

Masterarbeit

Energieeffizienz durch Einsatz automatisierter Stapler in ei- nem Distributionszentrum

eingereicht an der

Montanuniversität Leoben

erstellt am

Lehrstuhl Industriellistik

Vorgelegt von:

Wilfried Purgstaller, BSc
0535196

Betreuer/Gutachter:

Univ.-Prof. Mag.et Dr.rer.soc.oec. Helmut Zsifkovits

Leoben, 28.05.2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Wilfried Purgstaller, BSc

Leoben, 28.05.2011

Kurzfassung

Sowohl Fahrerlose Transportsysteme (FTS) als auch manuell bediente Stapler sind heute elementare Bestandteile der Intralogistik. Der technologische Standard hat mittlerweile dazu geführt, dass neben den Staplern auch FTS Einzug in fast alle Branchen und Produktionsbereiche gehalten haben. Insbesondere in Distributionszentren spielen diese automatisierten Flurförderzeuge eine wichtige Rolle.

Es gibt verschiedenste Modelle, die sich mit den entstehenden Kosten von Flurförderzeugen befassen. Hinsichtlich des Energieverbrauchs sind aber noch kaum Untersuchungen oder Erfahrungswerte vorhanden. Daher ist es das zentrale Ziel dieser Arbeit, den Energieverbrauch eines manuell bedienten Staplers sowie eines Fahrerlosen Transportfahrzeugs (FTF) zu ermitteln, die Ergebnisse zu vergleichen und daraus allgemeine Schlussfolgerungen abzuleiten. Zu diesem Zweck wurden Messungen durchgeführt. Zum einen wurde der jeweilige Energieverbrauch unter standardisierten Bedingungen in einem Testaufbau gemessen, zum anderen unter realen Bedingungen aus der Praxis eines österreichischen Lebensmittelkonzerns.

Nach einer Einführung in das Thema der Distributionszentren mit einer Betrachtung der verschiedenen Prozesse werden die Ergebnisse der Energiemessungen diskutiert. Bezogen auf den Energieverbrauch pro Stunde schneidet ein FTF sowohl im Praxistest als auch bei den standardisierten Testläufen besser ab als ein manuell bedienter Stapler. Weiters ergaben die Energiemessungen, dass bedingt durch die geringere Umschlagsleistung eines FTF dessen Gesamtenergieverbrauch höher ist. Generell kann man für die Erbringung einer bestimmten Arbeitsleistung festhalten, dass ein manuell bedienter Stapler durch hohen Momentanverbrauch in einer kurzen Zeitspanne insgesamt weniger Energie konsumiert als ein FTF, da dieses mit einem niedrigen Durchschnittsverbrauch eine längere Zeitspanne benötigt. Der Energieverbrauch der zusätzlichen elektronischen Komponenten eines FTF schlägt sich hier zu Buche.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist zu empfehlen, die elektronischen Komponenten hinsichtlich ihrer Energieeffizienz weiterzuentwickeln. Weiters sollten Maßnahmen gesetzt werden, um einem FTF höhere Geschwindigkeiten und damit eine bessere Umschlagsleistung zu ermöglichen.

Abgeschlossen wird diese Arbeit durch eine Betrachtung der gesamten Life-Cycle-Kosten von Flurförderzeugen. Dabei stehen neben den Anschaffungs- vor allem die Betriebskosten im Vordergrund. Ökologische Aspekte werden ebenfalls kurz angeschnitten.

Abstract

Today Automated Guided Transport Systems (AGTS) as well as manually operated fork lift trucks are basic components of intralogistics. By now the technological standard has enabled AGTS to establish in nearly every branch and all production areas. Particularly in distribution centres these automated ground conveyors play an important role.

There are various different models which deal with the arising costs of ground conveyors. But concerning the energy consumption hardly any research or empirical values exist. Therefore it is the main objective of this thesis to determine the energy consumption of a manually operated fork lift truck and of an Automated Guided Vehicle (AGV) in order to compare the results and to derive general conclusions. For these purposes measurements were made. Firstly the respective energy consumptions were measured under standardized conditions in a test set-up and secondly under real conditions in a daily routine environment in the distribution centre of an Austrian food company.

After an introduction to distribution centres with a reflection on the different processes the results of the energy measurements are discussed. Regarding the energy consumption per hour an AGV performs better than a manually operated fork lift truck- both during the practical tests as well as in the standardized test set-up. Moreover the test results show that due to its lower handling performance the AGV's total energy consumption is higher. For providing a given work performance it can be said that in general a manually operated fork lift truck with high consumption in a short interval of time consumes less energy than an AGV, because the AGV with a low average consumption needs more time. The energy consumption of the additional electronic components makes a great contribution to that.

Based on the results it is recommended to continue the development of the electronic components, concerning their energy efficiency. Furthermore measures should be taken to allow a higher velocity for AGVs so that they can perform a higher handling performance.

This thesis is completed by an analysis of the whole life-cycle-costs of ground conveyors. Major focus is put on acquisition, but in particular on operational costs. Ecological aspects are also broached.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Distributionszentren und ihre Bewirtschaftung	3
2.1 Distributionslogistik	3
2.2 Distributionszentrum – Definition und Nutzungskonzept.....	9
2.3 Relevante Prozesse in einem Distributionszentrum	14
2.3.1 Wareneingang.....	14
2.3.2 Lagerinterner Transport	16
2.3.3 Lagerung	18
2.3.4 Kommissionierung	18
2.3.5 Verpackung.....	20
2.3.6 Warenausgang	21
2.3.7 Cross Docking	21
2.3.8 Value-added Services	21
2.3.9 Hilfs- und Nebenprozesse	22
3 Flurförderzeuge in einem Distributionszentrum und deren Energieverbrauch	23
3.1 Einteilung der Fördermittel.....	23
3.2 Manuell bediente Stapler	26
3.2.1 Antrieb	26
3.2.2 Batterie	27
3.2.3 Räder, Lenkung und Hubgerüst.....	29
3.3 Fahrerlose Transportsysteme (FTS)	31
3.4 Energiebedarf	37
4 Rahmenbedingungen für Energiemessungen	41
4.1 Testaufbau	41
4.2 Praxistest.....	44
5 Testergebnisse	46
5.1 Testaufbau	46
5.1.1 Testläufe mit 600 kg.....	47
5.1.2 Testläufe mit 2000 kg.....	51
5.1.3 Vergleich	53
5.2 Praxistest.....	56
5.3 Schlussfolgerungen	60
6 Kostenbetrachtung	62
7 Zusammenfassung	69
Literaturverzeichnis	71
Anhang	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einordnung der Distributionslogistik	3
Abbildung 2: Elemente der Distributionslogistik	4
Abbildung 3: Strukturen von Distributionssystemen	7
Abbildung 4: Systematischer Überblick der Lagertypen	11
Abbildung 5: Einteilung der Fördermittel	23
Abbildung 6: Gliederung der Antriebsbatterien für Flurförderzeuge	28
Abbildung 7: STILL CX 20	30
Abbildung 8: Laserscanner	33
Abbildung 9: Fahrzeugsteuerung (SPS)	34
Abbildung 10: Sensor für die Personensicherheit	34
Abbildung 11: Sensor zur Hinderniserkennung	35
Abbildung 12: STILL CX 20 (FTF)	36
Abbildung 13: VDI-Zyklus	42
Abbildung 14: Fahrweg der Fahrzeuge beim VDI-Zyklus	43
Abbildung 15: Messgerät	44
Abbildung 16: Das FTF während eines Testlaufs.....	47
Abbildung 17: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 113 min)	48
Abbildung 18: Testlauf des manuell bedienten Staplers (Last: 600 kg, Dauer: 60 min).....	49
Abbildung 19: Alle Testläufe mit 600 kg	50
Abbildung 20: Auswirkung einer Fahrpause auf ein FTF	51
Abbildung 21: Testlauf des FTF (Last: 2000 kg, Dauer: 127 min)	52
Abbildung 22: Testlauf des manuell bedienten Staplers (Last: 2000 kg, Dauer: 60 min).....	52
Abbildung 23: Alle Testläufe mit 2000 kg	53
Abbildung 24: Durchschnittlicher Energieverbrauch für sämtliche Testläufe	54
Abbildung 25: Gesamtenergieverbrauch für sämtliche Testläufe	55
Abbildung 26: Praxistest für das FTF	57
Abbildung 27: Praxistest für den manuell bedienten Stapler	57
Abbildung A.1: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 105 min)	75
Abbildung A.2: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 122 min)	75
Abbildung A.3: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 129 min)	76
Abbildung A.4: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 138 min)	76
Abbildung A.5: Testlauf des FTF (Last: 2000 kg, Dauer: 132 min)	77
Abbildung A.6: Testlauf des FTF (Last: 2000 kg, Dauer: 136 min)	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eignung der Flurförderzeuge für die Lagerprozesse.....	22
Tabelle 2: Technische Daten STILL CX 20 und Toyota LPE 240	30
Tabelle 3: Technische Daten STILL CX 20 (FTF) und Toyota LAE 240 (FTF)	36
Tabelle 4: Energieverbrauch der Bauteile	38
Tabelle 5: Einstellungen für das FTF beim VDI-Zyklus.....	46
Tabelle 6: Ergebnisse des Praxistests.....	58
Tabelle 7: Vergleich der Ergebnisse von Testaufbau und Praxistest	60
Tabelle 8: Überblick über die wichtigsten Kostenkennzahlen	66

Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
etc.	et cetera
FTS	Fahrerloses Transportsystem
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

Der ständig wachsende Wettbewerbsdruck in fast allen Branchen der Wirtschaft sowie die steigenden Kundenanforderungen stellen immer größere Herausforderungen an Unternehmen dar. Um gegen die Konkurrenz bestehen zu können, setzen Unternehmen zunehmend die Distribution als Wettbewerbsinstrument ein. Bei der Erreichung der Kernziele eines Unternehmens, also einer hohen Kundenzufriedenheit, der Wirtschaftlichkeit der Wertschöpfungsprozesse und der Zukunftssicherung, nimmt die Distribution eine herausragende Bedeutung ein. Distributionszentren spielen dabei eine wichtige Rolle, da sie innerhalb der logistischen Kette maßgebliche Knotenpunkte darstellen.¹

Dabei findet eine umfangreiche Bewegung von Gütern statt, die in unterschiedlichen Bereichen innerhalb eines Betriebs bzw. eines Betriebsgeländes erfolgen kann. Die Organisation, Durchführung und Optimierung dieser Güter-, Waren- und Materialflüsse innerhalb eines Unternehmens werden dabei als Intralogistik bezeichnet.² Zunehmend setzt man in der Intralogistik, also auch innerhalb von Distributionszentren, auf Automatisierung. Insbesondere für Transportaufgaben, aber auch bei der Kommissionierung, sind Fahrerlose Transportsysteme (FTS) heute, neben den seit langem bewährten manuell bedienten Staplern, ein wichtiger Bestandteil der Intralogistik. Der technologische Standard und die mittlerweile vorhandene Erfahrung mit dieser Automatisierungstechnik haben dazu geführt, dass FTS Einzug in fast alle Branchen gehalten haben.³

Um die Anforderungen der Kunden, aber insbesondere die eigenen Anforderungen an die dafür entstehenden Kosten zu erfüllen, ist eine genaue Kenntnis der Kostenstrukturen unabdingbar. Dazu existiert eine Vielzahl an Modellen, die sich mit den Kosten von Flurförderzeugen beschäftigen. Einzig die Frage des Energieverbrauchs, und damit die der damit verbundenen Kosten, ist bis heute unbeantwortet. Gerade jetzt, da die Energiepreise im Steigen begriffen sind, und wo Energieeffizienz eine immer größere Bedeutung erlangt, ist es erforderlich, sich darüber ernsthaft Gedanken zu machen.

Es ist nun das Ziel dieser Arbeit, den Energieverbrauch eines manuell bedienten Staplers sowie eines baugleichen, mit elektronischen Komponenten zum Fahrerlosen Transportfahrzeug (FTF) aufgerüsteten Fahrzeugs zu untersuchen, um dadurch Erkenntnisse über deren Energieverbrauch zu erlangen.

¹ Vgl. Arnold (2008), S. 410; Schulte (2009), S. 455

² Vgl. ten Hompel (2008), S. 132; Ullrich (2011), S. 13

³ Vgl. Ullrich (2011), S. 1

Konkret sollen im Zuge dieser Arbeit in Zusammenarbeit mit der Firma KNAPP Systemintegration Leoben folgende Fragen beantwortet werden:

Welchen Energieverbrauch hat ein Fahrerloses Transportfahrzeug im Vergleich mit einem manuell bedienten Stapler? Wie kann man dies vergleichen? Welche Kosten entstehen beim Gesamtsystem eines FTS bzw. bei einem System mit manuell bedienten Staplern?

Kann durch die gleichmäßige Fahrweise des Fahrerlosen Transportfahrzeugs der Mehrverbrauch der elektronischen Komponenten (gegenüber einem manuell bedienten Stapler) wettgemacht werden oder nicht?

Wie kann man die betrieblichen Gegebenheiten gestalten, um aus energie-technischer Sicht einen optimalen Ablauf realisieren zu können?

Zu diesem Zweck werden umfangreiche Tests durchgeführt: Zum einen im Rahmen eines standardisierten Testaufbaus, zum anderen während der betrieblichen Praxis im Distributionszentrum eines großen österreichischen Lebensmittelkonzerns. Die gewonnenen Ergebnisse sollen ausgewertet und in geeigneter Form dargestellt werden. Außerdem soll auch auf Kostenaspekte in Zusammenhang mit dem jeweiligen Energieverbrauch eingegangen werden. Das Verhältnis der Energiekosten zu den Gesamtkosten soll im Zuge dessen ebenfalls ausgedrückt werden. Abschließend soll auch den ökologischen Aspekten dieser Überlegungen Rechnung getragen werden.

2 Distributionszentren und ihre Bewirtschaftung

Um zu Beginn der Arbeit einen allgemeinen Überblick zu ermöglichen, erfolgt an dieser Stelle eine Einführung in das Thema der Distributionslogistik. Diese stellt jenen Teilbereich der Logistik dar, in dem Distributionszentren angesiedelt sind. Daran schließen sich eine Beschreibung und eine Analyse von Distributionszentren an, und es wird auf ihre Aufgaben und relevanten Prozesse eingegangen.

2.1 Distributionslogistik

Die Distributionslogistik ist ein Teil der Unternehmenslogistik und stellt das Bindeglied zwischen Produktion und Kunden dar. Sie umfasst alle Lager- und Transportvorgänge, also den gesamten Waren- und Materialfluss sowie die damit verbundenen Informations-, Steuerungs- und Kontrolltätigkeiten vom Ende der Produktion bis zu den einzelnen Kunden. Damit dient die Distributionslogistik der zeitlichen und räumlichen Überbrückung zwischen Produktion und Absatzmarkt.⁴ Die Einordnung der Distributionslogistik in der Logistikkette von der Beschaffungsquelle bis zum Endverbraucher zeigt folgende Abbildung:

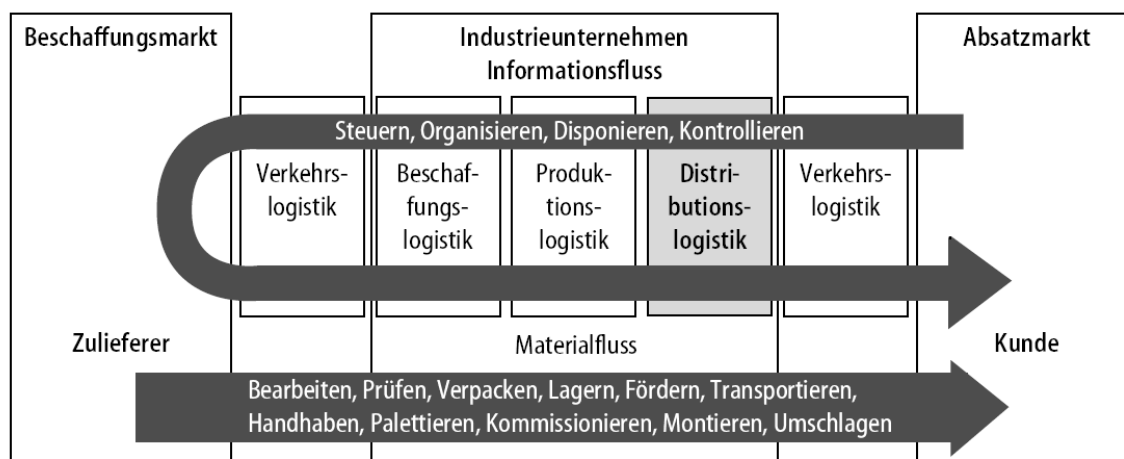


Abbildung 1: Einordnung der Distributionslogistik⁵

Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist die Distributionslogistik, so wie die Beschaffungslogistik, ein marktverbundenes System und beinhaltet alle Aktivitäten, die im Zusammenhang mit der Belieferung von Kunden mit Fertigfabrikaten und Handelswaren stehen.⁶ Der dabei entste-

⁴ Vgl. Martin (2006), S. 6; Schulte (2009), S. 455

⁵ Arnold (2008), S. 405

⁶ Vgl. Pfohl (2010), S. 198

hende Kontakt zwischen Unternehmen und Absatzmarkt wird vom Kunden direkt wahrgenommen, was zum Image des Unternehmens in beträchtlichem Ausmaß beiträgt. Daher setzen Unternehmen die Warenverteilung zunehmend als Wettbewerbsinstrument ein, um gegenüber den Konkurrenten Vorteile durch einen verbesserten Lieferservice zu erlangen.⁷ Aus diesem Grund ist die moderne Distributionslogistik nicht nur als reine Warenverteilung, sondern als aktives Wertschöpfungselement zu sehen. Dabei muss jedoch ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Lieferservice und Lieferkosten herrschen, um einerseits eine ausreichende Kundenzufriedenheit zu ermöglichen, aber andererseits die Wirtschaftlichkeit der Wertschöpfungsprozesse und damit die Zukunftssicherung des Unternehmens nicht zu gefährden.⁸ Es gilt also, die gewählten Absatzwege optimal zu bedienen.⁹

Kurz zusammengefasst ist die Bedeutung der Distributionslogistik in der Höhe der Kosten und der Eignung zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit zu sehen.¹⁰ Folgende Elemente stehen dabei zur Verfügung:

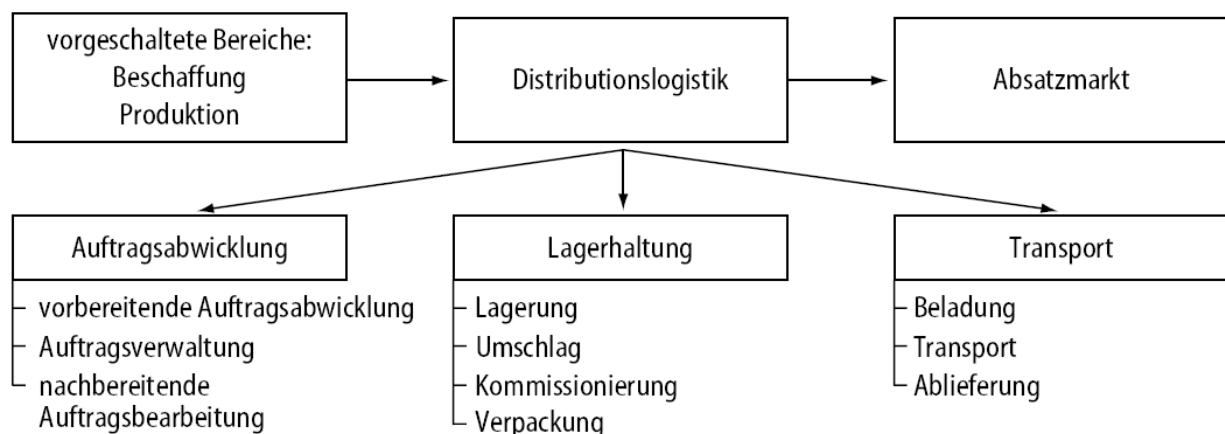


Abbildung 2: Elemente der Distributionslogistik¹¹

Die wesentlichen Aufgaben der Auftragsabwicklung sind die Aufnahme, Aufbereitung, Umsetzung, Weitergabe und Dokumentation von Auftragsdaten. Außerdem zählen die Information und Kommunikation der Kunden und der internen Funktionsbereiche, die mit der Abwicklung des Auftrags betraut sind, sowie die Gewährleistung eines dem Materialfluss vorausgehenden, begleitenden und nachfolgenden Informationsflusses zur Auftragsabwicklung. Die Lagerhaltung umfasst die Tätigkeiten Warenvereinnahmung, Einlagerung, Bereithaltung und Auslagerung sowie den Umschlag, die Kommissionierung, die Verpackung und die Be-

⁷ Vgl. Schulte (2009), S. 455

⁸ Vgl. Arnold (2008), S. 410

⁹ Vgl. Schulte (2009), S. 455

¹⁰ Vgl. Martin (2006), S. 7

¹¹ Arnold (2008), S. 406

reitstellung der Waren. Die Aufgabe der Transportfunktion liegt im Raumausgleich von Gütern innerhalb des Logistiksystems durch die Verwendung von geeigneten Transportmitteln.¹² Das Ziel der Distributionslogistik ist es, durch Planung, Gestaltung, Steuerung und Kontrolle des Material- und Informationsflusses die gewünschten Güter termingerecht und möglichst kostengünstig beim Kunden bereitzustellen. Folglich übernimmt die Distributionslogistik die Versorgung der Kunden mit den Produkten des Unternehmens.¹³ Im Rahmen dieser Versorgung werden diese Objekte im Normalfall nicht verändert, es sei denn, es werden im Zusammenhang mit logistischen Dienstleistungen komplementäre Dienstleistungen angeboten (sogenannte Value Added Services). Dabei werden Produkte speziell an die jeweiligen Kundenbedürfnisse angepasst.¹⁴

Die verschiedenartig abgestimmte Bereitstellung von Gütern wird durch die sogenannten Ausgleichsfunktionen ermöglicht: Beim Raumausgleich wird mit geeigneten Transportmitteln für einen räumlichen Ausgleich gesorgt, da Produktionsstätte und der Ort der Nachfrage in der Regel räumlich getrennt sind. Aus der Fertigung in wirtschaftlich sinnvollen Losgrößen ergibt sich eine Diskrepanz zwischen Herstellungs- und Nachfragezeitpunkt, sodass die Überbrückung dieser Zeitspanne durch Lagerhaltung vollzogen werden muss (Zeitausgleich). Weiters wird durch die Fertigung in wirtschaftlichen Losgrößen eine Fertigungsmenge erzeugt, die nicht der Nachfragemenge entspricht. Der erforderliche Mengenausgleich erfolgt durch eine Vereinzelung der nachgefragten Mengen am Lagerstandort. Der Sortimentsausgleich ist durchzuführen, da die Fertigung des Sortiments meist an mehreren Produktionsstätten erfolgt, das Angebot des Unternehmens aber das gesamte Sortiment an jedem Nachfrageort umfasst.¹⁵

Bei der Versorgung der Kunden mit den gewünschten Produkten nimmt die Aufbaustruktur des Warenverteilensystems eine herausragende Bedeutung ein. Die Aufbaustruktur wird einerseits durch die physische Ausgestaltung des Distributionsweges und andererseits durch die horizontale und vertikale Struktur bestimmt.¹⁶

Bezüglich der Ausgestaltung des Distributionsweges kann nach der Zahl der verwendeten Lagerstufen und der genutzten Transportwege differenziert werden. Zwischen direktem oder indirektem Distributionsweg wird nach der Zahl der zwischen dem Produzenten und den Kunden liegenden Lagerstufen unterschieden. Im Falle des direkten Distributionsweges wird die Belieferung des Kunden ohne Zwischenschaltung einer Lagerstufe durchgeführt, während bei der indirekten Belieferung immer mindestens eine Lagerstufe dazwischen liegt.

¹² Vgl. Arnold (2008), S. 406 ff.

¹³ Vgl. Martin (2006), S. 7

¹⁴ Vgl. Pfohl (2010), S. 198

¹⁵ Vgl. Arnold (2008), S. 406

¹⁶ Vgl. Arnold (2008), S. 420

Wenn die Kundenbelieferung nur über einen einzigen festgelegten Distributionsweg erfolgt, spricht man von Einwegabsatz. Werden allerdings mehrere und von Fall zu Fall unterschiedliche Distributionswege genutzt, so liegt Mehrwegabsatz vor.¹⁷

Die vertikale Struktur bezeichnet die Stufigkeit eines Distributionssystems. Sie sagt aus, wie viele Lagerstufen das Transportgut von der Produktion bis zum Kunden durchläuft, während die horizontale Struktur die Anzahl der Lager je Stufe, ihre Standorte und die Zuordnung von Lagerstandorten zu ihren Absatzgebieten beschreibt.¹⁸ In der vertikalen Distributionsstruktur werden vier Lagertypen unterschieden:

1. Werkslager werden auch Fertigwarenlager genannt und sind bei Produktionsstätten angesiedelt. Diese Lagerstufe dient vorwiegend dem kurzfristigen Mengenausgleich zwischen Produktion und Distribution und führt zumeist nur das vor Ort hergestellte Sortiment.¹⁹
2. Zentrallager sind die dem Werkslager nachgeordnete Lagerstufe. Ihre Anzahl ist meist sehr begrenzt, und sie nehmen die gesamte Sortimentsbreite eines Unternehmens auf, das gegebenenfalls noch durch Fremdprodukte ergänzt wird. Ihre Funktion besteht darin, bei Existenz nachgeordneter Lagerstufen für ein Nachfüllen der Bestände zu sorgen. Bei einer zentralisierten Distributionsstruktur werden im Zentrallager die Waren kundengerecht zur Auslieferung bereitgestellt.²⁰
3. Regionallager haben die Aufgabe, innerhalb einer bestimmten Absatzregion einen Puffer zwischen Produktion und Absatzmarkt zu schaffen und dadurch vor- und nachgelagerte Lagerstufen zu entlasten. In Regionallagern werden nur Teile des Sortiments gehalten, je nach Absatz und Region.²¹
4. Auslieferungslager sind dezentral im gesamten Absatzgebiet angeordnet und einem bestimmten Verkaufsbezirk direkt zugeordnet, um eine schnellstmögliche Kundenbelieferung zu ermöglichen. Ihre Aufgabe ist die Vereinzelung der Mengen zu den von den Kunden geforderten Einheiten und deren Bereitstellung zur Auslieferung. In den Auslieferungslagern findet man vorzugsweise die absatzstarken Produkte, die Schnelldreher mit großem Lagerumschlag und kurzen Verweilzeiten.²²

Grundsätzlich kann der Kunde von jeder dieser Lagerstufen beliefert werden. Sind allerdings Auslieferungslager vorhanden, so beliefern in der Regel diese die Kunden. Erst bei größeren

¹⁷ Vgl. Arnold (2008), S. 420 f.

¹⁸ Vgl. Alicke (2003), S. 75

¹⁹ Vgl. Arnold (2008), S. 421; Wannewetsch (2007), S. 308

²⁰ Vgl. Arnold (2008), S. 421; Schulte (2008), S. 459 f.; Wannewetsch (2007), S. 309

²¹ Vgl. Koether (2008), S. 452; Schulte (2008), S. 460; Wannewetsch (2007), S. 309

²² Vgl. Arnold (2008), S. 422; Koether (2008), S. 453; Schulte (2008), S. 460

Sendungen sollte die Lieferung von einer höheren Lagerstufe oder von der Produktionsstätte erfolgen. Die Lagerstufen können zu unterschiedlichen Distributionsstrukturen kombiniert werden, wobei für jede vertikale Stufe beliebige horizontale Ausprägungen möglich sind.²³ In Abbildung 3 sind alternative Lagerstrukturen dargestellt.

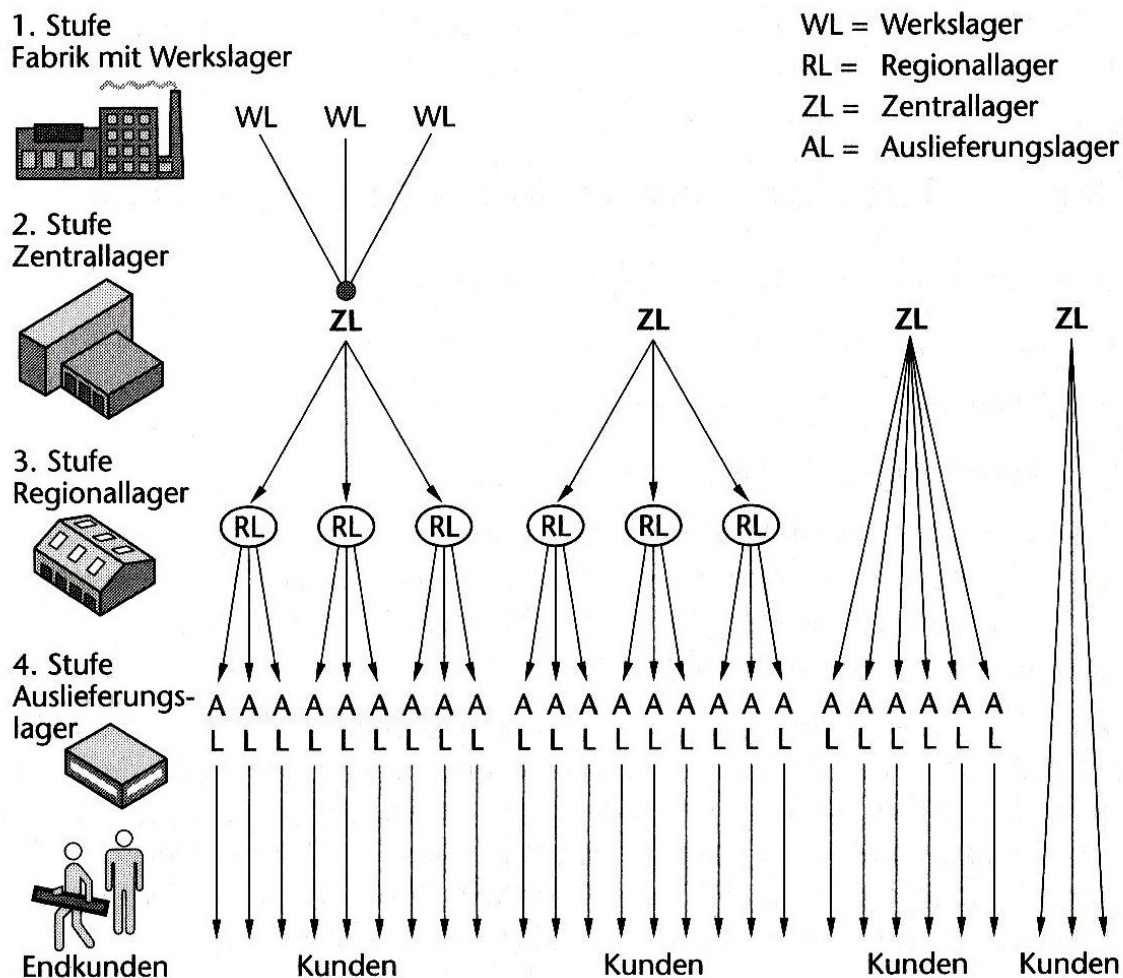


Abbildung 3: Strukturen von Distributionssystemen²⁴

Die Frage der langfristigen Grundsatzentscheidung, ob für die vertikale Struktur ein zentralisiertes oder ein dezentralisiertes Distributionssystem eingesetzt werden soll, ist sehr schwierig zu beantworten. Jedes Unternehmen muss diese Entscheidung individuell treffen, wobei das betreffende System schlussendlich den logistischen Zielen, etwa Soll-Lieferzeit oder Verfügbarkeit, und den Kostengesichtspunkten genügen muss.²⁵

Jedenfalls sind folgende Einflussfaktoren in diese Entscheidung mit einzubeziehen:²⁶

²³ Vgl. Arnold (2008), S. 422

²⁴ Koether (2008), S. 452

²⁵ Vgl. Koether (2008), S. 453; Schulte (2008), S. 461

²⁶ Vgl. Schulte (2008), S. 461 f.

- Anzahl und Größe der Lager,
- Umschlagskosten,
- Höhe der Bestände,
- Transportkosten für Mengenbewegungen zwischen den Lagern und
- Auslieferungskosten zu den Kunden.

Die Errichtung einer jeden Lagerstufe verursacht zusätzliche Kosten, da jedes Lager weitere Bau-, Kapitalbindungs- und Betriebskosten mit sich bringt. Eng damit verknüpft ist auch die Höhe der Umschlagskosten. Die Bestandskosten steigen mit wachsender Zahl der Lager. Je größer die Anzahl der Lager bzw. Lagerstufen, desto höhere Transportkosten zwischen den Lagern fallen an. Demgegenüber sinken die Auslieferungskosten zu den Kunden, je mehr Lagerstufen und Lager pro Stufe vorhanden sind.

In vielen Unternehmen zeichnet sich ein Trend zur zentralisierten Lagerhaltung ab. Die Gründe dafür liegen in möglichen Betriebskostenvorteilen bei Personaleinsatz, Organisation und Betriebstechnik, da große Lager durch das erhöhte Mengenaufkommen einen höheren Grad an Automatisierung und Standardisierung der Abläufe eher rechtfertigen.²⁷ Für moderne Distributionszentren stellt eine solche aufwändige Lager- und Kommissioniertechnik ein zentrales Element dar.

Darüber hinaus ist bei einer dezentralen Lösung durch die Vorhaltung von Sicherheitsbeständen der Gesamtlagerstand relativ hoch, während bei einer Zentralisierung der Distributionsstruktur die Lager- und Kapitalbindungskosten sinken. Vor allem bei höherwertigen Produkten schlägt sich das zu Buche. Weiters gewährleistet eine zentralisierte Lagerhaltung eine größere Übersichtlichkeit und mehr alternative Dispositionsmöglichkeiten in Bezug auf die vorhandenen Bestände. Dem Vorteil der niedrigeren Lagerkosten stehen aber die höheren Transportkosten gegenüber. Daher ist es notwendig, die Transportströme zu bündeln und damit den Großteil der Transporte von den Produktionsstätten zum Zentrallager durch kostengünstige Massentransporte abzuwickeln, während die Transporte zu den Kunden optimiert werden müssen. Hinzu kommt, dass die Unternehmen die Transportleistungen eines in den letzten Jahren stark gewachsenen und innovativen Verkehrsmarktes nutzen können, der neben Schnelligkeit und Zuverlässigkeit auch erhebliche Kosteneinsparungspotentiale bietet.²⁸ Zusammengefasst kann man sagen, dass mit zentraler Lagerung deutliche Gesamtkos-

²⁷ Vgl. Schulte (2008), S. 462

²⁸ Vgl. Arnold (2008), S. 412 f.; Schulte (2008), S. 462 f.

tenvorteile realisierbar sind.²⁹ Allerdings hängt es von der zukünftigen Entwicklung der Energie- und Transportkosten ab, ob dieser Kostenvorteil zu halten ist.

Das zweite wesentliche Strukturmerkmal eines Lagersystems liegt in der horizontalen Distributionsstruktur. Diese umfasst die Zahl der Lager auf jeder Stufe, ihre Standortbestimmung und die Zuordnung der Lager zu ihren Absatzgebieten. Folgende Einflussfaktoren bestimmen die horizontale Struktur:

- Abnehmerkreis,
- Bestellmengen und Bestellverhalten der Kunden,
- Produktionsstandorte,
- Lager-, Vorratshaltungs- und Transportkosten zwischen Produktionsstätten und Lagern sowie für die Warenauslieferung.

Für eine optimale Bestimmung müssen die jeweiligen Kosten- und Erlöswirkungen der verschiedenen Alternativen bekannt sein, was durch die Vielzahl der Variablen, ihre zum Teil vorhandene Unsicherheit und die Unbeeinflussbarkeit der unternehmensexternen Faktoren erschwert wird. Die Interdependenz zwischen einzelnen Kriterien wirken sich ebenfalls negativ aus. Eindeutige Lösungen lassen sich nur durch fallspezifische Modelle finden. Es existiert eine Vielzahl von Algorithmen, heuristischen Verfahren oder Simulationsmodellen.³⁰

Für den erfolgreichen Betrieb komplexer Distributionsstrukturen sind in jedem Fall leistungsfähige Transport-, Lager- und Umschlagssysteme erforderlich. Dies kann durch moderne Distributionszentren bewerkstelligt werden, wobei zunehmend auf automatisierte Systeme, beispielsweise Fahrerlose Transportsysteme, zurückgegriffen wird. Daher wird im Folgenden auf Distributionszentren im Allgemeinen eingegangen. Im Anschluss werden die wichtigsten Prozesse in Distributionszentren beschrieben.

2.2 Distributionszentrum – Definition und Nutzungskonzept

Innerhalb der logistischen Kette stellt das Distributionszentrum einen wichtigen physischen und funktionalen Knotenpunkt dar.³¹ Ein Distributionszentrum ist eine örtliche und funktionelle Zusammenfassung von dezentral operierenden Sammel- und Verteillagern. Diese erfüllen neben der Bevorratung den Zweck, mittels Kommissionierung Ladeeinheiten zu bilden.³² Somit ist das Distributionszentrum das zentrale Glied in der Distributionskette und maßgeblich für einen effizienten und schnellen Materialfluss vom Unternehmen zum Kunden verantwort-

²⁹ Vgl. Fortmann (2000), S. 113

³⁰ Vgl. Schulte (2008), S. 464 ff.

³¹ Vgl. ten Hompel (2007), S. 361

³² Vgl. ten Hompel (2008), S. 60, 248 und 316

lich.³³ In erster Linie dient es also der Verteilung von Gütern, die Erbringung von Distributionsleistungen steht im Vordergrund. Im Allgemeinen handelt es sich um eine Anlage, die als Hauptfunktionen Transport-, Lager- und Umschlagsaufgaben und als Nebenfunktion Dienstleistungsaufgaben wahrnimmt.³⁴ Folgende logistische Prozesse werden üblicherweise durchgeführt: Entladen der Güter vom Transportmittel, Bereitstellung im Wareneingangsbereich, Identifikation, Qualitätskontrolle, Entpacken und Bildung von Lagereinheiten, Bereitstellung, Ein- und Auslagerung, Kommissionierung, Verpacken, Bildung von Lade- und Versandeinheiten, Beladen von Transportmitteln und Sicherung der Ladung.³⁵ Insgesamt steht aber nicht die eigentliche Lagerung, obwohl unumgänglich, sondern der wertschöpfende Transformationsprozess zwischen produktorientiertem Wareneingang und kundenauftragsbezogenem Warenausgang im Vordergrund.³⁶ Die zentrale Aufgabe eines Distributionszentrums ist es folglich, dem Kunden die richtigen Waren, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort und zu den richtigen Kosten bereitzustellen. Dabei ist für den Kunden die technische Ausführung nicht von Bedeutung, sondern lediglich die Erfüllung der gestellten Aufgabe.³⁷

In der Literatur werden für Logistikimmobilien unterschiedliche Begriffe verwendet, deren Definitionen sich teilweise stark unterscheiden, welche aber zum Teil dennoch synonym verwendet werden. So kommen verschiedenste Begriffe wie beispielsweise Distributions- und Verteillager, Güter- bzw. Warenverteilzentrum, Logistikzentrum oder auch Umschlagzentrum vor, welche in dieser Arbeit unter dem Sammelbegriff „Distributionszentrum“ zusammengefasst werden. Dies mag angesichts der unterschiedlichen Ausprägungen der verschiedenen Arten von Lagern und Zentren unzureichend erscheinen, kann aber folgendermaßen begründet werden:

Zum einen ist erkennbar, dass die verschiedenen Definitionen sich teilweise stark unterscheiden, andererseits aber auch viele Überschneidungen vorkommen, sodass eine eindeutige Abgrenzung dieser Begrifflichkeiten nicht möglich ist. Zum anderen ist jedes Distributionszentrum an die individuellen Anforderungen der Errichter und Betreiber angepasst, sodass sich sehr unterschiedliche Ausprägungen ergeben. Der sogenannte amerikanische Ansatz beispielsweise besteht zumeist aus einer riesigen Lagerhalle, vielen Regalen und Bodenlagern, breiten Verkehrswegen und ausreichend Fläche für Umschlag und Sortierung. Der Transport erfolgt überwiegend mit Staplern, frei verfahrbaren Kommissionierfahrzeugen oder zu Fuß. Der europäische Ansatz dagegen setzt häufig auf Automatisierung und aufwändige

³³ Vgl. ten Hompel (2007), S. 361

³⁴ Vgl. Pfohl (2010), S. 274

³⁵ Vgl. Bode (2004), S. 38; ten Hompel (2007), S. 53

³⁶ Vgl. Arnold (2008), S. 646 f.

³⁷ Vgl. Wisser (2009), S. 9

Fördertechnik, die Flächenverhältnisse sind den Anforderungen meist sehr exakt angepasst.³⁸

Die einzelnen Lösungen können also sehr weit auseinander liegen. Aus diesem Grund wäre es schwierig, eine Anlage zur Gänze einem einzigen Begriff zuzuordnen, selbst wenn eindeutige abgrenzungen vorhanden wären. Daher wird in der Folge an der Bezeichnung „Distributionszentrum“ mit der vorliegenden Definition festgehalten.

Die logistischen Funktionen in einem klassischen Distributionszentrum umfassen vor allem den Umschlag und die Lagerung von Gütern.³⁹ Umschlag bezeichnet den Vorgang, bei dem Güter von einem logistischen System auf oder in ein anderes umgeladen werden.⁴⁰ Bezüglich Lagerung unterscheidet man grundsätzlich ungewollte (Aufenthalt) und gewollte Lagerung. Unabhängig davon entstehen Kapitalbindungs- und Lagerkosten sowie Organisations- und Dispositionsaufwand, sodass das Ziel lautet, Lagerungsvorgänge soweit wie möglich zu vermeiden.⁴¹ Jedes geplante Verweilen des Lagerguts in einem Lager, das den Material- und Warenfluss unterbricht, wird als Lagern bezeichnet, wobei man im Bereich der Distribution eher vom Waren- bzw. Güterfluss spricht.⁴² Ein Lager besteht aus Räumen oder Flächen zur Aufbewahrung von Materialien und Gütern zwecks Bevorratung, Puffern und Verteilens und zum Schutz vor ungewollten Einflüssen oder Eingriffen. Je nach Lagertyp dient ein Lager vorrangig der Überbrückung einer Zeitdauer, zum Ausgleich von Ein- und Ausgangsströmen oder zur Strukturänderung zwischen Zu- und Abgang.⁴³ Die

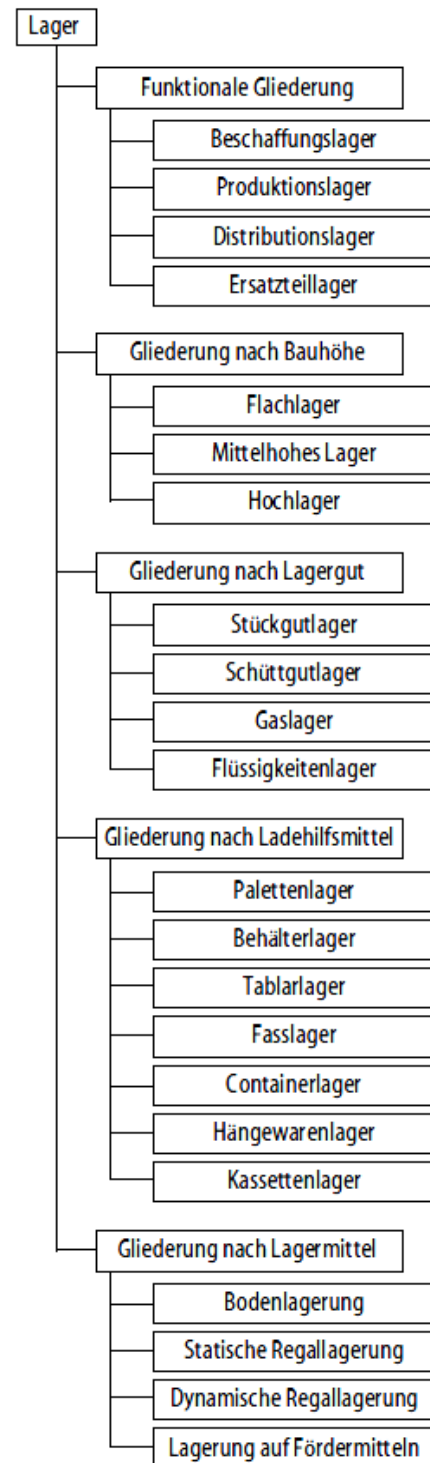


Abbildung 4: Systematischer Überblick der Lagertypen⁴⁴

³⁸ Vgl. Arnold (2006), S. 104 ff.

³⁹ Vgl. Arnold (2008), S. 21

⁴⁰ Vgl. ten Hompel (2008), S. 296

⁴¹ Vgl. Arnold (2008), S. 374

⁴² Vgl. Gleißner (2008), S. 88; ten Hompel (2008), S. 161

⁴³ Vgl. ten Hompel (2008), S. 156 f.

⁴⁴ Arnold (2008), S. 646

verschiedenen Lagertypen können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gegliedert werden. Die gängigsten Gliederungen sind in Abbildung 4 ersichtlich. Zusätzlich kann eine Klassifizierung der Lagerarten nach der Stellung im logistischen Prozess, der Zuordnung zu Fertigungsprozessen und gelagerten Materialien, dem Grad der Zentralisierung oder nach etwaigen organisatorischen bzw. technologischen Notwendigkeiten erfolgen.⁴⁵

Die Gestaltung eines Lagers wird vor allem durch die geforderten Lageraufgaben bestimmt. Daraus ergeben sich verschiedene Ausprägungen der Aufgaben der Lagerhaltung:

Alle Lager haben die Aufgabe, geplante räumliche und zeitliche Asynchronitäten zwischen Erzeugung und Verbrauch zu überbrücken. Dementsprechend wird dies als *Überbrückungsaufgabe* bezeichnet.

Daneben treten auch unbekannte Asynchronitäten auf, die das Lager für einen bestimmten Zeitraum überbrücken muss. Dabei sind nur ungenügende Informationen über zukünftige Mengenbedarfe, Liefer- und Bedarfszeitpunkte vorhanden. In diesem Fall hat die Sicherung der Verfügbarkeit Priorität vor wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Mindest- oder Sicherheitsbestände erfüllen diese *Sicherheitsaufgabe*.⁴⁶

Die *Anpassungs- bzw. Umformungsaufgabe* dient zur Anpassung der eingehenden Mengen in verbrauchsgerechte Mengen. Dazu gehören Arbeitsgänge wie Sortieren oder Verpacken.

Die *Bereitstellungsaufgabe* beinhaltet die Bereitstellung der nachgefragten Positionen in der vom Kunden geforderten Zeit, Menge und Qualität. Zur Erfüllung sind Pflege-, Kontroll-, Transport- und Umschlagaufgaben erforderlich.

Wenn der Lagerinhalt die nachgelagerten Prozesse steuert, spricht man von der *Steuerungsaufgabe* eines Lagers. Dies meint die Steuerung von Bearbeitungsprozessen über den aktuellen Lagerbestand.⁴⁷

Weiters kann ein Lager eine *Informationsaufgabe* erfüllen, indem verschiedene Kennzahlen generiert werden. Mit technischen Einrichtungen wie Barcoding oder Tracking und Tracing kann die Informationsqualität gesteigert werden.

Die *Veredelungsaufgabe* entsteht dann, wenn durch die Lagerung eine Veränderung des Produkts eintritt und diese Teil des Produktionsprozesses ist.

Vorhersehbare Preisschwankungen auf dem Beschaffungsmarkt oder zurzeit besonders niedrige Einstandspreise können ebenfalls Gründe für eine Lagerhaltung sein. In diesem Fall können Lager eine *Spekulationsaufgabe* erfüllen.⁴⁸

⁴⁵ Vgl. Arnold (2008), S. 376

⁴⁶ Vgl. Arnold (2008), S. 374; Wannewetsch (2007), S. 259 f.

⁴⁷ Vgl. Arnold (2008), S. 374 f.

⁴⁸ Vgl. Wannewetsch (2007), S. 260

Diese Aufgaben treffen auf jedes Lager zu, insbesondere Überbrückungs- und Sicherheitsaufgaben. Für das Distributionszentrum sind auch Anpassungs- bzw. Umformungsaufgaben sowie Bereitstellungsaufgaben von großer Bedeutung.

Distributionszentren haben somit zusätzlich zur Bevorratung den Zweck, eine Zusammensetzungsveränderung von Ladeeinheiten zwischen Zu- und Abgang herbeizuführen. Dazu wird kommissioniert, sortiert und konsolidiert. In Industrieunternehmen finden Distributionszentren sowohl als Rohmaterial- und Zukaufteilelager als auch als Fertigteilelager häufig Verwendung, wenn Teilmengen einzelner Ladeeinheiten benötigt werden. In Handelsunternehmen stellen sie den am häufigsten vorzufindenden Lagertyp dar.⁴⁹ Dabei findet im Allgemeinen keine Wertschöpfung statt, lediglich Value-Added Services tragen etwas zur Wertschöpfung bei.⁵⁰

Die Trends in der Distributionslogistik sind seit einigen Jahren die gleichen: Zentralisierung der Distribution, um Synergieeffekte zu nutzen sowie Konzentration auf die eigenen Kernkompetenzen, was vielfach durch Outsourcing erreicht wird. Weitere Einflussfaktoren sind jene Potentiale, die der internationale Informationsfluss durch Internet oder e-Commerce eröffnet, und die Konsequenzen, die sich aus der Globalisierung der Weltwirtschaft ergeben.⁵¹

Die Gründe, warum Distributionszentren eine wichtige Rolle spielen, liegen damit auf der Hand. Zum einen sind Unternehmen mit Distributionslagern leichter in der Lage, Güter am richtigen Ort zur richtigen Zeit zur Verfügung zu stellen. Des Weiteren wird der Lieferservice immer mehr zum Wettbewerbsinstrument. Durch geschickt platzierte Distributionslager lässt sich die Lieferzeit vermindern. Außerdem sind Massentransporte billiger als Kleintransporte, was sich insofern ausnützen lässt, dass große Mengen über große Distanzen versendet werden (vom Produzent ins Distributionslager), während die Versendung kleiner Mengen auf geringere Distanzen beschränkt bleibt (vom Distributionslager zum Kunden).⁵² Inzwischen machen die Kosten der Distributionszentren 20 bis 31% der Supply-Chain-Kosten aus.⁵³

Ausschlaggebend für Errichtung und Betrieb von Distributionszentren können mehrere Gründe sein. Neben dem Ausgleich von Bedarfs- und Liefermengen und der bereits genannten Möglichkeit zur Transportkostenreduktion sind hier vor allem die Optimierung logistischer Leistung und die Erbringung zusätzlicher Dienstleistungen erwähnenswert. Durch den Einsatz

⁴⁹ Vgl. ten Hompel (2007), S. 52

⁵⁰ Vgl. Arnold (2006), S. 169

⁵¹ Vgl. Arnold (2006), S. 101; Noche (2011), S. 1

⁵² Vgl. Specht (2005), S. 128 f.

⁵³ Vgl. Arnold (2006), S. 92

leistungsfähiger und effizient geführter Distributionszentren kann im Wettbewerb eine Position erreicht, behauptet oder ausgebaut werden.⁵⁴

Um die Kundenanforderungen zu erfüllen, werden die entsprechenden Prozesse im Distributionszentrum abgearbeitet. Das folgende Kapitel befasst sich mit diesen Prozessen, wobei besonders der Einsatz geeigneter Fördermittel im Mittelpunkt steht.

2.3 Relevante Prozesse in einem Distributionszentrum

So unterschiedlich die Anforderungen an ein Distributionszentrum und so vielfältig die Ausgestaltungsmöglichkeiten der Prozesse und der technischen Systemgestaltung auch sein können, es existieren bestimmte Standardabläufe, die in jedem größeren System etabliert sind.⁵⁵ Eine prozessorientierte Untersuchung aller Lagertypen ergibt, dass die vom Lager zu erbringenden Funktionen vom Lagertyp unabhängig und somit in allen Lagern gleich sind. Jedes Lager beinhaltet identische Grundfunktionen für die Handhabung von Waren. Folglich handelt es sich um allgemeingültige Prozesse, die in typischen Distributionszentren vorkommen. Jedes Lager hat die ankommenden Waren zu vereinnahmen, sie für einen definierten Zeitraum zu puffern oder zu lagern und sie anschließend kundenorientiert aufbereitet auszugeben. Nur bezüglich den technischen, organisatorischen oder von der Lagerart abhängigen Ausprägungen der Prozesse, den Kunden und Lieferanten sowie der geforderten Termintreue ergeben sich Unterschiede.⁵⁶

Es muss aber nicht zwangsläufig jeder dieser Prozesse in jedem Distributionszentrum vorhanden sein. Außerdem kann ein Prozess unter Umständen mehrmals durchgeführt werden, wie z.B. innerbetriebliche Transporte, oder an unterschiedlichen Stellen auftreten, beispielsweise Value Added Services.⁵⁷

Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf zumindest teilautomatisierte Lager. Sämtliche Prozesse werden daher von einem Lagerverwaltungssystem initiiert, überwacht und datenmäßig erfasst. Außerdem wird auf den Einsatz geeigneter Fördermittel eingegangen, insbesondere unstetiger Flurförderzeuge wie Stapler oder Fahrerlose Transportsysteme.

2.3.1 Wareneingang

Der Prozess des Wareneingangs stellt eine Schnittstelle zwischen dem Distributionszentrum und seiner Umgebung dar. Dies beinhaltet alle Aktivitäten zur Warenannahme und dient der

⁵⁴ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 3 ff.

⁵⁵ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 23

⁵⁶ Vgl. Arnold (2008), S. 381; ten Hompel (2007), S. 53

⁵⁷ Vgl. Wisser (2009), S. 12

Aufgabe, die Ware für die Einlagerung bereitzustellen. Der Aufenthalt der Waren im Wareneingangsbereich sollte so kurz wie möglich sein.⁵⁸

Warenannahme

Basierend auf der bereits im Vorfeld vereinbarten Lieferavisierung wird die eintreffende Lieferung mithilfe des Lieferscheins mit der Bestellung abgeglichen. Dabei wird die Übereinstimmung zwischen Ware, Menge und Liefertermin überprüft. Danach erfolgt eine vorläufige Einbuchung der Waren in das bestandsführende System.⁵⁹

Entladen der Ware

Nach erfolgter Freigabe kann die Ware an einer bestimmten Entladestelle vom externen Transportmittel entladen werden. Das kann manuell, teilmanuell durch Stapler oder automatisch durch geeignete Fördersysteme bewerkstelligt werden. Aufgrund der vielfältigen Arten von Ladungsträgern sowie der eingeschränkten Möglichkeiten zur Navigation sind Fahrerlose Transportsysteme kaum einsetzbar. Bei einer Anlieferung auf Paletten wird die Entladung in der Regel mit Staplern durchgeführt, die hier die größte Flexibilität bieten. Werden die Güter beispielsweise in Kartons angeliefert, kommen vielfach auch Förderbänder oder andere Einrichtungen zum Einsatz.⁶⁰

Identifikation und Wareneingangsprüfung

Während bzw. nach dem Entladevorgang erfolgt die Identifikation der Güter. Dies stellt eine wichtige Basis für die nachfolgenden Prozesse dar, für die eine richtige und vollständige Identifikation grundlegende Voraussetzung ist. Dabei wird ein Identifikationsmerkmal, z.B. ein Barcode oder ein RFID-Etikett, am Ladungsträger oder an den Gütern angebracht.

Außerdem wird eine Eingangs- und Mengenprüfung bezüglich Beschaffenheit der Lieferungen, Vollständigkeit der Daten, Beschädigungen, Termin, Abmessungen, Gewicht etc. durchgeführt. Es wird geprüft, ob die Ware und die Ladehilfsmittel zur Einlagerung geeignet sind.⁶¹

Qualitätskontrolle

Die Qualitätskontrolle kann, je nach der Art der zu prüfenden Objekte, in einem kleinen (z.B. Sichtkontrolle beim Wareneingang) oder großen (z.B. umfangreiche Laboruntersuchungen) Umfang durchgeführt werden. Für die Abnahme müssen Richtlinien vorliegen. Mängelbehaf-

⁵⁸ Vgl. Arnold (2008), S. 379; Pfohl (2010), S. 117 f.; Wisser (2010), S. 12

⁵⁹ Vgl. Schulte (2009), S. 336; ten Hompel (2008b), S. 23 ff.

⁶⁰ Vgl. Schulte (2009), S. 336; ten Hompel (2007), S. 53

⁶¹ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 25; VDI 3629 (2005), S. 4 f.

tete Ware wird mit Sperrkennzeichen versehen und in spezielle Bereiche gebracht oder unter Berücksichtigung der Sperrmerkmale eingelagert. Die Prüfung der Qualität hemmt den Materialfluss und verursacht nicht unerhebliche Kosten. Daher erfolgt die Qualitätskontrolle oft bereits beim Zulieferer.⁶²

Bildung von Lagereinheiten

In vielen Lager- und Materialflusssystemen werden aus Gründen der Transportsicherheit oder der Handhabung spezielle Ladehilfsmittel oder Behälter verwendet. Dies ist beispielsweise in Distributionszentren mit einem hohen Automatisierungsgrad der Fall. Soweit nicht bereits eine lagerfähige Einheit übergeben wurde, wird gemäß den warenspezifischen Gegebenheiten sowie den Anforderungen des Lagers eine Lagereinheit gebildet. Dazu gehört auch ein Identifizierungsmerkmal. Daher ist die Bildung von Lagereinheiten die Grundlage für die Synchronisation von Ware und Information.⁶³

Retourenabwicklung

Im Versandhandel stellt das Retourenhandling, also die Abwicklung von Warenrücksendungen durch den Kunden, eine Besonderheit dar. Diese hat in bestimmten Branchen wie der Bekleidungsindustrie mittlerweile einen bedeutenden Anteil der Warenlieferungen erreicht. Zunächst wird die Retourenware eingehend geprüft und bei Bedarf gereinigt, neu verpackt, etikettiert und wieder eingelagert.⁶⁴

Der Prozess Wareneingang ist mit der Freigabe der im Wareneingangsbereich befindlichen Waren zur Weiterverarbeitung beendet.

2.3.2 Lagerinterner Transport

Die primäre Aufgabe des innerbetrieblichen Transports ist die Raumüberbrückung zwischen dem Transportursprung und dem Transportziel. Die Raumüberbrückung entspricht der logistischen Funktion Transportieren.⁶⁵ Ein entscheidender Faktor für einen effizienten Materialfluss ist die Umschlagleistung. Als Umschlag wird die Gesamtheit der Förder- und Lagervorgänge beim Übergang der Güter auf ein Transportmittel, beim Abgang der Güter von einem Transportmittel oder beim Wechsel des Transportmittels bezeichnet.⁶⁶

⁶² Vgl. Fortmann (2000), S. 62 f.; ten Hompel (2008b), S. 25; VDI 3629 (2005), S. 4

⁶³ Vgl. Arnold (2008), S. 379; ten Hompel (2008b), S. 27; VDI 3629 (2005), S. 4

⁶⁴ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 28

⁶⁵ Vgl. Martin (2006), S. 94

⁶⁶ Vgl. Koether (2008), S. 457

Mit zunehmender Ausschöpfung von Rationalisierungspotentialen kommt dem innerbetrieblichen Transport als eine der Kernfunktionen der operativen Logistik eine immer größere Bedeutung zu. Er umfasst die Tätigkeiten des Ein-, Um- und Auslagerns.⁶⁷

Einlagerung

Bei der Einlagerung wird die Lagereinheit zunächst am Identifikationspunkt kontrolliert, um eine störungsfreie Einlagerung sicherzustellen. Hier wird anschließend durch das Lagerverwaltungssystem (LVS) bzw. Warehouse Management System (WMS) das Transportziel festgelegt und damit ein Transportauftrag gegeben. Die Lagereinheit wird zum Transportziel gebracht und dort eingelagert.⁶⁸

Für die Einlagerung können verschiedene Flurförderzeuge verwendet werden. Neben Staplern, die sehr häufig in diesem Bereich anzutreffen sind, können in vielen Fällen auch Fahrerlose Transportsysteme (FTS) eingesetzt werden. Voraussetzung ist aber, dass die Lagereinheiten am Identifikationspunkt genau am vorgesehenen Platz stehen, um eine störungsfreie Aufnahme durch das Fahrerlose Transportfahrzeug (FTF) zu gewährleisten.

Umlagerung

Mit Umlagerung wird eine Veränderung des Stellplatzes einer Lagereinheit in einem Lager bezeichnet, was unter bestimmten Voraussetzungen erforderlich sein kann. Diese Funktion greift in die Verwaltung der Lagerorte ein und muss deshalb vom WMS kontrolliert und gesteuert werden.⁶⁹

Zur Durchführung von Umlagerungen werden in der Regel Stapler herangezogen. Der Einsatz eines FTS ist ebenfalls möglich, allerdings müssen alle Lagereinheiten immer exakt am Lagerplatz positioniert sein.

Auslagerung

Der Auslagerungsvorgang umfasst alle datentechnischen und operativen Vorgänge, von der Bearbeitung eines Auftrags über die Warenentnahme bis zum Transport der Ware zum vorgegebenen Ziel. Die Initialisierung erfolgt durch einen Auslagerungsauftrag, danach werden die Auslagerung und der Transport, eventuell über einen Kontrollpunkt, zum Zielort durchgeführt.⁷⁰

⁶⁷ Vgl. Arnold (2008), S. 393 f.

⁶⁸ Vgl. VDI 3629 (2005), S. 5 f.

⁶⁹ Vgl. ten Hompel (2008), S. 295; VDI 3629 (2005), S. 7

⁷⁰ Vgl. ten Hompel (2008), S. 17; VDI 3629 (2005), S. 6 f.

Zur Auslagerung werden neben Staplern auch FTS eingesetzt. Eine Anwendungsmöglichkeit ist der Transport versandfähiger Lagereinheiten vom Lager in den Warenausgangsbereich, z.B. in eine vorgegebene Versandlinie. Die Lagereinheiten können aber auch an jeden anderen Zielort transportiert werden, wobei diese für das FTS vorher definiert werden müssen.

2.3.3 Lagerung

Unter Lagern versteht man das „geplante Verweilen der Ware im Lager“.⁷¹ Das Lagergut wird nach unterschiedlichen Gesichtspunkten überwacht und verwaltet. Es erfolgt eine Verwaltung der Lagerorte, die Bestandsführung aller eingelagerten Waren, die Überwachung des Lagerguts sowie der Lagerbedingungen.⁷²

2.3.4 Kommissionierung

Durch die steigenden Anforderungen des Marktes nach kundengerecht zusammengestellten Lieferungen zu möglichst kurzen Durchlaufzeiten gewinnt die Kommissionierung immer mehr an Bedeutung und stellt damit oft das zentrale Element moderner Distributionszentren dar. Der Kommissionierprozess beinhaltet das Zusammenstellen bestimmter Teilmengen (Artikel) aus einer bereitgestellten Gesamtmenge (Sortiment) auf der Basis von Bedarfsinformationen. Diese Teilmengen werden gesammelt und weitergeleitet. Dabei erfolgt eine Umwandlung von einem lager- in einen verbrauchsspezifischen Zustand. In der Regel ist der Kommissionierung eine Lagerfunktion vorgelagert und eine Verbrauchsfunktion (z.B. Produktion, Montage, Versand) nachgelagert.⁷³

Wenn ein Auftrag lediglich ganze Lagereinheiten eines Artikels beinhaltet, so reduziert sich die Kommissionierung auf die Auslagerung. Umfasst ein Auftrag ganze Lagereinheiten von mehreren Artikeln, kommt noch die Auftragszusammenführung hinzu. Enthält ein Auftrag aber mehrere Artikel in Mengen, die kleiner als die jeweiligen Lagereinheiten sind, so entstehen Kommissionieraufträge für Teilmengen, die somit Aufgabe von Kommissioniersystemen sind. Der gesamte Kommissionierprozess kann in mehrere Teilprozesse gegliedert werden.⁷⁴

Bereitstellung der Ware

Die Bereitstellung der Ware kann dynamisch oder statisch erfolgen. Bei der statischen Bereitstellung („Person-zur-Ware“) befinden sich die bereitgestellten Waren auf festen Zugriffsplätzen, zumeist auf dem Boden oder in Regalen angeordnet. Die Kommissionierer bewegen sich

⁷¹ VDI 3629 (2005), S. 6

⁷² Vgl. Arnold (2008), S. 379; VDI 3629 (2005), S. 6

⁷³ Vgl. Arnold (2007), S. 212; Fortmann (2000), S. 117; Koether (2008), S. 456 f.; Schulte (2009), S. 252

⁷⁴ Vgl. Arnold (2008), S. 668 f.

auftragsgemäß zu den geforderten Bereitstellplätzen, entnehmen die geforderten Mengen und legen diese im Kommissionierbehälter ab. Nach Fertigstellung aller bearbeiteten Aufträge wird die kommissionierte Ware an einem Auftragsammelplatz abgegeben. Bei diesem Konzept verwendet der Kommissionierer sehr häufig einen Stapler, um zu den Bereitstellplätzen zu fahren und die Waren nach Entnahme auf einer Palette abzulegen. Alternativ zum Stapler kann auch ein FTF zur Verwendung kommen, das den Kommissionierer selbstständig begleitet, ihm somit die Steuerung des Staplers abnimmt und eine Reduzierung der Kommissionierzeit ermöglicht. Zusätzlich können Systeme wie Pick by Light oder Pick by Voice zur Anwendung kommen.⁷⁵

Bei der dynamischen Bereitstellung („Ware-zur-Person“) wird die Ware aus dem in der Regel automatisierten Lager zum Kommissionierer transportiert. Dies wird mit entsprechender Fördertechnik, zumeist Bandförderer, seltener Flurförderzeuge, realisiert. Nach der Entnahme der benötigten Mengen wird die Restmenge wieder ins Lager zurückbefördert. Die entnommenen Waren werden wiederum in Sammelbehältern abgelegt und nach Fertigstellung eines Auftrags von Staplern oder FTF in den Versandbereich gebracht.⁷⁶

Entnahme und Abgabe

Der Kernprozess des Kommissionierens besteht aus dem Greifvorgang zur Vereinzelung, der Entnahme, der Ablage der zu kommissionierenden Mengen in einem Sammelbehälter sowie dessen Abgabe. Das Greifen („Picken“) wird von einem Kommissionierer durchgeführt, der eine Person oder eine Art von Maschine sein kann. In der Praxis ist es jedoch überwiegend der Mensch.⁷⁷

Die Abgabe umfasst das Weiterleiten der entnommenen und gesammelten Waren zu einer Auftragsammelstelle. Diese kann entweder eine zentrale Basisstation oder ein dezentraler Abgabeplatz sein. Zu diesem Zweck können verschiedene Transportmittel eingesetzt werden, z.B. Förderbänder, Stapler oder auch FTS.⁷⁸

Beschickung

In den meisten Fällen wird der Lagerbereich in ein Kommissionierlager und ein Reservelager aufgeteilt, da in einem Kommissionierlager die Wege in der Regel wesentlich kürzer sind als in einem Lager, in dem große Reserven aufbewahrt werden. Die Verfügbarkeit an den Entnahmestellen im Kommissionierlager ist von entscheidender Bedeutung für eine schnelle und

⁷⁵ Vgl. Arnold (2008), S. 671 ff.

⁷⁶ Vgl. Arnold (2008), S. 674 f.; Wannewetsch (2007), S. 281

⁷⁷ Vgl. Arnold (2007), S. 213 ff.; Arnold (2008), S. 669

⁷⁸ Vgl. Arnold (2008), S. 677; Schulte (2009), S. 255

reibungslose Kommissionierung. Die Beschickung beinhaltet die Nachschubliefereung von Waren vom Reservelager ins Kommissionierlager, wenn der Mindestbestand dieser Ware im Kommissionierlager unterschritten wurde. Die Überwachung und rechtzeitige Auslösung des Nachschubs ist ein wichtiger Faktor im Kommissionierablauf. Für die Durchführung von Beschickungsaufträgen werden in der Regel Stapler verwendet.⁷⁹

Die starke Endkundenorientierung und die Reduzierung von Beständen bei großer Artikelvielfalt führen zu immer kleineren Sendungsgrößen bei steigender Lieferfrequenz. Dadurch entsteht ein steigender Bedarf an effizienten Kommissioniergeräten. Das steigende Lohnniveau in den hoch industrialisierten Ländern verstärkt den Trend zu automatisierten Lösungen. Allerdings werden auch manuelle Kommissioniersysteme aufgrund ihrer niedrigen Investitionskosten und hohen Flexibilität von hoher Bedeutung bleiben. Aber auch (teil-) automatisierte Systeme können immer flexibler eingesetzt werden, z.B. manuelle Kommissionierer, die von FTS unterstützt werden.⁸⁰

2.3.5 Verpackung

Bevor die eigentliche Verpackung durchgeführt wird, werden die kommissionierten oder bereitgestellten Güter zusammengeführt. Da sich Kundenaufträge üblicherweise aus Teilmengen unterschiedlicher Lagerbereiche zusammensetzen und eine sekundengenaue Zusammenführung dieser Teilmengen für den Versand meist nicht möglich ist, wird in einem ersten Schritt eine Auftragszusammenführung durchgeführt. Hierbei werden die auszuliefernden Güter zu größeren Einheiten zusammengefasst, was als „Bildung logistischer Einheiten“ bezeichnet wird. Dabei kann eine Warenausgangsprüfung auf Vollständigkeit des Kundenauftrags und auf Qualität der Versand- bzw. Transporteinheiten erfolgen.

Die Verpackung an sich hat mehrere Aufgaben zu erfüllen: Neben der Schutzfunktion gegen Schmutz und Beschädigungen übt sie eine Lager- und Transportfunktion aus, das heißt die Artikel werden für Lagerung und Transport aufbereitet. Darüber hinaus liegt eine Informationsfunktion durch Identifikationsmerkmale wie Etiketten vor. Durch die erleichterte Handhabung bietet die Verpackung auch eine Manipulationsfunktion. Abschließend werden die versandfähigen Einheiten in den Warenausgangsbereich gebracht, was mittels manuell betriebener Stapler und unter bestimmten Umständen auch durch FTS realisiert werden kann.⁸¹

⁷⁹ Vgl. Arnold (2008), S. 669; ten Hompel (2008b), S. 50 f.; Schulte (2009), S. 254 f.

⁸⁰ Vgl. Arnold (2008), S. 685

⁸¹ Vgl. Pfohl (2010), S. 134 ff.; Schulte (2009), S. 479 f.; Specht (2005), S. 156 ff.; ten Hompel (2008b), S. 51 f.

2.3.6 Warenausgang

Zu den physischen Abläufen des Versands gehören die Zusammenstellung der Versandeinheiten entsprechend den Aufträgen, üblicherweise auf Bodenstellplätzen vor den Versandtoren, und die Verladung der Waren in ein Transportmittel. Zur Durchführung dieser Tätigkeiten sind auch eine Reihe an Organisations- und Kontrollfunktionen nötig, z.B. die Bestimmung der optimalen Versandart bzw. des Transportmittels. Es kann auch noch eine Warenausgangsprüfung durchgeführt werden.

Zur Verladung werden in der Regel Stapler verwendet, da sie flexibel einsetzbar sind. In speziellen Fällen können auch FTF für die Beladung von LKW eingesetzt werden. Abschließend wird die Ladung gesichert, um sie vor Belastungen und Umgebungseinflüssen zu schützen.⁸²

2.3.7 Cross Docking

Beim Cross Docking werden die Warenanlieferungen und -abgänge so aufeinander abgestimmt, dass die eingehenden Waren ohne Lagerung sofort in den Versandbereich gelangen. Es findet keine Vereinnahmung ins Lagersystem statt, das System gleicht einem reinen Umschlagssystem. Grundsätzlich werden zwei Arten des Cross Docking unterschieden:

Cross Docking mit Aufbrechen der Ladeeinheiten, wobei die ankommenden Ladeeinheiten artikelrein sind und daher entsprechend verteilt bzw. kommissioniert werden müssen (zweistufiges Cross Docking), und Cross Docking als Durchlaufsystem, wobei die ankommenden Ladeeinheiten bereits vom Lieferanten vorkommissioniert wurden und damit nicht aufgebrochen, sondern nur korrekt zusammengeführt werden müssen (einstufiges Cross Docking). Dieses Konzept kann sowohl mit Staplern als auch mit FTS realisiert werden, jedoch ist zu beachten, dass mit steigendem Automatisierungsgrad die Anforderungen an die Lieferanten und auch an die eigenen Prozesse steigen.⁸³

2.3.8 Value-added Services

Zwischen den verschiedenen Materialflussprozessen in einem Distributionszentrum können auch Dienstleistungen erbracht werden, die über die Kerndienstleistungen hinausgehen und einen Mehrwert schaffen. Diese Dienstleistungen werden Value-added Services genannt und beinhalten unter anderem Etikettierungen, Preisauszeichnungen oder verschiedene Montagetarbeiten. Die Ausprägungen dieses Prozesses sind branchenabhängig und damit sehr vielfältig.⁸⁴

⁸² Vgl. ten Hompel (2008b), S. 53; VDI 3629 (2005), S. 8 f.; Wannewetsch (2007), S. 295

⁸³ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 69 f.; Schulte (2009), S. 492 ff.

⁸⁴ Vgl. Bode (2004), S. 38; Wisser (2009), S. 15

2.3.9 Hilfs- und Nebenprozesse

Neben den bereits beschriebenen Prozessen gibt es in einem Distributionszentrum noch verschiedene Hilfs- und Nebenprozesse. Dazu zählt beispielsweise die Inventur. Dabei werden sämtliche Vermögenswerte, insbesondere die Lagerbestände, durch Zählen, Messen und Wiegen erfasst. Der Arbeitsablauf kann jedoch durch die Inventur erheblich beeinflusst werden, weshalb das Inventurverfahren vorab mit allen Beteiligten abgestimmt werden sollte.⁸⁵

Auch die Instandhaltung ist ein wichtiger Prozess in einem Distributionszentrum. Sie umfasst alle Maßnahmen der Wartung, Inspektion, vorbeugenden und ausfallbedingten Reparatur. Sämtliche Flurförderzeuge müssen ständig instand gehalten werden, um möglichst große Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen. Es gilt, Ausfälle zu verhindern, da bereits geringe Störungen im Bereich der Fördertechnik zu erheblichen Einbußen in anschließenden Bereichen führen können.⁸⁶

In folgender Tabelle werden alle Prozesse in einem Distributionszentrum zusammengefasst. Die für Flurförderzeuge relevanten Prozesse werden zudem noch aufgeschlüsselt. Die Eignung, diese Prozesse durchzuführen, wird für manuell bediente Stapler und FTS dargestellt.

Prozess		Eignung Stapler	Eignung FTS
Wareneingang	Entladung (z.B. aus LKW)	hoch	niedrig
Lagerinterner Transport	Einlagerung	hoch	hoch
	Umlagerung	hoch	hoch
	Auslagerung	hoch	hoch
Lagerung			
Kommissionierung	Entnahme (unterstützend)	hoch	hoch
	Abgabe	hoch	hoch
	Beschickung	hoch	hoch
Verpackung			
Warenausgang	Bereitstellung	hoch	hoch
	Verladung (z.B. in LKW)	hoch	mittel
Cross-Docking		hoch	mittel
Value-Added Services			
Neben- und Hilfsprozesse			

	hoch
	mittel
	niedrig

Tabelle 1: Eignung der Flurförderzeuge für die Lagerprozesse

⁸⁵ Vgl. ten Hompel (2008), S. 133; VDI (2005), S. 9 f.

⁸⁶ Vgl. ten Hompel (2006), S. 1; Wannenwetsch (2007), S. 428 f.

3 Flurförderzeuge in einem Distributionszentrum und deren Energieverbrauch

In Distributionszentren werden verschiedenste Arten von Fördermitteln eingesetzt. Im Allgemeinen werden unter Fördermittel die technischen Systeme des Materialflusses verstanden, die im Wesentlichen die innerbetrieblichen Ortsveränderungen von Gütern bewirken. Dabei werden die logistischen Funktionen Transportieren, Umschlagen, Stapeln, Lagern und Kommissionieren realisiert. Die verschiedenen Fördermittel können in mehrere Gruppen unterteilt werden.⁸⁷

3.1 Einteilung der Fördermittel

Anhand ihrer Arbeitscharakteristik kann man Stetig- und Unstetigförderer unterscheiden. Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht:

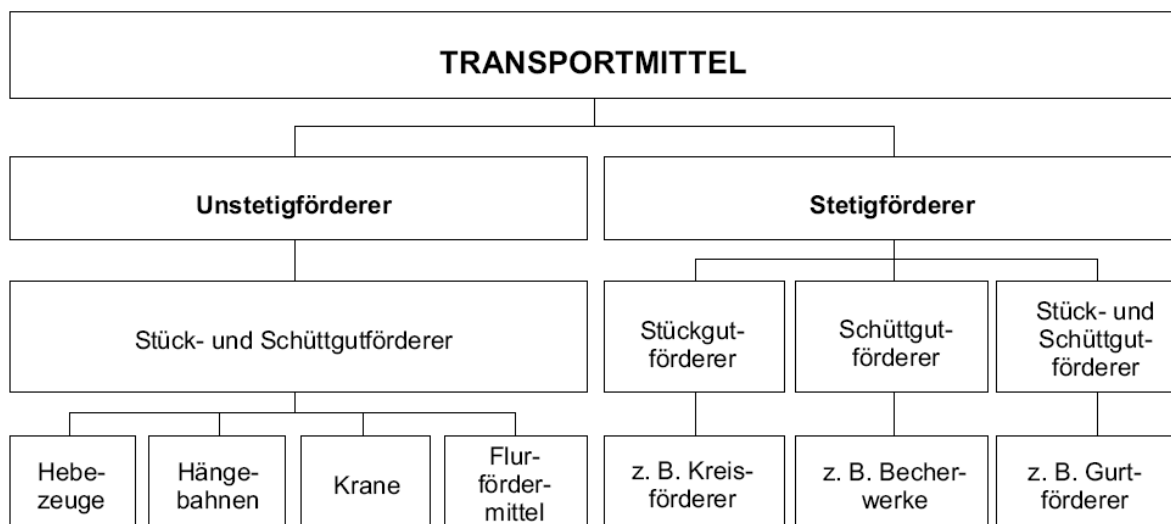


Abbildung 5: Einteilung der Fördermittel⁸⁸

Stetigförderer haben eine kontinuierliche Arbeitsweise und sind meistens ortsfest installiert. Sie verfügen über eine hohe Förderleistung. Die kontinuierliche Arbeitsweise und die einfache Funktion erlauben eine gute Automatisierbarkeit und Kontrolle der Materialströme im Fördersystem.⁸⁹

Unstetigförderer werden durch eine intermittierende Förderung geprägt, das heißt sie transportieren einzelne oder wenige Fördergüter von einem Ausgangspunkt zum Ziel. Dies wird

⁸⁷ Vgl. Martin (2006), S. 96; ten Hompel (2008b), S. 90 f.

⁸⁸ Martin (2006), S. 97

⁸⁹ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 91

als Arbeitsspiel bezeichnet. Unstetigförderer sind selten ortsfest, sondern zumeist geführt oder frei verfahrbar. Dadurch besitzen sie eine hohe Anpassungsfähigkeit an viele Förderaufgaben und weisen eine große Flexibilität auf. Eine Automatisierung ist deutlich schwieriger zu realisieren als bei Stetigförderern, jedoch wird sie durch die Fortschritte im Bereich der Sensor- und Steuerungstechnik sowie das Absinken der Hard- und Softwarekosten begünstigt.⁹⁰

Unstetigförderer werden anhand ihrer Verfahrbarkeit in zwei Gruppen unterteilt:

1. Frei verfahrbare Fördermittel sind flurgebunden und damit in der Ebene beliebig verfahrbar. Durch Hubgerüste kann auch die dritte Dimension erschlossen werden. Die Steuerung übernimmt zum überwiegenden Teil der Mensch, dessen kognitive Fähigkeiten alternativ nur durch aufwändige Steuerungs- und Sensoreinrichtungen erbracht werden können, wie dies beispielsweise bei FTS geschieht.
2. Geführt verfahrbare Fördermittel sind durch Laufschiene spurgeführt, die bodenmontiert (flurgebunden), auf Stützen (aufgeständert) oder außerhalb des eigentlichen Arbeitsbereiches (flurfrei) angeordnet sind. Dadurch verringert sich der Steuerungsaufwand erheblich.⁹¹

Im Bereich der Unstetigförderer sind insbesondere die Flurförderzeuge relevant. Diese umfassen bodengebundene und in der Regel nicht auf Schienen fahrende Fördermittel. Als Grundarten gleisloser Flurförderzeuge unterscheidet man Schlepper, Wagen und Stapler. Als Kriterium für diese Unterscheidung dient der Lastangriff: Der Schlepper überträgt eine Zugkraft, wobei sich die Last auf einem anderen Transportmittel befindet. Beim Wagen erfolgt der Lastangriff innerhalb und beim Stapler außerhalb der Radbasis. Aber allein mit dem Stapler können Ladeeinheiten selbstständig aufgenommen und abgegeben werden.⁹²

Für Flurförderzeuge fallen verschiedene Aufgabenstellungen an, die deren Gestaltung wesentlich beeinflussen:⁹³

- Transport von Stückgütern über kurze bzw. weite Distanzen
- Umschlag von Stückgütern zwischen Arbeitsmitteln oder Wechsel zwischen Arbeitsstationen
- Stapeln von Stückgütern und gegebenenfalls Transport gestapelter Einheiten
- Regalbedienung: Ein- und Auslagerung sowie Kommissionierung in der Regalfläche

⁹⁰ Vgl. ten Hompel (2007), S. 155 f.

⁹¹ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 95 f.

⁹² Vgl. Schulte (2009), S. 160

⁹³ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 96

Je nachdem, in welcher Häufigkeit eine oder mehrere dieser Aufgaben durchzuführen sind, werden verschiedene Typen von Flurförderzeugen eingesetzt. Für reine Transportaufgaben kommen oft Wagen oder Schlepper mit Anhängern zum Einsatz, die zur Be- und Entladung allerdings eines weiteren Fördermittels oder des Menschen bedürfen. Universalgeräte bzw. universelle Umschlaggeräte können Ladeeinheiten selbstständig aufnehmen, sie zum Abgabepunkt transportieren und dort abgeben, was sie für Lösungen mittels FTS sehr gut eignet. Im Bereich der Regalbedienung werden spezielle Lagergeräte eingesetzt, die sich durch schmale Arbeitsgänge, große Einlagerhöhen oder durch die Möglichkeit der Kommissionierung in der Regalfront auszeichnen.⁹⁴

Zusätzlich können sie entsprechend ihrer Bauart nach unterschiedlichen Kriterien gegliedert werden. Es kann die hauptsächliche Bewegungsrichtung, die Hubfähigkeit, die Art des Antriebs, die Stapelfähigkeit und die Position des Bedieners unterschieden werden. Herstellerabhängig werden gleiche Namen für unterschiedliche Geräte oder unterschiedliche Namen für das gleiche Gerät verwendet, woraus naturgemäß eine Inhomogenität bei der Benennung entsteht.⁹⁵ Unabhängig davon verfügen Flurförderzeuge im Allgemeinen über folgende Vorteile:⁹⁶

- freizügiger Einsatz in allen Betriebsbereichen,
- große Beweglichkeit und Wendigkeit (Drehen auf der Stelle),
- vielseitige Verwendbarkeit des selben Geräts,
- Fahren in schmalen Gängen und kleinen Kurven,
- keine Störung durch ortsfeste Gleise,
- niedrige Betriebskosten, geringe Anlagekosten,
- bei Verwendung von Ladeeinheiten Ersparnis an Umladevorgängen und
- leichtes Anpassen an Betriebsumstellungen.

Demgegenüber stehen aber auch einige Nachteile:

- beschränkte Lade- bzw. Tragfähigkeit,
- größerer Fahrwiderstand der Räder als bei Schienenfahrzeugen,
- Erfordernis von Aufzügen mit hoher Tragkraft und großen Abmessungen,
- Abhängigkeit von Bodenbeschaffenheit und -tragfähigkeit und
- für jedes Fahrzeug muss eigens ausgebildetes Personal vorhanden sein.

⁹⁴ Vgl. ten Hompel (2008b), S. 96 f.

⁹⁵ Vgl. ten Hompel (2007), S. 156 f.

⁹⁶ Vgl. Martin (2006), S. 219

3.2 Manuell bediente Stapler

Als Stapler bezeichnet man ein Flurförderzeug mit einem Hubgerüst, welches eine vertikale Lastbewegung ausführen kann.⁹⁷ Aufgrund ihrer breiten Einsatzmöglichkeiten stellen Stapler die am weitesten verbreiteten Transportsysteme für Stückgüter dar. Die meisten Stapler sind aus Leichtbauprofilen, Rohren und Blechen zusammengeschweißt. Die wichtigsten Baugruppen sind die Antriebe, die Batterien, das Fahrwerk, die Lenkung, das Hubgerüst und das Lastaufnahmemittel.⁹⁸

3.2.1 Antrieb

Die Antriebsart entspricht einer bestimmten Form der Energieumwandlung zur Erzeugung von Bewegungsenergie für den Stapler. Der Begriff Antrieb umfasst alle dazugehörigen Baugruppen, z.B. Motor (Energieumwandler), Getriebe, Übertragungselemente und Steuerung. Neben dem manuellen und dem Schwerkraftantrieb, welche hier nicht betrachtet werden, spielt vor allem der motorische Antrieb eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich wird zwischen verbrennungs- und elektromotorischem Antrieb unterschieden.

Verbrennungsmotoren wandeln über Kolben und Kurbeltrieb die in einem Zylinder durch Verbrennung eines Brennstoffes freigesetzte Wärme in mechanische Energie um. Die Kraftstoffe sind Benzin, Diesel und Treibgas (Propan, Butan), die in flüssiger Form mitgeführt werden. Da durch die entstehenden Abgase die Luft verunreinigt wird, ist der Einsatz in geschlossenen Räumen nur bedingt möglich. In Distributionszentren kommen daher fast ausschließlich Stapler mit elektromotorischem Antrieb zum Einsatz.

Der Elektromotor setzt elektrische in mechanische Arbeit um. In der Transporttechnik werden Drehstrom- und Gleichstrommotoren eingesetzt. Gleichstrom fließt ständig in eine Richtung, lässt sich über weite Strecken relativ verlustarm transportieren und kann gespeichert werden. Gleichstrommotoren haben einige Vorteile wie stufenlose Verstellbarkeit der Drehzahl, hohe Dynamik und hohe Drehzahlsteifigkeit. Demgegenüber stehen Nachteile wie Verschleiß an den bewegten stromdurchflossenen Kontakten und die Erfordernis einer gut geklärten Spannung, die durch zusätzliche Aggregate erzeugt werden muss. Sie beziehen den Gleichstrom zumeist aus einer Batterie, welche elektrische Energie in Form von chemischer Energie speichert.⁹⁹

Drehstrom ist eine Form des Wechselstroms, die bei einer bestimmten Verkettung von drei verschiedenen Wechselströmen entsteht, und kann nicht gespeichert werden. In der Transporttechnik hat man als Energiequelle eine Gleichspannungsquelle, die erst in dreiphasige

⁹⁷ Vgl. Martin (2006), S. 230

⁹⁸ Vgl. Schulte (2009), S. 161

⁹⁹ Vgl. Martin (2006), S. 96 ff.; ten Hompel (2008c), S. 193

Wechselspannung umgewandelt werden muss. Dies kann mit so genannten Umrichtern realisiert werden. Bei Staplern werden nur Asynchronmotoren eingesetzt, die aufgrund des robusten mechanisch-elektrischen Aufbaus zu einer wichtigen Alternative zum Gleichstrommotor geworden sind. In Verbindung mit den entsprechenden Bauteilen kommen sie anstelle der vorwiegend eingesetzten Gleichstrommaschinen zunehmend zum Einsatz.¹⁰⁰

Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren weisen die meisten elektrischen Motoren eine beträchtliche Überlastbarkeit auf, deren Grenzen durch die mit der Belastung steigenden Verluste gegeben sind. Da die Temperatur der Verlustleistung folgt, kann die Maschine kurzzeitig überlastet werden, falls die Temperatur anfänglich unter dem zulässigen Grenzwert war. Die Wahl eines geeigneten Antriebs hängt auch von der geplanten Betriebsweise ab, also ob der Motor im Dauer-, Kurzzeit-, Taktbetrieb oder auf eine andere Weise eingesetzt werden soll. Die unterschiedlichen Betriebsweisen stellen auch verschiedene Anforderungen an die Batterie.¹⁰¹

3.2.2 Batterie

Wird von einer batterieelektrischen Antriebseinheit gesprochen, versteht man darunter einen Elektromotor, die Batterie als Stromlieferant, das Getriebe, die Steuerung und das Zubehör, wie z.B. ein Batterieladegerät. In Staplern kommen wiederaufladbare Batterien, also Akkumulatoren, zum Einsatz. Diese werden unterteilt in Starterbatterien zum Anlassen von Verbrennungsmotoren und in Antriebsbatterien zum Antrieb von Fahr- und Hubmotoren.

Die Batteriezelle ist die kleinste abgeschlossene stromliefernde Einheit der Batterie. Sie besteht aus einem Gehäuse, aus positiven und negativen Elektrodenplatten, dazwischen liegenden mikroporösen Separatoren, die den Kontakt zwischen den Elektroden verhindern, den Polen und dem Elektrolyt. Die Nennspannung pro Zelle beträgt üblicherweise zwischen 1,2 V und 2 V. Durch Hintereinanderschaltung von Zellen kann die Spannung, durch Parallelschaltung die Kapazität erhöht werden. Die gängigen Batteriespannungen liegen bei 24 V, 48 V oder 80 V, die Kapazität liegt zwischen 100 Ah und 1000 Ah. Eine weitere wichtige Kenngröße ist die Energiedichte, die für Bleibatterien bei rund 40 Wh/kg bzw. bei rund 60 Wh/kg für Nickel-Cadmium-Batterien liegt.¹⁰²

Zu unterscheiden sind Blei-Akkumulatoren mit verdünnter Schwefelsäure (2 V Nennspannung pro Zelle) und alkalische Batterien mit verdünnter Kalilauge (1,2 V Nennspannung pro Zelle) als Elektrolyt. In Abbildung 6 wird eine Übersicht dargestellt.

¹⁰⁰ Vgl. Babel (2007), S. 97 ff.; Schröder (2007), S. 264 und 520 f.; ten Hompel (2008c), S. 191 ff.

¹⁰¹ Vgl. Leonhard (2000), S. 46 ff.; VDI 4451 (2000), S. 17 ff.

¹⁰² Vgl. Huggins (2009), S. 10; Martin(2006), S. 101

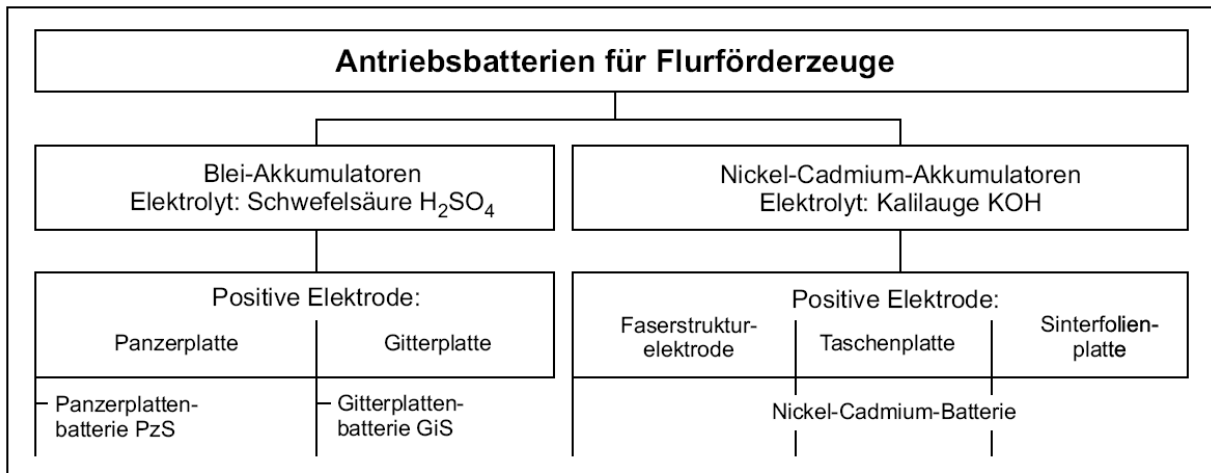


Abbildung 6: Gliederung der Antriebsbatterien für Flurförderzeuge¹⁰³

Bleibatterien werden in der Gitterplattentechnik oder in der vorherrschenden Panzerplatten-technik ausgeführt. Die Gitterplattenbatterie ist eine kostengünstige Batterie für leichte Einsatzbedingungen mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von maximal 900 Lade- und Entladezyklen. Die Panzerplattenbatterie ist für normale und schwere Einsätze geeignet, die Lebensdauer ist mit maximal 1600 Ladungen deutlich höher als bei der Gitterplattenbatterie.¹⁰⁴

Die chemische Reaktionsgleichung für die Entladung lautet (beim Ladevorgang geht die Reaktion in die andere Richtung): $\text{Pb} + 2 \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{PbO}_2 \longrightarrow 2 \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Entscheidend für eine lange Lebensdauer der Batteriezellen ist das regelmäßige Versorgen mit destilliertem Wasser zum Ausgleich des Wasserverlusts beim Laden. Dieses Problem kann mit Gel- bzw. AGM-Batterien umgangen werden, indem der Elektrolyt immobilisiert wird. Die Schwefelsäure bildet mit einem SiO_2 -Pulver ein Gel (Gel-Technologie) bzw. wird in einem hochporösen, trockenen Glasfasermaterial absorbiert (Absorbent Glas Material – AGM-Technologie). Dadurch sind diese Batterien wartungsfrei.¹⁰⁵

Nickel-Cadmium-Batterien sind insbesondere im Taktbetrieb einsetzbar, da sie ständig nachgeladen werden müssen. Ungefähr ein Viertel der Zeit muss für das Nachladen verwendet werden. Nachteilig ist ebenso die hohe Restkapazität von 40%. Im Betrieb haben sie aber auch einige Vorteile wie längere Gebrauchsdauer, höhere mechanische und thermische Festigkeit und den nichtätzenden Elektrolyt Kalilauge. Dieser dient im Wesentlichen zum Transport der OH-Ionen von der positiven zur negativen Elektrode.¹⁰⁶

¹⁰³ Martin (2006), S. 102

¹⁰⁴ Vgl. Martin (2006), S. 101 f.; VDI 4451 (2000), S. 7

¹⁰⁵ Vgl. Babel (2007), S. 23 ff.

¹⁰⁶ Vgl. Martin(2006), S. 103; VDI 4451 (2000), S. 62

Die Lebensdauer einer Batterie vermindert sich durch falsche Entladung, zu niedrigen Säurestand, zu häufige Tiefenentladung und schlechte Wartung. Die Wahl des richtigen Ladegeräts hängt von der Anzahl der zu ladenden Fördermittel, der Batteriespannung und der zur Verfügung stehenden Ladezeit ab. Als Ladeform bieten sich der Ladebetrieb und der Wechselbetrieb an. Beim Wechselbetrieb wird die entladene Batterie durch eine geladene ausgetauscht. Der Ladebetrieb wird mit einer Ladestation in Einzelaufstellung oder in einer Sammelstation durchgeführt.¹⁰⁷

3.2.3 Räder, Lenkung und Hubgerüst

Die Verbindung zwischen Stapler und Fahrbahn wird durch die verwendeten Räder hergestellt. Diese bestehen aus Nabe, Felgen und Reifen, aus Nabe und Reifen oder aus nur einem homogenen Werkstoff. Der Reifen ist ein Verschleißelement und muss austauschbar sein. Insbesondere muss er Kräfte übertragen und aufnehmen, Stöße abfangen und den Anforderungen aus den Einsatzbedingungen genügen. Ausführungsformen sind Luftreifen, Supere-lastikreifen, Vollgummireifen und Kunststoffreifen (aus Polyurethan).

Zur Lenkung eines Staplers stehen Drehschemel- und Achsschenkellenkung zur Verfügung. Bei der Drehschemellenkung sind zwei starre Laufräder auf einer Achse angebracht, die über einen U-förmigen Schemel mit der Lenkachse verbunden sind. Dadurch erhält das Fahrzeug eine große Wendigkeit. Bei der Achsschenkellenkung sind die gelenkten Räder durch Achsschenkel angelenkt. Die Lenkung kann manuell mittels Lenkrad oder Deichsel erfolgen, automatisch durch geeignete Führungssysteme oder als Kombination von manueller und automatischer Lenkung.¹⁰⁸

Das Hubgerüst dient der Vertikalbewegung von Lastaufnahmemittel und Last. Es ist hydraulisch angetrieben. Das Lastaufnahmemittel eines Staplers besteht aus dem Lastschlitten und dem Lastträger. Beim Gabelstapler beispielsweise entspricht der Lastschlitten dem Hub- oder Gabelschlitten, der Lastträger den Gabelzinken. Andere Lastträger sind Anbaugeräte, z.B. Rollenklammern oder Montagebühnen. Zu unterscheiden sind Hubgerüste nach der Größe ihres Freihubs, das heißt nach dem Hub eines Staplers ohne Ausfahren eines Hubgerüsts.¹⁰⁹

Natürlich besteht ein Stapler aus vielen weiteren Bestandteilen, wie der Bremse, den Lüftern oder verschiedenen Geräten zur elektronischen Steuerung. Diese Komponenten werden im Kapitel 3.4 näher beschrieben.

Beispielhaft soll im Folgenden auf Horizontal-Kommissionierfahrzeuge bzw. Niederhubstapler eingegangen werden, da diese in Distributionszentren vielfach verwendet werden. Es handelt

¹⁰⁷ Vgl. Martin (2006), S. 104

¹⁰⁸ Vgl. Martin (2006), S. 107 und 221 f.

¹⁰⁹ Vgl. Martin (2006), S. 233 f.; ten Hompel (2008), S. 99

sich dabei um angetriebene Flurförderzeuge für den Mitfahr- oder Mitgängerbetrieb, die aufgrund ihrer Hubhöhen Ladeeinheiten aufnehmen, aber nicht stapeln können. Sie können eine oder zwei Euro-Paletten hintereinander aufnehmen und verfügen über eine Deichsel- oder Lenkradlenkung. Der Fokus dieser Fahrzeuge liegt in der optimalen Unterstützung des Kommissioniervorgangs bei der Person-zur-Ware-Kommissionierung sowie des innerbetrieblichen Transports.¹¹⁰ Gegenstand der Betrachtung ist der Horizontalkommissionierer STILL CX 20. Zum weiteren Vergleich werden auch die technischen Daten des Toyota LPE 240 dargestellt.



Diese Stapler dienen, neben anderen, als Basisgeräte für die FTF der KNAPP Systemintegration. Die stehende Abbildung zeigt den CX 20, die wichtigsten technischen Daten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Abbildung 7: STILL CX 20¹¹¹

Technische Daten	[Einheit]	STILL CX 20	Toyota LPE 240
Nenntagfähigkeit	kg	2000	2400
Gesamtlänge	mm	3575	2403
Gabellänge	mm	2150	1150
Breite	mm	800	790
Höhe	mm	1165	1450
Freihub	mm	130	210
Batteriekapazität	Ah	465	600
Batteriespannung	V	24	24
Max. Geschwindigkeit	m/s	3,5	3,3

Tabelle 2: Technische Daten STILL CX 20 und Toyota LPE 240

¹¹⁰ Vgl. ten Hompel (2007), S. 169 f.

¹¹¹ Dieses und sämtliche Bilder des folgenden Kapitels wurden aus internen Unterlagen der KNAPP Systemintegration entnommen

3.3 Fahrerlose Transportsysteme (FTS)

Grundsätzlich existieren zwei unterschiedliche Konzepte. Zum einen gibt es die klassische Lösung, wobei die Fahrzeuge für einen bestimmten Zweck eigens konstruiert und hergestellt werden. Zum anderen werden aber auch Serien-Stapler mittels elektronischen Komponenten zu FTF aufgerüstet bzw. bereits als automatisierte Stapler gefertigt. Alle gängigen Flurförderzeuge werden mittlerweile auch als Fahrerlose Transportfahrzeuge realisiert. Diese Arbeit beschäftigt sich aber speziell mit automatisierten Serienstaplern. Das bedeutet, dass manuell bediente Stapler mit den notwendigen elektronischen Komponenten, wie zum Beispiel Laserscannern oder Sensoren, versehen werden, damit sie sich ohne manuelle Steuerung durch den Menschen automatisch bewegen können. Außerdem ist es möglich, jederzeit zwischen manuellem und automatischem Betrieb umzustellen. Trotz des hohen technischen Aufwands werden FTS aus mehreren Gründen eingesetzt:¹¹²

- Reduzierung der Personalkosten (diese können bis zu 75% der Betriebskosten eines Staplers ausmachen ¹¹³),
- Transporte in Risikobereichen und Erhöhung der Arbeitssicherheit,
- Erfüllung hoher fördertechnischer Anforderungen,
- Reduzierung von Beständen im Lager und an den Linien,
- gleichmäßige Kapazität,
- hohe Verfügbarkeit,
- ökologische Gesichtspunkte (Schallpegel, Energieverbrauch),
- Transparenz der Abläufe,
- Vermeidung von Transportschäden,
- Verringerung des Verschleißes am Fahrzeug.¹¹⁴

Insgesamt bleibt das Ziel, durch FTF (automatisierte Serienfahrzeuge) die Kosten zu senken und die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen.¹¹⁵ Ein FTS besteht aber nicht nur aus den FTF, sondern setzt sich aus vielen Komponenten zusammen. Dazu gehören ein oder mehrere Fahrzeuge (FTF) samt Energieversorgung, der Fahrkurs, die Lastübergabestationen und das Lenksystem. Des Weiteren ist das Vorhandensein einer Anlagensteuerung, eines Kommunikationssystems und von Personenschutzeinrichtungen notwendig.¹¹⁶

Eine wesentliche Komponente jedes FTS ist natürlich das Fahrzeug. Ein wichtiger Bestandteil ist dabei die Navigation. Darunter werden Maßnahmen zur Fahrzeugführung verstanden, mit

¹¹² Vgl. ten Hompel (2008b), S. 106; VDI 4450 (2001), S. 19 ff.

¹¹³ Vgl. Martin (2006), S. 262

¹¹⁴ Vgl. Ullrich (2011), S. 23

¹¹⁵ Vgl. ten Hompel (2007), S. 198

¹¹⁶ Vgl. Martin (2006), S. 262

deren Hilfe ermittelt wird, wo sich das Fahrzeug befindet, wohin das Fahrzeug ohne die Bewegung verändernde Maßnahmen gelangen würde und was zu tun ist, um ein gewünschtes Ziel sicher zu erreichen.¹¹⁷

Zur automatischen Führung von Flurförderzeugen gibt es zwei Hauptprinzipien: Die Führung kann entweder anhand einer realen, also entlang einer im Boden verlegten oder auf dem Parcours angebrachten Leitlinie, oder anhand einer virtuellen Leitlinie erfolgen. Zu den Verfahren mit physisch vorhandener Leitlinie zählen die induktive, die optische und die magnetische Führung.¹¹⁸ Jedenfalls werden Einrichtungen am oder im Boden verwendet. Die gängigsten Varianten sind:

1. Die aktiv-induktive Leitspur, bei der stromdurchflossene Leiter im Boden eingelassen werden. Unter dem Fahrzeug sind zwei Spulen angebracht, in die der Wechselstrom des Leitdrahts einen Strom induziert. Dadurch wird die Abweichung von der Leitspur gemessen und der Lenkmotor geregelt.
2. Die passiv-induktive Leitspur, bei der ein Metall- oder Magnetstreifen am Boden verklebt wird. Ein Sensor erkennt mit Hilfe der Kantendetektion das Band bzw. die Feldänderung und nutzt diese zur Ansteuerung des Lenkmotors.
3. Die optische Leitspur, bei der ein Farbanstrich lackiert oder mit einem Textilband aufgebracht wird. Eine geeignete Kamerasensorik nutzt ebenfalls Kantendetektionsalgorithmen und steuert so den Lenkmotor.
4. Die berührungslose Energieübertragung, wobei ein Doppelleiter im Boden verlegt wird, der neben der Energie quasi als Nebenprodukt auch die Navigation bereitstellt.

Die erste Variante wurde in der Vergangenheit zur wichtigsten Technik bei FTS-Anlagen. Mit einem Generator (4 bis 20 kHz, typischerweise 100 mA) wird Wechselstrom durch die Leerschleife getrieben. Das System ist durch die Versenkung im Boden sehr robust. In modernen Anlagen gibt es sie in der ursprünglichen Form allerdings kaum noch, da die Flexibilität der FTF stark eingeschränkt wird. Besonders in komplexen Layouts verwendet man heute eher die freien Verfahren, d.h. diejenigen mit virtueller Leitspur.¹¹⁹

Künstliche Marken im Boden werden oft als Vertreter der sogenannten freien Verfahren eingesetzt. Diese Bezeichnung kommt daher, dass die Fahrspur nicht starr, sondern virtuell in einem Rechner realisiert wird. Zur Berechnung der Leitlinie wird einerseits die Koppelnavigation eingesetzt, zusätzlich werden die in regelmäßigen Abständen eingelassenen Marken gepeilt. Das Verfahren der Koppelnavigation basiert auf dem Prinzip, ausgehend von einem

¹¹⁷ Vgl. Ullrich (2011), S. 76

¹¹⁸ Vgl. ten Hompel (2007), S. 199 f.

¹¹⁹ Vgl. Ullrich (2011), S. 79 f.

bekanntem Startpunkt durch Messung von zurückgelegter Distanz und Lenkwinkel die Position zu berechnen. Die relative Positionsbestimmung führt zu einem Fehler, der immer größer wird, je weiter man sich vom Ausgangspunkt entfernt. Daher kann dieses auch als Odometrie bekannte Steuerungssystem nur in Kombination mit einem anderen Verfahren zur Positionsbestimmung eingesetzt werden. Ein gängiges Prinzip ist der Einsatz von Dauermagneten oder Transpondern, die in den Boden eingebracht werden.¹²⁰

Die Lasernavigation ist der prominenteste Vertreter der freien Navigation. Das Verfahren ist sehr flexibel, da sich neue Fahrkurse direkt einprogrammieren oder durch eine Lernfahrt erstellen lassen. An den Wänden und Säulen werden reflektierende Folienstreifen angebracht, die von einem rotierenden Laserscanner (siehe Abbildung 8) genau vermessen werden. Dieser Laserscanner ist auf dem FTF angebracht und sendet über eine rotierende Optik einen Strahl aus. Wenn der Strahl auf einen Reflektor trifft, wird er zurückgeworfen und in der integrierten Messeinheit ausgewertet. Zur Bestimmung der Position wird die Winkelmessung, die Laufzeitmessung oder eine Kombination beider Verfahren eingesetzt. In jedem Fall ist die Genauigkeit sehr hoch, es müssen aber stets mindestens drei Streifen sichtbar sein. Für das menschliche Auge ist der verwendete Laser völlig ungefährlich.¹²¹



Abbildung 8: Laserscanner

Daneben gibt es noch Funkverfahren, bei denen eine Selbstortung auch mittels Laufzeitmessung zu Satelliten (Global Positioning System, GPS) oder stationären, codierten Radarreflektoren vorgenommen wird. Dies wird jedoch vorrangig zur Navigation in sehr großen Räumen oder auf dem freien Feld verwendet, da das GPS in bebauter Umgebung ungeeignet ist. Es kann lediglich ein sogenanntes LPR (Local Positioning Radar) aufgebaut werden, das jedoch deutlich ungenauer als das GPS ist. Das macht diese Alternative für Distributionszentren nur sehr schwer einsetzbar.¹²²

¹²⁰ Vgl. ten Hompel (2007), S. 200; Ullrich (2011), S. 80 f.

¹²¹ Vgl. ten Hompel (2007), S. 202 f.; Ullrich (2011), S. 83 f.

¹²² Vgl. Ullrich (2011), S. 85

Nebenstehende Abbildung zeigt eine weitere sehr wesentliche Komponente: die Fahrzeugsteuerung. Hier laufen sämtliche Informationen des FTF zusammen, womit dieser Bauteil zur zentralen Steuerungseinheit des Fahrzeugs wird. Es kommuniziert ständig mit dem Steuerungssystem des FTS.



Abbildung 9: Fahrzeugsteuerung (SPS)

Bei diesem Gerät handelt es sich um eine so genannte Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Diese besteht im Wesentlichen aus Prozessor, Daten-, System- und Programmspeicher, digitalen und analogen Ein- und Ausgabegruppen, Funktionsgruppen und einer Spannungsversorgung.¹²³

Zur Regelung von Lenkung und Antrieb gibt es eine Reihe weiterer Bauteile. Dabei ist unter anderem die I/O-Erweiterungseinheit zu nennen. Diese wird verwendet, weil bei der Fahrzeugsteuerung zu wenige I/O-Anschlüsse vorhanden sind. Die Erweiterungseinheit ist eine spezielle Fahr- und Lenksteuereinheit (in Verbindung mit der Antriebsregelung), die als digitale und analoge Schnittstelle für Sicherheitssensoren, den Batteriezustand, die Warnleuchte oder die Hupe dient. Ein weiteres wichtiges Bauteil ist der Servo-Verstärker. Dieser regelt die Antriebs- und Lenkmotoren sowie die Motoren zum Heben und Senken der Gabeln. Durch den Servo-Verstärker wird das Beschleunigen und Bremsen der Motoren ermöglicht. Des Weiteren benötigt ein FTF eine Antriebsregelung, die Statusinformationen über Batteriespannungen, Motortemperatur, Warnungen und Fehler liefert. Die Antriebsregelung wird von der Fahrzeugsteuerung angesteuert und ermöglicht das Fahren und Lenken des FTF sowie das Steuern der Lastaufnahmemittel. Dabei wirkt die Antriebsregelung als Regler zum Überwachen von Geschwindigkeit und Position. Verschiedene Lenk- und Antriebsgeber



Abbildung 10: Sensor für die Personensicherheit

¹²³ Vgl. ten Hompel (2008), S. 271

(Encoder) liefern Werte der Lenkung bzw. des Antriebs an die Fahrzeugsteuerung und an die Sicherheitssensoren. Um eine Störung der Elektronik durch das hochfrequente Rauschen der Elektromotoren zu verhindern, werden Störungsfilter eingebaut. Für die Interaktion des Menschen mit dem FTF wird eine Bedienerkonsole verwendet, die Informationen über den FTF-Status, Fehlermeldungen und Warnungen ausgibt. Über die Bedienerkonsole können auch FTF-Einstellungen oder Betriebsarten eingegeben werden.

Für die Personensicherheit werden Warnleuchten, Notstopptasten, eine Hupe sowie Sensoren am Fahrzeug installiert. Abbildung 10 zeigt einen solchen Sensor. Dieser arbeitet mit zweidimensionalen Warn- und Sicherheitsfeldern, deren Reichweite dynamisch an Geschwindigkeit und Fahrtrichtung angepasst wird. Informationen über die Entfernung georteter Objekte werden an die Fahrzeugsteuerung gemeldet, nach Beseitigung des Hindernisses erfolgt automatisch die Freigabe.

Für die Hinderniserkennung wird in speziellen Anwendungen ein zusätzlicher Sicherheitssensor verbaut. Dieser wird vorne am FTF schräg nach unten zeigend eingebaut und ermittelt Informationen über Hindernisse, beispielsweise in den Fahrweg hereinstehende Objekte, und liefert diese an die Fahrzeugsteuerung. Das Überwachungsfeld wird an die jeweilige Fahrtrichtung angepasst.



Abbildung 11: Sensor zur Hinderniserkennung

Das Beispiel eines fertigen FTF ist in Abbildung 12 abgebildet. Dabei diente der Standardstapler STILL CX 20 (siehe Abbildung 7) als Basisfahrzeug, und durch den Einbau der soeben beschriebenen elektronischen Komponenten ist ein FTF entstanden. Dadurch haben sich neben den Abmessungen auch verschiedene andere technische Daten verändert. Die wesentlichsten Daten des automatisierten STILL CX 20 sowie des Toyota LAE 240, bei dem der Toyota LPE 240 als Basisgerät dient, sind in Tabelle 3 zusammengefasst.



Abbildung 12: STILL CX 20 (FTF)

Technische Daten	[Einheit]	STILL CX 20 (FTF)	Toyota LAE 240 (FTF)
Nenntragfähigkeit	kg	2000	2400
Gesamtlänge	mm	3755	2769
Gabellänge	mm	2150	1200
Breite	mm	860	790
Höhe	mm	2200	2245
Freihub	mm	130	225
Batteriekapazität	Ah	465	600
Batteriespannung	V	24	24
Max. Geschwindigkeit	m/s	1,5	1,7

Tabelle 3: Technische Daten STILL CX 20 (FTF) und Toyota LAE 240 (FTF)

Um die FTF richtig einsetzen zu können, ist ein geeignetes Steuerungssystem unumgänglich. Dieses hat die Schlüsselaufgabe, das FTS in die Umgebung zu integrieren. Außerdem steuert es die FTF, die sich im System befinden. Zu den Aufgaben gehören die Fahrzeugdisposition, die Wahl der Warteposition für nicht beladene Fahrzeuge, die Kommunikation mit den Fahrzeugen, das Ansteuern der Lastübergabestationen, das Batteriemanagement, die Verkehrskontrolle und -lenkung sowie die Kommunikation mit dem Zentralrechner (Host – in der Re-

gel ist das das WMS). Insbesondere der Blockstreckensteuerung kommt eine wichtige Aufgabe zu. Diese dient einerseits der Kollisionsvermeidung zwischen den Fahrzeugen und andererseits der Verkehrslenkung. Dazu wird der gesamte Fahrkurs in Blockabschnitte gegliedert. Mit dieser Unterteilung wird festgelegt, dass ein Fahrzeug nur dann in den nächsten Abschnitt einfahren darf, wenn sich dort kein anderes Fahrzeug mehr befindet.¹²⁴ Die Datenübertragung zwischen den Fahrzeugen und dem WMS kann entweder über Kommunikationsschleifen erfolgen, die an bestimmten Stellen (z.B. parallel zum Leitdraht) im Boden verlegt sind, aber auch mittels Infrarot oder Datenfunk. In modernen Anlagen erfolgt die Datenübertragung fast ausschließlich über WLAN.¹²⁵

3.4 Energiebedarf

Die elektrische Energie sowie deren Markt sind stark von ihren technischen Eigenschaften geprägt. Elektrische Energie lässt sich nicht direkt speichern. Daher ist auch eine Erzeugung auf Lager nicht möglich. Eine Speicherung lässt sich mit Batterien zwar bewerkstelligen, allerdings haben diese eine begrenzte Kapazität. Diese Tatsachen bedingen, dass sich die Kapazität der Erzeugungs- und Verteilungsanlagen an der höchsten zu erwartenden Belastung (Spitzenbelastung) zuzüglich einer notwendigen Reserve zu orientieren hat. Dieser Grundsatz gilt für alle Anlagen der Stromversorgung. Deshalb wird stets eine zeitlich ausgeglichene Belastungsstruktur angestrebt.

Elektrische Energie ist leitungsgebunden, das heißt sie braucht ein eigenes Transportsystem. Die Kapazität dieses Transportsystems muss ebenso für die Spitzenlast einschließlich Reserve ausgelegt sein. Beim Transport treten Leistungsverluste auf.

Ihr Quasimonopol bei der Anwendung zeichnet die elektrische Energie ebenfalls aus. Mittels Energiewandler lässt sich elektrische Energie leicht in alle Nutzenenergien umwandeln. Diese Umwandlung ist im Vergleich zu anderen Rohenergien mit relativ geringem Aufwand möglich, sodass die Elektrizität bei vielen Anwendungen eine monopolartige Schlüsselstellung einnimmt.¹²⁶

Für Flurförderzeuge mit Elektromotoren und Batterien bedeutet dies, dass die Batterien nach ihrer Entladung mittels Ladegeräten wieder aufgeladen werden müssen. Die Ladegeräte beziehen die elektrische Energie aus dem Stromnetz und laden damit die Batterie auf. Danach steht dem Flurförderzeug die in der Batterie gespeicherte Energie, abhängig von der jeweiligen Kapazität, zur Verfügung.

¹²⁴ Vgl. ten Hompel (2008), S. 34 f.

¹²⁵ Vgl. ten Hompel (2007), S. 204 ff.; Ullrich (2011), S. 95 f.

¹²⁶ Vgl. Müller (1998), S. 25 f.

Ein Stapler besteht aus vielen verschiedenen Komponenten, die unterschiedliche Mengen an Energie verbrauchen. Die größten Verbraucher sind Fahr- und Hubmotor, allerdings ist der tatsächliche Energieverbrauch stets von der Last, der individuellen Fahrweise des Fahrers und anderen Einflüssen der Umgebung abhängig. Mehrere Komponenten wie die Motoren, die Axiallüfter oder die Bremse sind zudem nicht ständig in Verwendung, sodass man hinsichtlich des Verbrauchs kaum allgemeingültige Aussagen treffen kann, sondern auf Durchschnittswerte aus Messungen zurückgreifen muss. Die Staplerhersteller lösen dies durch die Angabe des mittleren Energieverbrauchs während eines standardisierten Tests, der im folgenden Kapitel noch näher beschrieben wird. Im Falle des manuell bedienten Staplers STILL CX 20 sind dies 0,99 kWh/h.

Wenn nun ein serienmäßig gefertigter Stapler zu einem Fahrerlosen Transportfahrzeug ausgerüstet werden soll, wird das Basisgerät mit verschiedenen elektronischen Komponenten erweitert. Dadurch erhöht sich aber natürlich die Anzahl jener Bauteile, die für ihren Betrieb mit elektrischer Energie versorgt werden müssen. Folglich steigt der Stromverbrauch des FTF. In folgender Tabelle sind sämtliche stromverbrauchenden Bauteile für den STILL CX 20 aufgelistet.

	Bereich	Komponente	Bemerkung	Verbrauch	[E]
System	FTS Steuerung	Leitsteuerung (PC-Server)		351	W
		Leitsteuerung (PC-Arbeitsplatz)		280	W
		I/O-Gerät	OPC/BIV 3	1	W
		Infrastruktur	WLAN	188	W
Fahrzeug	Motorik	Fahrmotor	max. 3 kW	990	W
		Hubmotor	max. 2,2 kW		
		Lenkmotor			
	Steuerung	Schütz			
		Fahrsteuerung	Frequenzumrichter		
		Lenkungssteuergerät			
	Sonstiges	Steuerkonsole	Deichselkopf		
Axiallüfter		2 Stk.			
Bremse		elektromagnetisch			
Komponenten FTF	FTF Steuerung	Fahrzeugsteuerung	VMC 500	14	W
		Lenk-/Antriebsregler	VMC 20-SDIO	5	W
		Encoder (Drehgeber)	AC 58 CANopen	2,6	W
	Sensorik	Lasernavigation	LS 4	43,2	W
		Sensor SICK	S3000 (2 Stk.)	55	W
		Sensor SICK	S100	8	W
	Display	Display	OPT 100	7	W
	Fahrzeugansteuerung	Fahrzeugansteuerung	ACD	1	W
		Servo Verstärker	FSA II	1,6	W
		Störungsfilter	Mains Filter	1	W

Tabelle 4: Energieverbrauch der Bauteile

Der Stromverbrauch für die Systemsteuerung des FTS wird exemplarisch auf 10 Fahrzeuge umgelegt. In der Regel sind für Systeme mit manuell bedienten Staplern nur ein Staplerleitsystem und die nötige Infrastruktur mit WLAN vorhanden. Für den manuell bedienten Stapler ergibt sich somit ein theoretischer Verbrauch von 1037 W.

Da dieser Stapler mit vielen Bauteilen aufgerüstet wird, um als FTF einsetzbar zu sein, muss der jeweilige Verbrauch dieser Komponenten addiert werden. Damit erhöht sich der theoretische Verbrauch auf 1265 W. Das heißt, aufgrund dieser Komponenten müsste ein FTF um rund 22% mehr Energie verbrauchen als ein manuell bedienter Stapler.

Tendenziell wird dies durch erste Messungen bestätigt. Dabei wurde der Energieverbrauch gemessen, während der manuell bediente Stapler bzw. das FTF eingeschaltet, aber im Stillstand war. Die Fahrzeuge standen also auf einem Platz, waren aber aktiviert, sodass genau jene Komponenten Strom verbrauchten, die immer in Betrieb sind. Dabei wurde durchschnittlich ein Verbrauch von 43 W für den manuell bedienten Stapler sowie 296 W für das FTF gemessen. Dabei wurde ausschließlich der Verbrauch der Fahrzeuge betrachtet, der Verbrauch der Systemsteuerung oder ähnliches sind also nicht enthalten.

Selbst im Falle eines ausgeschalteten FTF beträgt der Verbrauch 124 W. Das bedeutet, dass einige Komponenten andauernd in Betrieb sind und Energie aus der Batterie entnehmen, auch wenn das FTF gar nicht eingeschaltet ist. Der Energieverbrauch eines ausgeschalteten manuell bedienten Staplers beträgt hingegen fast null. Eine entsprechende Abschaltautomatik für FTF würde diesem Umstand Abhilfe schaffen. So wäre ein niedrigerer Verbrauch gewährleistet, wenn das FTF ausgeschaltet ist.

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Verbesserung der Elektronik nach energietechnischen Gesichtspunkten. Würden die elektronischen Bauteile am FTF weniger Strom verbrauchen, würde der Energieverbrauch entsprechend sinken. Erste Schritte in dieser Richtung wurden bereits getan, indem das Gerät für die Lasernavigation erneuert wurde. Dieses braucht anstatt 43,2 W nur noch 24 W. Außerdem wurde für die FTF-Steuerung der so genannte CVC600 entwickelt, der den VMC500 und auch den VMC20-SDIO ersetzt und dabei nur noch fünf W verbraucht statt 19 W. Das sind zwar kleine Schritte, wenn man diesen Weg aber konsequent weitergeht, könnte man erhebliche Einsparungen erreichen.

Im Gegensatz zum höheren Grundverbrauch ist nun aber zu erwarten, dass ein FTF durch die spezielle Steuerung eine gleichmäßigere Fahrweise realisieren kann als ein Stapler mit einem Staplerfahrer. Das heißt die Beschleunigung aus dem Stillstand und das Abbremsen am Zielpunkt bzw. vor Hindernissen geschieht weniger abrupt. Während der Fahrt wird eine

sehr gleichmäßige Geschwindigkeit beibehalten, was bei einem manuell bedienten Stapler ebenfalls nicht der Fall ist. Dadurch ist ein Absinken des Stromverbrauchs beim FTF gegenüber dem manuell bedienten Stapler zu erwarten. Weiters kann eine höhere Lebensdauer durch die Schonung der Fahrzeugkomponenten angenommen werden.

Im Fall des verwendeten STILL CX 20 muss noch erwähnt werden, dass dieser aufgrund der hohen Anforderungen mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet wurde, die nicht zur Standardausführung gehören. Diese werden üblicherweise nur im gemischten Betrieb eingebaut, und nur dann, wenn lange Strecken in Rückwärtsfahrt absolviert werden müssen (z.B. in Versandbahnen). Bei Standardgeräten fallen diese Sensoren teilweise weg, sodass im Normalfall der Energieverbrauch niedriger ist als hier.

Wie sich der Energieverbrauch nun im tatsächlichen Betrieb niederschlägt, kann nur durch geeignete Tests sowie durch Energiemessungen ermittelt werden. Die Vorgangsweise dazu wird im folgenden Kapitel beschrieben. Für diese Energiemessungen gibt es mehrere Ziele: Es sollen sowohl der Energieverbrauch eines manuell bedienten Staplers als auch eines FTF ermittelt und anschließend miteinander verglichen werden. Aus diesen Ergebnissen sollen allgemeine Schlussfolgerungen abgeleitet werden.

Für ein FTF ergibt sich durch die elektronischen Komponenten ein Mehrverbrauch gegenüber einem manuell bedienten Stapler. Allerdings sind durch die gleichmäßigere Fahrweise wiederum Ersparnisse im Energieverbrauch zu erwarten. Ob nun der zusätzliche Verbrauch durch die Automatisierungskomponenten oder die Ersparnis durch die schonende Fahrweise überwiegen oder ob sich dies ausgleicht, gilt es zu klären. Insgesamt läuft dies auf eine grundsätzliche Frage hinaus:

Kann durch die gleichmäßige Fahrweise des FTF der Mehrverbrauch der elektronischen Komponenten wettgemacht werden oder nicht?

4 Rahmenbedingungen für Energiesmessungen

Anhand von Energiesmessungen sollen nun die theoretischen Überlegungen aus dem vorherigen Kapitel überprüft und konkretisiert werden. Dazu werden sowohl bei FTF als auch bei manuell bedienten Staplern der jeweilige Energieverbrauch ermittelt, quantitativ erfasst und dargestellt. Die Methodik hierzu teilt sich in zwei Bereiche: zum einen wird der Energieverbrauch von FTF sowie manuell bedienten Staplern unter standardisierten Bedingungen in einem geeigneten Testaufbau gemessen, um die Ergebnisse vergleichbar zu gestalten. Zum anderen wird der jeweilige Energieverbrauch im laufenden Praxisbetrieb gemessen. Dadurch ist es möglich, die gewonnenen Daten aus dem Testaufbau mit jenen aus dem betrieblichen Alltag zu vergleichen und so zu einem realistischen Ergebnis zu kommen.

Für diese Energiesmessungen wurden möglichst identische Fahrzeuge verwendet, das heißt dass FTF und manuell bedienter Stapler grundsätzlich baugleich sind, allerdings wurde das FTF mit den entsprechenden Komponenten aufgerüstet. Außerdem sind die Fahrzeuge etwa gleich alt und haben eine ähnliche Anzahl von Betriebsstunden absolviert.¹²⁷

4.1 Testaufbau

In der Richtlinie 2198 des Vereins Deutscher Ingenieure werden Typenblätter für Flurförderzeuge geregelt. Unter anderem wird der so genannte VDI-Zyklus beschrieben, wobei die Messung von Energieverbrauch von Flurförderzeugen unter standardisierten Bedingungen erfolgt. Die Messung nach diesem Zyklus hat sich bei allen Herstellern durchgesetzt. Daher sind entsprechende Werte für jedes Flurförderzeug in der Regel in den jeweiligen Typenblättern, angegeben als „Energieverbrauch nach VDI-Zyklus“ in der Einheit kWh/h, zu finden.

Für alle Stapler gilt, dass sie genau eine Stunde mit der Nennlast (max. Tragfähigkeit) ohne Pause fahren müssen. Es wird zwischen zwei Punkten A und B, welche 30 Meter voneinander entfernt sind, hin und her gefahren und somit ein Arbeitsspiel simuliert, ohne die Last abzusetzen. Die Fahrgeschwindigkeit ist so anzupassen, dass eine Spielzahl von 60 Spielen pro Stunde eingehalten werden kann. Ein Spiel entspricht jeweils einer Hin- und Rückfahrt.

Der Stapler hat dabei in Vorwärtsfahrt zu fahren, Rückwärtsfahrten gibt es lediglich an den Punkten A und B, wo um 90° eingelenkt und bis zur Lasttiefe (entspricht dem zweifachen

¹²⁷ FTF (Baujahr 2008): rund 1600 Betriebsstunden bzw. manuell bedienter Stapler (Baujahr 2009): rund 1400 Betriebsstunden

Lastschwerpunktstand c^{128}) gefahren wird. In Abbildung 13 ist der Fahrweg schematisch dargestellt.

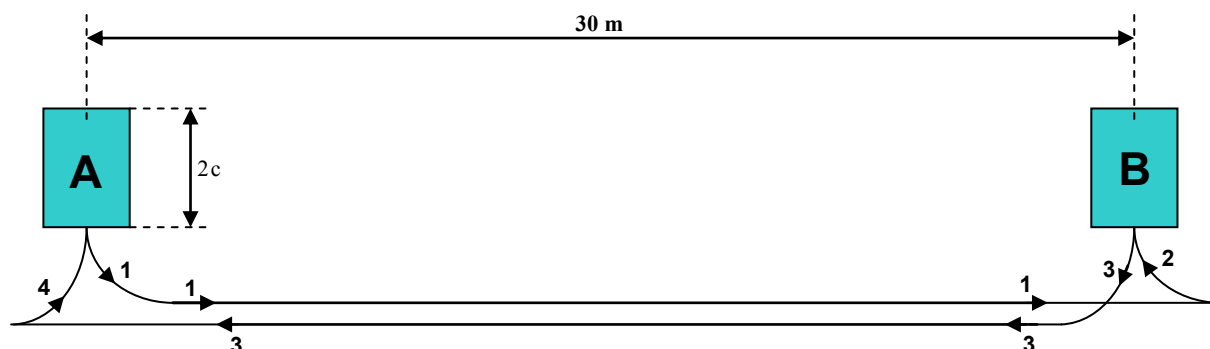


Abbildung 13: VDI-Zyklus¹²⁹

Die Vorgabe, wonach der Zyklus genau eine Stunde dauern muss, bleibt jedoch nur für den manuell bedienten Stapler bestehen. Für das FTF werden Geschwindigkeit und Beschleunigung angepasst, sodass die Dauer variiert und der Zyklus im Allgemeinen länger als eine Stunde dauert. Für jede dieser Zeiten soll der Test (also 60 Arbeitsspiele) durchgeführt werden. Der Grund dafür liegt darin, dass aufgrund der Sicherheitsauflagen die Geschwindigkeit von FTF reduziert werden muss. Des Weiteren hat das FTF im betrieblichen Alltag ebenfalls mehr Zeit zur Verfügung als ein manueller Stapler, dafür fährt es jedoch kontinuierlich und ohne Pausen.

Folglich erbringen FTF und manuell bedienter Stapler die gleiche Transportarbeit (den Transport von Paletten), nur benötigt der manuell bediente Stapler weniger Zeit dafür. Man kann also die Energieeffizienz in Abhängigkeit von der benötigten Zeit messen. Um auch eine Aussage bezüglich der Abhängigkeit vom aufgeladenen Gewicht zu erhalten, wird der Test, bei dem ein Ladungsgewicht von 2000 Kilogramm vorgegeben ist, zusätzlich mit 600 Kilogramm durchgeführt. Die Last von 600 Kilogramm wurde deshalb gewählt, da die Transporte im Zentrallager jenes großen österreichischen Lebensmittelhändlers, in dem die Tests durchgeführt wurden, durchschnittlich dieses Gewicht haben. Dabei werden nämlich drei Rollcontainer zu je durchschnittlich 200 Kilogramm transportiert.

Dieser Test wurde mit einem FTF in Leoben und mit einem manuell bedienten Stapler im Zentrallager dieses österreichischen Lebensmittelhändlers durchgeführt. Der exakte Fahrweg der beiden Fahrzeuge ist in folgender Abbildung dargestellt.

¹²⁸ gemeint ist der horizontale Abstand zwischen Gabelrücken und Schwerpunkt der Last, welche als homogen angenommen wird

¹²⁹ in Anlehnung an VDI 2198 (2002), S. 10

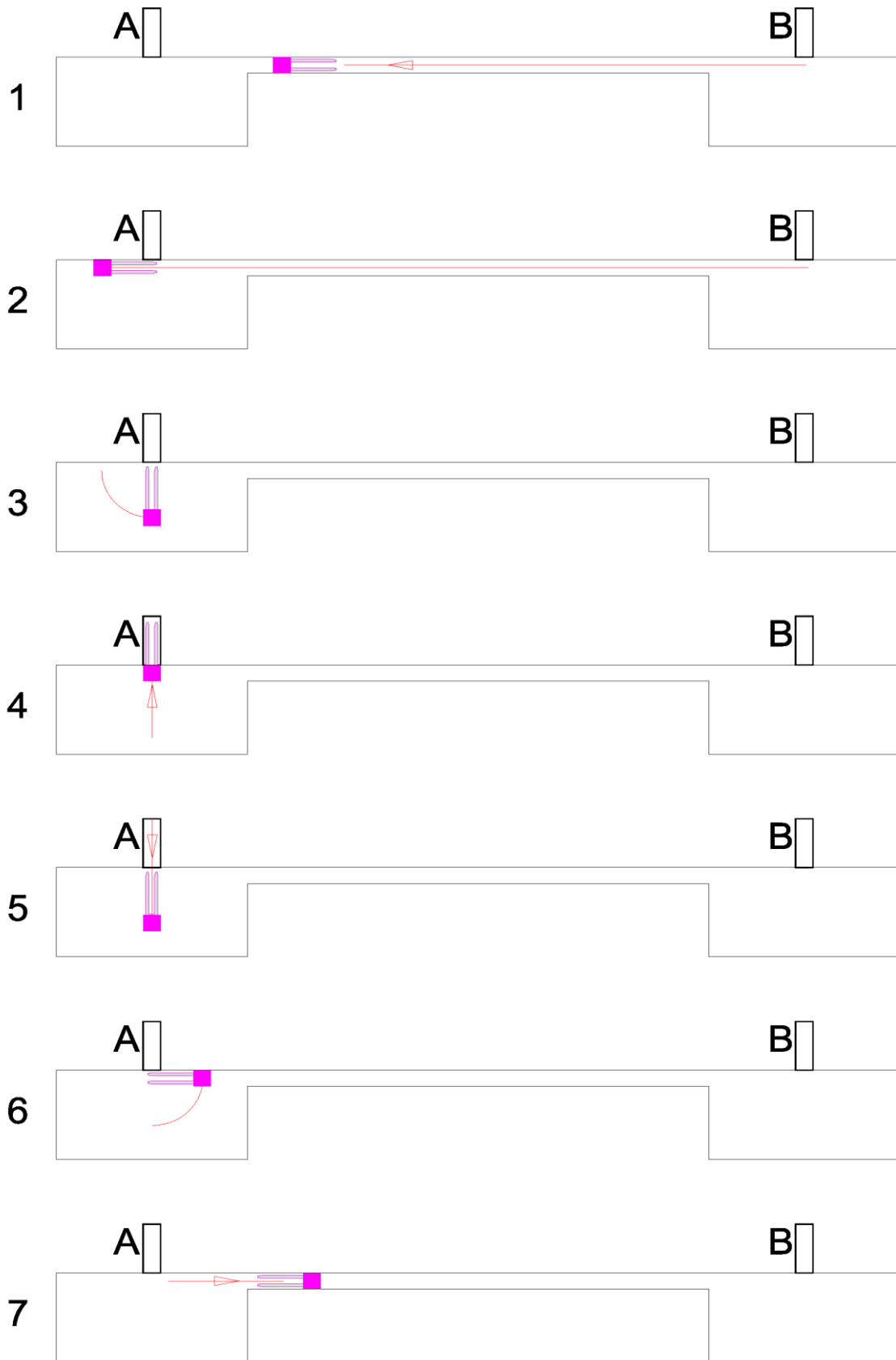


Abbildung 14: Fahrweg der Fahrzeuge beim VDI-Zyklus

4.2 Praxistest

Der Energieverbrauch für innerbetriebliche Transporte im betrieblichen Alltag wird untersucht. Dabei wird der Energieverbrauch von einem FTF und einem manuell bedienten Stapler gemessen. Die Tests werden mehrere Wochen lang durchgeführt und dann ausgewertet. An reiner Betriebszeit stehen insgesamt 13 Stunden für das FTF und rund 60 Stunden für den manuell bedienten Stapler zur Auswertung zur Verfügung. Schließlich wird der Energieverbrauch pro Stunde in kWh/h ermittelt. Aber auch der gesamte Energieverbrauch pro Transportauftrag wird berechnet. Die Ergebnisse werden mit den Werten aus dem Testaufbau verglichen, um allgemeine Schlussfolgerungen ableiten zu können.

Für sämtliche Tests gilt die Vorgabe, dass die Fahrbahn eben und trocken sein muss. Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung des FTF können festgelegt werden, während diese Faktoren beim manuell bedienten Stapler vom Fahrer abhängig sind.

Bei elektrischem Antrieb ist bei der Ermittlung des Energieverbrauchs die elektrische Arbeit W_{el} in kWh zu erfassen. Wenn dazu eine Messung der Strommenge (Ah) erfolgt, ist zur Berechnung des Energieverbrauchs die zutreffende mittlere Batteriespannung gemäß der Batterienorm einzusetzen,¹³⁰ gemäß der Formel $W_{el} [\text{kWh}] = U [\text{V}] * I [\text{A}] * t [\text{h}] / 1000$. Dividiert durch die Dauer der Messung ergibt sich der Energieverbrauch in der Einheit kWh/h.

Der Energieverbrauch wird mittels eines eigens entwickelten Messgeräts der Firma Fronius gemessen. Dieses kann ohne spezielles Werkzeug direkt an der Batterie montiert werden und ist für alle Batteriespannungen geeignet. Nach Inbetriebnahme wird eine Strommessung durch Magnetfeldsonden (Hall-Sensoren) durchgeführt. Damit erfasst und speichert das Messgerät wichtige Betriebsdaten des Zusammenspiels zwischen Stapler und Antriebsbatterie.



Abbildung 15: Messgerät

¹³⁰ Vgl. VDI 2198 (2002), S. 14

Die Datenübertragung über GSM ermöglicht die Kommunikation mit dem Fahrzeug oder mit einem Computer. Ein Temperaturfühler komplettiert die Ausstattung. Abbildung 15 zeigt dieses Messgerät, das während der Energiemessungen am Fahrzeug angebracht war. Die Antenne ganz oben ermöglicht den Datenaustausch und die Steuerung des Messgeräts via GSM. Im Hintergrund sind auch zwei Reflektoren für die Lasernavigation erkennbar.

Nach Abschluss der Tests und der Energiemessungen stand eine Vielzahl an Daten zur Verfügung. Im folgenden Kapitel werden diese ausgewertet, und es wird versucht, diese in geeigneter Form darzustellen.

5 Testergebnisse

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen der rund dreimonatigen Energiemessungen und deren Interpretation. Dabei gliedern sich die folgenden Überlegungen in die bekannten zwei Bereiche, nämlich den standardisierten Testaufbau sowie den Praxistest.

5.1 Testaufbau

Wie bereits erwähnt können Beschleunigung und maximale Geschwindigkeit des FTF über die Fahrsteuereinheit eingestellt werden. Durch Anpassung dieser Parameter kann die Dauer für das Abfahren des VDI-Zyklus dermaßen variiert werden, sodass eine Verteilung über die Zeit entsteht. Dabei werden jeweils von der schnellstmöglichen Einstellung ausgehend beide Parameter verringert. Diese Vorgangsweise wird für die Last von 600 kg sowie 2000 kg angewandt. Dies dient dazu, die energietechnisch günstigsten Einstellungen zu finden. In Tabelle 5 werden diese Einstellungen aufgelistet.

Last	max. Geschwindigkeit	Beschleunigung	Dauer
[kg]	[mm/s]	[mm/s²]	[min]
600	1500	800	105
600	1300	600	113
600	1200	500	122
600	1100	450	129
600	1050	400	138
2000	1500	800	127
2000	1400	450	132
2000	1300	400	136

Tabelle 5: Einstellungen für das FTF beim VDI-Zyklus

Dabei fällt sofort auf, dass durch die unterschiedliche Last auch bei gleichen Einstellungen die Testdauer sehr stark variiert. Für die schnellstmögliche Einstellung dauerte der Test mit 600 kg 105 Minuten, mit 2000 kg jedoch 127 Minuten. Dies lässt bereits vermuten, dass die Performance eines FTF auch vom transportierten Gewicht abhängt.

Mit dem manuell bedienten Stapler wurde jeweils ein Testlauf mit 600 kg sowie mit 2000 kg absolviert. Die Dauer wurde nicht variiert, sondern betrug jeweils 60 Minuten, wie im VDI-Zyklus vorgegeben.

Abbildung 16 zeigt das FTF beim Abfahren eines Testlaufs in Leoben. Das notwendige Gewicht wurde mit Paletten und Bierkisten in klassischer Modulbauweise auf den Gabeln des Fahrzeugs aufgebaut. Das Gewicht wurde vor den Tests noch mit einer Palettenwaage überprüft.



Abbildung 16: Das FTF während eines Testlaufs

5.1.1 Testläufe mit 600 kg

Die folgende Grafik zeigt den Verlauf des Energieverbrauchs für ein FTF während des VDI-Zyklus mit der Dauer von 113 Minuten. Dabei wurden die Gabeln des FTF mit einer Last von 600 kg auf einer Euro-Palette beschwert.

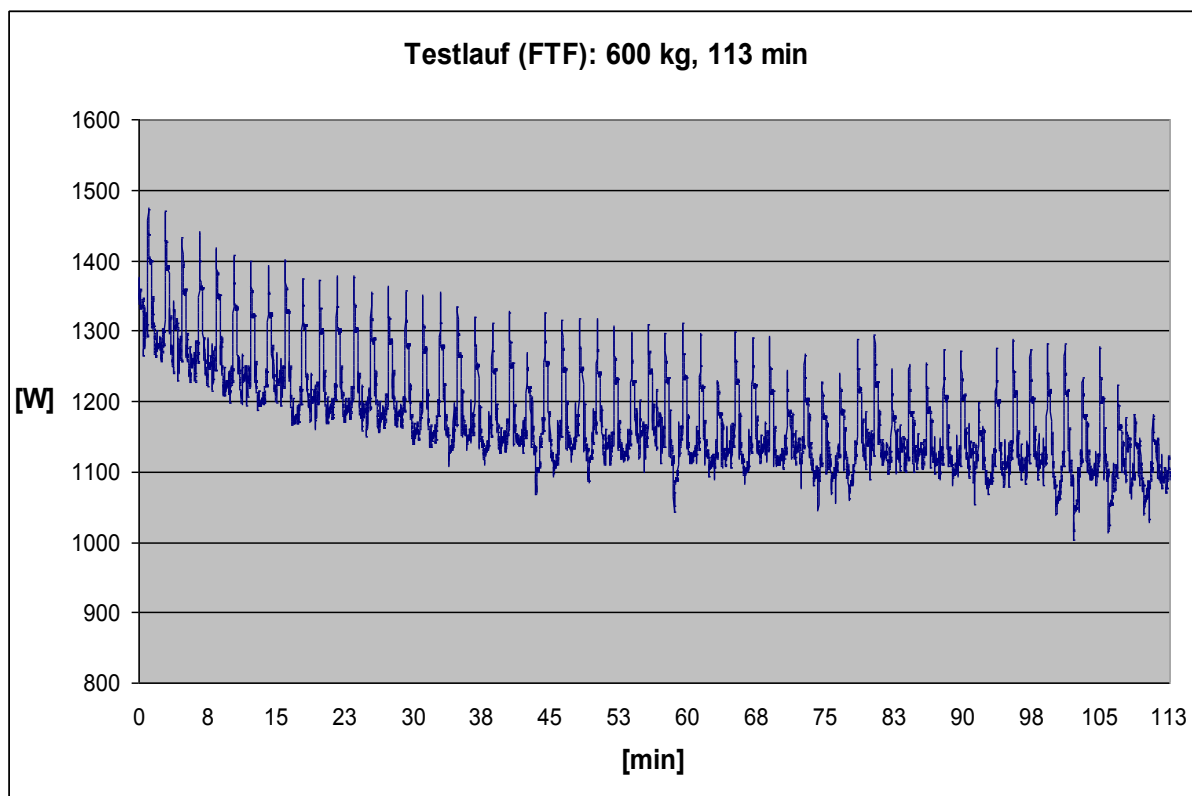


Abbildung 17: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 113 min)

Dieser Verlauf ist typisch für alle Testläufe. Qualitativ zeigen nämlich alle Tests sehr ähnliche Graphen. Auffällig ist zum einen, dass der Verlauf sehr regelmäßig ist. Das heißt man kann jedes einzelne der 60 Arbeitsspiele eindeutig erkennen und die Schwankungsbreite ist eher gering. Außerdem fällt auf, dass der Energieverbrauch am Anfang am höchsten ist, um danach abzunehmen und sich auf einem bestimmten Level zu stabilisieren. Dies kann mit verschiedenen Einschaltverlusten und den niedrigen Temperaturen (rund 3° C) während der Tests im Dezember 2010 erklärt werden, sodass das Fahrzeug erst nach dem „Warmlaufen“ eine geeignete Betriebstemperatur erreicht. Erst nach Erreichen dieser Betriebstemperatur kann das FTF mit konstantem und auch verhältnismäßig niedrigem Energieverbrauch fahren. Für den manuell bedienten Stapler ergibt sich zunächst ein anderes Bild. Durch die menschliche Steuerung ist der Verlauf des Energieverbrauchs naturgemäß unregelmäßiger. Trotzdem zeigt sich auch hier die Tendenz, dass zu Beginn des Tests der Energieverbrauch relativ hoch ist. Danach nimmt er ebenfalls ab, auch wenn dies in geringerem Ausmaß passiert und es aufgrund der Unregelmäßigkeiten nicht so leicht zu erkennen ist. Abbildung 18 zeigt diesen Sachverhalt.

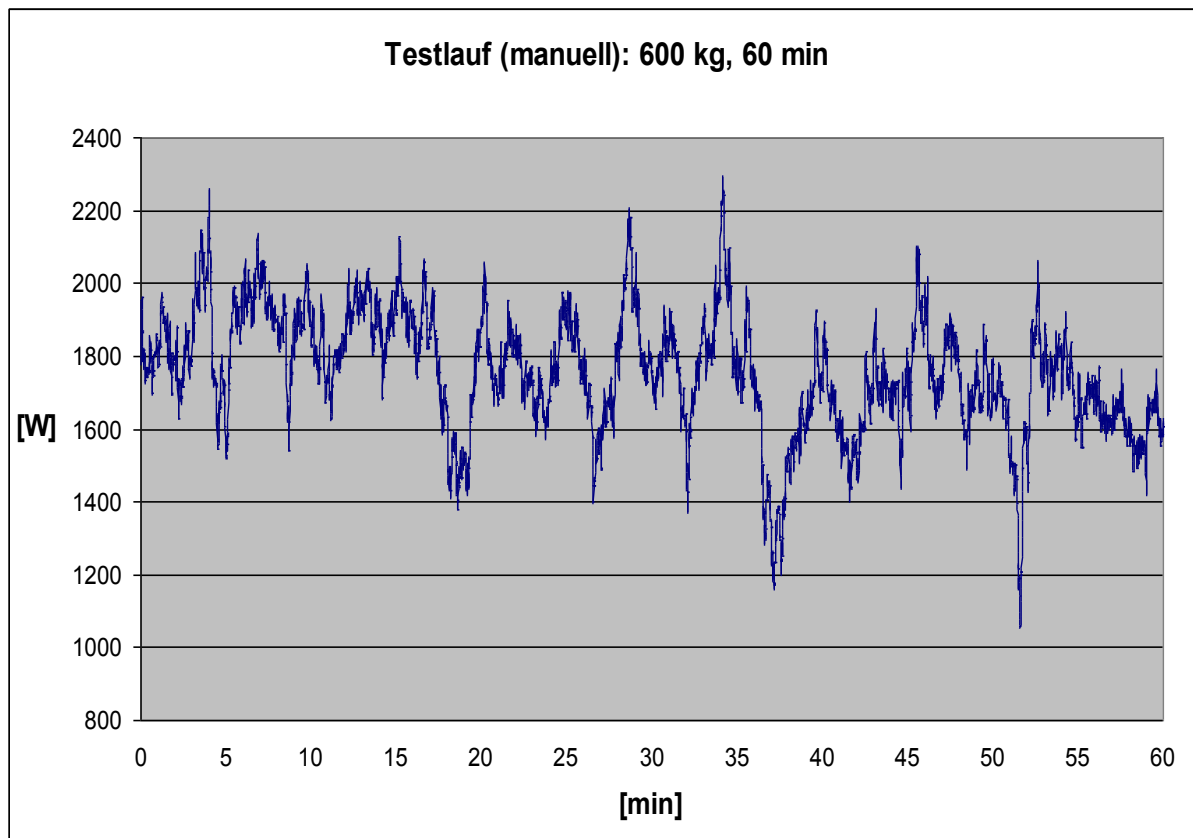


Abbildung 18: Testlauf des manuell bedienten Staplers (Last: 600 kg, Dauer: 60 min)

Wenn wir jetzt den Energieverbrauch von FTF und manuell bedientem Stapler vergleichen, wird ersichtlich, dass der Verbrauch des manuell bedienten Staplers um einiges höher ist. Allerdings benötigt das FTF eine erheblich längere Zeitspanne, um den VDI-Zyklus zu bewältigen. In folgender Abbildung sind der Testlauf des manuell bedienten Staplers sowie sämtliche Testläufe des FTF, die mit 600 kg durchgeführt wurden, zu sehen. Zur besseren Übersicht sind die Verläufe unter Verwendung eines gleitenden Mittelwerts dargestellt.

Auffällig ist dabei, dass der Energieverbrauch sinkt, je länger der VDI-Zyklus dauerte, allerdings nur vom Beginn bis zum Test mit 122 min. Danach steigt auch der durchschnittliche Energieverbrauch wieder. Daraus kann geschlossen werden, dass eine übermäßig langsame Fahrweise den durchschnittlichen Energieverbrauch wieder steigen lässt. Es gibt also für die Fahreinstellungen eines FTF einen optimalen Bereich, in dem der Energieverbrauch minimiert werden kann.

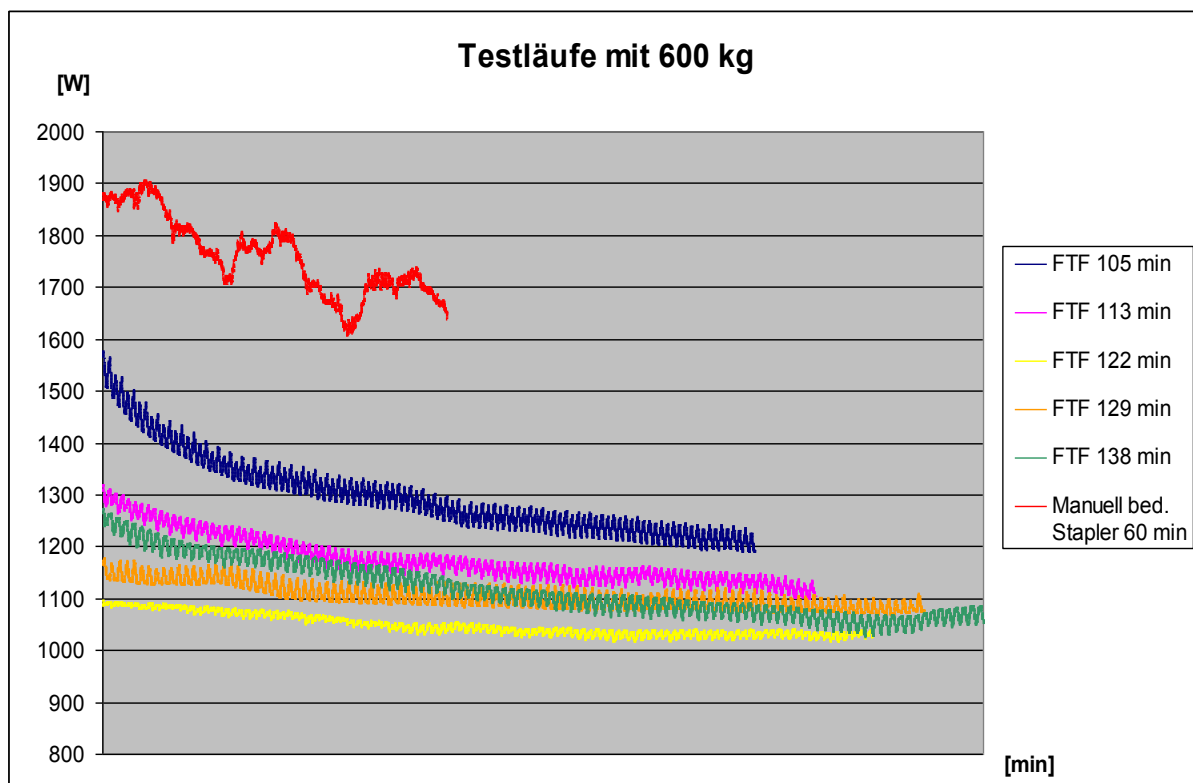


Abbildung 19: Alle Testläufe mit 600 kg

Obenstehende Grafik bestätigt, dass ein manuell bedienter Stapler einen weitaus höheren Energieverbrauch aufweist als ein FTF. Ein FTF benötigt aber, abhängig von den Fahreinstellungen, eine längere Zeit für die Erbringung der mit dem VDI-Zyklus verbundenen Arbeit. Folglich wirkt sich diese längere Fahrzeit negativ auf den Gesamtenergieverbrauch aus. Was das für das Endergebnis bedeutet, wird im Kapitel 5.1.3 geklärt.

Alle diese Tests sind unter „idealen“ Bedingungen abgelaufen, das heißt für die Dauer des Tests war das jeweilige Fahrzeug kontinuierlich und gleichmäßig in Betrieb, es gab keine Fahrpausen. Die Auswirkungen einer Pause beim FTF wurden ebenfalls getestet und sind in nachfolgender Abbildung dargestellt. Dabei zeigt sich wieder der übliche Verlauf: Nach anfänglich hohem Verbrauch sinkt dieser allmählich ab und stabilisiert sich. Dann beginnt aber die Fahrpause, und der Verbrauch sinkt auf rund 260 W, wie das schon vorher im Kapitel 3.4 angedeutet wurde. Nach Ende der Pause ist nun aber der Energieverbrauch wieder auf dem anfänglichen Niveau. Daher muss die Phase des „Warmlaufens“ erneut durchlaufen werden, was den Energieverbrauch erhöht. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, einen möglichst gleichmäßigen und störungsfreien Betrieb von FTF sicherzustellen.

Für den Betrieb von manuell bedienten Staplern sind Pausen ein notwendiger Bestandteil. Die Auswirkungen auf den Energieverbrauch werden im Praxistest untersucht.

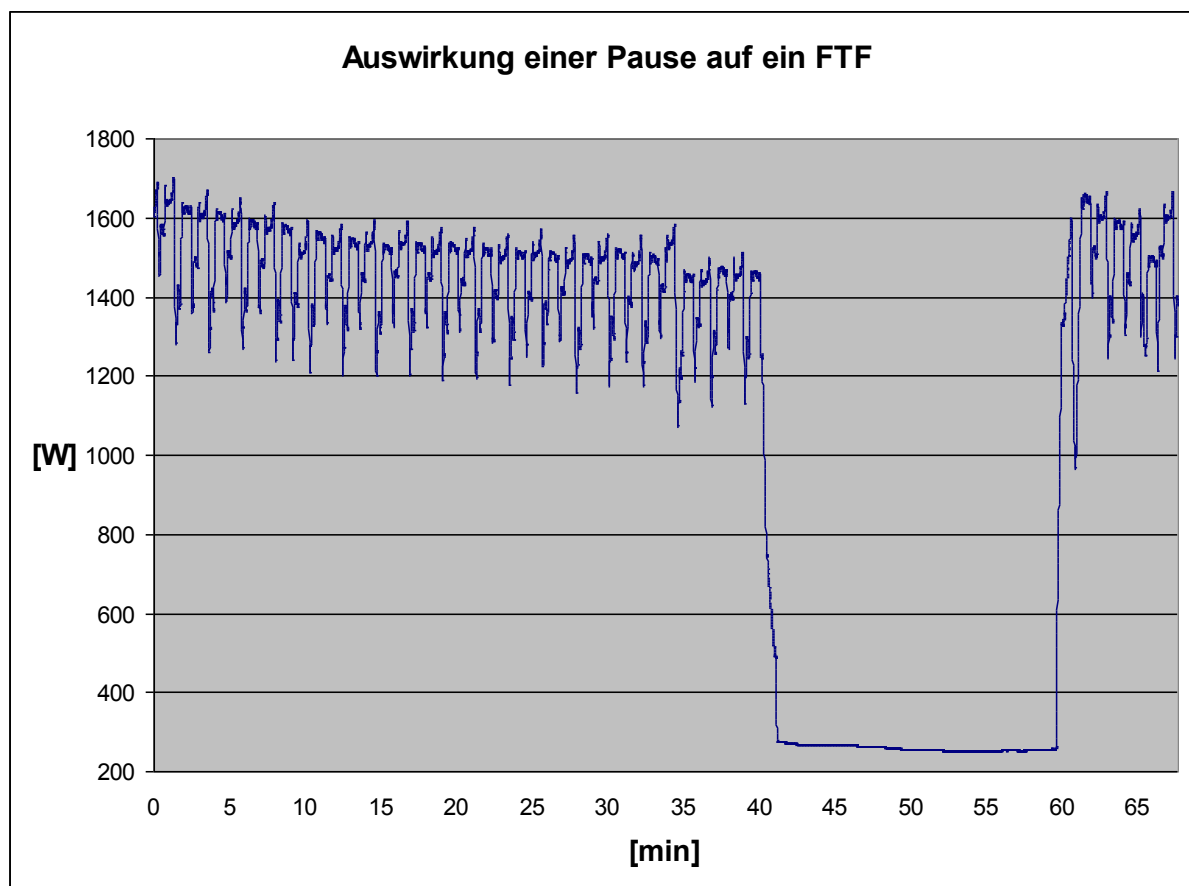


Abbildung 20: Auswirkung einer Fahrpause auf ein FTF

Nachdem die Testläufe mit 600 kg ausführlich besprochen wurden, folgt eine Darstellung der Testläufe, die mit 2000 kg durchgeführt wurden. Alle anderen Testbedingungen sind gleich geblieben.

5.1.2 Testläufe mit 2000 kg

Ein FTF, dessen Gabeln mit einer Last von 2000 Kilogramm beschwert sind, benötigt für das Abfahren des VDI-Zyklus zumindest 127 Minuten. In den folgenden Abbildungen zeigt sich der bereits von den Tests mit 600 kg bekannte typische Verlauf. Allerdings verschiebt sich jetzt der gesamte Graph nach oben, da durch die schwerere Last mehr Energie verbraucht wird, insbesondere beim Anfahren aus dem Stillstand. In Abbildung 21 ist der Energieverbrauch des FTF beim VDI-Zyklus dargestellt.

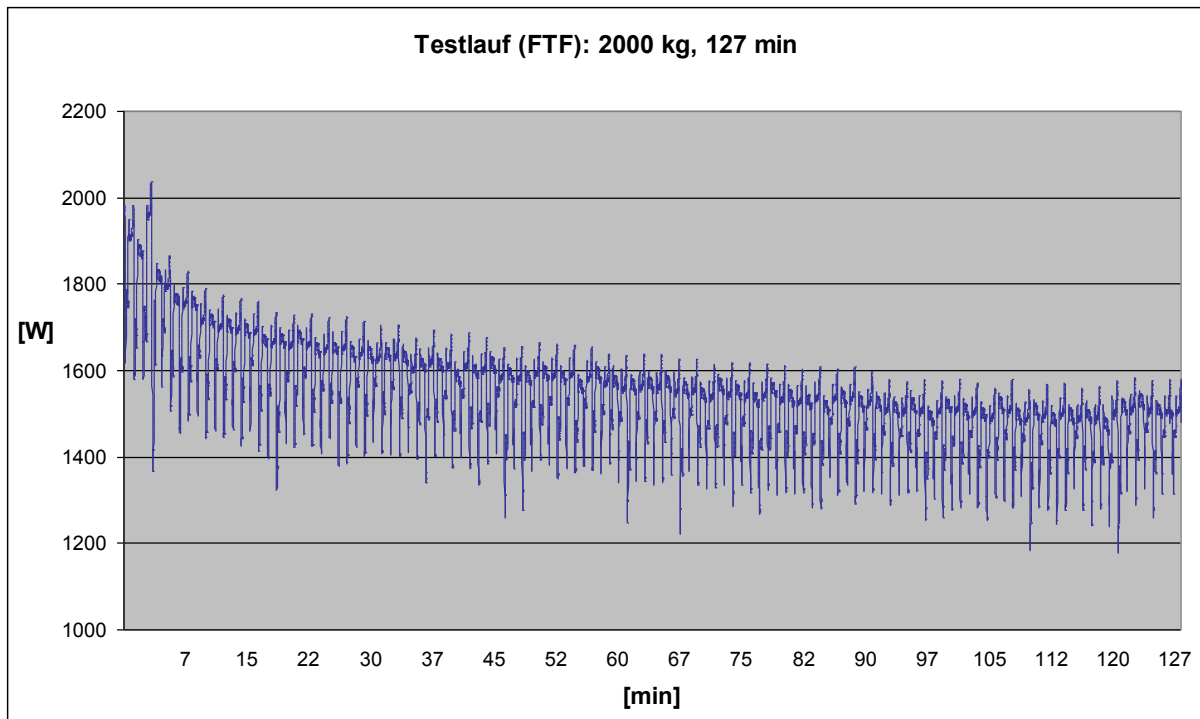


Abbildung 21: Testlauf des FTF (Last: 2000 kg, Dauer: 127 min)

Dies gilt auch für den Test mit dem manuell bedienten Stapler. Auch hier wird durch das höhere Gewicht mehr Energie verbraucht, wie Abbildung 22 zeigt.

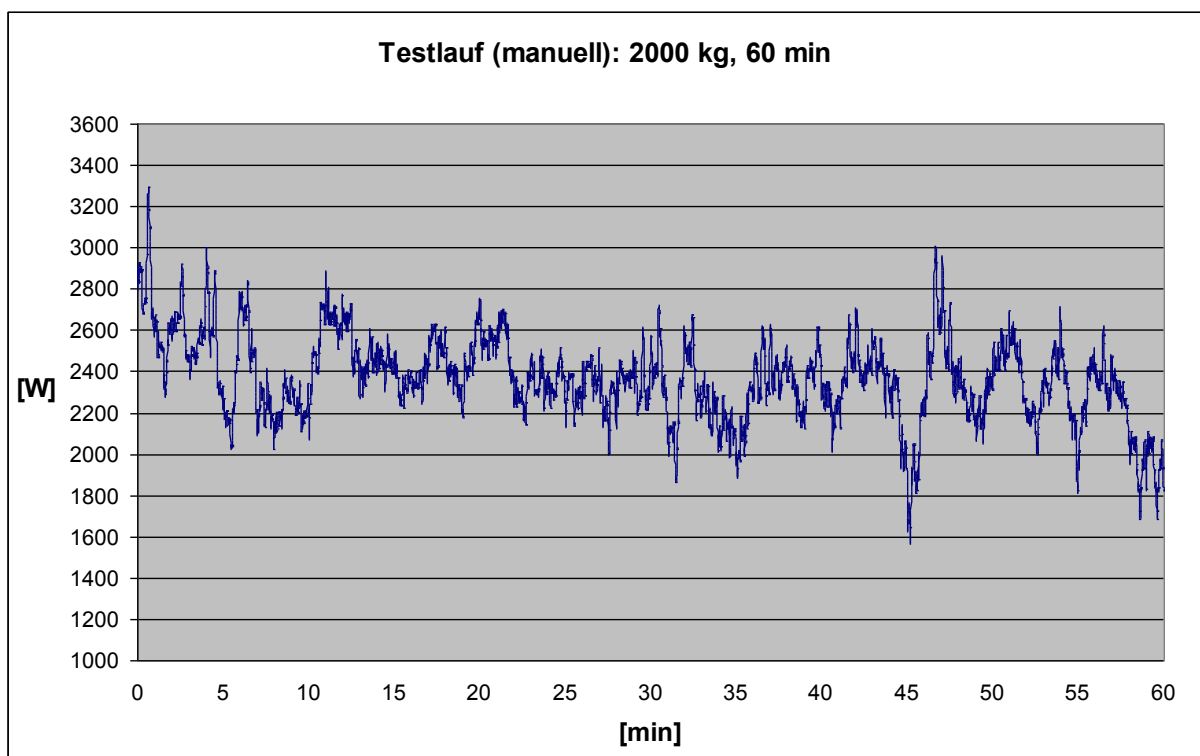


Abbildung 22: Testlauf des manuell bedienten Staplers (Last: 2000 kg, Dauer: 60 min)

Für einen genaueren Vergleich werden wieder alle Testläufe des FTF sowie der Testlauf mit dem manuell bedienten Stapler, die jeweils mit 2000 kg durchgeführt wurden, in einer Abbildung zusammengefasst. Zur besseren Übersicht werden die Verläufe durch einen gleitenden Mittelwert dargestellt.

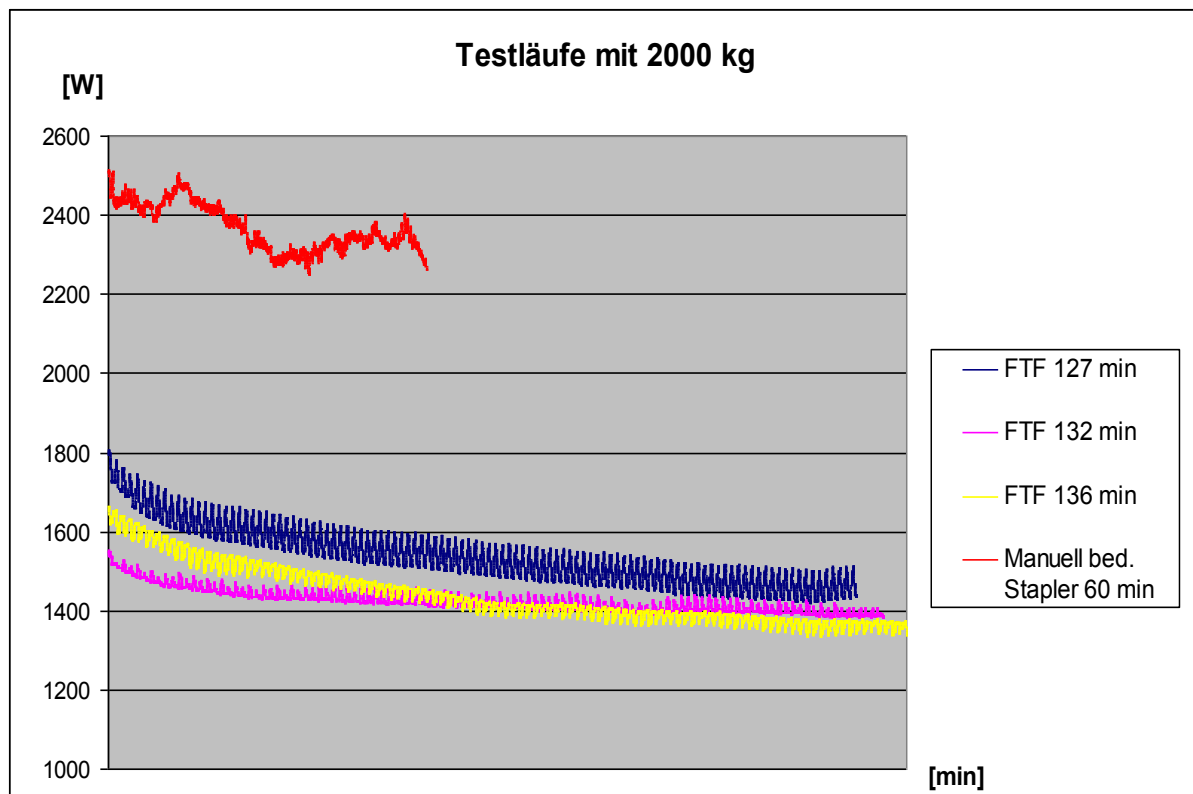


Abbildung 23: Alle Testläufe mit 2000 kg

Hier ist der Unterschied zwischen dem manuell bedienten Stapler und den verschiedenen Testläufen des FTF noch größer als bei den Tests mit 600 kg. Allerdings erhöht sich die Fahrzeit des FTF ebenfalls. Was das für den durchschnittlichen Energieverbrauch bzw. den Gesamtenergieverbrauch bedeutet, soll im nun folgenden Kapitel geklärt werden.

5.1.3 Vergleich

Um die Ergebnisse dieser Testläufe untersuchen zu können, reicht es nicht, nur den durchschnittlichen Energieverbrauch in der Einheit Kilowattstunde pro Stunde (kWh/h) bzw. Watt (W) zu betrachten. Es muss auch die während des Testlaufs insgesamt verbrauchte Energie in der Einheit Wattstunde (Wh) berücksichtigt werden. Das ist deshalb notwendig, da an-

sonsten durch die unterschiedliche Dauer der Testläufe eine allgemeine Aussage kaum möglich wäre. Die folgende Abbildung zeigt nun den durchschnittlichen Energieverbrauch.

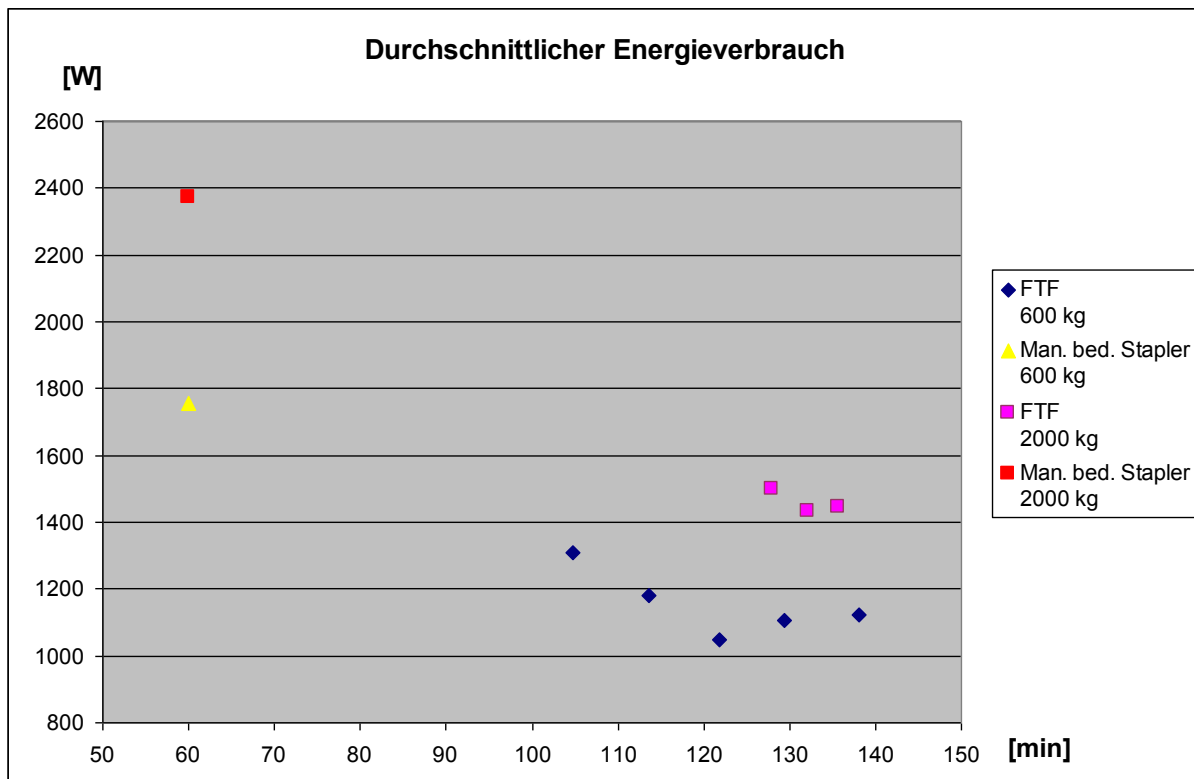


Abbildung 24: Durchschnittlicher Energieverbrauch für sämtliche Testläufe

Zum einen zeigt sich hier, dass durch eine höhere Last auch der Energieverbrauch beim Transport steigt. Das ist natürlich wenig überraschend.

Interessant ist allerdings, dass es für die Fahreinstellungen beim FTF ein Optimum zu geben scheint, bei dem sich das FTF mit dem niedrigsten Energieverbrauch bewegen kann. Dieses liegt bei etwa 122 Minuten für die Tests mit 600 kg und bei rund 132 Minuten für die Tests mit 2000 kg. Das bedeutet, dass man durch eine gleichmäßige, langsamere Fahrweise durchschnittlich weniger Energie verbraucht. Dem sind aber Grenzen gesetzt! Durch übermäßig langsame Fahrweise steigt nämlich der Energieverbrauch wieder. So liegt die optimale Fahreinstellung für den automatisierten STILL CX 20 zwischen 1200 und 1400 mm/s für die maximale Geschwindigkeit und zwischen 450 und 500 mm/s² für die Beschleunigung. Die genauen Einstellungen hängen auch von der transportierten Last ab und sind für FTF anderer Bauart individuell zu ermitteln.

Weiters kann man festhalten, dass bei 600 kg das FTF mit einem Durchschnittsverbrauch von 1050 W gegenüber dem manuell bedienten Stapler mit 1755 W einen deutlichen Vorteil hat. Hier verbraucht der manuell bediente Stapler rund 67% mehr Energie. Bei 2000 kg ist

der Unterschied etwa gleich groß: ein manuell bedienter Stapler verbraucht mit 2370 Wh um 65% mehr Energie als das FTF mit 1435 Wh. Dass diese Daten aber nur die halbe Wahrheit aussagen, zeigt uns die Abbildung 25. Diese berücksichtigt nämlich nicht nur den durchschnittlichen Energieverbrauch, sondern auch den Umstand, dass ein FTF durch die langsamere Fahrweise längere Zeit fahren muss und daher der Energieverbrauch auch länger andauert. Es wird daher jener Energieverbrauch dargestellt, der für die Absolvierung des gesamten VDI-Zyklus aufgewendet werden muss.

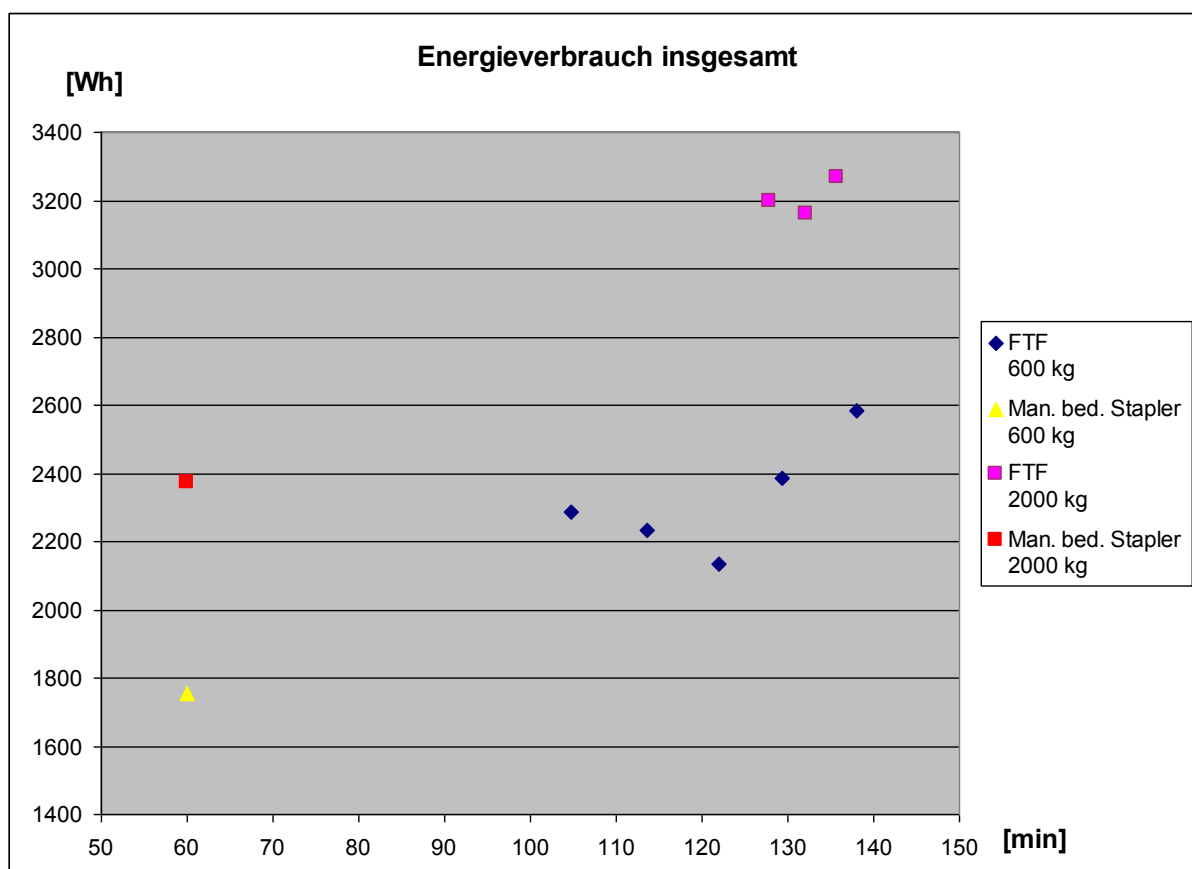


Abbildung 25: Gesamtenergieverbrauch für sämtliche Testläufe

Vorher hat man gesehen, dass im Durchschnitt ein FTF weniger Energie verbraucht als ein manuell bedienter Stapler. Jetzt zeigt sich hier ganz deutlich, dass durch die niedrigere Geschwindigkeit eine geringere Umschlagsleistung erzielt wird. Dadurch erhöht sich die Zeit, die für den VDI-Zyklus benötigt wird. Für die Erbringung einer bestimmten Arbeitsmenge, in diesem Fall für den Transport von Paletten, verbraucht der manuell bediente Stapler insgesamt weniger Energie. Konkret sind das 2132 Wh beim FTF und 1755 Wh beim manuell bedienten Stapler bei den Tests mit 600 kg sowie 3155 Wh beim FTF und 2370 Wh beim ma-

nuell bedienten Stapler für die Tests mit 2000 kg. Damit verbrauchte das FTF um 21% bzw. 33% mehr an Energie als der manuell bediente Stapler.

Zusammenfassend kann man sagen, dass ein manuell bedienter Stapler einen hohen Energieverbrauch in einer kurzen Zeitspanne aufweist. Das FTF dagegen verbraucht weniger Energie, kann aber leistungsmäßig nicht mit einem manuell bedienten Stapler mithalten.

5.2 Praxistest

Der Praxistest dient zur Untersuchung des Energieverbrauchs von FTF und manuell bedienten Staplern bei innerbetrieblichen Transporten. Er wurde im Distributionszentrum eines großen österreichischen Lebensmittelkonzerns im Zeitraum von Jänner bis März 2011 durchgeführt. Dabei werden bei jedem Transportauftrag drei Rollcontainer transportiert. Deren Gewicht ist naturgemäß unterschiedlich, im Durchschnitt beträgt es aber 200 kg, sodass für einen durchschnittlichen Auftrag rund 600 kg angenommen werden können. Der durchschnittliche Transportweg kann aufgrund der betrieblichen Gegebenheiten als für alle Fahrzeuge gleich angenommen werden. Grundsätzlich weist das Warehouse Management System den FTF sowie den manuell bedienten Staplern gleichwertige Aufträge zu, sodass man sagen kann, dass Transportgewicht und Transportweg im Durchschnitt gleich sind.

Insgesamt werden im Zuge dieses Praxistests rund 13 Stunden für das FTF und rund 60 Stunden für den manuell bedienten Stapler untersucht. Für die Auswertung gibt es zwei wesentliche Kennzahlen: den Energieverbrauch pro Stunde in kWh/h bzw. W und den gesamten Energieverbrauch pro ausgeführtem Transportauftrag in Wh/Auftrag. Zusätzlich wird noch die Umschlagsleistung, also die erfüllten Aufträge pro Stunde, angegeben.

Abbildung 26 zeigt den Verlauf für den Energieverbrauch des FTF im betrieblichen Alltag. Dabei wird der Energieverbrauch blau dargestellt. Zusätzlich wird dieser zur besseren Übersicht geglättet und in oranger Farbe hinzugefügt. Dieselbe Darstellungsweise gilt für den Praxistest mit dem manuell bedienten Stapler in Abbildung 27.

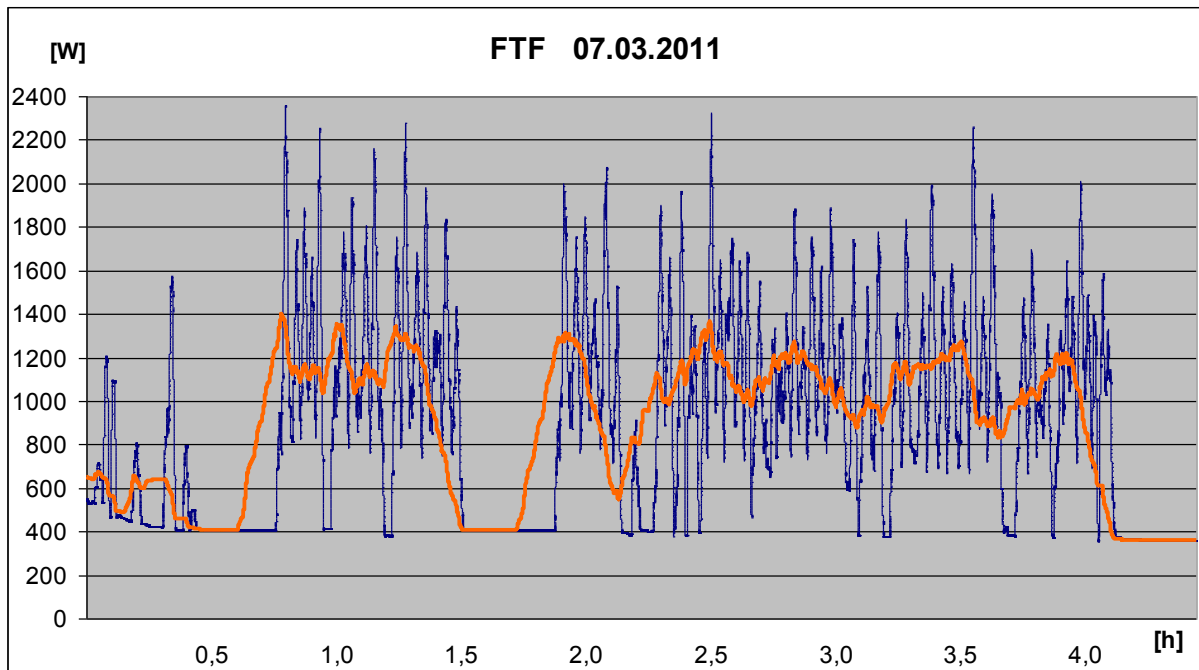


Abbildung 26: Praxistest für das FTF

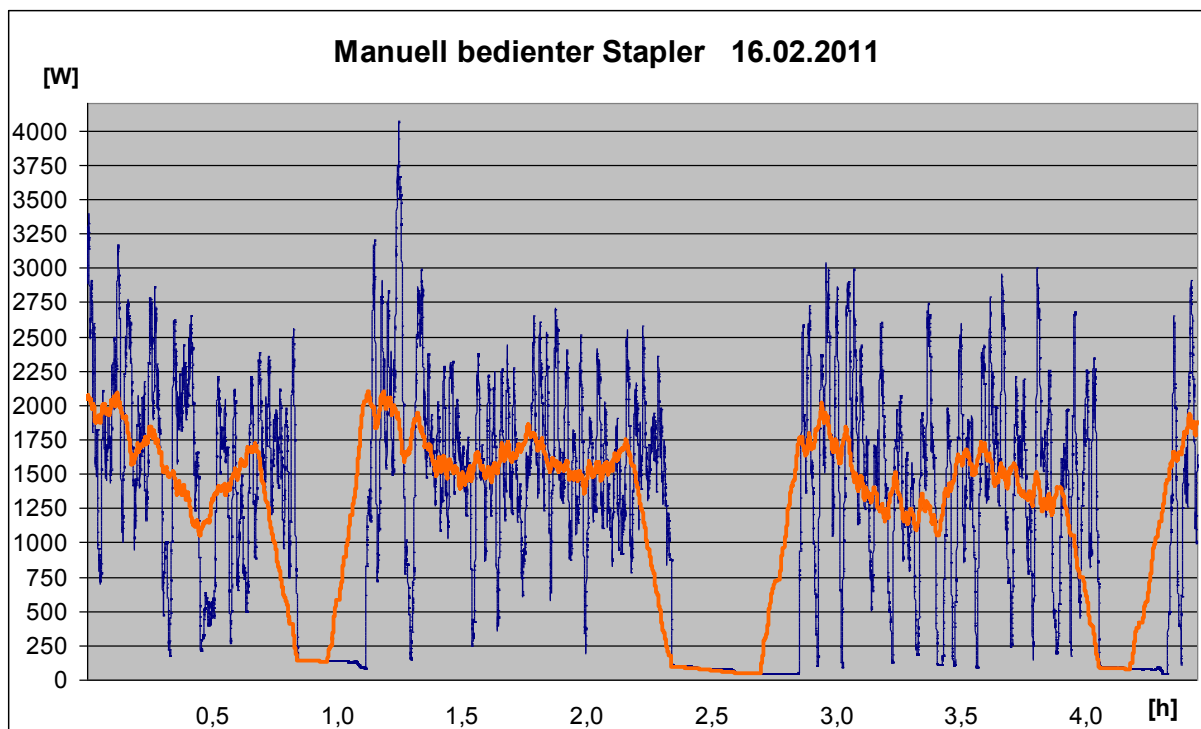


Abbildung 27: Praxistest für den manuell bedienten Stapler

Beim Vergleich der beiden Graphen zeigt sich, dass der Verlauf des Energieverbrauchs sich gar nicht so stark unterscheidet. Lediglich die Fahrpausen geben den Graphen ein verschiedenes Aussehen, der tatsächlich maßgebliche Bereich sieht aber ähnlich aus. Dabei bewegt

sich der geglättete Energieverbrauch des FTF stets zwischen 800 und 1400 W, während der manuell bediente Stapler zwischen 1000 und 2100 W verbraucht. Während der Ausführung von Transportaufträgen ist also der Verbrauch des FTF deutlich niedriger.

Weiters bestätigt sich die Aussage aus dem Testaufbau, dass der Grundverbrauch eines FTF höher ist als der eines manuell bedienten Staplers. Die bereits erwähnten Komponenten, die zur Automation des Fahrzeugs dienen, sorgen für diesen Umstand. Die Spitzenbelastung wiederum ist beim manuell bedienten Stapler mit gut 4000 W weitaus höher als beim FTF mit knapp 2400 W.

Für diese beiden vorliegenden Fälle legt das den Schluss nahe, dass ein FTF grundsätzlich weniger Energie verbraucht als ein manuell bedienter Stapler. Das ist im Durchschnitt auch völlig richtig. Allerdings ist zu beachten, dass die Leistung nicht vergleichbar ist. Im hier betrachteten Zeitraum von etwa viereinhalb Stunden konnte der manuell bediente Stapler genau 59 Aufträge erfüllen, während das FTF lediglich 31 Aufträge erfüllte. In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse des Praxistests zusammengefasst. Dazu wurden vor allem die beiden Kennzahlen Durchschnittsverbrauch in W sowie Energieverbrauch pro Auftrag in Wh herangezogen.

	FTF	Manuell bedienter Stapler
[W]	1017,93	1140,44
[Wh/Auftrag]	100,93	80,80
[Aufträge/h]	10,80	14,26

Tabelle 6: Ergebnisse des Praxistests

Der Durchschnittsverbrauch des manuell bedienten Staplers ist mit rund 1140 W gegenüber dem FTF mit 1017 W höher. Dies entspricht einem Mehrverbrauch von rund 12%. Dabei muss man aber beachten, dass beim FTF die Pausen nicht mitgerechnet wurden, da diese unnötig und sowohl von betrieblicher als auch energietechnischer Hinsicht unerwünscht sind. Dieser Energieverbrauch ist also für ein ständig in Betrieb befindliches FTF zu erwarten, was dem Soll-Zustand entspricht. Für den hier konkret vorliegenden Fall, also mit allen Pausen, würde der Energieverbrauch auf 884 W sinken. Damit würde der Mehrverbrauch des manuell bedienten Staplers rund 29% betragen. Das bedeutet zwar, dass der Durchschnittsverbrauch niedriger werden würde, allerdings verlängert sich die Fahrzeit. Das heißt, das FTF ist länger damit beschäftigt, die Aufträge zu erfüllen, was sich negativ auf die Umschlagsleistung aus-

wirkt. Nicht zuletzt steigt damit der Gesamtenergieverbrauch, auch wenn der durchschnittliche Energieverbrauch sinkt.

Die Pausen für einen manuell bedienten Stapler sind im Gegensatz zum FTF nicht zu vermeiden, da diese aufgrund gesetzlicher Bestimmungen oder aus Notwendigkeiten des betrieblichen Ablaufs meist unumgänglich sind. Daher ist in den Berechnungen auch jene Zeit berücksichtigt, in der der Fahrer eine Pause gemacht hat. Dies führt zu einem niedrigeren Energieverbrauch, als es während der produktiven Fahrzeit tatsächlich der Fall ist. Aus den genannten Gründen wird aber auf die Berechnung des Verbrauchs ausschließlich während der Fahrzeit und ohne Pausen verzichtet, da dies den realen Bedingungen in einem Distributionszentrum nicht entspräche.

Die zweite Kennzahl zeigt den Energieverbrauch eines Fahrzeugs für die Ausführung eines einzelnen Transportauftrags. Hier schneidet der manuell bediente Stapler mit rund 81 Wh besser als das FTF mit 101 Wh ab. Das heißt, er verbraucht um rund 20% weniger Energie als das FTF. Verantwortlich dafür ist natürlich, dass das FTF eine längere Fahrzeit benötigt. Der niedrigere Durchschnittsverbrauch schlägt sich eben für längere Zeit zu Buche, was insgesamt zu einem höheren Energieverbrauch pro Auftrag führt. Die längere Fahrzeit spiegelt sich in der dritten Kennzahl wieder. Demnach ist ein manuell bedienter Stapler in der Lage, in einer Stunde gut 14 Transportaufträge zu erfüllen, während ein FTF knapp 11 schafft. In Prozent ausgedrückt heißt das, dass das FTF rund 24% weniger Aufträge erfüllen kann als ein manuell bedienter Stapler.

Das kann man auch noch anders ausdrücken: Will man ein FTS in einem Unternehmen implementieren, so muss man damit rechnen, für einen manuell bedienten Stapler mehr als ein FTF einsetzen zu müssen, um die gleiche Leistung zu erhalten. In Zahlen ausgedrückt heißt das, man kann einen manuell bedienten Stapler durch etwa 1,3 FTF ersetzen. Für ein ganzes FTS gerechnet könnte man beispielsweise sechs manuell bediente Stapler durch acht FTF ersetzen.

Wie bereits erwähnt lassen sich Fahrpausen, anders als beim manuell bedienten Stapler, beim FTF großteils vermeiden. Dennoch kommen sie in der Praxis hin und wieder vor, und das FTF steht dann im wahrsten Sinne des Wortes herum. Dass das nicht produktiv ist, liegt auf der Hand, zumal die Umschlagsleistung darunter leidet und darüber hinaus dennoch Energie verbraucht wird.

Die Gründe für Pausen können mangelnde Aufträge oder Hindernisse sein. Daher sollte der Betreiber für eine gute Auslastung des FTS sorgen, indem er es mit ausreichend Aufträgen versorgt. Außerdem muss für Ordnung gesorgt werden, um Hindernisse zu vermeiden, die

ein FTF ja nicht so einfach umfahren kann wie ein manuell bedienter Stapler. Hierbei hat ein FTS als Organisationsmittel eine weit reichende und nachhaltige Wirkung auf die Intralogistik. Anfangs scheint die Ordnung, die für den FTS-Betrieb erforderlich ist, lästig. Es wird dann aber klar, dass diese Ordnung auch eine Folge des FTS ist. Hier liegt somit auch eine Chance, im Sinne einer ständigen Verbesserung die Abläufe immer weiter zu optimieren.¹³¹

5.3 Schlussfolgerungen

Alles in allem werden die Ergebnisse aus dem Testaufbau durch den Praxistest bestätigt. Es hat sich gezeigt, dass ein FTF im Durchschnitt einen deutlich niedrigeren Energieverbrauch hat als ein manuell bedienter Stapler, wie in folgender Tabelle ersichtlich ist (sämtliche Werte sind in W angegeben):

	FTF	Manuell bedienter Stapler
Praxistest	1018	1140
Testaufbau (600 kg)	1050	1755
Testaufbau (2000 kg)	1435	2372

Tabelle 7: Vergleich der Ergebnisse von Testaufbau und Praxistest

So ergeben sich für das FTF beim Testaufbau mit 600 kg und beim Praxistest, bei dem ja ebenfalls eine durchschnittliche Last von 600 kg transportiert wurde, mit 1050 W bzw. 1018 W fast dieselben Werte. Für den manuell bedienten Stapler gilt das nicht, allerdings sind beim Praxistest alle Fahrpausen mit eingerechnet, was den durchschnittlichen Verbrauch von 1755 W (bei reiner Fahrzeit ohne Pausen) auf 1140 W (in der Praxis) drückt. Beim Testaufbau mit 2000 kg schließlich unterscheiden sich FTF mit 1435 W und manuell bedienter Stapler mit 2372 W erheblich. Dies konnte aufgrund des großen Gewichts, das im Distributionszentrum dieses österreichischen Lebensmittelkonzerns kaum transportiert wird, nicht in der Praxis überprüft werden. Insgesamt gilt aber, dass der durchschnittliche Energieverbrauch eines manuell bedienten Staplers jenen eines FTF stets übersteigt. Jedoch muss bei allen Überlegungen die um rund 24% niedrigere Umschlagsleistung eines FTF ebenfalls berücksichtigt werden.

Aus betriebstechnischer Sicht ist es sinnvoll, für das FTF eine möglichst hohe Auslastung anzustreben. Damit soll ein gleichmäßiger Betrieb ohne Fahrpausen ermöglicht werden, so-

¹³¹ Vgl. Ullrich (2011), S. 15

dass das FTF ständig in Betrieb ist. Dafür ist eine kontinuierliche Versorgung mit Aufträgen notwendig. Weiters muss die Ordnung in einem Distributionszentrum eingehalten werden, um den FTF einen störungsfreien Betrieb zu ermöglichen. Beispiele dafür sind die klare Definition von Fahrwegen und Stellplätzen oder „Verkehrsregeln“ im Fall eines gemischten Betriebs, in dem sowohl FTF als auch manuell bediente Stapler zum Einsatz kommen.

In den meisten Fällen wird ein Distributionszentrum sowohl mit manuell bedienten Staplern als auch mit einem FTS realisiert werden. Ein FTS bietet dem Betreiber eine hohe Systemleistung, und zwar als Dauerleistung mit extrem hoher Verfügbarkeit. Ein manuell bedienter Stapler dagegen hat durch seine kurzfristig abrufbare Systemleistung und durch die hohe Flexibilität bezüglich der Aufgabenstellung ebenfalls seine Vorteile.¹³² Das ergibt eine gute Mischung.

Aus der Sicht des Betreibers ist es oft vorteilhaft, den im Distributionszentrum dauernd anfallenden Grundbedarf an Transporten durch das FTS abzudecken. Die hohe Systemleistung, die ständig zur Verfügung steht, macht das FTS dafür geradezu prädestiniert. Alle Transporte, die über diesen Grundbedarf hinausgehen, einschließlich aller Spitzenbelastungen, können mit manuell bedienten Staplern durchgeführt werden.

Diese Vorgangsweise kann durch eine Berechnung der maximalen Fahrtzeit unterstützt werden. Bei einer Batteriekapazität von 465 Ah und einer Batteriespannung von 24 V kann die maximale Fahrtzeit gemäß der Formel $W_{el} [Wh] = U [V] * I [A] * t [h]$ durch Einsetzen des durchschnittlichen Verbrauchs berechnet werden. Für das FTF ergibt sich durch Einsetzen von 1018 W eine maximale Fahrtzeit (ohne Pausen) von rund 11,0 Stunden. Ein manuell bedienter Stapler mit einem Durchschnittsverbrauch von 1140 W hat demnach rund 9,8 Stunden an Fahrtzeit (Pausen eingerechnet) zur Verfügung. In der Realität ist das bei beiden weniger, da keine Tiefentladung der Batterien erfolgen soll, um diese nicht zu beschädigen. Bei einer Restkapazität von 20% beträgt die maximal mögliche Fahrtzeit 8,8 Stunden für das FTF und 7,8 Stunden für den manuell bedienten Stapler.

¹³² Vgl. Ullrich (2011), S. 15 f.

6 Kostenbetrachtung

Logistikkosten im Allgemeinen „umfassen den wertmäßigen Gebrauch und Verbrauch der für die Logistikleistungserstellung eingesetzten Produktionsfaktoren.“¹³³ Sie können nach den verschiedenen Logistikprozessen in verschiedene Hauptkostenarten unterteilt werden:¹³⁴

- Kosten der Kommissionierung,
- Kosten für Verpackung,
- Kosten der Lagerung und für Bestände,
- Kosten für externe Transporte,
- Kosten des Umschlags und des internen Materialflusses sowie
- Kosten der Steuerung sowie der Informations- und Kommunikationssysteme.

Dabei können in jedem Prozess Kosten für die Faktoren Material, Personal und Betriebsmittel sowie Kapitalbindungskosten entstehen. So fallen zum Beispiel für Kommissionierung und Verpackung vor allem Personalkosten an, aber auch Material- und Energiekosten haben ihren Anteil. Für alle Transportmittel, für Lagereinrichtungen, für die Anlagen des Umschlags und Kommissionierens und für die Informations- und Kommunikationssysteme entstehen Abschreibungen und Kapitalbindungskosten. Die Kosten für die Lagerhaltung hängen im Gegensatz zu den Ein- und Auslagerungskosten nicht vom Materialfluss, sondern von der Bestandshöhe und der Lagerdauer ab.¹³⁵ Der Lagervorgang, der bis auf Veredelungs- oder Spekulationslager keine Wertsteigerung für die Lagergüter erbringt, verteuert die Güter durch die Lagerhaltungskosten. Diese setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen:¹³⁶

- Bestandskosten (Kapitalbindungskosten, Versicherung),
- Personalkosten (Kosten für Ein-, Aus- und Umlagerungen, Schulungen, Lagerverwaltung, Bestandsführung, Inventur),
- Betriebskosten der Betriebsmittel (Lagereinrichtungen, Lagerhilfsmittel, Transportmittel, Transporthilfsmittel) und
- Gebäudekosten (Abschreibung, Heizung, Beleuchtung, Instandhaltung, Versicherung, Gebäudeverwaltung).

¹³³ Arnold (2008), S. 1087

¹³⁴ Vgl. Arnold (2008), S. 8; Schulte (2009), S. 10

¹³⁵ Vgl. Arnold (2008), S. 8

¹³⁶ Vgl. Martin (2006), S. 323 f.

Die Kosten für externe Transporte bestehen aus Material- und Energiekosten, Personalkosten für die Fahrer sowie für die Disponenten. Hinzu kommen noch Abschreibungen und Kapitalbindungskosten für die Transportmittel.

Die Bedeutung des Materialflusses kann an den innerbetrieblichen Materialflussskosten abgelesen werden, die je nach Branche und Produkt einen Anteil von 50% oder mehr an den Selbstkosten erreichen können. Eine Analyse der Materialflussskosten kann nach vier Hauptkostenarten durchgeführt werden:

- materialflussbedingte Personalkosten,
- Betriebsmittelkosten der Transportmittel und Lagereinrichtungen,
- materialflussbedingte Raum- und Wegekosten sowie
- materialflussbedingte Kapitalbindungskosten.

Wird eine Kostenuntersuchung nach diesen Kostenarten durchgeführt, so erhält man mit ausreichender Genauigkeit die tatsächlich in einem Betrieb anfallenden Materialflussskosten. Die Bedeutung wird aber nur dann richtig erkannt, wenn wirklich alle vom Materialfluss verursachten Kosten ermittelt werden.¹³⁷

Die Kosten der Steuerung und für die Informations- und Kommunikationssysteme umfassen die Kosten der Gestaltung, Planung und Kontrolle des Materialflusses. Dabei handelt es sich vorwiegend um Abschreibungen, Kapitalbindungskosten und Energiekosten.

Die Höhe der Logistikkosten schwankt je nach Branche zwischen 5% und 8% der Gesamtkosten. Für die Nahrungsmittelbranche beispielsweise sind sie mit etwa 8% relativ hoch.¹³⁸

Diese Werte können jedoch nur eine grobe Indikation für den Anteil der Logistikkosten an den Gesamtkosten darstellen, da sämtliche empirischen Erhebungen regelmäßig an ihre Grenzen stoßen. Je nach Anspruch an die Logistik in einem Unternehmen werden sehr unterschiedliche Anforderungen gestellt, was sich dann auch gravierend auf die Höhe der Logistikkosten auswirkt. Das bezieht sich auf die Breite der durch die Logistik übernommenen Verantwortung, aber auch auf den angestrebten Servicegrad.

Als weiteres Problemfeld ist zu nennen, dass die Messung der Logistikkosten noch immer viele Unternehmen vor große Schwierigkeiten stellt. Eine einheitliche Zuordnung von Logistikleistungen und –kosten gibt es nicht. Eine Prozesskostenrechnung, die eine verursachungsgerechte Schlüsselung der Logistikkosten auf relevante „Kostentreiber“ vornimmt, ist nur in wenigen Unternehmen umgesetzt.¹³⁹

¹³⁷ Vgl. Martin (2006), S. 29

¹³⁸ Vgl. Schulte (2009), S. 10

¹³⁹ Vgl. Arnold (2008), S. 8, S. 1092; Schulte (2009), S. 10 f.

Die für ein FTS bzw. für manuell bediente Stapler relevanten Kostenarten sind die Kosten des Umschlags, des internen Materialflusses sowie die Kosten der Steuerung und der Informations- und Kommunikationssysteme. Dazu zählen neben den einmaligen Investitionen für die Fahrzeuge sowie die dazugehörigen EDV-Systeme vor allem Personal- und Energiekosten. Weiters können Kosten für Instandhaltung hinzugezählt werden. Die folgende Berechnung basiert auf Zahlen, die sich aus Gesprächen mit Mitarbeitern der KNAPP Systemintegration ergeben haben. So soll der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten in einer statischen Rechnung gezeigt werden.

Ein Stapler der Bauart CX 20 kostet rund 13.000 EUR. Nach der Aufrüstung zu einem FTF erhöht sich der Kaufpreis pro Fahrzeug, abhängig von den projektspezifischen Anforderungen, auf rund 55.000 bis 65.000 EUR. Für die weitere Berechnung wird der Wert 60.000 EUR verwendet. Das stationäre System, also die Steuerungssoftware, Computer und sonstigen Installationen (z.B. Reflektoren), die für den Betrieb eines FTS notwendig sind, belaufen sich auf rund 240.000 EUR. Dabei sind sämtliche Kosten für Projektmanagement, Erstellung des Pflichtenhefts, Herstellung der Schnittstelle zum WMS, Implementierung, Inbetriebnahme, Schulung der Mitarbeiter und Dokumentation enthalten. Es wird davon ausgegangen, dass die Netzwerk-Infrastruktur für WLAN bereits vorhanden ist. Für dieses Rechenbeispiel, bei dem von einem FTS mit zehn FTF und der üblichen Peripherie ausgegangen wird, bedeutet das eine einmalige Investition von rund 840.000 EUR.

Hinzu kommen die regelmäßigen Kosten für die Wartung. Zumeist wird dabei ein Vollservice-Vertrag mit dem Staplerlieferanten abgeschlossen, in dem auch Ersatzteile, Öle, Batteriewartung etc. enthalten sind. Dafür werden 130 EUR pro Monat und Fahrzeug veranschlagt. Für das FTF fallen weiters Wartungskosten für die Automationskomponenten sowie das stationäre System an. Dafür kann man mit 500 EUR pro Jahr und Fahrzeug sowie 10.000 EUR für das stationäre System rechnen. Nach Umlegung der Anschaffungsinvestitionen auf eine Nutzungsdauer von 10 Jahren sowie Hinzurechnen der Wartungskosten machen also die Gesamtkosten für ein FTF 11.460 EUR pro Jahr aus.

Die Nutzungsdauer eines manuell bedienten Staplers beträgt normalerweise drei bis fünf Jahre, abhängig von den Einsatzbedingungen, und wird hier mit fünf Jahren angesetzt. Bei einem FTF wird die Nutzungsdauer mit 10 Jahre angenommen. Dies ist eher eine untere Grenze, und FTS mit 15 Jahren und mehr sind keine Seltenheit. Die Differenz zwischen manuell bedienten Staplern und FTF erklärt sich durch den höheren Verschleiß aufgrund der unregelmäßigeren Fahrweise sowie höhere Spitzenbelastungen. Die Personalkosten für die Fahrer der manuell bedienten Stapler werden mit je 30.000 EUR angenommen. Für dieses

Rechenbeispiel wird ein Zweischichtbetrieb vorausgesetzt. Die notwendige Batteriekapazität wird mittels Wechselbatterien realisiert. Somit belaufen sich die Gesamtkosten für einen manuell bedienten Stapler auf 64.160 EUR pro Jahr. Zu diesen Gesamtkosten für FTF bzw. manuell bedienten Stapler müssen die jeweils anfallenden Energiekosten noch addiert werden.

Die laufenden Kosten für die Energieversorgung sind von der Auslastung, der Antriebsleistung der Fahrzeuge und dem Wirkungsgrad der Ladegeräte abhängig.¹⁴⁰ Eine Untersuchung im Distributionszentrum des genannten österreichischen Lebensmittelkonzerns beschäftigte sich mit den Wirkungsgraden von Hochfrequenz-Ladegeräten verschiedener Hersteller. Dabei zeigte sich, dass Ladegeräte im Durchschnitt einen Wirkungsgrad von rund 90% aufweisen. Der Wirkungsgrad des Gesamtsystems (Ladegerät und Batterie), also das Verhältnis von der beim Fahren zur Verfügung stehenden Energie zu der beim Laden aus dem Stromnetz entnommenen Energie, beträgt im Durchschnitt rund 70%.

Aber die Ladegeräte verbrauchen auch im Leerlauf, also wenn keine Fahrzeugbatterie geladen wird, eine beträchtliche Menge Strom. Durchschnittlich werden dabei 0,23 kWh pro Stunde verbraucht, die völlig nutzlos in Wärme umgewandelt werden.

Für die Ermittlung des Energiebedarfs wird mit einem Durchschnittsverbrauch von 1018 W beim FTF bzw. 1140 W beim manuell bedienten Stapler gerechnet. Bei einem Zweischichtbetrieb sind demnach 23,33 kWh für das Laden der FTF-Batterien aufzuwenden. Zusätzlich werden in der Zeit, in der keine Batterie geladen wird, 2,76 kWh vom Ladegerät verbraucht. Für den Energieverbrauch des stationären Systems, wie Leitsteuerung und WLAN, werden weiters 1,31 kWh hinzugerechnet. Das macht in Summe rund 27,3 kWh für das FTF pro Arbeitstag. Der Energiebedarf für die Batterien eines manuell bedienten Staplers kann mit 26,07 kWh beziffert werden. Addiert man den Verbrauch des Ladegeräts sowie den Energieverbrauch für das stationäre System, summiert sich der Energiebedarf pro Tag auf rund 29,9 kWh für jeden manuell bedienten Stapler.

Für den Fall, dass im Distributionszentrum sechs Tage pro Woche gearbeitet wird, ergeben sich im ganzen Kalenderjahr 312 Arbeitstage. Folglich beträgt der jährliche Energiebedarf eines FTF rund 8822 kWh, der eines manuell bedienten Staplers rund 9624 kWh. Für die weiteren Berechnungen wird mit einem Strompreis von 0,10 EUR pro kWh kalkuliert. Das heißt in Zahlen ausgedrückt, dass der zweischichtige Betrieb eines FTF im Jahr rund 882,23 EUR an Energiekosten verursacht. Der Betrieb eines manuell bedienten Staplers, ebenfalls in zwei Schichten pro Tag, kostet im Jahr 962,42 EUR.

¹⁴⁰ Vgl. VDI 4450 (2001), S. 8

Der Anteil der Energiekosten an den Gesamtkosten kann ebenso ausgedrückt werden. Dieser beträgt 7,15% bei einem FTF bzw. 1,48% bei einem manuell bedienten Stapler.

Der Grund für den niedrigen Einfluss der Energiekosten beim manuell bedienten Stapler liegt vor allem in den hohen Personalkosten begründet. Diese sind ja auch der Grund dafür, dass sich FTS gegenüber Systemen mit manuell bedienten Staplern in der Regel in weniger als zwei Jahren amortisieren. Da ist das Potential beim FTF mit 7,15% schon deutlich höher.

Will man nun die gesamten Energiekosten eines FTS mit den Energiekosten eines Systems mit manuell bedienten Staplern vergleichen, muss man diese Vergleichsrechnung aufgrund des unterschiedlichen Leistungsvermögens mit 10 FTF und mit circa acht manuell bedienten Staplern durchführen. In Summe sind nun die jährlichen Energiekosten eines solchen FTS mit rund 8822 EUR höher als bei einem vergleichbaren System, das mit manuell bedienten Staplern operiert und rund 7962 EUR kostet. Die folgende Tabelle fasst noch einmal alle wesentlichen Zahlen zusammen:

	[E]	FTF	Manuell bedienter Stapler
Durchschnittsverbrauch	[W]	1017,93	1140,44
Energiekosten pro Fahrzeug und Jahr	[EUR]	882,23	962,42
Fahrzeugkosten pro Jahr	[EUR]	12.342,23	65.122,42
Anteil Energie an Gesamtkosten	[%]	7,15	1,48
Energiekosten für das Gesamtsystem	[EUR]	8.822,32	7.961,78

Tabelle 8: Überblick über die wichtigsten Kostenkennzahlen

Somit kann man folgern, dass ein FTS jährlich mehr Energie verbraucht als ein vergleichbares System mit manuell bedienten Staplern. Dies liegt nicht etwa daran, dass ein FTF mehr Energie verbrauchen würde als ein manuell bedienter Stapler. Der Grund dafür liegt vor allem daran, dass man aufgrund der niedrigeren Umschlagsleistung mehr als ein FTF benötigt, um einen manuell bedienten Stapler zu ersetzen. Durch die größere Anzahl an benötigten Fahrzeugen ist nun der Energieverbrauch eines FTS höher. Es muss daher im Interesse der Hersteller von FTS liegen, sowohl die Energieeffizienz ihrer Fahrzeuge als auch deren Leistung zu verbessern.

Im Prinzip kann man sagen, dass Maßnahmen zur Verringerung des Energieverbrauchs, wie sehr viele Maßnahmen des Umweltschutzes, sowohl ökologische als auch ökonomische Vorteile mit sich bringen. Das ist eigentlich auch logisch: Wo Energie eingespart wird, bei deren

Gewinnung klimaschädliche Stoffe entstehen, werden sowohl die Menge dieser Stoffe reduziert als auch die Kosten für die Energie. Man schlägt also zwei Fliegen mit einer Klappe. Und je höher die Energiepreise steigen, desto größer wird auch der ökonomische Nutzen dieser umweltfreundlichen Maßnahmen.¹⁴¹

Um den ökologischen Nutzen bewerten zu können, ist es notwendig, die verbrauchte Energie umzurechnen, und zwar in die bei der Herstellung dieser Energie anfallenden Umweltauswirkungen. Der Strommix in Österreich besteht aus rund 62% erneuerbaren Energieträgern, aus rund 20% fossilen Energieträgern sowie rund 18% zugekauftem Strom aus Europa. Die Umweltauswirkungen daraus lassen sich mit 195,16 g CO₂ sowie 0,000137 g radioaktivem Abfall pro kWh beziffern.¹⁴²

Für das vorliegende Beispiel heißt das folgendes:

Bei dem errechneten Energieverbrauch von 8822 kWh pro Jahr verursacht ein FTF also rund 1722 kg CO₂ sowie 1,2 g radioaktiven Abfall. Ein manueller Stapler, der 9624 kWh an Strom pro Jahr verbraucht, ist für 1878 kg CO₂ und 1,3 g radioaktiven Abfall verantwortlich.

Für das vorher gewählte Szenario, wonach sich ein FTS aus 10 FTF bzw. ein entsprechendes System aus acht manuell bedienten Staplern zusammensetzt, bedeutet das eine Umweltbelastung von 17.217 kg CO₂ und 12,1 g radioaktivem Abfall für das FTS bzw. 15.538 kg CO₂ und 10,9 g radioaktivem Abfall für das System mit manuell bedienten Staplern.

Diese hier errechneten Werte sind qualitativ natürlich den Ergebnissen der Kosten sehr ähnlich, da sie im Wesentlichen auf diesen basieren. Um die Umweltbelastungen zu senken, gelten daher auch hier dieselben Schlussfolgerungen.

Aufgrund der intensiven Diskussion im Hinblick auf Ursachen und Konsequenzen des weltweiten Klimawandels wird den CO₂-Emissionen zunehmend Beachtung geschenkt. Diese Emissionen tragen zusammen mit anderen Treibhausgasen wie Methan nach vorherrschender wissenschaftlicher Meinung maßgeblich zur Erderwärmung bei. Aufgrund dessen werden in Zukunft dramatische Klimaveränderungen befürchtet. Diese prognostizierten Veränderungen dürften auch erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaft haben, beispielsweise Ernteverluste in der Landwirtschaft, Beseitigung von Sturmschäden oder Aufwendungen für Deichbau und Sicherung.

Obwohl in der öffentlichen Diskussion ein Zusammenhang zwischen CO₂-Emissionen und der Erwärmung der mittleren Erdtemperatur kaum mehr in Frage gestellt wird, steht ein letztgül-

¹⁴¹ Vgl. Sadowski (2010), S. 77

¹⁴² Vgl. E-Control (2011), S. 41 ff.

tiger wissenschaftlicher Beweis einer Kausalität dieser Phänomene noch aus. Insbesondere stellt sich die Frage, ob durch die angestrebte Reduktion von CO₂-Emissionen (z.B. durch das Kyoto-Protokoll) die Erderwärmung wirklich gestoppt oder gar zurückgeführt werden kann.¹⁴³ Für die Überlegungen hinsichtlich der Energieeffizienz von Flurförderzeugen in einem Distributionszentrum ist diese Frage letztendlich aber nicht entscheidend, da ohnehin die erreichbaren Energieeinsparungen und die damit verbundenen Kostenreduktion im Vordergrund stehen.

¹⁴³ Vgl. Arnold (2008), S. 1032

7 Zusammenfassung

Insgesamt kann gesagt werden, dass es sich beim durchaus aktuellen Themengebiet Energieeffizienz um einen komplexen Bereich handelt, dessen großes Potential es noch zu nutzen gilt. Nach einer allgemeinen Beschreibung der Distributionslogistik widmet sich diese Arbeit einem der wichtigsten Bestandteile, dem Distributionszentrum. Im Zuge dessen werden auch die Prozesse in einem solchen Distributionszentrum genau betrachtet. Außerdem werden die dabei eingesetzten Flurförderzeuge untersucht und ihr Energieverbrauch theoretisch ermittelt. Darauf folgt eine Beschreibung über den Ablauf der Energiemessungen, die sich in zwei Teile gliedern.

In den standardisierten Testläufen hat sich gezeigt, dass ein FTF einen niedrigeren durchschnittlichen Energieverbrauch hat als ein manuell bedienter Stapler. Aufgrund der langsameren Fahrweise und der damit verbundenen längeren Fahrzeit verbraucht ein FTF für die gleiche Transportleistung im Vergleich aber mehr Energie.

Während der Praxistests im Distributionszentrum eines großen österreichischen Lebensmittelkonzerns hat sich diese Tendenz bestätigt. Der Durchschnittsverbrauch eines FTF beträgt rund 1018 W, während ein manuell bedienter Stapler rund 1140 W verbraucht. Dabei ist aber zu beachten, dass ein FTF nur 11, ein manuell bedienter Stapler aber 14 Aufträge pro Stunde erfüllen kann, sodass das FTF eine um rund 24% niedrigere Umschlagsleistung als ein manuell bedienter Stapler hat.

Für eine beispielhafte Rechnung werden daher zehn FTF und acht manuell bediente Stapler verglichen, da diese in etwa die gleiche Umschlagsleistung realisieren können. Für diesen Fall sind die Energiekosten des gesamten FTS höher als der eines vergleichbaren Systems mit manuell bedienten Staplern. Die jährlichen Energiekosten des FTF betragen hier rund 7,2% der Gesamtkosten, beim manuell bedienten Stapler sind es nur 1,5%. Das zeigt aber auch die Möglichkeit auf, dass bei einem FTS Maßnahmen zur Energieeffizienz durchaus Sinn machen.

Energieeinsparungen ergeben sich bei einem FTF vor allem durch die gleichmäßige Fahrweise. Die abrupten Brems- und Beschleunigungsvorgänge bei einem manuell bedienten Stapler fallen beim FTF weg. Zusätzlich sollten aber auch die Automationskomponenten, beispielsweise Sicherheitssensoren, Lasernavigation und Fahrzeugsteuerung, weiterentwickelt werden, um den hohen Grundbedarf eines FTF zu senken. Eine Abschaltautomatik während der Zeit, in der das FTF keine Aufträge hat, könnte ebenso zu einem niedrigeren Energieverbrauch beitragen. Im Sinne von ganzheitlichen Maßnahmen wäre auch eine Weiterentwick-

lung der Ladegeräte sinnvoll. Zumindest eine Vorkehrung, die den Leerlaufverbrauch minimiert, wäre sehr wünschenswert.

Der Hauptgrund dafür, dass der Energieverbrauch eines FTF noch immer relativ hoch ist, liegt im Grunde an der geringeren Umschlagsleistung. Deren Steigerung, etwa durch die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit, würde im Endeffekt auch zur Erhöhung der Energieeffizienz beitragen. Alles in allem bietet dieser Bereich noch einiges an Entwicklungspotential, das noch erschlossen werden kann.

Literaturverzeichnis

Alicke, K.: Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken, Berlin, Springer 2003.

ISBN 978-3-540-44370-4

Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen, Berlin, Springer 2006.

ISBN 978-3-540-29657-7

Arnold, D.; u.a.: Materialfluss in Logistiksystemen, 5. Auflage, Berlin, Springer 2007.

ISBN 978-3-540-45659-9

Arnold, D. (Hrsg.); u.a.: Handbuch Logistik, 3. Auflage, Berlin, Springer 2008.

ISBN 978-3-540-72928-0

Babel, G.: Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik, Wiesbaden, GWV Fachverlage 2007.

ISBN 978-3-8348-0311-5

Bode, W.; u.a.: Comprehensive introduction to intralogistics. A reference book by STILL Akademie, Suhl/Thüringen, Wirtschaftsverlag W.V. 2004.

ISBN 3-936-652-06-6

E-Control: Bericht über die Stromkennzeichnung 2010. Online im Internet:

<<http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/oeko-energie/dokumente/pdfs/stromkennzeichnungsbericht-2010-final.pdf>>

Stand: 12.05.2011; Abfrage: 12.05.2011, MEZ 13:55 Uhr.

Fortmann, K.-M.; u.a.: Logistik, Stuttgart, Kohlhammer 2000.

ISBN 978-3-170-16461-1

Gleißner, H.; u.a.: Logistik. Grundlagen – Übungen – Fallbeispiele, Wiesbaden, Gabler 2008.

ISBN 978-3-8349-0296-2

Huggins, R. A.: Advanced Batteries – Materials Science Aspects, New York, Springer 2009.

ISBN 978-0-387-76423-8

Koether, R. (Hrsg.): Taschenbuch der Logistik, 3. Auflage, Leipzig, Hanser 2008.

ISBN 978-3-446-41503-4

Leonhard, W.: Regelung elektrischer Antriebe, 2. Auflage, Berlin, Springer 2000.

ISBN 3-540-67179-X

Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik, 6. Auflage, Wiesbaden, GWV Fachverlage 2006.

ISBN 978-3-8348-0168-5

Müller, L.: Handbuch der Elektrizitätswirtschaft – Technische, wirtschaftliche und rechtliche Grundlagen, Berlin, Springer 1998.

ISBN 3-540-56163-3

Noche, B.: Planung von Distributionszentren unter Berücksichtigung von Anforderungen des e-Commerce. Online im Internet: <http://www.sim-serv.com/pdf/whitepapers/whitepaper_58.pdf> Stand: 04.01.2011; Abfrage: 04.01.2011, MEZ 11:45 Uhr.

Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen, 8. Auflage, Berlin, Springer 2010.

ISBN 978-3-642-04161-7

Sadowski, P.: Grüne Logistik – Grundlagen, Ansätze und Hintergründe zur Optimierung der Energieeffizienz in der Logistik, Saarbrücken, Verlag Dr. Müller 2010.

ISBN 978-3-639-26595-8

Schröder, D.: Elektrische Antriebe – Grundlagen, 3. Auflage, Berlin, Springer 2007.

ISBN 978-3-540-72764-4

Schulte, C.: Logistik – Wege zur Optimierung der Supply Chain, 5. Auflage, München, Vahlen 2009.

ISBN 978-3-8006-3516-0

Specht, G; u.a.: Distributionsmanagement, 4. Auflage, Stuttgart, Kohlhammer 2005.

ISBN 978-3-170-18410-7

ten Hompel, M.: Zellulare Fördertechnik, in: eLogistics Journal, 2006. Online im Internet:

<http://www.elogistics-journal.de/archiv/2006/August/599/tenHompel_d.pdf>

Stand: 25.01.2011; Abfrage: 25.01.2011, MEZ 17:15 Uhr.

ten Hompel, M.; u.a.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik, 3. Auflage, Berlin, Springer 2007.

ISBN 978-3-540-73235-8

ten Hompel, M. (Hrsg.); u.a.: Taschenlexikon Logistik – Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik, 2. Auflage, Berlin, Springer 2008.

ISBN 978-3-540-75661-3

ten Hompel, M.; u.a.: Warehouse Management – Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen, 3. Auflage, Berlin, Springer 2008b.

ISBN 978-3-540-74875-5

ten Hompel, M.; u.a.: Identifikationssysteme und Automatisierung, Berlin, Springer 2008c.

ISBN 978-3-540-75880-8

Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme. Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung, Wiesbaden, Vieweg und Teubner 2011.

ISBN 978-3-8348-0791-5

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2198 – Typenblätter für Flurförderzeuge, Düsseldorf, 2002.

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 3629 – Organisatorische Grundfunktionen im Lager, Düsseldorf, 2005.

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4450 – Analyse der Wirtschaftlichkeit Fahrerloser Transportsysteme (FTS), Düsseldorf, 2001.

Verein Deutscher Ingenieure: VDI 4451 Blatt 2 – Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS), Energieversorgung und Ladetechnik, Düsseldorf, 2000.

Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik – Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion, 3. Auflage, Berlin, Springer 2007.

ISBN 978-3-540-29756-7

Wisser, J.: Der Prozess Lagern und Kommissionieren im Rahmen des Distribution Center Reference Model (DCRM), Karlsruhe, Universitätsverlag Karlsruhe 2009.

ISBN 978-3-86644-372-3

Produkt- und herstellerspezifische Informationen wurden den Homepages der folgenden Unternehmen entnommen:

Kollmorgen Schweden http://www.ndcsuite.com/#/ndc8_platform

STILL G.m.b.H. <http://www.still.at>

Toyota Industries Corp. <http://www.bt-forklifts.com/En/Pages/index.aspx>

Anhang

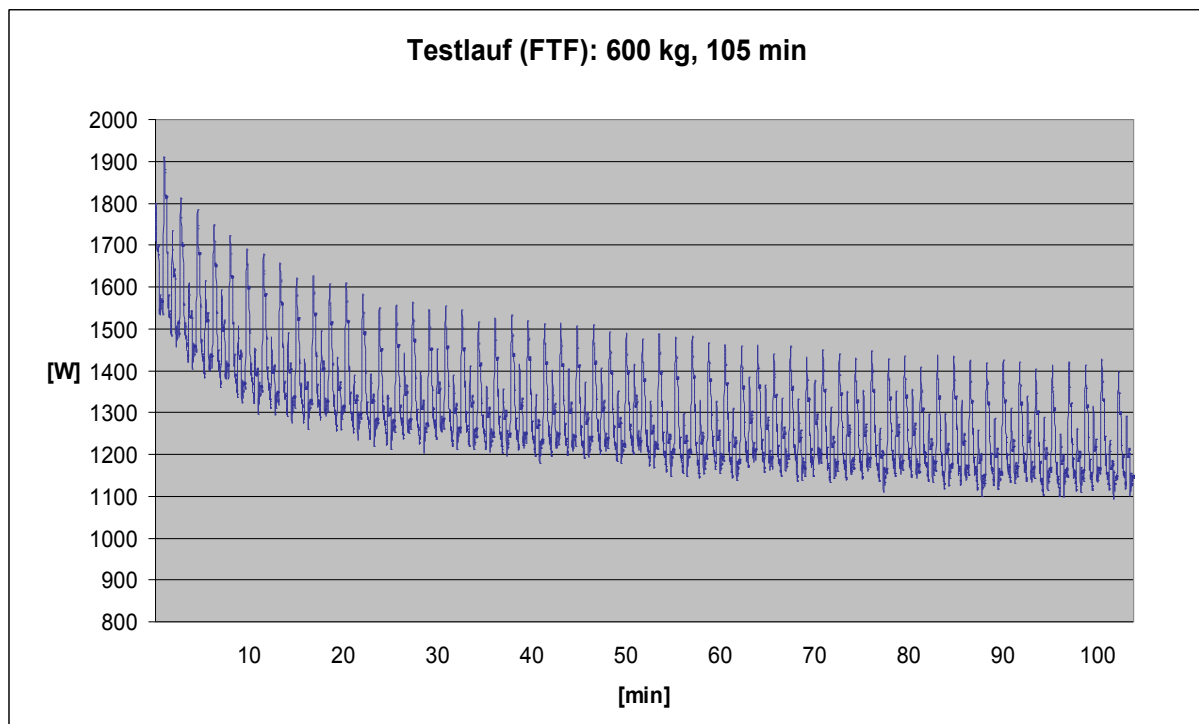


Abbildung A.1: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 105 min)

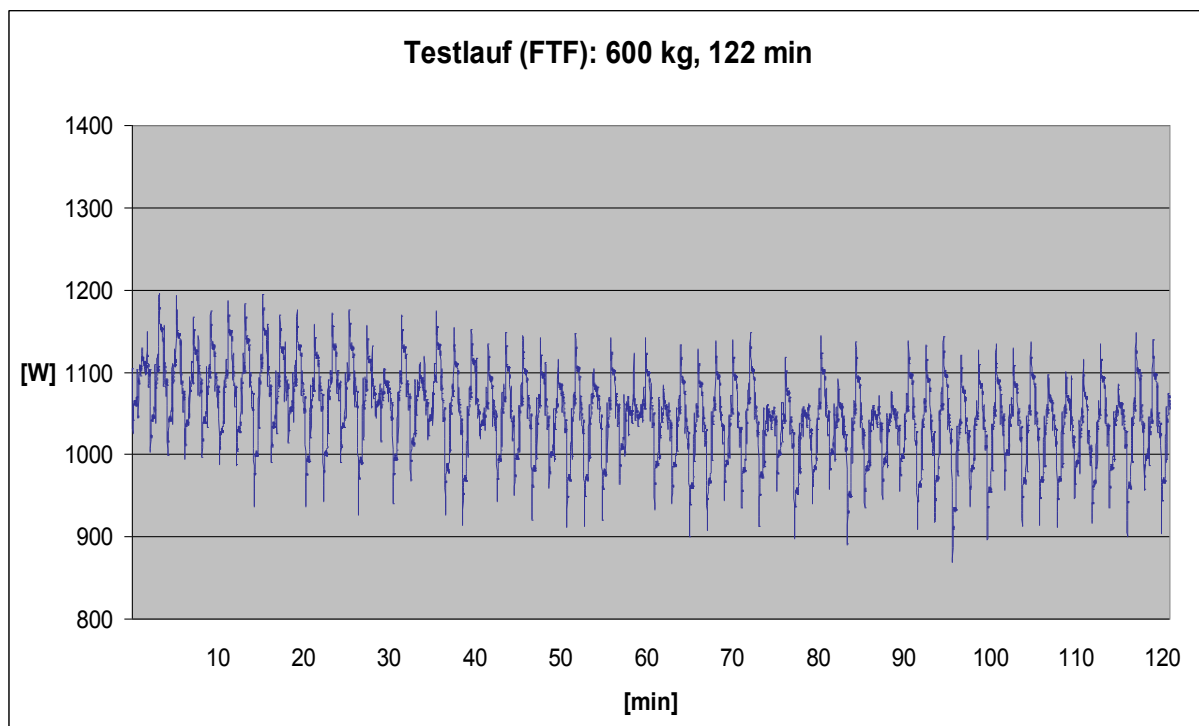


Abbildung A.2: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 122 min)

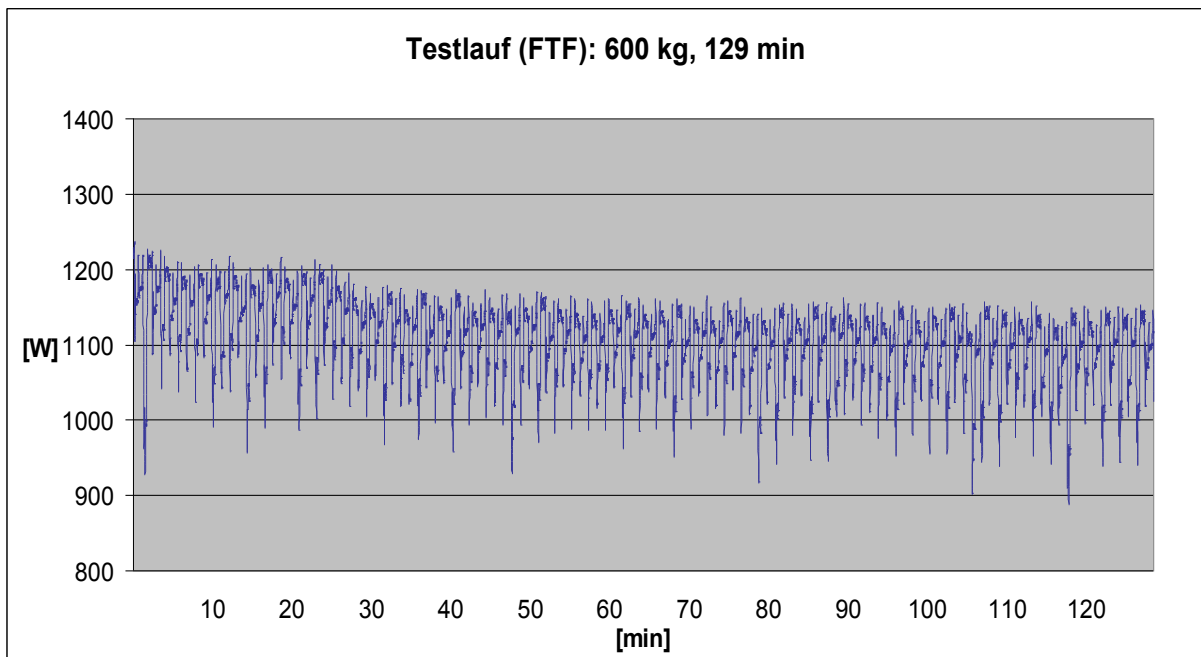


Abbildung A.3: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 129 min)

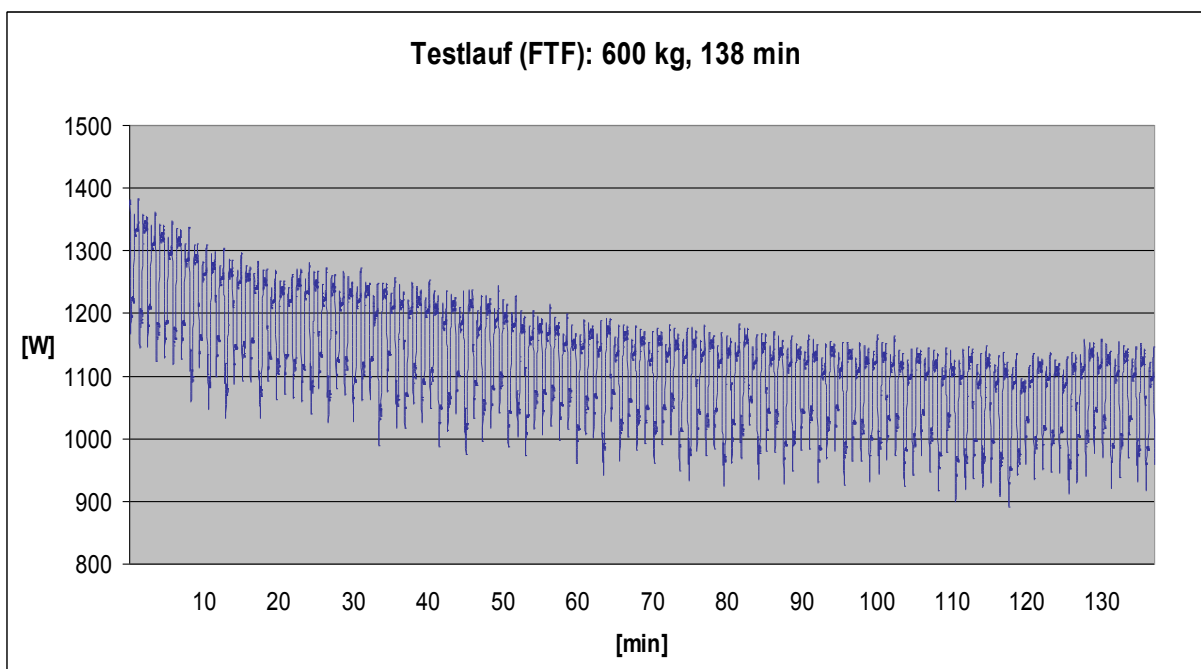


Abbildung A.4: Testlauf des FTF (Last: 600 kg, Dauer: 138 min)

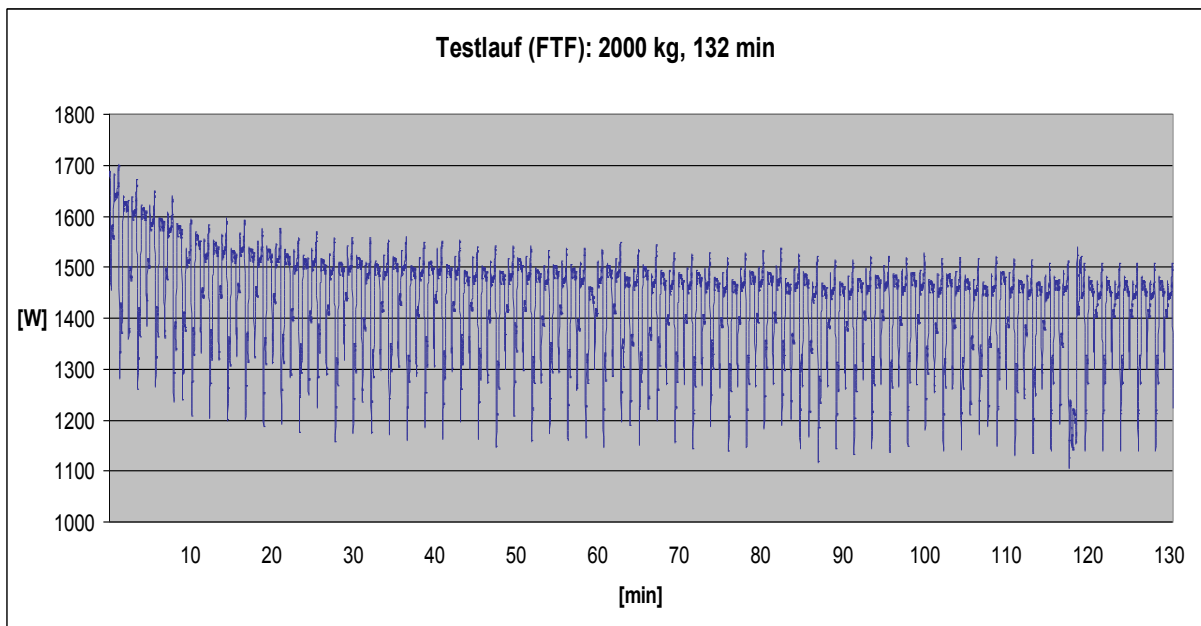


Abbildung A.5: Testlauf des FTF (Last: 2000 kg, Dauer: 132 min)

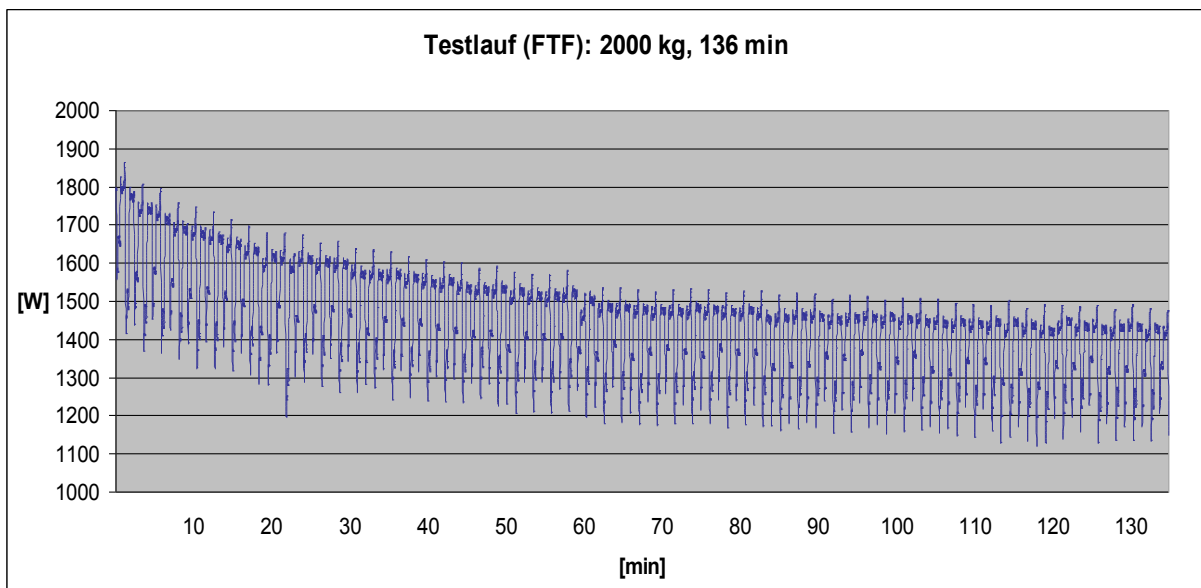


Abbildung A.6: Testlauf des FTF (Last: 2000 kg, Dauer: 136 min)