

Bachelorarbeit
im Bachelorstudiengang
Wirtschaftsingenieurwesen/Logistik
an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm

**Routenzug oder Direktversorgung? Entwicklungen in der innerbetrieblichen
Stückgutförderung im Hinblick auf Smarte Fabriken**

Erstkorrektor: Herr Prof. Dr. Stefan Distel

Verfasser: Luis Büttner (Matrikel-Nr.: 260268)

Thema erhalten: 27.10.2022

Arbeit abgegeben: 26.02.2023

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe und die Überprüfung mittels Anti-Plagiatssoftware dulde.

26.02.2023

Ort, Datum

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'L. Böhms', written over a horizontal line.

Unterschrift

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	III
1. Einleitung	1
1.1 Herausforderungen des innerbetrieblichen Transportes im 21. Jahrhundert	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1 Einordnung der innerbetrieblichen Stückgutförderung in die Unternehmenslogistik	3
2.2 Zentrale Begriffe des innerbetrieblichen Transports	4
3. Innerbetriebliche Stückgutfördersysteme	9
3.1 Aufgaben der Fördersysteme	9
3.2 Grundbausteine der innerbetrieblichen Fördersysteme	10
3.2.1 Fördermittel	10
3.2.2 Fördereinheit	12
3.2.3 Verkehrsnetz	13
3.2.4 Förderprozess	14
3.2.5 Transportsteuerung	16
3.3 Staplersysteme	17
3.4 Routenzugsysteme	20
3.5 Fahrerlose Transportsysteme	27
3.6 Vergleich der Systeme	33
4. Industrieller Wandel	40
4.1 Die Smarte Fabrik	42
4.2 Auswirkungen der Smarten Fabrik auf die innerbetriebliche Logistik	46
5. Einfluss der Smarten Fabrik auf die Entscheidung zwischen Routenzug- und Direktversorgungssystemen	47
6. Fallbeispiel	51
6.1 Konzeptvergleich in der innerbetrieblicher Stückgutförderung	51
6.2 Betrachtung des Fallbeispiels im Hinblick auf Smarte Fabriken	58
7. Zusammenfassung und Fazit	60
8. Literaturverzeichnis	63
9. Anhang	66

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 MATERIALFLUSSTECHNISCHE AUFGABEN VON STÜCKGUTFÖRDERERN	10
ABBILDUNG 2 EUROPALETTE, GITTERBOX UND KLT-BEHÄLTER	13
ABBILDUNG 3 BEISPIELHAFTER TRANSPORTPROZESS NACH FOTTNER (2022)	16
ABBILDUNG 4 ELEKTROSCHLEPPER MIT VIER EINACHSIGEN EINSCHUBANHÄNGERN MIT E-RAHMEN	23
ABBILDUNG 5 UNTERFAHR-FTF DER NEUMAIER INDUSTRY GMBH & CO	29
ABBILDUNG 6 VERGLEICH STAPLER- UND SCHLEPPZUG-BEREITSTELLUNG	37
ABBILDUNG 7 DIE STUFEN DER INDUSTRIELLEN REVOLUTION	41
ABBILDUNG 8 LEAN SMART FACTORY IN GRABEN-NEUDORF, SEW-EURODRIVE GMBH & Co KG.....	45
ABBILDUNG 9 EIGENE DARSTELLUNG	53
ABBILDUNG 10 GEWICHTETE BEWERTUNGSERGEBNISSE	57

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 BEISPIELHAFTE BEWERTUNG ANHAND WICHTIGER BESTIMMUNGSKRITERIEN DER FÖRDERMITTEL NACH HOMPEL.....	35
TABELLE 2 TÄGLICHER TRANSPORTBEDARF	52
TABELLE 3 INVESTITIONS- UND BETRIEBSKOSTEN DER MATERIALVERSORGUNGSSYSTEME.....	54

Abkürzungsverzeichnis

FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
KLT	Kleinladungsträger
GLT	Großladungsträger
LHM	Ladehilfsmittel
LAM	Ladeaufnahmemittel
RFID	Radio-Frequency Identification
CPS	Cyberphysisches System
m/s	Meter pro Sekunde
kW/h	Kilowatt pro Stunde
mm	Millimeter
Vgl.	Vergleiche

1. Einleitung

1.1 Herausforderungen des innerbetrieblichen Transportes im 21. Jahrhundert

Die heutige Industrielandschaft ist durch eine rasante Entwicklung geprägt. Die Erwartungen der Kunden steigen stetig, wodurch die Industrie vielen Herausforderungen gegenübersteht. Die steigenden Qualitätsanforderungen der Kunden verlangen eine annähernd fehlerfreie Produktion. Eine Folge der zunehmenden Globalisierung und Digitalisierung ist eine Verkürzung der Produktlebenszyklen, was zu ständig wechselnden Produktionsabläufen führt. Außerdem steigt die Variantenvielfalt der Produkte, die auf die spezifischen Anforderungen der Kunden zugeschnitten sind, wodurch ein Trend zur zunehmenden Komplexität der Produktionsprozesse erkennbar ist.¹

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist es notwendig, den Materialfluss und die Produktionsver- und -entsorgung sicherzustellen. Die innerbetriebliche Logistik spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Sie umfasst die Maßnahmen aller logistischen Prozesse, die innerhalb eines Unternehmens stattfinden, wie z.B. den Transport, die Lagerung und die Bereitstellung von Gütern und Materialien.²

Ein wichtiger Teil der innerbetrieblichen Logistik ist die Stückgutförderung, die für den Transport von Fördergütern innerhalb der Produktion verantwortlich ist. Hierbei gibt es verschiedene Ansätze der Materialversorgung wie den Routenzug und die Direktversorgung. Beim Routenzug werden mehrere Wagen zu einem Zug zusammengestellt, der durch das Produktionsgebäude fährt und an verschiedenen Stationen beladen und entladen wird. Die Direktversorgung hingegen sorgt dafür, dass die Fördergüter auf direktem Weg an die Stationen in der Produktion geliefert werden.³ Beide Materialversorgungskonzepte konkurrieren bezüglich ihrer Effizienz miteinander und müssen für den jeweiligen Einsatzbereich bewertet werden. Bisher hat sich kein System vollständig durchgesetzt.

Angesichts der zunehmenden Präsenz von Industrie 4.0 müssen Unternehmen sich auf die Smarte Fabrik der Zukunft einstellen. Die Smarte Fabrik ist eine hochgradig vernetzte

¹ Vgl. *Hofmann, J.*, Die digitale Fabrik, 2016, S. 8f.

² Vgl. *Martin, H.*, Transport- und Lagerlogistik, 2016, S. 9.

³ Vgl. *Durchholz, J./Boppert, J.*, Schlanke Logistikprozesse, 2013, S. 181f.

Produktionsstätte, in der die Produktion und Logistik durch eine Vielzahl von Sensoren und Datenverarbeitungssystemen optimiert wird.⁴ Die Stückgutförderung steht vor neuen Herausforderungen, die bei der Entscheidung zwischen Routenzug und Direktversorgung berücksichtigt werden müssen. Es geht dabei um die Integration von Industrie 4.0-Konzepten und um die Anpassung an die veränderten Produktionsbedingungen. In diesem Zusammenhang sollen in dieser Arbeit die Entwicklungen der innerbetrieblichen Stückgutförderung im Hinblick auf Smarte Fabriken betrachtet werden, um herauszufinden, welches der beiden Systeme besser für die Anforderungen der Smarten Fabrik geeignet ist.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, diejenigen Entwicklungen der Smarten Fabrik zu erfassen, welche für die innerbetriebliche Stückgutförderung relevant sind. Anhand dieser Betrachtung soll die zukünftige Relevanz für die Routenzug- und Direktversorgung bewertet werden.

Zu Beginn wird die innerbetriebliche Stückgutförderung in die Unternehmenslogistik eingeordnet und von anderen Aufgabenbereichen abgegrenzt. Anschließend werden die für die Thematik grundlegenden Begrifflichkeiten geklärt.

Der Kernteil befasst sich mit den innerbetrieblichen Flurfördersystemen und dem industriellen Wandel. Nachdem die Grundbausteine der Flurfördersysteme betrachtet werden, wird auf die einzelnen Fördersysteme genauer eingegangen. Anschließend werden die Fördersysteme unter heutigen Voraussetzungen verglichen. Im vierten Kapitel wird auf den industriellen Wandel bezuggenommen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Industrie 4.0 und der Smarten Fabrik.

Nachfolgend werden im Zusammenhang mit Smarten Fabriken, die Entwicklungen im Entscheidungsprozess zwischen den Materialversorgungskonzepten aufgezeigt. Die Entwicklungen werden infolgedessen anhand eines Fallbeispiels veranschaulicht. Daraufhin wird eine Zusammenfassung von den Ergebnissen der Arbeit präsentiert, bei der die Forschungsfrage, inwiefern sich die Veränderungen, die Smarte Fabriken mit sich bringen, auf die Entscheidung zwischen der Routenzug- und der Direktversorgung auswirken, beantwortet wird.

⁴ Vgl. *Steven, M.*, Industrie 4.0, 2018, S. 59.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Einordnung der innerbetrieblichen Stückgutförderung in die Unternehmenslogistik

Unter dem Begriff Unternehmenslogistik versteht man die marktorientierte Planung, Steuerung, Kontrolle und Realisierung des gesamten Material- und Informationsflusses zwischen einem Unternehmen und seinen Lieferanten beziehungsweise seinen Kunden.⁵ Die Unternehmenslogistik gilt als umfassender Begriff aller logistischen Aktivität eines Unternehmens und lässt sich in drei horizontale Aufgabenbereiche gliedern: Beschaffungslogistik, Produktionslogistik und Distributionslogistik.⁶ Diese Bereiche sind auch Bestandteil des rein innerbetrieblichen Parts der Unternehmenslogistik, der Intralogistik (=innerbetriebliche Logistik), welche die wichtigsten operativen Funktionen innerhalb eines Unternehmens umfasst. Diese sogenannten Materialflussfunktionen umfassen das Lagern, Transportieren, Umschlagen, Kommissionieren und Verpacken.⁷ (Vgl. Anhang 1)

Die einzelnen Tätigkeitsbereiche der Intralogistik werden unterschieden in:

- Umschlaglogistik; Entsorgungslogistik; Transportlogistik
- Lager- und Kommissionierlogistik
- Informationslogistik

Der im Laufe dieser Arbeit genauer betrachtete Tätigkeitsbereich ist der innerbetriebliche Transport. Seine primäre Aufgabe ist die Raumüberbrückung vom Transportursprung (= Quelle) zum Transportziel (= Senke).⁸ Der physische Raum wird durch die intralogistische Funktion des Transportierens überbrückt. Im Gegensatz zur außerbetrieblichen Logistik werden jedoch in der Intralogistik anstatt „Transport“, „Transportieren“ und „Transportmittel“ auch die jeweiligen Synonyme „Fördervorgang“, „Fördern“ und „Fördermittel“ verwendet.⁹

⁵ Vgl. Thiele, D., RFID-Technologie, 2015, S. 3.

⁶ Vgl. Martin, H., Transport- und Lagerlogistik, 2016, S. 3.

⁷ Vgl. Dombrowski, U./Krenkel, P., Ganzheitliches Produktionsmanagement, 2021, S.296ff.

⁸ Vgl. Martin, H., Transport- und Lagerlogistik, 2016, S.9, S.99.

⁹ Vgl. Wannewetsch, H., Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion, 2021, S.657.

Der innerbetriebliche Fördervorgang ist von Warenein- und ausgangstransporten, der Lager- und Kommissionierlogistik sowie von der Umschlaglogistik abzugrenzen. Er bezieht sich lediglich auf den Transport von Materialien zwischen Produktionsstationen und Lagerorten. Um den Fördervorgang anhand des Fördergutes einordnen zu können, wird zwischen der innerbetrieblichen Stück- und Schüttgutförderung unterschieden.¹⁰

2.2 Zentrale Begriffe des innerbetrieblichen Transports

Innerbetriebliche Stück- und Schüttgutförderung

Die Definition von innerbetrieblicher Stückgutförderung und Schüttgutförderung bezieht sich auf zwei Faktoren. Einerseits grenzen sie den Ort ein, an dem Material transportiert wird und andererseits das zu transportierende Fördergut. Die innerbetriebliche Schütt- und Stückgutförderung dient primär dazu, die Produktionsver- und entsorgung zu gewährleisten. Transporte zwischen einzelnen Lagerstufen können jedoch ebenfalls zum Aufgabenbereich gehören.¹¹

Als Schüttgut werden Güter bezeichnet, die sich in einem Behältnis frei bewegen können und nicht gesichert sind. Schüttgüter können unter anderem Baustoffe (z.B. Sand, Zement oder Kies), Rohstoffe (z.B. Erz oder Kohle) oder Lebensmittel (z.B. Getreide, Salz oder Zucker) sein. Wenn sich ein Transportgut im Gegensatz zu Schüttgütern oder Flüssigkeiten einzeln am Stück transportieren lässt, dann handelt es sich um ein Stückgut. Stückgüter sind beispielsweise Pakete, Schachteln, Holzkisten oder Kleinladungsträger. Ladehilfsmittel (LHM) wie Paletten, Gitterboxen oder Container werden häufig auch als Stückgut bezeichnet.¹² Flüssigkeiten und Schüttgüter können jedoch auch in einem Behältnis aufbewahrt werden, wodurch das Gebinde als Stückgut deklariert und von Stückgutförderern transportiert werden kann.¹³

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Fördersysteme betrachtet, die für den Transport von Stückgütern bestimmt sind. Außerdem wird ausschließlich auf

¹⁰ Vgl. *Martin, H.*, Transport- und Lagerlogistik, 2016, S. 99.

¹¹ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 25f.

¹² Vgl. *Schmidt, T.*, Innerbetriebliche Logistik, 2018, S. 1.

¹³ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 8.

Stückgutförderer eingegangen, die im Indoor-Bereich auf Werksgeländen produzierender Industrieunternehmen zum Einsatz kommen. Die dabei betrachteten Rohstoffe, Halb- und Fertigerzeugnisse sind meistens Einzelteile, Werkstücke oder Materialien. Hierfür verwendete LHM, die im Folgenden betrachtet werden, überschreiten nicht das Volumen einer Europalette, Gitterbox oder vergleichbaren Alternativen.

Direktversorgung

Der Begriff „Direktversorgung“ ist ein Transportkonzept und findet in der außer- und innerbetrieblichen Transportlogistik Anwendung. Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich die Direktversorgung jedoch ausschließlich auf den innerbetrieblichen Bereich. Bei der Direktversorgung handelt es sich um den innerbetrieblichen Transport eines Fördergutes auf direktem Weg von der Quelle zur Senke. Dabei wird der effizienteste Transportweg von einem Transportmittel manuell oder vollautomatisch durchgeführt. Das Mittel, um eine Direktversorgung zu ermöglichen ist der Direkttransport, der auch als Direktverkehr bezeichnet wird. Ein innerbetrieblicher Direkttransport kann manuell, mit beispielsweise einem Gabelstapler oder vollautomatisch durch ein Fahrerloses Transportsystem (FTS) durchgeführt werden.¹⁴ Als Synonym für die Direktversorgung wird in der Literatur auch der Begriff „Taxi-Prinzip“ verwendet.^{15 16}

Fahrerlose Transportfahrzeuge

Ein FTS wird als solches bezeichnet, wenn mehrere Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) gleichzeitig eingesetzt werden und über ein digitales Kommunikationssystem verbunden sind. FTF sind automatisch und führerlos geführte Fördermittel mit eigenem Fahrtrieb.¹⁷ Sie werden als Montageplattform, zur Verkettung von Produktionsschritten und für weitere Produktionsprozesse verwendet. Neben der Direktversorgung können FTS auch für andere Transportkonzepte verwendet werden.¹⁸

¹⁴ Vgl. *Durchholz, J./Boppert, J.*, Schlanke Logistikprozesse, 2013, S.181.

¹⁵ Vgl. *Klug, F.*, Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2018, S. 208.

¹⁶ Vgl. *Durchholz, J./Boppert, J.*, Schlanke Logistikprozesse, 2013, S. 58.

¹⁷ Vgl. *Ihme, J.*, Logistik im Automobilbau, 2006, S186f.

¹⁸ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S41f.

Milkrun und Routenzug

Der Begriff „Milkrun“ stammt ursprünglich aus der außerbetrieblichen Transportlogistik. Als Vorbild diente der traditionelle amerikanische und britische Milchmann (engl. milk man). Die Milchmänner hatten eine fest vorgegebene Route, die täglich mit ihrem Transportfahrzeug abgefahren wurde. An den jeweiligen Bauernhöfen wurden volle Milchflaschen auf den Transporter aufgeladen und leere Milchflaschen abgeladen, um diese den Bauern zum Wiederauffüllen bereitzustellen. Nachdem an der Verkaufsstelle daraufhin die vollen Flaschen gegen Leere eingetauscht wurden, begann der Zyklus von vorne.¹⁹ Aufgrund der Haltestellen und dem stetigen Austausch der zu transportierenden Materialien, ähnelte die Fahrtroute, der eines Omnibusses.²⁰ In Anhang 2 wird der Ablauf eines traditionellen Milkruns dargestellt.

Das Transportkonzept „Milkrun“ hat das Ziel, mehrere Transporte in einem Transport zu bündeln, um größere Lademengen zu transportieren und die Kapazität der Lieferwägen so weit wie möglich ausschöpfen zu können. Dies war unter anderem ein Grund dafür, dass der Milkrun mithilfe von Routenzügen auch in der Intralogistik Anwendung fand.²¹ In der innerbetrieblichen Stückgutförderung wird der Milkrun entweder manuell mit einem Regalwagen oder mit einem sogenannten Routenzug ausgeführt.²²

Der Routenzug ist ein motorisch betriebenes Fördermittel, das zur Materialver- und entsorgung innerhalb einer Produktionsanlage oder zum Materialaustausch zwischen Lagerstufen verwendet wird.²³ Routenzüge bestehen aus einer Zugmaschine (Schlepper) und aus mindestens einem Anhänger. Der Aufbau des Routenzuges erinnert an einen Schienenzug, jedoch ist der Routenzug gleislos. Ein Routenzug kann entweder manuell oder vollautomatisch durch ein FTS gesteuert werden. Die innerbetriebliche Materialversorgung durch Routenzüge wird als Routenzugsystem, oder auch als innerbetrieblicher Milkrun bezeichnet.²⁴

Routenzüge und FTF werden, wie auch Gabelstapler, branchenübergreifend in produzierenden Unternehmen zur innerbetrieblichen Stückgutförderung verwendet. Routenzüge werden laut einer Studie von LIEB et al. (2017), zum Großteil im Automotive-

¹⁹ Vgl. *Kunert, C.*, Design for stability in transport logistics, S.40f.

²⁰ Vgl. *Ihme, J.*, Logistik im Automobilbau, 2006, S.185.

²¹ Vgl. *Ihme, J.*, Logistik im Automobilbau, 2006, S.275.

²² Vgl. *Griemert, R./Römis, P.*, Fördertechnik, 2015, S.188f.

²³ Vgl. *Lieb, C. u. a.*, Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung, 2017, 44 f.

²⁴ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S.25f.

und Fahrzeugbau (63%) eingesetzt. Branchen wie Elektrotechnik und Mechanik, sowie Maschinen- und Anlagenbau machen jeweils nur 11% der Routenzugverwendung aus.²⁵ In einer Studie von CLAUER und FOTTNER (2019) über FTF ist die Nutzung der Automotive- und Fahrzeugbaubranche mit 25% ebenso stark vertreten.²⁶

Industrie 4.0, Digitale Fabrik und Smarte Fabrik

Die Industrie 4.0 wurde erstmals bei der Vorstellung eines Zukunftsprojektes der deutschen Bundesregierung im Jahre 2011 benannt.²⁷ Das Ziel dieser Initiative war es, die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie langfristig zu sichern. Der Begriff ist eine Anlehnung an die vergangenen drei industriellen Revolutionen und verweist damit auf eine vierte industrielle Revolution. Industrie 4.0 umfasst Potenziale und Herausforderungen für Produktion, Produkte, Geschäftsmodelle und Dienstleistungen der Zukunft. Hierbei soll die digitale Transformation, die Vernetzung und die Selbstoptimierung der Unternehmen angestrebt werden.²⁸ Ein Anwendungsgebiet der Industrie 4.0 ist die Logistik 4.0. Dieses Anwendungsgebiet umfasst die Einflussfaktoren der Industrie 4.0 auf die grundlegenden Aufgaben der Logistik.²⁹

Im Zuge der heutigen Überlegungen zu einer umfassenden Digitalisierung von Produktionsprozessen gewinnt der Begriff „Digitale Fabrik“ an Bedeutung. Die Digitale Fabrik umfasst ein Netzwerk aus Modellen, Methoden und Werkzeugen, die in ein ununterbrochenes Datenmanagement integriert werden. Der Fokus liegt hierbei vor allem auf der Produktionsplanung und -gestaltung. Digitale Fabriken werden in vielen Unternehmen bereits angewendet.³⁰

Eine Smarte Fabrik (engl. Smart Factory) ist die Weiterentwicklung der Digitalen Fabrik und orientiert sich an den Potenzialen und Herausforderungen der Industrie 4.0. Die Smarte Fabrik umfasst eine intelligente Produktion, in der alle Bestandteile vollständig miteinander vernetzt sind. Sie wird als Zukunftsvision in der Forschung verwendet und dient als Musterfabrik, in der Mensch, Maschine und Bauteil miteinander kommunizieren und in der

²⁵ Vgl. Lieb, C. u. a., Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung, 2017, S.22f.

²⁶ Vgl. Clauer, D./Fottner, J., Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände, 2019, 13f.

²⁷ Vgl. Hofmann, J., Die digitale Fabrik, 2016, S. 3.

²⁸ Vgl. Hofmann, J., Die digitale Fabrik, 2016, S.8.

²⁹ Vgl. Steven, M., Industrie 4.0, 2018, S. 137f.

³⁰ Vgl. Hohmann, S., Logistik- und Supply Chain Management, 2022, S.67f.

nur die Produkte und Materialien gefertigt werden, welche die tatsächlich im Wertschöpfungsprozess benötigt werden.³¹ Der Fertigungsprozess verläuft hier dezentral und wird somit von den zu produzierenden Produkten selbst gesteuert. Im Gegensatz zur digitalen Fabrik wird in der Smarten Fabrik, dank der Echtzeitsteuerung durch das Internet der Dinge, eine bessere Energie- und Ressourceneffizienz und eine Produktivitätssteigerung ermöglicht.³²

³¹ Vgl. *Göpfert, I.*, Logistik der Zukunft - logistics for the future, 2022, S. 213.

³² Vgl. *Hofmann, J.*, Die digitale Fabrik, 2016, S.58.

3. Innerbetriebliche Stückgutfördersysteme

Bei einem außerbetrieblichen und innerbetrieblichen Transport wird eine Ortsveränderung von Objekten (z.B. Rohstoffe, Halbzeuge, Fertigwaren oder Leerbehälter) durchgeführt. Findet die Ortsveränderung in einem räumlich abgegrenzten Gebiet statt, wird auch von Fördern gesprochen.³³ Um mehrere Fördervorgänge gleichzeitig und geregelt durchführen zu können, wird in vielen Fällen der innerbetriebliche Materialfluss mit Hilfe von Fördersystemen umgesetzt. Fördersysteme koordinieren Transporte innerhalb von Betriebsstätten und verbinden den Wareneingang und -ausgang, die Produktionseinrichtungen sowie das Rohstoff- und Fertigungslager miteinander.³⁴

Im folgenden Abschnitt wird auf die Grundbausteine der Systeme zur innerbetrieblichen Stückgutförderung eingegangen. Anschließend werden die Gabelstaplersysteme, Routenzugsysteme und FTS in Bezug auf die Grundelemente genauer betrachtet.

3.1 Aufgaben der Fördersysteme

Fördermittel besitzen neben dem reinen Güter- oder Personentransport zusätzlich noch weitere Aufgaben. Sie werden auch zum Sammeln, Verteilen, Stauen und zum Sortieren verwendet³⁵

Unter *Sammeln* versteht man das Zusammenführen von Fördergütern aus mehreren Quellen. Das *Verteilen* ist im Gegensatz dazu das gezielte Vereinzeln in individuelle Fördereinheiten. Dabei stammen die einzelnen Fördereinheiten aus einer Quelle und müssen an mehrere Senken oder Abgabestellen befördert werden. Das Ordnen einer Anzahl von Gütern im Vor- und Nachlauf des Sammel- oder Verteilvorgangs wird als *Sortieren* bezeichnet. Das *Stauen* von Ladeeinheiten kann aus unterschiedlichen Gründen erforderlich sein. Es dient der Entkopplung oder Synchronisation von technischen Prozessen. Durch das Puffern von Fördergütern können Teilsysteme weitestgehend unabhängiger voneinander operieren. Das Stauen von Fördersystemen kann auch für den

³³ Vgl. *Hompel, M. ten*, Materialflusssysteme, 2018, S.125.

³⁴ Vgl. *Dombrowski, U./Krenkel, P.*, Ganzheitliches Produktionsmanagement, 2021, S.296.

³⁵ Vgl. *Schmidt, T.*, Innerbetriebliche Logistik, 2018, S.3f.

Wechsel des Transportmittels, z.B. von Gabelstapler zu Routenzug, sinnvoll sein.³⁶ . In Abbildung 1 sind die materialflusstechnischen Aufgaben der Fördersysteme dargestellt.

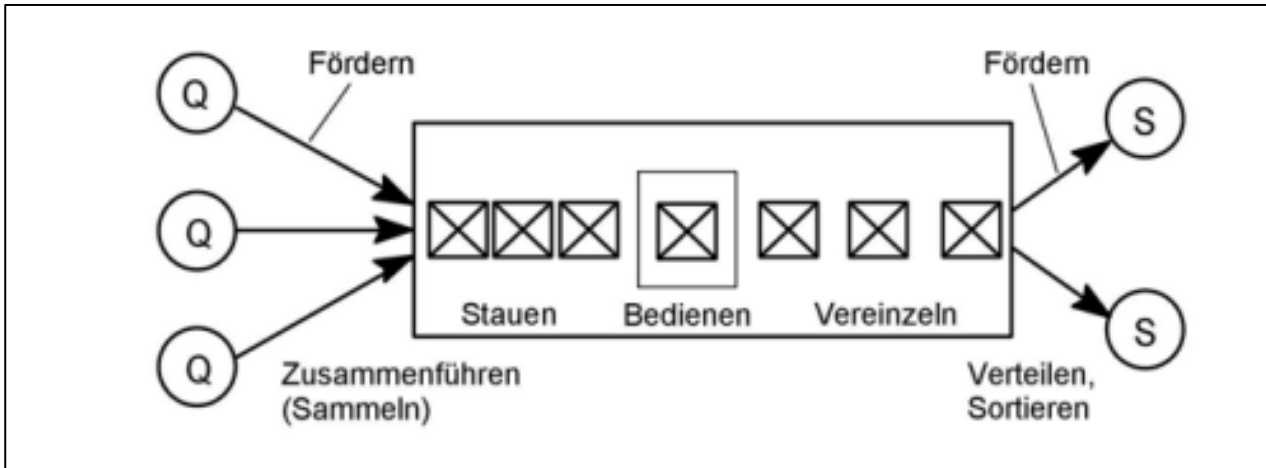


Abbildung 1 Materialflusstechnische Aufgaben von Stückgutförderern³⁷

3.2 Grundbausteine der innerbetrieblichen Fördersysteme

Die Charakteristik eines innerbetrieblichen Fördersystems lässt sich anhand von in fünf Grundbausteine beschreiben. Der Transport einer *Fördereinheit* von einer Quelle zu einer Senke wird mit einem *Fördermittel* durchgeführt. Damit sich das Fördermittel auf der Förderstrecke fortbewegen kann, muss ein *Verkehrsnetz* existieren. Der *Förderprozess* beschreibt, auf welche Art und Weise die notwendigen Schritte zur Erfüllung einer Transportaufgabe durchgeführt werden müssen. Die Voraussetzung für einen erfolgreichen Fördervorgang ist eine Übereinstimmung des Transportprozesses mit der *Steuerung* der Förderaufgaben.³⁸

3.2.1 Fördermittel

Eine wichtige Rolle in einem innerbetrieblichen Transportsystem nimmt die Wahl des Fördermittels ein. Es dient als Arbeitsmittel oder -gerät zur Distanzüberbrückung und ist für die Ausführung von Transportaufgaben verantwortlich. Ausschlaggebend für die Förderprozesse, die durch die Fördermittel durchgeführt werden, ist die Förderleistung.

³⁶ Vgl. Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S.126ff.

³⁷ Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S. 3.

³⁸ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 7ff.

Diese setzt sich aus der Fördermenge, der Fördermasse oder dem Fördervolumen zusammen und wird auch als Massen- oder Fördergutstrom bezeichnet.³⁹

Um einen innerbetrieblichen Stückguttransport effizient durchführen zu können und einen optimalen Fördergutstrom zu generieren, benötigt man die entsprechende Fördertechnik. Die Fördertechnik lässt sich in zwei Hauptgruppen unterteilen, die Stetig- und Unstetigförderer.⁴⁰ Um in den jeweiligen Hauptgruppen genauer differenzieren zu können, wird jeweils zwischen flurfreien und flurgebundenen Fördermitteln unterschieden. Wenn sich die Fördermittel an der Hallendecke bewegen, sind diese flurfrei. Fördermittel, welche im Boden eingelassene Verkehrswege nutzen, sind hingegen flurgebunden.⁴¹ Anhang 3 zeigt die beispielhafte Einteilung einiger Fördermittel in die jeweiligen Untergruppen.

Stetigförderer

Stetigförderer sind in der Lage, ununterbrochen Schütt- und Stückgüter zu transportieren, wobei dabei die Förderrichtung stets beibehalten wird. Infolgedessen kann ein kontinuierlicher Fördergutstrom erzeugt werden.⁴² Im Gegensatz zu Unstetigförderern müssen Stetigförderer während des Betriebes nicht mehrfach anfahren und abbremsen. Dadurch benötigen sie lediglich eine gleichmäßige Energiezufuhr, für die eine geringere Antriebsleistung ausreichend ist.⁴³ Klassische Stetigförderer, wie Rollen-, Gurt- oder Kettenförderer erzielen trotz niedrigeren Fördergeschwindigkeiten meist höhere Durchsätze.⁴⁴

Unstetigförderer

Wenn Güter in einer geringeren Frequenz oder besonders als schwere Einzellasten transportiert werden müssen, werden oft Unstetigförderer bevorzugt.⁴⁵ Im Gegensatz zu stetig fördernden Transportmitteln verläuft der Fördervorgang bei Unstetigförderern diskontinuierlich, wobei der Bewegungsablauf zeitweise unterbrochen wird. Stillstände der Transportmittel treten beim Auf- und Abladen des Fördergutes oder aufgrund von anderen innerbetrieblichen Verkehrsteilnehmern während des Fördervorganges auf.⁴⁶ Zudem ist der

³⁹ Vgl. *Hompel, M. ten*, Materialflusssysteme, 2018, S.126f.

⁴⁰ Vgl. *Schmidt, T.*, Innerbetriebliche Logistik, 2018, S.2.

⁴¹ Vgl. *Wannenwetsch, H.*, Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion, 2021, S.658f.

⁴² Vgl. *Schmidt, T.*, Innerbetriebliche Logistik, 2018, S. 2.

⁴³ Vgl. *Griemert, R./Römis, P.*, Fördertechnik, 2015, S. 3.

⁴⁴ Vgl. *Schmidt, T.*, Innerbetriebliche Logistik, 2018, S. 2.

⁴⁵ Vgl. *Griemert, R./Römis, P.*, Fördertechnik, 2015, S. 3.

⁴⁶ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 8.

Arbeitsablauf von Unstetigförderern durch den Wechsel von Last- und Leerfahrten gekennzeichnet. Leerfahrten sind unerwünscht, können jedoch vermieden werden, indem sie für den Abtransport von Leergut genutzt werden.⁴⁷

Das Eigengewicht ist bei Unstetigförderern meist höher als die Nutzlast, sie besitzen jedoch im Verhältnis zu Stetigförderern eine höhere Flexibilität bei Änderungen im Produktionslayout oder -programm.⁴⁸

Unstetigförderer lassen sich ebenso wie Stetigförderer in flurgebundene oder flurfreie, schienengebundene oder schienenfreie Transportmittel unterteilen. Die in dieser Arbeit betrachteten Fördermittel Stapler, Routenzug und FTF sind flurgebundene und schienenfreie Unstetigförderer.

3.2.2 Fördereinheit

Stückgüter müssen mit einem passenden Behälter oder Träger, welcher das Stückgut transportiert sicher transportiert, befördert werden. Als Fördereinheit wird ein Gebinde aus einem oder mehreren Fördergütern und Ladungsträgern bezeichnet. Zusammen bilden diese Elemente eine Einheit, die für den Transport mit einem Fördermittel geeignet ist.⁴⁹ Neben den Stückgütern, die die Produktionsstationen verlassen oder erreichen, müssen auch Abfälle und leere Förderhilfsmittel von Transportmitteln abtransportiert werden. Auch die Entsorgungslogistik wird meistens in Fördersystemen miteingeplant.⁵⁰ Die nach dem Verband der Automobilindustrie empfohlenen Ladungsträger zur Aufbewahrung von Stückgütern sind Kleinladungsträger (KLT) und Großladungsträger (GLT).⁵¹(Vgl. Abbildung 2)

⁴⁷ Vgl. *Martin, H.*, Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, 126f.

⁴⁸ Vgl. *Ihme, J.*, Logistik im Automobilbau, 2006, S. 85.

⁴⁹ Vgl. *Griemert, R./Römis, P.*, Fördertechnik, 2015, S.5.

⁵⁰ Vgl. *Fottner, J.* u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S.24f, S.51.

⁵¹ Vgl. *Klug, F.*, Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2010, S.149.

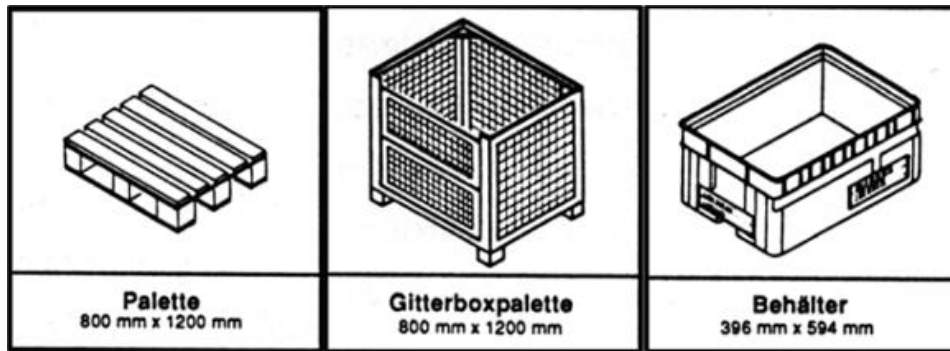


Abbildung 2 Europalette, Gitterbox und KLT-Behälter⁵²

Ein KLT misst maximal 400 mal 600 mm und ist ein nicht unterfahrbares Transport- und Ladehilfsmittel, das manuell oder automatisiert auf einen Groß- oder Standardladungsträger umgeschlagen werden kann. Aufgrund ihres Packmaßes können beispielsweise mehrere dieser Kunststoffbehälter gleichzeitig in einem Gebinde, zum Beispiel einer EURO-Palette, transportiert werden. GLT sind größer als 400 mal 600 mm, wie beispielsweise Paletten, Ladegestelle und Großbehälter, die als tragende, geschlossene oder als umschließende Plattform für Stückgüter dienen. So können kleinere Fördereinheiten zu einer großen fusioniert werden und nicht unterfahrbare Güter unterfahrbar gemacht werden.⁵³

Ein Großteil an LHM wird auch als Mehrwegbehälter bezeichnet und ist Teil eines kombinierten Ver- und Entsorgungssystems. In eigenbetrieblichen Mehrwegsystemen wird die Abfallvermeidung und eine Wiederverwertung angestrebt.⁵⁴ Die dadurch nötigen Zusatztransporte müssen bei der Auswahl und Planung eines Fördersystems beachtet werden. Im Laufe dieses Kapitels wird auf die entsprechende Eignung der Transportmittel und -systeme in Bezug auf die Fördereinheit genauer eingegangen.

3.2.3 Verkehrsnetz

Eine essenzielle Grundlage eines Transportsystems ist das Verkehrsnetz. Es werden Fahrwege benötigt, die es den Transportmitteln ermöglichen, alle Quellen und Senken zu erreichen. Unstetigförderer können sich frei bewegen und benötigen aufgrund dessen Rangierflächen und ausreichenden Bewegungsraum. Nach der Arbeitsstätten-Richtlinie 17/1,2 „Verkehrswege“ muss zudem zwischen ausschließlichen Fahrwegen, ausschließlichen Fußwegen und gemeinsamen Fuß- und Fahrwegen unterschieden

⁵² Vgl. Jünemann, R., Materialfluß und Logistik, 1989, S. 134.

⁵³ Martin, H., Transport- und Lagerlogistik, 2016, S62f.

⁵⁴ Vgl. Martin, H., Transport- und Lagerlogistik, 2016, S.88f.

werden. Bei der zugelassenen Arbeitsgangbreite für ein Flurförderfahrzeug muss beachtet werden, wie groß die maximale Breite des Flurförderers ist und ob es sich um einen Richtungs- oder Gegenverkehr handelt. Tritt Personenverkehr auf demselben Gang auf, muss auch dieser berücksichtigt werden.⁵⁵ Die Arbeitsgangbreite ist eine entscheidende Größe, da in Produktionsgebäuden ungern auf mögliche Produktions- oder Lagerflächen verzichtet wird.⁵⁶

Auch der Fahrbahnbelag und dessen Sauberkeit spielen eine Rolle. Da alle Flurförderfahrzeuge Vollgummireifen verwenden und zudem keine Federung haben, muss die Fahrbahn glatt sein.⁵⁷ Von großer Bedeutung ist jedoch die Struktur des Verkehrsnetzes. Wenn Kreuzungen vom Personenverkehr und anderen Verkehrsteilnehmern gleichzeitig benutzt werden, kann dies zu Staubildungen und auch zu einer erhöhten Unfallgefahr führen. Flurförderfahrzeuge tragen einen großen Beitrag zu meldungspflichtigen innerbetrieblichen Arbeitsunfällen bei. Laut der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung wurden im Jahr 2021 über 34.000 Unfälle durch Materialtransportwagen und Stapler gemeldet.⁵⁸

3.2.4 Förderprozess

Das Ziel des innerbetrieblichen Transports ist die Unterstützung von wertschöpfenden Prozessen. Bei der Ausführung der Transporte müssen unterschiedliche Anforderungen unter bestimmten Voraussetzungen erfüllt werden. Förderprozesse können durch die unterschiedlichen Fortbewegungen charakterisiert werden.

Die verschiedenen Formen der Fortbewegung lassen sich anhand des Fördergutstroms unterteilen, welcher in folgende Kategorien unterschieden wird:

- kontinuierlicher Fördergutstrom (Schüttgut transportiert von Stetigförderern)
- diskret kontinuierlicher Fördergutstrom (Stückgut transportiert von Stetigförderern)
- unterbrochener, diskreter Fördergutstrom (Schütt- oder Stückgut transportiert von Unstetigförderern)

⁵⁵ Vgl. BAuA -Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Arbeitsstättenrichtlinie, 2022, S. 2f.

⁵⁶ Vgl. Martin, H., Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, S.252f.

⁵⁷ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 10, 22, 29.

⁵⁸ Vgl. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., Statistik - Arbeitsunfallgeschehen 2021, 2022, S.10.

In dieser Arbeit werden unterbrochene, diskrete Fördergutströme betrachtet. Wann ein Förderprozess beginnt und endet, ist nicht immer klar abzugrenzen, da Fördersysteme in die Produktions- und Lagerplanung integrativ mit eingebunden sind. So werden teilweise sogenannte Handhabungs- und Umschlagfunktionen in Fördersysteme integriert. Förderprozesse können auch nach Handhabungsstufen unterschieden werden.⁵⁹

Eine Handhabungsstufe bezeichnet einen Schritt im Materialfluss, bei dem ein Gut von einem zum anderen Ort bewegt wird, ohne dabei das Transportmittel zu wechseln. Es sollte angestrebt werden, möglichst wenige Handhabungsstufen in einen Förderprozess zu implementieren, damit ein Umschlag zwischen zwei Handhabungsschritten vermieden wird. Ein einstufiger Transport könnte zum Beispiel ein Transport von einem Stapler (Quelle zur Senke) sein. Ein zweistufiger Transport könnte zum Beispiel ein Transport von einem Routenzug (Quelle zum Umschlagpunkt) mit anschließendem Transport von einem Stapler (Umschlagpunkt zur Senke) sein. Bei der Planung eines Fördersystems ist dabei zu beachten, welche Transporte zum Zuständigkeitsbereich des Systems gehören. Beispielsweise kann der Transport von Rohstoffen vom Wareneingang zu einem Produktionslager zum Zuständigkeitsbereich der Beschaffungslogistik gehören.⁶⁰

Ein einstufiger Förderprozess der Direktanlieferung kann nach FOTTNER (2022) in fünf Arbeitsschritte aufgeteilt werden. Als erstes erhält der Fahrer oder das automatisierte Fahrzeug *Auftragsinformationen* zum anstehenden Transportauftrag. Die Informationen enthalten unter anderem Daten über die Quelle, das Fördergut, die Ausführungszeit und die Senke. Es folgt der Start der Lastfahrt in Form einer *Leerfahrt* zur Quelle. Wenn das Fördermittel an der Quelle angekommen ist, kann die *Lastaufnahme* ausgeführt werden. Hierbei wird teilweise eine Bestätigung, z.B. per Scannen eines QR-Codes, benötigt. Anschließend kann die *Lastfahrt* starten und letztendlich das Fördergut an die Senke geliefert werden. Die *Lastabgabe* muss gegebenenfalls analog zur Lastaufnahme bestätigt werden.

Bei Routenzugsystemen werden Transporte gebündelt. In diesem Fall werden die Arbeitsschritte nicht starr in dieser Reihenfolge durchgeführt. Während des Prozesses wiederholen sich mehrere Arbeitsschritte, da mehrere Quellen und Senken auf einer Transportstrecke angefahren werden. Es müssen mehrfach die Lastaufnahme und -abgabe, sowie die Lastfahrt durchgeführt werden. Die zusätzlichen Arbeitsschritte wurden in

⁵⁹ Vgl. Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S.127.

⁶⁰ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S.11ff.

Abbildung 3 mit roten Pfeilen markiert.⁶¹ Der Stapler verfolgt das Konzept der Direktanlieferung und der Routenzug das Milkrunkonzept. FTS sind auf beide Materialversorgungskonzepte übertragbar.

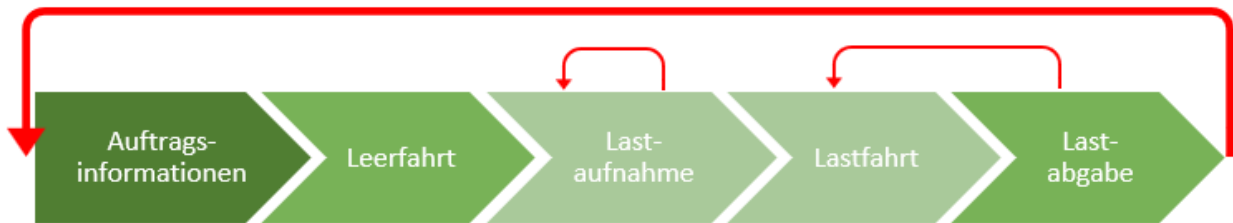


Abbildung 3 Beispielhafter Transportprozess nach FOTTNER (2022)⁶²

3.2.5 Transportsteuerung

Unter Steuerung versteht man die gedankliche Vorwegnahme eines dynamischen Prozesses. Im Gegensatz zu Planung umfasst die Steuerung sich wiederholende Abläufe. Es gibt mehrere hierarchische Ebenen, in welche die Steuerung eines Transportsystems unterteilt werden kann:

- Auftragsverwaltung,
- Routenwahl,
- Fahrzeugbedienung und
- Regelsysteme zu Unterstützung der Fahrzeugbedienung.

Routenwahl, Fahrzeugbedienung und Regelsysteme können auch unter dem Begriff Fahrzeugsteuerung zusammengefasst werden.⁶³

Die *Auftragsverwaltung* (Auftragssteuerung) dient zur Verteilung der Transportaufträge. Ziel ist, dass alle Transportaufträge fristgerecht und mit dem passenden Fördermittel ausgeführt werden. Dabei sollen nichtwertschöpfende Tätigkeiten, wie Leerfahrten, vermieden und die Transportzeit und -strecke verringert werden. Die Auftragsverteilung kann durch die Mitarbeiter:innen selbst abgestimmt, bei größeren Systemen muss jedoch die Verteilung durch Softwareprodukte unterstützt werden.⁶⁴ Die Auftragsverwaltung ist mit einer Taxi-

⁶¹ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S.14ff.

⁶² Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 14.

⁶³ Vgl. Koether, R., Taschenbuch der Logistik, 2018, S.306f.

⁶⁴ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S.15f.

Zentrale zu vergleichen, je nach Anforderungen von Transportaufträgen wird das am besten geeignete Fahrzeug dem Auftrag zugeordnet. Diese Zuordnung übernimmt im innerbetrieblichen Materialfluss ein Leitstand oder eine zentrale Transportsteuerung.⁶⁵

Eine geeignete *Fahrtroute*, auf der sich Fördermittel fortbewegen können, muss für jeden Fördervorgang ausgewählt werden, bei dem mehrere Routen zur Verfügung stehen. Ausschlaggebende Faktoren bei der *Routenwahl* können hierbei Blockaden auf den Verkehrswegen oder ein erhöhtes Verkehrsaufkommen sein. Diese Faktoren stellen auch Anforderungen an die Fahrzeugbedienung. Falls ein Streckenabschnitt von einem Fördermittel besetzt ist, muss bei manuell geführten Transportmitteln der Fahrer reagieren und neu navigieren. Bei automatischen Fördersystemen wird der gesamte Streckenabschnitt gesperrt, sobald ein Fördermittel in diesen eingefahren ist. Erst wenn das Fördermittel anschließend den Streckenabschnitt verlässt, wird dieser für andere Fördermittel wieder freigegeben. *Regelsysteme* können die Fahrzeugbedienung unterstützen und die Steuerung vereinfachen. Ein Regelsystem kann zum Beispiel die induktive Spurführung von FTS sein. Je nach Steuerungsebene kann diese zentral oder dezentral gehandhabt werden. Ein Gabelstapler kann beispielsweise zentral über ein mobiles Gerät, einen Auftrag zugeteilt bekommen. Die Fahrtroute wird jedoch dezentral vom Staplerfahrer gewählt.⁶⁶

3.3 Staplersysteme

Stapler gelten als die am weitesten verbreiteten Stückgut-Transportsysteme.⁶⁷ Sie besitzen eine Plattform und eine Gabel oder einen anderen Lastträger mit einer Hubfunktion, die zur Lastaufnahme und -abgabe genutzt wird. Stapler werden für den innerbetrieblichen Warenumschlag und Transport, sowie zur Regalbedienung verwendet. Ein Gabelstapler wird durch eine Person gesteuert. Diese Person kann mit Hilfe des Gabelstaplers Fördergüter aufnehmen, transportieren, stapeln und in Regale einordnen. Neben dem Haupteinsatzgebiet von Gabelstaplern in der Lagerhaltung und beim Be- und Entladen von Straßenverkehrsmitteln werden sie auch zur Produktionsversorgung eingesetzt.⁶⁸

⁶⁵ Vgl. Koether, R., Taschenbuch der Logistik, 2018, S.306f.

⁶⁶ Vgl. Koether, R., Taschenbuch der Logistik, 2018, S.306ff.

⁶⁷ Vgl. Koether, R., Taschenbuch der Logistik, 2018, S.295.

⁶⁸ Vgl. Klug, F., Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2010, S.183.

Fördermittel

Gabelstapler sind aufgrund ihres verstellbaren Lastaufnahmemittels in der Lage, diverse Transportaufgaben zu bewältigen. Für den jeweiligen Anwendungsbereich in der Materialbereitstellung kann die Wahl zwischen drei Antriebsarten und unterschiedlichen Bauformen getroffen werden.

Es wird zwischen elektrischen, verbrennungsmotorischen und hybriden Gabelstaplerantrieben unterschieden.⁶⁹ Da sich die Fördermittel bei der innerbetrieblichen Stückgutförderung primär im Indoor-Bereich fortbewegen, wird aufgrund der Emissionsausstoße der Elektromotor gegenüber den anderen zwei Alternativen bevorzugt. Der batterie-elektrische Antrieb ist auch geräuschärmer, besitzt jedoch eine kleinere Antriebsleistung.⁷⁰

Das Grundgerät eines Gabelstaplers wird in einer Drei- oder Vierradbauweise ausgeführt. Dreirad-Gabelstapler sind kleine und wendige Geräte mit E-Antrieb, die für Transport und Stapelaufgaben in Produktionshallen und -lagern bevorzugt werden. Im Gegensatz dazu werden Vierrad-Gabelstapler mit einem elektrischen oder verbrennungsmotorischen Antrieb hergestellt. Sie werden für den Transport von mittleren und großen Traglasten verwendet. Für den außerbetrieblichen Transport oder den Transport großer Lasten, eignet sich ein Vierrad-Gabelstapler. Für die innerbetriebliche Stückgutförderung eignet sich die Dreiradbauweise.⁷¹

Alternativ zum klassischen Gabelstapler können auch Niederflurkommissionierer verwendet werden. Diese Fördermittel sind primär für den horizontalen Transport von Gütern konzipiert. Sie können LHM heben, sind jedoch nicht in der Lage diese aufeinander zu stapeln. Niederflurkommissionierer können zwei bis drei Paletten hintereinander aufzunehmen.⁷²

⁶⁹ Vgl. Klug, F., Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2018, S.208.

⁷⁰ Vgl. Griemert, R./Römis, P., Fördertechnik, 2015, S.186f.

⁷¹ Vgl. Griemert, R./Römis, P., Fördertechnik, 2015, 193f.

⁷² Vgl. Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, 169f, 176.

Fördergut

In Gabelstaplersystemen werden vor allem Paletten und Gitterboxen transportiert. Für einzelne KLTs oder Pakete sind Gabelstapler nur bedingt geeignet. Für einzelne Stückgüter muss ein LHM unterlegt und gegebenenfalls ein Gebinde mit einer Ladungssicherung konstruiert werden.⁷³

Verkehrsnetz

Die flexiblen Fördermittel sind sehr wendig und haben auf Grund ihrer guten Rangierfähigkeiten wenig Schwierigkeiten mit starken Kurven. Sie sind außerdem in der Lage, Fahrstrecken mit einer geringen Neigung zu überwinden. Gabelstapler bewegen sich auf innerbetrieblichen Transportflächen fort, welche die richtige Fahrbahnbeschaffenheit vorweisen. Im Betriebsverkehr sind oftmals viele Gabelstapler gleichzeitig im Einsatz, was zu einem erhöhten Verkehrsaufkommen, Staubbildung und folglich auch Unfallgefahr führen kann. Letztere ist aufgrund der vorstehenden Gabelzinken als hoch einzuschätzen.⁷⁴

Förderprozess

In Gabelstaplersystemen wird das Transportkonzept der Direktversorgung bzw. des Taxi-Prinzips angewendet.⁷⁵ Die definierte Reihenfolge des Förderprozesses eines Gabelstaplers lässt sich in fünf Schritte gliedern:

- Erhalt der Auftragsinformationen
- Leerfahrt zur Quelle
- Lastaufnahme des Fördergutes mit der Gabelstaplergabel
- Lastfahrt zur Senke
- Lastabgabe durch absetzen des Fördergutes (Vgl. 3.1.4)

Wenn der Transportprozess abgeschlossen ist, startet der Gabelstaplerfahrer den Vorgang erneut, indem der nächste Auftrag angenommen wird. Falls kein Transportauftrag vorliegt, fährt der Fahrer zu einer vorgegebenen Parkposition oder stellt den Gabelstapler an einer

⁷³ Vgl. Klug, F., Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2010, S.184.

⁷⁴ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 22.

⁷⁵ Vgl. Klug, F., Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2010, S.184.

geeigneten Stelle ab. Diese zusätzliche Fahrt wird als Leerfahrt für den nächsten Förderprozess gewertet.⁷⁶

Steuerung

Die Einsatzsteuerung eines Staplers kann dezentral oder zentral durchgeführt werden. Bei der dezentralen Steuerung handelt es sich um einen Offline-Betrieb. Beispielsweise kehrt jeder Staplerfahrer und jede Staplerfahrerin nach Erledigung seines Auftrages zur Steuerstelle zurück und holt sich persönlich den nächsten Transportauftrag ab. Zentrale Steuerung heißt hingegen Online-Betrieb. Hier werden beispielsweise die Aufträge per Sprechfunk oder Datenfunk an die Staplerfahrer und Staplerfahrerinnen weitergeleitet.⁷⁷

In größeren Produktionssystemen ist eine dezentrale Steuerung nicht mehr ausreichend. Es müssen sogenannte Staplerleitsysteme verwendet werden. Ein Staplerleitsystem verwaltet alle Transportaufträge zentral und verteilt die einzelnen Aufträge anschließend auf die Staplerfahrer:innen. Somit kann der optimale Einsatz der Fahrzeuge erfolgen. Der Optimierungsgedanke der Staplerleitsysteme ist dabei, unproduktive Leerfahrten zu vermeiden oder zu reduzieren und dabei die Terminfristen einzuhalten. Die Transportaufträge in Staplerleitsystemen werden elektronisch disponiert und anschließend direkt an die mobilen Endgeräte der Staplerfahrer übertragen. Die Staplerfahrerinnen und Staplerfahrer können mithilfe ihres Gerätes den Eingang des Transportauftrages bestätigen, den Transportabschluss quittieren oder den Auftrag ablehnen.⁷⁸

3.4 Routenzugsysteme

Routenzüge sind bereits seit mehreren Jahrzehnten bei japanischen und teilweise amerikanischen Automobilherstellern im Einsatz. In Europa wurde das speziell für die Produktionsver- und -entsorgung konzipierte Fördermittel um die Jahrtausendwende erstmals eingesetzt. Nach dem Vorbild des Toyota Produktionssystems soll es ermöglicht werden, kleine Losgrößen in hoher Frequenz transportieren zu können. Der Grund für die

⁷⁶ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 22f.

⁷⁷ Vgl. *Martin, H.*, Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, S. 169.

⁷⁸ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 23f.

Einführung von Routenzugsystemen liegt am Streben nach einer Synchronisierung von Produktions- und Logistikprozessen.⁷⁹

Der Routenzug ermöglicht innerhalb eines Betriebes eine hochzyklische Versorgung von verschiedenen Materialsken. Als Quelle für solche Systeme dienen oftmals Materiallager oder andere Produktionsstationen, die sich entlang der vorgegebenen Route befinden. Routenzüge sind außerdem darauf ausgelegt, Leergut entlang ihrer Route zu entsorgen.⁸⁰ Ihre Aufgabe ist dabei das Sicherstellen eines kontinuierlichen Materialflusses und die Kompensierung von Bedarfsschwankungen an Montagelinien. Das erhöhte Transportvolumen und die Bündelung mehrerer Transportaufträge reduziert die Anzahl innerbetrieblicher Fahrten und folglich auch die Personalkosten.⁸¹

Fördermittel

Schleppzüge bestehen aus einem manuell bedienten oder automatisierten Schleppfahrzeug und mehreren Anhängern. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Varianten, woraus unterschiedliche Ent- und Beladeprozesse resultieren. Das Fördergut kann entweder vom Zug oder dem Kommissionierer be- und entladen werden oder es wird der gesamte Anhänger ab- bzw. angekuppelt.⁸² Alternativ zu Schleppzügen kann auch ein Niederflurkommissionierer oder Regalwagen für den Milkrun verwendet werden. In Einzelfällen werden auch Gabelstapler verwendet. Die heutzutage eingesetzten Routenzüge sind generell Flurförderer.⁸³

Schleppzug

Der Schleppzug dient als Zugmittel und wird von einer Person entweder im Sitzen oder im Stehen bedient. Alternativ kann er auch von einem FTS gesteuert werden. Die Zugfahrzeuge besitzen keine eigene Ladefläche und dienen während des Förderprozesses ausschließlich zum Ziehen der Lasten.⁸⁴ Analog zum Gabelstapler werden Schlepper in der

⁷⁹ Vgl. Günthner, W. A., Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport, 2012, S. 14.

⁸⁰ Vgl. Günthner, W. A./Keuntje, C., IntegRoute - Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung, 2016, S. 27.

⁸¹ Vgl. Klug, F., Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2018, 210ff.

⁸² Vgl. Günthner, W. A./Keuntje, C., IntegRoute - Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung, 2016, S. 27.

⁸³ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 27f.

⁸⁴ Vgl. Griemert, R./Römisch, P., Fördertechnik, 2015, 189f.

Drei- und Vierradbauweise ausgeführt und in denselben drei Antriebsvarianten produziert. Elektroschlepper in Dreiradbauweise kommen im Indoor-Bereich am häufigsten zum Einsatz. Sie ziehen zwei bis sechs Anhänger und können eine Höchstgeschwindigkeit von bis zu 10 km/h erreichen.⁸⁵

Anhänger

Bei Routenzugsystemen können vom Schleppzug mehrere Anhänger gezogen werden, die auf das Transportsystem ausgelegt sind. Die Anhänger lassen sich grob in KLT- und GLT-Anhänger und anhand der Be- und Entladeprozesses unterscheiden. Üblicherweise lassen sich mehrere Anhänger verschiedener Bauformen gleichzeitig von einem Schlepper ziehen.⁸⁶

Als Grundgestaltungsformen für Anhänger gelten Einschub-, Taxi- und Plattformwagen. Bei Einschub- und Taxiwagen muss der Ladungsträger zuerst auf einen Trolley gestellt werden, um anschließend auf- bzw. in den Wagen geschoben zu werden. Trolleys sind Gestelle oder Plattformen mit an der Unterseite befestigten Rollen. Anhänger, in die Regale eingeschoben werden können, werden als E-, C-, U- oder H-Frame-Anhänger bezeichnet, da die Form der Anhänger an die eines Buchstabens erinnert. (Vgl. Abbildung 4) Im Gegensatz dazu muss bei Plattformwagen lediglich der Ladungsträger auf den Wagen gestellt werden. Auf diesen Wagen befinden sich bereits Plattformen, Regale oder andere Befestigungen, die an das jeweilige Fördergut angepasst sind.⁸⁷

Die Flexibilität bei der Fahrt um eine Kurve ist vom Achs- und Lenksystem abhängig. Es wird zwischen zwei- und einachsigen Anhängern unterschieden. Einachsige Anhänger können nur eine begrenzte Last tragen, haben jedoch im Verhältnis einen kleinen Wenderadius, wodurch enge Kurven einfacher befahren werden können.⁸⁸

⁸⁵ Vgl. *Griemert, R./Römisch, P.*, *Fördertechnik*, 2015, S. 189.

⁸⁶ Vgl. *Hompel, M.* ten, *Materialflusssysteme*, 2018, 196f.

⁸⁷ Vgl. *Günthner, W. A.*, *Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport*, 2012, 46ff.

⁸⁸ Vgl. *Günthner, W. A.*, *Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport*, 2012, S. 50.



Abbildung 4 Elektroschlepper mit vier einachsigen Einschubanhängern mit E-Rahmen⁸⁹

Fördergut

Die von einem Routenzug transportierten Fördergüter werden zum Großteil mit Hilfe von Ladungsträgern transportiert. Routensysteme werden in der Praxis für Transporte von Kleinladungs- und Großladungsträger gleichermaßen verwendet, teilweise auch als KLT/GLT-Gemischtsystem.⁹⁰ An den Bereitstellungsstellen eines Milkruns wird Vollgut abgeladen und Leergut aufgeladen oder umgekehrt. Bei Routenzugsystemen dürfen die Transporteinheiten weder zu groß noch zu schwer sein, da die Materialien spätestens an den Haltestellen manuell verschoben werden müssen. Der manuelle Transport, Be- und Entladungsprozess von zu schwereren Lasten, kann eine körperliche Überlastung zur Folge haben. Dies lässt sich jedoch teilautomatisieren oder durch mechanische Hilfe erleichtern. Routenzugsysteme empfehlen sich somit eher für kleinere Transporteinheiten. Durch das An- und Entkoppeln von Anhängern sind sie jedoch im Hinblick auf das Transportvolumen weitestgehend flexibel.⁹¹

⁸⁹ Vgl. *STILL Advanced Applications*, Das Wie, Was und Warum zur Einführung von Routenzugsystemen, 2018, 16,18.

⁹⁰ Vgl. *Lieb, C. u. a.*, Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung, 2017, 29ff.

⁹¹ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 26f.

Verkehrsnetz

Durch die Bündelung von Transportaufträgen und das hohe Transportvolumen, welcher Routenzüge transportieren können, sinkt die Anzahl an Transporten zur innerbetrieblichen Materialversorgung. Folglich wird das gesamte betriebliche Verkehrsaufkommen und die Anzahl an Kreuzungsverkehren reduziert. Somit sinkt auch die Unfallgefahr und der innerbetriebliche Materialfluss wird beruhigt, was zu einer steigenden Transparenz führt.⁹²

Der Einsatz des Routenzuges ist von der Wegführung und somit auch vom Fabriklayout abhängig. Die Fahrbahnbreite kann einerseits entlang ununterbrochener Fahrtabschnitten schmaler gestaltet werden, da der Routenzug die Fördergüter im Einbahnverkehr bereitstellt.⁹³ Andererseits müssen die Gangbreiten aufgrund weiterer Faktoren breiter sein. Die Be- und Entladung erfolgt meist seitlich, somit wird zusätzlicher Platz für die Handhabung benötigt. Außerdem muss der Routenzug von anderen Fördermitteln und Fußgängern mit einem Sicherheitsabstand überholt werden können, um größere Wartezeiten und Staus zu vermeiden.⁹⁴ In Kurven wird aufgrund der großen Wenderadien und den nicht immer spurbezogen nachlaufenden Anhänger mehr Platz benötigt als beim Gabelstaplerverkehr. Senken in Sackgassen können von Routenzügen nicht angefahren werden, weil die Fördermittel mit Anhängern nicht rückwärtsfahren können.⁹⁵ Nicht mit allen Routenzügen können Steigungen bergabwärts befahren werden, da die Anhänger teilweise ungebremst sind.⁹⁶

⁹² Vgl. *Klug, F.*, Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2018, S. 211.

⁹³ Vgl. *Klug, F.*, Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2010, S. 186.

⁹⁴ Vgl. *Hompel, M.* ten, Materialflusssysteme, 2018, 195f.

⁹⁵ Vgl. *Günthner, W. A.*, Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport, 2012, 50,61.

⁹⁶ Vgl. *Fottner, J.* u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 30,34.

Förderprozess

Der Förderprozess bei Routenzugsystemen wird auch als innerbetrieblicher Milkrun bezeichnet. Das Hauptmerkmal des Förderprozesses ist die Bündelung, bei der Transporte mehrerer Fördergüter auf einer gemeinsamen Fahrt durchgeführt werden. Diese Sammeltransporte können wie folgt ablaufen:

- Zwischen einer Quelle und mehreren Senken
- Zwischen mehreren Quellen und mehreren Senken
- Zwischen mehreren Quellen und einer Senke.⁹⁷

Die Implementierung des Leergutkreislaufs ist charakteristisch für Sammeltransporte. Der sich wiederholende Prozessablauf lässt sich nach DROSTE (2011) in den folgenden Schritten darstellen:

- Beladen des Routenzuges mit Material
- Transport des Materials zum Bereitstellungsort
- Entladen des Materials am Bereitstellungsort
- Beladen des Routenzugs mit Leergut am Bereitstellungsort
- Transport des Leerguts zum Leergutabgabeort
- Entladen des Leerguts am Leergutabgabeort.

Die Prozessschritte 1-4 werden an jedem Bereitstellungsort wiederholt.⁹⁸ Der Routenzug fährt dabei auf einer zuvor definierten „Route“. Dieser Route sind Bereitstellungsorte zugeordnet, die mit Material versorgt werden. Eine „Tour“ bezeichnet dabei eine einzige Fahrt auf einer Route. Die Materialquelle für den Routenzug wird auch als „Bahnhof“ bezeichnet. Am Bahnhof wird der Routenzug endgültig beladen oder es werden dem Schlepper Anhänger angehängt.⁹⁹

⁹⁷ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 25.

⁹⁸ Vgl. Droste, M./ElMaraghy, H. A., Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, 2011, 606f.

⁹⁹ Vgl. Günthner, W. A., Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport, 2012, S. 17.

Steuerung und Planung

Die Herausforderung liegt vor allem in der Auslegung von Routenzugsystemen, es handelt sich um ein multidimensionales Optimierungsproblem. Neben der Routenplanung und dem Startzeitpunkt der Touren muss auch die Auftragsbeschaffungsart und Fahrzeugdisposition bestimmt werden.¹⁰⁰

Die Routenplanung dient als Basis für den Betrieb eines Routenzugsystems. Dabei werden die Bereitstellorte meistens einer festgelegten Route zugeordnet, wodurch keine Routenplanung während des Betriebs erfolgt. Durch das Verändern der Anfahrreihenfolge der Bereitstellorte, können jedoch teilweise Fahrzeiten eingespart werden. Das Variieren der Fahrwege kann sinnvoll sein, falls für einen Bereitstellort kein Auftrag vorliegt und dieser übersprungen werden kann. Bei dieser Strategie wird ein Bereich festgelegt, jedoch wird der Fahrweg je nach Bereitstellorten variabel gewählt. Die jüngste strategische Überlegung ist eine dynamische Routenplanung nach Auftragslast. Hierbei sollen weder Routen noch Bereiche festgelegt und die Touren erst unmittelbar vor dem Startzeitpunkt anhand der anstehenden Transportaufträge gebildet werden.¹⁰¹

Für die Steuerung der Routenzüge ist festzulegen, wie die Taktung und der Tourenstart durchgeführt werden. Dabei ist zwischen der getakteten, auslastungsorientierten und permanenten Steuerung zu unterscheiden. Erfolgt die Steuerung nach einem festgelegten Fahrplan, mit festen Zeitintervallen, bezeichnet man diese als getaktete Steuerung. Es werden hierbei alle Aufträge mitgenommen, die in der Zwischenzeit angefallen sind, sofern die Kapazität ausreichend ist. Die auslastungsorientierte Steuerung orientiert sich an der Zugkapazität und an den geforderten Anlieferungszeitpunkten. Eine Tour wird gestartet, sobald die Kapazität des Zuges erreicht ist oder die Auslieferung gestartet werden muss, weil sonst der Anlieferungszeitpunkt nicht eingehalten werden kann. Wenn ein Routenzugsystem permanent gesteuert wird, startet die nächste Tour, sobald die vorherige abgeschlossen wurde.¹⁰²

Aus organisatorischer Sicht ist die Art und Weise, wie Aufträge zum Routenzugsystem gelangen von hoher Bedeutung. Die Steuerung kann entweder bedarfsorientiert, anhand zentral geplanter Bedarfe, oder verbrauchsorientiert, durch die tatsächlich auftretenden

¹⁰⁰ Vgl. *Schmidt, T.*, Innerbetriebliche Logistik, 2018, 51f.

¹⁰¹ Vgl. *Fottner, J.* u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 38f.

¹⁰² Vgl. *Günthner, W. A.*, Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport, 2012, 38f.

Verbräuche an den Bereitstellungsstellen, gehandhabt werden. Ein weitverbreitetes System der verbrauchsorientierten Steuerung ist das Kanban-System. Der Begriff „Kanban“ stammt aus der japanischen Fertigungsindustrie und bedeutet „Sichtkarte“ oder „Signal“. Bei einem Kanban-System werden beispielsweise an den jeweiligen Bereitstellungsstellen mehrere Handkarten als „Kanban-Signal“ verwendet. Mit Hilfe der beschrifteten Handkarten kann der Routenzugfahrer informiert werden, welches Material benötigt wird. Der Routenzugfahrer sammelt die Handkarten bei seiner Tour am Bereitstellungsstelle ein und lädt anschließend das benötigte Material an der Quelle auf. In der nächsten Tour wird der Bereitstellungsstelle mit dem Material beliefert.¹⁰³

In größeren Routenzugsystemen muss die Zuweisung der Fördermittel auf die jeweiligen Routen festgelegt werden. Im einfachsten Szenario bedient ein Fahrzeug nur eine Route und diese Route wird nur von einem Fahrzeug bedient. Wenn eine Route lang ist oder einen hohen Bedarf aufweist, können auch mehrere Fahrzeuge auf einer Route abwechselnd die Touren übernehmen. Falls die Touren klein sind oder ein geringer Bedarf besteht, kann ein Routenzug auch mehrere Routen abdecken. Ähnlich wie die dynamische Routenplanung nach Auftragslast, kann auch ein dynamischer Fahrzeugpool nach Fahrzeugverfügbarkeit verwendet werden.¹⁰⁴

3.5 Fahrerlose Transportsysteme

Zur Gruppe der automatisch fahrenden Flurförderfahrzeuge gehören FTF. Sie sind automatisch gesteuert und werden berührungslos geführt, werden also ohne direktes menschliches Einwirken, geführt. Während einzelne FTF eigenständige Fördermittel sind, können sie als FTS mit einer zentralen Leitsteuerung vernetzt werden.¹⁰⁵

Die FTS-Technik hat sich bereits in den 1970er und 1980er Jahren entwickelt, damals war der technische Fortschritt für den Durchbruch der Systeme nicht ausreichend. Die versprochene, aber oft nicht erreichte Flexibilität bei hohen Investitionskosten führte in den frühen 1990er Jahren zu einem starken Rückgang von Neuinstallationen. Entwicklungen in Hard- und Software haben der FTS-Technik jedoch einen neuen Aufschwung ermöglicht.

¹⁰³ Vgl. *Hompel, M. ten*, Materialflusssysteme, 2018, 197f.

¹⁰⁴ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 40f.

¹⁰⁵ Vgl. *Bauernhansl, T.*, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, 2014, S. 221.

Seit Mitte der 1990er Jahre steigt die Anzahl an FTS-Neuanlagen jährlich um mehr als 50%.¹⁰⁶

Obwohl FTS hohe Investitionskosten mit sich ziehen, ist laut einer Umfrage von FOTTNER der Kostendruck der größte Treiber für die Einführung von FTS und für 86% der Befragten die Personalkostenreduktion ein Ziel.¹⁰⁷ Beim Transport mit Gabelstaplern nehmen die Personalkosten rund 75% der Betriebskosten ein. Mit der Automatisierung von Fördervorgängen wird so die Reduktion von Personalkosten angestrebt.¹⁰⁸

FTS-Anlagen werden in Unternehmen vielseitig eingesetzt. Der Anwendungsbereich erstreckt sich von reinen Transportaufgaben, über Aufgaben im Lager- und Kommissionierbereich, bis hin zur mobilen Werkbank für Mitarbeiter:innen.¹⁰⁹ Dies kann im Outdoorbereich, Indoorbereich oder in Kombination der beiden durch FTS ausgeführt werden. FTS finden überwiegend im Indoorbereich Anwendung, sie haben dort den höchsten Reifegrad erreicht und werden in der Praxis am häufigsten als Serienanwendung eingesetzt.¹¹⁰ Aufgrund der inhaltlichen Ausrichtung werden in dieser Arbeit ausschließlich Indoor-FTS zur Erfüllung von Transportaufgaben betrachtet.

Fördermittel

FTF sind Flurförderer, die den Materialtransport durch Ziehen oder Tragen des Fördergutes durchführen können. Folglich wird zwischen lastziehenden und lasttragenden FTF unterschieden. Lastziehende FTF können Anhängerschlepper oder Unterfahrschlepper sein. Anhängerschlepper sind Alternativen zum manuell gesteuerten Routenzugschlepper und dienen zum Ziehen von Anhängern. Unterfahrschlepper sind FTF, die rollende Fördergüter unterfahren und anheben können.¹¹¹

Lastragende FTF können weiter in Fahrzeugtypen mit aktiven oder passiven Ladeaufnahmemittel (LAM) unterteilt werden. LAM dienen dem Hochheben bzw. als Tragefläche des Stückgutes. Bei passiven LAM wird das Fördergut durch manuelles oder automatisches Ablegen auf das Fördermittel platziert. Von einem aktiven LAM ist die Rede,

¹⁰⁶ Vgl. *Hompel, M.* ten, *Materialflusssysteme*, 2018, S. 209.

¹⁰⁷ Vgl. *Clauer, D./Fottner, J.*, *Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände*, 2019, S.25f, 30f.

¹⁰⁸ Vgl. *Martin, H.*, *Technische Transport- und Lagerlogistik*, 2021, S. 616.

¹⁰⁹ *Martin, H.*, *Technische Transport- und Lagerlogistik*, 2021, S. 172.

¹¹⁰ Vgl. *Clauer, D./Fottner, J.*, *Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände*, 2019, S. 18.

¹¹¹ Vgl. *Wehking, K.-H.* u. a., *Technisches Handbuch Logistik*, 2020, 617f.

wenn das Fördermittel durch Unterfahren und Anheben das Fördergut aufnimmt. Hierfür wird eine Gabel oder eine andere Hubeinrichtung benötigt.¹¹² Die Fahrwerke von FTF werden in Dreirad- und Mehrradbauweise konstruiert. Im Vergleich zu Routenzügen ist es bei FTF und Gabelstaplern möglich, alle vier Räder lenkbar zu machen.¹¹³ Mit der Vierradlenkung ist das Fahrzeug in der Lage, im Stehen zu drehen, wodurch wenig Rangierfläche benötigt wird. Die Anzahl der Räder hat einen Einfluss auf die Standsicherheit. Je mehr Räder umso höher die Standsicherheit.¹¹⁴



Abbildung 5 Unterfahr-FTF der NEUMAIER Industry GmbH & Co¹¹⁵

Als Antrieb werden Elektromotoren verwendet, die meist mittels Batterien versorgt werden. Teilweise werden die Elektromotoren auch durch induktive im Boden eingelegte Drähte mit Energie versorgt. Wenn das Fördermittel mit einer Batterie versorgt wird, muss diese auch während der Betriebszeiten zwischengeladen werden. Heutzutage werden typischerweise Lithium-Ionen-Batterien und Doppelschichtkondensatoren verwendet. Diese Batterietechnologien sind für das Zwischenladen geeignet und zudem wartungsfreundlicher als herkömmliche Bleisäurebatterien.¹¹⁶

An einem FTF müssen besondere Sicherheitseinrichtungen ausgeführt werden, um andere Teilnehmer des Werkverkehrs zu schützen. Zum einen muss eine Notstopptaste am

¹¹² Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 42f.

¹¹³ Vgl. Wehking, K.-H. u. a., Technisches Handbuch Logistik, 2020, S. 606f.

¹¹⁴ Vgl. Martin, H., Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, 173f.

¹¹⁵ NEUMAIER Industry GmbH & Co, AGV FS400 Factory Shuttle – Kompaktes und fahrerloses Transportsystem (FTS), 2023.

¹¹⁶ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 47f.

Fahrzeug angebracht und eine Hupe installiert werden. Die Hupe informiert andere Verkehrsteilnehmer über die Präsenz des Fahrzeugs. Außerdem muss ein FTF für den Personenschutz ein berührendes (z.B. Bumper) oder ein berührungsloses Schutzsystem (z.B. Lasersensoren) besitzen. Wird ein Reiz durch das System ausgelöst, kommt das Fahrzeug unmittelbar danach zum Stehen. Sicherheitslaserscanner haben sich mittlerweile als Standard etabliert.¹¹⁷

Fördergut

FTF werden zusätzlich zum LAM und der Art der Lasthandhabung auch durch das zu transportierende Fördergut klassifiziert. Das hat besonders auf die Größe der Fördermittels Einfluss. FTF werden in Häfen zum Transport von Containern ebenso verwendet wie für KLT in der Produktion.¹¹⁸ Aufgrund der vielen Fahrzeugvarianten können FTF im innerbetrieblichen Transport vielfältig für unterschiedliche Fördergüter eingesetzt werden. FTF sind normalerweise nur auf ein LHM, entweder GLT oder KLT, ausgelegt. FTS-Schlepper können verschiedene LHM transportieren, wenn ihre Anhänger entsprechend ausgelegt sind.

Verkehrsnetz

Die automatischen Flurförderfahrzeuge bewegen sich auf denselben Wegen mit anderen Fördermitteln und Personen. Die Verwaltungs-Berufsgenossenschaft-Richtlinie für Flurförderzeuge, sowie die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments legen die dadurch erforderlichen Sicherheitsbestimmungen fest. Es wird zwischen fahrzeug- und anlagenbezogenen Sicherheitskomponenten unterschieden. Die fahrzeugbezogenen Sicherheitskomponenten wurden bereits in diesem Kapitel thematisiert. Anlagenbezogene Sicherheitskomponenten beziehen sich auf das Verkehrsnetz in Verbindung mit dem Produktionslayout. Dazu gehören seitliche Freiräume, die im automatischen System 10 cm ohne Personenverkehr und 50cm mit Personenverkehr betragen müssen. Außerdem

¹¹⁷ Vgl. *Martin, H.*, Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, S. 175.

¹¹⁸ Vgl. *Wehking, K.-H.* u. a., Technisches Handbuch Logistik, 2020, 630f.

müssen Fahrbahnmarkierungen aufgezeichnet und Ampeleinrichtungen implementiert werden.¹¹⁹

Für die Installation von Navigationshilfsmitteln wie Leitdrähte oder Magnetspots gelten spezifische Anforderungen an den Bodenaufbau nach Hersteller und VDI-Vorgaben.¹²⁰ Zudem gilt bei FTS, die Fahrwege besonders rein zu halten und ebenmäßig zu gestalten, damit die Funktionsweise der Navigations- und Sicherheitstechnologien gewährleistet werden kann. Durch ihre flexible Streckenführung können FTS auf Änderung des Layouts leicht reagieren, da keine besondere Trasse benötigt wird.¹²¹

Bei der Planung müssen Bahnhöfe zur Aufnahme unbeschäftigter FTF, Batterieladestationen sowie Übergabestationen bei der Layoutplanung beachtet werden. An diesen drei Positionen können auch Wartungsarbeiten durchgeführt werden. Zur Stauvermeidung werden Blockstrecken verwendet, damit das Steuerungssystem blockierte Verkehrsabschnitte frühzeitig erkennen und den Verkehr umleiten kann.¹²²

Förderprozess

FTS führen den logistischen Förderprozess nach dem Milkrun- und Direktversorgungskonzept automatisiert durch. Automatisiert wird dabei die Transportauftragbearbeitung, Leerfahrt, Lastaufnahme, Lastfahrt, sowie die Lastabgabe. Die Lastaufnahme und -abgabe erfolgen teilweise auch manuell. Aufgrund des un stetigen Prozesses von FTS müssen Puffer zur Entkopplung vorlaufender Prozesse installiert werden.¹²³ Übergabestationen zu den vor- und nachlaufenden Prozessen können unterschiedlich gestaltet werden. Entweder besitzt das FTF ein aktives LAM (z.B. Hubtisch) und die Übergabestation ist passiv (z.B. statische Vorrichtung) oder das FTF hat ein passives LAM (z.B. Plattformwagen) und die Übergabestation ist aktiv (z.B. Teleskopgabel). In Einzelfällen sind das FTF und die Übergabestation aktiv (z.B. beide Komponenten sind mit angetriebenen Rollenförderern ausgestattet).¹²⁴

¹¹⁹ Vgl. *Hompel, M.* ten, *Materialflusssysteme*, 2018, S. 219.

¹²⁰ Vgl. *Fottner, J.* u. a., *Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen*, 2022, S. 49.

¹²¹ Vgl. *Koether, R.*, *Taschenbuch der Logistik*, 2018, S. 304.

¹²² Vgl. *Martin, H.*, *Technische Transport- und Lagerlogistik*, 2021, 178f.

¹²³ Vgl. *Fottner, J.* u. a., *Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen*, 2022, S.51.

¹²⁴ Vgl. *Martin, H.*, *Technische Transport- und Lagerlogistik*, 2021, S. 180.

Steuerung

Die Steuerungsbausteine eines FTS sind die Sicherheits-, Leit- und Kommunikationssysteme, sowie die Fahrzeugführung. Das Sicherheitssystem kann fahrzeugbezogen und systembezogen in Verbindung mit der Produktionsanlage gestaltet werden. (vgl. Fördermittel und Verkehrsnetz). Die Leitsteuerung ist für die Transportauftragsverwaltung, Verkehrssteuerung und die Anbindung an übergeordnete Materialflussteuerung verantwortlich. Falls nötig, muss die Leitsteuerung eine steuerungstechnische Anbindung an die vorhandenen Verkehrseinrichtungen wie Türen oder Aufzüge ermöglichen. In rein automatisierten Systemen besitzt die Leitsteuerung ein User-Interface, das einen aktiven Eingriff einer Person in das System ermöglicht.¹²⁵

Die Schlüsseltechnologie eines FTS ist die Fahrzeugführung, deren Aufgabe ist, das FTF von einer Startposition zu einer Zielposition über den effizientesten Weg führen. Man spricht von zwei Hauptprinzipien bei der automatischen Führung der Flurförderfahrzeuge. Die Führung des Fahrzeuges kann entweder mit Hilfe einer realen oder virtuellen Leitlinie geschehen. Für die Steuerung durch physische Leitlinien werden auf dem Boden der Produktionsanlage Leitlinien angebracht oder verlegt. Das Fahrzeug kann dadurch optisch, induktiv oder magnetisch geführt werden.¹²⁶ Bei der drahtlosen Fahrzeugführung wird von Navigation gesprochen. Bei der Punktnavigation werden einzelne Punktreфлекoren entlang des Fahrweges angebracht, die dem Fördermittel mit Lasertechnik zur Navigation dienen. Die Basis der Rasternavigation ist ein Raster aus Magneten oder Transpondern, die gleichmäßig verteilt im Fahrbereich platziert werden. Die Transponder geben Identifikationssignale ab, wodurch die Position des Fahrzeugs millimetergenau erfasst werden kann.¹²⁷

Das Kommunikationssystem dient zur Datenübertragung vom FTF zum Leitsystem und vom Leitsystem zu den vorhandenen Verkehrseinrichtungen. Es werden Informationen über Transportaufträge, Ladeinheit, Fehlermeldungen und Staus bzw. Teilstreckenblockaden ausgetauscht. Die Datenübertragung zwischen FTF und Leitsystem erfolgt heutzutage überwiegend über kabellosen Funk. Für die Anbindung an andere Verkehrseinrichtungen werden kabelgebundene Verbindungen verwendet.¹²⁸

¹²⁵ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, 51f.

¹²⁶ Vgl. *Bauernhansl, T.*, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, 2014, S. 223.

¹²⁷ Vgl. *Martin, H.*, Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, 187f.

¹²⁸ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 42.

Die Systemsteuerung und Koordination eines FTS kann zentral und dezentral durchgeführt werden. Die zentrale Steuerung basiert auf einem Zentralrechner, der sämtliche Aufgaben wie Fahrzeugdisposition, Kommunikation mit den Fahrzeugen oder Ansteuern von Lastübergabe- oder Ladestationen durchführt. Dezentral gesteuerte Systeme bestehen auch aus einem Zentralrechner, dessen untergelagerte Ebene sich in mehrere Substationen unterteilt. Jede Substation kontrolliert ein für sich definiertes Gebiet. Die hier angewendete Anlagensteuerung verbindet die Substation mit dem FTF und dem Zentralrechner. Komplexe Systeme mit vielen Fahrzeugen werden üblicherweise dezentral und kleinere Systeme zentral gesteuert. In autonomen Systemen ist die Steuerung komplett in die FTF verlagert. Dabei sind die Fahrzeuge in der Lage, sich ohne äußere Steuerung selbst zu orientieren und untereinander zu kommunizieren.¹²⁹

3.6 Vergleich der Systeme

Die drei vorgestellten Fördermittel von Stückgutfördersystemen sollen im Folgenden verglichen werden. Der Stapler dient hierbei als Beispiel für die Direktversorgung und der Schlepper für klassische Routenzugsysteme. FTS sind auf beide Konzepte übertragbar.

Zur Auswahl des geeigneten Fördermittels in der innerbetrieblichen Logistik gibt es eine Vielzahl an möglichen Parametern. Investitions- und Betriebskosten sind den anderen Entscheidungskriterien übergeordnet. Diese können jedoch nicht allgemein wertmäßig angegeben werden, sondern sind fallspezifisch. Als Voraussetzung für eine Auswahl des Transportmittels werden detaillierte Informationen über die Transporthäufigkeit, die Aufstellung der Haltepunkte, das Gebäudelayout und die Schnittstellen zu anderen Prozessen benötigt. Zudem müssen die zu transportierenden Fördergüter und die benötigte Transportleistung bekannt sein.¹³⁰

Einige Einflussgrößen und Restriktionen der Fördermittel sind jedoch vergleichbar. Die Übersicht aller Fördermittel, die HOMPEL (2018) bewertet hat, sind in Anhang 4 und 5 dargestellt. Die Bewertungen von Stapler, Schlepper und FTS sind in Tab 1 separat dargestellt. FTS werden hierbei als direktversorgendes Fördermittel betrachtet. Die Beurteilung zu den Bestimmungskriterien hat keinen allgemeingültigen Charakter, sondern

¹²⁹ Vgl. *Wehking, K.-H. u. a.*, Technisches Handbuch Logistik, 2020, S. 628.

¹³⁰ Vgl. *Wehking, K.-H. u. a.*, Technisches Handbuch Logistik, 2020, S. 646.

dient als Muster. Für die jeweiligen Anwender muss eine Gewichtung der verschiedenen Bestimmungskriterien durchgeführt werden, damit die Bedeutung der einzelnen Kriterien den Umständen und Zielen des geplanten Systems gerecht wird.¹³¹

Die einzelnen Bestimmungskriterien nach HOMPEL (2018) sind:

- Der *Automatisierungsgrad* beschreibt das nötige Maß manuellen Eingreifens und den Personalaufwand, der damit verbunden ist. Zudem trifft er Aussagen über die Möglichkeiten einer kontrollierten und automatisierten Materialversorgung.
- Die *Integrierbarkeit* hängt unmittelbar mit dem Automatisierungsgrad zusammen. Es gilt: Je besser die Integrierbarkeit der Fördermittel in das System, umso höher der Automatisierungsgrad.
- Die *Flexibilität bei Layoutänderungen*, beschreibt den Aufwand, der bei Änderungen der Topologie oder Fahrwege, betrieben werden muss.
- Die *Flexibilität bei Änderungen der Förderleistung* zeigt auf, in welchem Maß Unstetigförderer auf Änderungen der Förderkapazität reagieren können.
- Der *Flächenbedarf für Transportstrecken* sagt aus, wieviel Hallenfläche die jeweiligen Unstetigfördersysteme beanspruchen.
- Die Einordnung der *Hindernisbildung* stellt dar, inwiefern die Fördertechnik andere Verkehrsteilnehmer oder Arbeitsmittel bei ihren Bewegungsabläufen einschränkt.
- Die *umkehrbare Förderrichtung* soll klarstellen, ob es sich bei der Förderrichtung um einen Richtungsverkehr handelt oder ob die Fördertechnik in der Lage ist in beide Richtungen zu fördern.
- Ob ein Fördermittel für das *Überwinden von Steigungen* geeignet ist, bezieht sich auf die Fähigkeit ansteigende Fahrbewegungen zu erhöhten Bodenniveaus innerhalb einer Halle zu überwinden.
- Der *Aufwand bei Verzweigungen* sagt aus, wie umfangreich die Gestaltung der Streckenführung ist, wenn Abzweigungen im Verkehrsnetz existieren.
- Unter *Stau- und Pufferfähigkeit* versteht man, inwieweit die Fördermittel zum Stauen von Fördereinheiten geeignet sind.
- Ob eine *Lastübergabe an der gesamten Transportstrecke möglich* ist, hängt vom Aufbau des LAM des Transportmittels ab und ob der Prozess stetig oder unstetig durchgeführt wird. Daraus resultiert, inwiefern das Fördermittel eine Fördereinheit während des Fördervorgangs an ein anderes Fördermittel übergeben kann.

¹³¹ Vgl. Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S. 243.

- Anforderungen an den Baukörper können beispielsweise Erfordernisse bezüglich der Bodenverhältnisse, der Säulenabstände oder ähnliches sein.
- Die Möglichkeit der Organisation mit Datenverarbeitung zeigt, inwieweit die Fördertechnik automatisch steuerbar bzw. der Mensch zur Steuerung erforderlich ist. Je mehr Möglichkeiten der Organisation mit Datenverarbeitung bestehen, umso eher kann die Steuerung automatisiert werden.
- Anhand des Investitions- und Wartungsaufwandes wird die Wirtschaftlichkeit der Fördermittel bestimmt.¹³²

Tabelle 1 Beispielhafte Bewertung anhand wichtiger Bestimmungskriterien der Fördermittel nach HOMPEL¹³³

Bestimmungskriterium	Unstetigförderer		
	Schlepper	Stapler	FTS
Automatisierungsgrad			■
Integrierbarkeit in automatische Systeme			■
Flexibilität bei Layoutänderungen	■	■	■
Flexibilität bei Änderungen der Förderleistung	■	■	■
Flächenbedarf für Transportstrecken	■	■	■
Hindernisbildung	■	■	■
Umkehrbare Fahrtrichtung	■	■	■
Überwinden von Steigungen		■	■
Aufwand bei Verzweigungen	■	■	■
Stau- und Pufferfähigkeit	■		
Lastübergabe an gesamter Transportstrecke möglich	■	■	■
Anforderungen an den Baukörper	■	■	■
Organisation mit Datenverarbeitung	■	■	■
Investitionsbedarf	■	■	
Wartungsaufwand	■	■	

	ungünstig
■	durchschnittlich
■	günstig

Aus den in Kapitel 3.2 bis 3.4 gesammelten Informationen können bereits einige Rückschlüsse hinsichtlich dieser Bewertungskriterien bei Schleppern, Staplern und FTS

¹³² Vgl. Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S. 243-246.

¹³³ Vgl. Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, 241f.

gezogen werden. Zusätzlich werden die Erkenntnisse aus HOMPEL (2018) herangezogen. Folgende Schlüsse können aus dem Vergleich gezogen werden:

- FTS weisen einen hohen Automatisierungsgrad und eine gute Integrierbarkeit in automatische Systeme auf. Hierfür sind rein manuell bediente Schlepper und Stapler schlecht geeignet.
- Schlepper sind nicht in der Lage rückwärtszufahren, wenn Anhänger angehängt sind. Der Transportprozess verläuft im Einbahnstraßenverkehr. Direktversorgende Stapler und FTS sind in der Lage rückwärtszufahren und transportieren im 2-Richtungsverkehr. Daraus resultiert, dass Stapler und FTS flexibler gegenüber der Positionierung von Bereitstellungsarten sind.
- Das Überwinden von Steigungen ist bei Schleppzügen selten möglich, da die Anhänger meistens keine eigene Bremsfunktion installiert haben. Vor allem beim Bergabfahren führt dies zu Problemen. Gabelstapler sind in der Lage Steigungen von über 13% mit Last zu überwinden.¹³⁴ Direktversorgende FTS sind analog zu Gabelstaplern, je nach Bauweise für die Überwindung von Steigungen besser oder schlechter geeignet.
- Bei Routenzugsystemen mit Schleppern und Anhängern kann die Pufferfunktion verwendet werden. Hierfür werden die Anhänger zur Handhabung abgehängt und können dabei auch als Puffer verwendet werden.¹³⁵
- FTS haben besonders hohe Ansprüche an die Bodenverhältnisse, sie benötigen eine besonders glatte und saubere Fahrbahn. Manuell betriebene Gabelstapler und Schlepper sind diesbezüglich weniger empfindlich.
- Die automatische Steuerung ist bei FTS ohne menschliche Eingriffe möglich. Bei manuell gesteuerten Flurförderern kann lediglich eine Teilautomatisierung angestrebt werden.
- Der Investitionsbedarf und der Wartungsaufwand ist generell bei Schleppern und Staplern günstiger zu bewerten als bei FTS. Dies kann jedoch fallspezifisch variieren.

Das FTS schneidet im Vergleich am besten ab. Das Fördermittel ist jedoch mit hohen Betriebs- und Investitionskosten nicht immer die wirtschaftlichste Entscheidung. Um Entscheidungen bezüglich des geeigneten Fördermittels zu treffen, dienen die Erkenntnisse als Hilfe zur Einordnung. Es ist jedoch die Betrachtung weiterer Aspekte nötig.

¹³⁴ Vgl. *Martin, H.*, Transport- und Lagerlogistik, 2016, 268f.

¹³⁵ Vgl. *Hompel, M.* ten, Materialflusssysteme, 2018, S. 93.

Vergleich der Materialversorgungskonzepte

Zusätzlich zu den bisherigen einzelnen Entscheidungskriterien gilt es für die Fördermittelentscheidung auch das Materialversorgungskonzept als Ganzes zu betrachten. Ein beispielhafter Bereitstellungsprozess eines Gabelstaplers nach dem Direktversorgungskonzept und eines Routenzuges nach dem Konzept des Milkrun ist in Abbildung 6 dargestellt.

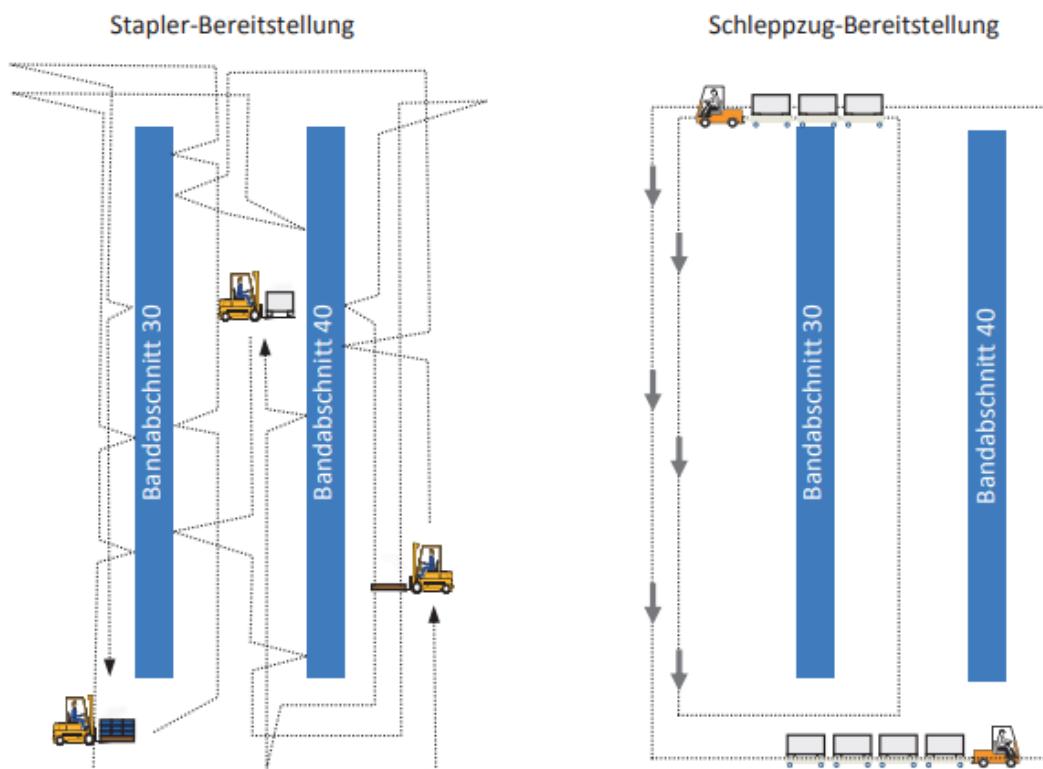


Abbildung 6 Vergleich Stapler- und Schleppzug-Bereitstellung¹³⁶

Der entscheidende Vorteil von Routenzugsystemen ist die Bündelung von Einzeltransporten. Durch die hohe Ladekapazität der Routenzüge und die Bündelung mehrerer Transportaufträge können, im Vergleich zur Direktversorgung, die Transportwege gekürzt und die Leerfahrten reduziert werden. Der Einsatz eignet sich tendenziell eher für eine hohe Anzahl an Bereitstellungsstellen und große Entfernungen. Das Ziel bei der Einführung eines Routenzugsystems kann eine hochfrequente Ver- und Entsorgung der Produktion mit kleinen Transportmengen sein.¹³⁷

¹³⁶ Vgl. Klug, F., Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2018, S. 212f.

¹³⁷ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 64f.

Direktversorgungssysteme haben dagegen einen Vorteil in der Flexibilität. Sobald die Fahrzeugdisposition durchgeführt wurde, werden die Transportaufgaben meist unabhängig voneinander abgearbeitet. Das Fördergut gelangt auf direktem Weg zur Senke. Außerdem sind Direktversorgungssysteme in der Lage schneller auf Layoutänderungen zu reagieren, da sie keiner, in der Planung festgelegten Routenvorgabe folgen müssen. Der Einsatz von Gabelstaplern ist für den Transport großer Fördergüter bei kleinen bis mittleren Transportaufkommen geeignet.¹³⁸

Laut MARTIN (2021), sowie GRIEMERT und RÖMISCH (2015) sind Stapler aus wirtschaftlichen Gründen nicht für die Raumüberbrückung großer Entfernungen geeignet. Laut einem Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Gabelstaplern und Routenzügen von MARTIN (2021) ist ab einer Distanz von 70 Metern der Routenzug wirtschaftlicher als der Gabelstapler, wenn keine beladene Rückfahrt durchgeführt wird. Wenn Doppelspiel, also eine beladene Hin- und Rückfahrt, durchgeführt wird, dann ist der Routenzug nach einer Distanz von 126,5 Metern wirtschaftlicher.¹³⁹ Nach GRIEMERT und RÖMISCH sollten die Fahrwege von Staplern aus wirtschaftlichen Gründen nicht 200 Meter überschreiten.¹⁴⁰ Bei größeren Distanzen und Fördermengen ist der Horizontaltransport mit Schleppzügen in Kombination mit Staplern zu empfehlen.

Durch die Einführung von FTS ändert sich der Vergleich zwischen Milkrun Direkt- und Routenzugversorgung. Der Automatisierungsgrad bei Routenzugsystemen ist jedoch derzeit noch gering. Die automatisierten Prozesse bei Routenzugsystemen begrenzen sich auf die Be- und Entladung. Die autonome Fahrt mit einem FTS bietet in den meisten Einsatzszenarien nicht die geforderte Flexibilität. Laut einer Studie von LIEB et al. (2017) wird nur 1% der Routenzugtouren automatisch durchgeführt. Um die Wirtschaftlichkeit bei der Automatisierung von Routenzügen zu erhöhen, wird eine umfangreich automatisierte Produktionsumgebung vorausgesetzt.¹⁴¹

FTS werden heutzutage vor allem für den Transport einzelner Behälter im Indoorbereich verwendet. Entscheidend sind dabei die zwei monetären Aspekte Investitionen und Personalkosten. Aufgrund von Personalmangel und den damit einhergehenden ansteigenden Personalkosten, wird der Einsatz von FTS jedoch immer attraktiver.¹⁴² Die

¹³⁸ Vgl. Klug, F., Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2018, 208ff.

¹³⁹ Vgl. Martin, H., Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, S. 268.

¹⁴⁰ Vgl. Griemert, R./Römis, P., Fördertechnik, 2015, S. 192.

¹⁴¹ Lieb, C. u. a., Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung, 2017, S. 12, 37f.

¹⁴² Vgl. Clauer, D./Fottner, J., Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände, 2019, S. 30f.

Komplexität der FTS bringt zwar höhere Wartungsaufwände mit sich, wodurch aber nur ein leichter Anstieg der variablen Kosten zu erwarten ist.¹⁴³ Im Vergleich zu Routenzugsystemen, wird für Gabelstaplersysteme deutlich mehr Personal benötigt. Die hohen Investitionen eines FTS relativieren sich mit den geringen Betriebskosten.¹⁴⁴ (vgl. Anhang 6)

¹⁴³ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 189.

¹⁴⁴ *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 188f.

4. Industrieller Wandel

Seit der Begriff Industrie 4.0 im Jahr 2011 im Rahmen der Hannover Messe Industrie Öffentlichkeit erlangte, hat er an Popularität in Presse und Literatur zugenommen.¹⁴⁵ Von einer industriellen Revolution ist die Rede, wenn bisherige Produktionsmethoden durch neue Technologien tiefgreifend und dauerhaft ersetzt werden.¹⁴⁶ Um die Unterschiede der vorherigen industriellen Revolutionen und den Kern der Industrie 4.0 deutlich zu machen, wird die erste, zweite und dritte industrielle Revolution kurz erläutert.

Die erste industrielle Revolution begann in der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts mit dem Übergang von Muskel- zu Maschinenkraft. Die Mechanisierung bewirkte den Einsatz von Maschinen und technischen Hilfsmitteln. Dampfmaschinen und mechanische Webstühle wurden erfunden und für ihre jeweiligen Zwecke angepasst. Am Ende des 19. Jahrhunderts setzte sich die flächendeckende Elektrifizierung von Städten durch. Die Elektrotechnik diente als Grundvoraussetzung für die zweite industrielle Revolution, die durch die Einführung des Fließbands und der Massenproduktion eingeläutet wurde. Fließbänder wurden 1870 erstmals zur Fleischverarbeitung in Cincinnati und anschließend auch in der Automobilindustrie verwendet. Durch die Fließfertigung wurde die arbeitsteilige Massenproduktion zu geringen Stückkosten ermöglicht.¹⁴⁷

Die nächste tiefgreifende Veränderung in der Fertigungstechnologie fand in den 1970er-Jahren statt. In der dritten industriellen Revolution, auch als digitale Revolution bezeichnet, nahm die Automatisierung und beginnende Digitalisierung Einzug in die Arbeitswelt. Durch Computer, Mikrochips und Programme wurden die betrieblichen und privaten Gegebenheiten grundlegend verändert. Computersysteme haben in dieser Phase weite Teile der Steuerung von Maschinen und Prozessen übernommen.¹⁴⁸ Mit der dritten industriellen Revolution wurden zudem auch FTS eingeführt.¹⁴⁹

Die vierte industrielle Revolution ist die erste, die bereits als Revolution bezeichnet wird, bevor sie vollständig umgesetzt wurde.¹⁵⁰ Durch das Internet steht heutzutage ein weltweit vernetztes Kommunikations- und Koordinationssystem zur Verfügung. Das Ziel der Industrie

¹⁴⁵ Vgl. *Steven, M.*, Industrie 4.0, 2018, S. 13.

¹⁴⁶ Vgl. *Bauer, W.* u. a., Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, 2014, S. 12.

¹⁴⁷ Vgl. *Steven, M.*, Industrie 4.0, 2018, S. 19f.

¹⁴⁸ Vgl. *Hofmann, J.*, Die digitale Fabrik, 2016, S. 3.

¹⁴⁹ Vgl. *Clauer, D./Fottner, J.*, Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände, 2019, S. 11.

¹⁵⁰ Vgl. *Steven, M.*, Industrie 4.0, 2018, S. 22.

4.0 ist die durchgehende und übergreifende Vernetzung der realen und digitalen Welt, auf Basis von cyberphysischen Systemen. Voraussetzung dafür ist die durchgängige Digitalisierung und Vernetzung aller Objekte und Prozessschritte, die an der Leistungserstellung beteiligt sind.¹⁵¹ Die 4 Stufen der industriellen Revolution sind in Abbildung 7 verdeutlicht.

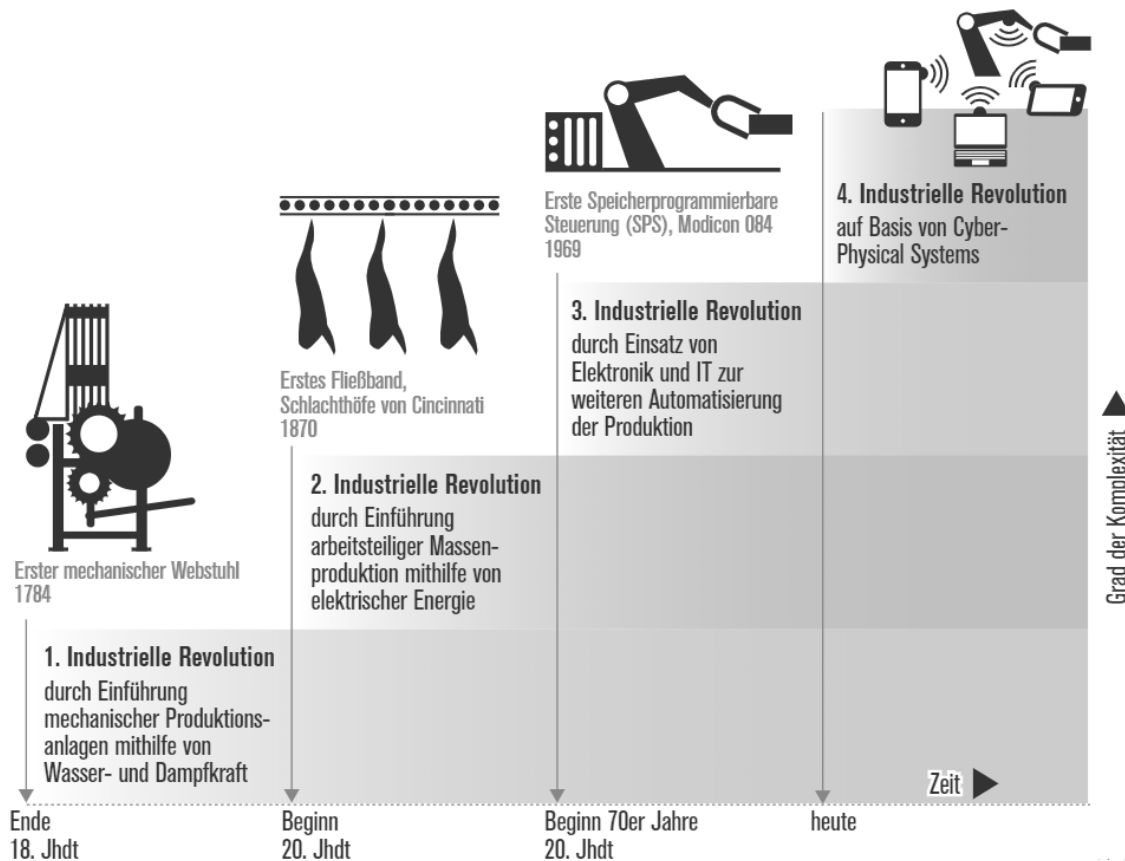


Abbildung 7 Die Stufen der Industriellen Revolution¹⁵²

Aufgrund des raschen technologischen Fortschritts und dem globalen Konkurrenzkampf werden vom Endverbraucher zunehmend höhere Qualitätsanforderungen, kürzere Lieferzeiten und eine wachsende Variantenvielfalt erwartet. Als Ergebnis führen verkürzte Produktlebenszyklen zu sich ständig ändernden Produktionsanforderungen. Um konkurrenzfähig zu bleiben, müssen produzierende Unternehmen mit ihren Zulieferern, potenziellen Kunden und anderen Geschäftspartnern entlang der Wertschöpfungskette gut vernetzt sein.¹⁵³

¹⁵¹ Vgl. Steven, M./DörseIn, J. N., Smart Factory, 2020, S. 9.

¹⁵² acatech, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, 2013, S. 17.

¹⁵³ Vgl. Hofmann, J., Die digitale Fabrik, 2016, S. 8f.

Als wichtigster Faktor für die Innovationswelle der Industrie 4.0 gilt das Internet der Dinge und das Internet der Dienste und Daten. Ausgangspunkt dieser sind eingebettete Systeme, hochleistungsfähige Kleinst-Computer ausgestattet mit Sensoren und Aktoren. Das System umfasst, speichert und verarbeitet Informationen aus seinem Umfeld und kann diese an andere Systeme kommunizieren. Somit wird ein Objekt zum intelligenten Objekt. Die reale und digitale Welt verschmelzen somit: Die eingebetteten Systeme werden durch das Internet und die Vernetzung der physischen Objekte zu cyberphysischen Systemen (CPS). Technologien wie Radio-Frequency Identification (RFID), der kontaktlose Datenaustausch zwischen Lese- und Schreibgerät, sowie Robotik und Smarte Sensorik ermöglichen CPS. Somit können Maschinen, Anlagen, Produkte und Bauteile selbständig miteinander kommunizieren, Daten und Informationen in Echtzeit austauschen, Aktionen anstoßen und sich gegenseitig steuern.¹⁵⁴

Durch die Implementierung des Internets der Dinge, Daten und Dienste in eine Fabrik kann das Produktionsumfeld zu einer intelligenten Umgebung verwandelt werden. Die Industrie 4.0 bietet nicht nur für Produktionsprozesse, sondern auch für Logistikprozesse viele neue Möglichkeiten.

4.1 Die Smarte Fabrik

Die Logistik unter Einfluss der Industrie 4.0 zeigt sich deutlich im Konzept der Smarten Fabrik (engl. intelligente Fabrik). Als Grundlage für die Smarte Fabrik gilt die digitale Fabrik. Dies bedeutet, dass alle Produktionsmittel über verschiedene Ebenen digitalisiert und automatisiert werden. Sämtliche Maschinen, Werkzeuge, Lagersysteme und Transportmittel sind in der Lage, über cyberphysische Systeme miteinander zu kommunizieren. Zudem werden Mitarbeiter:innen über Mensch-Maschine-Schnittstellen, die eine Interaktion und Zusammenarbeit mit Maschinen erleichtern, in die Kommunikation miteingebunden. Alle soeben erwähnten Instanzen können dadurch mit fertigungsrelevanten Informationen in Echtzeit versorgt werden. In der Zukunftsvision einer Smarten Fabrik sind Werkstücke bzw. Aufträge in der Lage, mit Hilfe von RFID-Chips und cyberphysischen Produktionssystemen sich selbst durch die Fertigung zu steuern. Dazu

¹⁵⁴ Vgl. *Bauernhansl, T.*, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, 2014, 603ff.

gehört auch das autonome Anfordern von benötigten Smarten Ladungsträgern und Fördermitteln.¹⁵⁵

Durch die Implementierung von CPS in Fertigungsanlagen und Transportsystemen entwickeln sich CPS zu wissensbasierten, autonom agierenden und flexibel gesteuerten cyberphysischen Produktionssystemen. Die Zusammenarbeit mehrerer räumlich verteilter cyberphysischen Produktionssysteme untereinander und mit den Mitarbeiter:innen führt schließlich zu einer Smarten Fabrik. Die Prozessabläufe können durch cyberphysische Produktionssysteme weitestgehend autonom, dezentral und echtzeitnah organisiert werden.¹⁵⁶

Die Rolle der Mitarbeiter:innen in Smarten Fabriken verändert sich. Wie sich bereits in der dritten industriellen Revolution abzeichnete, werden einfache Tätigkeiten von Maschinen übernommen. Im Zuge der Industrie 4.0 werden zudem zahlreiche Planungs-, Abstimmungs-, Überwachungs- und Kontrollaufgaben von autonomen cyberphysischen Produktionssystemen durchgeführt. Die verbleibenden Mitarbeiter:innen werden Aufgaben zugeteilt, für die eine persönliche Interaktion notwendig ist oder die Tätigkeit aufgrund ihrer Komplexität nicht digitalisiert werden kann. Es wird erwartet, dass daher vermehrt Mitarbeiter:innen benötigt werden, die über einen hohen Ausbildungsstand und spezielle Qualifikationen verfügen.¹⁵⁷

Lean Management in der Smarten Fabrik

In den 1990er Jahren wurde das Lean Management entwickelt. Lean Management bedeutet übersetzt „schlankes Management“ und umfasst Methoden und Verfahren zur effizienten Gestaltung der gesamten Wertschöpfungskette. Die 5 Grundprinzipien dieses Produktionsparadigmas lauten: Kundenwert, Wertstromorientierung, Flussprinzip, Pull-Prinzip und kontinuierliche Verbesserung. Es sind auch die Grundbausteine für die Produktions- und Logistikprozesse der digitalen und Smarten Fabrik. STEVEN et al. (2020) haben die fünf Grundprinzipien, sowie die Faktoren Transparenz und Reaktionsfähigkeit aus der Logistik 4.0-Perspektive betrachtet und deren Entwicklung analysiert:

¹⁵⁵ Vgl. Steven, M./Dörseln, J. N., Smart Factory, 2020, S. 10.

¹⁵⁶ Vgl. Steven, M., Industrie 4.0, 2018, S. 115f.

¹⁵⁷ Vgl. Steven, M., Industrie 4.0, 2018, S. 118.

- Der **Kundenwert** hat aufgrund der steigenden Produktvielfalt und der kundenindividuellen Produktion sowohl im Lean Management als auch in der Industrie 4.0 eine große Bedeutung.
- Die **Wertstromorientierung** strebt im Lean Management die vertikale und horizontale Integration, sowie die Identifikation und Vermeidung von Verschwendung an. Durch Smarte Objekte und die starke Vernetzung lässt sich die Wertstromorientierung besonders gut in die Prozesse der Smarten Fabrik einbringen.
- Das klassische **Flussprinzip**, bei dem Mitarbeiter:innen das Werkstück den Produktionsprozess über begleiten, wird in der Smarten Fabrik nicht mehr angewendet. Durch die Intelligenz der Objekte können Werkstücke selbstständig ihren Weg durch die Produktion steuern.
- Eine klare Veränderung liegt beim **Pull-Prinzip** vor. Im Lean Management wird die zentrale bedarfsorientierte Planung angestrebt. Der Ansatz der Industrie 4.0 verfolgt die dezentrale Planung.
- Das Streben nach einer **kontinuierlichen Verbesserung** ist gleichgeblieben. In der Smarten Fabrik wird jedoch nicht mehr auf die Aufmerksamkeit der Mitarbeiter:innen, sondern auf die Mithilfe von Sensoren cyberphysischer Systeme gesetzt.
- Digitale Abbilder und ausführliche Datenquellen in Form von eingebetteten Systemen ermöglichen eine hohe **Transparenz** über Materialien, Informationen und Prozesse.
- Die Vernetzung aller beteiligten Akteure und die damit einhergehende Interaktion bilden die Grundlage für eine hohe **Reaktionsfähigkeit**.¹⁵⁸

Das Lean Management und die Industrie 4.0 haben viele Gemeinsamkeiten in der Zielsetzung. Die Kombination beider Konzepte wird als Lean 4.0 bezeichnet. Das Produktionskonzept hilft dabei die Zukunftsvision der Smarten Fabrik in die richtigen Wege zu leiten.

Als Grundlage einer Smarten Fabrik kann die digitale Fabrik entweder vollständig neu geplant werden (genannt Greenfield) oder anhand einer bestehenden Struktur umgeplant werden (genannt Brownfield).¹⁵⁹ Das Fabriklayout der Zukunft wird als wandlungsfähig angestrebt. Dabei soll die Fabrikstruktur so gestaltet werden, dass bei Veränderungen in der Zielsetzung und der langfristigen Strategie des Unternehmens reagiert werden kann. Um auf Prozess- und Produktänderungen schnell reagieren zu können, muss das Gebäude

¹⁵⁸ Vgl. Steven, M./Dörsehn, J. N., Smart Factory, 2020, S. 174ff.

¹⁵⁹ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., Digitale Fabrik, 2018, S. 263.

auf wechselnde Bedingungen gut angepasst sein. Neben der Wandelbarkeit sollen Materialfluss- und Montageabläufe kollisionsfrei gestaltet werden.¹⁶⁰ Bei der Greenfield-Layoutplanung einer neuen Fabrik wird auf die räumlichen Anordnungen der Produktionsstationen geachtet, um im Optimalfall die kostenminimale Anordnung zu finden.¹⁶¹ In Abb. 8 ist die seit 2013 betriebene Schaufensterfabrik der Firma SEW Eurodrive zu sehen.¹⁶² Am Layout dieser Smarten Fabrik ist zu erkennen, dass die einzelnen Produktionsstationen am Materialfluss orientiert angeordnet sind. Beim Brownfield-Ansatz wird die Verbesserung von Teilprozessen angestrebt. Das kann beispielsweise eine Weiterentwicklung in Richtung Digitalisierung sein.¹⁶³

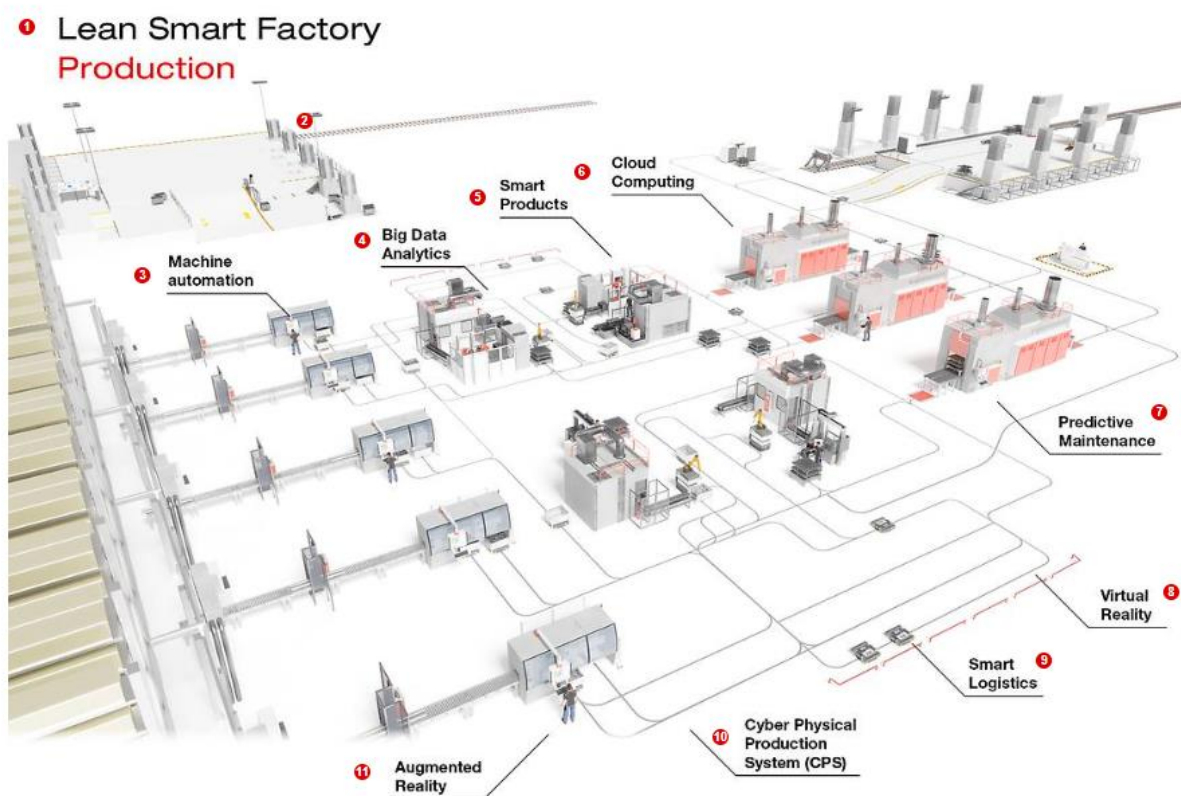


Abbildung 8 Lean Smart Factory in Graben-Neudorf, SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG¹⁶⁴

¹⁶⁰ Vgl. Bracht, U./Geckler, D./Wenzel, S., Digitale Fabrik, 2018, 32f.

¹⁶¹ Vgl. Arnold, D./Furmans, K., Materialfluss in Logistiksystemen, 2019, S. 307f.

¹⁶² Vgl. Steven, M., Industrie 4.0, 2018, S. 119.

¹⁶³ Vgl. Reinhart, G., Handbuch Industrie 4.0, 2017, S. 687.

¹⁶⁴ SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG, Lean Sm@rt Factory, 2022.

4.2 Auswirkungen der Smarten Fabrik auf die innerbetriebliche Logistik

Für die Logistik besteht ein großes Potential für die Anwendung von Industrie 4.0-Technologien. Die Logistik ist für die Sicherung der Materialverfügbarkeit verantwortlich und somit eine wesentliche Voraussetzung für einen reibungslosen Produktionsvorgang. Material- und Informationsflüsse müssen konsequent aufeinander abgestimmt werden, um sich der ansteigenden Komplexität und hohen Dynamik, die der vierte industrielle Wandel mit sich bringt, stellen zu können.¹⁶⁵

Im Zuge der Industrie 4.0 wird auch die Logistik den nächsten Entwicklungssprung, hin zur „Kognitiven Logistik“, vollziehen. Durch Kognitive Logistik können sich Unternehmen, auf Basis einer erhöhten Informationsverfügbarkeit, flexibel und schnell an ein wechselhaftes Umfeld anpassen und sind zudem durch „Maschinelles Lernen“ in der Lage, Systeme zu optimieren.¹⁶⁶

RFID-Systeme werden in der innerbetrieblichen Logistik bereits seit mehreren Jahrzehnten zur Dokumentation des Materialflusses verwendet. Während Barcodes lediglich Auskunft über die Artikelnummer geben, lassen sich RFID-Tags mit objektspezifischen Statusinformationen beschreiben. In der Industrie 4.0 werden RFID-Tags neben der Informationsspeicherung auch zur Ortung von FTF verwendet. Einzelne Fördermittel fusionieren zu einem vernetzten „Transportschwarm“, der Fahraufträge autonom durchführt und dabei eigenständig durch Produktions- und Lagerhallen navigiert.¹⁶⁷

Die Industrie 4.0 und die Smarte Fabrik bringen vielfältige Innovationen und Veränderungen mit sich, die auch im innerbetrieblichen Stückguttransport neue Möglichkeiten eröffnen. Es gilt daher zu betrachten, inwiefern sich die Entwicklung zur Smarten Fabrik bei der Entscheidungsfindung zwischen Routenzug- und Direktversorgungssystemen auswirkt.

¹⁶⁵ Vgl. Steven, M./DörseIn, J. N., Smart Factory, 2020, S. 239.

¹⁶⁶ Vgl. Bauernhansl, T., Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, 2014, S. 298.

¹⁶⁷ Vgl. Steven, M./DörseIn, J. N., Smart Factory, 2020, S. 240ff.

5. Einfluss der Smarten Fabrik auf die Entscheidung zwischen Routenzug- und Direktversorgungssystemen

Die Entscheidung zwischen Routenzug und Direktversorgung in der innerbetrieblichen Stückgutförderung muss, um zukunftsfähig zu sein, in Hinblick auf die Industrie 4.0 getroffen werden. Nach FOTTNER (2022) sind neben den Investitions- und Betriebskosten, auch die qualitativen Aspekte des Prozesses, der Steuerung und der Flexibilität für eine Grobbewertung der Transportsysteme entscheidend.¹⁶⁸

Prozess und Steuerung

Die Transportmittel beider Konzepte werden in einer Smarten Fabrik autonom mit einem FTS gesteuert. In Bezug auf FTS, steht der Begriff „Autonomie“ für Entscheidungs- und Handlungsfreiheit. Autonome FTF sind in der Lage, selbst eine Route und einen Fahrauftrag auszusuchen und auszuführen, wofür sie keine FTS-Leitsteuerung benötigen. Die einzelnen Individuen benötigen trotzdem Informationen anderer FTF im System, um die richtige Entscheidung treffen zu können. Heutzutage werden FTS noch zentral gesteuert, was bedeutet, dass die FTS-Leitsteuerung die zentralen Funktionen übernimmt, um die Aufgaben auf die Fahrzeuge zu verteilen. Die Steuerung von FTF in Smarten Fabriken wird in der Zukunft dezentral ausgeführt.¹⁶⁹

Mehrere dezentrale vernetzte FTF werden in der Literatur oftmals als „Schwarm“ bezeichnet. FTF-Schwärme werden seit einigen Jahren mit Phänomenen aus der Tierwelt in Verbindung gebracht.^{170 171 172} VOGEL-HEUSER et al. (2017) vergleichen die Schwarm-Intelligenz von FTF mit der Steuerungs- und Organisationsstruktur eines Ameisenstaates. Bei Ameisen verteilt sich die kollektive Intelligenz über die Gesamtheit der Gruppenmitglieder, man kann also sagen, dass das „Gehirn“ des Ameisenstaates dezentralisiert ist. Ameisen sind ständig wechselnden Änderungen ausgesetzt. Wenn sich

¹⁶⁸ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 143f.

¹⁶⁹ Vgl. Ullrich, G./Albrecht, T., Fahrerlose Transportsysteme, 2019, S. 235ff.

¹⁷⁰ Vgl. Vogel-Heuser, B./Bauernhansl, T./Hompel, M. ten, Handbuch Industrie 4.0 Bd.3, 2017, S. 63f.

¹⁷¹ Vgl. Ullrich, G./Albrecht, T., Fahrerlose Transportsysteme, 2019, S. 237.

¹⁷² Vgl. Bauernhansl, T., Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, 2014, S. 100,304,618.

größere Ressourcenquellen aufzutun, werden mehr Individuen benötigt als üblich. In derartigen Situationen kommunizieren Ameisen per Duftmarker oder Fühler mit ihren Artgenossen. In FTS erfolgt die Kommunikation und Informationsweitergabe bei auftretenden Herausforderungen, Situationen oder Aufgaben über cyberphysische Systeme.¹⁷³

Besonders die Direktversorgung profitiert von der Schwarmintelligenz. Dadurch, dass sich eine Vielzahl an FTF auf dem Werksgelände fortbewegen, entsteht eine große Datenmenge von Umgebungsinformationen. Mit Hilfe dieser Informationen können die Fahrzeuge als Kollektiv auf die Auftragslasten reagieren und ihre Routen so planen, dass Streckenblockaden vermieden werden können.

Durch Smarte Steuerungslogiken haben Routenzugsysteme bei der dynamischen Routenplanung und Tourenbildung neue Möglichkeiten. Die Entscheidung, wann und wie eine Route durchgeführt wird, kann anhand von aktuellen und prognostizierten Bedarfen, proaktiv und dynamisch getroffen werden. Zudem kann die Steuerung flexibel auf veränderte Randbedingungen, wie z.B. neu implementierte Bereitstellungsorte, reagieren. Außerdem können eigenständig intelligente Bereitstellungsorte Bedarfs- und Bestandsdaten digital erfassen, wodurch frühzeitig Bereitstellungsort umfahren werden können, die keinen Transportbedarf aufweisen.¹⁷⁴ Der Echtzeitinformationsaustausch zwischen den einzelnen Fahrzeugen ermöglicht auch dem Routenzug Streckenblockaden zu umfahren.

Investitions- und Betriebskosten

Bei FTS werden die Transporte nicht mehr manuell, sondern automatisch gesteuert. Folglich sinken die Betriebskosten durch den Entfall der Personalkosten.¹⁷⁵ In der Smarten Fabrik wird der Schlepper vom FTS-Schlepper und der Gabelstapler vom FTF ersetzt. Der sinkende Anteil an Betriebskosten führt zu einer höheren Gewichtung der Investitionskosten.

¹⁷³ Vgl. *Vogel-Heuser, B./Bauernhansl, T./Hompel, M.* ten, Handbuch Industrie 4.0 Bd.3, 2017, S. 56.

¹⁷⁴ Vgl. *Lieb, C. u. a.*, Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung, 2017, S. 89,92f.

¹⁷⁵ Vgl. *Martini, A./Stache, U.*, Automatisierung von Routenzugsystemen, S. 2, 9ff.

In einer autonom gesteuerten Fabrik werden Routenzüge an den Bereitstellungsorten auch autonom entladen. Dafür muss in entsprechende automatisierte Be- und Entladungstechnologien oder in automatisierte Anhänger investiert werden. Falls automatisierte Anhänger benötigt werden, hängen die Investitionskosten eines Routenzugsystems zum Großteil von der Gesamtanzahl der Anhänger ab.¹⁷⁶ Direktversorgende FTF benötigen meistens keine Be- und Entladetechnologien, da die FTF mit LAM, wie z.B. Hubvorrichtungen, ausgestattet sind (vgl. 3.4).

Um die zwei Transportkonzepte mit automatisierten FTS vergleichen zu können, nimmt LIEB an, dass die Investitionskosten von n FTF, der Investition von einem Routenzug mit n Anhängern entsprechen. Demnach müssen n parallele Direkttransporte für einen Routenzug mit n Anhängern getätigt werden. LIEB (2021) stellt dabei fest, dass die automatisierte Direktversorgung per FTF effizienter als automatisierte Routenzugsysteme ist.¹⁷⁷ Dabei ist jedoch zu beachten, dass in Direktversorgungssystemen jedes einzelne FTF eine autonome Selbststeuerung installiert hat. Bei Routenzugsystemen ist ausschließlich der Schlepper mit dieser Steuerung ausgestattet, da die Anhänger an die Steuerung des Schleppers gebunden sind.¹⁷⁸ Außerdem muss die Installation von Ladestationen und Bereitstellungsorten in den fallspezifischen Investitionsumfang einkalkuliert werden.

Durch die Entwicklung zur Smarten Fabrik wechselt der Fokus von den variablen auf die fixen Kosten. Das entfallende Steuerungspersonal hat vor allem auf Direktversorgungssysteme einen großen Einfluss. Aufgrund weiterer Investitionen, wie Ladestationen, Bereitstellungsorte oder ggf. Anhänger, muss die ganzheitliche wirtschaftliche Bewertung der Materialversorgungskonzepte projektbezogen durchgeführt werden.

Flexibilität

Die Flexibilität bei der innerbetrieblichen Stückgutförderung spielt in einer wandlungsfähigen Fabrik mit vielen Produkt und Produktionsveränderungen eine wichtige Rolle. Routenzüge haben den Vorteil, dass sie ihren Anhängertyp frei wählen können und dadurch in der Lage sind, verschiedene Ladungsträger in Kombination zu transportieren. FTF sind je nach LAM

¹⁷⁶ Vgl. Lieb, C., Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme, 2021, S. 229.

¹⁷⁷ Vgl. Lieb, C., Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme, 2021, S. 229.

¹⁷⁸ Vgl. Ullrich, G./Albrecht, T., Fahrerlose Transportsysteme, 2019, S. 78.

auf einen Ladungsträger spezialisiert. Um unterschiedliche Ladungsträger mit einem FTF transportieren zu können, werden zusätzliche Handhabungsschritte benötigt.

Hinsichtlich Erweiterungen der Produktion und Veränderungen der Quellen oder Senken, sind beide Transportkonzepte aufgrund ihrer dynamischen Routenplanung flexibel. Bei Bedarf können zusätzliche Fördermittel in den Fahrzeugpool integriert werden.¹⁷⁹

In einer von LIEB (2017) durchgeführten Umfrage zum zukünftigen Einsatz von Routenzugsystemen wurde die Wahrscheinlichkeit, dass Routenzugsysteme in Zukunft durch kleine Transportmittel ersetzt werden, von 31% der Befragten als hoch bzw. sehr hoch eingeschätzt. Aus der Umfrage ist außerdem zu entnehmen, dass vor allem bei Großladungsträgertransporten, der Wechsel zu einzelnen FTF erwartet wird.¹⁸⁰

¹⁷⁹ Vgl. *Fottner, J. u. a.*, Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 163, 196.

¹⁸⁰ Vgl. *Lieb, C. u. a.*, Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung, 2017, S. 83f.

6. Fallbeispiel

6.1 Konzeptvergleich in der innerbetrieblicher Stückgutförderung

Die Entscheidungsprozess zwischen der Routenzug- und Direktversorgung soll anhand eines fiktiven Fallbeispiels veranschaulicht werden. In diesem Fallbeispiel wird ein manuell gesteuerter Routenzug mit einem direktversorgenden FTF für den Transport von Großladungsträgern verglichen. Zuerst werden hierfür die Prozessanforderungen grob beschrieben, um dann die Prozessabläufe zu schildern. Danach wird die Anwendung der zwei Materialversorgungskonzepte monetär und qualitativ bewertet. Das Ergebnis der Fallstudie wird abschließend unter den Gegebenheiten der Smarten Fabrik beleuchtet.

Die Flurförderfahrzeuge haben die Aufgabe, Paletten zwischen dem Warenlager (Quelle), den Bereitstellungorten A bis E und der Leergutabgabe (Senke) zu transportieren. Von den Fördermitteln müssen sieben verschiedene Transportauftragstypen mit einem Transportbedarf von insgesamt 160 Paletten durchgeführt werden. (Vgl. Tab. 2) Ein Arbeitstag dauert 8 Stunden, wobei die Nettoarbeitszeit der Mitarbeiter:innen 7,5 Stunden beträgt. Das Produktionslayout des Betriebes ist in Abbildung 9 dargestellt.

Beide Fördermittel sind mit einem Elektromotor ausgestattet. Aufgrund des Personenverkehrs im Produktionsbereich dürfen FTF nur 1m/s fahren, was der Gehgeschwindigkeit der Mitarbeiter:innen entspricht.¹⁸¹ Elektroschlepper sind in der Lage bis zu 2,78 m/s schnell zu fahren, müssen ihr Tempo jedoch in Kurven und an Kreuzungen reduzieren.¹⁸² Im Umfang dieser Fallstudie wird für Routenzüge von einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1,67 m/s ausgegangen.

Der Routenzug fährt die einzelnen Stationen in einer fest vorgegebenen Reihenfolge ab: Warenlager-A-B-C-Leergutabgabe-D-E-Warenlager. (vgl. Anhang 7) An allen fünf Bereitstellungorten erfolgt die Entladung von Paletten durch den Routenzug, sofern er Paletten für den entsprechenden Ort mitführt. Bei Bedarf lädt der Routenzug am Bereitstellungsort B eine Palette auf, die am Bereitstellungsort D wieder entladen wird. Am

¹⁸¹ Vgl. Ullrich, G./Albrecht, T., Fahrerlose Transportsysteme, 2019, S. 117.

¹⁸² Vgl. Griemert, R./Römisch, P., Fördertechnik, 2015, S. 189f.

Bereitstellungort C wird gegebenenfalls eine Leergutpalette aufgeladen, welche anschließend an der Leergutabgabe entladen wird.

Die FTF fahren alle Transportstrecken einzeln auf direktem Weg an. Im Normalfall kehrt das FTF nach Erfüllung der Transportaufgabe zum Warenlager zurück. Falls anschließend an den Transport-Nr.2 oder Nr. 3 eine Palette für einen anderen Bereitstellungsart abholbereit ist, wird direkt danach der Transport-Nr. 6 bzw. 7 durchgeführt. Es wird angenommen, dass dieses Ereignis in 50% der Fälle eintritt. Wenn das Ereignis nicht Eintritt, fährt das FTF zum Warenlager zurück. Die Transportaufträge erhält jedes FTF über ein FTS-Leitsystem.

Tabelle 2 Täglicher Transportbedarf

Transport-Nr.	Start	Ziel	Paletten/Tag
1	Warenlager	A	15
2	Warenlager	B	10
3	Warenlager	C	20
4	Warenlager	D	45
5	Warenlager	E	5
6	B	D	35
7	C	Leergutannahme	30
Gesamt:			160

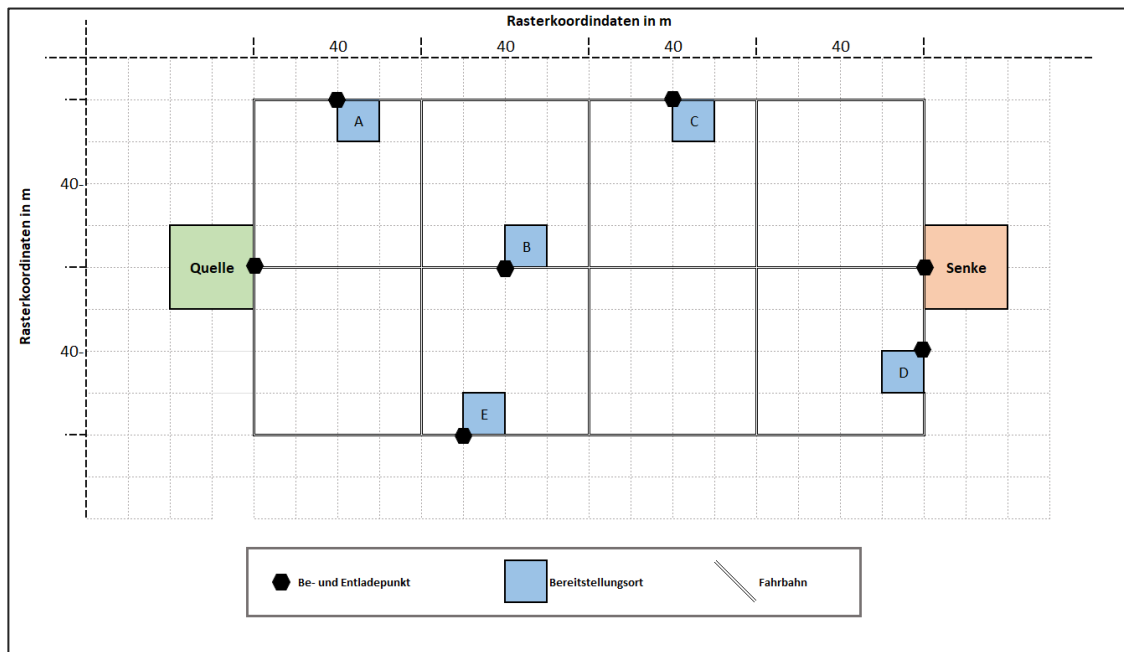


Abbildung 9 Eigene Darstellung

Übersichtshalber wurden die Berechnungen der verschiedenen Planungsvarianten in den Anhang 8 und 9 verschoben. Für das Routenzugsystem wird die Zykluszeit, Taktzeit, die Anzahl an Routen und das Transportvolumen nach DURCHHOLZ et al. (2013) berechnet.¹⁸³ Die Berechnungen für die Direktversorgung per FTF basieren auf einer Quellen-Senken-Matrix nach LIENERT (2021) und ULLRICH et al. (2019).¹⁸⁴ ¹⁸⁵ Es wird angenommen, dass die Prozesszeit für das Beladen des Routenzuges im Warenlager 1 min pro Palette beträgt und die Prozesszeit für die Handhabung an den Bereitstellungsstellen 2 Minuten beträgt.¹⁸⁶ FTF benötigen 20 Sekunden für die Lastauf- oder Lastabgabe.¹⁸⁷ Nachladezeiten der batteriebetriebenen Fördermittel wurden bei beiden Fördermitteln vernachlässigt.

Das Ergebnis der Berechnungen zeigt, dass bei der Routenzugversorgung täglich 30 Touren von zwei Routenzügen mit jeweils 6 Anhängern durchgeführt werden müssen, um die Materialbedarfe decken zu können. Die Routenzugtouren müssen von Mitarbeiter:innen gesteuert werden. Bei der Direktversorgung müssen täglich 320 Voll- und Leertransporte

¹⁸³ Vgl. Durchholz, J./Boppert, J., Schlanke Logistikprozesse, 2013, S. 119–125.

¹⁸⁴ Vgl. Lienert, T., Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme, 2021, S.52ff.

¹⁸⁵ Vgl. Ullrich, G./Albrecht, T., Fahrerlose Transportsysteme, 2019, S.257f.

¹⁸⁶ Vgl. Durchholz, J./Boppert, J., Schlanke Logistikprozesse, 2013, S. 127.

¹⁸⁷ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 177.

durchgeführt werden, um den Transportbedarf zu decken. Für die Durchführung der Transporte werden 4 FTF benötigt.

Bewertung

Bei der monetären Bewertung werden die Investitions- und Betriebskosten der Planungsvarianten verglichen.¹⁸⁸ Die Investitions- und Betriebskosten sind im Tabelle 3 aufgelistet. Die Herleitung der Systemkosten wurde durch Herstellerdaten und Umfragen von MARTINI et al. (2014) und FOTTNER et al. (2022) durchgeführt. Die detaillierte Gesamtkostenbetrachtung ist im Anhang 10 dargestellt.

Die Investitionskosten des FTS sind deutlich höher als die des manuellen Routenzugsystems. Grund für die geringen Betriebskosten des FTS ist der Personalkostenentfall. Jedoch muss für das FTS eine Person das FTS-Leitsystem steuern. Die Steuerung des Leitsystems erfordert ein höheres Qualifikationsniveau als das des Fahrers eines Routenzuges und ist somit mit höheren Personalkosten verbunden. Die Personaleinsparungen beim FTS werden zudem durch die hohen jährlichen Wartungskosten gedämpft. Das FTS rentiert sich wirtschaftlich im Verhältnis zum Routenzugsystem erst nach 7,5 Jahren, was ein stark erhöhtes Risiko hinsichtlich der Kapitalrückgewinnung bedeutet. Aus Sicht der monetären Bewertung sollte sich das Unternehmen daher für das Routenzugsystem entscheiden. Um die Entscheidung jedoch ganzheitlich treffen zu können ist zusätzlich eine qualitative Bewertung mit Hilfe der Nutzwertanalyse notwendig.

Tabelle 3 Investitions- und Betriebskosten der Materialversorgungssysteme

	Manuelles Routenzugsystem	Automatisiertes FTS-Direktversorgungssystem
Investitionskosten	109.000€	273.000€
Betriebskosten	102.966 €/Jahr	81.173 €/Jahr
Amortisationsdauer (Abschreibung vernachlässigt)		7,5 Jahre

¹⁸⁸ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 186.

Dazu werden vorerst die Bewertungskriterien aufgestellt und gewichtet. Im Umfang der Nutzwertanalyse werden die Kriterien *Flexibilität des Transportguts*, *Prozesskomplexität*, *Erweiterbarkeit* und *Unfallgefahr* bewertet. Die Flexibilität des Transportguts gibt an, wie gut das Transportmittel auf den Wechsel von Ladungsträgern reagiert. Die Prozesskomplexität gibt die Verständlichkeit und Transparenz des Transportprozesses an. Die Erweiterbarkeit des Fördersystems ist die Flexibilität hinsichtlich Positionsänderungen von Quellen oder Senken oder einer Erweiterung der Produktionskapazitäten. Die Unfallgefahr, die das Fördermittel für Personen und andere Verkehrsteilnehmer darstellt, ist aus sicherheitstechnischer und auch aus wirtschaftlicher Sicht von Bedeutung.

Die Bestimmung des Bewertungsgewichts der Kriterien wird mit Hilfe des paarweisen Vergleiches festgelegt.¹⁸⁹ Die Vorgehensweise der Gewichtung ist dem Anhang 11 zu entnehmen. Die Prozesskomplexität und die Erweiterbarkeit werden demnach am höchsten gewichtet. Um die soeben genannten Kriterien bewerten zu können, wird eine Bewertungsskala von 0 bis 10 gewählt. Die Bewertungszahl „10“ ist die beste und die Bewertungszahl „0“ ist die schlechteste. Die Bewertungswerte der einzelnen Kriterien sind in folgenden tabellarisch mit einer kurzen Begründung aufgelistet. Das gewichtete Ergebnis ist in Abbildung 10 zu sehen.

¹⁸⁹ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022.

	Routenzug	FTS
Flexibilität des Transportguts	Falls das Transportsystem zu einem reinen KLT oder gemischten Transport wechseln sollte, können sich Routenzüge aufgrund der flexiblen Anhängerwahl gut anpassen. Es müssen gegebenenfalls neue Anhänger angeschafft werden. Bewertung: 9	Das FTF besitzt eine Ladeplattform, die auf GLT spezialisiert ist. Um das Fördermittel an einen KLT-Transport anpassen zu können muss das LAM ersetzt werden. Neue Ladungsträger müssen in das FTS-Leitsystem integriert werden. Bewertung: 6
Prozesskomplexität	Dieser Routenzugprozess ist aufgrund der geringen Fahrzeuganzahl und der festgelegten Route transparent gestaltet. Der Routenzug benötigt kein Leitsystem, um den Transportprozess ausführen zu können. Aufgrund der fehlenden Digitalisierung können Schwachstellen unentdeckt bleiben. Bewertung: 9	Der grobe Prozess ist für die Mitarbeiter:innen in der Produktion leicht zu verstehen. Transporte von einem Bereitstellungsort zum anderen können jedoch organisatorische Schwierigkeiten für den Leitstand mit sich bringen. Um den Fehler beheben zu können, muss ein entsprechendes Fachwissen bei den Mitarbeiter:innen angelernt werden. Bewertung:8
Erweiterbarkeit	Wenn sich die Position der Bereitstellungsorte verändert, kann das zur Folge haben, dass sich die Streckenführung für einen Milkrun nicht mehr eignet. Mit zusätzlichen Routenzügen oder Anhängern kann auf eine steigende Anzahl an Transportaufträgen reagiert werden. Mehr als sechs Anhänger sollten jedoch nicht vom Schlepper gezogen werden. Bewertung: 7	Weitere Fahrzeuge sollten in der Regel von gleichem Hersteller bezogen werden, um eine Kompatibilität mit der Leitsteuerung zu gewährleisten. Das Implementieren von neuen FTF ist grundsätzlich problemlos. Auf Layoutänderungen kann das fahrerlose Direktversorgungssystem schnell reagieren. Bewertung:10
Unfallgefahr	Nur zwei Fördermittel fahren in der Produktion. Das beruhigt den Werksverkehr und verringert die Unfallgefahr. Die Umfahrung einer Kurve mit einem Routenzug der sechs Anhängern zieht ist allerdings mit einem gewissen Risiko verbunden. Bewertung:8	FTF fahren in der Gehgeschwindigkeit der Mitarbeiter:innen. Dadurch ist die Unfallgefahr als gering einzuschätzen. Lediglich Fehler in der Sensorik können einen Zusammenstoß verursachen. Bewertung: 10

In der qualitativen Bewertung liegt das FTS vor dem Routenzugsystem. Vor allem bei der Erweiterbarkeit zeigen sich die Nachteile vom Routenzugsystem. Das Produktionslayout in diesem Fallbeispiel eignet sich sehr gut für eine Routenzugversorgung. Wenn jedoch beispielsweise ein Bereitstellungsort aufgrund neuer Produktionsanlagen umpositioniert werden würde, müsste der Routenzug bei jeder Route einen Umweg fahren. Die führt möglicherweise zu Effizienzverlusten bei der Routenzugversorgung.

Kriterien	Gewichtung	Routenzugsystem		FTS	
		Bewertungszahl	gew. Bewertungszahl	Bewertungszahl	gew. Bewertungszahl
1 Flexibilität des Transportguts	1	9	9	6	6
2 Prozesskomplexität	5	9	45	8	40
3 Erweiterbarkeit	4	7	28	10	40
4 Unfallgefahr	2	8	16	10	20
max Punktzahl: 120		98		106	

Abbildung 10 Gewichtete Bewertungsergebnisse

Die monetäre Bewertung spricht eindeutig für den Routenzug. Das Routenzugsystem hat deutlich geringere Investitionskosten und lediglich etwas höhere Betriebskosten. Bei der qualitativen Bewertung ist das FTS etwas besser bewertet, jedoch schneiden beide Planungsvarianten gut ab. Das Unternehmen sollte sich in diesem Fallbeispiel für das Routenzugsystem entscheiden.

6.2 Betrachtung des Fallbeispiels im Hinblick auf Smarte Fabriken

Im Hinblick auf die Entwicklungen der Industrie 4.0 werden Fabriken immer mehr automatisiert. Um diese Tendenz einzurechnen, wird im Folgenden die Annahme getroffen, dass die im Fallbeispiel beschriebene Produktion autonom gesteuert wird. Die FTF werden dementsprechend nicht mehr mit einer Leitsteuerung, sondern dezentral gesteuert. Das manuelle Routenzugsystem wird durch dezentral gesteuerte FTS-Schlepper ersetzt.

Durch die Autonomisierung des Milkruns müssen die fünf Bereitstellungsorte und die Anhänger der Routenzüge vollautomatisiert werden. Die hohen Investitionskosten können ein entscheidender Faktor im Wirtschaftlichkeitsvergleich sein. Die Betriebskosten würden jedoch sinken, da weder Fahrer:innen noch ein zentraler Leitstand benötigt wird. Dadurch, dass der FTS-Schlepper sich in einem digital vernetzten Umfeld befindet, ist eine dynamische Routenplanung möglich. Diese Planungssteuerung ist jedoch vor allem bei vielen Bereitstellungsorten und großen Entfernungen zwischen den Haltestellen sinnvoll. Außerdem kann es bei kleinen Rundkursen zu gegenseitigen Behinderungen der Routenzüge kommen.¹⁹⁰ Im Fallbeispiel könnte eine dynamische Routenplanung auch negative Auswirkungen mit sich bringen, da viele Transportstrecken über zentrale Kreuzungen führen. Die dynamische Routenbildung könnte zu Staubildungen führen, wobei die Routenzüge sich gegenseitig im Weg stehen. Durch die Vernetzung der Fördermittel mit cyberphysischen Systemen könnte jedoch derartige Blockaden oder Behinderungen im Vorhinein vermieden werden. Die Folge davon kann allerdings eine ineffizientere Routenplanung sein.

Die FTF sind im autonomen Umfeld nicht mehr an die zentrale Leitsteuerung gebunden, folglich entfällt auch der Steuerungsleitstand. Der Investitionsschwerpunkt liegt demnach vor allem auf den einzelnen FTF und deren Steuerungssoftware. Durch den Echtzeitaustausch zwischen den einzelnen Fördermitteln können mehrere Transporte hintereinander ausgeführt werden. Das heißt, nachdem ein FTF einen Transportauftrag abgeschlossen hat, fährt es nicht direkt zu seiner Ausgangsposition, im Fallbeispiel das Warenlager, zurück. Das FTF sucht sich frühzeitig einen Transportauftrag in der Nähe der Senke, der im Anschluss ausgeführt werden kann.

¹⁹⁰ Vgl. Lieb, C., Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme, 2021, S. 215f.

Aufgrund der zusätzlich benötigten Infrastruktur ist der Einsatz des FTS-Schleppers mit einem hohen Investitionsaufwand verbunden. Da die dynamische Routenplanung vor allem für große Produktionsflächen geeignet ist, bringen die Fortschritte der Industrie 4.0 in diesem Fallbeispiel für Routenzugsysteme wenig Mehrwert. Im Gegensatz zu Routenzügen können die FTF in diesem konkreten Fall von der digitalen Vernetzung stärker profitieren. Der Echtzeitaustausch sollte dabei die Leerfahrten reduzieren. Zudem können Direktversorger auf Layoutänderungen und veränderte Bereitstellungsorte schneller und vor allem kostengünstiger reagieren. Um die Produktionsver- und -entsorgung hinsichtlich der Smarten Fabrik auszurichten, sollte das Unternehmen ein Direktversorgungssystem wählen.

7. Zusammenfassung und Fazit

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung der innerbetrieblichen Stückgutförderung im Zuge des industriellen Wandels. Nach der Erläuterung der theoretischen Grundlagen wurde die innerbetriebliche Stückgutförderung dargestellt. Die hier näher betrachteten Fördersysteme Stapler-, Routenzug- und fahrerlose Transportsystem wurden anhand der Grundelemente Fördermittel, Fördergut, Verkehrsnetz, Förderprozess und Steuerung genauer beschrieben und wurden anschließend miteinander verglichen. Der Schwerpunkt wurde im Vergleich auf die verschiedenen Materialversorgungskonzepte gelegt.

Im Literatur Vergleich haben sich Vorteile von Routenzügen, wie Personaleinsparung, hohe Ladekapazität, Bündelung von Transportaufträgen und die hohe Flexibilität bei unterschiedlichen Ladungsträgern, gezeigt. Als wesentlichen Vorteile von Staplern wurden die Flexibilität bei Layoutänderungen, der schnelle Transport auf dem direkten Weg und die Eignung für große Fördergüter demonstriert. Anhand bestehender Forschung wurde als entscheidender Faktor bei der Wahl des Materialversorgungskonzeptes die Distanz zwischen der Quelle und Senke ausgemacht. Zudem wurden die beiden Fördersysteme Gabelstapler und Routenzug bezüglich der Anwendbarkeit von FTS betrachtet. Der Automatisierungsgrad von Routenzügen ist zum jetzigen Zeitpunkt im Vergleich zu Gabelstaplern geringer. Als Grund für den Wandel von Staplern zu FTF wurden, trotz der vermeintlich hohen Investitionskosten, die hohen Betriebskosten von Staplern genannt.

Im Hinblick auf den Trend zur Smarten Fabrik haben sich vor allem drei entscheidende Entwicklungen für die innerbetriebliche Stückgutförderung als relevant herausgestellt. CPS-Systeme ermöglichen eine starke Vernetzung zwischen den einzelnen Individuen und lassen die Fördermittel, Produkte und Maschinen miteinander kommunizieren. Dadurch können Informationen gewonnen werden, die zur Auftragsverarbeitung und Steuerung dienen. Dies zweite entscheidende Entwicklung ist die Echtzeitübertragung von Daten, welche die dynamische Routenbildung unterstützt. Wenn aktuelle Informationen über Blockaden oder Staubildungen an Routenzüge oder FTF übertragen werden, können diese die effizienteste Route planen. Ein weiterer wichtiger Faktor sind die Investitionsaufwände. Mit dem steigenden Grad an Automatisierung und Autonomisierung in smarten Fabriken, steigen auch die technischen Voraussetzungen an die Fördermittel, die Produktionsumgebung und an die Schnittstellen zwischen der innerbetrieblichen

Stückgutförderung und den vor- beziehungsweise nachlaufenden Prozessen. In Bezug hierauf wurden die hohen Investitionskosten für die Automatisierung von Bereitstellungsstellen und Anhängern bei Routenzugsystemen thematisiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Fallbeispiel durchgeführt, bei dem der Entscheidungsprozess zwischen einer Routenzugversorgung und einer fahrerlosen Direktversorgung anhand von Beispielwerten aufgezeigt werden sollte. Dabei wurden die heutigen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen berücksichtigt und die Vor- und Nachteile bewertet. Anschließend wurde ein Ausblick auf die zu erwartenden Entwicklungen der fallspezifischen Produktionslandschaft gegeben, insbesondere im Hinblick auf die Smarte Fabrik.

Ein Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, welche Auswirkungen die Anforderungen der smarten Fabrik auf die Entscheidung zwischen Routenzug- und Direktversorgung haben. Dabei wurden insbesondere die Autonomie und Vernetzung als entscheidende Faktoren für die Stückgutförderung betrachtet. Es zeigte sich, dass sowohl die Direkt- als auch die Routenzugversorgung von den neuen Technologien profitieren können. Dennoch ist die Entscheidungsfindung weiterhin stark fallspezifisch und kann nicht pauschalisiert werden. So werden Routenzüge tendenziell bei gebündelten Transporten über weitere Distanzen ihre Effizienzvorteile ausspielen können. Es ist jedoch zu erwarten, dass direktversorgende fahrerlose Transportsysteme im Hinblick auf die Smarte Fabrik eine größere Rolle spielen werden. Insbesondere bei mittleren Transportdistanzen könnten sie Routenzüge zukünftig ablösen. Es ist somit wichtig, bei der Entscheidungsfindung nicht nur die aktuellen Bedingungen, sondern auch die zu erwartenden Entwicklungen der Produktionslandschaft zu berücksichtigen.

Es wird deutlich gemacht, dass die Wahl des geeigneten Materialversorgungskonzepts von einer Vielzahl von Faktoren abhängt. Die innerbetriebliche Logistik ist mittlerweile eng in die Produktionsprozesse integriert und muss daher immer auf die spezifischen Bedürfnisse und Anforderungen des jeweiligen Unternehmens oder der Produktion abgestimmt werden. Es ist wichtig zu betonen, dass die theoretische Betrachtung der Entwicklung in dieser Arbeit an gewisse Grenzen stößt. Die tatsächliche Umsetzung und Anwendung von innerbetrieblichen Fördersystemen ist komplexer als es zuerst scheinen mag und die Vielzahl der festgestellten Einflussfaktoren kann zu einer großen Variationsbreite möglicher Entscheidungsergebnisse führen. Dennoch können die in dieser Arbeit dargestellten theoretischen Grundlagen und Fallbeispiele als Orientierungspunkte für die Wahl des

geeigneten Materialversorgungskonzepts dienen und einen wertvollen Beitrag zur Entscheidungsfindung leisten. Letztendlich hängt die erfolgreiche Umsetzung jedoch immer von einer sorgfältigen Analyse der individuellen Bedürfnisse und Anforderungen ab.

8.Literaturverzeichnis

- acatech* [Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0, 2013]: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, 2013
- Arnold, Dieter/Furmans, Kai* [Materialfluss in Logistiksystemen, 2019]: Materialfluss in Logistiksystemen, 7. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019
- Arbeitsstättenrichtlinie: ASR A1.8 Verkehrswege [Arbeitsstättenrichtlinie, 2022] 2022
- Bauer, Wilhelm* u. a. [Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland, 2014]: Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland: Studie, 2014
- Bauernhansl, Thomas* (Hrsg.) [Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, 2014]: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- Bracht, Uwe/Geckler, Dieter/Wenzel, Sigrid* [Digitale Fabrik, 2018]: Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Clauer, Dana/Fottnner, Johannes* [Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände, 2019]: Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände: Aktueller Umsetzungsstand und Handlungsbedarf, Garching b. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (fml) TU München, 2019
- Statistik - Arbeitsunfallgeschehen 2021 [Statistik - Arbeitsunfallgeschehen 2021, 2022] 2022
- Dombrowski, Uwe/Krenkel, Philipp* (Hrsg.) [Ganzheitliches Produktionsmanagement, 2021]: Ganzheitliches Produktionsmanagement: Strategischer Rahmen und operative Umsetzung, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021
- Durchholz, Janina/Boppert, Julia* [Schlanke Logistikprozesse, 2013]: Schlanke Logistikprozesse: Handbuch für den Planer, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013
- ElMaraghy, Hoda A.* [Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, 2011]: Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, Dordrecht: Springer, 2011, <http://gbv.ebilib.com/patron/FullRecord.aspx?p=885299>
- Fottnner, Johannes* u. a. [Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022]: Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen: Fahrzeugsysteme, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2022, <http://www.springer.com/>
- Göpfert, Ingrid* (Hrsg.) [Logistik der Zukunft - logistics for the future, 2022]: Logistik der Zukunft - logistics for the future, 9., aktualisierte und erweiterte Auflage, Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler, 2022
- Griemert, Rudolf/Römisch, Peter* [Fördertechnik, 2015]: Fördertechnik: Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen, 11., überarb. u. erw. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- Günthner, Willibald A.* (Hrsg.) [Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport, 2012]: Stand und Entwicklung von Routenzugsystemen für den innerbetrieblichen Materialtransport: Ergebnisse einer Studie, Garching b. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (fml) TU München, 2012
- Günthner, Willibald A./Keuntje, Christopher* [IntegRoute - Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung, 2016]: IntegRoute - Ganzheitliche Konzeptauswahl für Routenzugsysteme zur Produktionsversorgung: Integrierte Bewertung von Prozess und Technik : Forschungsbericht zu dem IGF-Vorhaben der Forschungsstelle Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Technische Universität München, 2016
- Hofmann, Johann* [Die digitale Fabrik, 2016]: Die digitale Fabrik: Auf dem Weg zur digitalen Produktion Industrie 4.0, 1. Auflage, Berlin, Offenbach, Berlin: VDE Verlag; Beuth Verlag GmbH; VDE Verlag GmbH, 2016, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=4772728>
- Hohmann, Susanne* [Logistik- und Supply Chain Management, 2022]: Logistik- und Supply Chain Management: Grundlagen, Theorien und quantitative Aufgaben, Wiesbaden: Springer Gabler, 2022
- Hompel, Michael* ten [Materialflusssysteme, 2018]: Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik, 4. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Ihme, Joachim* [Logistik im Automobilbau, 2006]: Logistik im Automobilbau: Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau ; mit Tabellen, München: Hanser, 2006

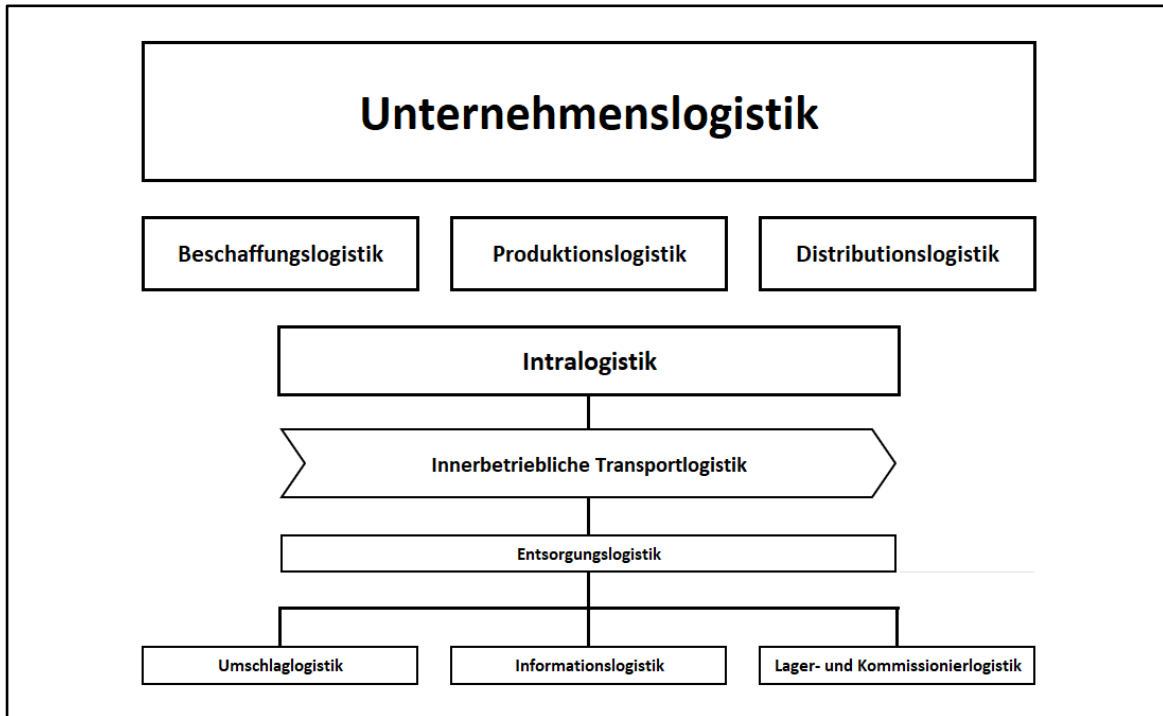
- Jünemann, Reinhardt* [Materialfluß und Logistik, 1989]: Materialfluß und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen, Berlin: Springer-Verl., 1989
- Klug, Florian* [Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2010]: Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau, Heidelberg, Berlin: Springer, 2010
- [Logistikmanagement in der Automobilindustrie, 2018]: Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018
- Koether, Reinhard* (Hrsg.) [Taschenbuch der Logistik, 2018]: Taschenbuch der Logistik, 5., aktualisierte Auflage, München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018
- Kunert, Christoph* [Design for stability in transport logistics]: Design for stability in transport logistics, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, KIT
- Lieb, Christian* u. a. [Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung, 2017]: Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung: Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb, Garching b. München: fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, 2017
- Lieb, Christian* [Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme, 2021]: Dynamische Steuerungsstrategien für innerbetriebliche Routenzugsysteme, Dissertation, Technische Universität München; Technische Universität München, 2021
- Lienert, Thomas* [Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme, 2021]: Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme, Dissertation, 2021
- Martin, Heinrich* [Transport- und Lagerlogistik, 2016]: Transport- und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit, 10. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021]: Technische Transport- und Lagerlogistik, Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021
- Martini, Andreas/Stache, Ulrich* [Automatisierung von Routenzugsystemen]: Automatisierung von Routenzugsystemen AGV FS400 Factory Shuttle – Kompaktes und fahrerloses Transportsystem (FTS) [AGV FS400 Factory Shuttle – Kompaktes und fahrerloses Transportsystem (FTS), 2023] 2023
- Prof. Dr.-Ing. H.Flämig* [Milkrun, 2011]: Milkrun 2011, <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/349780/>
- Reinhart, Gunther* (Hrsg.) [Handbuch Industrie 4.0, 2017]: Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik, München: Hanser, 2017
- Schmidt, Thorsten* (Hrsg.) [Innerbetriebliche Logistik, 2018]: Innerbetriebliche Logistik, 1. Aufl. 2019, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018
- Lean Sm@rt Factory: Unser Gestaltungskonzept der Zukunft [Lean Sm@rt Factory, 2022] 2022
- Steven, Marion* [Industrie 4.0, 2018]: Industrie 4.0: Grundlagen - Teilbereiche - Perspektiven, Stuttgart: Kohlhammer Verlag, 2018, <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:24-epflicht-1273753>
- Steven, Marion/Dörseln, Jan Niklas* (Hrsg.) [Smart Factory, 2020]: Smart Factory: Einsatzfaktoren - Technologie - Produkte, 1. Auflage, Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2020
- STILL Advanced Applications* [Das Wie, Was und Warum zur Einführung von Routenzugsystemen, 2018]: Das Wie, Was und Warum zur Einführung von Routenzugsystemen, 2018
- Elektroschlepper LTX 20 [Elektroschlepper LTX 20, 2022] 2022
- Thiele, David* [RFID-Technologie, 2015]: RFID-Technologie: Einsatzmöglichkeiten und Grenzen in der Unternehmenslogistik, Hamburg: Bachelor + Master Publishing, 2015, <http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/campus/2016/59154/>
- Ullrich, Günter/Albrecht, Thomas* [Fahrerlose Transportsysteme, 2019]: Fahrerlose Transportsysteme: Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung, 3., vollständig überarbeitete Auflage, Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019
- Vogel-Heuser, Birgit/Bauernhansl, Thomas/Hompel, Michael* ten (Hrsg.) [Handbuch Industrie 4.0 Bd.3, 2017]: Handbuch Industrie 4.0 Bd.3: Logistik, 2. Aufl. 2017, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- Wannenwetsch, Helmut* [Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion, 2021]: Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion: Supply Chain im Zeitalter der Digitalisierung, 6. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2021

Wehking, Karl-Heinz u. a. [Technisches Handbuch Logistik, 2020]: Technisches Handbuch Logistik, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020

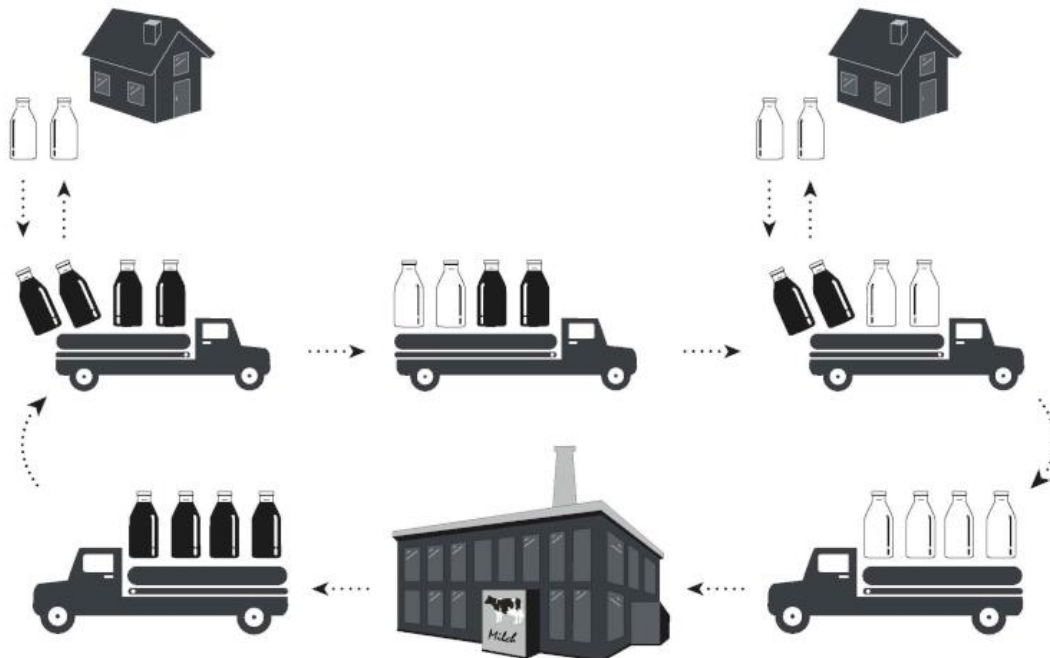
9. Anhang

Anhangsverzeichnis

ANHANG 1 EIGENE DARSTELLUNG NACH MARTIN UND HOHMANN	67
ANHANG 2 ABLAUF DES TRADITIONELLEN MILKRUNS	67
ANHANG 3 SYSTEMATIK DER FÖRDERMITTEL FÜR DIE STÜCKGUTFÖRDERUNG.....	69
ANHANG 4 BEWERTUNG VON UNSTETIG FÖRDERNDER FLURFÖRDERMITTELN ANHAND AUSGEWÄHLTER BESTIMMUNGSKRITERIEN (TEIL 1)	70
ANHANG 5 BEWERTUNG VON UNSTETIG FÖRDERNDER FLURFÖRDERMITTELN ANHAND AUSGEWÄHLTER BESTIMMUNGSKRITERIEN (TEIL 2)	71
ANHANG 6 KALKULATIONSTABELLE NACH FOTTNER FÜR DIE KOSTENVERGLEICHSRECHNUNG MIT BEISPIELWERTEN	72
ANHANG 7 EIGENE DARSTELLUNG: GRAFISCHE DARSTELLUNG DES MILKRUN-ZYKLUS	72
ANHANG 8 EIGENE TABELLARISCHE DARSTELLUNG: BERECHNUNG DES ROUTENZUGSYSTEMS IM FALLBEISPIEL.....	73
ANHANG 9 EIGENE TABELLARISCHE DARSTELLUNG: BERECHNUNG DES DIREKTVERSORGUNGSSYSTEM IM FALLBEISPIEL	74
ANHANG 10 EIGENE TABELLARISCHE DARSTELLUNG: MONETÄRER VERGLEICH DER MATERIALVERSORGUNGSSYSTEME NACH FOTTNER ET AL. UND MARTINI ET AL.	75
ANHANG 11 EIGENE TABELLARISCHE DARSTELLUNG: PAARWEISER VERGLEICH ZUR GEWICHTUNG DER KRITERIEN	76



Anhang 1 Eigene Darstellung nach Martin und Hohmann ¹⁹¹¹⁹²



Anhang 2 Ablauf des traditionellen Milkruns¹⁹³

¹⁹¹ Vgl. Hohmann, S., Logistik- und Supply Chain Management, 2022, 4ff.

¹⁹² Vgl. Martin, H., Technische Transport- und Lagerlogistik, 2021, S. 5–8.

¹⁹³ Prof. Dr.-Ing. H. Flämig, Milkrun, 2011.

Fördermittel					
Stetigförderer			Unstetigförderer		
flur-gebunden	aufgeständert	flurfrei	flurgebunden	aufgeständert	flurfrei
ortsfest	ortsfest	ortsfest	geführt verfahrbar	ortsfest	geführt verfahrbar
Zugmittel	Abwälzung	Zugmittel	Einzelantrieb	Einzelantrieb	Einzelantrieb
Unterflur-schleppkettenförderer	Rollenbahn, angetrieben	Rollenbahn	Umsetzer	Aufzug/Senkrecht-förderer	Trolleybahn
		Röllchenbahn	Verschiebe-wagen		Brückenkran
		Kugelbahn	Elektro-tragbahn	Verteiltahr-zeug	Portalkran
		Rutsche	Regalbedien-gerät		Kabelkran
			automat. Flurförder-zeug		Ausleger-/Drehkran
			Stapler		Elektro-hängebahn
			automat. Flurförder-zeug		
			Kommissio-nierfahrzeug		

Unstetigförderer (Teil 1)									
Bestimmungskriterien	Schlepper	Gabel-Hubwagen	Kommissionierfahrzeuge	Hochhubwagen	Stapler	Kommissionierstapler	Hochregalstapler	Regalbediengerät	Elektro-Tragbahn/ Destination Coded Vehicles
Automatisierungsgrad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Integrierbarkeit in automatische Systeme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Flexibilität bei Layoutänderung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flexibilität bei Änderung der Förderleistung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Flächenbedarf für Transportstrecken	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hindernisbildung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Umkehrbare Förderrichtung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Überwinden von Steigungen	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aufwand bei Verzweigungen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Stau- und Pufferfähigkeit	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lastübergabe an gesamter Transportstrecke möglich	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anforderungen an den Baukörper	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Organisation mit Datenverarbeitung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Investitionsbedarf	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Wartungsaufwand	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

günstig
 durchschnittlich
 ungünstig
 nicht möglich

Anhang 4 Bewertung von unstetig fördernder Flurfördermitteln anhand ausgewählter Bestimmungskriterien (Teil 1)¹⁹⁵

¹⁹⁴ Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S. 129.

¹⁹⁵ Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S. 241.

Unstetigförderer (Teil 2)									
Bestimmungskriterien	Umsetzer	FTS	Aufzug/ Senkrechtförderer	Kanal-/ Verteilfahrzeug	Trolley-/ Rohrbahn	Brücken-/ Hänge-/ Stapelkran	Portalkran	Automatischer Kran	Elektro-Hängebahn
Automatisierungsgrad	■	■	□	■	□	□	□	■	■
Integrierbarkeit in automatische Systeme	■	■	□	■	□	□	□	■	■
Flexibilität bei Layoutänderung	□	■	□	□	□	■	□	■	□
Flexibilität bei Änderung der Förderleistung	□	■	□	□	■	□	□	□	□
Flächenbedarf für Transportstrecken	□	■	□	□	□	■	□	■	■
Hindernisbildung	□	■	□	□	□	■	□	■	■
Umkehrbare Förderrichtung	■	■	■	■	□	■	■	■	□
Überwinden von Steigungen	□	□	■	□	□	■	■	■	■
Aufwand bei Verzweigungen	-	■	-	□	■	-	-	-	■
Stau- und Pufferfähigkeit	□	□	□	□	■	□	□	□	■
Lastübergabe an gesamter Transportstrecke möglich	□	■	□	■	■	■	■	■	□
Anforderungen an den Baukörper	□	□	□	■	□	□	□	□	□
Organisation mit Datenverarbeitung	■	■	□	■	□	□	□	■	■
Investitionsbedarf	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Wartungsaufwand	■	□	□	□	■	□	■	□	□

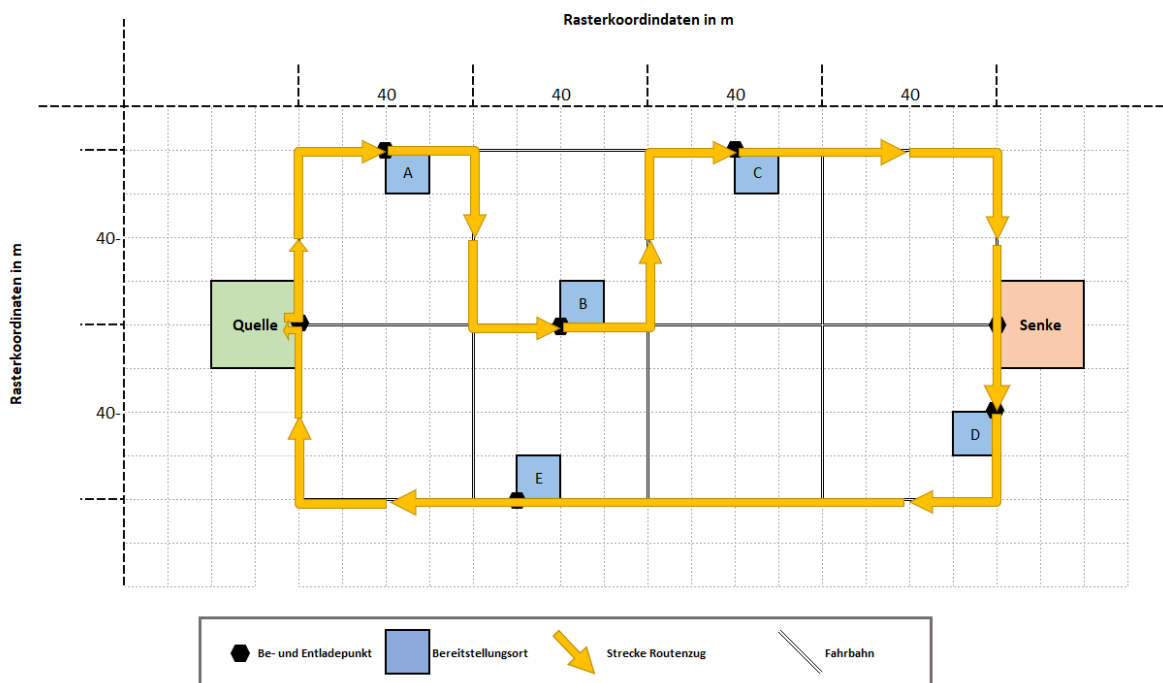
günstig
 durchschnittlich
 ungünstig
 nicht möglich

Anhang 5 Bewertung von unstetig fördernder Flurfördermitteln anhand ausgewählter Bestimmungskriterien (Teil 2)¹⁹⁶

¹⁹⁶ Hompel, M. ten, Materialflusssysteme, 2018, S. 242.

	Gabelstapler	Fahrerloses Transportsystem
Investition	130.500 €	435.000 €
Kalkulatorische Fixkosten		
Abschreibung	27.176 €	77.904 €
Kalkulatorische Zinsen	3263 €	10.875 €
Fixkosten		
Sonstige Fixkosten	6750 €	23.500 €
Summe	37.189 €	112.279 €
Variable Kosten		
Personalkosten	285.000 €	85.500 €
Energiekosten	2654 €	3250 €
Wartungskosten	4840 €	10.890 €
Summe	292.494 €	99.640 €
Summe	329.683 €	211.919 €

Anhang 6 Kalkulationstabelle nach FOTTNER für die Kostenvergleichsrechnung mit Beispielwerten¹⁹⁷



Anhang 7 Eigene Darstellung: Grafische Darstellung des Milkrun-Zyklus

¹⁹⁷ Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 189.

Berechnung Transportdaten Routenzug

Transport-Nr.	Prozess	Strecke	Anzahl Touren	Anzahl PAL/Tour	ΣStrecke	ΣFahrzeit	ΣHandlungszeiten (60s pro Palettenbewegung)	ΣZeitaufwand
1	Quelle:A:B:C:Senke:D:E:Quelle	1120	30	5,33	33600m	335,33min	320,0min	880min
				Insgesamt	33,6km		320min	14,67h

Berechnung Milchkun

Transportvolumen Gesamt	160
Arbeitszeit	8,0h
Anzahl Anhänger	6
Aufladen	60s
Handling Bereitstellungsart	120s
Anzahl Routenzug	1,69
Anzahl MA	1,96
Geschw. Routenzug	1,67 m/s
Dauer einer Strecke:	27,4min
Anh. mit Planungsauslastung 90%:	5,40
Transportvolumen pro Tour	5,33
Anzahl TourenGesamt:	29,63
Auslastung Routenzüge	84%

Transport-Nr.	Start	Ziel	Paletten/Tag
1	Warenlager A	A	15
2	Warenlager B	B	10
3	Warenlager C	C	20
4	Warenlager D	D	45
5	Warenlager E	E	5
6	B	D	35
7	C	Leergutabgabe	30
Gesamt:			160

Routenbedarf:

Bereitstellungsort	Anlieferung: Transportvolumen in Paletten/h
A	1,875
B	1,25
C	2,5
Leergutabgabe	3,75
D	10
E	0,625
Gesamt	20
Anzahl Touren (in Touren pro h)	3,704
Taktung (in min)	16,2

Berechnung Transportdaten FTF

Transport-Nr.	Prozess	Strecke	Anzahl Hin	Anzahl zurück (Leerfahrten)	Σ Strecke	Einzelfahrzeit	Σ Handlingzeiten (20s pro Palette)	Σ Zeitaufwand in min
1	Quelle-A	120	15	15	3600m	2,0min	10,0min	70min
2	Quelle-B	120	15	5	2400m	2,0min	10,0min	50min
3	Quelle-C	280	30	10	11200m	4,87min	20,0min	207min
4	Quelle-D	320	45	80	40000m	5,33min	30,0min	697min
5	Quelle-E	180	5	5	1800m	3,0min	3,33min	33min
6	B-D	240	35	0	8400m	4,0min	23,33min	163min
7	C-Senke	200	30	0	6000m	3,33min	20,0min	120min
	Quelle-Senke	320	0	30	9600m	5,33min	0min	160min
Insgesamt			175	145	83km		117min	25,1h

Transport	Start	Ziel	Paletten/Tag
1	Warenlager	A	15
2	Warenlager	B	10
3	Warenlager	C	20
4	Warenlager	D	45
5	Warenlager	E	5
6	B	D	35
7	C	Leergutabgabe	30
		Gesamt:	160

Arbeitsstunden FTF	8,0h	Anzahl Fahrten gesamt	320	Anzahl benötigter FTF	3,13
		Anzahl Fahrten FTF pro Stund	10	Tatsächliche Anzahl FTF	4
				Auslastung FTF	78,1%

Quelle-Senke Transportmatrix nach Ulrich et al.

nach	Warenlager	A	B	C	D	E	Leergutabgabe
von							
Warenlager		20	20	30	30	20	120
A							0
B					30		30
C							30
D							0
E							0
Leergutabgabe							0
Summe Eingehend	0	20	20	30	60	20	30
							Summe Ausgehend

	Manuelles Routenzugsystem	Automatisiertes FTS-Direktversorgungssystem
Dimensionierung		
Anzahl Fahrzeuge	2	4
Anzahl Fahrten Fahrzeug pro h	2,06	11,25
Zeitliche Auslastung	95%	81%
Wirtschaftlichkeit		
Investitionskosten	109.000€	273.000€
Schlepper/FTF	17.500€	52.000€
Anhänger (2x6)	5000€	
Wechselbatterie	5000€	Inkl.
Ladestation	2000€	Inkl.
Leitsystem		65.000€
Betriebskosten	102.966 €/Jahr	81.173 €/Jahr
Personalkosten (pro Fahrer) (1)	42.500 €/Jahr	
Personalkosten (Leitstand)		47.800 €/Jahr
Wartungskosten (10% der Investitionskosten)	10.900€/Jahr	27.300 €/Jahr
Energiekosten der Flotte (0,2€/kWh) (2)	7066 €/Jahr	6073 €/Jahr
<p><i>Hinweis:</i> Die jeweils kostengünstigere Variante wurde grün markiert.</p> <p>(1) Annahme, dass beide Mitarbeiter:innen abzüglich der Pausen vollständig ausgelastet sind.</p> <p>(2) Informationen basieren auf Angaben des Herstellerunternehmens STILL GmbH.¹⁹⁸</p>		

Anhang 10 Eigene tabellarische Darstellung: Monetärer Vergleich der Materialversorgungssysteme nach FOTTNER et al. und MARTINI et al.¹⁹⁹²⁰⁰

¹⁹⁸ STILL GmbH, Elektroschlepper LTX 20, 2022.

¹⁹⁹ Vgl. Martini, A./Stache, U., Automatisierung von Routenzugsystemen, S. 6-9.

²⁰⁰ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 195–198.

Kombinationen für die Bewertung		K1 wichtiger als K2	K1 und K2 gleichwichtig	K2 wichtiger als K1	Punkte	
Kriterium 1	Kriterium 2				K1	K2
Flexibilität des Transportguts	Prozesskomplexität		X	0	2	
Flexibilität des Transportguts	Erweiterbarkeit		X	0	2	
Flexibilität des Transportguts	Unfallgefahr	X		1	1	
Prozesskomplexität	Erweiterbarkeit	X		1	1	
Prozesskomplexität	Unfallgefahr	X		2	0	
Erweiterbarkeit	Unfallgefahr	X		2	0	

Punktematrix

Kriterien	1	2	3	4	Gewicht
1 Flexibilität des Transportguts		0	0	1	1
2 Prozesskomplexität	2		1	2	5
3 Erweiterbarkeit	2	1		1	4
4 Unfallgefahr	1	0	1		2

Anhang 11 Eigene tabellarische Darstellung: paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien²⁰¹

²⁰¹ Vgl. Fottner, J. u. a., Planung von innerbetrieblichen Transportsystemen, 2022, S. 191f.