

Masterarbeit

NEUENTWICKLUNG EINES KOMPAKTEN REGALSHUTTLESYSTEMS FÜR KLEINTEILE

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Ing. Stefan Leitner, BSc

1910322018

betreut und begutachtet von
DI Werner Josef Frissenbichler

Graz, im November 2020

.....

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....

Unterschrift

DANKSAGUNG

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herrn DI Werner Josef Frissenbichler, der meine Masterarbeit betreut und begutachtet hat. Ich möchte mich herzlich für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bedanken.

Ein besonderer Dank gilt der Firma Fb Industry Automation, die mir diese Masterarbeit innerhalb der Firma ermöglicht hat. Hierbei möchte ich mich speziell bei Herrn DI Gabriel Flechl bedanken, mit dem ich mich über meine Lösungsvorschläge nutzbringend unterhalten konnte. Weiters gilt mein Dank auch meinen Kollegen, die mich während der Arbeit besonders unterstützten, indem sie mir des Öfteren den Rücken freigehalten haben.

Ein Dankeschön möchte ich auch meinen Freunden, sowie meinen Studienkollegen aussprechen. Besonders hervorheben möchte ich die Vereinsmitglieder des PBSV und des USV St. Kathrein/Off, sowie meine Studienkollegen Philipp, Lukas und Matthias, die mich gerade in der Corona-Zeit in diversen Meetings mental unterstützten.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Freundin und meinen Eltern bedanken, die während der Arbeit immer ein offenes Ohr für mich hatten. Sie standen mir stets zur Seite und motivierten mich in schwierigeren Phasen der Masterarbeit.

Stefan Leitner

Graz, 29.11.2020

KURZFASSUNG

Das Kerngebiet der Firma Fb Industry Automation liegt in der Intralogistik. Im Niedriglastbereich verbaut Fb Industry Automation automatische Kleinteilelager in kompakter Form. In diesem Bereich wurde ein Shuttlefahrzeug mit maximaler Zuladung von 120 kg entwickelt. Im Anschluss war dieser Prototyp Teil einer Vorstudie, wobei die Schwachstellen des Prototyps analysiert wurden. Auf Grund dieser Vorstudie sollte das Shuttlefahrzeug neu- bzw. weiterentwickelt werden.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, das Shuttlefahrzeug dahingehend neu zu konzipieren, dass die Anforderungen des Marktes nach Lagerdichte, Durchsatz und Verfügbarkeit stärker berücksichtigt werden und somit das neue Shuttlefahrzeug wettbewerbsfähig ist.

Der Durchsatz wird per Neuauslegung des gesamten Antriebsstranges gesteigert. Hierzu werden in der vorliegenden Masterarbeit Nutzwertanalysen hinsichtlich des Shuttletyps sowie des Lastaufnahmemittels vorgenommen. Zudem wird die Zykluszeit des neuen Shuttlesystems berechnet, worauf die neuen Antriebe ausgelegt werden. Mittels einer Neuordnung der Antriebe sowie der Neuauswahl bestimmter Shuttlekomponenten verringert sich die Shuttlegröße, was zugleich die Lagerdichte erhöht. Die Verfügbarkeit wird über das bessere Handling des Shuttlefahrzeuges gewährleistet. Die verbauten Komponenten werden abschließend in der Arbeit festgehalten; ferner erfolgt ein Ausblick auf künftige Optionen für mögliche Weiterentwicklungen.

ABSTRACT

The requirements for intralogistics systems have increased significantly over the past few decades. Fb Industry Automation has been a supplier to the intralogistics sector for many years. The company's main product is an automated small parts store that uses shuttle vehicle technology. The current shuttle vehicle is no longer state of the art, subsequently further development of this system is essential.

The aim of this master's thesis is to redesign the shuttle vehicle enabling the competitiveness of the new system. Therefore, the requirements of the market regarding storage density, throughput and availability of the warehouse must be taken into account.

The throughput is increased by redesigning the entire drive train. For that purpose, benefit analyzes are carried out for the selection of a shuttle type and load handling device. Furthermore, the cycle time of the new shuttle system is calculated. The new drives are designed using the results of these calculations. The results demonstrate that the dimensions of the new drives are significantly smaller, therefore, the overall size of the shuttle vehicle can be considerably reduced by replacing these drives. This process increases the storage density of the system. A better handling of the shuttle vehicle guarantees the availability of the system. This goal has been implemented by attaching LED status bars and special maintenance hatches. In addition, a modular shuttle structure facilitates availability.

As a result, the built-in components are listed in this master's thesis. Finally, an outlook regarding future option for possible further developments is given. Through the results of this diploma thesis, it is feasible to create a shuttle vehicle prototype and following test series.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Firmenbeschreibung.....	5
2	Einleitung.....	6
3	Logistik	7
3.1	Definition und Funktionen der Logistik	7
3.2	Ziele der Logistik.....	8
3.3	Unternehmenslogistik bzw. Intralogistik	9
3.3.1	Beschaffungslogistik	10
3.3.2	Produktionslogistik.....	10
3.3.3	Distributionslogistik	11
3.3.4	Entsorgungslogistik.....	11
4	Lagern und Kommissionieren	13
4.1	Transportgut.....	13
4.1.1	Palette.....	13
4.1.2	Transport- und Lagerbehälter	14
4.1.3	Weitere Ladungsträger	15
4.2	Lagerstrategien in einem Unternehmen	15
4.2.1	FIFO.....	15
4.2.2	LIFO	15
4.2.3	FEFO	16
4.2.4	HIFO	16
4.2.5	LOFO	16
4.3	Lagersysteme in einem Unternehmen.....	16
4.3.1	Bodenlagerung.....	17
4.3.1.1	Bodenblocklagerung.....	18
4.3.1.2	Bodenzeilenlagerung.....	18
4.3.2	Statische Regallagerung.....	18
4.3.2.1	Palettenregale	19
4.3.2.2	Behälterregale	20
4.3.2.3	Hochregallager	24
4.3.2.4	Fachbodenregal.....	24
4.3.2.5	Weitere Regallagerungen.....	25
4.3.3	Dynamische Regallagerung.....	25
4.3.3.1	Verschieberegale.....	26
4.3.3.2	Vertikale Umlaufregale	26
4.3.3.3	Horizontale Umlaufregale	27
4.3.3.4	Durchlaufregale	28
4.4	Kommissioniermethoden	28
4.4.1	Person-zur-Ware.....	29
4.4.2	Ware-zur-Person.....	30

4.5	Kommissionierhilfsmittel	31
4.5.1	Pickliste	31
4.5.2	Terminals	31
4.5.3	Pick-by-Light	31
4.5.4	Put-to-Light	32
4.5.5	Pick-by-Voice	33
4.5.6	Weitere Hilfsmittel	33
5	Antriebstechnik	34
5.1	Servomotor	34
5.1.1	Aufbau	34
5.1.2	Wirkungsweise	37
5.1.2.1	Drehzahl	37
5.1.2.2	Leistung	37
5.2	Frequenzumrichter	38
5.2.1	Aufbau	38
5.2.1.1	Gleichrichter	39
5.2.1.2	Zwischenkreis	40
5.2.1.3	Wechselrichter	40
5.2.2	Vierquadrantenbetrieb	42
6	Marktanalyse	44
6.1	Systeme im AKL-Bereich	44
6.1.1	1D-Shuttlesystem	44
6.1.2	2D-Shuttlesystem mit horizontalem Wechsel	45
6.1.3	2D-Shuttlesystem mit vertikalem Wechsel	46
6.1.4	3D-Shuttlesystem	47
6.1.5	Regalbediengerät	48
6.2	Lastaufnahmemittel	49
6.2.1	Ziehvorrichtung	49
6.2.2	Teleskopvorrichtung	49
6.3	Analyse der Gerätedaten	50
6.4	Auswahl der Achsen für das neue Shuttlesystem	51
7	Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik	53
7.1	Theorie zu den Berechnungen	53
7.2	Ablaufdiagramm	54
7.3	Spielzeitberechnung	55
7.3.1	Ermittlung der Koordinaten	55
7.3.2	Altes Shuttlesystem	55
7.3.3	Neues Shuttlesystem	59
8	Auslegung der Antriebssysteme	61
8.1	Fahrtrieb	61
8.1.1	Weg/Winkel	62
8.1.2	Winkelgeschwindigkeit, Drehzahl, Geschwindigkeit	62

8.1.3	Winkelbeschleunigung	63
8.1.4	Trägheitsmoment	64
8.1.4.1	Lastträgheitsmoment auf Motorwelle	64
8.1.4.2	Trägheitsmoment Antriebselement auf Motorwelle	64
8.1.4.3	Gesamtes Trägheitsmoment an der Motorwelle	65
8.1.5	Erforderliche Momente des Motors	65
8.1.5.1	Rollwiderstandsmoment	65
8.1.5.2	Erforderliches Moment	66
8.2	Riemenantrieb	68
8.3	Teleskopantrieb	70
8.4	Hubantrieb	72
9	Ausführungsvarianten	74
9.1	Antrieb	74
9.2	Frequenzumrichter	74
9.2.1	Variante 1	74
9.2.2	Variante 2	75
9.3	Steuerung	75
9.3.1	Variante 1	76
9.3.2	Variante 2	76
9.4	Positionierung Fahrtriebsachse	77
9.4.1	Variante 1	77
9.4.2	Variante 2	77
9.4.2.1	Mit ELVCD	77
9.4.2.2	Mit Maxo	78
9.5	Energieübertragung	78
9.5.1	Variante 1	78
9.5.2	Variante 2	78
9.6	Datenübertragung	79
9.6.1	Variante 1	79
9.6.2	Variante 2	80
9.7	Wahl der Ausführung	81
9.7.1	Antrieb	81
9.7.1.1	Fahrtrieb	81
9.7.1.2	Teleskopantrieb	82
9.7.1.3	Riemenantrieb	84
9.7.1.4	Hubantrieb	85
9.7.2	Frequenzumrichter	86
9.7.3	Steuerung	86
9.7.4	Positionierung Fahrtriebsachse	86
9.7.5	Energieübertragung	87
9.7.6	Datenübertragung	87
9.7.7	Zusammenfassung	88

10	Zusammenfassung.....	89
10.1	Lagerdichte	89
10.2	Durchsatz.....	90
10.3	Verfügbarkeit.....	90
11	Aussicht.....	93
11.1	Weiterentwicklung hinsichtlich maximaler Zuladung	93
11.2	Einsatz eines Batteriesystems.....	93
11.3	Einsatz eines Microcontrollers	93
12	Literaturverzeichnis	94
13	Abbildungsverzeichnis.....	98
14	Tabellenverzeichnis.....	102

1 FIRMENBESCHREIBUNG

Das Unternehmen Fb Industry Automation (Firmenlogo in Abb. 1) entwickelt Anlagenautomation für die Energieerzeugung sowie entsprechende Lösungen im Bereich der Industrie-, Sonder- und Intralogistikanlagen.



Abb. 1: Logo Fb Industry Automation, Quelle: Fb Industry Automation

Im Bereich der Energieerzeugung bietet Fb Industry Automation energieeffiziente Systemlösungen für Photovoltaik und Wasserkraft. Das Unternehmen realisiert auch Projekte im Sonderanlagenbau. So werden Prototypenlösungen im Bereich der Messtechnik für Kunden entworfen und erfolgreich entwickelt. Des Weiteren verwirklicht Fb Industry Automation Projekte für kundenspezifische Produktionsanlagen.

Das Kerngebiet behandelt jedoch den Bereich der Intralogistikanlagen. Technologisch umfasst das Produktportfolio eine auf die Produktions- und Absatzlogistik ausgerichtete Shuttlelager- und Kommissioniertechnologie. Die verschiedenen Produkte der Shuttletechnik werden für Regalsysteme und verfahrbare Transportsysteme eingesetzt. Es wird, wie nachfolgend gezeigt, zwischen zwei Produktfamilien unterschieden:

1. Kompaktlagertechnik im Niedriglastbereich als Systemtechnik mit Regalshuttle-, Transport- und Kommissioniertechnologie bis 120 kg; hierfür wurden erste Prototypen als Entwicklungsmuster einer Anwendung für 70 kg und einer Anwendung für 120 kg als maximale Zuladung je Shuttlefahrzeug installiert. In diesem Zusammenhang wird auch die erforderliche Fördertechniktechnologie angeboten.
2. Schwerlasttechnik als Systemtechnik mit Verfahrwagen- und Transporttechnologie bis 10 000 kg; zukünftig soll in der Schwerlasttechnik die Regalshuttle- und Kommissioniertechnologie erweitert werden.

Die technologischen Schwerpunkte sind umfassend an den Anforderungen der Produktionslogistik und damit der Industrie 4.0 ausgerichtet.

2 EINLEITUNG

In einer Vorstudie wurden die Schwachstellen des Shuttlefahrzeug-Prototyps (siehe Abb. 2) analysiert und niedergeschrieben. Auf Basis dieser Vorstudie sollte das Shuttlefahrzeug mit der maximalen Zuladung von 120 kg weiter- bzw. neuentwickelt werden.

Die Motivation für die Durchführung dieser Masterarbeit begründet sich aus der Notwendigkeit einer marktgerechten Neu- und Weiterentwicklung des Shuttlefahrzeuges, um die Anforderungen des Marktes erfüllen und das signifikante Marktpotenzial dieser Systemtechnik uneingeschränkt nutzen zu können.

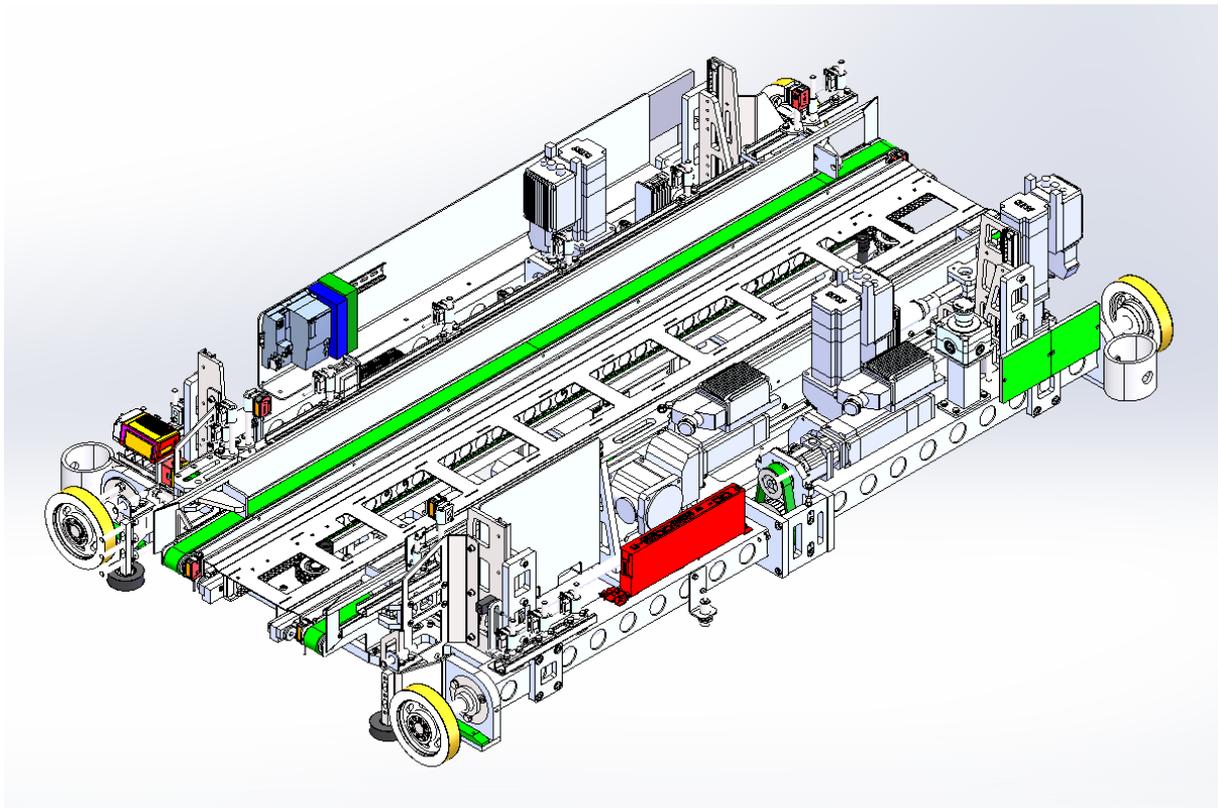


Abb. 2: Shuttlefahrzeug-Prototyp, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Ziel der Entwicklung ist es, das Produkt Kompaktlagertechnik mit der Ausführung des Niederlastshuttles für 120 kg Gesamtzuladung neu bzw. weiterzuentwickeln, sodass die Anforderungen des Marktes hinsichtlich Lagerdichte, Durchsatz und Verfügbarkeit wie auch jene nach einer gewinnbringenden Markteinführung für die Fb Industry Automation gesichert bzw. nachhaltig durchgeführt werden kann. Ein besonderer Fokus der Arbeit gilt der Antriebstechnik in Abhängigkeit von der Energieversorgung sowie der Steuerungs- und Sicherheitstechnik. Zudem soll ein modularer Systemaufbau des Regalshuttles berücksichtigt werden.

Die positive Weiterentwicklung hinsichtlich der Lagerdichte wird durch die Reduktion der Shuttlefahrzeug-Abmessungen gesichert. Die Neuauslegung des Antriebssystems sollte den gewünschten Fortschritt bezüglich des Durchsatzes garantieren und der modulare Systemaufbau zukünftig die Verfügbarkeit des Shuttlefahrzeuges deutlich verbessern.

3 LOGISTIK

Für die Neuentwicklung eines Gerätes ist es essenziell, zu wissen, in welchen Bereichen der Logistik das Gerät eingesetzt werden soll. Die Logistik selbst ist ein Überbegriff und wird in diesem Kapitel genauer betrachtet. Zudem sollen die Einsatzbereiche der Neuentwicklung genauer erörtert werden.

3.1 Definition und Funktionen der Logistik

„Die Logistik beschreibt einen systemischen Ansatz zur umfassenden Optimierung von Fließsystemen, dazu zählen insbesondere Materialflusssysteme, über einzelne Systemgrenzen hinaus. [...] Der Kern einer Reihe von Definitionen reduziert sich auf die Rolle der Logistik als Forschung und Lehre der Planung, Organisation und Kontrolle solcher Fließsysteme.“¹

Mit Blick auf die zuvor genannte Definition ist die Logistik die wissenschaftliche Lehre der Planung, Gestaltung, Verwaltung und Kontrolle des Material- und Informationsflusses des Unternehmens. Sie basiert auf

- der Technik (fertigungs-, transport- und lagertechnische Komponente des Materialflusses),
- der Informatik (Elemente des Informationsflusses) sowie
- der Betriebswirtschaft (wirtschaftliche Komponente).²

Die Logistik innerhalb eines Unternehmens wird durch Funktionen gesteuert. Letztere sind kontinuierlich zu verbessern und optimieren. Beispiele für solche operativen Funktionen werden nachfolgend genannt.

- Material- und Güterfluss: Transportieren, Lagern, Kommissionieren, Verpacken, Steuern
- Daten- und Informationsfluss: Erfassen, Speichern, Übertragen, Verarbeiten, Ausgeben
- Führungsfunktionen: Planen, Bewerten, Entscheiden, Kontrollieren, Überwachen³



Abb. 3: Logistik 4.0, Quelle: MMLogistik (2016), Online-Quelle [30.08.2020]

¹ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 15

² Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 1-2

³ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 1-2

Zudem wird in der Logistik vermehrt auf die Digitalisierung gesetzt – auch um den Daten- und Informationsfluss innerhalb des Betriebes zu steigern (siehe Abb. 3).

Die Logistik ist der Schlüssel zur Verbesserung und Optimierung der Betriebsinfrastruktur. Ziel ist es, die Marktleistung zu verbessern, Rationalisierungspotenziale zu erkunden und die Bereitstellung hochwertiger Dienstleistungen sicherzustellen. Die Logistik ist auch ein Planungswerkzeug für die Gestaltung betriebsinterner und unternehmensübergreifender Prozesse.⁴

3.2 Ziele der Logistik

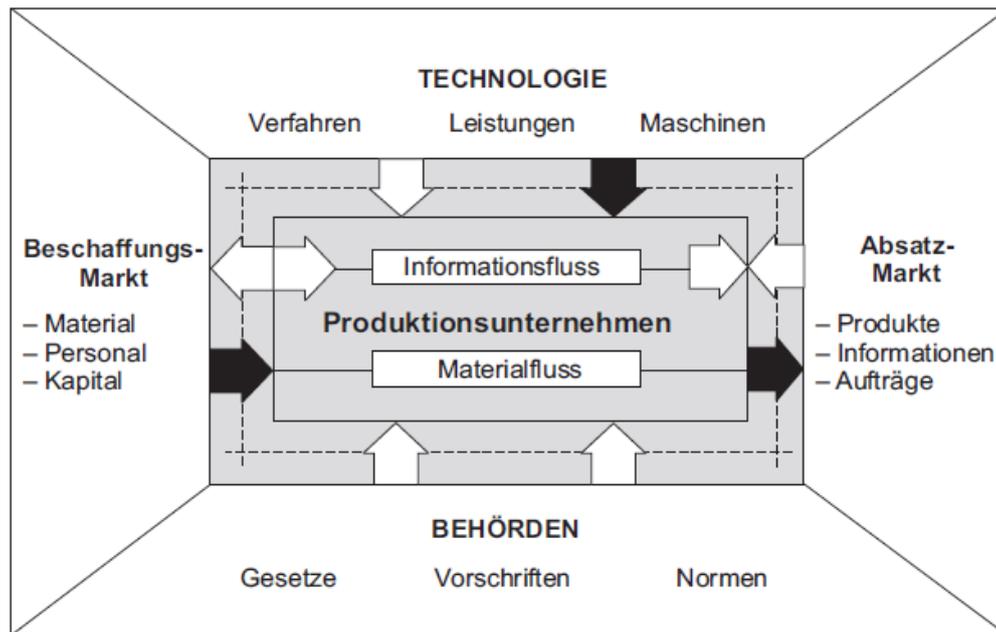


Abb. 4: Schnittstellen eines Unternehmens, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 1

Um die Ziele der Logistik definieren zu können, muss man zuvor das Unternehmen und deren Schnittstellen betrachten. Abb. 4 zeigt die Schnittstellen eines klassischen Produktionsunternehmens. Generell verfolgt ein Unternehmen die Absicht, Leistungen für Dritte bei Erzielung eines Gewinnes zu erbringen. Mit dem diesem Wissen lassen sich die Ziele der Logistik wie folgt zusammenfassen:

- Reduzierung der Kosten für den operativen Material- und den dazugehörigen Informationsfluss
- Erhöhung der eigenen Leistung⁵

Diese Ziele werden durch Einhaltung der *6Rs der Logistik* gewährleistet:

- richtigen Ware zum
- richtigen Zeitpunkt in der
- richtigen Zusammensetzung und der
- richtigen Qualität am

⁴ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 1-2

⁵ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 1-2

- richtigen Ort zum
- richtigen Preis.⁶

3.3 Unternehmenslogistik bzw. Intralogistik

Für die Erklärung der Unternehmenslogistik wurde Abb. 4, in der die Schnittstellen des Unternehmens gezeigt wurden, um die Struktur der innerbetrieblichen Logistik erweitert (siehe Abb. 5). Als *Unternehmenslogistik* gilt die Logistik des Unternehmens, auch als *Intralogistik* bekannt. Diese beinhaltet neben der Durchführung des innerbetrieblichen Materialflusses auch dessen Optimierung mit Hilfe technischer Systeme und Dienstleistungen.⁷

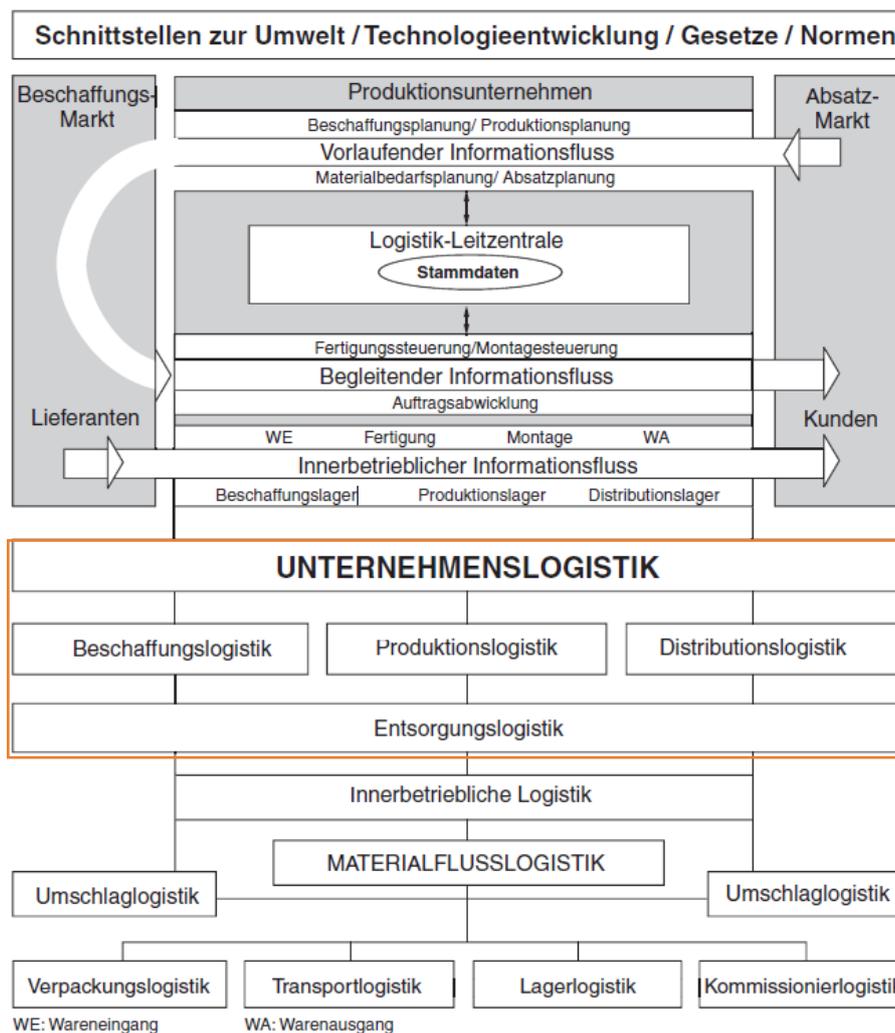


Abb. 5: Struktur eines Unternehmens, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 4

Die Aufgabe der Unternehmenslogistik besteht darin den Systemfluss hinsichtlich Material, Waren und Produktion in jeder relevanten Richtung wirtschaftlich zu planen, zu steuern und zu kontrollieren. Hierfür muss auch auf externe Faktoren wie Lieferanten und Kunden sowie Umwelt, Gesetze und Normen

⁶ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 16

⁷ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 4

geachtet werden. Daraus ergibt sich für die Unternehmenslogistik folgende horizontale Gliederung für ein Produktionsunternehmen (siehe Abb. 5):

- Beschaffungslogistik
- Produktionslogistik
- Distributionslogistik
- Entsorgungslogistik⁸

3.3.1 Beschaffungslogistik

Die Beschaffungslogistik ist die Basis jedes Unternehmens, da hier grundlegende Aufgaben des Waren- sowie des Materialflusses mit dem zugehörigen Informationsfluss vorbereitet werden. Konkret ist die Beschaffungslogistik dafür verantwortlich, dem Unternehmen Produkte nach Bedarf zur Verfügung zu stellen. Die betreffende Kette reicht vom Lieferanten über den Wareneingang bis zum Beschaffungslager sowie später zur Produktion. Die Beschaffungslogistik beschränkt sich nicht auf interne Prozesse, sondern überlegt und handelt entsprechend auch mit externen Anbietern – meist Speditionsfirmen. Der Zweck besteht darin, Waren zu kaufen, die zur Erbringung von Dienstleistungen wie Rohstoffen und Maschinen sowie Informationen, Kapital, Energie, Personal und Dienstleistungen auf dem Markt benötigt werden. In geschäftlicher Hinsicht ist die Beschaffung der Marktwirtschaft zugeordnet. Die Beschaffung von Logistiksystemen, Maschinen und Anlagen gelten als Investitionsgüter und sind in der Regel mit Investitionsentscheidungen verbunden.⁹

3.3.2 Produktionslogistik

Die Produktionslogistik steht im Mittelpunkt der Unternehmenslogistik, einschließlich des Betriebsprozesses von Materialien und Waren, des zugehörigen Informationsflusses und der damit verbundenen Vertriebs- und Managementfunktionen, die zur Erfüllung der Produktionsaufgaben erforderlich sind. Ziel der Produktionslogistik ist es, die passenden Materialien pünktlich und möglichst kostengünstig der Produktion bereitzustellen. Auch hier gilt: Die richtige Menge der richtigen Ware soll am richtigen Ort zur richtigen Zeit bereitstehen. Die Aufgabe der Produktionslogistik besteht in der Verfügbarmachung der Materialien an den Produktion- sowie Fertigungsstellen. Eine grundlegende Aufgabe liegt darin, den internen Materialfluss für den Transport zwischen Betriebsmitteln und Arbeitsplätzen sicherzustellen, zu optimieren und zu nutzen. Produktionslogistik plant, entwirft, steuert und kontrolliert den Material- und Informationsfluss in der Produktion über die verschiedenen Fertigungs- und Montagestufen des jeweiligen Produktionslagers hinweg bis zum Distributionslager.¹⁰

⁸ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 3

⁹ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 6

¹⁰ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 6

3.3.3 Distributionslogistik

Für die art- wie auch mengenmäßige Bereitstellung der produzierten Handelswaren für die Kunden und Abnehmer ist die Distributionslogistik zuständig. Zu den Aufgaben Letzterer zählen neben der Lager- und Transportplanung sowie der Kommissionierung und Verpackung der Ware auch die Standortwahl des Distributionslagers. Die Distributionslogistik soll eine kostengünstigste, termingerechte Bereitstellung der Güter gewährleisten. Hierzu bedarf es der richtigen Planung, Gestaltung, Steuerung und Kontrolle des Material- wie auch Informationsflusses vom Unternehmen zum Kunden. In der Distributionslogistik werden daher folgende Funktionen eingesetzt (siehe Abb. 6):

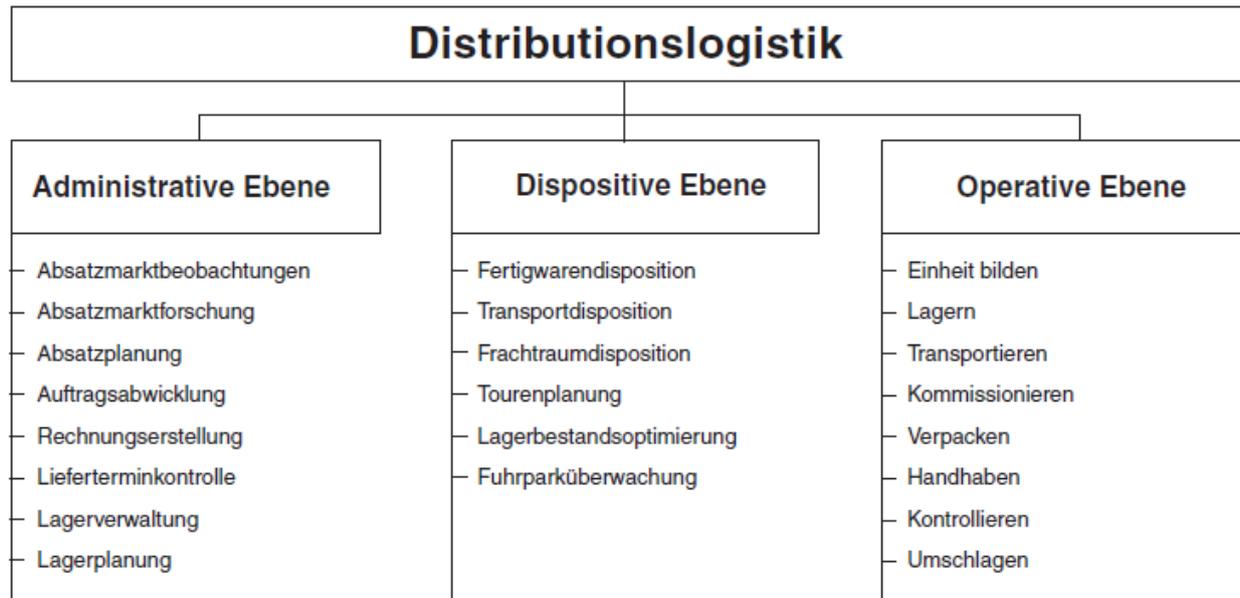


Abb. 6: Funktionen der Distributionslogistik, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 7

3.3.4 Entsorgungslogistik

Die Entsorgungslogistik begleitet die Unternehmenslogistik in jedem Bereich. Die Kosten der Entsorgung für die Abfälle im gesamten Unternehmen stellen einen bedeutenden Faktor der betrieblichen Kostenplanung dar. Die Entsorgungslogistik adressiert diese Thematik innerhalb eines Unternehmens, sie steuert und überwacht die Entsorgungsabläufe im Rahmen eines eigenständigen Bereiches. Die Entsorgungskosten von Materialien können im Unternehmen durch folgende Faktoren gemindert werden:

- Weiterverwendung, z. B. als Baumaterialzuschlag, Verbrennung
- Wiederverwendung, z. B. Altpapier, Schrott
- Weiterverwendung, z. B. Mehrwegebehälter
- Abfallverminderung
- Abfallvermeidung, Verzicht auf nicht recyclingtaugliche Verpackung¹¹

Im Allgemeinen gilt in der Entsorgungslogistik folgende Regel: Vermeiden vor Verwerten und Verwerten vor Beseitigen. Bei der Entsorgung von Stoffen sind zahlreiche Vorschriften einzuhalten. Je mehr Abfall- und Reststoffe in einem Unternehmen vorhanden sind, desto mehr Vorschriften müssen beachtet

¹¹ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 8

werden.¹² Die in einem Produktionsunternehmen auftretenden Reststoffe werden in Abb. 7 in einer Entsorgungsstruktur dargestellt.

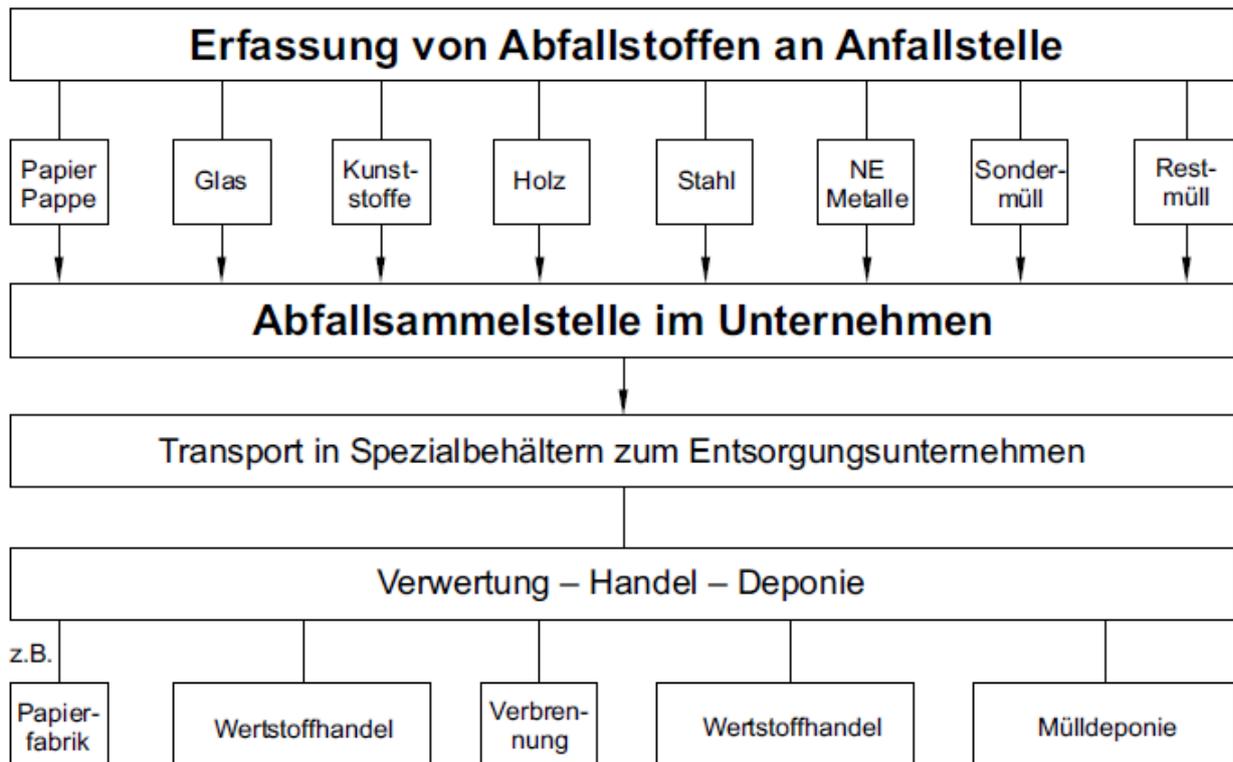


Abb. 7: Entsorgungsstruktur von Reststoffen in einem Produktionsunternehmen, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 9

¹² Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 8

4 LAGERN UND KOMMISSIONIEREN

Dieses Kapitel behandelt das allgemeine Lagern und Kommissionieren in einem Unternehmen. Hierbei werden die unterschiedlichen Lagersysteme sowie deren Lagerstrategien und Kommissioniermethoden näher betrachtet. Zudem wird auf das automatische Kleinteilelager hinsichtlich der Regalbediengerät(RBG)- und Shuttletechnik speziell eingegangen.

4.1 Transportgut

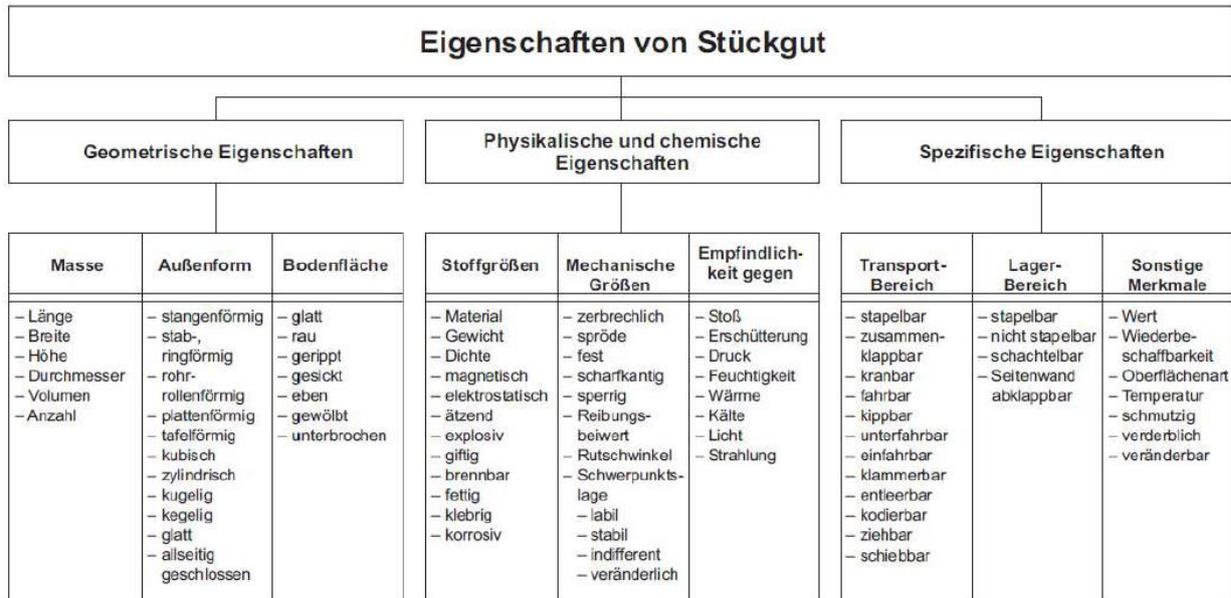


Abb. 8: Eigenschaften von Stückgut, Quelle: Martin, Transport und Lagerlogistik (2009), S. 60

Eine entscheidende Rolle spielt das Transportgut für die Auswahl und Festlegung eines Transportmittels sowie für die Planung eines Lagers. Lager- und Transportgut des internen Materialflusses sind feste, flüssige sowie gasförmige Stoffe (siehe Abb. 8). Fertigungs- und Montageteile, Pakete, Kisten, Dosen, Flaschen, Ringe, Ballen, Sacke, Behälter oder auch Trays sind typisches Stückgut in einem Betrieb. Aufgrund der unterschiedlichen Formen bzw. der großen Stückzahl wird Stückgut auf Transporthilfsmitteln zusammengefasst. In den meisten Intralogistikanlagen kommen folgende Transporthilfsmittel zum Einsatz: Paletten, Kunststoffbehälter, Kartons für Transport bzw. Lagerung sowie Einzelprodukte.¹³

4.1.1 Palette

Paletten sind unterfahrbare Transport- und Lagerhilfen. Einerseits werden sie verwendet, um kleine Gegenstände wie Kisten, entsprechend dimensionierte Container und Pakete zu größeren Ladeeinheiten zu gruppieren. Andererseits kommen sie zum Einsatz, um Waren, die sonst nicht von unten gefahren werden können, effizient transportierten zu können. Paletten können aus Pressplatten, Holz, Kunststoff,

¹³ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 62ff

Stahl oder Aluminium bestehen; sie sind teils standardisiert und teils an die zu transportierende Ladung angepasst. Die meistverwendete Konstruktion ist die EPAL-Europalette (siehe Abb. 9). Deren Abmessungen sind standardisiert: 1200 x 800 x 144 mm. Die Ladehöhe kann bis zu 2 m und die Zuladung bis zu 1000 kg betragen.¹⁴



Abb. 9: EPAL-Europalette, Quelle: Rotom, Europalette (2020), Online-Quelle [26.10.2020]

4.1.2 Transport- und Lagerbehälter

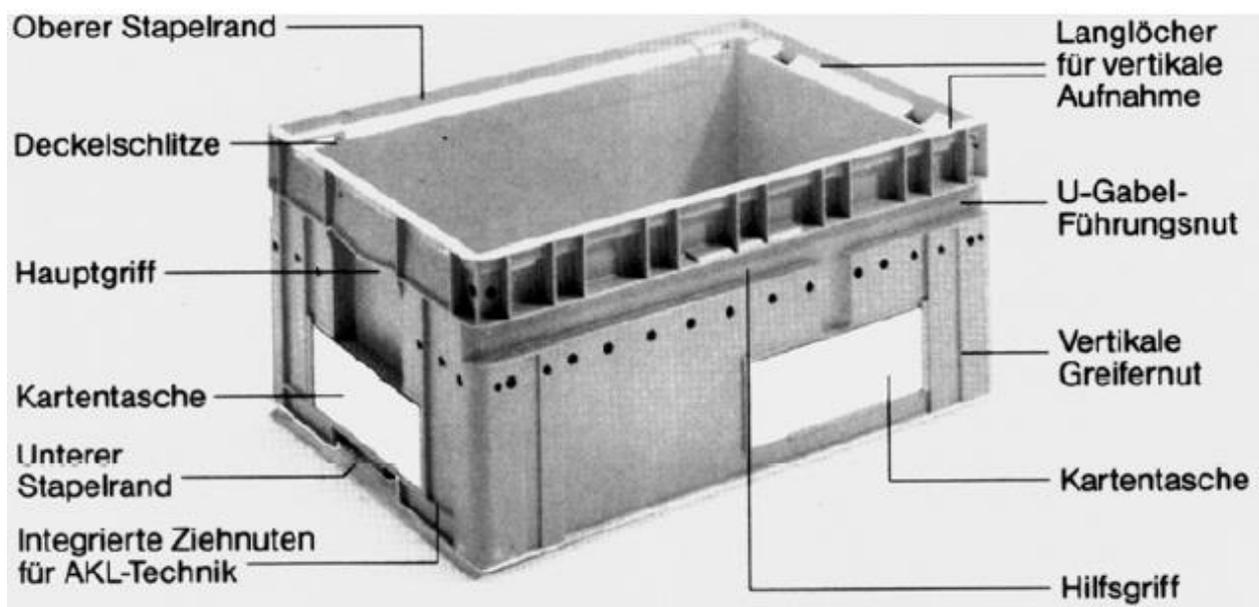


Abb. 10: KLT-Behälter, Quelle: Martin, Transport und Lagerlogistik (2009), S. 63

Die sogenannten nicht unterfahrbaren Transport- und Lagerhilfen sind Kleinladungsträger (KLT) wie Kleinbehälter, Schachteln, Kisten oder Kästen. Einige davon sind genormt oder standardisiert und haben im Regelfall eine modulare Größenverteilung. Sie bestehen aus Holz, Pappe, lackiertem bzw. verzinktem Stahl oder farbigem Kunststoff. Abb. 10 zeigt einen KLT-Behälter, der gleichermaßen für automatische, mechanische und manuelle Handhabung einzusetzen ist. Er gewährleistet nicht nur vertikalen Formschluss, sondern auch waagrechten Formschluss durch die am Boden verteilten Stapelfüße. Die

¹⁴ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 65f

KLT-Behälter haben meist Abmessungen von 600 x 300 mm oder 400 x 300 mm. Aufgrund dessen können sie optimal auf einer Europalette gelagert werden.¹⁵

4.1.3 Weitere Ladungsträger

Weitere Ladungsträger für automatisierte Systeme können unterschiedliche Arten von Kartonagen, Trays, Beuteltaschen sowie Kleiderbügel sein.

4.2 Lagerstrategien in einem Unternehmen

In diesem Unterpunkt werden gängige Lagerstrategien erklärt. Die Lagerstrategien hängen üblicherweise direkt mit dem Lagersystem zusammen (siehe Unterpunkt 4.3).

4.2.1 FIFO

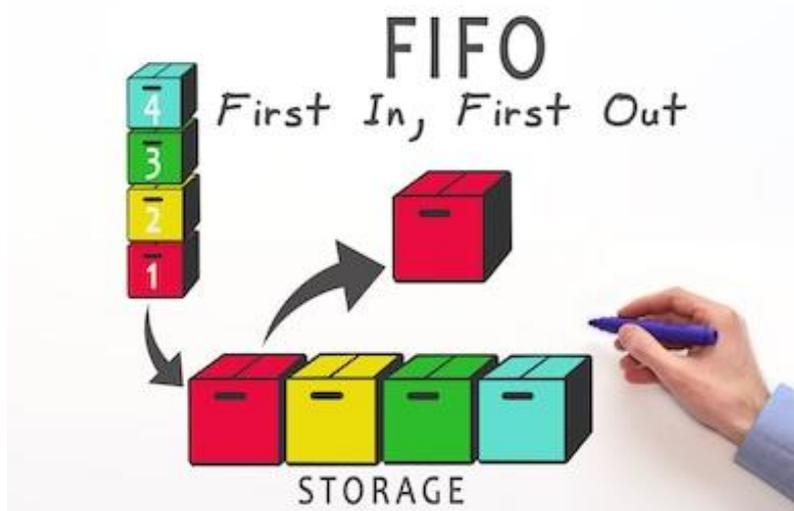


Abb. 11: FIFO-Prinzip, Quelle: Shutterstock (2020), Online-Quelle [26.10.2020]

Nach dem FIFO(First-In-First-Out)-Prinzip werden die zuerst gelagerten Waren auch als erste wieder ausgelagert. Dies kann sogenannte *Ladenhüter* vermeiden. Das Akronym FIFO ist auch ein Synonym für *First Come – First Served* (FCFS). Im Allgemeinen ist FIFO im Bereich des Warenmanagements ein gängiges Verfahren, da aus Sicht des Zyklusendes das älteste, gelagerte Inventar nach Möglichkeit auch zuerst verwendet werden sollte (siehe Abb. 11).

4.2.2 LIFO

Beim LIFO(Last-In-First-Out)-Prinzip werden die zuletzt gelagerten Verbrauchsmaterialien zuerst entnommen. Der Begriff LIFO ist gleichbedeutend mit *Last Come – First Served* (LCSD). Das LIFO-Prinzip ähnelt einem Papierstapel. Das Abrufen der Elemente erfolgt entgegen der Reihenfolge der vorherigen Platzierung, sodass das erste Element zuletzt abgerufen wird. Prinzipiell ist diese Form der Lagerung nicht wünschenswert, aber manchmal durch die Konsequenz der Lagerführung unvermeidlich.

¹⁵ Vgl. Martin, Transport- und Lagerlogistik, S. 62f

4.2.3 FEFO

Nach dem FEFO(First-Expire-First-Out)-Prinzip“ werden im Lebensmittelbereich die Produkte nach Mindesthaltbarkeitsdatum aussortiert.

4.2.4 HIFO

Beim HIFO(Highest-In-First-Out)-Prinzip werden die Elemente mit dem höchsten Wert zuerst wieder entnommen.

4.2.5 LOFO

Das LOFO(Lowest-In-First-Out)-Prinzip beschreibt jede Speichermethode, bei der dem Speicher zuerst die Elemente mit dem niedrigsten Wert entnommen werden. Bei der preisabhängigen LOFO-Methode wird davon ausgegangen, dass Waren, die zu den niedrigsten Kosten hergestellt oder erworben wurden, zuerst konsumiert oder verkauft werden. Diese Methode führt zu hohen mathematischen Bewertungen von Lagerbeständen.

4.3 Lagersysteme in einem Unternehmen

Die Lagerung von Stoffen spielt in einem Unternehmen eine essenzielle Rolle. Für die unterschiedlichen Bereiche der Logistik können verschiedene Lagersysteme individuell verwendet werden. Oft kommen auch Mischformen zur Anwendung. Tab. 1 zeigt eine grundlegende Differenzierung von Lagersystemen. Zudem gibt es primäre Auswahlgrößen eines Lagersystems, die wie folgt lauten:

- Anzahl verschiedener Artikel
- Artikelabmessungen und -gewichte
- Mengen pro Artikel
- geforderte Ein-/Auslagerleistung oder Durchsatz
- Flächen- und Raumbedarf
- Zugriffsverhalten und Bedienstrategien¹⁶

¹⁶ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 73

Merkmal	Ausprägungsformen	Beschreibung	gängige Zielsetzungen
Lagertechnik	Bodenlagerung	Ladegut wird unmittelbar auf dem Boden gelagert, ggf. gestapelt	große Mengen weniger Artikel kostengünstig lagern
	Regallagerung	Ladegut wird in Regalen gelagert, zumeist auf einem Ladehilfsmittel.	Direktzugriff auf große Artikelanzahl, hohe Flächennutzung
Lagerform	Blocklagerung	Lagergüter werden unmittelbar über-, hinter und nebeneinander gelagert.	hohe Raumnutzung und geringe Bedienwege
	Zeilenlagerung	Ladegüter werden über- und hintereinander gelagert; zwischen Regalfächen bestehen Bedienwege.	Direktzugriff auf größere Artikelanzahl
Lagerort	Statisches Lagersystem	Lagergut verbleibt zwischen Ein- und Auslagerung am selben Ort, d.h. es führt keine Ortsveränderung durch	kostengünstige Lagertechnik, geringe Beanspruchung des Lagergutes
	Dynamisches Lagersystem	Ladeeinheiten werden nach der Einlagerung bewegt. Ein-/Auslagerung am selben Ort ist dennoch möglich	geringe Bedienwege, Direktzugriff trotz hoher Volumennutzung

Tab. 1: Differenzierung der Lagersysteme, Quelle: Hompel, Warehouse Management (2010), S. 74

4.3.1 Bodenlagerung

Bei der Bodenlagerung werden die Güter direkt auf dem Boden gelagert bzw. darauf gestapelt. Die mögliche Stapelhöhe bei dieser Lagerart hängt von mehreren Faktoren ab:

- räumliche Gegebenheiten
- Bedientechnik (Kran, Stapler etc.)
- Stapelbarkeit der Güter (Ware auf Europalette, Gitterbox etc.)

Die Bodenlagerung ist eine kostengünstige Lagerart. Zudem ist sie flexibel an die Gegebenheiten anpassbar. Die Bedienung erfolgt meist manuell. Selbst in hochautomatisierten Lagersystemen finden sich Blocklagerbereiche. Insbesondere in den Zonen des Wareneingangs und -ausgangs werden Güter bzw. Waren oft bis zur weiteren Verbringung in Blockform gelagert bzw. gepuffert. Typischerweise findet sich diese Lagerform oft in Kommissionierbereichen, in denen kurzfristig große Mengen zu kommissionieren sind. Bei der Bodenlagerung kommen zwei Typen vor, die in den nachfolgenden Unterpunkten genauer erklärt werden.¹⁷

¹⁷ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 74

4.3.1.1 Bodenblocklagerung

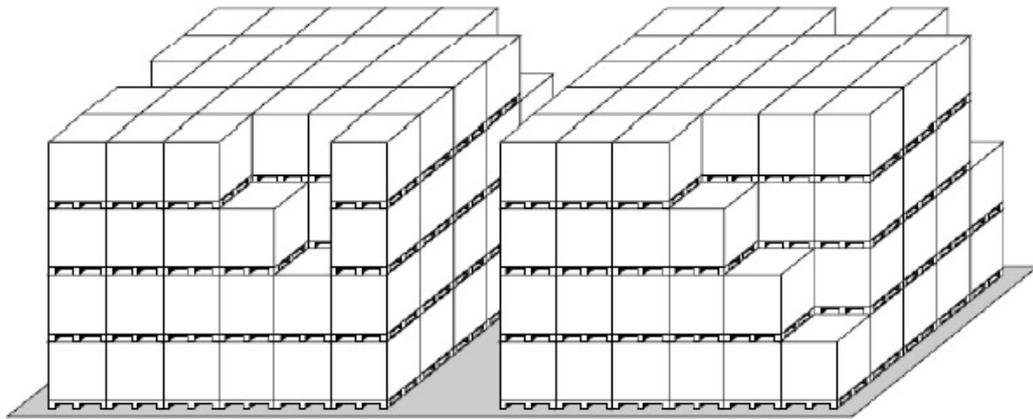


Abb. 12: Bodenblocklagerung, Quelle: Hompel, Warehouse Management (2010), S. 75

Bei der Bodenblocklagerung (siehe Abb. 12) werden die Güter zu einem kompakten Block angeordnet, also unmittelbar neben-, über- und hintereinander. Ein Vorteil bei dieser Lagerart ist, dass man den höchsten Raumnutzungsgrad erzielen kann. Praktisch einsetzbar ist diese Lagerart aber nur dort, wo eine LIFO-Strategie möglich ist, da immer nur die vorderste Säule der Güter verfügbar ist.¹⁸

4.3.1.2 Bodenzeilenlagerung

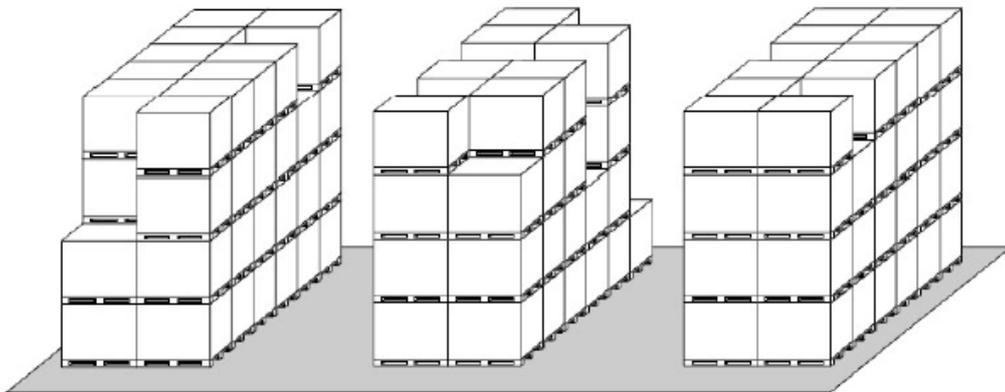


Abb. 13: Bodenzeilenlagerung, Quelle: Hompel, Warehouse Management (2010), S. 75

Die Bodenzeilenlagerung (siehe Abb. 13) ähnelt der Bodenblocklagerung. Der kompakte Block wird hierbei im Rahmen der Lagerung mehrfach in Zeilen unterteilt. Dadurch steigert sich die Zugänglichkeit der Güter; zugleich minimiert sich auch der Raumnutzungsgrad.¹⁹

4.3.2 Statische Regallagerung

Regallagerung wird meist zur Optimierung der Flächennutzung aufgrund einer besseren Nutzung der Höhe verwendet. Außerdem bewirken Regale eine gesteigerte Ordnung, was die Übersicht der Lagerung verbessert. Die jeweilige Ware wird im Regal in ein separates Fach eingelagert. Dieses wird auch oft

¹⁸ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 75

¹⁹ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 75

Stellplatz genannt und sollte eindeutig identifizierbar sein. Für die Auswahl des passenden Regals zur Lagerung der Artikel gibt es einige Auswahlkriterien:

- Räumliche Gegebenheit
- Ware (Paletten, Behälter etc.)
- Ladehilfsmittel (Stapler, RBG, Shuttle etc.)
- Lagerstrategie
- Kosten²⁰

4.3.2.1 Palettenregale

Die häufigste Lagerart für Paletten sind Palettenregale. Ein Palettenregal ist simpel aufgebaut. Grundsätzlich wird dabei zwischen Längs- und Querlagerung der Paletten unterschieden. Bei der Längslagerung besteht das Regal aus Stützprofilen und Längstraversen, welche bei den Stützprofilen befestigt (verschweißt, eingehakt oder verschraubt) werden. Die Einlagerung erfolgt auf den beiden Längstraversen. Bei der Querlagerung werden meist zusätzliche Auflegewinkel montiert.²¹ Eine weitere gängige Methode ist eine Einbringung eines Fachbodens, meist aus Holz. Die gängigere Lagerart ist die Längslagerung, die auf Grund der effizienteren Raumnutzung durch die Geometrie der Standard-Europalette (Abmessung 1200 mm x 800 mm) zurückzuführen ist.²² Abb. 14 zeigt ein Palettenregal der Fa. Bito. Hierbei sind die Stützprofile und die blauen Längstraversen gut zu sehen.



Abb. 14: Palettenregal, Quelle: Bito Lagertechnik, Palettenregal (2020), Online-Quelle [13.09.2020]

²⁰ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 76-77

²¹ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 78

²² Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 78

4.3.2.2 Behälterregale

Um den Raum optimal zu nutzen, ist für die Lagerung geringer Mengen oder kleiner Gegenstände bzw. von Kleinteilen das klassische Palettenmaß (800 x 1200 mm) keine zielorientierte Lösung. Daher wird in solchen Fällen die Verwendung von Behältern oder Tablarern (600 x 400 mm) favorisiert.²³

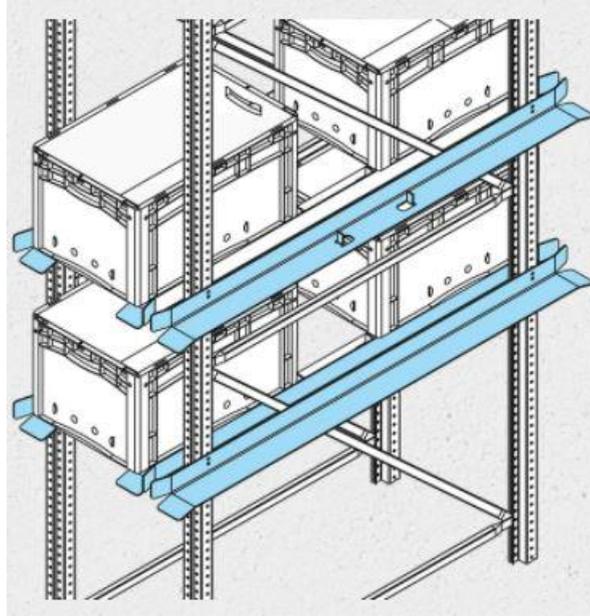


Abb. 15: Winkelprofile eines Behälterregals, Quelle: BITO (2020), Online-Quelle [26.10.2020]

Ein Tablar ist eine Blechschale mit einer stirnseitig montierten Eingriffsleiste. Tablare sind wegen der geringen Stückgewichte einfach auf Winkelprofilen (siehe Abb. 15) zu lagern, die seitlich an den Lagerfächern angebracht sind. Durch das niedrige Stückgutgewicht werden auch effektivere Formen der Lagerfachbedienung möglich, die zu besonderen Ausprägungen der Zeilenregale geführt haben. Diese werden als Behälter-, Kasten- oder Tablarregale bezeichnet.²⁴

²³ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 78f

²⁴ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 78f



Abb. 16: Regalbediengerät eines automatischen Kleinteilelagers, Quelle: SSI Schäfer AKL (2020), Online-Quelle [16.08.2020]

Behälterregale werden im Allgemeinen als *Automatische Kleinteilelager (AKL)* bezeichnet. Im Bereich der AKL gibt es zwei Möglichkeiten der Bedienung:

- Regalbediengerät (RBG, siehe Abb. 16)
- Shuttlesystem (siehe Abb. 17)



Abb. 17: Shuttlesystem eines automatischen Kleinteilelagers, Quelle: Logistra Shuttle (2020), Online-Quelle [16.08.2020]

Ein Regalbediengerät ist ein elektrisches Hebezeug, das sich in zwei Richtungen bewegen kann: entlang der Gasse in Fahrtrichtung (X-Achse) sowie in Hubrichtung (Y-Achse). Die horizontale Achse (Z-Achse) wird nur zur Ein- und Auslagerung genutzt. Die beiden Antriebe (Fahrwerk und Hubwerk) arbeiten gleichzeitig, um die Waren schnell und exakt am Lagerplatz zu positionieren. Beim Lagerplatz wird das Lastaufnahmemittel (Rollenbahn oder Teleskopgabel) ausgefahren, um die Fracht ein- oder auszulagern. Das Fahrwerk besteht aus Laufrädern, die auf der gesamten Fahrtstrecke über (Eisenbahn-)Schienen geführt werden. Die Energieversorgung erfolgt meist über Stromabnehmer entlang der Fahrschienen. Abhängig vom Leistungsbedarf werden eines oder beide Räder angetrieben. Der Hauptteil des RBGs ist der Mast. Dieser trägt die Ladung sowie das Gesamtgewicht des Fahrzeugs, weshalb er besonders stabil gebaut sein muss. Bei höheren Belastungen wird auch ein Zweimastgerät eingesetzt. Meist wird das Hubwerk über ein Seil, einen Riemen oder eine Kette angetrieben. Auf dem Hubschlitten befindet sich das Lastaufnahmemittel (LAM) zum Handling des Transportgutes. Die Kommunikation zum Lagerverwaltungssystem findet größtenteils über Funk statt.²⁵

Shuttlelagersysteme sind eine Form von AKL-Systemen, die die Auftragskommissionierung und -sequenzierung durch das Ware-zur-Person-Prinzip (näheres im Unterpunkt 4.4.2) unterstützt. Je nach Hersteller gibt es unterschiedliche Ausführungen dessen, wie die Ware in das Regalsystem ein- und ausgelagert wird. Jedoch lassen sich die Shuttles wie folgt kategorisieren:

- 1D-Systeme (Shuttle bewegt sich in einer Gasse und in einer Ebene)
- 2D-Systeme
 - horizontal (Shuttle bewegt sich über mehrere Gassen in einer Ebene)
 - vertikal (Shuttle bewegt sich in einer Gasse über mehrere Ebenen)
- 3D-Systeme (Shuttle bewegt sich über mehrere Gassen und über mehrere Ebenen)

Die vertikale Bewegung des Shuttles innerhalb des Shuttle-Systems findet über einen Vertikalumsetzer statt. In 3D-Systemen sowie in vertikalen 2D-Systemen (siehe Abb. 17) kann die Anzahl der Shuttles nach Kapazitätsanforderungen trennscharf dimensioniert werden. In den anderen Systemen muss mindestens ein Shuttle pro Regalebene arbeiten. Im Gegensatz zu den RBGs können die Shuttle-Systeme keine diagonalen Bewegungen innerhalb des Systems durchführen. Bei Erhöhung der Shuttleanzahl schafft ein Shuttle-System hinsichtlich der Spielzeiten im Gegensatz zu einem AKL-System mittels RBG eine deutlich höhere Leistung.²⁶

²⁵ Vgl. Technologieradar Regalbediengerät (2020), Online Quelle [16.08.2020]

²⁶ Vgl. Technologieradar Shuttle-Systeme (2020), Online Quelle [16.08.2020]

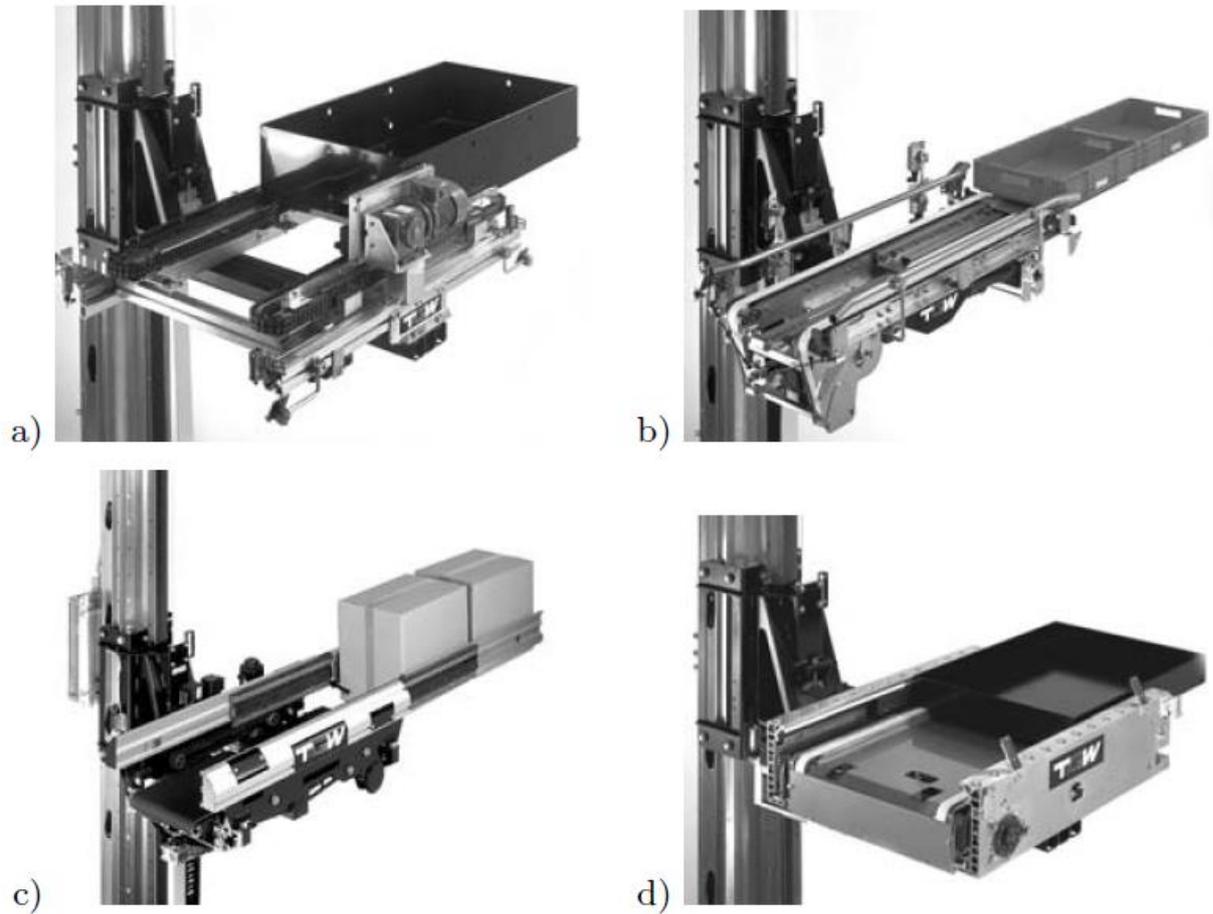


Abb. 18: Lastaufnahmemittel, Quelle: Hoppel, Warehouse Management (2010), S. 109

Eine Gemeinsamkeit beider Systeme ist das jeweils verbaute Lastaufnahmemittel. Abb. 18 zeigt verschiedene Varianten der Lastaufnahmemittel. Je nach Eigenschaften des Transportguts werden folgende Arten unterschieden:

- a) Ziehvorrichtung (für Kleinladungsträger, z. B. Behälter und Kartons)
- b) Teleskopiereinheit (für schwere Ladungsträger, z. B. Paletten oder Behältern)
- c) Greifer (für Kleinladungsträger, z. B. Behälter und Kartons)
- d) Reibriemen (für Kleinladungsträger, z. B. Behälter und Kartons)²⁷

²⁷ Vgl. Hoppel, Warehouse Management (2010), S. 108

4.3.2.3 Hochregallager

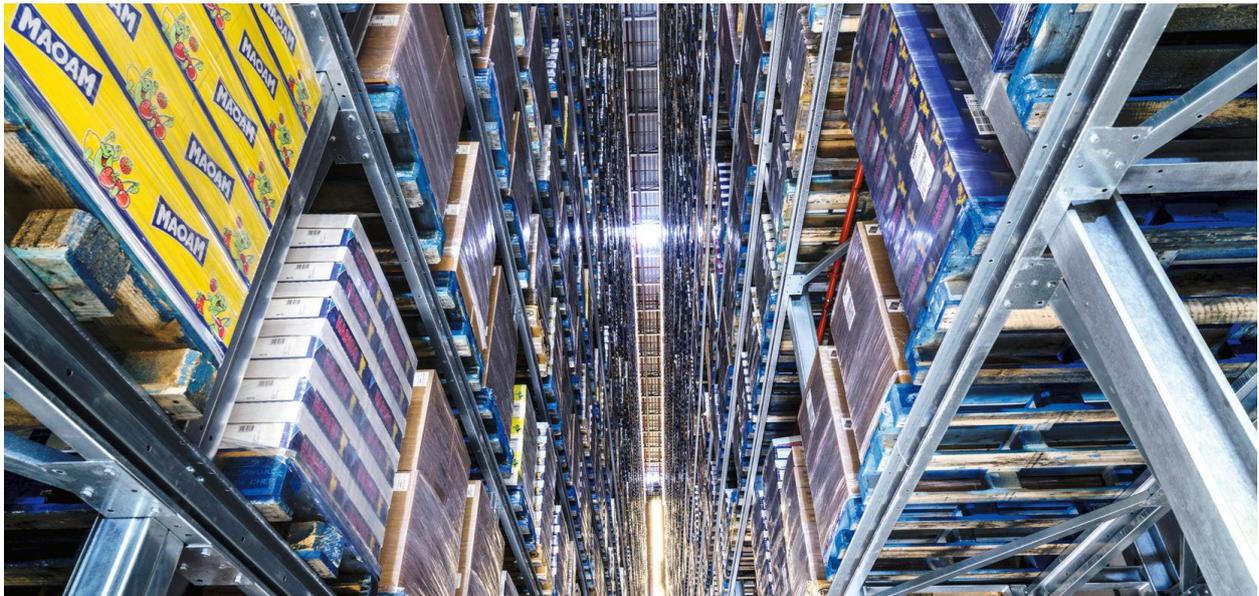


Abb. 19: Hochregallager, Quelle: SSI Schäfer Hochregallager (2020), Online-Quelle [26.10.2020]

Der Begriff *Hochregallager* (HRL) wird häufig als Synonym für hohe Regalbauten verwendet, tatsächlich gilt er Begriff jedoch nur für Regalhöhen ab 12 m oder mehr. Unter dem Begriff versteht man ferner ein Hochregalsystem mit fest installierten Bediengeräten (siehe Abb. 19). Die HRL werden in Höhen von bis zu etwa 50 m erbaut; sie können mehr als 100 000 Palettenplätze oder mehr als 100 000 Behälterplätze aufnehmen. Solche Systeme werden üblicherweise in einer Silostruktur implementiert, in der eine Regalstruktur das Dach und die Wände trägt und dadurch eine reine Einzweckstruktur nur für Lagerzwecke bildet. Neben der kurzen Implementierungszeit sind die geringen Kosten einer der Vorteile von HRLs.²⁸

4.3.2.4 Fachbodenregal

Jedes Ablagefach im Regal verfügt über einen durchgehenden Ablageboden, sodass Waren jeder Größe aufbewahrt werden können. Abb. 20 zeigt ein Fachbodenregalsystem, das ein Standardregaltyp in der Kommissionierung ist, da es durch flexible einstellbare Fachhöhen, verschiedene Formen der Fachtrennung und eine Vielzahl an Zubehörteilen ideal an die Bedürfnisse der manuellen Kommissionierung angepasst werden kann. Die reguläre Regalhöhe beträgt 2 m. Durch Einsatz von z. B. Leitern können ebenfalls 3 m Höhe erreicht werden, wobei hier jedoch auf Grund der zusätzlichen Bewegungsabläufe die Kommissionierleistung beeinträchtigt wird. Außerdem können zur Ausnutzung von vorhandenen Raumhöhen mehrgeschossige Regalsysteme erbaut werden. Hierbei werden die Zu- und Bewegungsgänge direkt an den Regalstützen montiert.²⁹

²⁸ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 81

²⁹ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 81



Abb. 20: Fachbodenregal, Quelle: NEDCON Fachbodenregale (2020), Online-Quelle [26.10.2020]

4.3.2.5 Weitere Regallagerungen

Weitere Bauformen von Regalsystemen sind unter anderem:

- Kragarmregale
- Wabenregale
- Stangenlager
- Turmregale

4.3.3 Dynamische Regallagerung

Bei der dynamischen Lagerung wird zwischen zwei grundlegenden Prinzipien unterschieden:

1. feststehende Lagereinheiten in bewegten Regalen (Verschieberegale, Umlaufregale)
2. bewegte Lagereinheiten in feststehenden Regalen (Durchschubregale)

Für die Auswahl einer dynamischen Regallagerung sprechen einige Gründe, z. B. hohe Umschlagleistung bei kompakter Lagerung oder Erhöhung der Kommissionierleistung durch Wegeinsparung.³⁰

³⁰ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 85

4.3.3.1 Verschieberegale



Abb. 21: Mechanisches Verschieberegale, Quelle: Berg Lagertechnik Verschieberegale (2020), Online-Quelle [13.09.2020]

Bei Verschieberegale werden statische Zeilenregale auf eine verfahrbare Einheit gestellt, die sich sodann verschieben lässt. Diese verfahrbare Einheit wird *Fahrschemel* genannt. Verschieberegale können in unterschiedlichen Formen auftreten, z. B. als Behälter-, Paletten-, Fachboden- oder Kragarmregal (siehe Abb. 21). Die Verschieberegale werden größtenteils nicht automatisiert ausgeführt. Das Regal wird stattdessen durch einen Bediener händisch verschoben. Eingesetzt werden die Verschieberegale meist dort, wo eine hohe Raumnutzung bei geringer Lagerleistung gefordert wird. Ein klassischer Einsatzort von Verschieberegalen sind Archive.³¹

4.3.3.2 Vertikale Umlaufregale

Vertikale Umlaufregale werden auch *Paternosterregale* genannt. Sie bestehen je nach Höhe aus unterschiedlich vielen Tableaus, die innerhalb des Systems vertikal befördert werden. Auf diesen Tableaus werden die Waren gelagert. Bei diesen Systemen gibt es mindestens eine Öffnung, durch die das jeweilige Tableau aus dem geschlossenen System herausgefahren werden kann. Das Regal selbst ist aus Sicherheitsgründen, sowie zum Schutz vor unerlaubtem Zugriff geschlossen. Abb. 22 zeigt ein vertikales Umlaufregal der Fa. Kardex Remstar. Evident ist das geschlossene System mit der Entnahmeöffnung. Bei solchen Paternosterregalen lassen sich durch Nutzung der Raumhöhe auf geringer Standfläche relativ viele Artikel mit geringer oder mittlerer Menge pro Artikel einlagern. Des Öfteren werden vertikale Umlaufregale ausschließlich zur Lagerung und Kommissionierung von Kleinteilen verwendet.³²

³¹ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 86

³² Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 86



Abb. 22: Vertikales Umlaufregal, Quelle: Kardex Remstar (2020), Online-Quelle [13.09.2020]

4.3.3.3 Horizontale Umlaufregale



Abb. 23: Horizontales Umlaufregal, Quelle: DirectIndustry (2020), Online-Quelle [13.09.2020]

Im Gegensatz zu vertikalen werden bei horizontalen Umlaufregalen die Lagerfelder an einer horizontalverlaufenden Förderkette montiert. Letztere wird angetrieben, wodurch sich die Felder im Kreis bewegen (siehe Abb. 23). Darum werden diese Umlaufregale oft auch *Karussellager* genannt. Die Ware wird in diesen Lagerfeldern ein- und ausgelagert. Je nach System und Ware unterscheiden sich die

Lagerfelder. Stirnseitig gibt es eine Öffnung für den Bediener, an der die Ware bereitgestellt wird. Diese Lagerart wird, wie die vertikale Umlaufregale, zur Kommissionierung von Behälterware eingesetzt.³³

4.3.3.4 Durchlaufregale



Abb. 24: Durchlaufregal, Quelle: Dexion Durchlaufregale (2020), Online-Quelle [13.09.2020]

Das Durchlaufregal ist ein Regalblock, in dem auf mehreren Ebenen Behälter oder Paletten bereitgestellt werden. Die Dynamik der Behälter gewährleisten nach vorne geneigte Röllchenleisten, die die Ware nach vorn zur Entnahme gleiten lässt (siehe Abb. 24). Einer der Vorteile dieses Regales ist, dass die Befüllung und die Entnahme der Waren unabhängig voneinander erfolgen können. Durchlaufregale werden größtenteils bei der Kommissionierung eingesetzt. Die Befüllung der Waren kann automatisiert, aber auch händisch erfolgen.³⁴

4.4 Kommissioniermethoden

Unter dem Begriff *Kommissionierung* wird die Zusammenstellung von Kundenaufträgen verstanden. Bei diesem Vorgang handelt es sich um den zeitintensivsten, zeitkritischsten und fehleranfälligsten Teil der Arbeit im Lager. Jedes Problem im Kommissionierprozess wirkt sich direkt auf die Kundenzufriedenheit aus. Um die Fehlerrate bei der Kommissionierung niedrig zu halten, wurden deshalb verschiedene Methoden und Systeme entwickelt (siehe Tab. 2), die nachfolgend sukzessive erläutert werden.

³³ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 87

³⁴ Vgl. Hompel, Warehouse Management (2010), S. 88

	Person-zur-Ware (PzW)	Ware-zur-Person (WzP)	Kombination aus PzW und WzP
manuell	<ul style="list-style-type: none"> • konventionelles Kommissionieren • Kommissioniermest • Kommissioniertunnel 		
teil-automatisiert	<ul style="list-style-type: none"> • manuelles Kommissionieren mit FTF • Kommissionieren im Hochregal • manuelles Kommissionieren mit Bahnhof • manuelles Kommissionieren - Kombination aus DLR u. FBR 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommissionierstation mit Behälterregal-Anbindung • Kommissionierstation mit Shuttlesystemanbindung • Kommissionierstation mit Horizontal-Umlaufregal-Anbindung • Vertikal-Umlaufregal • Liftsystem 	<ul style="list-style-type: none"> • zweistufige Kommissionierung mit Pick-to-belt • Kommissionieren entlang einer Regalfront am AKL • Inverses Kommissionieren
voll-automatisiert	<ul style="list-style-type: none"> • verfahrbarer Kommissionierroboter 	<ul style="list-style-type: none"> • stationärer Kommissionierroboter mit Palettenregal-Anbindung • Schachtkommissionierer • automatisches Kollipicken 	

Tab. 2: Übersicht und Einordnung der Kommissioniermethoden, Quelle: Hompel, Kommissionierung (2011), S. 66

4.4.1 Person-zur-Ware

Unter Person-zur-Ware (PzW) versteht man, dass die Ware an einem festen Ort gelagert wird und der Kommissionierer zur Ware kommt, um das Produkt zu kommissionieren. Zumeist erfolgt die Umsetzung der PzW-Methode manuell bzw. teilautomatisiert, was den Aufwand des Kommissionierers signifikant steigert.

Abb. 25 zeigt die einfachste Art der PzW-Kommissionierung: das konventionelle Kommissionieren in Fachbodenregalen. Hier geht der Kommissionierer meist eine angelegte Kommissionierroute anhand einer Pickliste ab und kommissioniert die Waren manuell.

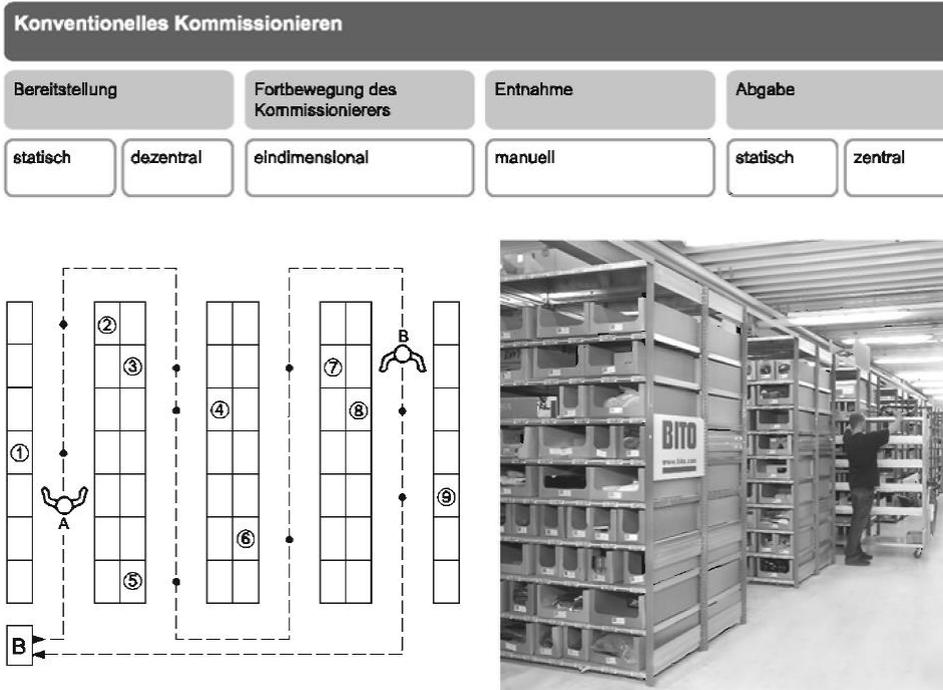


Abb. 25: Konventionelles Kommissionieren, Quelle: Hompel Kommissionierung (2011), S. 67

4.4.2 Ware-zur-Person

Bei der Ware-zur-Person(WzP)-Kommissionierung wird im Gegensatz zur PzW-Kommissionierung die Ware teilautomatisiert bzw. automatisiert zum Kommissionierer geführt. Meist erfolgt die Zulieferung über eine Art Fördertechnik. Abb. 26 zeigt ein solches Kommissioniersystem mit einer Behälterregalanbindung. Hier erfolgt die Bereitstellung der Ware komplett automatisch.

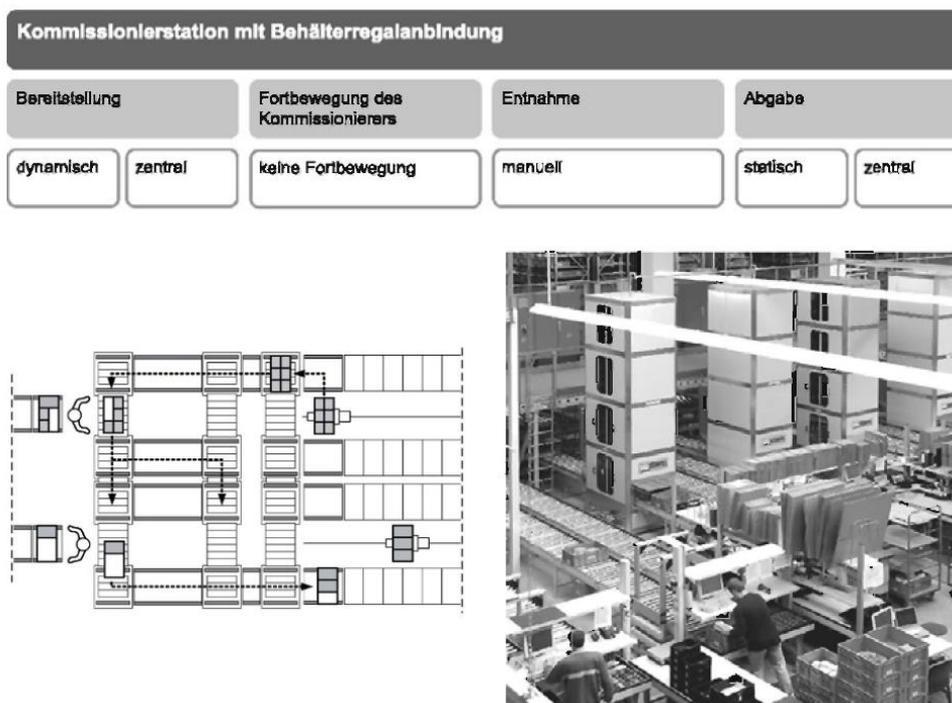


Abb. 26: Kommissionierstation mit Behälterregalanbindung, Quelle: Hompel Kommissionierung (2011), S. 76

4.5 Kommissionierhilfsmittel

In diesem Unterpunkt werden Kommissionierhilfsmittel zur verbesserten Kommissionierführung nähergebracht.

4.5.1 Pickliste

Unter Anleitung dieser Art von Kommissionierführung erhält der Auftragswähler ein Blatt Papier mit den zur Entnahme erforderlichen Informationen. Diese sogenannten Picklisten bzw. Kommissionierlisten gelten grundsätzlich für alle Kommissioniersysteme. Der Vorteil der Pickliste besteht darin, dass sie einfach und kostengünstig in der Umsetzung ist. Die Kommissionierliste kann auch verschiedene Hilfsaktivitäten ausführen, z. B. das Aufbringen von Preisschildern. Um Kommissionierfehler zu vermeiden, ist das Design wichtig, insbesondere die Lesbarkeit und Klarheit der Kommissionierliste. Aufgrund der Identifizierung unterschiedlicher Entfernungsorte und der Verarbeitung von Listen wirkt sich ein hoher Totzeit-Anteil nachteilig aus. Darüber hinaus bietet diese Art der Kommissionierung fast keine Flexibilität. Dies zeigt sich beispielsweise, wenn die Anzahl der zu entfernenden Artikel oder die Menge geändert wird. Die gedruckte Liste muss dann aufwendig angepasst werden.³⁵

4.5.2 Terminals

Eine Form der papierlosen Kommissionierführung ist die Verwendung fester Terminals. Ein Terminal ist ein Eingabe- und Ausgabegerät, über das ein Bediener mit dem Datenverarbeitungssystem interagieren kann. Die Mindestkomponenten sind das Anzeigemedium (Bildschirm, LCD-Anzeige) und das Eingabemedium (Tastatur, Steuertasten oder Scanner). Bei Terminals, die zur Bestellführung verwendet werden, kann zwischen festen (fest installiert oder stationär) und mobilen Lösungen unterschieden werden. Wenn es sich um ein festes Terminal handelt, zeigt der fest installierte Monitor Informationen zur Entnahme an. Solche Systeme werden häufig in zentralen Kommissionierstationen wie Lagern eingesetzt, etwa bei der WzP-Kommissionierung. Sie sind normalerweise direkt mit einem Lagerverwaltungssystem (WMS) oder einem Enterprise-Resource-Planning(ERP)-System verbunden. Ein Vorteil dieser Variante ist, dass der Betrieb des Kommissionierers nicht eingeschränkt ist, da seine Hände frei bleiben. Im Vergleich zur Pickliste sind die hohen Investitionskosten derweil ein Nachteil. Darüber hinaus sind feste Terminals bei Standortänderungen im Rahmen der Reorganisation nur wenig flexibel.³⁶

4.5.3 Pick-by-Light

Wie stationäre Terminals sind auch *Pick-by-Light* (siehe Abb. 27) ortsfeste Systeme. Unter Verwendung dieser Kommissionierführung, die normalerweise mit der Bereitstellung von Waren im Regal zusammenhängt, erhält die Bestellauswahl die erforderlichen Informationen für die Handhabung über ein Anzeigefeld, das über oder unter dem Lagerort installiert ist. Der zu steuernde Ort wird durch das

³⁵ Vgl. Hompel, Kommissionierung (2011), S. 52-53

³⁶ Vgl. Hompel, Kommissionierung (2011), S. 53-54

Aufleuchten einer entsprechenden Lampe angezeigt. Die meisten Systeme verfügen über eine Anzeige, auf der die Anzahl der Abhebungen angezeigt wird. Neben reinen Anzeigefunktionen haben diese Geräte auch verschiedene Kalibrierungsoptionen und eine Taste zur Bestätigung des Entfernens. Das Pick-by-light-System wird hauptsächlich in Bereichen mit geringen Mengen und wenigen Gegenständen eingesetzt.³⁷



Abb. 27: Pick-by-Light in einem Kommissioniersystem, Quelle: Wibond Pick-by-Light (2020), Online-Quelle [26.10.2020]

4.5.4 Put-to-Light

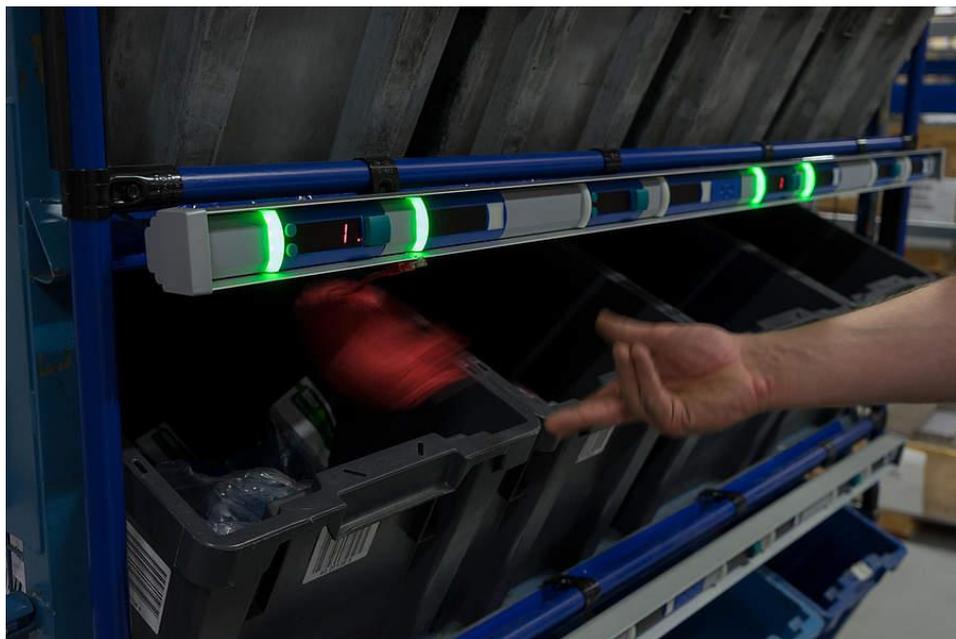


Abb. 28: Put-to-Light in einem Kommissioniersystem, Quelle: Wibond Put-to-Light (2020), Online-Quelle [26.10.2020]

Das Put-to-Light-System (siehe Abb. 28) zeigt nicht den Entnahmeort an, sondern visualisiert den Abgabeort der Kommissioniereinheit. Dieses System wird normalerweise in Kombination mit anderen Kommissionierführungsmethoden für die auftragsparallele Kommissionierung von Bestellungen verwendet. Ein weiterer Anwendungsfall ist die inverse Kommissionierung. Ein System, das Put-to-Light

³⁷ Vgl. Hompel, Kommissionierung (2011), S. 54

und Pick-by-Light kombiniert, kann eine durchschnittliche Leistung von mehr als 800 Picks pro Stunde erzielen.³⁸

4.5.5 Pick-by-Voice



Abb. 29: Pick-by-Voice in einem Kommissioniersystem, Quelle: Technische Logistik Pick Voice (2015), Online-Quelle [26.10.2020]

Das Pick-by-Voice-System (siehe Abb. 29) dient der sprachgesteuerten Auswahl. Mitarbeiter erhalten Arbeitsanweisungen von mobilen Endgeräten über Headsets. Zusätzlich ist ein Mikrofon integriert, um mit dem Computer zu kommunizieren. Die Stromversorgung wird durch eine am Gurt des Bedieners montierte Batterie sichergestellt. Der Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass der Kommissionierer die Hände freihaben kann, da die Anweisungen via Headset übertragen werden und auch die Bestätigung der Aufgabe per Spracheingabe erfolgt. Beispielsweise generiert das System nach dem Entfernen eines bestimmten Geräts hierbei eine Kontrollnummer und der Bediener muss diese zur Bestätigung wiederholen.³⁹

4.5.6 Weitere Hilfsmittel

Weitere Hilfsmittel sind verschiedene Arten mobiler Terminals sowie neue Ansätze im Bereich der Kommissionierung, z. B. vollautomatisierte Kommissionierlösungen (Regalpicker) oder auch visionäre Systeme im Bereich der Augmented Reality (Virtual-Reality-Systeme wie z. B. Head-Mounted-Displays).⁴⁰

³⁸ Vgl. Hompel, Kommissionierung (2011), S. 55

³⁹ Vgl. Hompel, Kommissionierung (2011), S. 57ff

⁴⁰ Vgl. Hompel, Kommissionierung (2011), S. 59ff

5 ANTRIEBSTECHNIK

Bei den Shuttlefahrzeugen wird auf die Servo-Antriebstechnologie gesetzt. In diesem Kapitel werden theoretische Themen hinsichtlich des Servo-Antriebs und des dazugehörigen Frequenzumrichters zur Regelung ausgearbeitet.

5.1 Servomotor

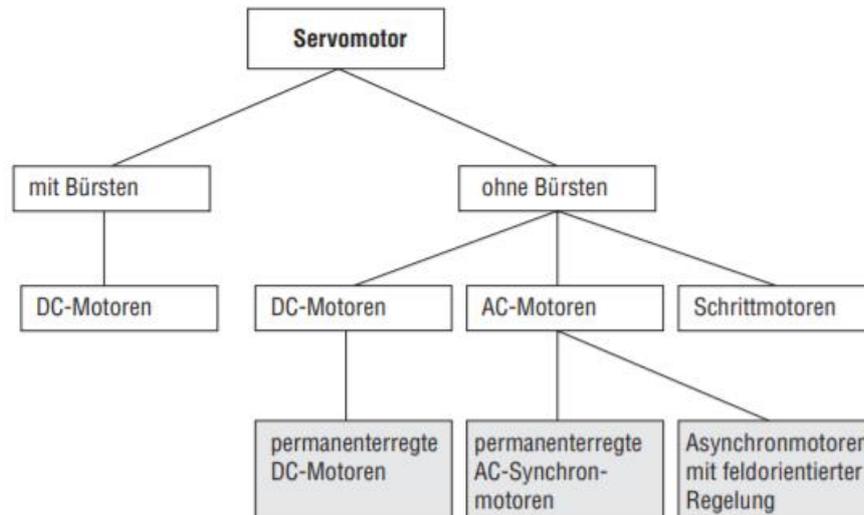


Abb. 30: Unterteilung Servomotoren, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 12

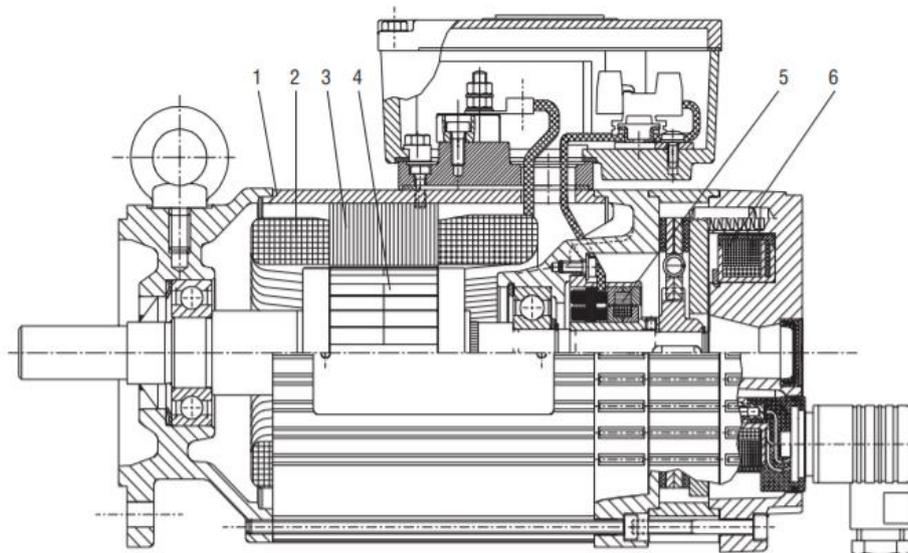
Die Gruppe der Servomotoren lässt sich wie in Abb. 30 gezeigt aufgliedern. Grundsätzlich lassen sich die Untergruppen anhand des Aufbaus unterscheiden. Zudem spielt die Speisung der Motoren eine Rolle. In diesem Kapitel werden die permanenterrregten Synchronmotoren genauer beleuchtet. In den folgenden Unterpunkten werden der Aufbau sowie die Wirkungsweise näher erklärt.⁴¹

5.1.1 Aufbau

Permanenterrregte Synchronmaschinen sind Drehfeldmotoren. Bei diesen laufen das Ständerdrehfeld und das Läuferdrehfeld synchron. Abb. 31 zeigt das Schema einer permanenterrregten Synchronmaschine. Der Aufbau des Servomotors ist dem einer Asynchronmaschine ähnlich. Er besteht ebenfalls aus einem Ständer (Stator) und einem Läufer (Rotor). Der Stator unterscheidet sich nur unwesentlich von einer herkömmlichen Asynchronmaschine. Das Blechpaket des Ständers besteht aus aufeinander gestapelten Eisenblechen, die mit Nuten zur Aufnahme der Wicklungen versehen sind. Die Bleche sind ca. 0,35–0,5 mm dick und durch eine dünne Schicht, die meist aus Papier, Lack oder Oxid besteht, voneinander isoliert.⁴²

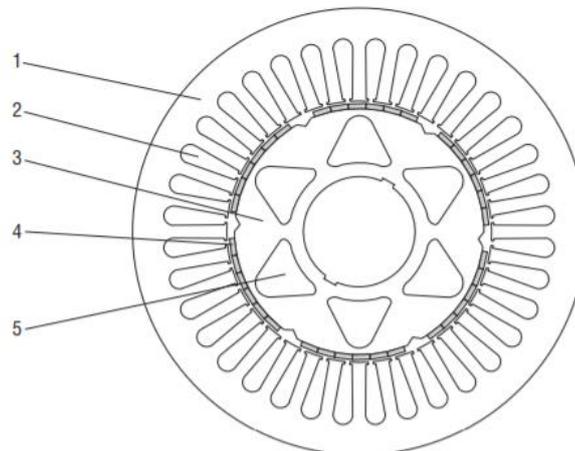
⁴¹ Vgl. SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S.12

⁴² Vgl. SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S.22



- Erläuterung:**
- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| 1. Ständer | 4. Läufer mit Permanentmagneten |
| 2. Ständerwicklung | 5. Resolver |
| 3. Ständerblechpaket | 6. Bremse |

Abb. 31: Aufbau eines permanenterregten Synchronmotors, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 21



- Erläuterung:**
- | |
|---------------------------|
| 1. Ständerblech |
| 2. Nuten für die Wicklung |
| 3. Läuferblech |
| 4. Permanentmagnete |
| 5. Aussparungen |

Abb. 32: Schnittbild von Ständer und Läufer, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 22

Der Aufbau des Rotors unterscheidet sich wiederum von der Asynchronmaschine. Der Rotor des permanenterregten Synchronmotors besteht aus einer Welle, den Rotorblechen sowie aufgeklebten Permanentmagneten. Durch die Aussparungen der Rotorbleche sinkt das Massenträgheitsmoment des

Läufers, was die Dynamik des Motors steigert (siehe Abb. 32).⁴³ Die verwendeten Permanentmagnete bestehen aus Neodym-Eisen-Bor. Magnete aus diesem Material weisen im Vergleich zu früher verwendeten Ferritmagneten besonders gute magnetische Eigenschaften auf und können ein höheres Drehmoment erzeugen.⁴⁴

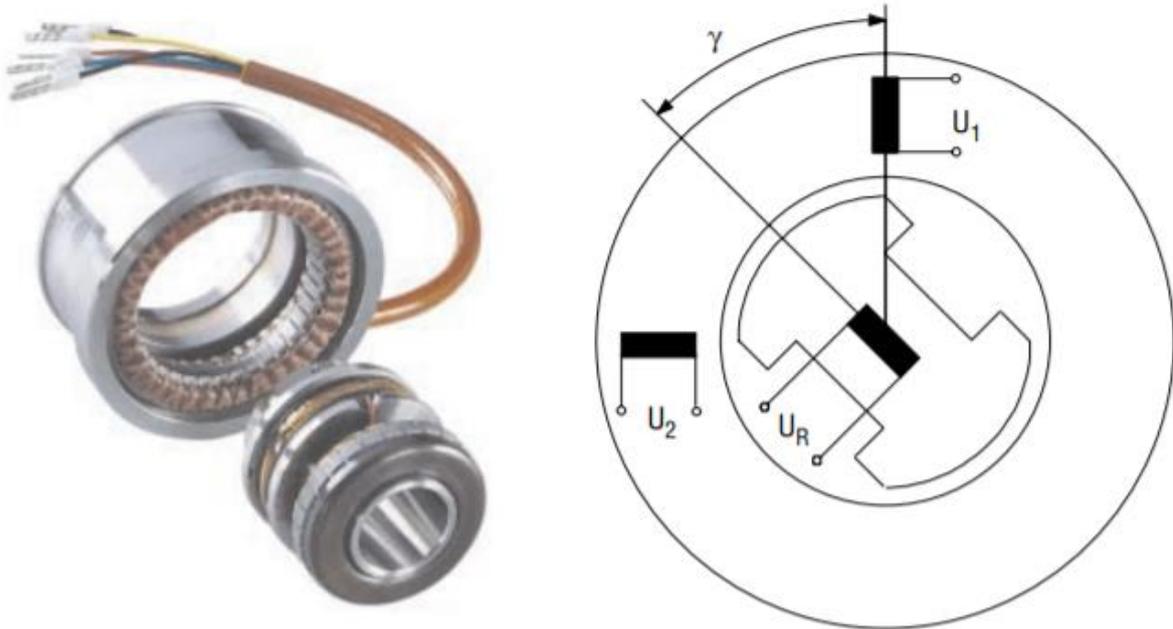


Abb. 33: Resolver, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 29

Das Funktionsprinzip des Resolvers beruht auf einem Drehtransformator. Der Resolver in Abb. 33 ist grundsätzlich wie ein Drehtransformator aufgebaut, wobei jedoch der Stator mit zwei um 90° zueinander versetzten Wicklungen ausgestattet ist. Verwendet wird der Resolver, um die Lage der Motorwelle zu ermitteln. Mit diesem Signal wird die Drehzahl sowie ein Encoder-Signal zur Lageregelung abgeleitet. Je nach Position des Rotors wird in den beiden Wicklungen eine unterschiedliche Spannung induziert. Mit dieser Information lässt sich ein Drehzahl- sowie ein Lagepositionssignal erzeugen.⁴⁵

⁴³ Vgl. SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S.22

⁴⁴

⁴⁵ Vgl. SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S.29-30

5.1.2 Wirkungsweise

Wenn der permanenterrregte Synchronmotor an ein geeignetes Netz angeschlossen wird, erzeugen die Wicklungen des Ständers ein Drehfeld – das sogenannte Stator- bzw. Ständerdrehfeld. Dieses übt eine Kraft auf den Rotor aus und wirkt auf ihn. Der Rotor beschleunigt synchron durch die magnetische Kopplung, die zwischen Stator und Rotor herrscht, also mit derselben Winkelgeschwindigkeit. Wird der Motor belastet, zeigt sich eine Verschiebung des Drehfeldes des Rotors, bezogen auf das des Stators. Die Pole des Stators eilen um einen bestimmten Winkel (*Polradwinkel α*) denen des Ständerdrehfeldes nach. Das Drehmoment hängt anfangs vom Polradwinkel ab: Je größer dieser wird, desto höher gerät auch das Drehmoment. Bei einem Polradwinkel von 90° herrscht ein maximales Moment. Wird der Polradwinkel weiter vergrößert, überlastet der Motor und das Drehmoment nimmt ab. Dieser Vorgang führt dazu, dass der Motor stehen bleibt. Abb. 34 schematisiert diesen Vorgang.

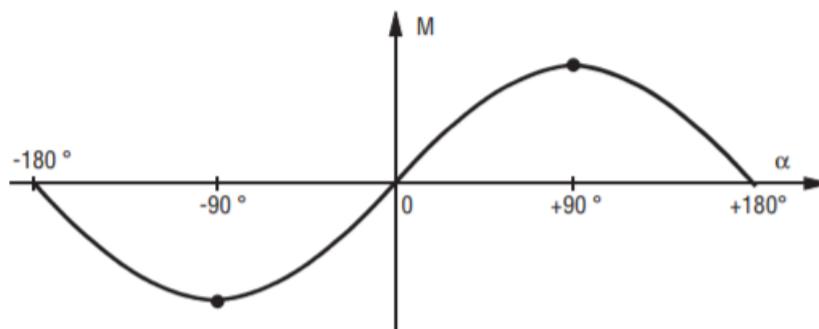


Abb. 34: Verlauf des Drehmoments über dem Polradwinkel, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 23

5.1.2.1 Drehzahl

Die Drehzahl steht in Abhängigkeit von der Nennfrequenz und der Polpaaranzahl. Formel 5.1 beschreibt diesen Zusammenhang:

$$n_N = \frac{f_N}{p} * 60 \quad (5.1)$$

n_N/min^{-1} Nenndrehzahl

f_N/s^{-1} Nennfrequenz

$p/1$ Polpaaranzahl

Aus der Einheitengleichung geht hervor, dass die Division mit dem Faktor 60 s/min multipliziert werden muss, da die Nenndrehzahl in 1/min angegeben wird.

5.1.2.2 Leistung

Die mechanische Leistung, welche der Servomotor erzeugt, wird in Formel 5.2 beschrieben. Die Leistung steht im Zusammenhang mit dem anstehenden Drehmoment und der Winkelgeschwindigkeit.

$$P_{Mech} = M * \omega \quad (5.2)$$

$P_{Mech}/\text{kgm}^2\text{s}^{-3}$	Mechanische Leistung
$M/\text{kgm}^2\text{s}^{-2}$	Drehmoment
ω/rads^{-1}	Winkelgeschwindigkeit

Die elektrische Leistung des Servomotors ist das Produkt des Verkettungsfaktors, der Strangspannung, des Strangstrom sowie des Leistungs- und Verkettungsfaktors. Folgende Formel beschreibt die elektrische Leistung:

$$P_{EI} = \sqrt{3} * U_{iN} * I_{iN} * \cos\varphi \quad (5.3)$$

P_{EI}/W	Elektrische Wirkleistung
U_{iN}/V	Strangspannung
I_{iN}/A	Strangstrom
$\cos\varphi/1$	Leistungsfaktor

Der Wirkungsgrad stellt die Effizienz des Servomotors dar. Er ist das Verhältnis der zuführenden Leistung und der abführenden Leistung bzw. der erzeugten mechanischen Leistung und der zugeführten elektrischen Leistung. Die Formel 5.4 zeigt diesen Zusammenhang.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{Mech}}{P_{EI}} \quad (5.4)$$

$\eta/1$	Wirkungsgrad
P_{ab}/W	abführende Leistung
P_{zu}/W	zuführende Leistung

5.2 Frequenzumrichter

Ein Frequenzumrichter ist per definitionem ein Stromrichter, der bei Wechselstrom an einer bestimmten Frequenz eine in Frequenz und Amplitude veränderbare Wechselspannung erzeugt.⁴⁶

5.2.1 Aufbau

Der grundlegende Aufbau eines Frequenzumrichters, wie in Abb. 35 zu sehen, besteht aus einem Gleichrichter, einem Zwischenkreis und einem Wechselrichter.

⁴⁶ Vgl. Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S.7

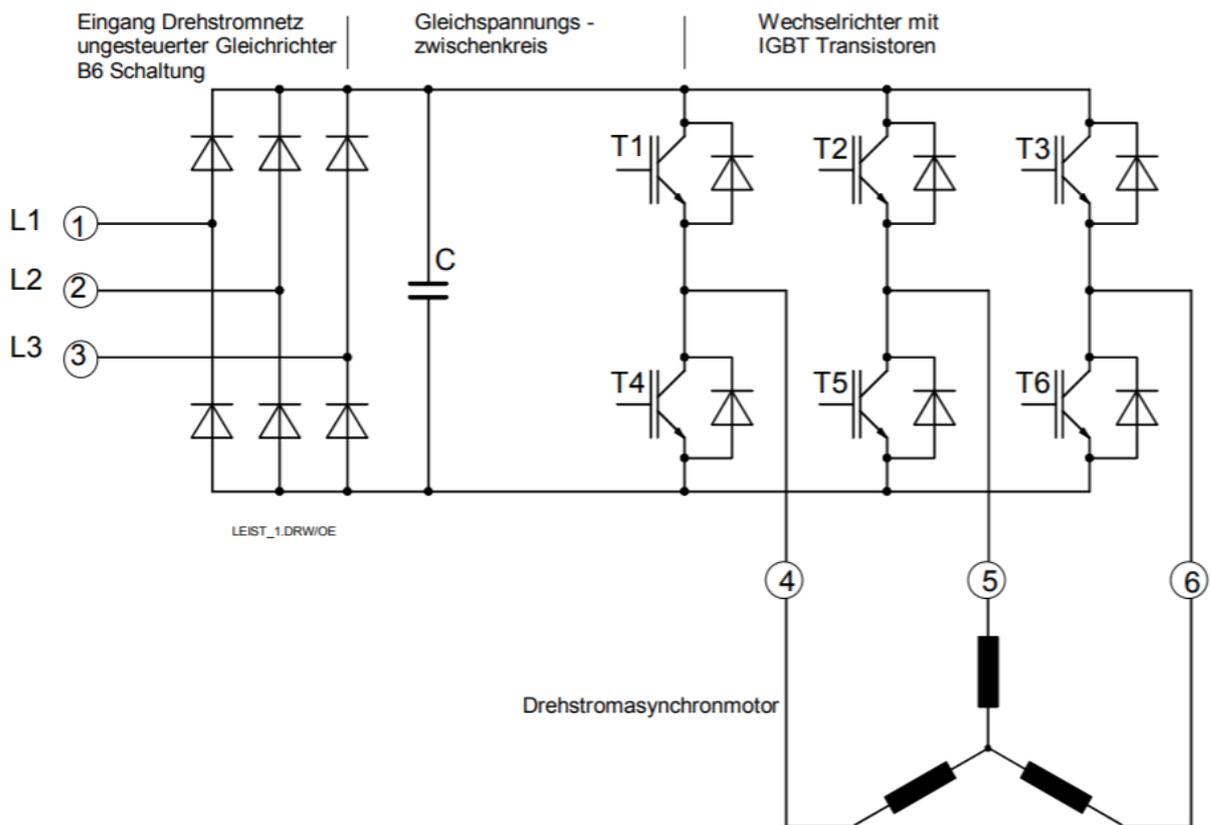


Abb. 35: Aufbau eines Frequenzumrichters, Quelle: SEW, Grundlagen Antriebstechnik (2004), S. 12

5.2.1.1 Gleichrichter

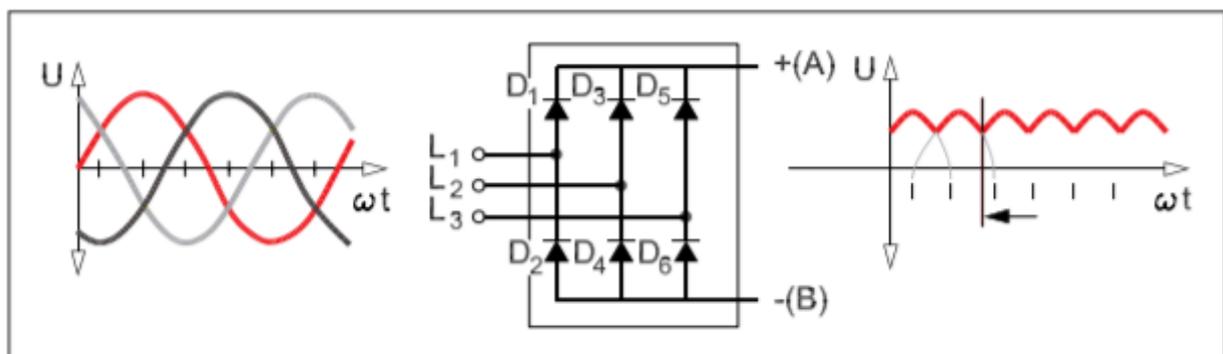


Abb. 36: Ungesteuerter Gleichrichter, Quelle: Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S. 45

Gleichrichter werden an Ein- bzw. Dreiphasen-Versorgungsnetze angeschlossen und erzeugen pulsierende Gleichspannungen. Der ungesteuerte Gleichrichter besteht aus einer B6-Diodenschaltung, wie sie in Abb. 36 zu sehen ist. Diese Dioden erlauben den Stromfluss nur von Anode (A) zu Kathode (K). Die durch die Diode fließende Wechselspannung wird in eine pulsierende Gleichspannung umgewandelt. Wenn ein unkontrollierter Dreiphasengleichrichter mit dreiphasiger Wechselspannung versorgt wird, pulsiert die Gleichspannung kontinuierlich.⁴⁷

⁴⁷ Vgl. Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S.45

5.2.1.2 Zwischenkreis

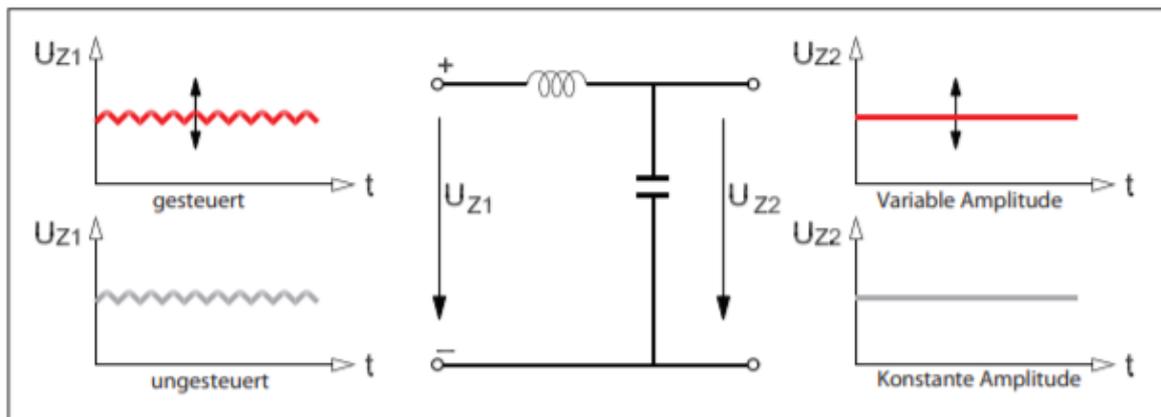


Abb. 37: Konstanter Zwischenkreis, Quelle: Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S. 52

Der Zwischenkreis wird im Frequenzumrichter benötigt, um die pulsierende Gleichspannung zu stabilisieren bzw. zu glätten. Diese Ausgangsspannung wird sodann dem nachfolgenden Wechselrichter zur Verfügung gestellt. Der Zwischenkreis kann aus einem Filter bestehen, der Kondensatoren bzw. Spulen (Drosseln) enthält (siehe Abb. 37). Im Allgemeinen werden Elektrolytkondensatoren aufgrund ihrer hohen Energiedichte verwendet. Auch wenn die Lebensdauer des Kondensators begrenzt ist, besitzt er mehrere Vorteile:

- glatte, pulsierende Gleichspannung (U_{Z2}) (siehe Abb. 37)
- Energiereserve bei sinkender Versorgungsspannung
- Energiespeicher für Laststoß und Motorgeneratorbetrieb

Die Spule hat folgende Vorteile:

- Schutz des Frequenzumrichters vor Spannungsspitzen
- Glättung der Stromwelligkeit, was die Lebensdauer der Komponenten des Zwischenkreises (insbesondere der Kondensatoren) erhöht
- Reduzierung der Netzstörungen
- Gewährleistung kleinerer Versorgungsleiterquerschnitte⁴⁸

5.2.1.3 Wechselrichter

Der Wechselrichter wandelt die konstante Gleichspannung vom Gleichrichter in eine variable Wechselspannung um. Er erzeugt zugleich die Frequenz der Motorspannung.

⁴⁸ Vgl. Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S.51

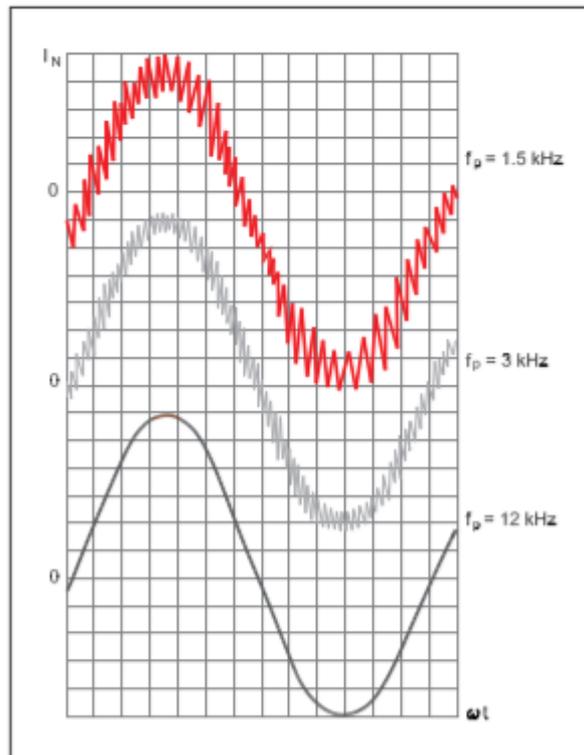


Abb. 38: Auswirkung der Taktfrequenz auf den Motorstrom, Quelle: Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S. 53

In Bezug auf Leistungsbereich, hohe Leitfähigkeit, hohe Taktfrequenz und einfache Steuerung sind IGBT-Transistoren für Frequenzumrichter ideal. Sie kombinieren die Eigenschaften von MOSFET-Transistoren mit den Ausgangseigenschaften von Bipolartransistoren. Durch hohe Taktfrequenzen der IGBT-Transistoren können mittels Pulsmagnetisierung magnetische Störungen vermieden werden. Überdies ist eine variable Modulation der Wechselrichter Ausgangsspannung möglich. So kann ein sinusförmiger Motorstrom (siehe Abb. 38) realisiert werden. Jedoch wachsen auch mit steigender Taktfrequenz die Verluste innerhalb des Wechselrichters an, sodass ein Kompromiss der Taktfrequenz gefunden werden muss. Parallel zu jedem IGB-Transistor ist eine Freilaufdiode geschaltet, da durch die induktive Ausgangslast eine hohe induzierte Spannung erzeugt wird. Die Diode zwingt den Motorstrom, weiter in seine Richtung zu fließen und schützt die Schalterbaugruppe vor der angelegten Spannung.⁴⁹

⁴⁹ Vgl. Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S.53-55

5.2.2 Vierquadrantenbetrieb

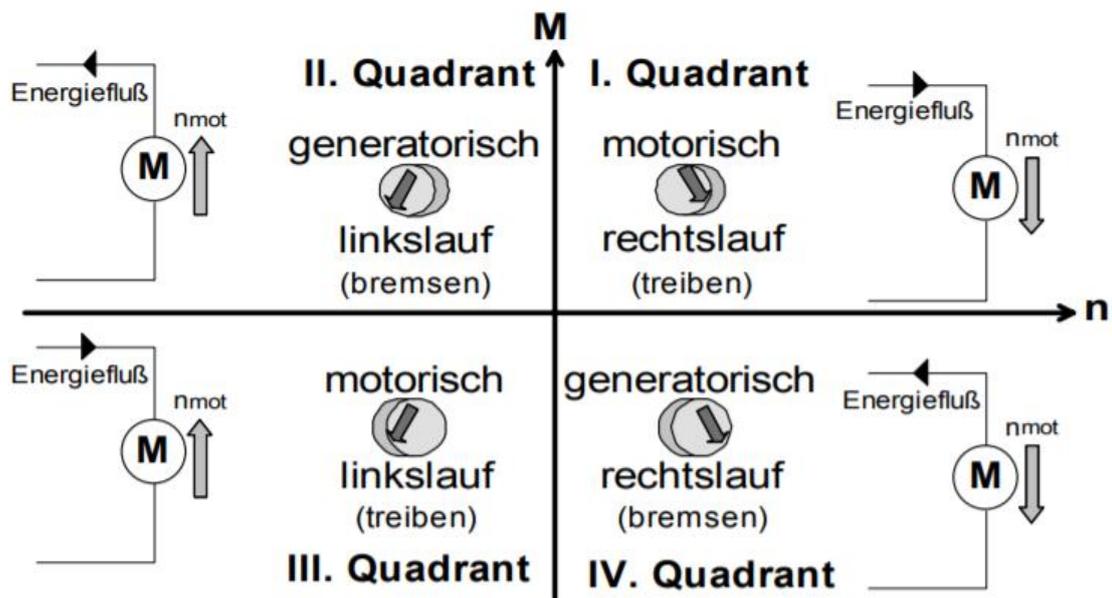


Abb. 39: 4-Quadrantenbetrieb, Quelle: SEW, Grundlagen Antriebstechnik (2004), S. 17

Der Vierquadrantenbetrieb ermöglicht dem Frequenzumrichter das Steuern des Antriebsmotors in einem Rechts- sowie in einem Linkslauf (siehe Abb. 39). Dabei ist auffällig, dass jeweils das Beschleunigen des Motors motorisch, dessen Abbremsen jedoch generatorisch wirkt. Für größere Geschwindigkeiten wird daher ein externer Bremschopper benötigt. Der Grund dafür ist, dass die kinetische Energie, die sich durch das Beschleunigen im System steckt, auch wieder rückgeführt und umgewandelt werden muss. Beim Bremsen wird diese Leistung über den Zwischenkreis abgeführt und die Zwischenkreisspannung U_z steigt an. Ab einer bestimmten Höhe wird der Bremschopper dazugeschaltet und so die Energie abgebaut. Durch dieses Zuschalten des Widerstandes sinkt die Zwischenkreisspannung wieder ab. Unterhalb einer bestimmten Schwelle wird der Chopper weggeschaltet. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis die kinetische Energie zum größten Teil in Wärme umgewandelt worden ist. Den Verlauf der Bremsleistung an einem Bremschopper zeigt Abb. 40.⁵⁰

⁵⁰ Vgl. SEW, Grundlagen Antriebstechnik (2004), S.17-18

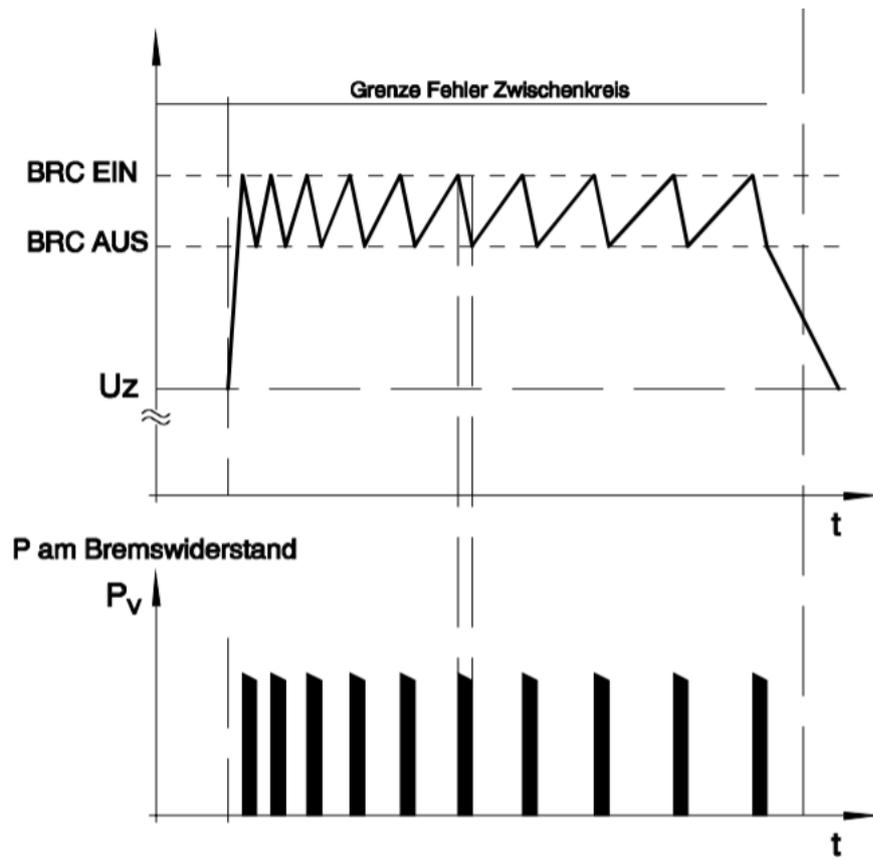


Abb. 40: Verlauf der Bremsleistung an einem Bremschopper, Quelle: SEW, Grundlagen Antriebstechnik (2004), S. 18

6 MARKTANALYSE

In diesem Kapitel wird eine technische Marktanalyse hinsichtlich der eingesetzten Systeme sowie der verwendeten Lastaufnahmemittel im AKL-Bereich durchgeführt.

6.1 Systeme im AKL-Bereich

In den nachfolgenden Unterpunkten werden Systeme gängiger Hersteller im AKL-Bereich analysiert. Diese Ausarbeitung sollte eine Hilfestellung zur Auswahl des angestrebten Shuttlesystems darstellen.

6.1.1 1D-Shuttlesystem



Abb. 41: SSI Schäfer Cuby, Quelle: SSI Schäfer Cuby (2020), Online-Quelle [15.8.2020]

Bei den 1D-Shuttlesystemen verfahren die Shuttlefahrzeuge jeweils innerhalb einer Ebene. Dabei gibt es im System so viele Shuttlefahrzeuge, wie Ebenen im System vorhanden sind. Die Verfügbarkeit der Ware ist durch die Anzahl der Shuttles auf den ersten Blick gut. Fällt jedoch ein Shuttlefahrzeug aus, ist die gesamte Ebene nicht verfügbar, was die Grundverfügbarkeit drastisch senkt. Die Kosten sind in diesem System erheblich, da eine große Anzahl an Shuttlefahrzeugen benötigt wird. Die Wartungsfähigkeit ist in diesem System ebenfalls eingeschränkt, da die Shuttles nicht vertikal bewegt werden können. Der Durchsatz bei diesem System ist jedoch aufgrund der hohen Anzahl der Shuttles gut.

Das SSI Schäfer *Cuby*-Shuttlesystem (siehe Abb. 41) ist ein solches Ein-Ebenen-Shuttlesystem (1D). Die Systemgrenzen des Regals betragen in der Gesamtlänge 100 m und in der Gesamthöhe 15 m. Zudem ist eine Gesamtzuladung von 35 kg möglich. Das Shuttle befördert Kartons und Behälter. Die Ware kann einfach- und mehrfach tief gelagert werden. Das Shuttlesystem verfügt über eine Fahrtriebsachse

sowie eine Ziehvorrichtung mit Klappen zum Handling der Ware. Die Fahrtriebsachse beschleunigt mit 1 m/s^2 auf eine Höchstgeschwindigkeit von $2,5 \text{ m/s}$.⁵¹

Die Firma SSI Schäfer bietet ein weiteres Ein-Ebenen-Shuttlesystem am Markt an: das *Flexi-Shuttlesystem* (siehe Abb. 46). Das Regal kann dabei maximal 150 m lang und 30 m hoch gebaut werden. Mit dem Flexi-System ist das Lagern von Kartons, kubischen Behältern und Tablaren mit einer Gesamtzuladung von maximal 50 kg möglich. Wie beim Cuby-System ist auch hier eine einfach- sowie eine mehrfachtiefe Lagerung der Ware vorgesehen. Mit der Fahrtriebsachse ist es möglich, das Shuttle mit bis zu 4 m/s zu bewegen. Dieser Vorgang wird mit einer Beschleunigung von 1 m/s^2 durchgeführt. Zum Handling unterschiedlicher Breiten der Waren verfügt die Ziehvorrichtung neben den Klappen auch über einen Lichte-Verschub.⁵²

6.1.2 2D-Shuttlesystem mit horizontalem Wechsel

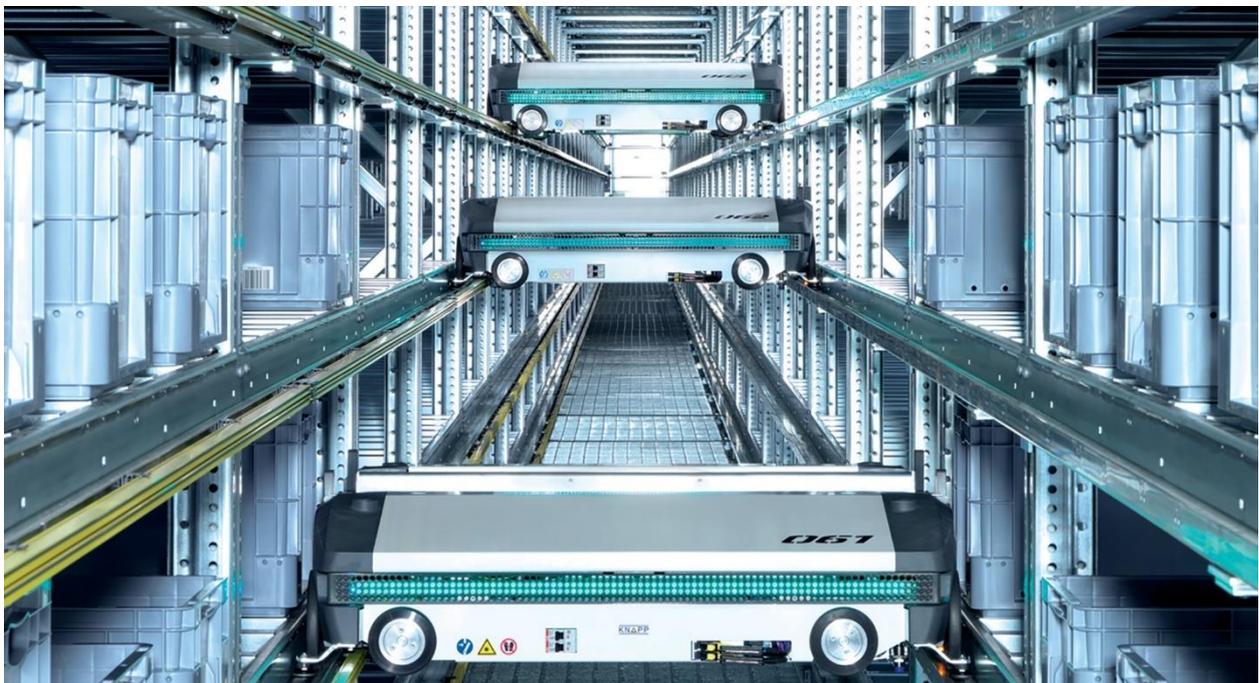


Abb. 42: OSR Shuttle Evo, Quelle: Knapp AG OSR Shuttle Evo (2020), Online-Quelle [Stand: 15.08.2020]

Wie beim 1D-Shuttlesystem verfahren die Shuttlefahrzeuge beim 2D-Shuttlesystem mit horizontalem Wechsel nur in einer Ebene. Der Unterschied zum 1D-System besteht darin, dass bei diesem das Shuttlefahrzeug die Gasse tauschen kann – es besitzt die Möglichkeit, horizontal zu verfahren. Dieses Detail wirkt sich positiv auf die Verfügbarkeit der Ware aus. Jedoch steigert es auch die Kosten. Zudem wird dadurch die Wartungsfähigkeit gesenkt, da das Shuttlefahrzeug über eine weitere Achse verfügt. Die Kosten sind in diesem System ebenfalls beträchtlich; das Shuttlefahrzeug selbst ist aufgrund der zusätzlichen Achse teurer als das 1D-Shuttlesystem. Der Durchsatz des Systems ist derweil signifikant hoch.

⁵¹ Vgl. SSI Schäfer Cuby (2020), Online-Quelle [15.8.2020]

⁵² Vgl. SSI Schäfer Flexi (2020), Online-Quelle [15.08.2020]

Das *OSR Evo-Shuttlesystem* der Firma Knapp (siehe Abb. 42) ist ein solches 2D-Shuttlesystem. Die Maximalmaße des Regals betragen 200 m in der Länge sowie 24 m in der Höhe. Zudem ist eine maximale Zuladung von 50 kg zulässig. Mit dem *Evo-Shuttlesystem* können Kartons, Behälter und Trays befördert werden. Die Ware lässt sich einfach- und mehrfach tief lagern. Das Shuttle verfügt über eine Fahrtriebsachse und kann sowohl längs als auch quer fahren. Die Auswahl der Fahrtrichtung lässt sich über den Hubantrieb steuern. Ist der Hubantrieb oben, kann das Shuttle längs gesteuert werden. Ist der Hubantrieb in der unteren Position, verfährt das Shuttle quer. Zum Handling der Ware verfügt das Shuttle über eine Ziehvorrichtung mit mehreren Klappen, sodass sich Produkte unterschiedlicher Längen lagern lassen.⁵³

6.1.3 2D-Shuttlesystem mit vertikalem Wechsel

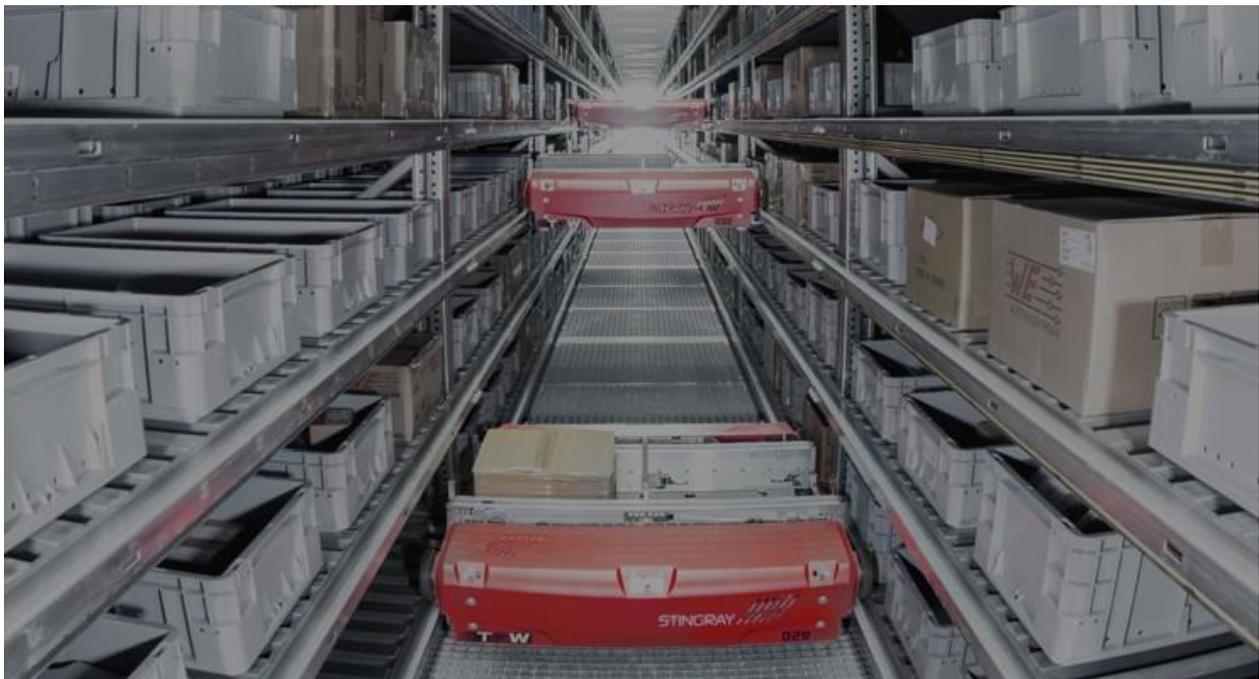


Abb. 43: TGW Stingray, Quelle: TGW Stingray (2020), Online-Quelle [15.08.2020]

Bei diesem Shuttlesystem kann das Shuttlefahrzeug über einen Vertikalumsetzer die Ebenen wechseln. Hiermit lässt sich die Shuttleanzahl im System optimal skalieren, was positiv auf die Kosten einwirkt. Durch den Vertikalumsetzer steigert sich auch die Wartungsfähigkeit, da sich die Shuttlefahrzeuge im Störfall einfach auf einen definierten Platz außerhalb des Regals bewegen lassen. Die Verfügbarkeit in diesem System ist gleichfalls gut, da andere Shuttlefahrzeuge im Störfall für die defekte Einheit einspringen können. Im Vergleich zu den beiden vorher beschriebenen Systemen ist der Durchsatz bei diesem etwas geringer, da die vertikalen Bewegungen der Shuttlefahrzeuge Zeit benötigen.

Abb. 43 zeigt das *Stingray*-Shuttlesystem der Firma TGW. Es lässt einen vertikalen Wechsel des Shuttles zu. Die Regal-Systemgrenzen liegen bei 150 m Länge sowie 30 m Höhe. Mit dem *Stingray*-Shuttlesystem

⁵³ Vgl. Knapp AG OSR Shuttle Evo (2020), Online-Quelle [Stand:15.08.2020]

lassen sich Kartons, Behälter und Tablare mit maximaler Zuladung von 50 kg befördern und lagern. Das Shuttle verfügt über einen Fahrtrieb sowie eine Ziehvorrichtung mit mehreren Klappen und einer variablen Lichte-Verschub zum Handling der Ware.⁵⁴

6.1.4 3D-Shuttlesystem



Abb. 44: Vanderlande Adapto, Quelle: Vanderlande Adapto (2020), Online-Quelle [15.08.2020]

Das Element 3D bedeutet, dass sich das Shuttle über mehrere Ebenen sowie über mehrere Gassen bewegen kann. Der Ebenenwechsel erfolgt bei diesem System gleichfalls per Vertikalumsetzer. Durch die Möglichkeit des Ebenen- sowie des Gassenwechsels ist die Verfügbarkeit optimal. Die Wartungsfähigkeit ist ähnlich gut wie beim vorigen System: Es verfügt über eine weitere Achse, die die horizontale Bewegung durchführt. Dadurch steigern sich die Kosten. Der Durchsatz bei diesem System ist durchweg gut, jedoch benötigt die vertikale Umsetzung Zeit.

Eines der wenigen 3D-Shuttlesysteme am Markt kommt von der Firma Vanderlande und heißt *Adapto*, (siehe Abb. 44). Es lagert und befördert Kartons, Behälter und Trays sowie Beutel einfach- oder mehrfachtief. Ähnlich dem Evo-Shuttle von Knapp verfügt das Adapto-Shuttlesystem über eine Fahrtriebsachse, die längs und quer verfahren kann. Hier wird wiederum eine Hubantriebsachse verwendet, um von Quer- auf Längsbetrieb zu wechseln. Für das Handling der Ware wird eine Ziehvorrichtung mit mehreren Klappen eingesetzt.⁵⁵

⁵⁴ Vgl. TGW Stingray (2020), Online-Quelle [15.08.2020]

⁵⁵ Vgl. Vanderlande Adapto (2020), Online-Quelle [15.08.2020]

6.1.5 Regalbediengerät



Abb. 45: Gebhardt-Regalbediengerät, Quelle: Gebhardt Fördertechnik Regalbediengeräte (2018), Online-Quelle [15.11.2020]

Ein Regalbediengerät ist eine weitere Möglichkeit, wie ein AKL-System ausgeführt werden kann. Das RBG gewährleistet zeitgleich eine horizontale und eine vertikale Bewegung der Ware. Die Verfügbarkeit dieser Systeme ist nicht optimal. Bei einem Störfall des RBG steht die komplette Gasse still, was sich daher deutlich bei der Verfügbarkeit widerspiegelt. Die Wartungstauglichkeit bei RBGs ist in Vergleich mit den Shuttlesystemen gut. Jedoch ist der Durchsatz um einiges geringer bei RBG-Systemen, da bei den Shuttlesystemen besser skaliert werden kann, was sich wiederum positiv auf den Durchsatz auswirkt. Die Kosten sind aufgrund des massiven Aufbaues des RBGs nicht wesentlich niedriger.

Einer der führenden Hersteller von RBGs ist die Firma Gebhardt Fördertechnik (siehe Abb. 45). **Abb. 47** Diese Systeme können 50 m hoch und bis zu 200 m lang gebaut werden. Gebhardt setzt beim Lastaufnahmemittel auf ein Konzept mit Teleskop- und Riemenantrieb. Dieses LAM wird zum Lagern von Behältern und Tablaren für eine maximale Gesamtzuladung von 100 kg verwendet. Die Lagerung kann sowohl einfach- als auch mehrfachtief erfolgen.⁵⁶

⁵⁶ Vgl. Gebhardt Fördertechnik Lastaufnahmemittel (2018), Online-Quelle [15.08.2020]

6.2 Lastaufnahmemittel

In diesem Kapitelabschnitt werden Lastaufnahmemittel analysiert, die im AKL-Bereich gängig sind. Diese Ausarbeitung sollte eine Hilfestellung zur Auswahl des LAM darstellen.

6.2.1 Ziehvorrichtung

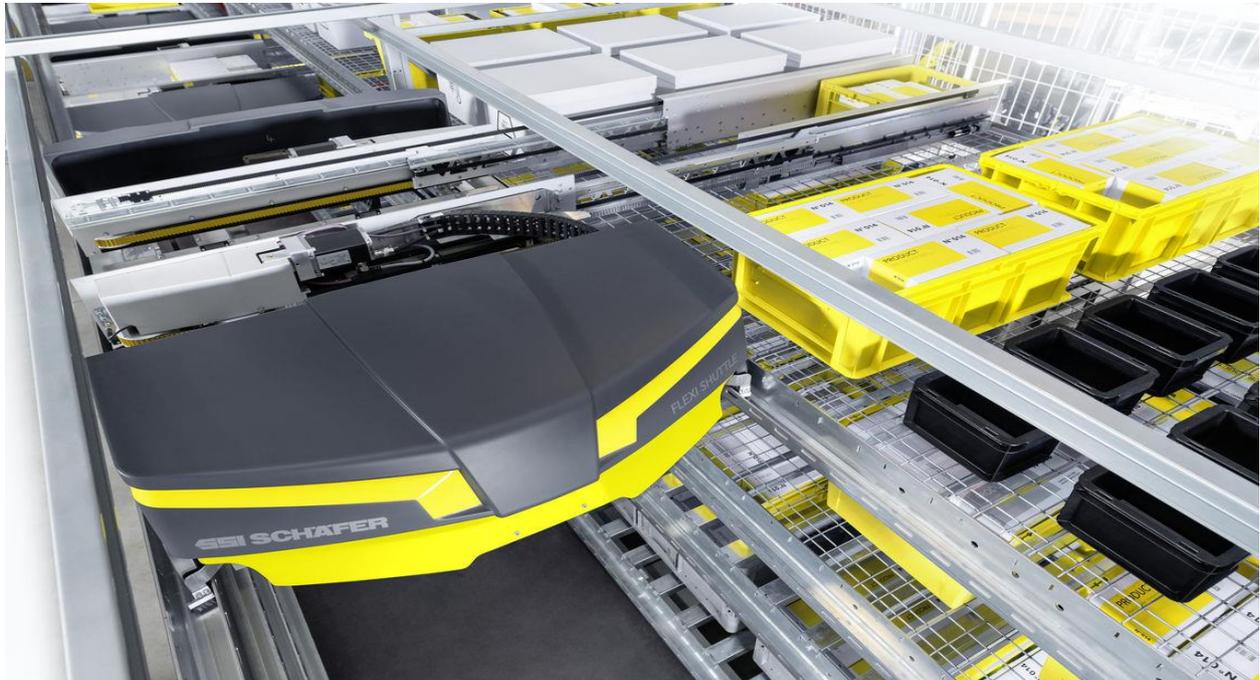


Abb. 46: SSI Schäfer Flexi mit einer Ziehvorrichtung, Quelle: SSI Schäfer Flexi (2020), Online-Quelle [15.08.2020]

Die meisten Shuttlesysteme verwenden als Lastaufnahmemittel eine Ziehvorrichtung. Zum Handling der Ware sind auf der Ziehvorrichtung Klappen verbaut. Die Ziehvorrichtung umschlingt die Ware komplett. Die Klappen schieben bzw. ziehen die Ware vom bzw. auf das Shuttle. Dieser Vorgang ist in Abb. 46 visualisiert. Die Spielzeit des Ziehvorganges sowie die Kosten der Ziehvorrichtung sind gering. Durch die Reibewerte der Ware am Regal kann bei den meisten Systemen nur Ware von bis zu 50 kg Gewicht befördert werden. Das Warenhandling ist durch die variable Klappenanzahl moderat bis solide. Mehrfachtiefe Lagerung ist mit der Ziehvorrichtung möglich. Je länger die Vorrichtung gebaut wird, desto mehr Klappen müssen verbaut werden.

6.2.2 Teleskopvorrichtung

Das Teleskopvorrichtung wird meist in Kombination mit einem Riemen verbaut (siehe Abb. 47). Zudem wird für die Auf- und Abgabe ein Hubantrieb benötigt. Die Teleskopvorrichtung unterfährt die Ware. Durch die Hubbewegung liegt die Ware auf dem Teleskop auf. Mittels Einziehens des Teleskops wird die Ware auf das Shuttle bewegt. Der Riemen ermöglicht das Handling auf dem Shuttlefahrzeug. Der Vorgang dauert im Vergleich mit der Ziehvorrichtung länger. Die Kosten sind durch die höhere Anzahl der Antriebe gleichfalls höher. Jedoch lassen sich deutlich höhere Zuladungen befördern. Das Warenhandling ist durch den Riemenantrieb optimal. Zudem ist die mehrfachtiefe Lagerung der Ware einfach möglich.

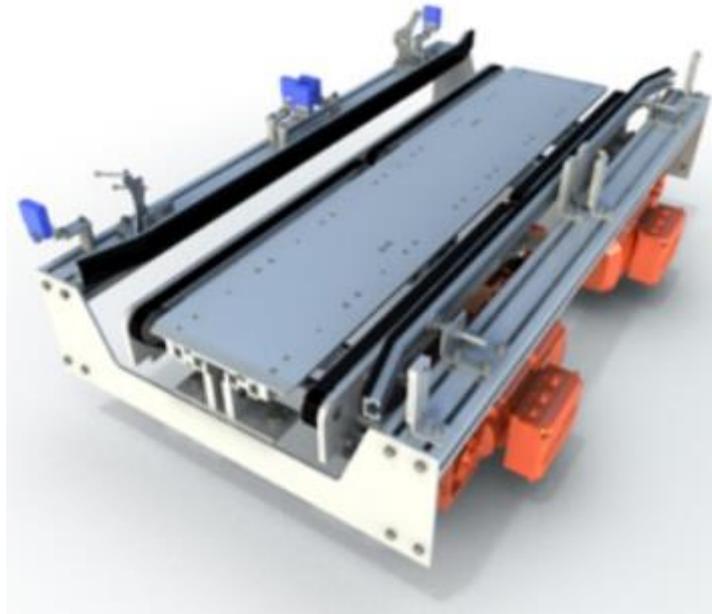


Abb. 47: Teleskopvorrichtung, Quelle: Gebhardt Fördertechnik Lastaufnahmemittel (2018), Online-Quelle [15.08.2020]

6.3 Analyse der Gerätedaten

Zur Analyse der Gerätedaten der unterschiedlichen Unternehmen wurde eine Matrix erstellt (siehe Tab. 3).

		SSI Schäfer Cuby	SSI Schäfer Flexi	Knapp OSR Evo	TGW Stingray	Vanderlande Adapto	Gebhardt RBG
Regal	Länge in m	100	150	200	150	k. A.	200
	Höhe in m	15	30	24	30	k. A.	50
Gesamtzuladung in kg		35	50	50	50	k. A.	100
Typ		1D	1D	2D vertikal	2D horizontal	3D	RBG
Ware		Kartons, Behälter	Kartons, kubische Behälter, Tablare	Kartons, Behälter, Trays	Kartons, Behälter, Tablare	Kartons, Behälter, Trays, Beutel	Behälter, Tablare
mehrfachtief		x	x	x	x	x	x
Achsen	Fahrantrieb	x	x	x	x	x	x
	Hubantrieb				x	x	x
	Ziehvorrichtung	x	x	x	x	x	
	Klappen	x	x	x	x	x	
	Lichte-Verschub		x	x	x		
	Teleskopantrieb						x
	Riemenantrieb						x

Tab. 3: Zusammenfassung der Geräte-Daten, Quelle: eigene Darstellung

Auffällig ist zunächst, dass alle Shuttlesysteme eine Gemeinsamkeit beim Handling der Ware haben: alle setzen eine Ziehvorrichtung ein. Derweil sind die geringen Gesamtzuladungen auffällig. Sie reichen bis maximal 35–50 kg. Für höhere Gesamtzuladungen sind Lastaufnahmemittel in Kombination mit Teleskop und Riemen von Vorteil, da die Reibwerte der Ware keine Rolle spielen.

6.4 Auswahl der Achsen für das neue Shuttlesystem

Kriterium	Gewichtung	System									
		1D		2D vertikal		2D horizontal		3D		RBG	
		Beurteilung	Wert								
Durchsatz	5	5	25	4	20	5	25	4	20	2	10
Verfügbarkeit	3	2	6	4	12	3	9	5	15	1	3
Wartungsfähigkeit	1	3	3	5	5	2	2	4	4	4	4
Kosten	4	3	12	5	20	2	8	4	16	3	12
Nutzwertsumme		46		67		44		55		29	
Rangauswertung		3. Rang		1. Rang		4. Rang		2. Rang		5. Rang	

Tab. 4: Nutzwertanalyse hinsichtlich des Shuttlesystems, Quelle: eigene Darstellung

Das neue Shuttlesystem der Firma Fb Industry Automation sollte in der Produktionslogistik eingesetzt werden. Ein maßgebliches Kriterium in diesem Logistikbereich stellt die maximale Zuladung für das Shuttlesystem dar. Zum Großteil wird die Ware mittels Behälter bzw. Tray zur Verfügung gestellt. Das Shuttle sollte daher in der Lage sein, vierfachtiefe Behälter bzw. Trays mit Abmessungen von 300 x 400 mm sowie zweifachtief Behälter mit Abmessungen von 600 x 400 mm befördern zu können. Durch dieses Szenario ergibt sich eine maximale Gesamtzuladung von 120 kg.

Kriterium	Gewichtung	System			
		Ziehvorrichtung		Teleskopvorrichtung	
		Beurteilung	Wert	Beurteilung	Wert
Spielzeitdauer	4	5	20	4	16
Warenhandling	3	4	12	5	15
Zuladung	5	3	15	5	25
Kosten	3	5	15	3	9
Mehrfachtief	2	4	8	5	10
Nutzwertsumme		70		75	
Rangauswertung		2. Rang		1. Rang	

Tab. 5: Nutzwertanalyse hinsichtlich des Lastaufnahmemittels, Quelle: eigene Darstellung

Zur Entscheidungsfindung, welches System bzw. welches Lastaufnahmemittel verwendet werden sollte, wurde diesbezüglich jeweils eine Nutzwertanalyse ausgearbeitet, die in Tab. 4 und in Tab. 5 zu sehen ist. Das Ergebnis ist ein vertikales 2D-Shuttlesystem mit einer Teleskopvorrichtung. Abb. 48 zeigt eine erste Konzeptdarstellung des neuen Fb *Compact-Shuttle*.

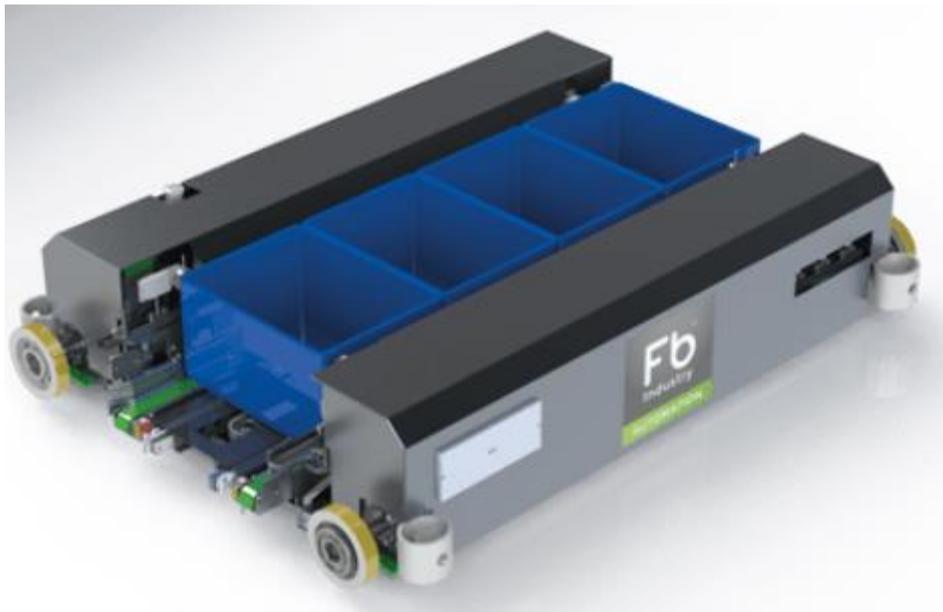


Abb. 48: Konzeptdarstellung Fb Compact-Shuttle neu, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

7 EUROPÄISCHE VEREINIGUNG DER FÖRDER- UND LAGERTECHNIK

Seit ihrer Gründung im Jahr 1953 vertritt die Europäische Vereinigung der Förder- und Lagertechnik (Fédération Européenne de la Manutention – FEM) die europäischen Hersteller von Materialtransport-, Hebe- und Lagergeräten. Die FEM ist ein gemeinnütziger Handelsverband (AISBL nach belgischem Recht) mit Sitz in Brüssel. Derzeit besteht sie aus 13 Mitgliedern der Europäischen Union sowie Großbritannien, Russland und der Türkei. Sie sind die treibende Kraft, die die gemeinsame Vision der FEM-Industrie antreibt und die führende Position der europäischen Materialtransport-, Werbe- und Lagerindustrie auf dem Weltmarkt behauptet. Der Jahresumsatz der europäischen Industrie liegt bei 62 Milliarden Euro (2015). Insgesamt vertritt die FEM mehr als 1000 Unternehmen und deckt 80 % aller förderfähigen europäischen Unternehmen ab. Damit macht es mehr als die Hälfte der gesamten Weltproduktion aus. Die technischen Regeln, die vom Verband veröffentlicht, haben ähnlichen Stellenwert wie Normen.⁵⁷

7.1 Theorie zu den Berechnungen

Die Spielzeit eines Shuttlesystems ist die Summe aus variablen Fahrtzeiten und konstanten Zeitwerten. Diese Zeiten hängen von den spezifischen technischen Daten des Shuttles und der Entfernung der Wegstrecken in X-, Y- und Z-Richtung ab.⁵⁸

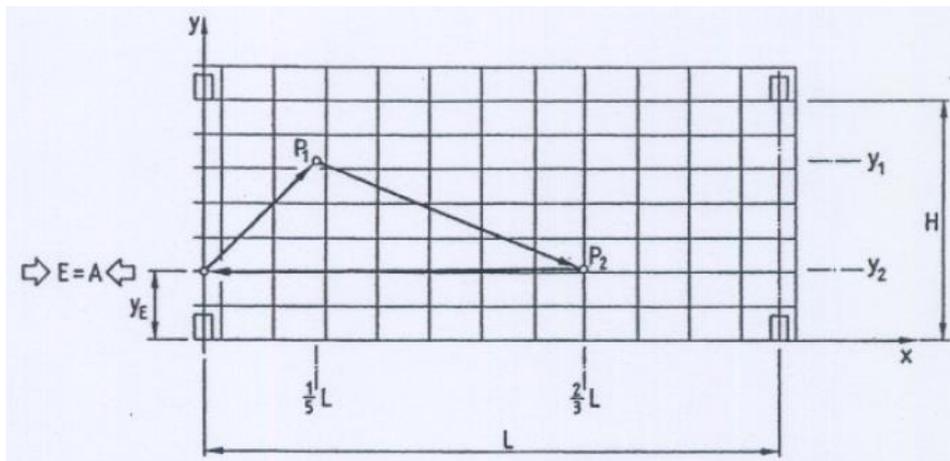


Abb. 49: Lagerdarstellung mit Bewegungen für kombiniertes Spiel, Quelle: FEM 9.851 (2003), S. 9

Abb. 49 zeigt ein Lagersystem mit einer stirnseitigen Ein- bzw. Auslagerstelle. Die Ein- und Auslagerung erfolgt nicht auf Ebene 0, sondern auf der einer um den Wert y_E höheren Ebene. Zudem zeigt die Darstellung zwei Punkte (P_1 und P_2). Diese hängen von der Gesamtlänge und Gesamthöhe des Lagersystems ab. Die genauen Koordinaten der Punkte können Tab. 6 entnommen werden. Der Ablauf beginnt mit der Abholung der Ware bei der Einlagerung. Die Ware wird zu P_1 befördert und dort abgegeben. Danach wird von P_2 ein Produkt abgeholt und zur Auslagerung befördert, wo es ausgelagert wird. Das genaue Ablaufdiagramm folgt in Unterpunkt 7.2.

⁵⁷ Vgl. FEM, About FEM (2020), Online Quelle [26.10.2020]

⁵⁸ Vgl. FEM 9.851 (2003), S.6

Punkt		Koordinaten	
		x	y
E = A		0	yE
P1	$0 < yE \leq H/2$	$1/5 L$	$y1 = 2/3 H + 1/3 yE$
P2	$0 < yE \leq H/2$	$2/3 L$	$y2 = 1/5 H + 1/3 yE$
P1	$H/2 < yE \leq H$	$1/5 L$	$y1 = 1/3 yE$
P2	$H/2 < yE \leq H$	$2/3 L$	$y2 = 7/15 H + 1/3 yE$

Tab. 6: Platzbestimmungen für kombiniertes Spiel, Quelle: FEM 9.851 (2003), S. 9

Eine gängige Darstellung des Durchsatzes ist die Angabe der Spielzeiten pro Stunde.

7.2 Ablaufdiagramm

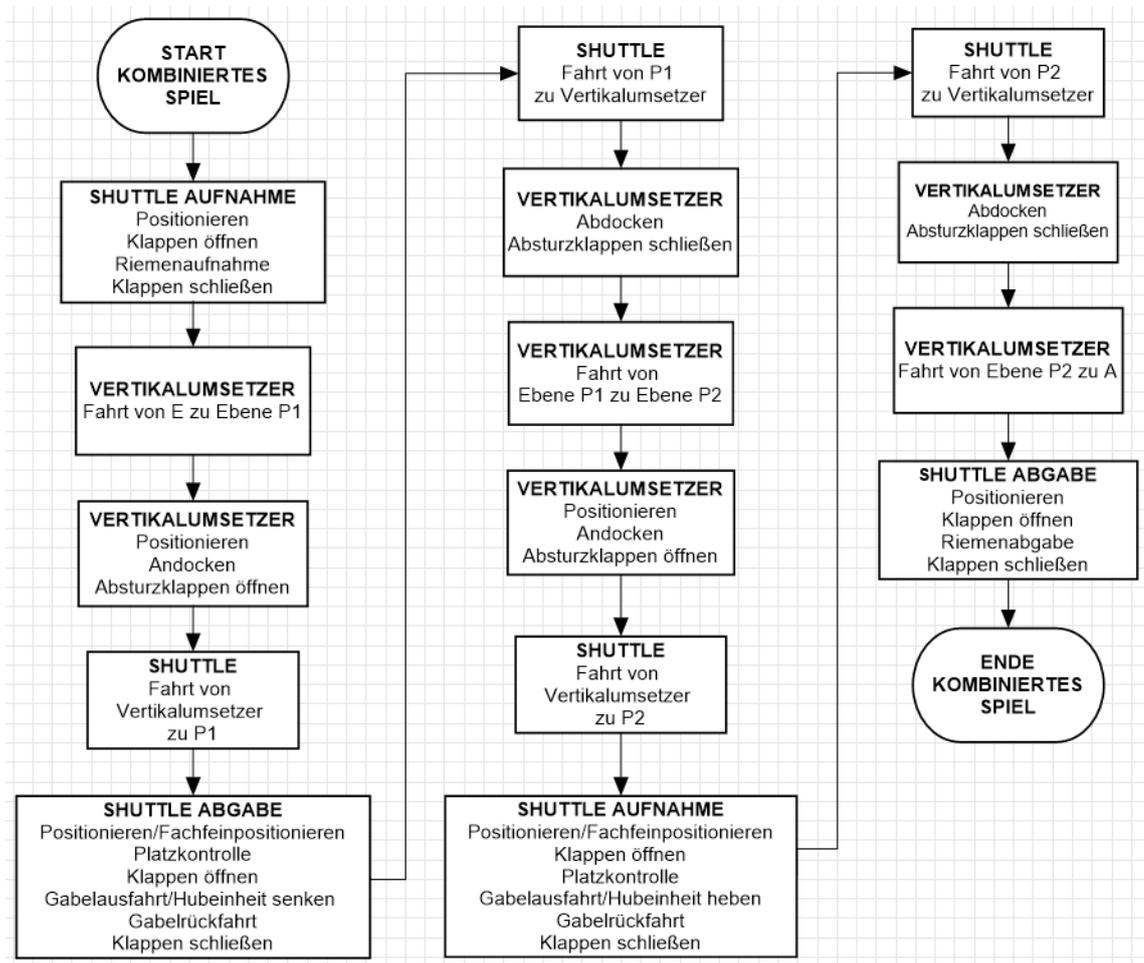


Abb. 50: Ablaufdiagramm kombiniertes Shuttlespiel, Quelle: eigene Darstellung

Abb. 50 zeigt das Ablaufdiagramm für ein kombiniertes Spiel des Shuttlesystems. Das Ablaufdiagramm ist die Basis für die Berechnung der Spielzeiten. Die einzelnen Bewegungen werden zur Vereinfachung zusammengefasst. Die jeweiligen Fahrten von Vertikalumsetzer und Shuttle variieren je nach Lagersystem, da die Maße des Lagersystems unterschiedlich sind.

7.3 Spielzeitberechnung

In diesem Unterpunkt werden die Spielzeiten des alten und des neuen Systems berechnet. Das alte System dient als Grundlage für die Definition der benötigten Geschwindigkeitsanforderungen für das neue System. Zudem kann danach durch die Gegenüberstellung der Spielzeiten die Erhöhung des Durchsatzes durch die Neuentwicklung ermittelt werden.

7.3.1 Ermittlung der Koordinaten

Für die Spielzeitberechnung wird ein Lagersystem mit 20 Ebenen sowie 100 Zeilen definiert. Eine Zeile ist 0,5 m breit. Der Ebenenabstand beträgt 0,375 m. Zudem gibt es einen Mindestabstand von 0,275 m für die erste Ebene. Daraus ergibt sich eine Gesamtlänge von 50 m und eine Gesamthöhe von 7,775 m. Die Ein- und die Auslagerstation befinden sich auf der vierten Ebene. Durch Einsetzen dieser Werte in Tab. 6 ergeben sich folgende Werte (siehe Tab. 7):

	x-Koordinate	y-Koordinate	Weg in x-Richtung s in m	Weg in y-Richtung s in m
E = A	0	4	0	1,775
P1	20	15	10	5,9
P2	67	6	33,5	2,525

Tab. 7: Koordinaten für Spielzeitberechnung, Quelle: eigene Darstellung

7.3.2 Altes Shuttlesystem

	Vertikalumsetzer (VU) Hubantrieb x = VH	Shuttle Fahrantrieb x = SF	Shuttle Teleskop- antrieb x = ST	Shuttle Riemen- antrieb x = SR	Shuttle Hubantrieb x = SH
Geschwindigkeit v_x in m/s	2,0	0,9	0,7	0,7	0,08
Beschleunigung a_x in m/s²	2,0	0,7	1,5	1,5	1,19
Strecke s_x in m	7,775	50,0	1,4	1,25	0,035

Tab. 8: Antriebsdaten des vorhandenen Shuttlesystem zur Berechnung der Spielzeiten, Quelle: eigene Darstellung

Tab. 8 zeigt die für die Spielzeitberechnung essenziellen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdaten. Zudem werden zur Berechnung für folgende Vorgänge Default-Zeiten verwendet.

- An- und Abdocken des Vertikalumsetzers (t_{DK}): 1,0 s const.
- Öffnen bzw. Schließen der Absturzklappen des Vertikalumsetzers (t_{AKI}): 1,0 s const.
- Öffnen bzw. Schließen der Sperrklappen des Shuttles (t_{SKI}): 1,0 s const.
- Positionieren sowie Fachfeinpositionieren des Shuttles (t_{Fp}): 2,0 s const.
- Auffahrt auf Vertikalumsetzer bzw. Abfahrt vom Vertikalumsetzer (t_v): 2,0 s const.

Der Ablauf beginnt mit der Aufnahme bei der Einlagerungsstation. Dies erfolgt über den Riemenantrieb. Die Berechnung dieser Einzelzeit zeigt Formel 6.1:

$$t_1 = 2t_{SKI} + 2 \frac{v_{SR}}{a_{SR}} + \frac{s_{SR} - 2 \left[0,5 * a_{SR} * \left(\frac{v_{SR}}{a_{SR}} \right)^2 \right]}{v_{SR}} \quad (6.1)$$

t1/s	Aufnahmezeit bei Einlagerung
t _{SKI} /s	Vorgangszeit der Sperrklappen
v _{SR} /ms ⁻¹	Geschwindigkeit Riemen
a _{SR} /ms ⁻²	Beschleunigung Riemen
s _{SR} /m	Verfahrweg Riemen

Nach der Aufnahme verfährt der Vertikalumsetzer (VU) auf die vorgegebene Ebene. Formel 6.2 zeigt die Berechnung:

$$t_2 = 2 \frac{v_{VH}}{a_{VH}} + \frac{(P1_y - E_y) - 2 \left[0,5 * a_{VH} * \left(\frac{v_{VH}}{a_{VH}} \right)^2 \right]}{v_{VH}} \quad (6.2)$$

t2/s	Verfahrzeit VU
v _{VH} /ms ⁻¹	Geschwindigkeit VU
a _{VH} /ms ⁻²	Beschleunigung VU
P1 _y /m	Y-Wert der Position1
E _y /m	Y-Wert der Einlagerung

Wurde der Vertikalumsetzer positioniert, dockt er an und öffnet die Absturzklappen. Die Berechnung erfolgt gemäß Formel 6.3:

$$t_3 = t_{DK} + t_{AKI} \quad (6.3)$$

t3/s	Gesamtzeit Andockvorgang
t _{DK} /s	Vorgangszeit beim Andocken
t _{AKI} /s	Vorgangszeit der Absturzklappen

Formel 6.4 zeigt die Berechnung für die Fahrtzeit des Shuttles vom Vertikalumsetzer zu Position 1. Zudem wird hier die Überfahrt des Shuttlefahrzeugs vom Vertikalumsetzer zum Regal mitgerechnet.

$$t_4 = t_V + 2 \frac{v_{SF}}{a_{SF}} + \frac{(P1_x - E_x) - 2 \left[0,5 * a_{SF} * \left(\frac{v_{SF}}{a_{SF}} \right)^2 \right]}{v_{SF}} \quad (6.4)$$

t4/s	Verfahrzeit des Fahrtriebs
t _V /s	Überfahrtzeit von VU zu Regal
v _{SF} /ms ⁻¹	Geschwindigkeit Fahrtrieb
a _{SF} /ms ⁻²	Beschleunigung Fahrtrieb

$P1_x/m$	X-Wert der Position1
E_x/m	X-Wert der Einlagerung

Auf Position 1 erfolgt die Abgabe über das Teleskop. Zuerst führt das Shuttle die Fachfeinpositionierung durch. Danach fährt das Teleskop aus. Anschließend senkt sich der Hub und das Teleskop fährt ein. Die Berechnung wird laut Formel 6.5 durchgeführt.

$$t_5 = t_{Ffp} + 2 \left\{ 2 \frac{v_{ST}}{a_{ST}} + \frac{s_{ST} - 2 \left[0,5 * a_{ST} * \left(\frac{v_{ST}}{a_{ST}} \right)^2 \right]}{v_{ST}} \right\} + 2 \frac{v_{SH}}{a_{SH}} + \frac{s_{SH} - 2 \left[0,5 * a_{SH} * \left(\frac{v_{SH}}{a_{SH}} \right)^2 \right]}{v_{SH}} \quad (6.5)$$

t_5/s	Abgabezeit bei Position 1
t_{Ffp}/s	Vorgangszeit Fachfeinpositionierung
v_{ST}/ms^{-1}	Geschwindigkeit Teleskop
a_{ST}/ms^{-2}	Beschleunigung Teleskop
s_{ST}/m	Verfahrweg Teleskop
v_{SH}/ms^{-1}	Geschwindigkeit Hub
a_{SH}/ms^{-2}	Beschleunigung Hub
s_{SH}/m	Verfahrweg Hub

Formel 6.6 zeigt die Berechnung für die Fahrtzeit des Shuttles von Position 1 zum Vertikalumsetzer. Zudem wird hier die Überfahrt des Shuttlefahrzeugs vom Regal auf den Vertikalumsetzer mitgerechnet.

$$t_6 = t_V + 2 \frac{v_{SF}}{a_{SF}} + \frac{(P1_x - E_x) - 2 \left[0,5 * a_{SF} * \left(\frac{v_{SF}}{a_{SF}} \right)^2 \right]}{v_{SF}} \quad (6.6)$$

t_6/s	Verfahrzeit des Fahrtriebs
---------	----------------------------

Ist das Shuttle auf dem Vertikalumsetzer positioniert, dockt der Vertikalumsetzer ab. Die Berechnung wird laut Formel 6.7 durchgeführt.

$$t_7 = t_{DK} + t_{AKI} \quad (6.7)$$

t_7/s	Gesamtzeit Abdockvorgang
t_{DK}/s	Vorgangszeit beim Abdocken

Nach dem Abdockvorgang verfährt der Vertikalumsetzer auf die Ebene der Position 2. Dies wird laut Formel 6.8 berechnet.

$$t_8 = 2 \frac{v_{VH}}{a_{VH}} + \frac{(P1_y - P2_y) - 2 \left[0,5 * a_{VH} * \left(\frac{v_{VH}}{a_{VH}} \right)^2 \right]}{v_{VH}} \quad (6.8)$$

t_8/s	Verfahrzeit VU
$P2_y/m$	y-Wert der Position 2

Hat der Vertikalumsetzer positioniert, dockt er an und öffnet die Absturzklappen. Die Berechnung erfolgt gemäß Formel 6.9:

$$t_9 = t_3 = t_{DK} + t_{AKl} \quad (6.9)$$

t_9/s Gesamtzeit Andockvorgang

Formel 6.10 zeigt die Berechnung für die Fahrtzeit des Shuttles vom Vertikalumsetzer zu Position 2. Zudem wird hier die Überfahrt des Shuttlefahrzeugs vom Vertikalumsetzer zum Regal mitgerechnet.

$$t_{10} = t_V + 2 \frac{v_{SF}}{a_{SF}} + \frac{(P2_x - A_x) - 2 \left[0,5 * a_{SF} * \left(\frac{v_{SF}}{a_{SF}} \right)^2 \right]}{v_{SF}} \quad (6.10)$$

t_{10}/s Verfahrzeit des Fahrantriebs

$P2_x/m$ X-Wert der Position 2

A_x/m X-Wert der Auslagerung

Auf Position 2 erfolgt nun die Aufnahme über das Teleskop. Zuerst führt das Shuttle noch die Fachfeinpositionierung durch. Danach unterfährt das Teleskop die Ware. Anschließend hebt der Hub das Lastaufnahmemittel und das Teleskop fährt ein. Die Berechnung wird laut Formel 6.11 durchgeführt:

$$t_{11} = t_{Ffp} + 2 \left\{ 2 \frac{v_{ST}}{a_{ST}} + \frac{s_{ST} - 2 \left[0,5 * a_{ST} * \left(\frac{v_{ST}}{a_{ST}} \right)^2 \right]}{v_{ST}} \right\} + 2 \frac{v_{SH}}{a_{SH}} + \frac{s_{SH} - 2 \left[0,5 * a_{SH} * \left(\frac{v_{SH}}{a_{SH}} \right)^2 \right]}{v_{SH}} \quad (6.11)$$

t_{11}/s Aufnahmezeit bei Position 2

Wurde der Behälter erfolgreich aufgenommen, überfährt das Shuttlefahrzeug auf den Vertikalumsetzer. Hierbei wird die Überfahrt vom Regal auf den Vertikalumsetzer berücksichtigt. Formel 6.12 zeigt die entsprechende Berechnung.

$$t_{12} = t_V + 2 \frac{v_{SF}}{a_{SF}} + \frac{(P2_x - A_x) - 2 \left[0,5 * a_{SF} * \left(\frac{v_{SF}}{a_{SF}} \right)^2 \right]}{v_{SF}} \quad (6.12)$$

t_{12}/s Verfahrzeit des Fahrantriebs

Ist das Shuttlefahrzeug auf dem Vertikalumsetzer positioniert, dockt er vom Regal ab. Die Berechnung wird laut Formel 6.13 durchgeführt:

$$t_{13} = t_{DK} + t_{AKl} \quad (6.13)$$

t_{13}/s Gesamtzeit Abdockvorgang

Nach dem Abdockvorgang verfährt der Vertikalumsetzer auf die Ebene der Auslagerung. Dies wird wie in Formel 6.14 berechnet:

$$t_{14} = 2 \frac{v_{VH}}{a_{VH}} + \frac{(P2_y - A_y) - 2 \left[0,5 * a_{VH} * \left(\frac{v_{VH}}{a_{VH}} \right)^2 \right]}{v_{VH}} \quad (6.14)$$

t₁₄/s Verfahrzeit VU

Auf der Position der Auslagerung erfolgt die Abgabe über den Riemen. Hierfür müssen zunächst die Klappen geöffnet werden. Dieser Vorgang markiert das Ende des Zyklus. Die Berechnung erfolgt laut Formel 6.15:

$$t_{15} = 2t_{SKl} + 2 \frac{v_{SR}}{a_{SR}} + \frac{s_{SR} - 2 \left[0,5 * a_{SR} * \left(\frac{v_{SR}}{a_{SR}} \right)^2 \right]}{v_{SR}} \quad (6.15)$$

t₁₅/s Abgabezeit bei Auslagerung

Die gesamte Spielzeit wird gemäß Formel 6.16 berechnet. Diese ist die Summe aller zuvor berechneten Einzelzeiten.

$$t_M = \sum_{i=1}^{15} t_i \quad (6.16)$$

t_M/s Spielzeit für den Gesamtzyklus

Tab. 9 zeigt die Ergebnisse der Einzelzeiten sowie das Ergebnis der gesamten Spielzeit.

t ₁ in s	t ₂ in s	t ₃ in s	t ₄ in s	t ₅ in s	t ₆ in s	t ₇ in s	t ₈ in s
4,25	3,06	2,00	14,40	7,44	14,40	2,00	2,69
t ₉ in s	t ₁₀ in s	t ₁₁ in s	t ₁₂ in s	t ₁₃ in s	t ₁₄ in s	t ₁₅ in s	t _M in s
2,00	40,51	7,44	40,51	2,00	1,38	4,25	148,31

Tab. 9: Ergebnisse der Einzelzeiten sowie der gesamten Spielzeit, Quelle: eigene Darstellung

Aus den Berechnungen ergibt sich eine Spielzeit t_M für das kombinierte Spiel von 148,31 s. Das entspricht 24 kombinierten Spielen/h.

7.3.3 Neues Shuttlesystem

Das neue Shuttlesystem sollte künftig für diese Lagerkonfiguration 36 kombinierte Spiele/h schaffen. Das würde die Spielzeit um ca. 50 % verkürzen. Die Spielzeit t_M darf für die 36 kombinierten Spiele 100 s betragen. In Unterpunkt 7.3.2 zeigen, dass die Einzelzeiten, bei denen das Shuttle den Fahrtrieb benutzt, mit Abstand am höchsten sind. Die Hubbewegung des Shuttles dauert insgesamt lediglich ca. 0,5 s. Der Hubantrieb wird somit nicht verändert, da hier kein Potential für Verbesserung gesehen wird. Zudem bleiben die Geschwindigkeitswerte des Vertikalumsetzers konstant. Dieses Szenario vereinfacht die Berechnung.

Den Berechnungen des alten Shuttles werden die variablen Einzelzeiten entnommen und deren Prozentsatz der Gesamtzeit errechnet. Dafür müssen die konstanten Werte, wie Ab- und Andocken, die Bewegung des Vertikalumsetzers, das Positionieren des Shuttles, die Überfahrt auf den Vertikalumsetzer

und die Hubbewegung des Shuttles, von der Gesamtzeit abgezogen werden. Die konstanten Werte sind ebenfalls von der Soll-Gesamtzeit zu subtrahieren. Danach kann das Produkt aus dem jeweiligen Prozentsatz und der Soll-Gesamtzeit gebildet werden. Die so errechneten Sollzeiten der variablen Einzelspiele sind in Tab. 10 dargestellt.

	Aufnahme bzw. Abgabe Riemen x = 1 bzw. 15	Fahrt P1 Shuttle x = 4 bzw. 6	Aufnahme bzw. Abgabe Teleskop x = 5 bzw. 11	Fahrt P2 Shuttle x = 10 bzw. 12
Einzelzeit t_x in s	3,32	10,21	5,39	23,64

Tab. 10: Sollzeiten der variablen Einzelspiele des neuen Shuttlesystems, Quelle: eigene Darstellung

Grundsätzlich wurde für die weiteren Berechnungen zuerst davon ausgegangen, mit denselben Beschleunigungen wie beim alten Shuttlesystem zu rechnen. Da jedoch die angestrebte Sollzeit mit den Beschleunigungen von Teleskop- und Riemenantrieb nicht umsetzbar ist, wurde von einer Beschleunigung von jeweils 3 m/s^2 ausgegangen. Mit diesen Werten liefert die Kalkulation die in Tab. 11 aufgeführten Ergebnisse.

	Shuttle Fahrantrieb x = SF	Shuttle Teleskopantrieb x = ST	Shuttle Riemenantrieb x = SR
Geschwindigkeit v_x in m/s	1,75	1,6	1,6
Beschleunigung a_x in m/s^2	0,7	3,0	3,0

Tab. 11: Errechnete Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte des neuen Shuttlesystems, Quelle: eigene Darstellung

Da bei den Geschwindigkeiten bzw. den Beschleunigungen von Riemen- und Teleskopantrieb das Handling der Behälter eine große Rolle spielt, wurde beschlossen, diese Werte zu verringern, um ein optimales Handling der Behälter gewährleisten zu können. Damit die geforderten Spielzeiten eingehalten werden können, werden die Werte der Fahrantriebsachse so erhöht, dass sich ca. 4 s Reserve ergeben. Tab. 12 zeigt die ausgelegten Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für das neue Shuttlesystem. Die Spielzeit t_M liegt mit dieser Auslegung bei 95,75 s, was 37 kombinierte Spielen/h ergibt.

	Shuttle Fahrantrieb x = SF	Shuttle Teleskopantrieb x = ST	Shuttle Riemenantrieb x = SR	Shuttle Hubantrieb x = SH
Geschwindigkeit v_x in m/s	2,0	0,95	0,95	0,08
Beschleunigung a_x in m/s^2	0,9	2,5	2,5	1,19
Strecke s_x in m	50,0	1,4	1,25	0,035

Tab. 12: Ausgewählte Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für das neue Shuttlesystem, Quelle: eigene Darstellung

8 AUSLEGUNG DER ANTRIEBSSYSTEME

In diesem Kapitel werden die Antriebe des neuentwickelten Shuttlesystems ausgelegt. Die erforderlichen Kalkulationen hängen unmittelbar mit den errechneten Spielzeiten (siehe Kap. 7) zusammen. Für die Berechnungen wurden zudem folgende Annahmen getroffen:

Masse des Fördergutes:	120 kg (2 Behälter 600 x 400 mm zu je 60 kg oder 4 Behälter 300 x 400 mm zu je 30 kg)
Masse des Shuttles:	210 kg (aus Konstruktion entnommen)
Masse der Hubeinheit:	108 kg (aus Konstruktion entnommen)
Masse des Teleskops:	20 kg (aus Konstruktion entnommen)

8.1 Fahrtrieb

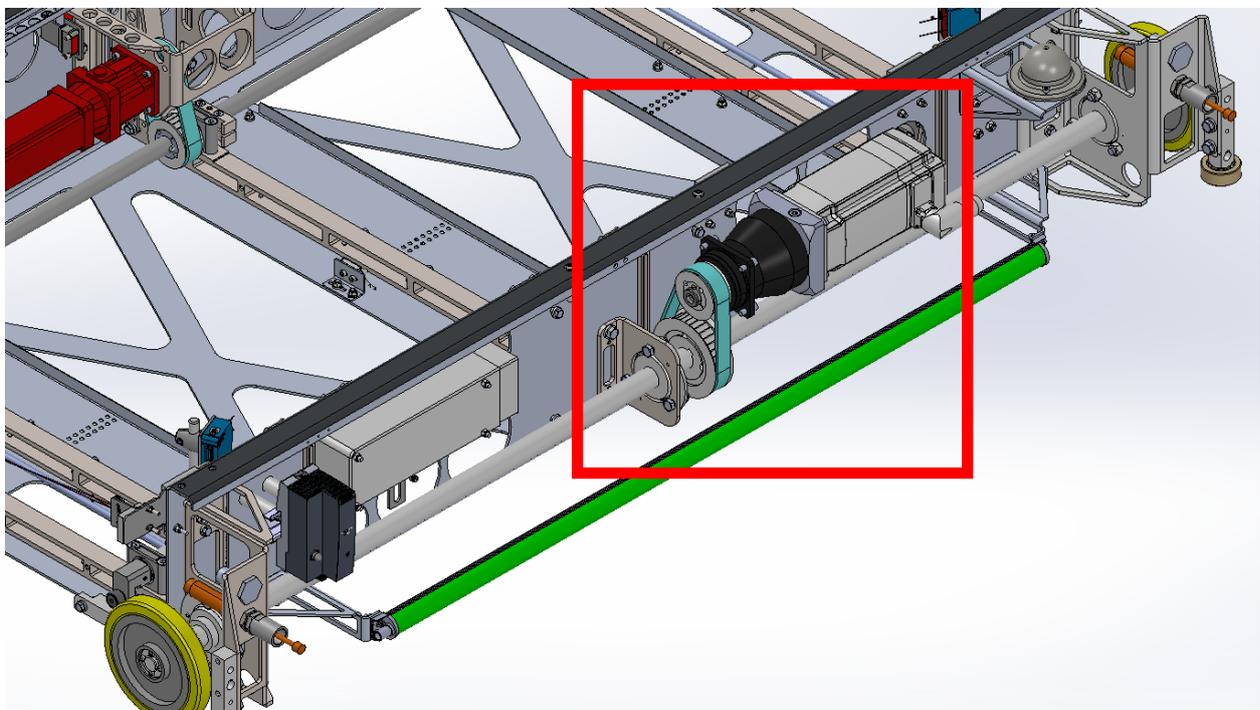


Abb. 51: Fahrtrieb des Shuttles, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Der Fahrtrieb des Shuttles (siehe Abb. 51) bewegt das Shuttle horizontal über die vier Laufräder. Die Kraftübertragung erfolgt mittels Riemen. Neben den allgemeinen Annahmen wurden für die Auslegung des Fahrtriebsmotors folgende Werte angenommen:

Es gibt vier Laufräder, von denen nur zwei direkt angetrieben werden. Ein Rad besitzt laut Datenblatt eine Massenträgheit von $0,034 \text{ kgm}^2$ und einen Durchmesser von 150 mm.

Zur Berechnung wurden für das Vorgelege gängige Werte angenommen. Es wird ein Riemen mit einer Riementeilung von 8,0 mm eingesetzt. Die Zähnezahzahl des Abtriebrades beträgt 36, die des Antriebrades 22. Es wurde eine Massenträgheit von $0,0001 \text{ kgm}^2$ geschätzt. Zudem wird ein Wirkungsgrad von 0,95 angenommen.

Für das Getriebe wurde eine Übersetzung von 6 sowie eine Massenträgheit von 0,0001 kgm² gewählt. Der Wirkungsgrad wird mit 0,95 modelliert.

8.1.1 Weg/Winkel

Der maximale Weg wurde mit 50 m in den Berechnungen der Spielzeiten (siehe Kap. 7) definiert. Um den zurückgelegten Weg am Vorgelege, am Getriebe bzw. am Motor errechnen zu können, muss der Weg wie folgt umgerechnet werden:

$$\varphi_{Ant} = 2 \pi \frac{s_{Fahr}}{d_{Rad} * \pi} \quad (7.1)$$

φ_{Ant}/rad	zurückgelegter Winkel Antriebswelle
s_{Fahr}/mm	Fahrweg
d_{Rad}/mm	Durchmesser des Rades

$$\varphi_G = \varphi_{Ant} * i_{Vg} \quad (7.2)$$

φ_G/rad	zurückgelegter Winkel Getriebe
$i_{Vg}/1$	Übersetzung Vorgelege

$$\varphi_{Mot} = \varphi_G * i_G \quad (7.3)$$

φ_{Mot}/rad	zurückgelegter Winkel Motor
$i_G/1$	Übersetzung Getriebe

Durch das Miteinbeziehen der Übersetzungen von Vorgelege und Getriebe ergeben sich folgende Werte für die zurückgelegten Winkel an Antriebswelle, Getriebe und Motor (siehe Tab. 13):

	Motor	Getriebe	Antriebswelle
Winkel φ in rad	6545,45	1090,91	666,67

Tab. 13: Ergebnisse Fahrtrieb Weg/Winkel, Quelle: eigene Darstellung

8.1.2 Winkelgeschwindigkeit, Drehzahl, Geschwindigkeit

Das Ergebnis der Spielzeitberechnung (siehe Kap. 7) für die Fahrtriebsachse beträgt 2,0 m/s. Zudem wurden die Beschleunigungen für das Anfahren bzw. Abbremsen mit $\pm 0,9 \text{ m/s}^2$ definiert. Über folgende Formel ergeben sich die Zeiten für Gesamtweg sowie Beschleunigung- und Bremsweg:

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{a} \quad (7.4)$$

t/s	Zeit
-----	------

v/ms^{-1} Geschwindigkeit

a/ms^{-2} Beschleunigung

$$s = \frac{1}{2} a * t^2 \tag{7.5}$$

s/m Weg

Daraus ergeben sich folgende Zeiten (siehe Tab. 14):

	Gesamt	Anfahren	Bremsen
Zeit t in s	27,22	2,22	2,22

Tab. 14: Ergebnisse Fahrtrieb Zeiten, Quelle: eigene Darstellung

Diese Zeiten werden zur Ermittlung der maximal erreichten Geschwindigkeit am Motor, am Getriebe und an der Antriebswelle benötigt. Die Geschwindigkeit wird sodann wie folgt ermittelt (,x' wird als Platzhalter für Motor, Getriebe bzw. Antriebswelle verwendet):

$$\omega_{x_{max}} = \frac{\Delta\varphi_x}{\Delta\tau} \tag{7.6}$$

$\omega_{x_{max}}/rads^{-1}$ max. Winkelgeschwindigkeit

Mit der kalkulierten Geschwindigkeit kann die maximale Drehzahl wie folgt ausgerechnet werden:

$$n_x = \frac{30}{\pi} \omega_{x_{max}} \tag{7.7}$$

n_{vg}/min^{-1} max. Drehzahl

Daraus resultieren folgende Werte (siehe Tab. 15):

	Motor	Getriebe	Antriebswelle
Winkelgeschwindigkeit ω in rad/s	261,82	43,64	26,67
Drehzahl n in 1/min	2500,28	416,7	254,65

Tab. 15: Ergebnisse Fahrtrieb Winkelgeschwindigkeit/Drehzahl, Quelle: eigene Darstellung

8.1.3 Winkelbeschleunigung

Mit Hilfe der berechneten Winkelgeschwindigkeit lassen sich in der Folge die Winkelbeschleunigungen für das Anfahren und das Bremsen berechnen (,x' wird als Platzhalter für Motor, Getriebe bzw. Antriebswelle verwendet):

$$\alpha_x = \frac{\Delta\omega_x}{\Delta\tau} \tag{7.8}$$

$\alpha_x/rads^{-2}$ Winkelbeschleunigung

Dies liefert folgende Ergebnisse (siehe Tab. 16):

	Motor	Getriebe	Antriebswelle
Winkelbeschleunigung beim Anfahren α in rad/s ²	117,94	19,66	12,01
Winkelbeschleunigung beim Bremsen α in rad/s ²	117,94	19,66	12,01

Tab. 16: Ergebnisse Fahrtrieb Winkelbeschleunigung, Quelle: eigene Darstellung

8.1.4 Trägheitsmoment

Für die Berechnung der erforderlichen Momente wird ferner das Trägheitsmoment benötigt, das an der Motorwelle wirkt. Für diese Berechnung werden die definierten Trägheitsmomente von Getriebe und Vorgelege sowie die Massenträgheit der Räder aus dem Datenblatt verwendet. Das Trägheitsmoment wird der Antriebswelle entnommen. Es beträgt 0,0016 kgm².

8.1.4.1 Lastträgheitsmoment auf Motorwelle

Das Lastträgheitsmoment auf der Motorwelle wird mit der allgemeinen Massenträgheitsformel berechnet, die wie folgt lautet:

$$J = \int_m r^2 dm \tag{7.9}$$

J/ kgm² Trägheitsmoment

r/m Radius

m/ kg Masse

Vereinfacht:

$$J = mr^2 \tag{7.10}$$

Beim Lastträgheitsmoment auf der Motorwelle wird die Übersetzung des Vorgeleges sowie des Getriebes miteinberechnet.

$$J_L = \frac{J}{i_G^2 \cdot i_V^2} \tag{7.11}$$

J_L/ kgm² Lastträgheitsmoment

8.1.4.2 Trägheitsmoment Antriebselement auf Motorwelle

Für die weiteren Berechnungen wird das gesamte Trägheitsmoment des gesamten Antriebsstranges benötigt. Zuerst wird das Trägheitsmoment des Antriebselementes wie folgt berechnet:

$$J_{Ant} = (n_{Rad} * J_{Rad}) + J_{Wel} \tag{7.12}$$

- J_{Ant} / kgm² Trägheitsmoment Antriebselement
- n_{Rad} /1 Anzahl Laufräder
- J_{Rad} / kgm² Trägheitsmoment Laufrad
- J_{Wel} / kgm² Trägheitsmoment Antriebswelle

Nun folgt die Berechnung des Trägheitsmoments des gesamten Antriebsstranges:

$$J_{Str} = \frac{J_{Ant}}{i_{Vg}^2 * i_G^2} + \frac{J_{Vg}}{i_G^2} + J_G \tag{7.13}$$

- J_{Str} / kgm² Trägheitsmoment Antriebsstrang
- J_{Vg} / kgm² Trägheitsmoment Vorgelege
- J_G / kgm² Trägheitsmoment Getriebe

8.1.4.3 Gesamtes Trägheitsmoment an der Motorwelle

$$J_M = J_{Str} + J_L \tag{7.14}$$

- J_M / kgm² Trägheitsmoment an Motorwelle

In

	Last	Antriebswelle	Rad	Antriebselement	Vorgelege	Getriebe	Antriebsstrang	Motorwelle
Trägheitsmoment J in kgm²	0,0193	0,0016	0,0034	0,0152	0,0001	0,0001	0,0003	0,0195

Tab. 17 sind alle Ergebnisse der Berechnungen bezüglich der Trägheitsmomente zusammengefasst.

	Last	Antriebswelle	Rad	Antriebselement	Vorgelege	Getriebe	Antriebsstrang	Motorwelle
Trägheitsmoment J in kgm²	0,0193	0,0016	0,0034	0,0152	0,0001	0,0001	0,0003	0,0195

Tab. 17: Ergebnisse Fahrtrieb Trägheitsmoment (Werte gerundet), Quelle: eigene Darstellung

8.1.5 Erforderliche Momente des Motors

Für die Auslegung des Motors sind das erforderliche Brems- sowie das erforderliche Beschleunigungsmoment essenzielle Werte.

8.1.5.1 Rollwiderstandsmoment

Für die Berechnung des Brems- und des Beschleunigungsmoments wird zunächst das Rollwiderstandsmoment benötigt. Für dessen Berechnung wiederum ist die Normalkraft zu ermitteln, die auf das Shuttle wirkt:

$$F_N = m * g \quad (7.15)$$

F_N /N Normalkraft auf Shuttle

m/ kg Masse

g/ms⁻² Erdbeschleunigung

Zudem wird für die Berechnung der Reibungskraft ein Rollwiderstand von 0,02 angenommen. Daraus kann die Reibungskraft wie folgt berechnet werden:

$$F_R = c_R * F_N \quad (7.16)$$

F_R /N Reibungskraft

c_R /1 Rollwiderstandskoeffizient

Mit Hilfe der Reibungskraft lässt sich anschließend das Rollwiderstandsmoment berechnen:

$$M_{R_{Ant}} = F_R * r \quad (7.17)$$

$M_{R_{Ant}}$ / Nm Rollwiderstandsmoment Antriebswelle

Hier müssen nun noch die Übersetzungen sowie die Wirkungsgrade von Getriebe und Vorgelege berücksichtigt werden:

$$M_{R_{Mot}} = \frac{M_{R_{Ant}}}{\eta_{Vg} * \eta_{G}} \quad (7.18)$$

$M_{R_{Mot}}$ / Nm Rollwiderstandsmoment Motor

η_{Vg} /1 Wirkungsgrad Vorgelege

η_G /1 Wirkungsgrad Getriebe

Tab. 18 zeigt die Ergebnisse der Berechnungen.

Masse m in kg	Normalkraft F_N in N	Reibungskraft F_R in N	Rollwiderstands- moment Antriebswelle $M_{R_{Ant}}$ in Nm	Rollwiderstands- moment Motor $M_{R_{Mot}}$ in Nm
330	3237,3	64,75	4,86	0,55

Tab. 18: Ergebnisse Fahrtrieb Rollwiderstandsmoment, Quelle: eigene Darstellung

8.1.5.2 Erforderliches Moment

Das Bremsmoment wird mit Hilfe der zuvor berechneten Winkelbeschleunigung und des Trägheitsmoments berechnet. Die Wirkungsgrade von Getriebe und Vorgelege werden hierbei berücksichtigt. Zudem wirkt das Rollwiderstandsmoment entgegengesetzt.

$$M_{Br} = J_M * \alpha_{Br_{Mot}} * \eta_{Vg} * \eta_G - M_{R_{Mot}} \quad (7.19)$$

M_{Br} / Nm erforderliches Bremsmoment

So wie das Bremsmoment wird auch das Beschleunigungsmoment mit der Winkelbeschleunigung sowie dem Trägheitsmoment berechnet. Das Rollwiderstandsmoment wirkt in gleicher Richtung wie das Beschleunigungsmoment. Die Wirkungsgrade von Getriebe und Vorgelege werden mit einbezogen.

$$M_{Anl} = \frac{J_M * \alpha_{Anl_{Mot}}}{\eta_{Vg} * \eta_G} + M_{R_{Mot}} \quad (7.20)$$

M_{Anl} / Nm erforderliches Beschleunigungsmoment

Die Ergebnisse der erforderlichen Momente folgen in Tab. 19.

	Beschleunigen	Bremsen
Moment M in Nm	3,1	1,5

Tab. 19: Ergebnisse Fahrtrieb erforderliche Momente, Quelle: eigene Darstellung

Die mechanische erforderliche Leistung wird in der Formel 5.2 beschrieben. Mit den bereits errechneten Werten ergeben sich die erforderlichen Leistungen in Tab.20.

	Beschleunigen	Bremsen
Leistung P in W	811,64	392,73

Tab. 20: Ergebnisse Fahrtrieb erforderliche Leistung, Quelle: eigene Darstellung

8.2 Riemenantrieb

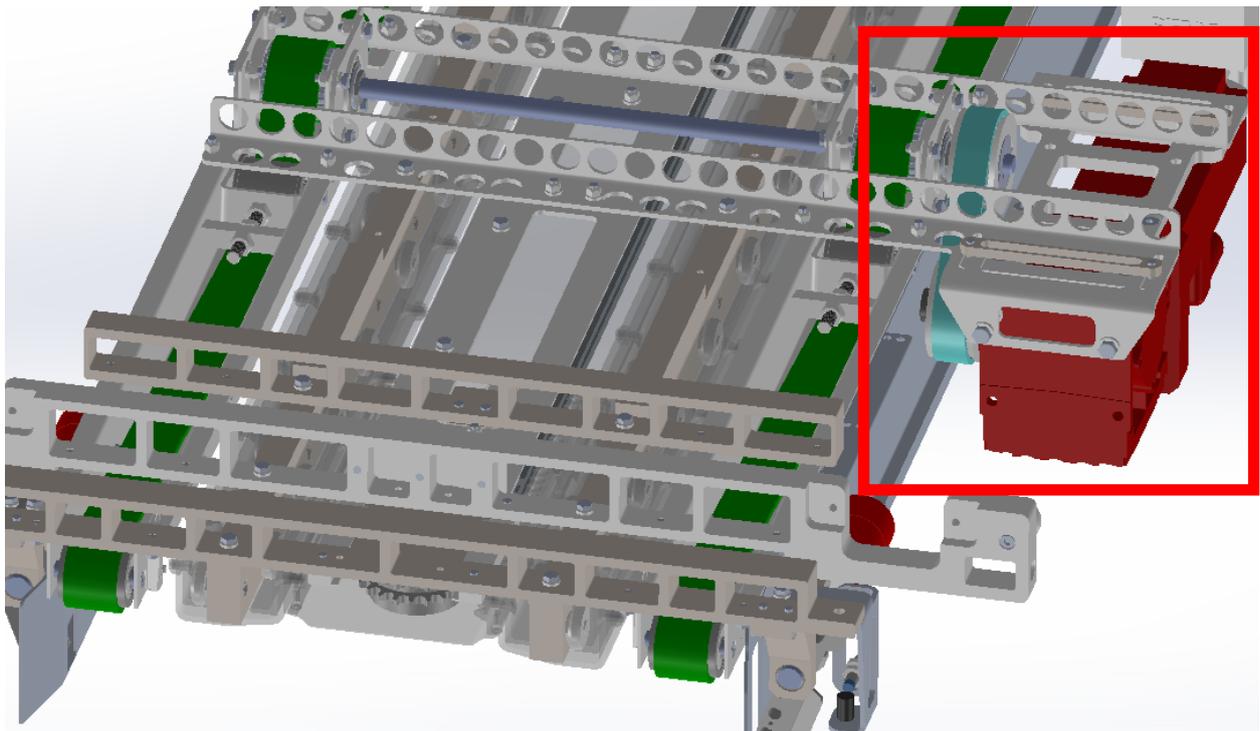


Abb. 52: Riemenantrieb des Shuttles, Unterseite, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Der Riemenantrieb (siehe Abb. 52) dient zur Ausrichtung der Behälter auf dem Shuttle. Die Kraftübertragung erfolgt über einem Riemen. Neben den allgemeinen Annahmen wurden für die Auslegung des Riemenantriebs folgende Werte benutzt:

Der Antrieb bewegt zwei 3275 mm lange Riemen mit einer Gesamtmasse von 0,52 kg. Für den Reibungskoeffizienten auf der Oberfläche wird von 0,35 ausgegangen.

Zur Berechnung werden für das Vorgelege gängige Werte angenommen. Es wird ein Riemen mit einer Riementeilung von 8,0 mm eingesetzt. Die Zähnezahl des Abtriebrades wie auch des Antriebrades beträgt jeweils 22. Es wurde eine Massenträgheit von 0,0001 kgm² geschätzt. Zudem wird ein Wirkungsgrad von 0,95 angenommen.

Für das Getriebe wird eine Übersetzung von 7 sowie eine Massenträgheit von 0,0001 kgm² benutzt. Der Wirkungsgrad wird auf 0,9 festgelegt.

Zur Berechnung werden die in Kap. 7 berechneten Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte hinzugezogen. Für den Riemenantrieb beträgt die Geschwindigkeit 0,95 m/s. Die Anfahrbeschleunigung sowie die Bremsbeschleunigung haben eine Höhe von ± 2 m/s². Der zurückgelegte Weg wird mit 1250 mm definiert.

Die Berechnungen erfolgen analog zum Unterpunkt 8.1. Darum werden in den Tab. 21–Tab. 24 nachfolgend lediglich die Ergebnisse angeführt.

	Motor	Getriebe	Antriebswelle
Winkel φ in rad	392,7	56,1	56,1
Winkelgeschwindigkeit ω in rad/s	299,77	42,82	42,82
Drehzahl n in 1/min	2862,6	408,94	408,94
Winkelbeschleunigung beim Anfahren α in rad/s ²	624,52	89,22	89,22
Winkelbeschleunigung beim Bremsen α in rad/s ²	624,52	89,22	89,22

Tab. 21: Ergebnisse Riemenantrieb Winkel/Winkelgeschwindigkeit/Winkelbeschleunigung/Drehzahl, Quelle: eigene Darstellung

	Last	Antriebswelle	Umlenkrolle	Antriebs-element	Vorgelege	Getriebe	Antriebsstrang	Motorwelle
Trägheitsmoment J in kgm ²	0,00122	0,00009	0,00005	0,0011	0,0001	0,0001	0,00012	0,00134

Tab. 22: Ergebnisse Riemenantrieb Trägheitsmomente, Quelle: eigene Darstellung

Masse m in kg	Normalkraft F_N in N	Reibungskraft F_R in N	Rollwiderstandsmoment Antriebswelle M_{RAnt} in Nm	Rollwiderstandsmoment Motor M_{RMot} in Nm
120	1177,2	412	9,2	1,5

Tab. 23: Ergebnisse Riemenantrieb Rollwiderstandsmoment, Quelle: eigene Darstellung

	Beschleunigen	Bremsen
Moment M in Nm	2,5	-0,8
Leistung P in W	749,43	-239,82

Tab. 24: Ergebnisse Riemenantrieb erforderliche Momente und Leistungen, Quelle: eigene Darstellung

8.3 Teleskopantrieb

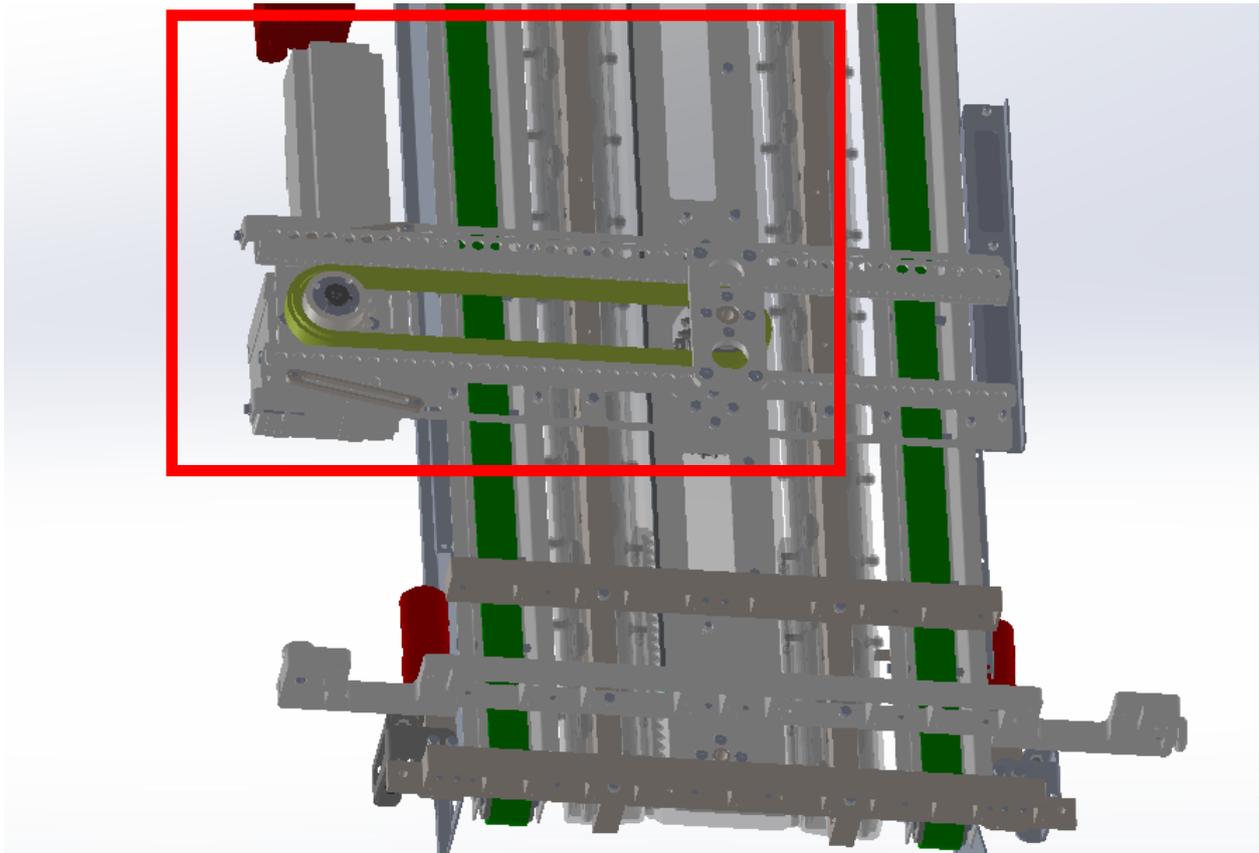


Abb. 53: Teleskopantrieb des Shuttles, Unterseite, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Der Teleskopantrieb (siehe Abb. 53) dient zur Aufnahme und Abgabe der Behälter. Die Kraftübertragung erfolgt mittels Kette. Neben den allgemeinen Annahmen wurden für die Auslegung des Teleskopantriebs folgende Werte festgelegt:

Die Antriebskette besitzt eine Kettenteilung von 9,525 mm sowie eine Gesamtlänge von 3170 mm. Die Masse der Antriebskette beträgt 2,73 kg. Der Reibungskoeffizient wurde mit 0,05 angenommen.

Zur Berechnung werden für das Vorgelege gängige Werte eingesetzt. Es wird eine Kette mit einer Kettenteilung von 12,7 mm verwendet. Die Zähnezahzahl des Abtriebrades wie auch des Antriebrades beträgt 16. Es wurde eine Massenträgheit von 0,0001 kgm² geschätzt. Zudem wird ein Wirkungsgrad von 0,95 angenommen.

Für das Getriebe werden eine Übersetzung von 9, eine Massenträgheit von 0,0001 kgm² und ein Wirkungsgrad von 0,95 angenommen.

Zur Berechnung werden die in Kap. 7 berechneten Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte hinzugezogen. Für den Teleskopantrieb beträgt die Geschwindigkeit 0,95 m/s. Als Anfahrbeschleunigung sowie als Bremsbeschleunigung werden $\pm 2,5$ m/s² gewählt. Der zurückgelegte Weg wird mit 1400 mm definiert.

Die Berechnungen erfolgen analog zu Unterpunkt 8.1. Darum werden nachfolgend in den Tab. 25–Tab. 28 nur die Ergebnisse angeführt.

	Motor	Getriebe	Antriebswelle
Winkel φ in rad	377,8	41,98	41,98
Winkelgeschwindigkeit ω in rad/s	257,01	28,56	28,56
Drehzahl n in 1/min	2454,24	272,69	272,69
Winkelbeschleunigung beim Anfahren α in rad/s ²	676,33	75,15	75,15
Winkelbeschleunigung beim Bremsen α in rad/s ²	676,33	75,15	75,15

Tab. 25: Ergebnisse Teleskopantrieb Winkel/Winkelgeschwindigkeit/Winkelbeschleunigung/Drehzahl, Quelle: eigene Darstellung

	Last	Antriebswelle	Umlenrolle	Antriebs-element	Vorgelege	Getriebe	Antriebsstrang	Motorwelle
Trägheitsmoment J in kgm ²	0,00194	0,00023	0,0002	0,00409	0,0001	0,0001	0,00409	0,00209

Tab. 26: Ergebnisse Teleskopantrieb Trägheitsmoment, Quelle: eigene Darstellung

Masse m in kg	Normalkraft F_N in N	Reibungskraft F_R in N	Rollwiderstandsmoment Antriebswelle M_{RAnt} in Nm	Rollwiderstandsmoment Motor M_{RMot} in Nm
140	1373,4	68,87	2,3	0,3

Tab. 27: Ergebnisse Teleskopantrieb Rollwiderstandsmoment, Quelle: eigene Darstellung

	Beschleunigen	Bremsen
Moment M in Nm	1,8	1,0
Leistung P in W	462,62	257,01

Tab. 28: Ergebnisse Teleskopantrieb erforderliche Momente und Leistungen, Quelle: eigene Darstellung

8.4 Hubantrieb

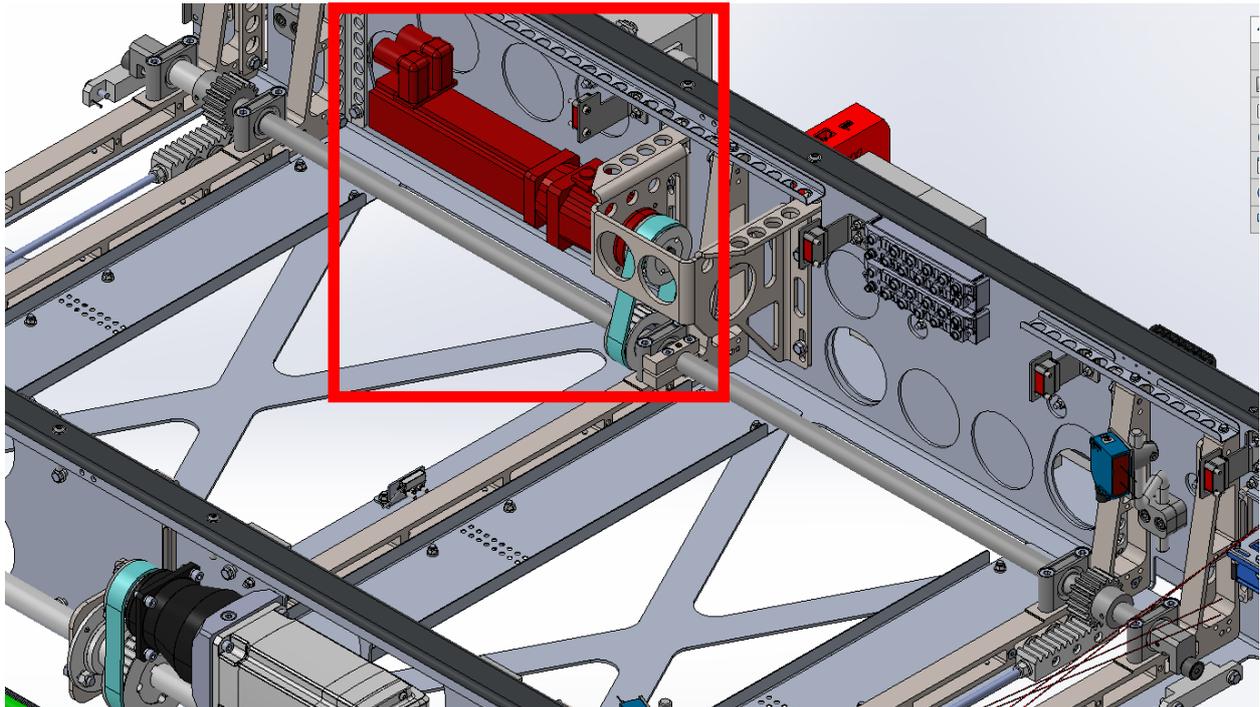


Abb. 54: Hubantrieb des Shuttles, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Der Hubantrieb (siehe Abb. 54) hebt die Teleskopeinheit beim Vorgang der Aufnahme bzw. der Abgabe der Behälter. Die Kraftübertragung erfolgt mittels Riemen auf eine Exzenterwelle. Der Absolutweg der Hubhöhe beträgt 35 mm. Dieser entspricht einer 180°-Drehung an der Exzenterwelle. Der Weg beruht auf Erfahrungswerten und berücksichtigt die Durchbiegung des Regals sowie der Behälter. Dieser Antrieb wird vom alten System übernommen, deshalb erfolgt hierzu keine neue Berechnung. Die Ergebnisse der Kalkulation zum alten Antriebssystem werden in Tab. 29 angeführt.

	Motor	Getriebe	Antriebswelle	Stellung
Winkel φ in rad	153,94	3,14	3,14	bei 180°
Max. Winkelgeschwindigkeit ω in rad/s	236,83	4,83	4,83	bei 88° bzw. 92°
Max. Drehzahl n in 1/min	2261,54	46,15	46,15	bei 88° bzw. 92°
Max. Winkelbeschleunigung beim Anfahren α in rad/s ²	2368,28	48,33	48,33	bei 13°
Max. Winkelbeschleunigung beim Bremsen α in rad/s ²	2368,28	48,33	48,33	bei 167°
Max. Moment M in Nm	0,898	–	–	bei 88° bzw. 92°
Max. Leistung P in W	212,67	-	-	bei 88° bzw. 92°

Tab. 29: Ergebnisse Hubantrieb Winkel/Winkelgeschwindigkeit/Winkelbeschleunigung/Drehzahl/Moment/Leistung, Quelle: eigene Darstellung

9 AUSFÜHRUNGSVARIANTEN

In den folgenden Unterpunkten werden Ausführungsvarianten hinsichtlich Antrieb, Frequenzumrichter, Steuerung, Versorgung, Messsystem sowie Datenübertragung dargestellt.

9.1 Antrieb



Abb. 55: SEW CMP, Quelle: SEW Motor (2010), Online-Quelle [11.11.2020]

Motor und Getriebe stammen vom Hersteller SEW. Die Motoren der einzelnen Achsen gehören zur Serie CMP. Diese Motoren sind Servoantriebe (siehe Abb. 55). Das jeweilige Getriebe wird hinsichtlich der Auslegung ausgewählt. Details hierzu bietet Unterpunkt 9.7.

9.2 Frequenzumrichter

Die Regelung der Drehzahlen des Motors übernimmt der Frequenzumrichter. Letzterer wird über das Bussystem *Profinet* angesteuert.

9.2.1 Variante 1



Abb. 56: SEW ELVCD, Quelle: SEW ELVCD (2020), Online-Quelle [11.11.2020]

Die erste Variante gehört zur Extra-Low-Voltage-Compact-Drive(ELVCD)-Serie (siehe Abb. 56) des Herstellers SEW. Sie wurde speziell für Anwendungen im Gleichstrombereich entwickelt. Die Umrichter sitzen hierbei dezentral. Der Anschluss der Kabel beim Frequenzumrichter ist elektrisch fix. Auf der Motorseite sind die Kabel steckbar ausgeführt. Die Frequenzumrichter haben zudem einen Safe-Torque-Off(STO)-Eingang zur sicheren Abschaltung des Antriebes. Die vorgegebenen Geschwindigkeiten lassen sich bei der Fahrtriebsachse nur mit dem Einsatz von zwei Motoren umsetzen, die im Synchronlauf die

Antriebswelle antreiben. Die Ansteuerung der Steuerung erfolgt per Controller, der über das Bussystem Profinet mit der Steuerung verbunden ist.

9.2.2 Variante 2



Abb. 57: SEW Maxo, Quelle: nicht veröffentlichte Betriebsanleitung SEW

Die *Maxo-Box* des Herstellers SEW (siehe Abb. 57) ist ein neuentwickeltes Produkt, das die Regelung von vier Achsen gewährleistet. Die elektrischen Anschlüsse sind steckbar ausgeführt. Zudem sind höhere Leistungen als bei Variante 1 realisierbar, sodass die vorgegeben Geschwindigkeiten und Beschleunigungen jeder Achse erreicht werden können. Eine sicherheitsrelevante Abschaltung mittels STO-Kontakt ist ebenfalls möglich. Zudem ist an der Box ein Anschluss zur Verwendung von Superkondensatoren (Supercaps) vorgesehen. Die Ansteuerung dieser Box erfolgt, ähnlich wie bei Variante 1, via Controller, der über Profinet mit der Steuerung verbunden ist.

9.3 Steuerung

Die Steuerung ist neben dem Antriebsstrang das Herzstück des Shuttles. Sie realisiert die Abläufe des Shuttles und steht in Kommunikation mit dem MFR sowie der Kopfsteuerung des Kompaktlagersystems. Am Shuttle selbst ist es die Aufgabe der Steuerung, alle IO-Signale zu verarbeiten.

9.3.1 Variante 1



Abb. 58: Siemens CPU1512SP F, Quelle: Siemens Admall CPU (2020), Online-Quelle [11.11.2020]

Eine Möglichkeit zur Ansteuerung der Achsen und zur Abwicklung des gesamten Ablaufes ist der Einsatz einer Siemens CPU (siehe Abb. 58). Dabei wird auf eine CPU der SP-Serie gesetzt, die direkte IO-Anschlüsse bietet. Aufgrund des Einsatzes ähnlicher CPUs in anderen firmeninternen Bereichen hat die Firma Fb Industry Automation bereits Erfahrung mit der Programmierung solcher Steuerungen. Softwaretechnisch müssten nicht alle Bausteine neu entwickelt werden.

9.3.2 Variante 2



Abb. 59: Siemens IPC, Quelle: Siemens IPC (2020), Online-Quelle [11.11.2020]

Die Ansteuerung des Shuttles lässt sich auch über einen IPC umsetzen, etwa mittels eines IPC der Firma Siemens (siehe Abb. 59). Ein Vorteil dieser Variante sind die geringeren Kosten des IPC. Jedoch fallen

Aufwände für IO-Hubs an, da bei dieser Variante kein direkter Anschluss der IOs möglich sind. Zudem müsste die komplette Software neu entwickelt werden.

9.4 Positionierung Fahrtriebsachse

Die Positionierung der Fahrtriebsachse spielt beim Ablauf hinsichtlich der Spielzeit eine große Rolle.

9.4.1 Variante 1

In dieser Variante wird die Positionierung der Fahrtriebsachse über den internen Drehzahlgeber des Motors ausgeführt. Da bei den Überfahrten vom Vertikalumsetzer in das Regal ein Schlupf auftreten kann, ist die reine Positionierung über den Drehzahlgeber nicht möglich. Daher muss bei dieser Variante die Achse jeweils nach der Fachfeinpositionierung die Achse referenziert werden. Dies wirkt sich negativ auf die Spielzeit aus, da die Referenzierung der Achse weitere Zeit erfordert. Jedoch ist diese Ausführung der Positionierung preiswert, da keine zusätzlichen Geber verwendet werden.

9.4.2 Variante 2



Abb. 60: Sick-Messsystem, Quelle: Sick OLM (2020), Online-Quelle [11.11.2020]

Zur exakten Positionierung der Fahrtriebsachse wird bei Variante 2 auf ein optisches Linear-Messsystem von Sick gesetzt. Hierzu muss auf der Fahrschiene ein Barcodeband angebracht werden, das vom Scanner (siehe Abb. 60) gelesen wird. Dadurch ist die Position des Shuttles eindeutig und exakt determiniert.

9.4.2.1 Mit ELVCD

Das Messsystem steht in direkter Verbindung mit Steuerung und Frequenzumrichter. Im Regelfall übernimmt der Frequenzumrichter die Positionierung, doch ist dies in der ELVCD-Ausführung nicht möglich. Deshalb muss bei Letzterer die Positionierung die Steuerung übernehmen, was die Positionierung etwas träger macht, da hier die Zykluszeit der Steuerung hinzutritt.

9.4.2.2 Mit Maxo

Bei der Maxo-Frequenzumrichterbox ist ein direkter Anschluss des Messsystems möglich. Hierbei übernimmt der Frequenzumrichter die gesamte Positionierung und muss von der Steuerung lediglich angestoßen werden.

9.5 Energieübertragung

Die Energieübertragung der Shuttles im Regal bzw. am Vertikalumsetzer erfolgt unter Einsatz von Schleifleitungen. Für zukünftige Projekte sollte es möglich sein, dass sich bis zu zwei Shuttles in einer Ebene gleichzeitig bewegen.

9.5.1 Variante 1

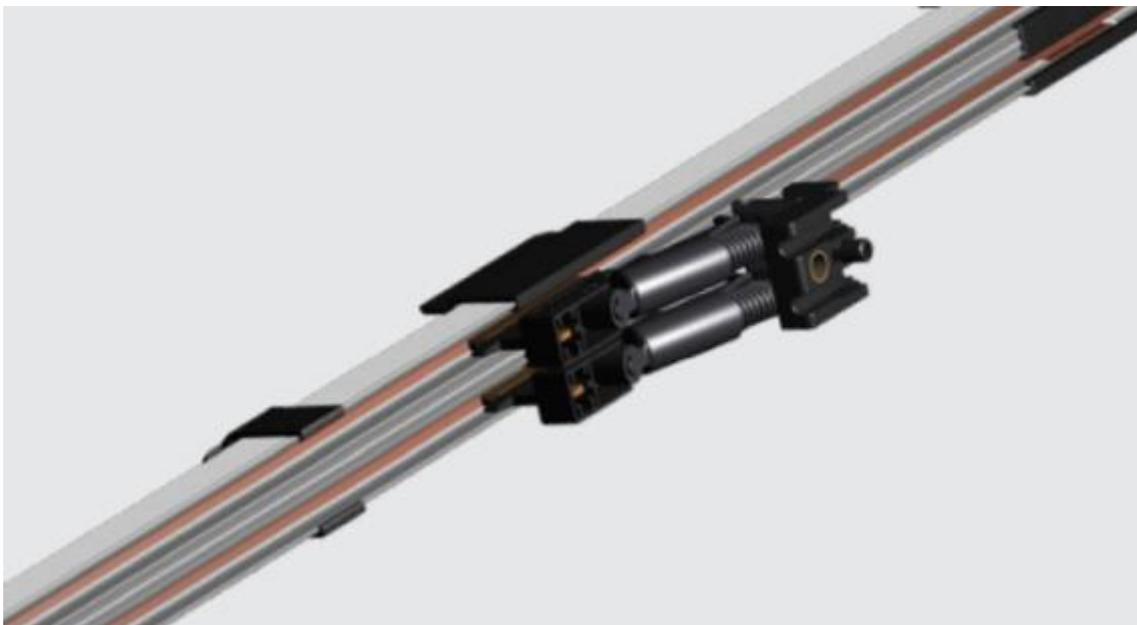


Abb. 61: Vahle-Schleifleitung, Quelle: Vahle Schleifleitung (2020), Online-Quelle [11.11.2020]

Die Schleifleitung der Firma Vahle (siehe Abb. 61) ist die günstigere Variante. Zudem ist die Montagezeit der Schleifleitungen durch die einfache Cliptechnik geringer. Die Stromschienen haben jedoch eine maximale zulässige Stromstärke von nicht mehr als 50 A (kurzfristig 100 A möglich).

9.5.2 Variante 2

Abb. 62 zeigt das Stromschienensystem der Firma Conductix. Bei dieser Variante ist es möglich, gleichzeitig zwei Shuttles in einer Ebene zu bewegen. Die Stromschiene hat eine maximal zulässige Stromstärke von 100 A. Des Weiteren sind die Stromabnehmer auf eine maximal zulässige Stromstärke von 50 A ausgelegt. Dem stehen die höheren Kosten sowie die etwas längere Montagezeit einer Schiene gegenüber.



Abb. 62: Conductix-Schleifleitung, Quelle: Conductix Schleifleitung (2015), Online-Quelle [11.11.2020]

9.6 Datenübertragung

Für den Ablauf erhält das Shuttle Befehle vom Materialflussrechner. Zudem muss es bei Überfahrten auf dem Vertikalumsetzer sowie bei Ein- und Auslagerung in der Vorzone mit der Kopfsteuerung kommunizieren. Für diese Kommunikation benötigt das Shuttle die drahtlose Übertragung der Daten. Hierbei wird auf WLAN-Technik gesetzt.

9.6.1 Variante 1



Abb. 63: Phoenix-Contact-Funkmodul, Quelle: Phoenix Contact WLAN, Online-Quelle [11.11.2020]

Variante 1 ist in Abb. 63 dargestellt. Es zeigt das Funkmodul FL WLAN 2100 des Herstellers Phoenix Contact. Dieses Modul wird im Shuttle verbaut und verbindet sich mit dezentral montierten Accesspoints. Das Modul ist sowohl für 2,4 GHz als auch 5 GHz einsetzbar. Die Datenübertragung kann im Bereich je nach Umgebungsbedingungen mit bis zu 50 m erfolgen. Für weitere Distanzen müssten mehrere Accesspoints installiert werden. Die Datenübertragung über das Bussystem Profinet ist möglich, doch gibt es keine offizielle Zertifizierung. Diese Lösung ist daher günstiger als Variante 2.

9.6.2 Variante 2



Abb. 64: Siemens WLAN-Modul, Quelle: Siemens Admall WLAN (2020), Online-Quelle [11.11.2020]

Abb. 64 zeigt das WLAN-Modul des Herstellers Siemens. Die Leistungsdaten entsprechen jenem der Variante 1. Allerdings ist im Gegensatz zum Fabrikat von Phoenix Contact das Bussystem Profinet sowie Profisafe zertifiziert. Zudem lassen sich auf Wunsch ganze Anlagen durch den Hersteller Siemens zertifizieren.

9.7 Wahl der Ausführung

In diesem Unterpunkt werden die hinsichtlich der Ausführung getroffenen Entscheidungen näher beschrieben.

9.7.1 Antrieb

In diesem Unterabschnitt wird die Auswahl der Komponenten hinsichtlich des Motors sowie des Getriebes der gesamten Achsen beleuchtet.

9.7.1.1 Fahrtrieb

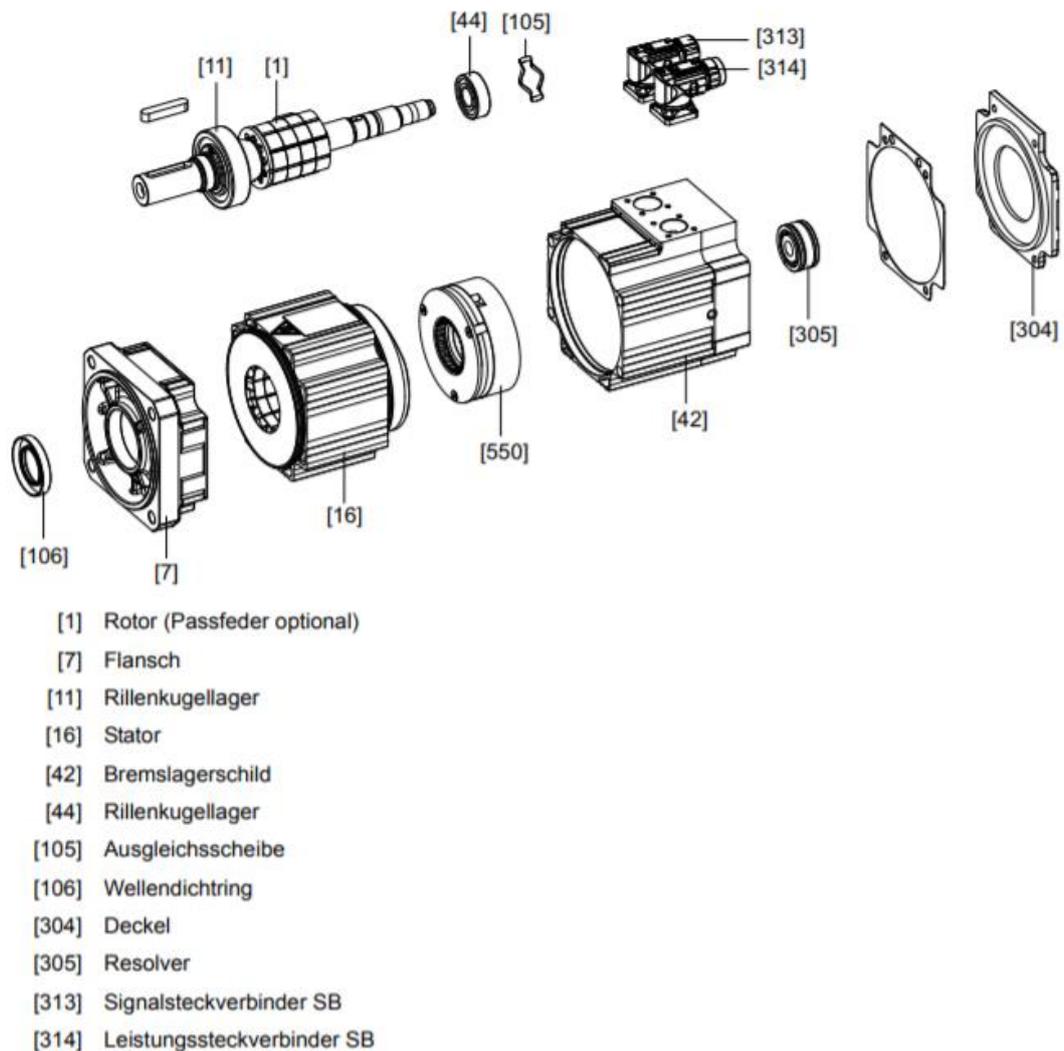
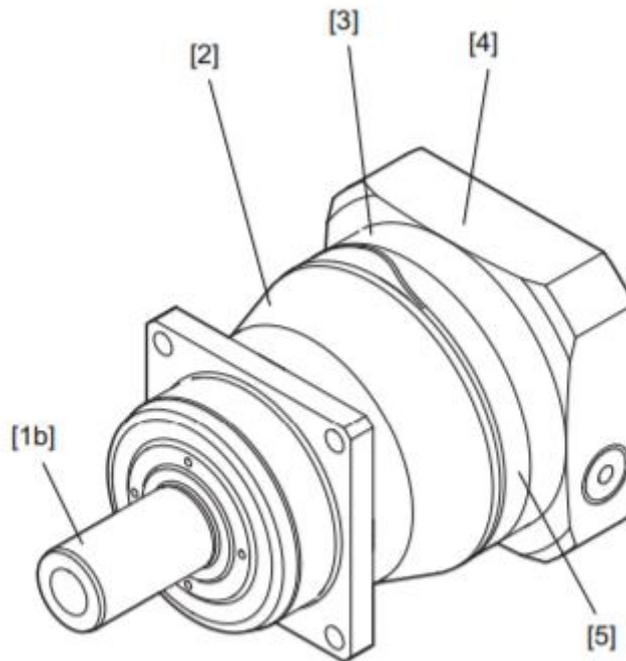


Abb. 65: SEW Motortyp CMP71M, Quelle: SEW Motor (2010), Online-Quelle [11.11.2020]

Als Fahrtrieb wird der SEW-Motor vom Typ CMP71M gewählt. Abb. 65 zeigt den Aufbau des Motors. Der Antriebsstrang wird ohne Bremse ausgeführt, was die Wartbarkeit des Shuttles steigert. So kann das Shuttle im Fehlerfall händisch verschoben werden. Ansonsten hätte eine eigene Vorrichtung entwickelt werden müssen, die die Fahrtriebsachse im Fehlerfall aushebelt, damit das Shuttle bewegt werden kann. Der Motor besitzt eine Bemessungsdrehzahl von 4500 1/min, einen Stillstandsstrom von 10,9 A

sowie ein Stillstandsmoment von 9,4 Nm. Zudem wird ein Planetengetriebe des Herstellers SEW vom Typ P5NG31 (siehe Abb. 66) verbaut. Das Übersetzungsverhältnis des Getriebes liegt bei 7:1.



[1a]	Flanschblockwelle	[3]	Adaptergehäuse
[1b]	Abtriebswelle	[4]	Adapterflansch
[2]	Getriebegehäuse	[5]	Typenschild

Abb. 66: SEW Getriebetyp P5NG31, Quelle: SEW Servoplanetengetriebe (2020), Online-Quelle [13.11.2020]

9.7.1.2 Teleskopantrieb

Für den Teleskopantriebsstrang wird ein Motor vom Typ CMP50M des Herstellers SEW verwendet, der in Abb. 67 zu sehen ist. Der Motor wird ohne Bremse ausgeführt, was das Handling im Störfall steigert. Das Teleskop kann im Notfall händisch zurückgezogen werden. Ansonsten wäre die Bremse aufwendig zu entlüften, während zeitgleich das Teleskop händisch verschoben werden müsste. Der Teleskopantriebsmotor besitzt eine Bemessungsdrehzahl von 3000 1/min, einen Stillstandsstrom von 1,68A sowie ein Stillstandsmoment von 2,4 Nm.

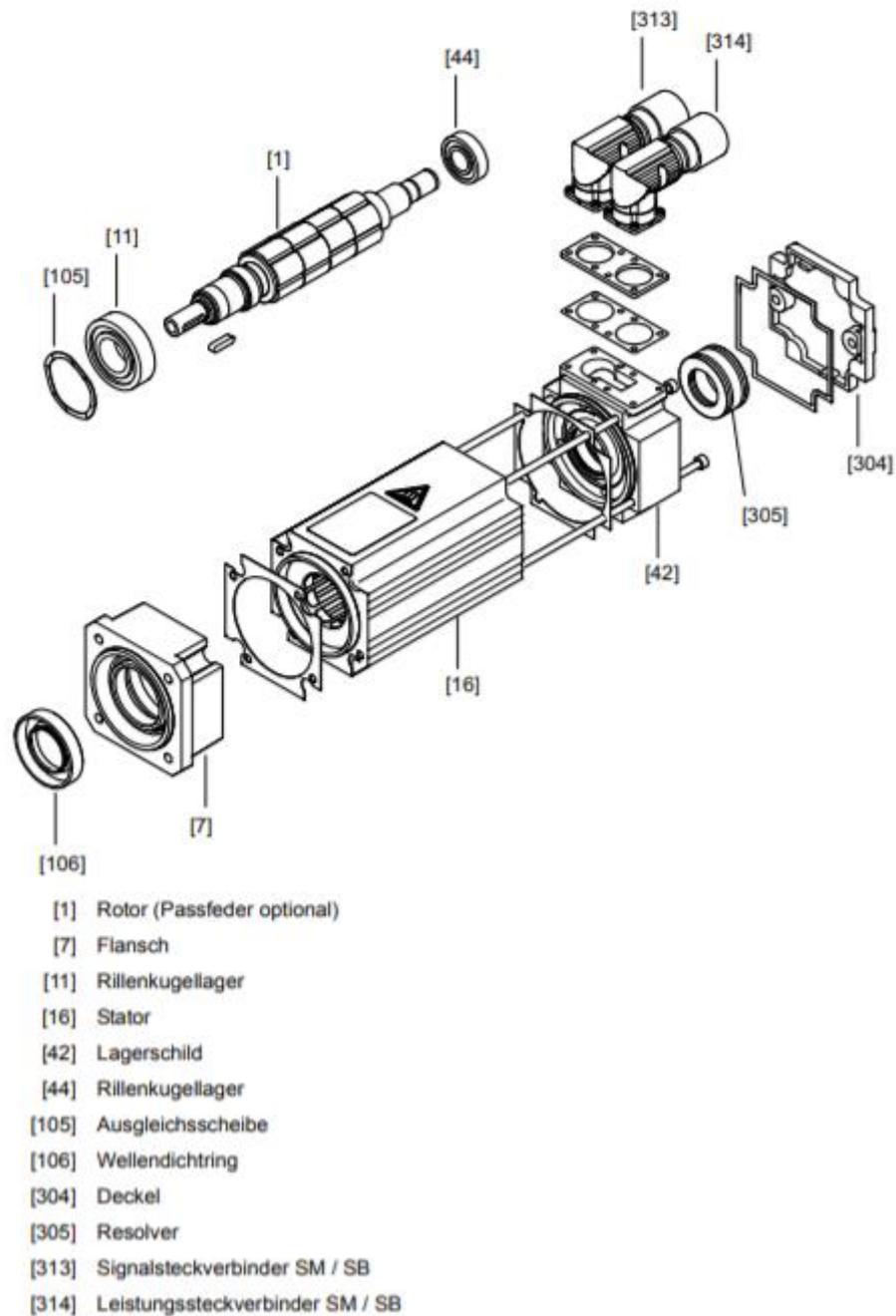
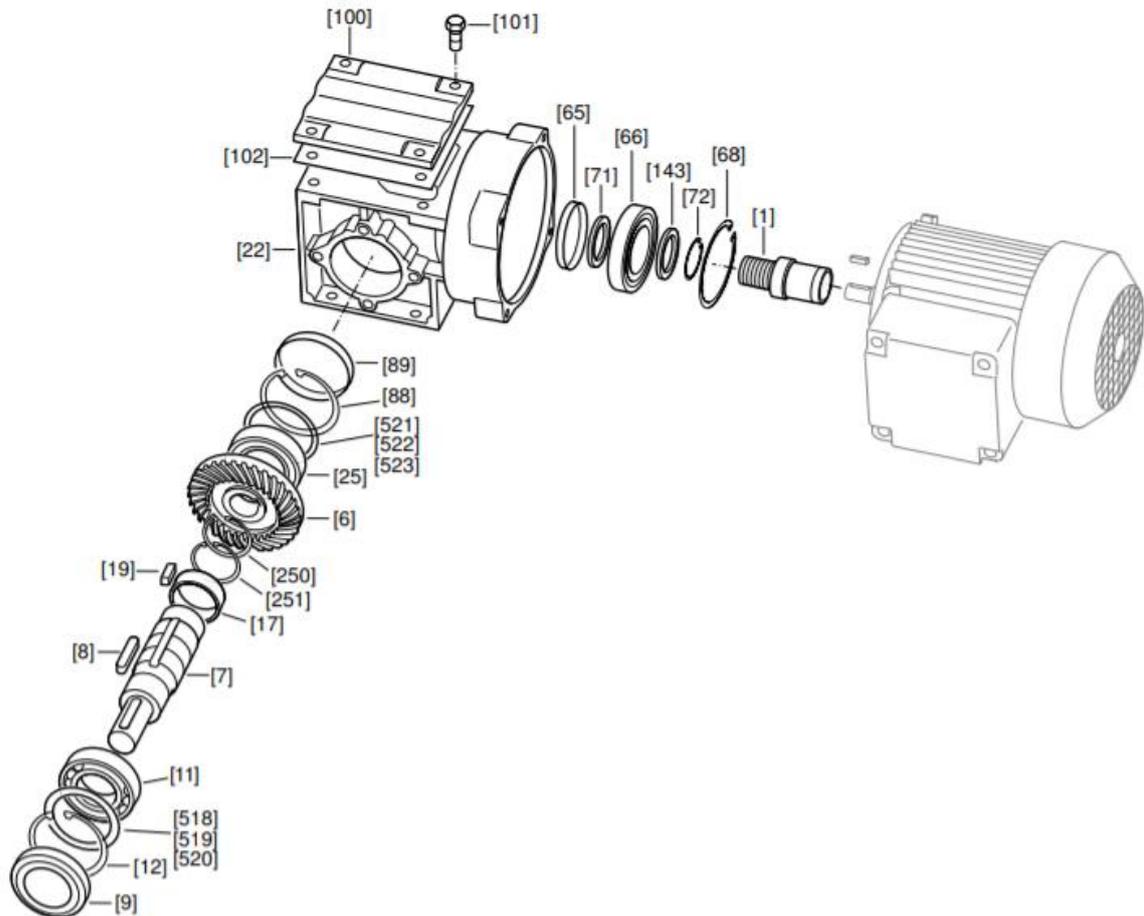


Abb. 67: SEW Motortyp CMP40M und CMP50M, Quelle: SEW Motor (2010), Online-Quelle [11.11.2020]

Auf dem Motor sitzt ein Spiroplangetriebe vom Typ W20 des Hersteller SEWs (zum Aufbau siehe Abb. 68) mit einer Übersetzung von 10,25.



9007199274048267

[1] Ritzel	[19] Passfeder	[88] Sicherungsring	[518] Pass-Scheibe
[6] Rad	[22] Getriebegehäuse	[89] Verschlusskappe	[519] Pass-Scheibe
[7] Abtriebswelle	[25] Wälzlager	[100] Getriebedeckel	[520] Pass-Scheibe
[8] Passfeder	[65] Radial-Wellendichtring	[101] Sechskantschraube	[521] Pass-Scheibe
[9] Radial-Wellendichtring	[66] Wälzlager	[102] Dichtung	[522] Pass-Scheibe
[11] Wälzlager	[68] Sicherungsring	[143] Stützscheibe	[523] Pass-Scheibe
[12] Sicherungsring	[71] Stützscheibe	[250] Sicherungsring	
[17] Distanzrohr	[72] Sicherungsring	[251] Sicherungsring	

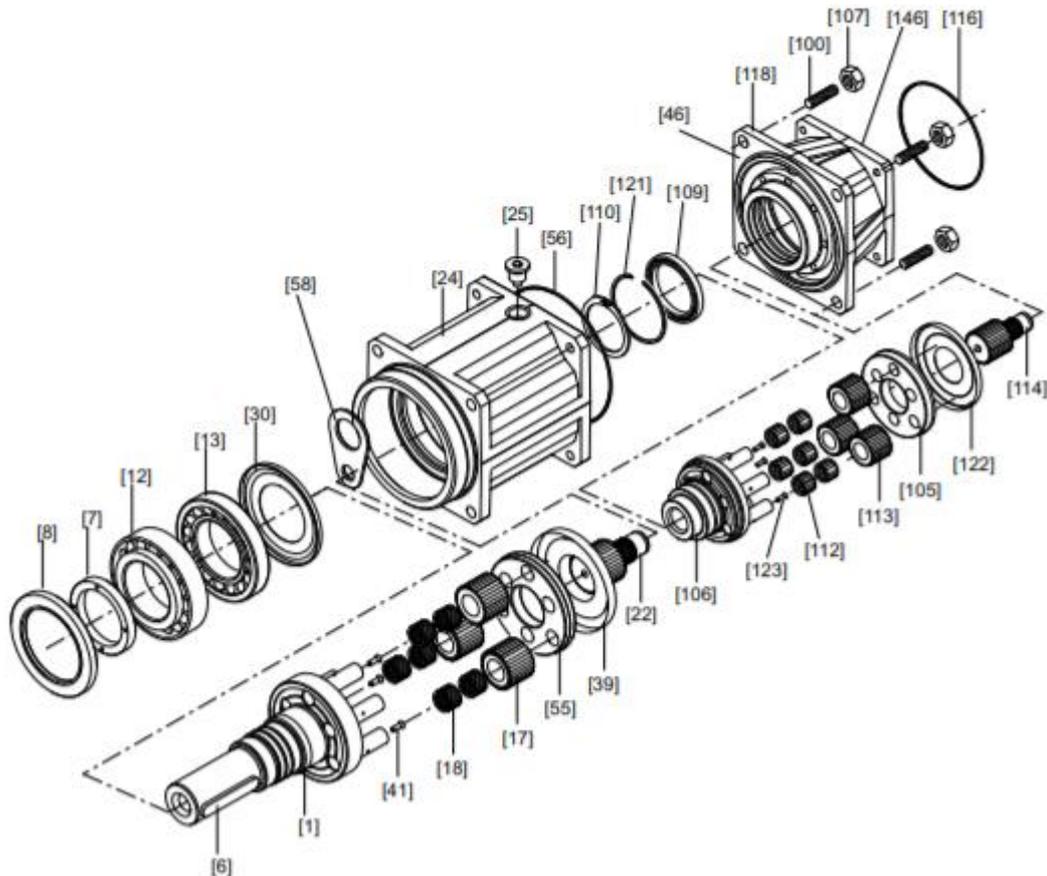
Abb. 68: SEW Getriebetyp W20, Quelle: SEW Spiroplangetriebe (2018), Online-Quelle [11.11.2020]

9.7.1.3 Riemenantrieb

Die Ausführung des Riemen- ähnelt dem des Teleskopantriebes. Es wird dasselbe Getriebe vom Typ W20 (siehe Abb. 68) sowie ein gleicher Motortyp CMP50M (siehe Abb. 67) verwendet. Der Motor unterscheidet sich jedoch in den technischen Daten, da er eine größere Bemessungsdrehzahl besitzt. Im Fall des Riemenantriebsmotors beträgt diese 4500 1/min. Entsprechend besitzt der Motor einen Stillstandsstrom von 2,3 A sowie ein Stillstandsmoment von 2,4 Nm. Die Übersetzung des Getriebes ist dieselbe wie beim Teleskopantrieb (10,25).

9.7.1.4 Hubantrieb

Der Hubantrieb wird mit dem SEW-Motor CMP40M (zum Aufbau siehe Abb. 67) ausgeführt. Bei diesem wird eine Bremse verbaut. Andernfalls müsste eine Halteregelung für den Motor verwendet werden, wenn sich das Lastaufnahmemittel in gehobener Position befindet. Dies würde eine Belastung darstellen, die durch die Bremse umgangen werden kann. Der Motor besitzt eine Bemessungsdrehzahl von 3000 1/min, einen Stillstandsstrom von 0,95 A sowie ein Stillstandsmoment von 0,8 Nm. Es wird ein Planetengetriebe von Typ PSKF222 verwendet. Abb. 69 zeigt den gesamten Aufbau des Getriebes. Die Übersetzung beträgt 49.



[1] Planetenträger Abtrieb komplett	[30] Dichtscheibe ¹⁾	[109] Rillenkugellager
[6] Passfeder ²⁾	[39] Fangscheibe	[110] Sicherungsring
[7] Wellenmutter	[41] Senkernagel	[112] Nadelkranz
[8] Wellendichtring	[46] Klebe- und Dichtmittel	[113] Planetenrad
[12] Kegelrollenlager	[55] Anlaufscheibe	[114] Sonnenrad
[13] Kegelrollenlager	[56] O-Ring	[116] O-Ring
[17] Planetenrad	[58] Transportöse	[118] Gehäuse-Vorstufe
[18] Nadelkranz	[100] Stiftschraube	[121] Sprengring
[22] Sonnenrad	[105] Anlaufscheibe	[122] Fangscheibe
[24] Gehäuse	[106] Planetenträger komplett	[123] Senkernagel
[25] Verschluss-Schraube	[107] Sechskantmutter	[146] Klebe- und Dichtmittel

Abb. 69: SEW Getriebetyp PSKF, Quelle: SEW Planetengetriebe (2012), Online-Quelle [11.11.2020]

9.7.2 Frequenzumrichter

Die Maxo-Box wird beim neuen Shuttlefahrzeug als Frequenzumrichter-System verbaut. Für diese Entscheidung gibt es mehrere Gründe, die nachfolgend angeführt werden.

Durch den Einsatz der Box kann Platz eingespart werden. Die kompakte Bauform als Schaltschrank kann probat in das Fahrwerk des Shuttlefahrzeuges integriert werden. Für die andere Variante müssten Halterungen wegen der dezentralen Frequenzumrichter verbaut werden, was sich bei der kompakten Bauform des Shuttlefahrzeuges schwierig darstellen würde.

Die elektrische Verkabelung der Maxo-Box ist deutlich einfacher als bei der Variante mit den ELVCD-Umrichtern verwirklicht. Durch das Stecksystem wird bei der Verkabelung Zeit gespart. Zudem gewährleistet das Stecksystem einen modularen Aufbau hinsichtlich der Elektrik.

Die Maxo-Box verfügt ferner über einen direkten Anschluss des Positioniersystems, was auch hinsichtlich der Verarbeitungszeit der Daten ein Vorteil ist.

Mit diesem System wären künftig auch größere Leitungen möglich, bei der Umrichterserie der ELVCDs jedoch tendenziell nicht. Falls also eine Anforderung für höheren Durchsatz entsteht, könnte trotzdem diese Umrichterbox verwendet werden.

9.7.3 Steuerung

Die Ablaufsteuerung wird auch künftig über eine SPS durchgeführt. Dabei wird das Modell CPU1512SP F des Herstellers Siemens verbaut. Siemens hat in der Industrie einen ausgezeichneten Ruf und ist bei SPS-Komponenten Marktführer. Dieses Modell hat den Vorteil, dass hier keine zusätzlichen Anschaltbaugruppen verbaut werden müssen, sondern die IO-Module direkt an die SPS gekoppelt werden können. Diese Variante ist somit platzsparender. Ferner können mit ihr auch alle sicherheitsrelevanten Aspekte hinsichtlich der Ansteuerung der STO-Eingänge der Motoren ohne weitere Aufwände realisiert werden. Ein weiterer Aspekt, der für die Verwendung der SPS spricht, sind die bereits vorhandenen Software-Bausteine, die bei der Weiterentwicklung nicht mehr neu konzipiert werden müssen.

9.7.4 Positionierung Fahrtriebsachse

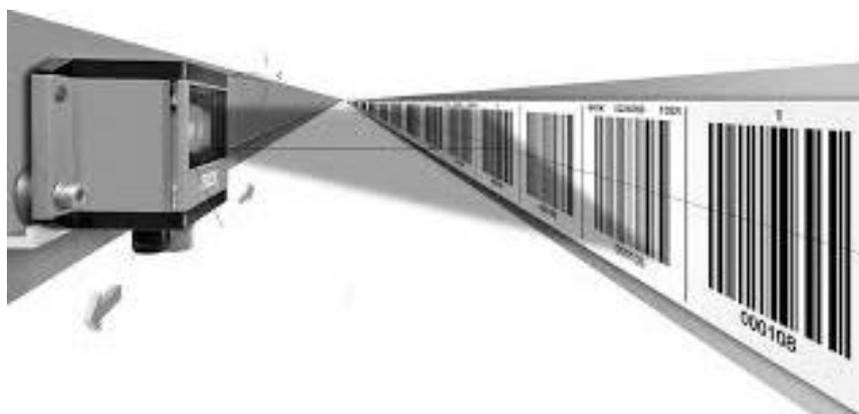


Abb. 70: Barcodesystem mit Barcodeband, Quelle: Sick OLM100 (2010), Online-Quelle [17.11.2020]

Zur Positionierung der Fahrtriebsachse wird das Linear-Messsystem mittels eines optischen Sensors des Herstellers Sick verwendet. Das OLM-Modell liest einen eindeutigen Barcode. Der Barcode wird als PVC-Band ausgeführt und kann problemlos entlang der Fahrschiene geklebt werden. Der am Shuttlefahrzeug mitfahrende Scanner liest diesen und gibt ihn direkt an die Frequenzumrichterbox Maxo über das Bussystem Ethercat weiter. Der Umrichter für die Fahrtriebsachse verwertet dieses Signal und nutzt die Daten des externen Wegmesssystems zur genauen Positionierung der Achse. Die exakte und vor allem schnelle Positionierung ist ausschlaggebend, damit dieses System zukünftig verbaut wird. Ansonsten könnten die berechneten Spielzeiten durch die längere Positionierzeit nicht eingehalten werden. Abb. 70 zeigt das Barcodesystem mit dem Sensormodell OLM sowie dem dazugehörigen Barcodeband.

9.7.5 Energieübertragung

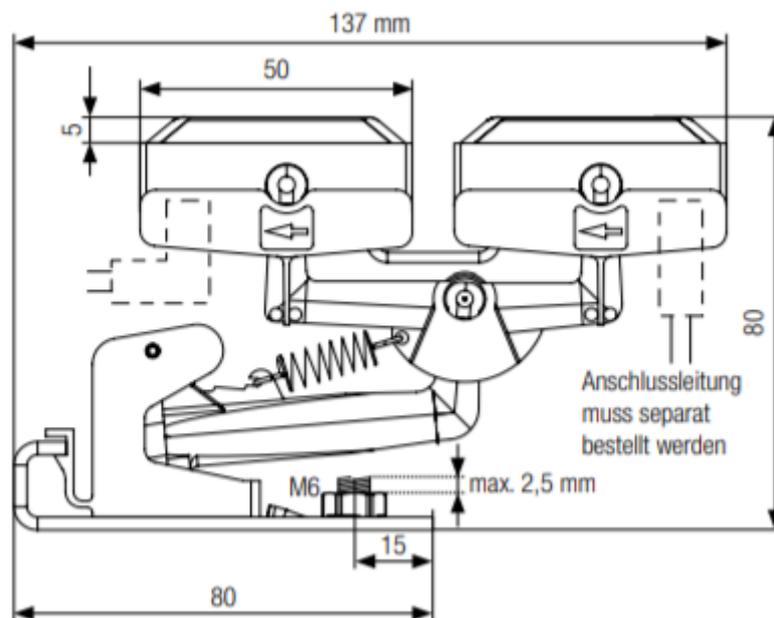


Abb. 71: Stromabnehmereinheit, Quelle: Conductix Schleifleitung (2015), Online-Quelle [11.11.2020]

Die Energieübertragung wird zukünftig mit dem System der Fa. Conductix ausgeführt. Die Auswahl dieses Systems ist auf die eingesetzten Motoren zurückzuführen. Das Stromschiensystem muss die kurzfristig auftretenden Anfahrströme der Antriebe von bis zu 50 A gesamt gewährleisten können. Da die Komponenten vom Hersteller Vahle nicht auf diese Leistungen ausgelegt sind, fiel die Entscheidung auf Variante 2. Wegen der maximal zulässigen Stromstärke der Stromschiene von 100A können sich zukünftig bis zu zwei Shuttlefahrzeuge in einer Ebene bewegen. Abb. 71 zeigt den Aufbau der fortan eingesetzten Stromabnehmer.

9.7.6 Datenübertragung

Die Datenübertragung wird künftig über das System des Herstellers Siemens realisiert. Ausschlaggebend dafür ist, dass das Bussystem Profinet sowie Profisafe zertifiziert ist. Vor allem die Zertifizierung von Profisafe spielt in der Risikobewertung eine sicherheitsrelevante Rolle. Per Einsatz des iWLAN-Clients 722-1 besteht eine sicherheitstechnisch saubere Möglichkeit, die Datenübertragung zum

Materialflussrechner sowie zur Kopfsteuerung zu realisieren. Ein weiterer Vorteil dieses Systems ist der Einsatz der Antenne ANT795-6MN (siehe Abb. 72). Letztere ist platzsparend ausgeführt und somit für die kompakte Bauweise des Shuttlefahrzeuges optimal. Die Möglichkeit der Anlagenzertifizierung kann gerade im Bereich der Industrie ein zusätzlicher Pluspunkt werden.



Abb. 72: WLAN-Antenne, Quelle: Siemens WLAN-Antenne (2020), Online-Quelle [17.11.2020]

9.7.7 Zusammenfassung

Vorliegend werden die ausgewählten Komponenten in Tab. 30 tabellarisch zusammengefasst.

	Auswahl der Komponenten			
	Fahrertriebs- achse	Teleskoptriebs- achse	Riemenantriebs- achse	Hubantriebs- achse
Motor	SEW CMP71M	SEW CMP50M	SEW CMP50M	SEW CMP40M
Getriebe	SEW P5NG31	SEW W20	SEW W20	SEW PSKF222
Bremse	nein	ja	ja	nein
Frequenzumrichter	SEW Maxo			
Steuerung	Siemens CPU1512SP F			
Positionierung Fahrertriebsachse	Sick OLM 200			
Energieübertragung	Conductix Multiline 0835			
Datenübertragung	Siemens iWlan-Client 722-1 sowie Siemens iWlan-Antenne ANT795-6MN			

Tab. 30: Zusammenfassung der ausgewählten Komponenten, Quelle: eigene Darstellung

10 ZUSAMMENFASSUNG

Ziel der Arbeit war es, eine positive Weiterentwicklung hinsichtlich Lagerdichte, Durchsatz und Verfügbarkeit auszuarbeiten wie auch umzusetzen. In den folgenden Unterpunkten werden die Ergebnisse dieser Kategorien in Zahlen festgehalten.

10.1 Lagerdichte

Die Lagerdichte wird durch die geringeren Abmessungen der Neuentwicklung des Shuttlefahrzeuges gewährleistet. Aufgrund der Wahl der Antriebskomponenten sowie deren neuer Anordnungen konnten sowohl die Höhe als auch die Breite verringert werden.

Die Höhe des Shuttlefahrzeuges kann um 37 % von 405 auf 256 mm verringert werden. Für die Ebenen im Regal bedeutet dies Folgendes: Statt jeweils zwei Ebenen im alten System können zukünftig drei verbaut werden. Dies entspricht hinsichtlich der Ebenen eine Steigerung der Lagerdichte um 58 %.

Die Breite lässt sich bei der Neuentwicklung des Shuttlefahrzeuges um 12 % verringern. Dies wirkt sich positiv sowohl auf die Gassenbreite des Gesamtsystems als auch auf die Lagerdichte aus.

Abb. 73 zeigt einen Vergleich der beiden Shuttlefahrzeuge hinsichtlich der Abmessungen.

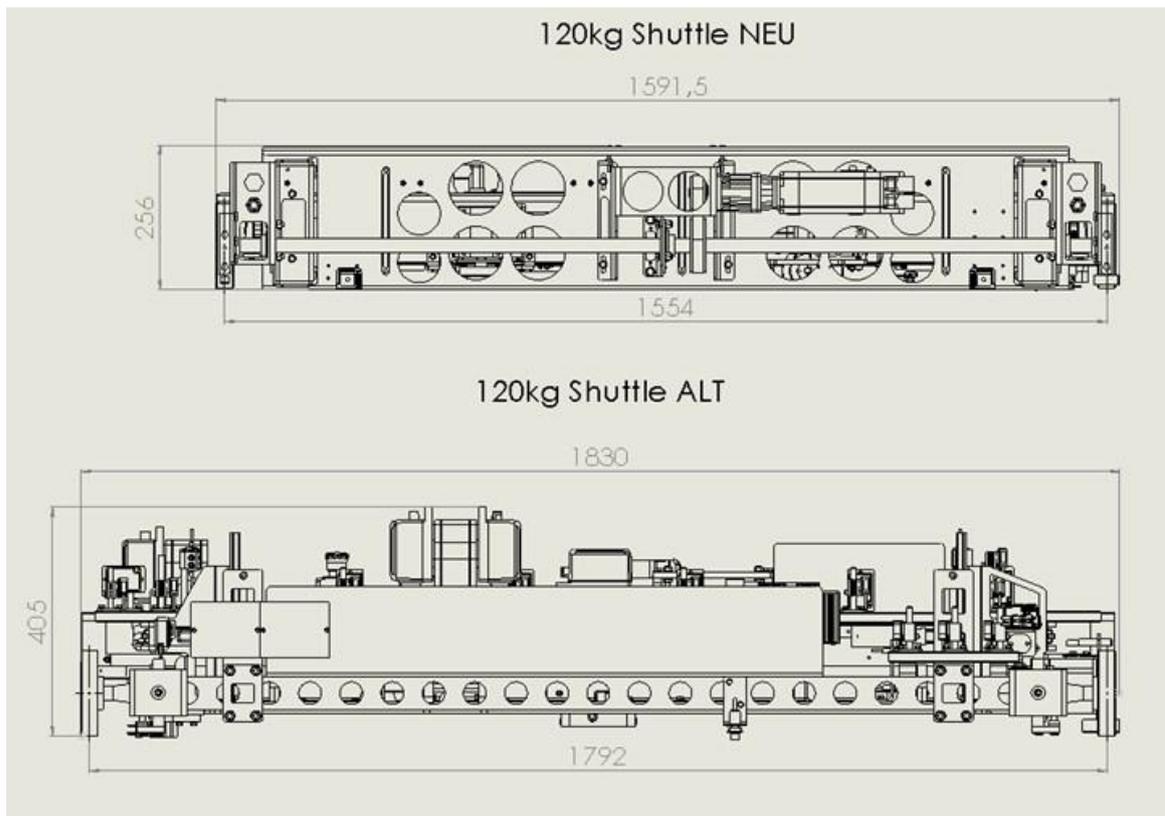


Abb. 73: Shuttlevergleich hinsichtlich der Abmessungen, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

10.2 Durchsatz

Die Spielzeitberechnungen wurden in Kap. 7 ausführlich behandelt. Die Spielzeit wird von 148,31 auf 95,33 s gesenkt. Ein Shuttlefahrzeug kann somit nun 37 kombinierte Spiele pro Stunde ausführen. Mit dem bisherigen Shuttlesystem sind nicht mehr als 24 Doppelspiele möglich. Das entspricht einer Steigerung des Durchsatzes pro Shuttlefahrzeug von über 54 %. Dieser Durchsatz wird durch das neue im Shuttlefahrzeug verbaute Antriebssystem gewährleistet.

10.3 Verfügbarkeit

Das alte Shuttlesystem baut komplett auf einer gefrästen Aluminiumplatte (siehe Abb. 74) auf, die zu fertigen schwierig und kostenintensiv ist. Beim Zusammenbau muss das Shuttlefahrzeug vorab mechanisch gesamtmontiert werden. Erst danach wird die Elektroinstallation durchgeführt. Da in diesem System keine Kabelkanäle vorgesehen sind, ist die Elektromontage entsprechend schwierig. Darunter leidet die Wartungs- und Servicefähigkeit des Shuttlefahrzeuges.

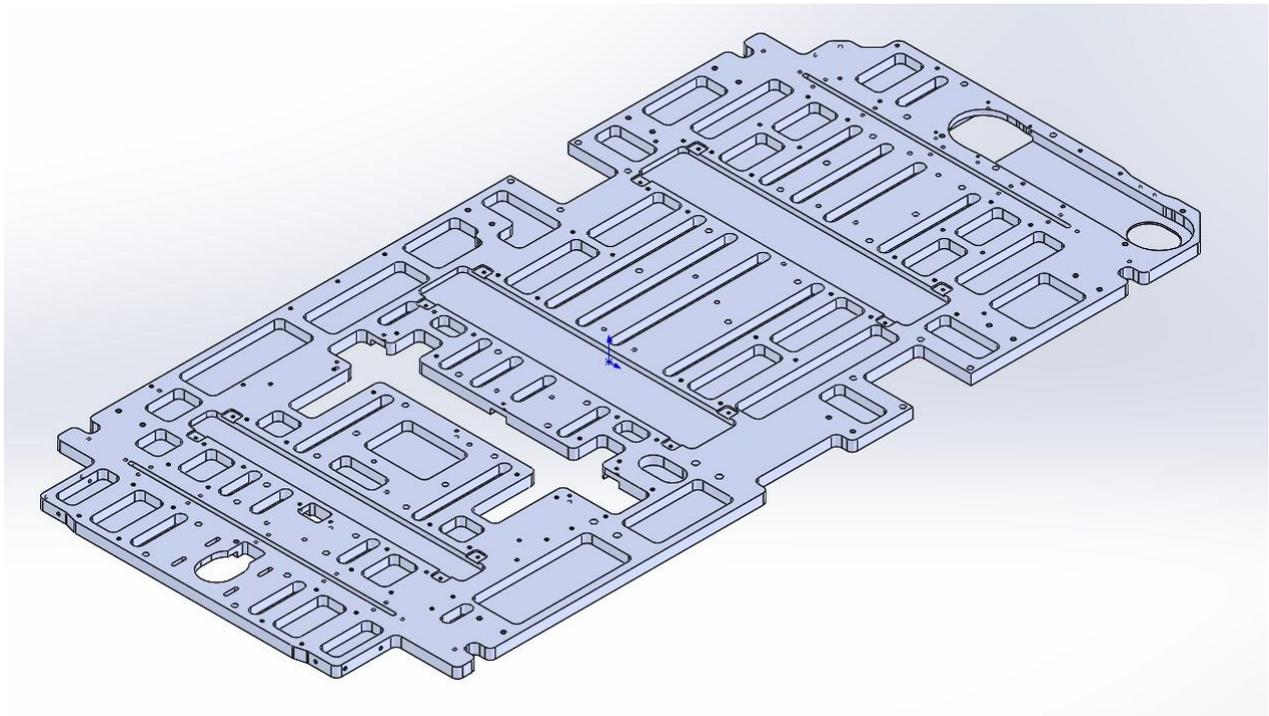


Abb. 74: Grundplatte des alten Shuttlefahrzeuges, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Das neue Shuttlefahrzeug hingegen besteht aus zwei Hauptteilen: der Grundwanne (siehe Abb. 75) und der Teleskopeinheit (siehe Abb. 76). Das Fahrwerk des Shuttlefahrzeuges ist als Wanne ausgeführt. Diese Grundwanne ist ein Laserblechbiegeteil. Im Vergleich zum alten Shuttlesystem wird hier viel Wert auf einfache Verkabelungsmöglichkeiten gelegt. Deswegen sind auf der Wanne in der Mitte Kabeltrassen verbaut, mittels derer die Kabel leichter geführt werden können. Zudem wird jedes Kabel steckbar gefertigt, was einen Tausch der Komponenten erleichtert. Beide Einheiten können in sich selbst vorverkabelt werden. Nach Fertigstellung beider können sie mit wenig Aufwand zusammengefügt werden.

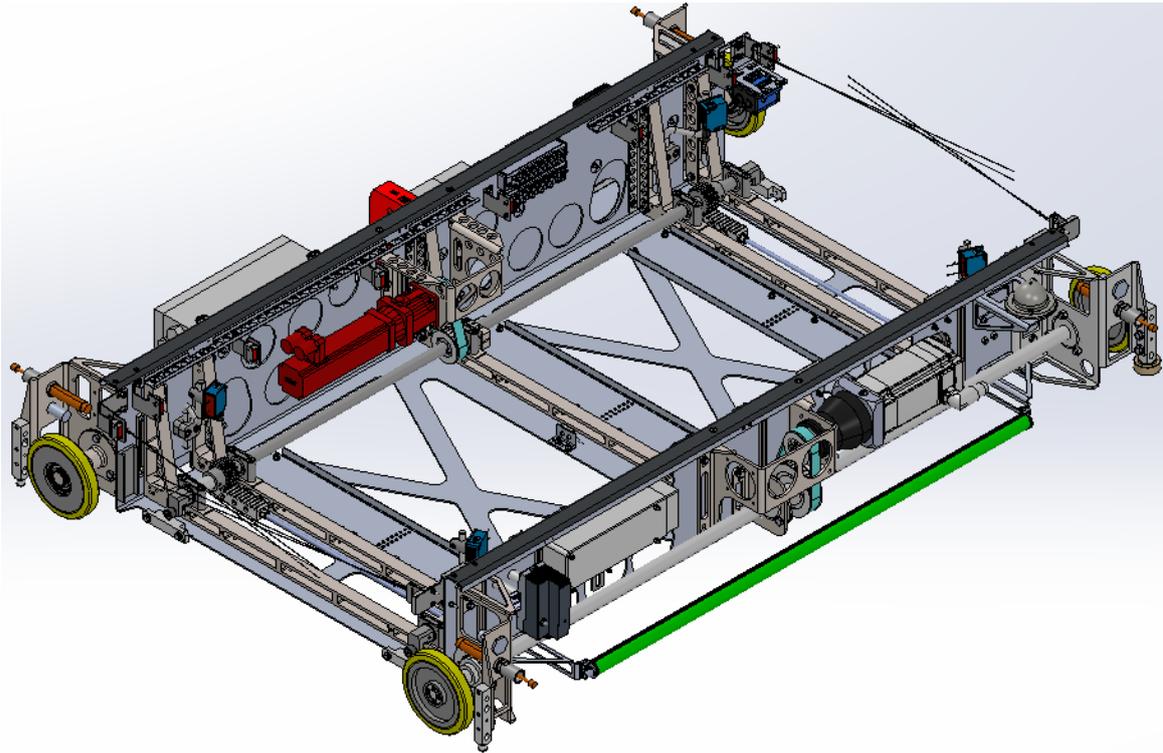


Abb. 75: Grundwanne des neuen Shuttlesystem, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Die Modulbauweise bietet den Vorteil, dass sich die Kunden künftig einzelne Unterbaugruppen auf Lager legen können. Das gesamte Konzept des modularen Aufbaus steigert die Wartungs- und Servicefähigkeit des Shuttlefahrzeuges signifikant.

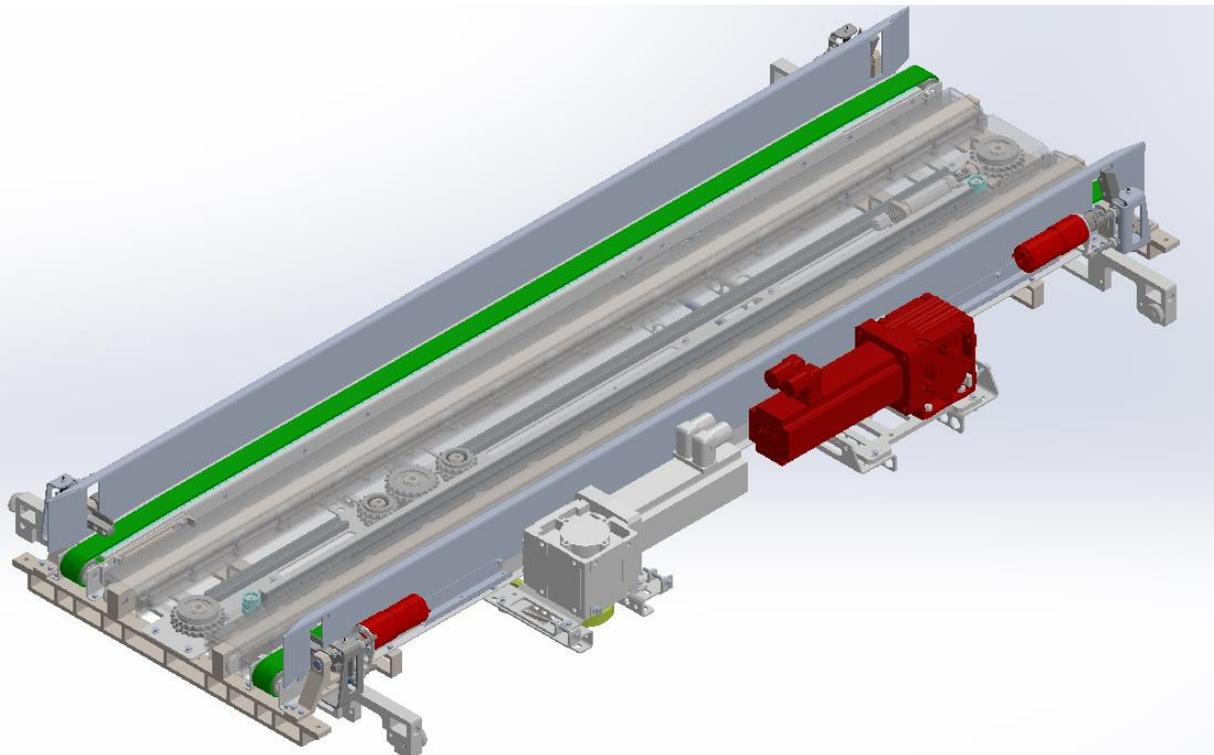


Abb. 76: Teleskopenheit des neuen Shuttlesystems, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Abb. 77 visualisiert das vollständig zusammengebaute Shuttlefahrzeug. Zur schnelleren Störungserkennung wird am Shuttlefahrzeug eine mehrfarbige LED-Leiste angebracht, die per Farbcode jeweils den aktuellen Status preisgibt. Die Abdeckung ist so ausgeführt, dass sie in Störfällen nicht komplett abgebaut werden muss. Vielmehr sind die Abdeckungen mittels Klappscharnieren konzipiert.

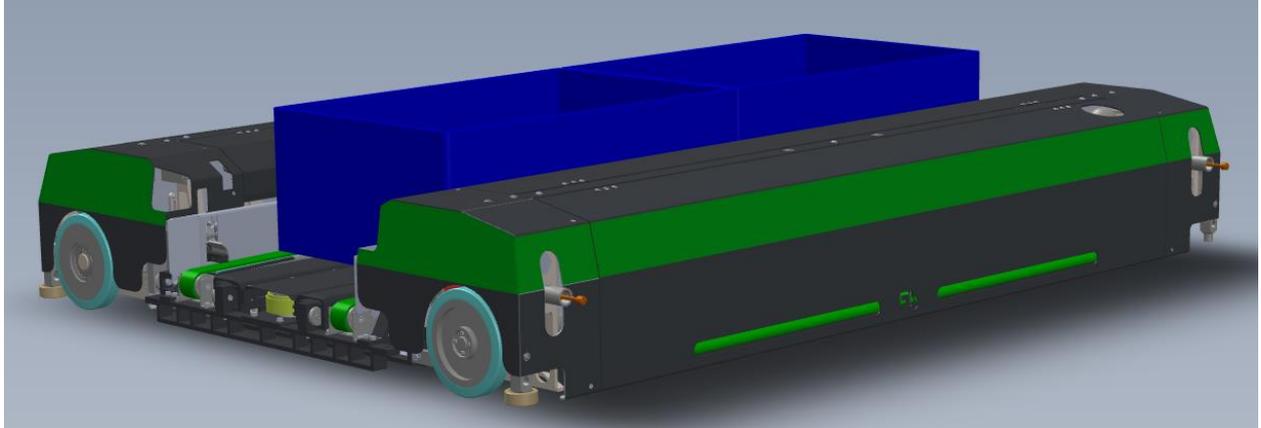


Abb. 77: Neuentwickeltes Shuttlefahrzeug, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)

Die genannten Punkte fördern die Verfügbarkeit der Shuttlefahrzeuge in ausreichendem Maße, sodass sie gewinnbringend in den Markt eingeführt werden können.

11 AUSSICHT

In diesem Kapitel wird für die Firma Fb Industry Automation ein Ausblick auf die Zukunft gegeben. Dieser soll Möglichkeiten beschreiben, die in Bezug auf das Shuttlefahrzeug zukünftig interessant werden.

11.1 Weiterentwicklung hinsichtlich maximaler Zuladung

Beträchtliches Marktpotenzial besteht zukünftig für Shuttlefahrzeuge mit höherer Zuladung. Aktuell können Anforderungen von Zuladungen > 150 kg nur durch Regalbediengeräte umgesetzt werden. Wie in der Marktanalyse beschrieben (siehe Kap. 6), lassen sich mit Shuttlesystemen deutlich höhere Durchsätze erzielen. Speziell im Bereich der Automobilindustrie werden Anforderungen zur Lagerung und Beförderung von KLTs mit einer maximalen Zuladung von 80 bis 100 kg je Behälter kommen. Zugleich sollte eine Weiterentwicklung des Shuttlefahrzeuges hinsichtlich einer maximalen Zuladung von 160 bis 200 kg angestrebt werden, um den Marktanforderungen gerecht zu werden.

11.2 Einsatz eines Batteriesystems

Aktuell wird im Bereich der Energieübertragung auf ein Stromschienensystem gesetzt. Sollten die Anlagen zukünftig größer werden, wäre der Einsatz von Stromschienen zu überdenken, da dieser in einem AKL-System einen gewichtigen Kostenfaktor darstellt. Neben den Anschaffungskosten der Schienen ist auch die Montagezeit des Systems im Regal bei größeren Anlagen als kritisch anzusehen. Der Einsatz eines Batteriesystems stellt sich künftig als Alternative dar. Jedoch erfordert die Umstellung der Energieübertragung – bzw. in diesem Fall die Speicherung dieser Energie – bedeutenden Entwicklungsaufwand. Neben den Ladestationen, die definiert werden müssen, ist die Entwicklung eines Batteriemagements für das Shuttle einer der größten Tasks. Zudem muss das Begehungssystem hinsichtlich des Sicherheitsaspekts durch den Einsatz einer Batterie kontrolliert werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Lebensdauer solch einer Batteriezelle sowie deren Wartungsmöglichkeiten. Auch die Unterbringung des Batteriesystems in das vollständig montierte Shuttlefahrzeug ist essenziell.

11.3 Einsatz eines Microcontrollers

Verbunden mit der Nutzung eines Batteriesystems kann auch der Einsatz eines Microcontrollers als Steuereinheit des Shuttlefahrzeuges von Vorteil sein. Dessen Verwendung macht vor allem dann Sinn, wenn die Stückzahlen der Shuttlefahrzeuge steigen. Hierzu wäre eine eigens entwickelte Platine sinnvoll, die die vollständige Ablaufsteuerung sowie das Batteriemangement des kompletten Systems übernehmen würde. Nicht außer Acht gelassen werden darf die sicherheitsgerichtete Abschaltung, die aktuell über sicher ausgeführte digitale Ausgänge an der SPS realisiert wird. Neben den deutlich niedrigeren Kosten eines Microcontrollers gegenüber einer SPS ist vor allem die signifikant niedrigere Zykluszeit ein Vorteil des Microcontrollers.

12 LITERATURVERZEICHNIS

Berg Lagertechnik. (13. 9 2020). *Verschieberegale*.

Von <https://berg-lagertechnik.de/2017/11/09/verschieberegale/> abgerufen

Bito Lagertechnik. (2020). *Palettenregal*.

Von <https://www.bitto.com/de-at/loesungen/systeme/regalsysteme-fuer-paletten/palettenregal/> abgerufen

Conductix. (2015). *Schleifleitung*.

Von https://www.conductix.de/sites/default/files/downloads/KAT0835-0001-D_Shuttle-Systemschleifleitung_MultiLine_Programm_0835.pdf abgerufen

Danfoss. (2015). *Wissenswertes über Frequenzumrichter*.

Dexion. (13. 09 2020). *Durchlaufregale*.

Von <https://www.dexion-austria.at/produkte/palettenregal-lagerlosungen/carton-flow-picking-unit/> abgerufen

DirectIndustry. (13. 09 2020). *Kardex Remstar*.

Von <https://www.directindustry.de/prod/kardex-remstar/product-37211-2126219.html> abgerufen

FEM. (2020). *About FEM*.

Von <https://www.fem-eur.com/about/> abgerufen

Fuest, K. (2007). *Elektrische Maschinen und Antriebe*. Vieweg.

Gebhardt Fördertechnik. (2018). *Lastaufnahmemittel*.

Von <https://www.gebhardt-foerdertechnik.de/de/produkte/lagertechnik/lastaufnahmemittel/> abgerufen

Gebhardt Fördertechnik. (2018). *Regalbediengeräte*.

Von <https://www.gebhardt-foerdertechnik.de/de/produkte/lagertechnik/regalbediengerate/cheetah-eco/> abgerufen

Hempel. (2010). *Warehouse Management*.

Hempel. (2011). *Kommissionierung*.

Kardex Remstar. (13. 09 2020). *Vertikale Liftsysteme*.

Von <https://www.kardex-remstar.at/at/vertikale-liftsysteme-at/energieeffiziente-lagerloesungen.html> abgerufen

Knapp AG. (15. 8 2020). *Knapp AG OSR Shuttle Evo*.

Von <https://www.knapp.com/loesungen/technologien/lagern/> abgerufen

Logistikknowhow. (2020). *Mann-zur-Ware-Kommissionierung*.

Von <https://logistikknowhow.com/kommissionierung/mann-zur-ware-kommissionierung/> abgerufen

Logistikknowhow. (2020). *Ware-zum-Mann-Kommissionierung*.

Von <https://logistikknowhow.com/materialfluss-und-transport/ware-zum-mann-kommissionierung/> abgerufen

Logistra. (16. 08 2020). *Logistra Shuttlesystem*.

Von <https://logistra.de/news/nfz-fuhrpark-lagerlogistik-intralogistik-retrofit-shuttle-verdoppelt-anlagenleistung-bei-aesculap-16171.html> abgerufen

Martin. (2009). *Transport- und Lagerlogistik*.

MM Logistik. (16. 08 2020). *MM Logistik AKL*.

Von <https://www.mm-logistik.vogel.de/automatische-kleinteilelager-funktion-vorteile-strategien-a-655598/> abgerufen

MMLogistik. (15. 12 2016). *Industrie 4.0*.

Von <https://www.mm-logistik.vogel.de/industrie-40-fordert-logistiker-a-568551/> abgerufen

NEDCON. (2020). *Fachbodenregale*.

Von <https://www.nedcon.com/de/produkte/fachbodenregal/> abgerufen

Phoenix Contact. (2020). *WLAN*.

Von <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/at/?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2702535&library=atde&pcck=P-08-11-02-02-01&tab=1&selectedCategory=ALL> abgerufen

SEW. (2004). *Grundlagen Antriebstechnik*.

SEW. (2010). *Motor*.

Von <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16907205.pdf> abgerufen

SEW. (2012). *Planetengetriebe*.

Von <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/20050933.pdf> abgerufen

SEW. (2018). *Spiroplangetriebe*.

Von <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/25803522.pdf> abgerufen

SEW. (2020). *ELVCD*.

Von <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/24757721.pdf> abgerufen

SEW. (2020). *Servoplanetengetriebe*.

Von <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/26639521.pdf> abgerufen

SEW Drive Academy. (2004). *Grundlagen Antriebstechnik*.

SEW Eurodrive. (1997). *Praxis der Antriebstechnik*.

Shutterstock. (2020). *FIFO*.

Von <https://www.shutterstock.com/de/image-photo/fifo-first-out-accounting-425567284> abgerufen

Sick. (2020). *OLM*.

Von <https://www.sick.com/at/de/aufgabenstellungen/absichern/tueren-und-klappen/linear-messsensoren/olm100/c/g132554> abgerufen

Siemens. (2020). *IPC*.

Von <https://new.siemens.com/global/de/produkte/automatisierung/pc-based/simatic-box-ipc.html> abgerufen

Siemens. (2020). *WLAN Antenne*.

Von <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/de/Catalog/Product/6GK5795-6MN10-0AA6> abgerufen

Siemens Admall. (2020). *CPU*.

Von <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/WW/Catalog/Product/6ES7512-1SK01-0AB0> abgerufen

Siemens Admall. (2020). *WLAN*.

Von <https://mall.industry.siemens.com/mall/de/de/Catalog/Product/6GK5734-1FX00-0AA0> abgerufen

SSI Schaefer. (2020). *Hochregallager*.

Von <https://www.ssi-schaefer.com/de-at/produkte/lagern/palettenlagerung/hochregallager-47450> abgerufen

SSI Schäfer. (16. 08 2020). *SSI Schäfer AKL*.

Von <https://www.ssi-schaefer.com/de-de/produkte/lagern/kleinladungstraeger/kleinteilelagerung/automatisches-kleinteilelager-akl--9336> abgerufen

SSI Schäfer. (15. 8 2020). *SSI Schäfer Cuby*.

Von <https://www.ssi-schaefer.com/de-at/produkte/lagern/kleinladungstraeger/lager-shuttle-systeme/einebenen-shuttle-system-ssi-cuby--47826> abgerufen

SSI Schäfer. (15. 08 2020). *SSI Schäfer Flexi*.

Von <https://www.ssi-schaefer.com/de-ch/produkte/lagern/kleinladungstraeger/lager-shuttle-systeme/ssi-flexi--445464> abgerufen

Sunier, C. (2017). Frequenzgeregelte Drehstromantriebe.

Technische Logistik. (28. 10 2015). *Pick Voice*.

Von <https://www.technische-logistik.net/pick-voice-l%C3%B6sung-wird-zweimal-ausgezeichnet> abgerufen

Technologieradar. (16. 08 2020). *Technologieradar Shuttle-Systeme*.

Von <https://technologieradar.de/technologien/shuttle-systeme> abgerufen

Technologieradar Regalbediengerät. (2020).

Von <https://technologieradar.de/technologien/regalbediengerat> abgerufen

TGW. (15. 08 2020). *TGW Stingray*.

Von <https://www.tgw-group.com/de/technologien/module-produkte/automatische-lagertechnik/shuttle-systeme> abgerufen

Vahle. (2020). *Schleifleitung*.

Von https://vahle.de/fileadmin/user_upload/pdf/Kataloge/deutsch/Cat_03d_de_Kompakt_Schleifleitungen_VCL2_Rev02.indd.pdf abgerufen

Vanderlande. (15. 08 2020). *Vanderlande Adapto*.

Von <https://www.vanderlande.com/de/lagerung/innovative-systeme/automatisierte-ein-und-auslagersysteme/adapto/> abgerufen

Wibond. (2020). *Pick-by-light*.

Von <https://wibond.de/beleglose-kommissionierung/verfahren/pick-by-light.html> abgerufen

Wibond. (2020). *Put-to-light*.

Von <https://wibond.de/beleglose-kommissionierung/verfahren/put-to-light.html> abgerufen

13 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Logo Fb Industry Automation, Quelle: Fb Industry Automation	5
Abb. 2: Shuttlefahrzeug-Prototyp, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung).....	6
Abb. 3: Logistik 4.0, Quelle: MMLogistik (2016), Online-Quelle [30.08.2020]	7
Abb. 4: Schnittstellen eines Unternehmens, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 1.....	8
Abb. 5: Struktur eines Unternehmens, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 4.....	9
Abb. 6: Funktionen der Distributionslogistik, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 7....	11
Abb. 7: Entsorgungsstruktur von Reststoffen in einem Produktionsunternehmen, Quelle: Martin, Transport- und Lagerlogistik (2009), S. 9.....	12
Abb. 8: Eigenschaften von Stückgut, Quelle: Martin, Transport und Lagerlogistik (2009), S. 60	13
Abb. 9: EPAL-Europalette, Quelle: Rotom, Europalette (2020), Online-Quelle [26.10.2020].....	14
Abb. 10: KLT-Behälter, Quelle: Martin, Transport und Lagerlogistik (2009), S. 63.....	14
Abb. 11: FIFO-Prinzip, Quelle: Shutterstock (2020), Online-Quelle [26.10.2020]	15
Abb. 12: Bodenblocklagerung, Quelle: Hompel, Warehouse Management (2010), S. 75.....	18
Abb. 13: Bodenzeilenlagerung, Quelle: Hompel, Warehouse Management (2010), S. 75.....	18
Abb. 14: Palettenregal, Quelle: Bito Lagertechnik, Palettenregal (2020), Online-Quelle [13.09.2020]	19
Abb. 15: Winkelprofile eines Behälterregals, Quelle: BITO (2020), Online-Quelle [26.10.2020].....	20
Abb. 16: Regalbediengerät eines automatischen Kleinteilelagers, Quelle: SSI Schäfer AKL (2020), Online-Quelle [16.08.2020].....	21
Abb. 17: Shuttlesystem eines automatischen Kleinteilelagers, Quelle: Logistra Shuttle (2020), Online-Quelle [16.08.2020]	21
Abb. 18: Lastaufnahmemittel, Quelle: Hompel, Warehouse Management (2010), S. 109	23
Abb. 19: Hochregallager, Quelle: SSI Schäfer Hochregallager (2020), Online-Quelle [26.10.2020].....	24
Abb. 20: Fachbodenregal, Quelle: NEDCON Fachbodenregale (2020), Online-Quelle [26.10.2020]	25
Abb. 21: Mechanisches Verschieberegale, Quelle: Berg Lagertechnik Verschieberegale (2020), Online-Quelle [13.09.2020]	26
Abb. 22: Vertikales Umlaufregal, Quelle: Kardex Remstar (2020), Online-Quelle [13.09.2020]	27
Abb. 23: Horizontales Umlaufregal, Quelle: DirectIndustry (2020), Online-Quelle [13.09.2020]	27
Abb. 24: Durchlaufregal, Quelle: Dexion Durchlaufregale (2020), Online-Quelle [13.09.2020].....	28
Abb. 25: Konventionelles Kommissionieren, Quelle: Hompel Kommissionierung (2011), S. 67	30

Abb. 26: Kommissionierstation mit Behälterregalanbindung, Quelle: Hompel Kommissionierung (2011), S. 76	30
Abb. 27: Pick-by-Light in einem Kommissioniersystem, Quelle: Wibond Pick-by-Light (2020), Online-Quelle [26.10.2020]	32
Abb. 28: Put-to-Light in einem Kommissioniersystem, Quelle: Wibond Put-to-Light (2020), Online-Quelle [26.10.2020].....	32
Abb. 29: Pick-by-Voice in einem Kommissioniersystem, Quelle: Technische Logistik Pick Voice (2015), Online-Quelle [26.10.2020].....	33
Abb. 30: Unterteilung Servomotoren, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 12.	34
Abb. 31: Aufbau eines permanentenerregten Synchronmotors, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 21	35
Abb. 32: Schnittbild von Ständer und Läufer, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 22	35
Abb. 33: Resolver, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 29.....	36
Abb. 34: Verlauf des Drehmoments über dem Polradwinkel, Quelle: SEW Eurodrive, Praxis der Antriebstechnik (1997), S. 23	37
Abb. 35: Aufbau eines Frequenzumrichters, Quelle: SEW, Grundlagen Antriebstechnik (2004), S. 12 ...	39
Abb. 36: Ungesteuerter Gleichrichter, Quelle: Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S. 45	39
Abb. 37: Konstanter Zwischenkreis, Quelle: Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S. 52	40
Abb. 38: Auswirkung der Taktfrequenz auf den Motorstrom, Quelle: Danfoss, Wissenswertes über Frequenzumrichter (2015), S. 53	41
Abb. 39: 4-Quadrantenbetrieb, Quelle: SEW, Grundlagen Antriebstechnik (2004), S. 17	42
Abb. 40: Verlauf der Bremsleistung an einem Bremschopper, Quelle: SEW, Grundlagen Antriebstechnik (2004), S. 18.....	43
Abb. 41: SSI Schäfer Cuby, Quelle: SSI Schäfer Cuby (2020), Online-Quelle [15.8.2020]	44
Abb. 42: OSR Shuttle Evo, Quelle: Knapp AG OSR Shuttle Evo (2020), Online-Quelle [Stand: 15.08.2020].....	45
Abb. 43: TGW Stingray, Quelle: TGW Stingray (2020), Online-Quelle [15.08.2020].....	46
Abb. 44: Vanderlande Adapto, Quelle: Vanderlande Adapto (2020), Online-Quelle [15.08.2020]	47
Abb. 45: Gebhardt-Regalbediengerät, Quelle: Gebhardt Fördertechnik Regalbediengeräte (2018), Online-Quelle [15.11.2020]	48

Abb. 46: SSI Schäfer Flexi mit einer Ziehvorrichtung, Quelle: SSI Schäfer Flexi (2020), Online-Quelle [15.08.2020].....	49
Abb. 47: Teleskopvorrichtung, Quelle: Gebhardt Fördertechnik Lastaufnahmemittel (2018), Online-Quelle [15.08.2020].....	50
Abb. 48: Konzeptdarstellung Fb Compact-Shuttle neu, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)	52
Abb. 49: Lagerdarstellung mit Bewegungen für kombiniertes Spiel, Quelle: FEM 9.851 (2003), S. 9	53
Abb. 50: Ablaufdiagramm kombiniertes Shuttlespiel, Quelle: eigene Darstellung	54
Abb. 51: Fahrtrieb des Shuttles, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)	61
Abb. 52: Riemenantrieb des Shuttles, Unterseite, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung) .	68
Abb. 53: Teleskoptrieb des Shuttles, Unterseite, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)	70
Abb. 54: Hubtrieb des Shuttles, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)	72
Abb. 55: SEW CMP, Quelle: SEW Motor (2010), Online-Quelle [11.11.2020]	74
Abb. 56: SEW ELVCD, Quelle: SEW ELVCD (2020), Online-Quelle [11.11.2020]	74
Abb. 57: SEW Maxo, Quelle: nicht veröffentlichte Betriebsanleitung SEW	75
Abb. 58: Siemens CPU1512SP F, Quelle: Siemens Admall CPU (2020), Online-Quelle [11.11.2020]	76
Abb. 59: Siemens IPC, Quelle: Siemens IPC (2020), Online-Quelle [11.11.2020].....	76
Abb. 60: Sick-Messsystem, Quelle: Sick OLM (2020), Online-Quelle [11.11.2020]	77
Abb. 61: Vahle-Schleifleitung, Quelle: Vahle Schleifleitung (2020), Online-Quelle [11.11.2020]	78
Abb. 62: Conductix-Schleifleitung, Quelle: Conductix Schleifleitung (2015), Online-Quelle [11.11.2020]	79
Abb. 63: Phoenix-Contact-Funkmodul, Quelle: Phoenix Contact WLAN, Online-Quelle [11.11.2020].....	79
Abb. 64: Siemens WLAN-Modul, Quelle: Siemens Admall WLAN (2020), Online-Quelle [11.11.2020]....	80
Abb. 65: SEW Motortyp CMP71M, Quelle: SEW Motor (2010), Online-Quelle [11.11.2020]	81
Abb. 66: SEW Getriebetyp P5NG31, Quelle: SEW Servoplanetengetriebe (2020), Online-Quelle [13.11.2020].....	82
Abb. 67: SEW Motortyp CMP40M und CMP50M, Quelle: SEW Motor (2010), Online-Quelle [11.11.2020]	83
Abb. 68: SEW Getriebetyp W20, Quelle: SEW Spiroplangetriebe (2018), Online-Quelle [11.11.2020]....	84
Abb. 69: SEW Getriebetyp PSKF, Quelle: SEW Planetengetriebe (2012), Online-Quelle [11.11.2020]...	85
Abb. 70: Barcodesystem mit Barcodeband, Quelle: Sick OLM100 (2010), Online-Quelle [17.11.2020]...	86
Abb. 71: Stromabnehmereinheit, Quelle: Conductix Schleifleitung (2015), Online-Quelle [11.11.2020]...	87
Abb. 72: WLAN-Antenne, Quelle: Siemens WLAN-Antenne (2020), Online-Quelle [17.11.2020].....	88

Abb. 73: Shuttlevergleich hinsichtlich der Abmessungen, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung) 89

Abb. 74: Grundplatte des alten Shuttlefahrzeuges, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung)90

Abb. 75: Grundwanne des neuen Shuttlesystem, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung) . 91

Abb. 76: Teleskopeinheit des neuen Shuttlesystems, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung) 91

Abb. 77: Neuentwickeltes Shuttlefahrzeug, Quelle: Fb Industry Automation (eigene Darstellung) 92

14 TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Differenzierung der Lagersysteme, Quelle: Hompel, Warehouse Management (2010), S. 74	17
Tab. 2: Übersicht und Einordnung der Kommissioniermethoden, Quelle: Hompel, Kommissionierung (2011), S. 66	29
Tab. 3: Zusammenfassung der Geräte-Daten, Quelle: eigene Darstellung	50
Tab. 4: Nutzwertanalyse hinsichtlich des Shuttlesystems, Quelle: eigene Darstellung	51
Tab. 5: Nutzwertanalyse hinsichtlich des Lastaufnahmemittels, Quelle: eigene Darstellung	51
Tab. 6: Platzbestimmungen für kombiniertes Spiel, Quelle: FEM 9.851 (2003), S. 9	54
Tab. 7: Koordinaten für Spielzeitberechnung, Quelle: eigene Darstellung	55
Tab. 8: Antriebsdaten des vorhandenen Shuttlesystem zur Berechnung der Spielzeiten, Quelle: eigene Darstellung	55
Tab. 9: Ergebnisse der Einzelzeiten sowie der gesamten Spielzeit, Quelle: eigene Darstellung	59
Tab. 10: Sollzeiten der variablen Einzelspiele des neuen Shuttlesystems, Quelle: eigene Darstellung ...	60
Tab. 11: Errechnete Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte des neuen Shuttlesystems, Quelle: eigene Darstellung	60
Tab. 12: Ausgewählte Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für das neue Shuttlesystem, Quelle: eigene Darstellung	60
Tab. 13: Ergebnisse Fahrtrieb Weg/Winkel, Quelle: eigene Darstellung	62
Tab. 14: Ergebnisse Fahrtrieb Zeiten, Quelle: eigene Darstellung	63
Tab. 15: Ergebnisse Fahrtrieb Winkelgeschwindigkeit/Drehzahl, Quelle: eigene Darstellung	63
Tab. 16: Ergebnisse Fahrtrieb Winkelbeschleunigung, Quelle: eigene Darstellung	64
Tab. 17: Ergebnisse Fahrtrieb Trägheitsmoment (Werte gerundet), Quelle: eigene Darstellung	65
Tab. 18: Ergebnisse Fahrtrieb Rollwiderstandsmoment, Quelle: eigene Darstellung	66
Tab. 19: Ergebnisse Fahrtrieb erforderliche Momente, Quelle: eigene Darstellung	67
Tab. 20: Ergebnisse Fahrtrieb erforderliche Leistung, Quelle: eigene Darstellung	67
Tab. 21: Ergebnisse Riemenantrieb Winkel/Winkelgeschwindigkeit/Winkelbeschleunigung/Drehzahl, Quelle: eigene Darstellung	69
Tab. 22: Ergebnisse Riemenantrieb Trägheitsmomente, Quelle: eigene Darstellung	69
Tab. 23: Ergebnisse Riemenantrieb Rollwiderstandsmoment, Quelle: eigene Darstellung	69
Tab. 24: Ergebnisse Riemenantrieb erforderliche Momente und Leistungen, Quelle: eigene Darstellung	69

Tab. 25: Ergebnisse Teleskopantrieb Winkel/Winkelgeschwindigkeit/Winkelbeschleunigung/Drehzahl, Quelle: eigene Darstellung	71
Tab. 26: Ergebnisse Teleskopantrieb Trägheitsmoment, Quelle: eigene Darstellung	71
Tab. 27: Ergebnisse Teleskopantrieb Rollwiderstandsmoment, Quelle: eigene Darstellung	71
Tab. 28: Ergebnisse Teleskopantrieb erforderliche Momente und Leistungen, Quelle: eigene Darstellung	71
Tab. 29: Ergebnisse Hubantrieb Winkel/Winkelgeschwindigkeit/Winkelbeschleunigung/Drehzahl/Moment/Leistung, Quelle: eigene Darstellung	73
Tab. 30: Zusammenfassung der ausgewählten Komponenten, Quelle: eigene Darstellung	88