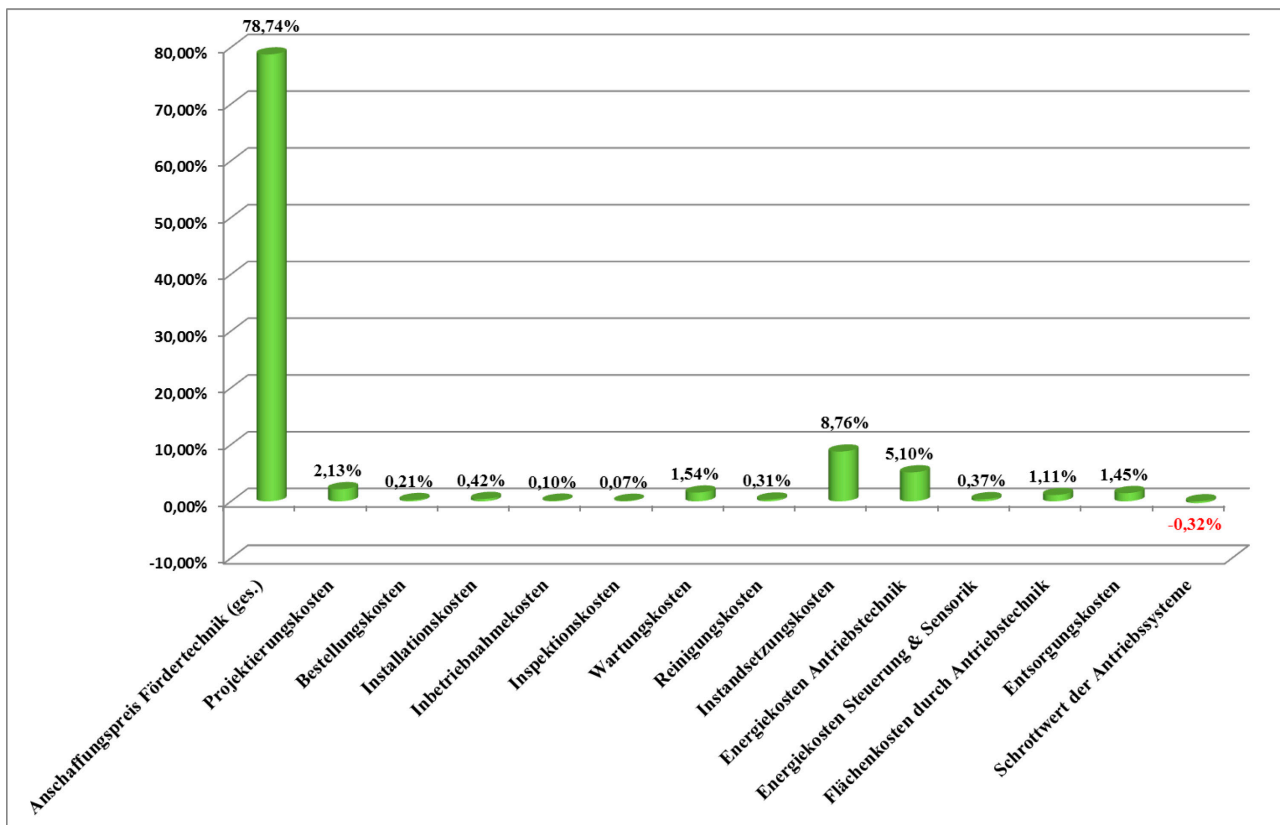


Abbildung 11. Beispielhaftes Ergebnis einer Anlage

Die Kostenverhältnisse können sich jedoch mit der Anzahl der Antriebssysteme in einer Fördertechnik ändern. Die folgende Abbildung stellt diesen Umstand am Beispiel von Energiekosten, Instandsetzungskosten und Wartungskosten dar, indem ein gegebener Fördertechnik-anlagenausschnitt stetig erweitert wird. Während die Verfügbarkeit bedingt durch die Reihenschaltung immer weiter sinkt, steigen ebenso die Instandsetzungskosten aufgrund einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Ausfalls. Dabei ist der Anstieg der Instandsetzungskosten zu An-

fang stark, da mit dem Einsatz unterschiedlicher Antriebssysteme neue Ersatzkomponenten zur Vorhaltung im Lager beschafft werden müssen. Sobald die notwendigen Ersatzkomponenten zur Vorhaltung im Lager angelegt wurden, schwächt sich der Anstieg der Instandsetzungskosten ab. Die Wartungskosten steigen wie die Instandsetzungskosten mit Zunahme der Antriebssysteme in den Fördermitteln an. Sie sind abhängig von der Anzahl der Ölwechsel und der Wechseln von Wellendichtringen und somit von der Anzahl der Antriebssysteme in der Fördertechnikanlage. In Abhängigkeit der Personalkosten kön-

nen die beiden Steigungen im Instandhaltungsbereich stärker oder schwächer ansteigen. Die Energiekosten steigen in Abhängigkeit von Fördermittelarten bzw. Nennleistungen der verbauten Elektromotoren, Strompreisen und Förderfrequenzen. Durch den im Beispiel periodischen Einsatz von Kettenförderern nähern sich dabei die Energiekosten treppenstufenartig den Instandsetzungskosten immer weiter an. Somit übertreffen ab einer gewissen Fördermittelanzahl die Energiekosten die Instandsetzungskosten.

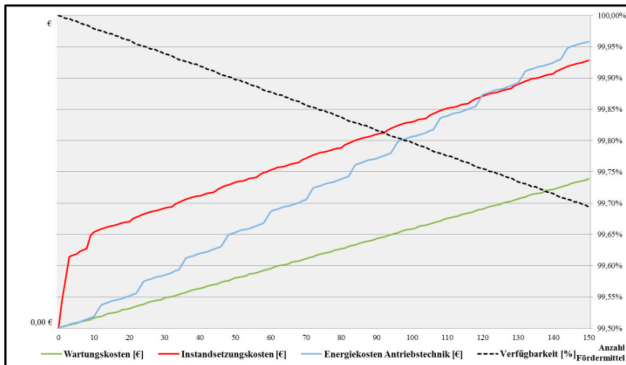


Abbildung 12. Kostenverhältnis bei steigender Antriebszahl

Auf diese Weise kann gezeigt werden, dass die ermittelten Kostenverhältnisse für Fördertechnikanlagen mit einer steigenden Anzahl von Fördermitteln nicht statisch sind, sondern sich je nach Einsatz von Personalkosten, Fördermittelarten, Förderfrequenzen und Strompreisen verändern können. Da Fördertechnikanlagen immer individuell gestaltet sind, die Variation an Fördermitteln sehr hoch ist und sich Förderstrecken zusätzlich noch in mehrere Nebestrecken verzweigen können, sind weitere stichprobenhafte Untersuchungen notwendig, um fundierte Aussagen über die Kostenverhältnisse bei einer steigenden Anzahl von Fördermitteln zu treffen.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wie Untersuchungen von Anwendungsfällen zeigen, dominieren die Energiekosten nicht im Lebenszyklus bei Antriebssystemen mit geringen Leistungen und Fördertechnik mit niedriger Förderfrequenz. Durch die Verwendung von Antriebssystemen mit kleinen Leistungen, die in der handelsüblichen Fördertechnik vorzufinden sind, bilden vor allem die Anschaffungskosten im Lebenszyklus die hauptsächlichen Kosten. Man kann im Leistungsbereich von Stetigfördertechnik von einem umgedrehten Eisberg sprechen. Neben den Energiekosten sind weitere Folgekosten Instandsetzungskosten, Energiekosten, Wartungskosten sowie Kosten im Zuge der Projektierung, Installation und Inbetriebnahme relevant. Ansonsten sind hauptsächliche Kosten die Investitionskosten, die einen Großteil der Gesamtkosten einnehmen. Die Energiekosten erhöhen sich jedoch, wenn Getriebemotoren mit höheren Leistungen eingesetzt werden. Auch ändern sich diese,

wenn mit höheren Förderfrequenzen gefördert wird sowie schwerere Fördermassen bewegt werden. Sinnvoll ist der Einsatz von LZK bei Fördertechnikanlagen dennoch, da in den Anwendungsfällen gezeigt wurde, dass die Anlagen eine hohe Kostenfestlegung aufweisen. Somit kann mit Hilfe der LZK-Analyse bestimmt werden, wie sich die Gesamtkosten insgesamt verringern lassen.

Zusammengefasst sind umfangreiche LZK-Betrachtungen von Fördertechnikanlagen aufwändig aber auch hilfreich, da diese immer individuell an Unternehmen angepasst sind und Hersteller von Antriebssystemen hier verstärkt ihren Blick auf kundenorientierte Lösungen richten können. Lösungen zur Energieeffizienz allein sind bei handelsüblicher Fördertechnik, speziell bei Stetigförderern, nicht mehr ausreichend. Hierbei bietet das entwickelte Modell zur LZK-Kalkulation von Antriebssystemen in Fördertechnik eine Möglichkeit, wie LZK von Antriebssystemen in Fördertechnik detailliert berechnet werden können und liefert eine hohe Kostentransparenz und -genauigkeit. Dabei ist es nicht ausreichend, einzelne Fördermittel zu vergleichen. Die Stärke der Vorgehensweise im Modell liegt im modularen Aufbau einer Fördertechnikanlage aus einem Portfolio aus frei definierbaren Fördermitteln, die individuell mit Antriebstechnik versehen werden können. Dennoch kann das Modell aufgrund der zahlreichen Einflüsse zwischen Fördermittelparametern, Antriebsparametern und weiteren Unsicherheitsfaktoren wie beispielsweise die Ausfallrate die Kosten für die Zukunft nur schätzen. Jedoch ist es mit dem beschriebenen Ansatz möglich, dass unterschiedliche Fördertechnikanlagen mit unterschiedlichen Fördergütern anhand eines einheitlichen Modells verglichen werden können. Auf diese Weise können Hersteller von Fördertechnik in Verkaufsgesprächen Anlagenbetreiber auf bestimmte Folgekosten je nach Fördertechnikanlage hinweisen und gleichzeitig passende Lösungen, wie Instandhaltungsservice, energieeffizientere Elektromotoren, effizientere Inbetriebnahme usw. anbieten. Auf diese Weise können durch maßgeschneiderte Lösungen und Serviceleistungen Betreiber bei der Investition einer Fördertechnikanlage begleitet werden und neue Arten der Dienstleistungen können erschlossen werden. Zudem ist die Darstellung komplexer Zusammenhänge einer Fördertechnikanlage von Antriebssystemen, Fördermitteln, Lagerbildung und Ersatzteilmanagement möglich und dient der Wissensnutzung von Herstellern, da Zusammenhänge und Wechselwirkungen oft nur auf Erfahrungen von Experten basieren.

Im Moment werden wenige Arten von Fördermitteln aus dem Bereich der Stetigförderer berücksichtigt, die allerdings beliebig parametrisiert werden können. Von daher sind weitere Validierungsanlagen zu untersuchen, die weitere Arten von Fördermitteln beinhalten, um anhand von Analysen von Lastspielen und weiteren technischen Daten in das Modell hinzuzufügen. Mit zusätzlichem Aufwand ist zudem theoretisch die Integration von Unstetigförderern möglich. Die Vision der Methodik besteht in

der vollständigen Vergleichbarkeit und Beurteilung sämtlicher Fördermittel in Produktions- und Distributionszentren und somit aller erdenklichen Fördertechnikanlagenkombinationen.

LITERATUR

- [Alb09] Albrecht, Volker; Wetzel, Peter (2009): M-TCO – Daimler AG. In: Schweiger, Stefan (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren – Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage, 2009, S. 81-96
- [Alm08] de Almeida, Aníbal T., et al. (2008): EUP Lot 11 Motors Final Report. University of Coimbra (Portugal), 2008
- [Ber04] Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert (2004): Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004
- [Bin09] Binder, Andreas (2009): Technische Optimierungspotentiale bei elektrischen Antriebssystemen. Fachforum: Kosten- und Energiesparen durch effiziente elektrische Antriebe. IHK Nürnberg am 20.01.2009
- [Bod11] Bode, Maximilian; Bünting, Frank; Geißdörfer, Klaus (2011): Rechenbuch der Lebenszykluskosten – Ein Leitfaden mit Rechenmodell und Arbeitshilfen. Frankfurt a. M.: VDMA Verlag, 2011
- [Bro79] Brown, Robert J. (1979): A New Marketing Tool: Life-Cycle Costing. In: Industrial Marketing Management 8/1979, pp. 109-113
- [Coe09] Coenenberg, Adolf; Fischer, Thomas M.; Günther, Thomas (2009): Kostenrechnung und Kostenanalyse. 7. Auflage, Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, 2009
- [Der11] Dervisopoulos, Marina (2011): Methode zur lebenszyklusbezogenen Optimierung von Werkzeugmaschinen. Abele, Eberhard (Hrsg.). Aachen: Shaker Verlag, 2011
- [DIN05] DIN EN 60300-3-3 (2005): Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Anwendungsleitfaden Lebenszykluskosten. Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [Eil95] Ellram, Lisa M. (1995): Total Cost of Ownership: An Analysis Approach for Purchasing. In: International Journal of Physical Distribution & Logistics Management Vol. 25, Iss. 8, 1995, pp. 4-23
- [Eve95] Eversheim, Walter (1995): Prozessorientierte Unternehmensorganisation – Konzepte und Methoden zur Gestaltung "schlanker" Organisationen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995
- [Fri10] Friedl, Birgit (2010): Kostenrechnung – Grundlagen, Teilrechnungen und Systeme der Kostenrechnung. 2. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2010
- [Fuc05] Fuchs, Frank (2005): Entwicklung eines Werkzeugs zur ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung für die Logistik. Kuhn, Axel (Hrsg.). Dortmund: Verlag Praxiswissen, 2005
- [Gei10] Geißdörfer, Klaus (2010): Total Cost of Ownership und Life Cycle Costing im Einkauf. Gleich, Ronald et al. (Hrsg.). Freiburg: Haufe-Lexware, 2010
- [Gel10] Geldermann, Jutta; Lauven, Lars; Wiedenmann, Susanne (2010): Lebenszykluskosten als Entscheidungshilfe beim Erwerb von Werkzeugmaschinen. Research Paper, Schwerpunkt Unternehmensführung. Göttingen: Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät der Georg-August-Universität Göttingen, 2010
- [Hor89] Horváth, Péter; Mayer, Reinhold (1989): Prozesskostenrechnung – Der neue Weg zu mehr Kostentransparenz und wirkungsvolleren Unternehmensstrategien. In: Controlling Heft 4, 1989, S. 214-219
- [IEC10] IEC 60034-31 (2010): Rotating electrical machines – Part 31: Selection of energy-efficient motors including variable speed applications. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010
- [Kel12] Kellens, Karel et al. (2012): Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit pro-

- cess life-cycle inventory. In: International Journal of Life Cycle Assessment 17, 2012, pp. 69-78
- [Kie07] Kiel, Edwin (Hrsg.) (2007): Antriebslösungen – Mechatronik für Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [Kis01] Kistner, Klaus-Peter; Steven, Marion (2001): Produktionsplanung. 3. Auflage, Heidelberg: Physica-Verlag, 2001
- [Kuh95] Kuhn, Axel (1995): Prozessketten in der Logistik – Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien. Dortmund: Verlag Praxiswissen, 1995
- [Kuh08] Kuhn, Axel; Hellgrath, Bernd; Hinrichs, Jörg (2008): Logistische Assistenzsysteme. In: Software in der Logistik, 2008, S. 20-26
- [Mar09] Martin, Heinrich (2009): Transport- und Lagerlogistik. 7. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+ Teubner | GWV Fachverlage, 2009
- [Mat10] Matyas, Kurt (2010): Taschenbuch Instandhaltungslogistik. Brunner, Hans J. (Hrsg.). 4. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2010
- [Pfo02] Pfohl, Markus C. (2002): Prototypgestützte Lebenszyklusberechnung. Peter Horváth; Reichmann, Thomas (Hrsg.). München: Verlag Franz Vahlen, 2002
- [Rem05] Remer, Detlef (2005): Einführen der Prozesskostenrechnung. 2. Auflage, Stuttgart: Schäffer-Poeschel-Verlag, 2005
- [Rud08] Rudolph, Manfred; Wagner, Ulrich (2008): Energieanwendungstechnik – Wege und Techniken zur effizienteren Energienutzung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [Sch95] Schuh, Günther; Kaiser, Andreas (1995): Kostenmanagement in der Entwicklung und Produktion mit der Ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung. In: Männel, Wolfgang (Hrsg.): Prozesskostenrechnung – Bedeutung, Methoden, Branchenerfahrungen, Softwarelösungen. Wiesbaden: Dr. Th. Gabler Verlag, 1995, S. 369-382
- [Sch05] Schuh, Günther (2005): Produktkomplexität managen: Strategien – Methoden – Tools. 2. Auflage, München: Carl Hanser Verlag, 2005
- [Sch09] Schweiger, Stefan (2009): Nachhaltige Wettbewerbsvorteile für Anbieter und Nutzer von Maschinen/Anlagen durch Lebenszykluskostenoptimierung schaffen. In: Schweiger, Stefan (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren – Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern. Wiesbaden: Gabler | GWV Fachverlage, 2009, S. 15-34
- [Str12] Strunz, Matthias (2012): Instandhaltung – Grundlagen – Strategien – Werkstätten. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012
- [VDI94] VDI 3646 (1994): Spielzeitermittlung von Fördermitteln der Stetigfördertechnik in automatisierten Lagersystemen. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 1994
- [VDI03] VDI 2885 (2003): Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2003
- [VDI05] VDI 2884 (2005): Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.). Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [VDM06] VDMA 34160 (2006): Prognosemodell für die Lebenszykluskosten. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (Hrsg.). Frankfurt: VDMA-Verlag, 2006
- [Weh11] Wehking, Karl-Heinz et al. (2011): Energieeffizienz in Intralogistiksystemen – Bewertung von Komponenten, Anlagen und Systemen. In: Hebezeuge Fördermittel 11/2011, S. 608-610
- [Weh12] Wehking, Karl-Heinz et al. (2012): Prognose-Modelle für Ressourcen der Intralogistik – Lebenszykluskosten ermitteln. In: Hebezeuge Fördermittel 9/2012, S. 476-478

- [Wil10] Wildemann, Horst (2010): Total Cost of Ownership – Leitfaden zur Optimierung der Gesamtkostenposition in Beschaffung, Produktion und Logistik. 4. Auflage, München: TCW Transfer-Centrum, 2010
- [Wou08] Wouters, Marc (2008): Beyond the Acquisition Price – Total Cost of Ownership for Supporting Purchase Decisions. In: Proceedings of the 8th International Business Research Conference Dubai (UAE), 2008

Jörn Dreier, M.Eng., MBE, research assistant at the Institute for Material Handling and Logistics (IFT), University of Stuttgart. Between 2003 and 2009 he studied production engineering and systems engineering & management at the Ulm University of Applied Science.

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. K.-H. Wehking, director of the Institute for Material Handling and Logistics (IFT), University of Stuttgart.

Address: Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 15B, D-70174 Stuttgart.
Phone: +49 711 685-83770, **Fax:** +49 711 685-83769,

E-Mail: joern.dreier@ift.uni-stuttgart.de

karl-heinz.wehking@ift.uni-stuttgart.de