

Wolf-Michael Scheid (Hrsg.)

**5. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen
Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)**

**5. Fachkolloquium der
Wissenschaftlichen Gesellschaft
für Technische Logistik
(WGTL)**

Technische Universität Ilmenau
1. - 2. Oktober 2009

Herausgegeben von
Wolf-Michael Scheid



Universitätsverlag Ilmenau
2009

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

- Herausgeber: Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau/Fachgebiet Fabrikbetrieb
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolf-Michael Scheid

Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische
Logistik e.V. (WGTL)
Holzgartenstr. 15B
70174 Stuttgart
- Redaktion: Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau/Fachgebiet Fabrikbetrieb
Dipl.-Ing. Matthias Berge
Postfach 100565
98684 Ilmenau
- Verlag: Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Ilmenau
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag
- Herstellung und
Auslieferung: Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-939473-56-5 (Druckausgabe)
urn:nbn:de:gbv:ilm1-2009100089

Titelfoto: Susanne Jakob / TU Ilmenau

Inhalt

Vorwort

Themengruppe 1: Steuerung und Systemverhalten

- | | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Ansätze zur automatischen Analyse und Diagnose von komplexen Materialflusssystemen | 1 |
| | Dipl.-Ing. David Wustmann*, Dipl.-Ing. Volodymyr Vasyutynskyy**, Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt* | |
| | Technische Universität Dresden | |
| | *Professur für Technische Logistik, | |
| | **Professur für Technische Informationssysteme | |
| 2 | Werkzeuggestützte Methode zur Untersuchung des Zeitverhaltens agentenbasierter Materialflusststeuerungen | 21 |
| | Dipl.-Ing. Sergey Libert, Prof. Dr. Michael ten Hompel | |
| | Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund | |
| | Dipl.-Inf. Andreas Nettsträter, Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund | |
| 3 | Dezentrale Koordination und Kooperation im Internet der Dinge | 37 |
| | Dipl.-Inf. R. Chisu, Dipl.-Ing. F. Kuzmany, Prof. W. A. Günthner | |
| | Technische Universität München | |
| | Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik fml | |

Themengruppe 2: Antriebskonzepte

- | | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Entwicklung optimierter mehrrolliger Magnettreibscheiben für Aufzüge | 59 |
| | Dipl.-Ing. Rüdiger Herhold, Dipl.-Ing. Martin Anders | |
| | Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt | |
| | Technische Universität Dresden | |
| | Professur für Technische Logistik | |
| 2 | Numerische und experimentelle Analyse von Seilscheibenbelastungen | 73 |
| | Dipl.-Ing. Christian Vorwerk, Dipl.-Ing. Thomas Kuczera | |
| | Universität Stuttgart | |
| | Institut für Fördertechnik und Logistik | |
| | Fachgebiet Fördertechnik | |
| 3 | Modellierung eines Lineardirektantriebes für Transportbänder | 83 |
| | Dipl.-Ing. Tobias Froböse, Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, | |
| | Dipl.-Ing. Jan-Peter. Jastrzembski, Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick | |
| | Leibniz Universität Hannover | |
| 4 | Der variable Fahrtrieb – Eine neue Lösung für die Gestaltung von FTF-Fahrwerken | 95 |
| | Dipl.-Ing. Matthias Könemann, Prof. Dr. Michael ten Hompel | |
| | Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik Dortmund | |

Themengruppe 3: Flurförderer / (Automatische) Kommissionierung

- | | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Onlineanalyse der im Betrieb von Flurförderzeugen auftretenden Belastungen | 109 |
| | Dipl.-Ing. Christian Vorwerk Universität Stuttgart Institut für Fördertechnik und Logistik Fachgebiet Fördertechnik | |
| 2 | Das Reifenmodell als Schlüsselement der Fahrdynamik-simulation von Gabelstaplern | 123 |
| | Dipl.-Ing. (FH) N. Busch, Dipl.-Ing. O. Höppner, Prof. Dr.-Ing. R. Bruns Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg Professur für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL) | |
| 3 | Der FlexFörderer – ein vollständig dezentral gesteuerter, modularer und ortsungebundener Stetigförderer | 137 |
| | Dipl.-Wi.-Ing. D. Berbig, Dr.-Ing. F. Schönung, Dr.-Ing. S. Mayer, Prof. Dr.-Ing. K. Furmans KIT / Universität Karlsruhe (TH) Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme | |
| 4 | Ein System zur automatisierten Kommissionierung unterschiedlicher Artikel - Einsatz von Bildverarbeitung und Künstlicher Intelligenz in der Logistik | 149 |
| | Dipl.-Math. (FH) Björn Cleves, Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik | |
| 5 | Bestimmung der mittleren Fahrzeit bei Kommissionierumdrehungen an einem Regal mit verschobener Schnellläuferzone | 157 |
| | Dipl.-Ing. Sebastian Mühlenbrock, Prof. Dr. Michael ten Hompel Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund | |

Themengruppe 4: Planung und Bewertung von Systemen

- | | | |
|----------|--|------------|
| 1 | Ganzheitliche Planung logistischer Systeme – Hilfestellung durch EDV-gestützte Assistenzsysteme | 171 |
| | Dipl.-Kfm. Boris Jobi, Dipl.-Logist. Daniel Neuhäuser, Dipl.-Wi.-Ing. Tobias Sommer Universität Stuttgart | |
| 2 | Toolgestützte effiziente Materialflussplanung | 183 |
| | Dr.-Ing. Ingolf Meinhardt, Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt Technische Universität Dresden Professur für Technische Logistik | |
| 3 | Kennzahlen zur Bewertung der technischen Eigenschaften von RFID-Systemen | 203 |
| | Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Andreas Jungk Institut für Transport- und Automatisierungstechnik Leibniz Universität Hannover, Garbsen | |

- 4 Abnahmeverfahren mit dem neuen Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“ angewandt auf die durchschnittliche, deutsche Kleinanlage** **219**
 Dipl.-Ing. Martina M. Maier
 Technische Universität Ilmenau
 Institut für rechnerunterstützte Produktion
 Fachgebiet Fabrikbetrieb

Themengruppe 5: Neues bei Stetigförderern

- 1 Eigenschaftsermittlung zur optimalen Auslegung von Staurollenketten** **231**
 Dipl.-Ing. Uwe Dombeck, Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel
 Technische Universität Chemnitz
 Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik
 Professur Fördertechnik
- 2 Bewegung eines Fördergutes auf einer dynamischen Gleitfördermembran** **241**
 Dipl.-Wi.-Ing. Melf Gerthsen,
 Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns
 Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
 Professur für Maschinenelemente und Technische Logistik
- 3 Innovative Zug- und Tragmittel für die Fördertechnik** **253**
 Dipl.-Ing. Ingo Berbig, Dipl.-Ing. Sindy Subbert,
 Dipl.-Ing.(FH) Enrico Putzke, Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel
 Technische Universität Chemnitz,
 Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik

Themengruppe 6: Anwendungen

- 1 Analyse instandhaltungsbedingter Retouren und Prognose der Beeinflussung bestehender Mehrwegsysteme** **263**
 Dipl.-Logist. Benjamin Cebulla
 Institut für Distributions- und Handelslogistik (IDH) des Vereins zur Förderung innovativer Verfahren in der Logistik (VVL) e.V., Dortmund
- 2 Container-Pooling: Optimierung der Leercontainerbereitstellung in Seehäfen** **271**
 Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani, Dipl.-Wirt.-Inf. Arne Rajchowski,
 Dipl.-Wirt.-Ing. Felix Lootz, Manuela Pickel
 Universität Rostock,
 Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik
- 3 RFID-Einsatz in der Baubranche** **281**
 Dipl.-Ing. O. Schneider, Prof. W. A. Günthner
 Technische Universität München
 Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Posterbeiträge

- 1 Kopplung von FEM und DEM zur Simulation des Durchhangs eines Fördergurtes 299**
Dipl.-Ing. Mathias Dratt, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Andre Katterfeld
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg
Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM)
Fachgebiet Schüttgutfördertechnik
- 2 Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren mit dem Kennzahlensystem des „Distribution Center Reference Model“ (DCRM) 311**
Dipl.-Wi.-Ing. Melanie Schwab, Dipl.-Wi.-Ing. Judith Weiblen,
Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans
Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme
- 3 Strategien für eine flexible, auftragsweise Kommissionierung 319**
Dipl.-Logist. J. Zellerhoff, Dipl.-Logist. M. Pelka,
Prof. Dr. M. ten Hompel
Technische Universität Dortmund
Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen
- 4 Über den Einfluss verfügbarer Steuerungsinformationen auf die Leistung eines intralogistischen Systems 331**
Dipl.-Ing. Jan Robert Nopper, Prof. Dr. Michael ten Hompel
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik Dortmund
- 5 Integration einer HF-Kommunikationsstruktur in metallische Komponenten 341**
Dipl.-Ing. Stefan Franke, Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
- 6 Simulation von kognitiven Transportmodulen in Materialflusssystemen 353**
Dipl.-Ing. Gerd Heiserich, Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
- 7 Beitrag zur Funktion und Dimensionierung von Puffern 365**
Dipl.-Ing. Ayman Al Khateeb
Technische Universität Ilmenau
Institut für rechnerunterstützte Produktion
Fachgebiet Fabrikbetrieb
- 8 Aspekte der Wirtschaftlichkeit bei der kooperativen Instandhaltung in einem Unternehmensnetzwerk 379**
Dipl.-Ing. Andreas Weißenbach
Technische Universität Ilmenau
Institut für rechnerunterstützte Produktion
Fachgebiet Fabrikbetrieb



VORWORT

Zum 5. Male veranstaltet die Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik WGTL ein Fachkolloquium. Es dient natürlich der Bestandsaufnahme dessen, was aktuelle Forschungsschwerpunkte der Institute der WGTL sind. Wie könnten sich die unterschiedlichen Akzentsetzungen besser erkennen lassen als in der Forschung.

Andererseits präsentiert sich hier der wissenschaftliche Nachwuchs. Er hat die Chance, im persönlichen Gespräch Kontakte zu knüpfen zu Kolleginnen und Kollegen anderer Hochschulen. Netzwerkbildung nennt man das heute. Sich frühzeitig in den logistischen Netzen zu bewegen, sollte nützlich sein für die wissenschaftliche und damit natürlich auch berufliche und last but not least persönliche Entwicklung.

Technische Logistik, oder um den neuen In-Begriff „Intralogistik“ zu verwenden, operiert nicht abstrakt fern der Realität sondern ist als angewandte Wissenschaft auf den Kontakt mit der Praxis, auf die Konfrontation mit deren Problemen heute und den absehbaren von morgen angewiesen. Dass wir dies alle so sehen, ist aus den 30 Beiträgen des Kolloquiums deutlich erkennbar.

Wir hoffen, dass auch die Unternehmer dies erkennen und am Kolloquium teilnehmen werden, was zu dem Zeitpunkt, da diese Zeilen geschrieben werden, noch nicht absehbar ist. Es liegt im ureigensten Interesse gerade der Unternehmen, die in der Intralogistik auf der Anbieterseite stehen (als Planer oder als Hersteller von Mechanik, Steuerungstechnik, Software einzelner Komponenten wie auch integrierter Gesamtanlagen) hierher zu kommen und von ihrer Seite auch die Netzwerkbildung voran zu treiben. Gute Gespräche sollten vorhandene Kontakte vertiefen und neue knüpfen. Wenn Angebote für Praktika entstehen, Themen für gemeinsame Bachelor- und Masterarbeiten oder Verbund-Forschungsvorhaben gefunden werden, dann wird ein weiteres Ziel dieses Kolloquiums erreicht, den Dialog zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu führen und zu vertiefen.

Das ist ein langfristiger, ein permanenter Prozess. Die zwei Tage in Ilmenau sind ein kleiner Schritt auf einem langen Weg zum Ziel. Ein Ziel, das wir nicht erreichen werden, weil mit neuen Erkenntnissen und mit neuen Aufgaben sich Ziele verändern, neue entstehen.

Auch eine Rückschau ist manchmal von Nutzen.

Ein Jahr zurück blicken wir nach Chemnitz zum 4. Fachkolloquium. Es setzte Maßstäbe, die für Ilmenau Vorgaben sind. Wir hoffen, den Erwartungen gerecht zu werden.

Blicken wir weiter zurück, so hat die durch Fusion mit der ADB in der neuen VDI-Gesellschaft GPL Produktion und Logistik aufgegangene VDI-Gesellschaft FML Fördertechnik Materialfluss Logistik vor zwei Jahren ihr 50jähriges Bestehen gefeiert. Mehrere Mitglieder der WGTL sind in Vorstand, Beirat und Fachausschüssen aktiv. Die Gründung damals lenkte das Augenmerk auf die Bedeutung der seinerzeit noch schlicht Fördertechnik genannten Branche, der sich damit befassenden Wissenschaftler und der Nutzer dieser Technik.

Manchmal sieht man den Wald vor lauter Bäumen nicht, sagt das Sprichwort. So mag auch die detailverliebte Beschäftigung mit Teilproblemen, so wichtig und unentbehrlich sie ist, zeitweise den Blick für das Ganze versperren. Bei studentischen Arbeiten beobachte ich das immer wieder. Auch Wissenschaftler oder Lehrbücher sind nicht frei davon.

Den Blick aufs Ganze, auf ein Lebenswerk, soll der Eröffnungsbeitrag von Dipl.-Ing. Horst Giessler bieten. Ich will dem Referenten keineswegs vorgreifen.

Wir haben einen gebürtigen Thüringer, aus der Nachbarschaft, eingeladen. Er hat sich, wie man so sagt, von der Pike auf mit Intralogistik befasst, auch wenn er - wie wir alle - diesen Begriff erst seit kurzer Zeit kennt. Er hat sich als Ingenieur, als Unternehmer, als Konstrukteur bewährt und Erfolg gehabt. Diese positive Lebenserfahrung wünsche ich vor allem den jungen Teilnehmern des Kolloquiums.

Ich selbst könnte sagen, wenn ich meine Lehrzeit und damit Schüttgut mit einbeziehe, ich sei jetzt über 45 Jahre in der Branche. Zählen will ich davon 38, die sich mit Systemen der Intralogistik befassen. Den Kollegen der WGTL bin ich dankbar, dass sie das Fachkolloquium hier in Ilmenau stattfinden lassen.

Wir werden heute Abend noch auf die geschichtliche Einheit von Ingenieur und Logistik zu sprechen kommen, sie buchstäblich begreifen.

Ich zitiere:

“La troisième est la grande tactique des batailles et des combats.

La quatrième est la logistique ou l'application pratique de l'art de mouvoir des armées.

. . .

La cinquième est l'art de l'ingenieur, l'attaque et la defense des places.“

Als Baron Antoine-Henri de Jomini (1779 - 1869) dies 1838 in seinem Buch „Précis de l'art de la guerre“ schrieb dachte er an Festungsbau und Truppenbewegung, wenn er die Begriffe „Ingenieur“ und „Logistik“ verwendete. Meine Eltern durften noch Aufsätze über das Thema „Der Krieg ist der Vater aller Dinge“ schreiben.

Das sehen wir heute anders. Es kommt darauf an, ehrgeizige Ziele zu setzen und systematisch, mit Kreativität und auch einem Quäntchen Glück, sich diesen Zielen zu nähern.

Wahr ist aber, dass kriegerische Aspekte diese Begriffe prägten und auch bis in das 20. Jahrhundert formten.

Wir werden uns heute Abend friedlich der Festung Petersberg in Erfurt nähern, einige Aspekte der dortigen Ingenieurkunst kennen lernen und uns dann im **Friedenspulvermagazin** unterhalten bei Speis und Trank. Auch dies gehört zwingend zu einem Kolloquium.

Ich wünsche uns allen zwei spannende und erfolgreiche Tage!

Ilmenau, im Oktober 2009

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'W. Scheid', written in a cursive style.

Wolf-Michael Scheid

Ansätze zur automatischen Analyse und Diagnose von komplexen Materialflusssystemen

Dipl.-Ing. David Wustmann*, Dipl.-Ing. Volodymyr Vasyutynskyy**, Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt*

Technische Universität Dresden

**Professur für Technische Logistik,*

***Professur für Technische Informationssysteme*

Abstract

Bis heute wird durch die Simulation lediglich spezifiziert, ob der Entwurf eines Materialflusssystemes formalen Anforderungen genügt, nicht jedoch wie gut bzw. wie schlecht er das tut. Letzteres wird derzeit aufgrund von fehlenden Methoden nur intuitiv vom Planer für stark eingeschränkte Zeitbereiche analysiert und hängt somit entscheidend von der Erfahrung und Expertise der beteiligten Spezialisten ab. Nahezu identische Aussagen lassen sich für die weiterführende Analyse (z.B. Identifikation komplexer Abhängigkeiten, Suche nach Problemursachen) von bereits existierenden industriellen Anlagen treffen. Dieser Beitrag betrachtet Ansätze zur rechnergestützten Diagnose von Ereignisdaten aus der Simulation bzw. von Materialflussrechnern. Die automatische Analyse komplexer Materialflusssysteme soll hierbei die verschiedensten intralogistischen Datenströme unabhängig vom System auswerten können. Der Artikel beschreibt das notwendige Vorgehen und erste Resultate, um den Widerspruch zwischen den an sich verfügbaren Datenmengen und dennoch unzulänglichen Analysemöglichkeiten aufzulösen.

Till now, the simulation of material flow systems solely specifies the compliance of a system design (layout and control) to formal requirements, but does not show in detail how good and why the systems operate. The latter is currently analysed only intuitively by the system developer, without support by software tools. There are still no methods to search systematically for critical points. Nearly the same applies to the analysis of operating industrial systems, e.g. lack of methods for identification of complex dependencies or searching for problem causes. This paper examines an approach for computer-aided diagnosis of the problems based on event data from simulation studies or real material flow controllers. In this way, the automated analysis of complex material flow systems should be able to interpret different material flow data streams independently of the underlying system. The paper describes the necessary workflow and first analysis results in order to close the gap between available data and analytical approaches.

1 Einleitung

Die Steuerung komplexer Materialflusssysteme, wie zum Beispiel von Gepäckförderanlagen in Flughäfen oder Paketsortieranlagen, erfolgt über einen oder mehrere Materialflussrechner. Diese speichern in der Regel jede Zustandsänderung (Ereignisse) im System in Form von Log- oder Protokolldaten. Nur selten werden diese Datenmengen aber für eine Prozessanalyse genutzt, um systeminterne Schwachstellen oder Leistungsreserven zu identifizieren. Vielmehr entsteht nach TOLUJEV et al. (2007) eine unbefriedigende Situation für alle betroffenen Seiten. Den Logistikern stellt sich die Frage „Was bringen uns, [...], diese Daten?“ wohingegen die Informatiker nicht wissen „wohin mit den Daten“. Analog zu den Kommunikationsprotokollen der Materialflussrechner treffen diese Aussagen ebenso für Trace-Daten aus der Simulation zu.

1.1 Stand der Technik

Die Idee vorhandene Datenmengen für eine Analyse zu nutzen ist nicht neu. So stellen KEMPER/TEPPER (2005) einen Ansatz vor, welcher auf die ausgeprägte (menschliche) Fähigkeit zur visuellen Wahrnehmung und Bewertung von Zusammenhängen setzt. Die Aufbereitung der Daten in Form von so genannten „Message Sequence Charts“ schafft eine Möglichkeit zur Identifikation von partiellen Blockierungen sowie Staus, Warteschlangen und Engpässen. Dieser Ansatz wurde jedoch nur für relativ kleine Systeme und somit nur für kleinere Datenmengen betrachtet. Die Autoren weisen diesbezüglich darauf hin, dass zur Aggregation größerer Datenmengen die Entwicklung von „reduction techniques“ eine zukünftige Zielstellung sein sollte.

In NAKAYAMA (2006) findet sich eine aktuelle Darstellung der derzeit verbreiteten Sichtweise auf das Thema „Output analysis for simulations“. So werden häufig statistische Methoden zur Bestimmung von nur globalen Leistungskenngrößen diskutiert (vgl. LAW/KELTON (2000); FISHMAN (2001)). BRATLEY et al. (1987) erläutern zum Beispiel wie möglichst signifikante Schätzer zur Leistungsbewertung des Gesamtsystems bestimmt werden können. Die Schätzer beschreiben, in welchem Maße spezifische globale Kenngrößen von bestimmten Parametern abhängen. NAKAYAMA (2006) nennt hierbei die „perturbation analysis“ (vgl. BONNANS/SHAPIRO (2000)) und „likelihood-ratio method“ (vgl. RUBINSTEIN (1989)) als Verfahren, diese Schätzer für den Grad der Abhängigkeit zu bestimmen. Aufgrund des hohen Zeit- und Rechenaufwandes stellen diese jedoch keine geeignete Möglichkeit dar, um in der für komplexe Systeme charakteristischen Vielzahl von Abhängigkeiten diejenigen gezielt zu identifizieren, die besonders stark ausgeprägt sind. Ein weiteres Konzept zur Parametrierung von Simulationsmodellen und zum spurbasiertem Debuggen auf Basis von Trace-Daten wird in GORDON/KEMPER (2007) vorgestellt. Durch Clusterbildung von einem Set mehrerer Traces soll der Simulationsexperte bei der Organisation der Daten unterstützt werden und somit die Identifikation von entscheidenden Parametern oder relevanten Simulationsläufen erleichtert werden.

Dem in diesem Beitrag vorgestellten Ansatz kommen BETTER et al. (2007) methodisch am nächsten. Sie entwickeln eine interessante Kombination von Dynamic-Data-Mining- und Optimierungs-Techniken, um die relevanten Variablen, Attribute und Regeln zu identifizieren, welche das Simulationsmodell maßgeblich bestimmen. Die Autoren verfolgen hierbei jedoch das Ziel, die für die Optimierung einer Kenngröße erforderliche Zahl von Simulationsläufen zu reduzieren. Auch in KEMPER/TEPPER (2007) wird zwar ein Verfahren vorgestellt, welches die Identifizierung von Fehlern aus Simulations-Traces ermöglicht, jedoch liegt der Fokus nur auf „echten“ Fehlern. Es handelt sich somit, um eine Identifikation von Fehlern, welche sich selbst als irregulär definieren, also irreversible Veränderungen im Zustand eines diskreten Simulationsmodells (z.B. Brand, Explosion,...). Die Zielsetzung liegt demnach in der Fehlerbehebung bei der Modellerstellung und nicht in der Fehleridentifizierung und Diagnose des laufenden Systems. Eine strukturierte Analyse von Abhängigkeiten und eine Rückverfolgung von Fehlern zu ihren Ursachen in einzelnen Simulationsläufen bzw. Traces realer Anlagen können diese Verfahren nicht leisten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass aktuell keine Verfahren bzw. Ansätze für ein allgemeines Diagnose-Vorgehen zur Verfügung stehen, um intralogistische Systeme anhand von Trace- und/oder Log-Daten zu analysieren. Es ist demnach keine Methode bekannt, welche die strukturierte und systematische Suche nach systeminternen Schwachstellen sowie deren Ursachen ermöglicht. Aussagen zur inneren Funktionsgüte komplexer Materialflusssysteme sind somit kaum oder nur für stark eingeschränkte Zeitbereiche möglich.

So ist zum Beispiel in der Planungsphase die Analyse des Systems und das Auffinden von kritischen Einflüssen anhand des Simulationsmodells sehr stark von der Erfahrung des Experten und vom Zufall abhängig (vgl. DANGELMAIER et al. (2003)). Zwar ist die Prüfung formaler Anforderungen an das Gesamtsystem möglich, jedoch können nur Aussagen darüber getroffen werden, ob diese erfüllt werden oder nicht. Wie gut bzw. wie schlecht der vorliegende Systementwurf dies tut ist derzeit aufgrund riesiger Datenmengen nur mit sehr großem Aufwand ermittelbar.

Auf der Seite der Betreiber von Materialflussanlagen sind die Probleme ähnlicher Natur. Häufig wird der Fehler erst dann erkannt, wenn es zu einem Systemausfall kommt bzw. globale Leistungswerte aufgrund immanenter Irregularitäten im System nicht erfüllt werden. Die Suche nach den Ursachen für diese Systemausfälle (abgesehen von technischen Störungen) scheitert aufgrund der meist hohen Komplexität automatischer Materialflusssysteme bei der Identifizierung der suboptimalen Zustände im relevanten Betrachtungszeitraum.

1.2 Zielstellung

Ziel der Forschungsarbeit ist es, die Lücke zwischen dem vorhandenen Informationspotential und dessen derzeitigen Nutzung zu schließen. Hierzu werden Methoden und Algorithmen entwickelt, die eine strukturierte Suche nach suboptimalen Systemzuständen in Log-/Trace-Daten sowie eine Identifizierung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen bis zu den entsprechenden Primär-Ursachen für relevante Schwachstellen ermöglichen. Das System wird in erster Linie nicht global betrachtet. Vielmehr sollen anhand verfügbarer Protokoll-Daten verantwortliche Stellen/Anlageteile, an denen Fehler/Engpässe auftreten, gefunden sowie die Fehlerursachen identifiziert werden. Die Abbildung 1 verdeutlicht das Gesamtkonzept und die Zielstellung einer Software mit Wissensdatenbank und Regelkatalogen zur automatischen Diagnose komplexer Materialflusssysteme.

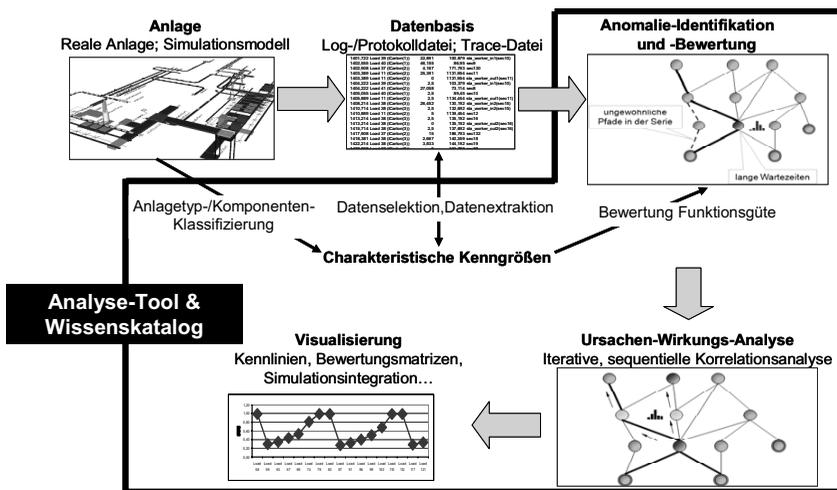


Abbildung 1: Gesamtkonzept und Zielstellung

Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Beschreibung des entwickelten Vorgehensmodells sowie des Analysekonzeptes, um die genannten Ziele sowie die in Abschnitt 2 dargestellte Differenziertheit der Problemstellung abbilden zu können. Der hier vorgestellte Forschungsansatz stellt eine praktikable Herangehensweise zur Entwicklung einer rechnergestützten, automatischen Analyse und Diagnose von komplexen Materialflusssystemen vor.

1.3 Motivation

Das Generieren von Traces aus Simulationen und deren Analyse ist auch nach KEMPER (2007) ein mächtiges Werkzeug zur Fehlersuche in Simulationsmodellen. Dem Planer soll eine Möglichkeit geschaffen werden, Simulationsläufe anhand der

Trace-Daten schnell und über den gesamten Ereignisraum auszuwerten. Hierdurch können gezielt die wahrscheinlichsten Primär-Ursachen – unabhängig vom verwendeten Simulationswerkzeug, vom betrachteten System sowie von der Art der Modellierung – identifiziert werden. Dem Planer/Betreiber werden somit Optimierungspotentiale für identifizierte Zeitbereiche oder Anlagenteile aufgezeigt. Bei Nicht-Erfüllung globaler Anforderungen (z.B. Durchsatz, DLZ) kann durch die vergangenheitsbezogene Diagnose der Protokolldaten zügig nach systeminternen Ursachen gesucht werden, um diese damit zukünftig zu vermeiden. Die Ergebnisse aus der Planungsphase – also aus der Trace-Analyse der Simulationsdaten – können für die Adaption der Diagnoseregeln für das reale System verwendet werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit eines späteren Abgleichs der Diagnoseergebnisse aus der Planung mit den Ergebnissen aus dem Betrieb. So ist es zum Beispiel denkbar, durch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse die Frage zu untersuchen, warum die globale Durchlaufzeit in der Realität höher ist als in der Simulation ermittelt.

Das folgende Beispiel soll an dieser Stelle die praktische Relevanz der genannten Zielstellungen noch einmal unterstreichen. Vor einiger Zeit wurde das Transportsystem einer Großmolkerei untersucht. Trotz an sich fehlerfreier Funktion wurden vereinzelt extrem lange Transportzeiten beklagt. Es stellte sich heraus, dass einzelne Nutzer die Abhängigkeit der Reaktionszeit von der Auftragslast ausnutzten. Sie lösten gezielt eine Überzahl von Auslagerungsaufträgen im Hochregallager aus, um schneller bedient zu werden. Die so entstandene „Blindlast“ an Retouren konnte seinerzeit nur durch Beobachtung und Aufschreibung (!) identifiziert werden.

2 Problembeschreibung

Ein allgemein nutzbarer Ansatz zur Analyse und Diagnose komplexer Materialflusssysteme muss vielfältigen Anforderungen genügen. Die Ereignisdaten können von unterschiedlicher Struktur und von stark variierendem Informationsgehalt sein. Dies liegt zum Einen an der Vielfalt der Anlagen selbst und zum Anderen an dem gegebenen Kontrast zwischen Simulationsdaten und Daten realer Anlagen. Demnach gestaltet sich die Datenerhebung, die anschließende Datenverwaltung und -auswertung aus informationstechnischer Sicht verhältnismäßig schwierig. Weiterhin besitzt die Variationsbreite der jeweils globalen Anlageziele und -anforderungen mit heterogenen Gewichtungen einen unmittelbaren Einfluss auf die Analyse. Die Diagnose- und Analysemethoden sind daher modular aufzubauen, sodass diese bezüglich der spezifischen Anforderungen des analysierten Materialflusssystems harmonisiert bzw. optimiert und gegebenenfalls geändert werden können. Um dieses adaptive Verhalten methodisch umzusetzen sind die Relevanz von Merkmalen und Kenngrößen bezüglich des betrachteten Systems im Vorfeld festzustellen sowie die Verknüpfungen zwischen Kenngrößen und Wirkungen zu sondieren.

Ebenso wie in zahlreichen anderen Forschungsvorhaben besteht auch hier das Problem der Übertragung von empirischen Erfahrungen der Experten in die Diagnosemethoden bzw. in das Software-Tool. Die Notwendigkeit eines Eingabemodells zur effizienten Katalogisierung und Verwaltung von Wissen liegt auf der Hand. Zusätzlich stellt sich die Frage: „Welche Meta-Informationen neben den Ereignisdaten sind sinnvoll und durch den Anwender mit relativ geringem Aufwand einzugeben?“.

Neben den bereits aufgeführten konstitutiven Einflussfaktoren auf die Entwicklung eines Diagnoseansatzes lassen sich weitere multiple Probleme anführen. Die im Folgenden gelisteten Punkte geben einen Auszug:

- Welchen Einfluss haben die Fördermittel auf die Kenngrößen und Diagnoseregeln?
- Wie ist mit Inkonsistenzen/Redundanzen in den Daten bei der Betrachtung eines Gesamtsystems, welches aus mehreren verschachtelten Subsystemen besteht und somit der Ereignisraum aus verschiedenen Datenquellen stammt, umzugehen?
- Wie hoch ist die Kontinuität der Datenerfassung?
- Welchen Einfluss hat die Steuerungs- bzw. Modellierungslogik auf die Diagnose?
- Welche Kern-Attribute sind unabhängig vom betrachteten Materialflusssystem in den Protokolldaten für jedes Ereignis generell vorhanden?
- Welche weiteren Ereignisattribute können aus dem Simulationswerkzeug extrahiert werden? Welche sind, bezüglich eines tatsächlichen Informationsgewinns für die Diagnose, sinnvoll zu extrahieren?
- In welchem Format liegen die Daten vor?

An dieser Stelle zusätzlich zu nennen ist vor allem das Risiko des Mangels an relevanten Informationen zum Beispiel von internen Variablen der Steuerungslogiken. Es gilt demnach abzuschätzen, inwieweit eine Interaktion durch den Nutzer vor der Diagnose notwendig bzw. zweckmäßig ist, um den Erfolg der Diagnose zu gewährleisten. Eine Empfehlung zur Erstellung von Trace-Daten – welche Ereignisattribute sollten erfasst werden, um die angestrebte Diagnose durchführen zu können – ist gegebenenfalls ein zusätzliches Ergebnis der Forschungsarbeit.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Komplexität der Problemstellung im Wesentlichen aus der Systemsicht heraus geprägt wird. Diese Sicht besteht hauptsächlich nur aus den Informationen in den Ereignisdaten und begleitend aus den bisher nicht quantifizierten Metainformationen (z.B. Systemquellen und -senken).

3 Vorgehen

Die Zielstellung, eine Software mit Wissensdatenbank und Regelkatalogen zur automatischen Diagnose komplexer Materialflusssysteme zu entwickeln, erfordert einen mehrstufigen Entwicklungsprozess. Die Komplexität, der Anspruch an einen allgemein verwertbaren Lösungsansatz und die Vielseitigkeit der in Abschnitt 2 genannten Probleme sind nur durch eine geeignete Herangehensweise zu beherrschen. Hierfür wurde der gesamte Entwicklungsprozess in 3 Phasen unterteilt und ein Vorgehensmodell für die Implementierung eines auf breiter Ebene einsetzbaren Software-Tools zur Materialflussdiagnose entwickelt. Die Abbildung 2 fasst die Entwicklungsphasen sowie die jeweiligen Zielsetzungen und Restriktionen zusammen.

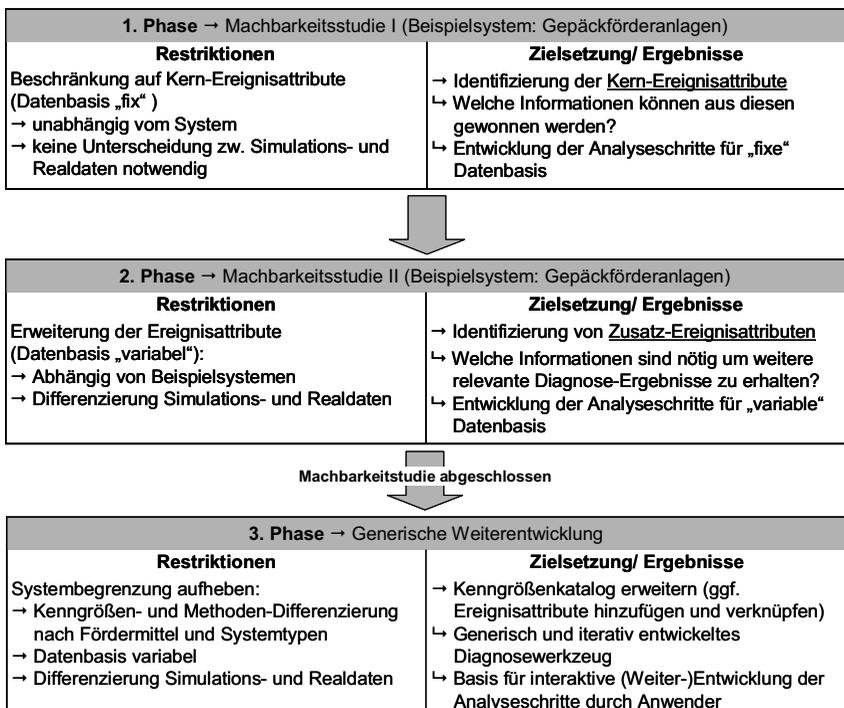


Abbildung 2: Entwicklungsphasen zur systemgestützten Materialflussdiagnose

Für jede Phase im Vorgehensmodell werden die in Abschnitt 4 beschriebenen Analyseschritte (vgl. Abbildung 4) entwickelt bzw. weiter qualifiziert. Nach Abschluss der ersten Phase existiert somit bereits ein erster Demonstrator zur Analyse und Diagnose für ausgewählte Beispielsysteme und eingeschränkter Datenbasis. Dieser wird in der zweiten und dritten Entwicklungsphase jeweils erweitert, zum einen für weitere Materialflusssysteme und zum anderen für variierende Datenbasen.

Zum Zweck einer ersten Machbarkeitsstudie erfolgen die derzeitigen Untersuchungen in der ersten Phase anhand repräsentativer Beispielsysteme, speziell an Gepäckförderanlagen. Aufgrund ihrer langen spurgebundenen Förderstrecken (bis über 90km) mit zahlreichen Verzweigungen und Zusammenführungen sowie strikten Anforderungen (ein Koffer soll in einer vorgegebenen Zeit von A nach B gelangen) sind diese Systeme hierfür besonders geeignet. Zwar besitzen Gepäckförderanlagen nicht alle typischen Charakteristika komplexer Systeme (vgl. ZSIFKOVITS/KRENN (2007)), jedoch sind sie für den Planer (Betreiber) allein wegen ihrer enormen Größe zu unübersichtlich, um eine vollständige Diagnose durchführen zu können. Hinzu kommt die Notwendigkeit zwischen verschiedenen Fördergütern (Koffer, Leerschale, Schale mit Koffer) mit unterschiedlicher Transportpriorität zu unterscheiden, wodurch die Komplexität der Diagnoseaufgabe steigt.

Derzeit werden die Analyseschritte, der Identifikation, der Bewertung und der Diagnose für die erste Phase entwickelt. Ziel dieser Phase ist es aus einer gegebenen elementaren Datenstruktur sämtliche, für die Diagnose relevanten Informationen zu gewinnen, zu interpretieren und die Ergebnisse adäquat zu visualisieren. Durch die Untersuchung verschiedenster Trace- und Log-Files von Materialflusssystemen wurden drei Kernereignisattribute identifiziert:

- Der **Ort** des Ereignisses als Punkt im System, an dem das Ereignis stattgefunden hat (z.B. eine Lichtschranke als Ereignisgeber).
- Die **ID** des Förderguts, welche das Ereignis betrifft (z.B. Kofferkennzeichnung, Produktnummer).
- Der **Zeitstempel** als Ereigniszeitpunkt.

Diese Ereignisattribute sind Informationen, welche aus der Simulation und in den Protokollen realer Anlagen gleichermaßen enthalten bzw. abfragbar sind. Sie sollten (nach Auffassung der Autoren) Bestandteil jeder Ereignisdatenmenge eines Materialflusssystems, und zwar unabhängig vom Systemtyp, sein. Der bereits existierende Demonstrator ermöglicht es die Informationen aus den Kern-Ereignisattributen – unabhängig von der Anzahl der Ereignisse – zu extrahieren bzw. zu verdichten. So bietet der in Abschnitt 4.1 beschriebene *PerformanceIndex* bereits die Möglichkeit ausgewählte Transportzeiten zu bewerten und zu vergleichen. Hierbei wurden, im Hinblick auf die Ergänzung und Wiederverwendbarkeit der bereits implementierten Analyseschritte in den späteren Entwicklungsphasen, die jeweiligen Methoden und Regeln modular aufgebaut. Derzeitig werden Methoden entwickelt, um relevante von weniger sinnvollen extrahierten Informationen oder Kenngrößen zu unterscheiden.

Die Konzentration auf die genannten drei Ereignisattribute in der ersten Entwicklungsphase hat den Vorteil, dass die Differenzierung zwischen Simulationsdaten und Log-Files von realen Anlagen an dieser Stelle nicht notwendig ist. Ebenso ist in der ersten Phase eine detaillierte Unterscheidung zwischen verschiedenen Fördermitteln

nicht erforderlich. Einzige Bedingungen sind, dass es sich um spurgebundene Fördermittel handelt und dass für spurgebundene Unstetigförderer (z.B. Regalbediengerät oder Verschiebewagen) zwischen Last- und Leerfahrten unterschieden werden kann. Die Wahl der Gepäckförderanlagen als repräsentative Beispielsysteme zeigte in diesem Zusammenhang einen weiteren Vorteil, denn diese Anlagen bestehen in der Regel aus stetigen und unstetigen Förderabschnitten. Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt des Simulationsmodells einer Gepäckförderanlage sowie einen Auszug aus den Ereignisdaten der Trace-Datei mit den drei Kernereignisattributen.

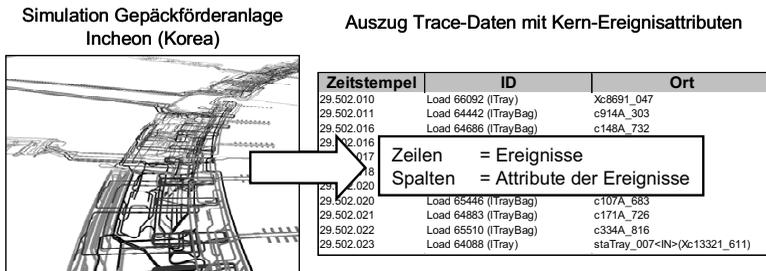


Abbildung 3: Beispiel einer Gepäckförderanlage mit Auszug aus Trace-Daten

In der zweiten Entwicklungsphase erfolgt die Erweiterung der elementaren Informationsbasis und damit verbunden auch der Analyse- und Diagnosemöglichkeiten. Das quasi vorhandene zusätzliche Informationspotential der Simulation gegenüber den Protokollen realer Anlagen wird somit für die Diagnose nutzbar gemacht. Ziel ist dabei keineswegs eine ganzheitliche Betrachtung aller denkbaren, aus der Simulation zu extrahierenden, Ereignisattribute. Vielmehr sollen möglichst relevante zusätzliche Attribute gefunden werden, welche die Diagnoseergebnisse signifikant verbessern. Als Ergebnis könnte unter anderem ein Vorschlag entstehen, welche Daten zusätzlich abzufragen sind, um bestimmte systeminterne Verhaltensmuster identifizieren zu können. Für die zweite Entwicklungsphase empfiehlt sich demnach im Gegensatz zur ersten ein teilweises rekursives Vorgehen. Es wird somit nicht versucht ausgehend von einer fixen Datenbasis den maximalen Informationsgehalt zu gewinnen, sondern es ist vielmehr die Frage zu beantworten „Welche Daten werden benötigt, um die gewünschte Analyse/Diagnose durchführen zu können bzw. um die gewünschten Ergebnisse zu erhalten?“

In der dritten Phase werden bisher nicht betrachtete Systemtypen / -komponenten, wie zum Beispiel Sortieranlagen oder Regalbediengeräte untersucht. Ausgehend von den (in den beiden vorherigen Phasen) entwickelten und implementierten Modulen der Analyseschritte zur Berechnung der Kenngrößen und für die Analyse- sowie Diagnosemethoden werden Kenngrößen und entsprechenden Diagnoseregeln für bisher nicht berücksichtigte Systeme und Systemkomponenten entwickelt. Der Vorteil liegt hierbei in der Möglichkeit, bereits vorhandene Module für neue Anlagentypen zu

testen und diese gegebenenfalls nur anzupassen. Dieses Vorgehen bedingt jedoch, dass sich die späteren Ergänzungen/Erweiterungen mit relativ geringem Aufwand hinzufügen lassen. Bereits umgesetzte Module sollen im optimalen Fall die Grundlage für Neuerungen darstellen, sodass jeder erfolgreiche Iterationsschritt eine Aufwandsreduzierung für die nächsten bedeutet. Die Modularisierung des Diagnose-Tools und die bedienerfreundliche Gestaltung der GUI für eine interaktive Analyse, stellen gleichermaßen Herausforderungen für die Methoden selbst sowie deren Implementierung dar. Diese Entwicklungsphase ist mit dem Erreichen des Ziels, eine Grundlage (Basismodule, Standard-Diagnoseregeln, intuitive Benutzeroberfläche,...) für die interaktive und generische Weiterentwicklung des Diagnosewerkzeuges geschaffen zu haben, abgeschlossen. Der iterative Prozess der Weiterentwicklung während der Anwendung und damit das stetige Erweitern der Wissensbasis ist soweit vorzubereiten, dass der Nutzer relativ einfach eigene, für seinen spezifischen Anwendungsfall relevante, Kenngrößen, Regeln, Funktionen usw. erstellen kann.

4 Analyseschritte

Entsprechend dem in Abschnitt 3 beschriebenen Vorgehen sind für jede Entwicklungsphase die Analyseschritte (vgl. Abbildung 4)

- der **Identifikation** von suboptimalen Systemzuständen bzw. Abweichungen vom Normalfall,
- deren **Bewertung**
- sowie der abschließenden **Diagnose** zur Bestimmung von Primär-Ursachen und deren Wirkungsbeziehungen modular zu entwickeln sowie zu implementieren.

Hierbei sind in jeder Phase der Entwicklung die Anforderungen

- an eine stetige Erweiterung des Softwarewerkzeuges,
- an eine interaktive Analyse – schneller Zugriff auf verschiedene Kenngrößen, geeignete Visualisierung
- sowie an ständig erweiterbare Analyse- und Diagnosemethoden – flexible Anwendung und Kombination der Kenngrößen durch den Anwender selbst –

durch einen modularen Aufbau der Kenngrößenberechnungen, Analysemethoden und Diagnoseregeln zu berücksichtigen. Ausgehend von Basismodulen müssen neue Module gebildet und diese wiederum zu weiteren Modulen zusammengefasst werden können.

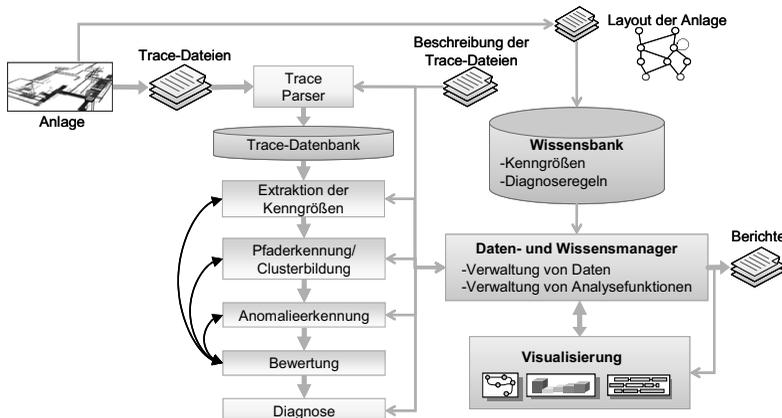


Abbildung 4: Analyseschritte für die Phasen im Vorgehensmodell

Die folgenden Unterabschnitte beschreiben jeweils den wesentlichen Inhalt sowie die Ziele der Analyseschritte. Auf die differierenden Anforderungen und Ergebnisse, die sich aus den Phasen des Vorgehensmodells ergeben, wird nicht extra eingegangen.

4.1 Identifikation

Im ersten Analyseschritt werden die internen Systemzustände – Ereignisse und Ereignisketten – identifiziert, welche eine Abweichung vom Normal- bzw. Optimalfall bedeuten. Aus der durch den Ereignisraum vorgegebenen Systemsicht können Abweichungen vom Normalfall für spezifische Kenngrößen nach beiden Seiten auftreten. Aus der Datenbasis werden, entsprechend den Fördermitteln, zwischen zwei benachbarten Ereignispunkten Kenngrößen berechnet und die Ereignisse bewertet. Hierzu sind eine Katalogisierung der Kenngrößen und die Verknüpfung zu den entsprechenden Fördermitteln erforderlich, um die jeweiligen für den Materialfluss relevanten Merkmale der Fördererlemente zu berücksichtigen. Die Klassifizierung der Fördererlemente nach analytischen sowie diagnostischen Gesichtspunkten auf Basis der gängigen systemtechnischen Einordnung (vgl. JÜNEMANN/SCHMIDT (2000)) ist dem Einfluss der Fördermittel auf die Kenngrößen und Diagnoseregeln geschuldet und dient der Zentralisierung gleicher Kenngrößen für verschiedene Systemelemente. Die Datenauswertung erfolgt demnach auf der Grundlage des Informationsgehalts zwischen zwei benachbarten Ereignispunkten und berücksichtigt somit die Klasse des Fördererlementes dazwischen. Dies stellt für Simulationsdaten insofern kein Problem dar, da die notwendigen Ereignisse relativ leicht während des Simulationslaufes aufgezeichnet und z.B. in einzelnen Traces ausgegeben werden können. Für die Analyse von Ereignisdaten realer Anlagen ist dieses Vorgehen ungleich schwieriger, da eine Gleichheit der Systemelemente zwischen zwei Ereignisgebern nicht vorausgesetzt werden kann.

Im ersten Teil der Analyse werden demnach die eventuell vorhandenen einzelnen Trace-Daten der Teilsysteme nach dem Zeitstempel sortiert und zu einem Ereignisraum für das Gesamtsystem zusammengefasst. Im Anschluss daran erfolgt das Auslesen der Topologiestruktur aus der Datenbasis. Die Ereignispositionen (analog den Knoten in der Graphentheorie) werden als „State“ bezeichnet und direkte Verbindungen zwischen zwei States als „Transition“ (analog den Kanten in der Graphentheorie). Für das Erstellen des State-Transition-Modells sind keine zusätzlichen Informationen erforderlich, jedoch wird hierbei ein wesentlicher Nachteil der ereignisgeprägten Systemsicht deutlich. Schleifen im System sind unter Umständen für das Diagnose-Tool nicht „sichtbar“, wenn diese von keinem Fördergut im betrachteten Zeitraum befahren wurden und somit keine Ereignisse auf deren Existenz hindeuten. Daher wird die Möglichkeit des Imports der Topologiestruktur aus anderen Datenquellen in Betracht gezogen. Neben den stationären Entities State und Transition existiert das bewegte Objekt des Fördergutes (Load bezeichnet). Aufbauend auf dieser elementaren Objektivierung der Sichtweisen auf das System können nun weitere Objektinstanzen hierarchisch zugeordnet werden. So sind zum Beispiel Systemquellen oder -senken Teilmengen von State bzw. Pfade eine Gruppierung von bestimmten Transitionen. Diese Herangehensweise dient der Modularisierung und wird der Hierarchie der Kenngrößen bzw. der Mengenrelationen für die Berechnung gerecht. Ebenso wird die Möglichkeit jederzeit neue Elemente hinzuzufügen und einzuordnen gewährleistet.

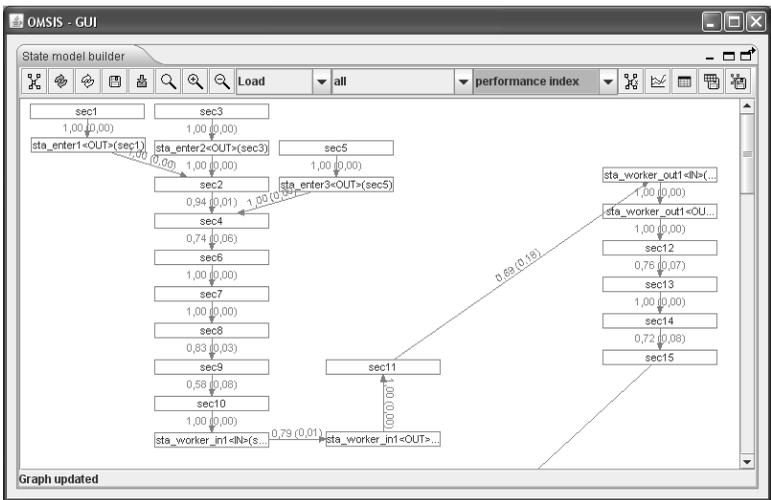


Abbildung 5: Screenshot des Demonstrator (Visualisierung PerformanceIndex an den Transitionen)

Die derzeitige Forschung befindet sich in der ersten Phase des Vorgehensmodells und konzentrierte sich vor allem auf die Informationsgewinnung aus den drei elementaren Kern-Ereignisattributen und deren Interpretation. Die folgende Liste zeigt einen

Auszug bereits implementierter primärer und sekundärer Kenngrößen, welche auf Basis der drei Ereignisattribute (Ort, ID, Zeit) ermittelt werden und im Demonstrator am State-Transition-Modell visualisiert werden können (Abbildung 5):

- *TraceTime*:
Förderzeit für eine Load L_{ID} von einem direkten Vorgänger-State ($i-1$) zur State (i)
- *TimeInSystem*:
Durchlaufzeit einer Load L_{ID} bis zum jeweiligem State (i)
- *InterArrivalTime*:
Ankunftsabstand in [ZE] zwischen zwei aufeinanderfolgender Loads L_{ID} an einem State (i)
- *VertexDegree*:
Knotengrad des States (i), Anzahl der Kanten an einem Knoten (vgl. TITTMANN (2003))
- *LoadCounter*:
Zähler für Loads L_{ID} je State (i) oder Transition ($p(i-1;i)$)

Diese und andere primäre Kenngrößen stellen somit den ersten Schritt zur Informationsgewinnung und -verdichtung dar und bilden die Basis für die Berechnung sekundärer Kenngrößen.

- *minTraceTime* ($t_{p(i-1,i),\min}$):

Minimum von *TraceTime*, welche eine Fördereinheit für die Transition $p(i-1;i)$ im betrachteten Ereignisraum benötigt hat

$$t_{p(i-1,i),\min} = \underset{L_{ID} \in ID_{p(i-1,i)}}{\text{Min}} \left[t_{p(i-1,i),L_{ID}} \right]$$

Gleichung (1)

für:

$$\forall L_{ID} \in ID_{p(i-1,i)}; p(i-1,i) \in P; i \in I; ID_{p(i-1,i)} \in ID$$

- *PerformanceIndex* ($PI_{L_{ID},p(i-1,i)}$):

Normierung von *minTraceTime* zu *TraceTime*, um Vergleichbarkeit zwischen Transitionen verschiedener Länge und Fördergeschwindigkeit zu gewährleisten

$$PI_{L_{ID},p(i-1,i)} = \left[\frac{t_{p(i-1,i),\min}}{t_{p(i-1,i),L_{ID}}} \right]$$

Gleichung (2)

für:

$$L_{ID} \in ID_{p(i-1,i)}; p(i-1,i) \in P; i \in I; ID_{p(i-1,i)} \in ID$$

wobei gilt:

$$\text{wenn } t_{p(i-1,i),\min} = t_{p(i-1,i),L_{ID}} \quad \text{ist } PI_{L_{ID},p(i-1,i)} = 1;$$

$$\text{wenn } t_{p(i-1,i),\min} = 0 \text{ und } t_{p(i-1,i),L_{ID}} > 0 \quad \text{ist } PI_{L_{ID},p(i-1,i)} = 1$$

Anhand der Gleichungen (1) und (2) wird deutlich, dass die Schwierigkeit bisher nicht in der Berechnung selbst liegt, sondern, wie die aufwendige Indizierung zeigt, in der Berücksichtigung der Anforderungen an einen modularen Aufbau. Dem Anwender soll die Möglichkeit gegeben werden, sämtliche Größen auch nur für Teile des Ereignisraumes zu berechnen bzw. die zu Grunde gelegten Mengenrelationen ggf. nach eigenen Vorgaben anzupassen. Ebenfalls wird die notwendige spezifische Berechnung einzelner Kenngrößen für gebildete zeitliche oder topologische Cluster in den anschließenden Analyseschritten der Bewertung und Diagnose durch eine von Beginn an konsequente und systematische Modulbauweise erleichtert.

Für die primären und sekundären Kenngrößen sind in diesem Analyseschritt Untersuchungen bezüglich Ihrer Interpretationsfähigkeit durchzuführen. Es sind demnach Wertebereiche zu definieren, statistische Muster zu erkennen, geeignete Darstellungsformen zu wählen und sinnvolle Verknüpfungen mit den ggf. vorhandenen Meta-Informationen herzustellen, um als Ergebnis relevante Anomalien oder Abweichungen zu identifizieren. Ebenso erwies sich die Berechnung statistischer Maßzahlen für einzelne Kenngrößen bzw. Bereiche und deren Vergleich mit anderen Clustern als sinnvoll. Obwohl nicht zwingend notwendig, kann eine adäquate Chart-Visualisierung einzelner oder mehrere Kenngrößen an dieser Stelle das Ergebnis dem Anwender aufzeigen und dadurch gleichzeitig die Akzeptanz erhöhen. Der wesentliche Inhalt des Analyseschrittes der Identifikation ist in Abbildung 6 dargestellt.

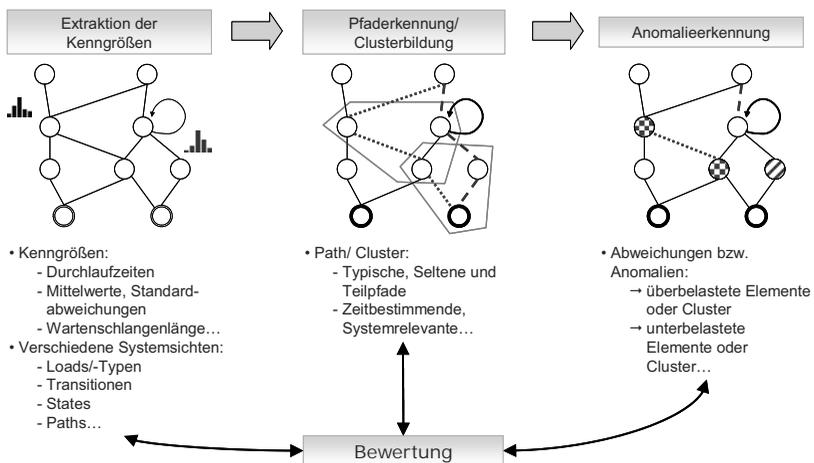


Abbildung 6: Adaptive Analyse – Identifikation & Bewertung

Im nächsten Abschnitt wird nun die Bewertung der identifizierten Ereignisse bzw. berechneten Kenngrößen vorgenommen. Der Übergang zwischen diesen beiden Analyseschritten ist in der Realität fließend und nur zum Zweck der Übersichtlichkeit in diesem Beitrag schärfer abgegrenzt.

4.2 Bewertung

Wie in Abschnitt 4.1 bereits erwähnt, sind die Kenngrößen im Hinblick auf die Aussagefähigkeit zur systeminternen Funktionsgüte zu interpretieren. Die Bewertung der Abweichungen vom Normalfall aus Schritt 1 dient der Interpretation. So sind anhand der im ersten Schritt einzeln berechneten Kenngrößen über den gesamten Zeitraum durch deren Bewertung relevante Zeitperioden zu erkennen. Hier liefern zum Beispiel die Häufigkeit von auftretenden Abweichungen für die Größe *TraceTime* oder eine besonders hohe Durchlaufzeit (*TimeInSystem*) in bestimmten Perioden gute Anhaltspunkte für eine zweckdienliche Diskretisierung des Betrachtungszeitraumes in äquidistante oder auch nicht äquidistante Zeitperioden. Neben diesen zeitlichen Clustern ist auch ein topologisches Clustering für die Bewertung sowie die Beherrschung der Datenmenge hilfreich. Die Kenngröße des *VertexDegree*, die Häufigkeit der Nutzung topologischer Elemente (*LoadCounter*) geben zum Beispiel Hinweise auf sinnvolle Cluster bzw. auf kritische für die Analyse interessante States oder Transitionen. Für diese gebildeten Cluster können nun spezifischere Werte relevanter Kenngrößen berechnet, verglichen und erneut interpretiert werden. Dieses repetierende Vorgehen – Kenngrößen berechnen, Cluster bilden, Abweichungen identifizieren, Bewertung, Cluster anpassen (...) – dient der adaptiven Analyse, um möglichst ausschlaggebende und sinnvoll interpretierbare Abweichungen vom Normalfall als Anomalien zu identifizieren.

Eine abschließende Klassifizierung der identifizierten „echten“ Anomalien nach bestimmten Merkmalen, wie zum Beispiel der Anomalie-Art, -Ausprägung, -Häufigkeit oder nach ihrer zeitlichen Ordnung bzw. nach statistischen Maßzahlen, dient der Priorisierung für den Diagnoseschritt. Diese Grobplanung für den im Folgenden beschriebenen Schritt der Ursachen-Wirkungs-Analyse, soll die Effizienz der Suche nach den Primärursachen steigern. Denn generell kann ein Ereignis die Ursache für mehrere Anomalien sein, aber auch gleichzeitig die Folge mehrere unerwünschter Systemzustände darstellen. An dieser Stelle besteht jedoch noch einiger Forschungsbedarf und es können derzeit keine validierten Aussagen bezüglich einer automatischen Anomalieklassifizierung getroffen werden.

4.3 Ursachen-Diagnose

Das Ziel dieses letzten Analyseschrittes besteht in der Identifizierung von so genannten Schlüsselereignissen. Mit Hilfe einer iterativen, sequentiellen Korrelationsanalyse sollen auf Basis der Bewertungscluster und der Klassifikation aus dem vorangegangenen Schritt die Primär-Ursachen für suboptimales Flussverhalten im System ermittelt werden. Diese automatische Ursachen-Diagnose ist ungleich schwieriger als die Berechnung der Kenngrößen. Mit Hilfe der statistischen Korrelationsrechnung ist es zwar möglich zwischen 2 Merkmalen bzw. Kenngrößen relativ leicht einen rechnerischen Zusammenhang zu ermitteln, jedoch liegt die Komplexität in der sinnvollen In-

terpretation des errechneten Zusammenhangmaßes. Diese Interpretation ist schon zum Teil manuell für nur wenige Erscheinungen bzw. Merkmale schwierig, da aus einem ganz nahe an „1“ liegenden Korrelationskoeffizienten oder Korrelationsverhältnisses noch nicht auf einen unmittelbaren ursächlichen Zusammenhang der beiden Erscheinungen in dem Sinne, dass die eine die „Ursache“ der anderen wäre, geschlossen werden darf. Es kann eine hohe Korrelation zwischen zwei Merkmalen auch dadurch zustande kommen, dass beide durch einen übergeordneten Erscheinungskomplex beeinflusst werden. Die systemgestützte Interpretation und damit verbundene mathematische Formalisierung gestaltet sich demnach als schwierig und es ist zu erwarten, dass eine zielführende Ursachen-Diagnose ganz ohne Interaktion mit dem Nutzer nur schwer zu realisieren ist. Das Eingeben und die automatische Katalogisierung von Nutzer-Diagnose-Regeln in einem Expertensystem sollen die Ursachen-Diagnose effizient gestalten und das Erfahrungswissen von Experten nutzbar machen. Die Diagnoseregeln können zum Beispiel folgende Typen sein:

- Regeln für Fehlersymptome zur schnellen Fehlererkennung, z.B. in der Form **IF** „PerformanceIndex < 0.1“ **THEN** „Löse Alarm_1 aus“. Auch komplexe Ereignisse sind hier denkbar.
- Ursache-Wirkungs-Beziehungen, z.B. in der Form **IF** „Durchlaufzeit > 10“ **UND** „Anzahl der Schleifen > 10“ **UND** Typ = „Leergut“ **THEN** „Meldung: Das Leergut hat eine niedrige Priorität“
- Beratung bei der Auswahl von Analysefunktionen, z.B. in der Form **IF** „Förderelement = Stapler“ **THEN** „Wende Funktion Warteschlangenanalyse an“

Die Anwendung statistischer Verfahren, hier auf intralogistische Daten, kann keine absoluten Aussagen liefern, jedoch sollen sie helfen, die wahrscheinlichsten Schlüsselereignisse für suboptimales Verhalten im System aufzuzeigen. Bei der Trace-Erzeugung zum Beispiel für ein Simulationsmodell einer Gepäckförderanlage mit ca. 35 km Förderstrecke wurden für 8h simulierter Zeit mit realen Inputszenarien mehr als 35 Millionen Ereignisse erfasst. Die Identifizierung der Primärursachen für eine systeminterne Reduzierung der Funktionsgüte würde zu einer massiven Komplexitätsreduktion führen und eine zielgerichtete lokale Systemoptimierung durch den Simulationsexperten bzw. auch später durch den Betreiber ermöglichen. An dieser Stelle sei noch einmal darauf verwiesen, dass es nicht Ziel ist konkrete Optimierungsmaßnahmen vorzuschlagen, dies scheint ohnehin aufgrund der Komplexität nicht möglich, sondern systeminterne Schwachstellen aufzuzeigen und deren Ursachen zeitlich sowie örtlich zu lokalisieren. Dem Planer oder Betreiber werden somit gezielt mögliche Optimierungspotentialen aufgezeigt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt ein Konzept eines systematischen Ansatzes zur Analyse und Diagnose intralogistischer Datenströme von Materialflussrechnern oder aus der Simulation

vor. Ziel ist es, Schwachstellen und suboptimale Systemzustände zu identifizieren und anschließend deren Primär-Ursachen zu ermitteln, um systeminterne Leistungsreserven besser nutzen zu können. Zwar ist die vollkommen automatische Feststellung von Problemursachen immer noch nicht möglich und aufgrund der Komplexität der Systeme auch nicht sinnvoll. Allerdings soll durch ein strukturiertes Vorgehen, interaktive Visualisierung und automatische Berechnung und Selektion von relevanten Kenngrößen die Information aus den Log-Files auf relevantes reduziert und dadurch für einen Analytiker beherrschbar gemacht werden. Durch den systematischen iterativen Aufbau der Wissensbasis mit Diagnoseregeln und -ergebnissen werden die bei der Analyse entstehenden Erkenntnisse nachhaltig aufbewahrt und wiederverwendet. Der modulare Aufbau des Analysetools soll es erlauben, nur die passenden Analysefunktionen auf die aktuellen Daten anzuwenden, um damit der immensen Heterogenität der Anlagen und ihrer Teile gerecht zu werden.

Der implementierte Demonstrator des Analysetools enthält bereits die Module zur Identifikation der Anlagentopologie und Berechnung von Kenngrößen anhand der Kern-Ereignisattribute aus den Trace-Daten, sowie zur Visualisierung. Dadurch wird bereits die Erkennung der Fehlerwirkungen und die interaktive Rückverfolgung der Fehlerursachen ermöglicht, was die ersten manuellen Tests zeigen. In den nächsten Schritten sollen die Module implementiert werden, die eine intuitive Erfassung und Anwendung von Diagnoseregeln unterstützen, wofür ein Expertensystem eingesetzt werden soll. Die ersten Analysen haben deutlich gezeigt, dass die bequeme Verwaltung von Daten und Analysemodulen sowie eine ansprechende Visualisierung der Analyseergebnisse und -vorgänge eine enorme Rolle für die Akzeptanz und die Effizienz der Diagnose spielen, sodass hier ein weiterer Bedarf zur Weiterentwicklung besteht. Ferner soll die erste Entwicklungsphase abgeschlossen werden und gemäß der zweiten weitere Kenngrößen sowie Module implementiert werden.

Info:

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln aus dem Haushalt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto-von-Guericke“ e.V. (AiF) im Auftrag der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. gefördert.

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt
E-Mail: thorsten.schmidt@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. David Wustmann
E-Mail: david.wustmann@tu-dresden.de

Anschrift:

Technische Universität Dresden
Fakultät Maschinenwesen
Professur für Technische Logistik
101062 Dresden

Dipl.-Ing. Volodymyr Vasyutynskyy
E-Mail: vv3@inf.tu-dresden.de

Anschrift:

Technische Universität Dresden
Fakultät Informatik
Lehrstuhl für Technische Informationssysteme
101062 Dresden

Symbole

| | |
|------------------------|--|
| i | <i>EventPosition</i> : Position (i), ($i-1$) ist direkte Vorgänger-EventPosition von (i); $i \in I$ |
| I | Menge aller möglichen <i>EventPositions</i> (i) im System |
| $ I $ | Mächtigkeit der Menge I |
| L_{ID} | <i>LoadID</i> : ID der Load (engl. für Fördereinheit), Kennzeichnung des Transportgutes zur Identifikation; $L_{ID} \in ID$ |
| ID | Menge aller <i>LoadID</i> 's (L_{ID}), alle Loads welche im betrachteten Trace-File Ereignisse erzeugten |
| $ ID $ | Mächtigkeit der Menge ID |
| $ID_{p(i-1,i)}$ | Menge der Loads (L_{ID}) welche die Transition $p(i-1;i)$ befahren haben; $ID_{p(i-1,i)} \in ID$ |
| $ ID_{p(i-1,i)} $ | Mächtigkeit der Menge $ID_{p(i-1,i)}$ |
| $p(i-1;i)$ | <i>Transition</i> : Übergang/Weg von der Vorgänger-EventPosition ($i-1$) bis zur EventPosition (i); $p(i-1;i) \in P$ |
| P | Menge aller Transitionen $p(i-1;i)$ |
| $ P $ | Mächtigkeit der Menge P |
| $PI_{L_{ID},p(i-1,i)}$ | <i>PerformanceIndex</i> : Verhältnis von MinTraceTime ($t_{p(i-1,i),\min}$) einer Load (L_{ID}) zu TraceTime ($t_{p(i-1,i),L_{ID}}$) für die Transition $p(i-1;i)$; $PI_{L_{ID},p(i-1,i)} \in [0,1]$ |
| $t_{p(i-1,i),L_{ID}}$ | <i>TraceTime</i> : Zeit der Load (L_{ID}) für die Transition $p(i-1;i)$, Zeitbedarf der Load (L_{ID}) für den Weg von der direkten Forerunner-EventPosition ($i-1$) zur EventPosition (i); $t_{p(i-1,i),L_{ID}} \in \mathfrak{R}^+$ in $[ZE]$ |
| $t_{p(i-1,i),\min}$ | <i>MinTraceTime</i> : Minimale-TraceTime; kürzeste Zeit welche eine Load (L_{ID}) für die Transition $p(i-1;i)$ im Ereignisraum E benötigt hat; $t_{p(i-1,i),\min} \in \mathfrak{R}^+$ in $[ZE]$ |

Literatur

BETTER, MARCO; GLOVER, FRED; LAGUNA, MANUEL (2007): *Advances in analytics: Integrating dynamic data mining with simulation optimization*. In: IBM Journal of Research and Development, Bd. 51 (2007), Nr. 3/4, S. 477-487

BONNANS, JOSEPH FRÉDÉRIC; SHAPIRO ALEXANDER (2000): *Perturbation analysis of optimization problems*. New York: Springer

- BRATLEY, PAUL; FOX, BENNETT L.; SCHRAGE, LINUS E. (1987): *A guide to simulation*. New York: Springer
- DANGELMAIER, WILHELM; FRANKE, WERNER; MUECK, BENGT; FISCHER, MATTHIAS (2003): *Komponenten zur aktiven Unterstützung der Analyse von Materialflusssimulationen in virtuellen Umgebungen*. In: GAUSEMEIER et al. (Hrsg.): 2. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Band 123. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe, S. 141-151
- FISHMAN, GEORGE S. (2001): *Discrete-event simulation – Modelling, programming, and analysis*. New York: Springer (Springer series in operations research)
- GORDON, DANIEL M.; KEMPER, PETER (2007): *On Clustering Simulation Traces*. In: Proceedings Eighth International Workshop on Performability Modeling of Computer and Communication Systems (PMCCS-8 2007), Edinburgh, Scotland, UK
- JÜNEMANN, REINHARDT; SCHMIDT, THORSTEN (2000): *Materialflusssysteme – Systemtechnische Grundlagen*. 2. Auflg. Berlin, Heidelberg: Springer
- KEMPER, PETER; TEPPER, CARSTEN (2005): *Trace based analysis of process interaction models*. In: KUHL, M. E. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 37th Winter Simulation Conference. ACM, S. 427-436
- KEMPER, PETER; TEPPER, CARSTEN (2007): *Automated Analysis of Simulation Traces – Separating Progress from Repetitive Behavior*. In: Proceedings 4th Int. Conference on Quantitative Evaluation of Systems, IEEE CS Press, S. 101-111
- KEMPER, PETER (2007) : *A trace-based visual inspection technique to detect errors in simulation models*. In: HENDERSON, S. G. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference, S. 747-755
- LAW, AVERILL M.; KELTON, W. DAVID (2000): *Simulation Modelling and analysis*. 3rd ed. p. cm. Boston: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science)
- NAKAYAMA, MARVIN K. (2006): *Output analysis for simulations*. In: PERRONE, L. F. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 38th Winter Simulation Conference. ACM, S. 36-46
- RUBINSTEIN, REUVEN V. (1989) : *Sensitivity analysis and performance extrapolation for computer simulation models*. In: *Operations Research*, Bd. 37 (1989), Nr. 1, S. 72-82
- TITTMANN, PETER (2003): *Graphentheorie – Eine anwendungsorientierte Einführung*. München, Wien: Hanser Verlag
- TOLUJEW, JURI; REGGELIN, TOBIAS; SERMPETZOGLOU, CHARIKLEIA (2007): *Simulation und Interpretation von Datenströmen in logistischen Echtzeitsystemen*. In: Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation ~ State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, S. 215-231
- ZSIFKOVITS, HELMUT; KRENN, BARBARA (2007) : *Beherrschung von komplexen Systemen durch Modellbildung und Simulation*. In: Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation ~ State-of-the-Art und innovative Konzepte. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, S. 55-70

Werkzeuggestützte Methode zur Untersuchung des Zeitverhaltens agentenbasierter Materialflusssteuerungen

Dipl.-Ing. Sergey Libert

Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund

Dipl.-Inform. Andreas Nettsträter

Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik, Dortmund

Prof. Dr. Michael ten Hompel

Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund

Kurzfassung: Innovative Konzepte für die Materialflusssteuerung wie das Internet der Dinge vereinigen moderne Methoden der Autoidentifizierung mit neusten Softwaretechnologien. Die Zielsysteme bestehen dabei aus standardisierten und autonomen, lose gekoppelten Steuerungseinheiten. Dank verteilter Softwarearchitektur ist hier mit höherer Flexibilität und besserer Skalierbarkeit der Steuerung zu rechnen. Diese Vorteile haben jedoch einen Preis – das nicht deterministische Zeitverhalten der Steuerung. Im vorliegenden Beitrag wird diese Problematik untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Erstellung einer formalen Beschreibungsmethode für zeitliche Einflussfaktoren in der automatisierten Stetigfördertechnik. Das Ergebnis stellt das Realtime-Logistics-Modell dar. Das Modell ist in eine Emulationssoftware integriert und wird für die Analyse des Zeitverhaltens agentenbasierter Steuerungssysteme verwendet.

Abstract: The novel material flow control concepts like Internet of Things combine up-to-date auto-identification methods with modern software technologies. The expected control systems exhibit distributed scalable and flexible structures of stand-alone control entities. The price for these advantages is a non-deterministic time behavior of the local controls. The present study is devoted to the analysis of decentralized material flow controls under time constraints. The study results in a new approach to deal with deterministic and non-deterministic time factors. The paper introduces the Real-Time Logistics Model for identification, description and unification of time factors in conveyor systems and their controls. The model is integrated in and used with the self-developed emulation software. The interaction of the model, the emulator and the agent-based control is shown in a real world example.

1 Einleitung und Hintergrund

Ein aktueller Trend in der Automatisierungstechnik zeichnet sich durch steigende Modularisierung von Produktions- und Materialflussanlagen mit gleichzeitiger Dezentralisierung der Steuerungsfunktion ab (vgl. [Wil08], [HD06] und [NJW04]). Dieser Trend führt zu einer Abkehr von der klassischen Automatisierungspyramide hin zu einer Verteilung auf Basis von unabhängigen Steuerungseinheiten, die sich in einer flachen Netzstruktur organisieren (siehe Abbildung 1).

Die ersten Schritte auf diesem Weg werden in mehreren Forschungsprojekten bereits unternommen. Einige dieser Projekte gehen bis zur Implementierung von prototypischen Lösungen in Real- und Demonstrationsanlagen (vgl. [tHS+05], [BS01]). Die Vision einer hochflexiblen dezentralen Steuerung für intralogistische Anlagen wird auch im Forschungsprojekt *Internet der Dinge*¹ verfolgt (vgl. [tH07]). In diesem Projekt werden innovative Konzepte für die Materialflusststeuerung entwickelt, die einerseits auf modernen Autoidentifizierungsmethoden wie RFID² beruhen, andererseits auf Lösungen der Informatik, wie Agentensysteme, aufsetzen. Die Fähigkeit, auch große Systeme mit Hilfe von einfachen einheitlichen Steuerungsagenten effizient steuern zu können, wurde bereits anhand von Simulationsexperimenten nachgewiesen [FR08]. Im nächsten Projektschritt werden gemeinsam mit Partnerunternehmen Demonstrationsysteme für realitätsnahe Betriebsszenarien entworfen, gebaut und in Betrieb genommen. In diesen Szenarien repräsentieren Softwareagenten alle wesentlichen Entitäten einer Materialflussanlage wie Förderer, Weichen aber auch Stückgüter und Systemdienste.

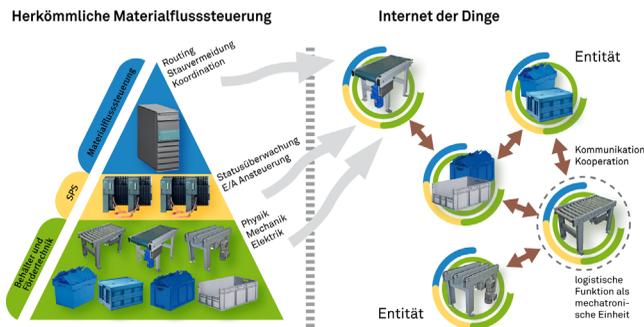


Abbildung 1: Übergang von hierarchischen zu flachen Architekturen

¹ Das Projekt *Internet der Dinge* (www.internet-of-things.net) wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

² Radio Frequency Identification ist ein funkwellenbasiertes Identifikationsverfahren.

Der Untersuchung des Echtzeitverhaltens agentenbasierter Steuerungssysteme widmet sich ein weiteres Forschungsprojekt *Realtime Logistics*³ der TU Dortmund. Der vorliegende Beitrag stellt ausgewählte Ergebnisse dieses Projektes vor und ist wie folgt aufgebaut: Am Anfang wird das Forschungsvorhaben motiviert, die Aufgabenstellung erläutert, und Forschungsziele werden gesetzt. Darauf folgend wird die Entwicklung einer werkzeuggestützten Methode zur Untersuchung des Zeitverhaltens agentenbasierter Materialflusssteuerungen vorgestellt. Die Methode baut auf einem selbstentwickelten Modell für eine einheitliche Beschreibung von Zeitfaktoren in der Stetigfördertechnik und Steuerung auf und wird in eine Emulationssoftware integriert. Das Zusammenspiel mit einer realen agentenbasierten Materialflusssteuerung wird anschließend an einem Beispiel ansatzweise erläutert. Zum Schluss werden die Ergebnisse zusammengefasst und weitere Forschungsschritte diskutiert.

2 Motivation, Aufgabenstellung und Ziele

Agentenbasierte Steuerungssysteme versprechen eine bessere Skalierbarkeit, Erweiterbarkeit und Robustheit. Diese Systemvorteile werden durch ausgewogene Granularität von Steuerungsagenten, lose Koppelung untereinander und autonomes Verhalten erreicht. Die Autonomie von Steuerungsagenten verursacht allerdings ein nicht deterministisches Verhalten sowohl einzelner Agenten als auch des gesamten Systems (vgl. [WBP07]). Bei einer Entscheidungsfindung unter Zeitrestriktionen wird ein solches nicht deterministisches Verhalten zu einer Fehlerquelle: Eine Entscheidung, die zu lange dauert, kann eine Fehlfunktion oder Betriebsstörung hervorrufen. Um dies zu vermeiden, sollen zeitliche Restriktionen sowie die mögliche Wirkung von diesen auf die Steuerung bereits während der Entwicklung analysiert und berücksichtigt werden. Eine Alternative dazu wäre eine zeit- und kostenintensive Anpassung und Optimierung einzelner Steuerungskomponenten während der Inbetriebnahme.

Für diese gesonderte Betrachtung von zeitlichen Faktoren wird bei der Planung und Entwicklung dezentraler Steuerungssysteme eine methodische Unterstützung benötigt. Die gesuchte Methode soll es ermöglichen, kritische Stellen und Situationen bereits in der Planungsphase zu erkennen. Die möglichen Problemsituationen sollen dann, beispielsweise durch Layoutänderung, aufgelöst oder in der Steuerungsimplementierung separat behandelt werden. Der Einsatz einer solchen Methode in der Praxis soll den Aufwand für Inbetriebnahme und Tests deutlich reduzieren.

³ *Realtime Logistics* ist Teilprojekt C5 im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 696 *Anforderungsgerechte Logistik* (www.sfb696.uni-dortmund.de), gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

2.1 Echtzeitproblematik in der Stetigfördertechnik

Der Materialfluss ist ein Echtzeitprozess. Er besteht aus mehreren Teilprozessen, die parallel zueinander ablaufen und Material, Energie sowie Informationen austauschen. Ein bekanntes Dualprinzip besagt, dass „ein System zur Automatisierung solcher Teilprozesse [...] aus mindestens derselben Anzahl von Rechenprozessen“ besteht, „die mit den jeweiligen Teilprozessen direkt kommunizieren“ [HSS79]. Wird eine Anlage vollständig modular gebaut, so benötigt jedes Fördermodul mindestens ein Rechenprozess für seine Ansteuerung. Das Lesen und Schreiben von Prozesszuständen, die Berechnung von diesen und insbesondere die Synchronisation von Rechenprozessen benötigt Zeit. Das entsprechende Zeitintervall (t_{st}) muss umso kleiner sein, je höher die Dynamik des technischen Prozesses ist. Diese Dynamik bestimmt die maximal verfügbare Zeit ($t_{prozess}$) für die Dauer der Steuerungsentscheidung innerhalb eines Steuerungszyklus. Diese Zeit hängt von einigen technischen Faktoren ab, wie beispielsweise der Anzahl, der Position und der Latenzzeit von installierten Sensoren und Aktuatoren. Die Realisierung eines echtzeitfähigen Steuerungssystems erfordert somit die Erfüllung der folgenden Ungleichung⁴.

$$t_{prozess} \geq t_{st} \quad (1)$$

Die Erfüllung dieser Bedingung wird in der industriellen Praxis mit dem Einsatz spezieller Hardware garantiert. So verarbeitet eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) alle zeitkritischen Steuerungsaufgaben innerhalb eines Berechnungszyklus fester Dauer. Die Aufteilung von Aufgaben in zeitkritische und nicht zeitkritische sowie die sinnvolle Verteilung dieser auf mehrere SPS sind Aktivitäten, die viel Erfahrung benötigen. Eine weitere Tätigkeit, die ebenfalls viel Erfahrung voraussetzt und darüber hinaus sehr zeitintensiv ist, ist die Planung und Installation von Sensoren entlang der Fördertechnik. Spezielles Augenmerk muss während der Inbetriebnahme auf die Ausrichtung und Positionierung der Sensoren gelegt werden, da diese oftmals entscheidend für die Qualität der Sensorinformationen sind. Eine bewährte Lösung für diese Aufgabe existiert zurzeit nicht. Abhilfe kann jedoch mit dem Einsatz einer Emulationssoftware geschaffen werden.

2.2 Besonderheiten dezentraler Steuerungssysteme

Die Grundidee einer dezentralen Materialflussteuerung ist die Verteilung der Steuerungsfunktionen entlang der Fördertechnik. Die dabei entstehenden Steuerungsknoten sollen sich allein mit der Lösung lokaler Steuerungsprobleme (z. B. einer Weiche in der Fahrriechtung schalten) beschäftigen, was zur Reduktion der Komplexität und

⁴ Der Unterschied zwischen der weichen und der harten Echtzeit wird an dieser Stelle nicht betrachtet.

Modularisierung der Steuerung beitragen soll. Globale Ziele (z. B. Anlagenauslastung optimieren) werden dabei mit Anwendung von verteilten Algorithmen erreicht. Abhängig vom gewünschten Grad der Dezentralisierung können die verteilten Steuerungsknoten (Softwareagenten) auf einer gemeinsamen Hardwareplattform laufen oder über eine eigene Hardware verfügen, die direkt an der zu steuernden Fördertechnik montiert ist. Ein Teil der Steuerungsaufgaben unterliegt dabei zeitlichen Restriktionen des technischen Prozesses (vgl. Formel (1)).

Ein prinzipieller Unterschied zwischen dem dezentralen Steuerungskonzept und der klassischen hierarchischen Steuerung besteht in der Unschärfe der zur Verfügung stehenden Informationen. Ein System mit einer zentralen Steuerungsinanz verfügt über alle notwendigen und aktuellen Prozess- und Topologiedaten, während autonome Steuerungsagenten diese Daten über eine Kommunikation mit anderen Systemteilnehmern sammeln müssen.

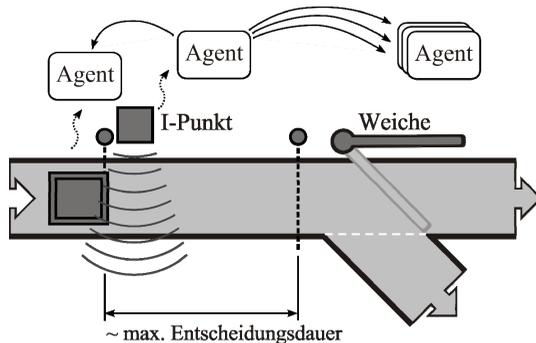


Abbildung 2: Beispiel dezentraler Entscheidungsfindung unter Echtzeitanforderungen

Abbildung 2 erklärt das Problem an einem einfachen Beispiel. Ein Fördergut, vertreten in der Steuerung durch einen Fördergutagenten, nähert sich einer Weiche. Die Weiche ist ebenso durch einen Weichenagent modelliert. Nach der Identifizierung des Förderguts muss eine Wegentscheidung getroffen werden, für die eine Koordination zwischen den Steuerungsagenten erforderlich ist. Diese Koordination dient beispielsweise dem Zweck, die Routeninformationen zu aktualisieren oder über mögliche Störungen im Materialfluss informiert zu werden. Zusätzlich können weitere Aktivitäten, beispielsweise das Beschreiben eines RFID-Tags, erforderlich sein.

Die maximal erlaubte Dauer der Steuerungsentscheidung inklusive der Ansteuerung der Weiche entspricht im Fall einer stetigen Abfertigung der Transportdauer des Förderguts zwischen dem Identifikationspunkt (I-Punkt) und dem Eintrittspunkt in den Konfliktbereich der Weiche. Diese Zeit ergibt sich aus dem Abstand zwischen diesen beiden Punkten und der Fördergeschwindigkeit. Verkleinert man dieses Zeitintervall, so kann dies dazu führen, dass die Weiche entweder zu spät oder gar nicht gestellt

wird. Die Vergrößerung des Zeitintervalls verschlechtert andererseits die Durchsatzleistung.

2.3 Methodische Vorgehensweise als Forschungsziel

Es existieren zwei praktische Methoden, um das Steuerungsverhalten unter Echtzeitbedingungen zu untersuchen. Diese sind zum einen die direkte Messung im Betrieb und zum anderen die Analyse anhand eines Simulationsmodells. Obwohl die Analyse mithilfe eines Simulators die Erstellung eines anlagenspezifischen Simulationsmodells erfordert, ist diese dennoch flexibler und effizienter und deswegen der direkten Messung vorzuziehen.

Für das Testen von Steuerungssoftware wird eine spezielle Art der Simulation verwendet – die so genannte Emulation. Hierbei wird der technische Prozess durch ein Emulationsmodell ersetzt an dem eine echte Steuerung angeschlossen wird. Die meisten industriellen Emulatoren sind für den Einsatz mit speicherprogrammierbaren Steuerungen entwickelt und können mit einer agentenbasierten Materialflusssteuerung nicht genutzt werden. Darüber hinaus wird eine Methode benötigt, welche die Aufnahme und Analyse von Zeitfaktoren im technischen Prozess und in der Steuerung ermöglicht. Diese Methode soll einerseits eine Bewertung der Echtzeitfähigkeit der Steuerung und andererseits das Setzen bzw. Anpassen von relevanten technischen Parameter in der Fördertechnik unterstützen.

Die meisten Arbeiten, die sich mit den zeitlichen Aspekten im Bereich der industriellen Automatisierung beschäftigen, legen den Fokus auf die Untersuchung von Leistung und Latenzzeiten von Controllern, Feldgeräten und Feldbussystemen (vgl. [TV99], [Kle96], [LMT99] und [Ros02]). Einen anderen Blickwinkel haben die Entwickler von echtzeitfähigen Agentensystemen. Sie betrachten die Echtzeitfähigkeit als Eigenschaft des Agentenprogramms (vgl. [Zha06], [UWG04]). Dabei wird garantiert, dass ein Agent seine Aktivitäten innerhalb einer bestimmten Frist abgeschlossen hat. Wie diese Fristvorgabe entsteht ist dabei nebensächlich und wird nicht weiter spezifiziert.

In dem vorliegenden Beitrag werden die beiden Gesichtspunkte in einer ganzheitlichen Methode kombiniert. Um dieses Ziel zu erreichen, wird zunächst ein Beschreibungsmodell erarbeitet, welches Zeitfaktoren der Fördertechnik und deren Steuerung vereinheitlicht. Die Integration des Modells in eine Emulationssoftware ist eine weitere Aufgabe. Dabei soll der Emulator nicht nur die Visualisierung und Konfiguration von Modellparametern ermöglichen, sondern auch in der Lage sein, über eine offene Schnittstelle mit einer agentenbasierten Materialflusssteuerung kommunizieren zu können.

3 Methodenentwurf

Die hier vorgestellte Methode besteht aus zwei Schritten. Zunächst wird ein konzeptuelles Modell für die Beschreibung von heterogenen Zeitfaktoren in einem Fördersystem erklärt. Dieses Modell soll die makroskopische Sicht auf die Systemtopologie mit der mikroskopischen Sicht auf die Systemkomponenten vereinigen. Desweiteren wird für die Anwendung des Modells eine instrumentale Unterstützung benötigt. Dies wird mittels Integration des Modells in eine selbstentwickelte Emulationssoftware erreicht. Durch diese Integration werden die Prozessereignisse und Steuerungsbefehle automatisch in Zeitfaktoren des Modells überführt. Die Modellierung sowie die Integration werden im Folgenden erläutert.

3.1 Modellierung der Systemtopologie

Für die Abbildung der Topologie einer Stetigförderanlage wird ein so genannter Materialflussgraph verwendet (siehe Abbildung 3). Die Kanten dieses Graphs bilden die Förderstrecken ab. Die Knoten repräsentieren die Übergänge zwischen zwei Fördertechnikabschnitten bzw. Verzweigungs- und Zusammenführungsstellen. Beispielsweise wird eine fördertechnische Weiche als ein Knoten mit einer eingehenden und zwei ausgehenden Kanten modelliert. Die Übergangsknoten gehören dabei zwei verschiedenen Fördertechnikabschnitten an. Ein Knoten ohne eingehende Kanten heißt Quelle. Hier werden Behälter in das System eingeschleust. Knoten ohne ausgehende Kanten sind die Senken des Systems.

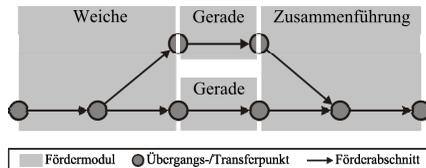


Abbildung 3: Ausschnitt aus dem Materialflussgraph

Ein Materialflussgraph entspricht der makroskopischen Systemsicht und kann für die Wegfindung verwendet werden. Die physikalischen Eigenschaften der Fördertechnik, wie z. B. Länge, Fördergeschwindigkeit oder die aktuelle Auslastung, können den Kanten des Graphen zugeordnet werden. Diese Informationen sind für die Ermittlung der Durchlaufzeit eines Förderguts durch einen Förderabschnitt notwendig und bilden eine Berechnungsgrundlage für die Suche optimaler Wege durch das Gesamtsystem.

3.2 Identifikation und Klassifikation von Zeitfaktoren

Die Durchlaufzeit beschreibt die Aufenthaltsdauer eines Förderguts auf einem Förderabschnitt. Alle Manipulationen mit dem Fördergut inklusive Verarbeitung relevanter Informationen und Handhabung (z. B. Richtungswechsel) müssen innerhalb dieses

Zeitraums abgeschlossen sein. Zur Darstellung des oben genannten Zeitraums werden drei Zeitfaktoren eingeführt. Der Faktor *transportzeit* beschreibt die Beförderungsdauer zwischen einer Quelle und einer Senke eines Förderabschnittes. Die *übergangszeit* beschreibt den Transport des Förderguts über die Grenze des Förderers. Die *wartezeit* entspricht dem Anhalten des Förderers und ist bei der Betrachtung der kürzesten Durchlaufzeit im Stetigbetrieb von keiner Bedeutung.

transportzeit und *übergangszeit* können aus der Geometrie und Physik entsprechender Fördermittel ermittelt werden. Die Zeitfaktoren *transportzeit*, *übergangszeit* und *wartezeit* werden *Zeiterzeuger* (*ze*) genannt (Tabelle 1), weil sie das Zeitlimit für sämtliche Aktivitäten bezüglich des Stückguts auf dem aktuellen Förderabschnitt vorgeben (vgl. Formel (1)).

Tabelle 1: Zeiterzeuger der Stetigfördertechnik im Überblick

| Zeiterzeuger | Prozess / Fördertechnik |
|------------------------|-------------------------|
| Verfügbare Prozesszeit | <i>transportzeit</i> |
| | <i>übergangszeit</i> |
| | <i>wartezeit</i> |

Eine andere Kategorie von Zeitfaktoren bilden Zeitgrößen, die durch Gerätetechnik und Steuerungslogik ausgeprägt sind (Tabelle 2). Diese Zeitfaktoren sind die Latenzzeit von Sensoren (z. B. RFID-Scanner), Verzögerung beim Warten auf Datenübertragung, Dauer der Datenverarbeitung sowie Verzögerung bei der Umsetzung eines Steuerbefehls in der Technik (z. B. Aktuator stellen oder RFID-Tag beschreiben) (siehe [LH+07], [LN+08]). Die Zeitfaktoren aus dieser Gruppe werden *Zeitverbraucher* (*zv*) genannt, weil diese zur Verringerung der verfügbaren Zeit führen. Je nach Steuerungsablauf können einfache oder komplexe Abhängigkeiten zwischen den *Zeitverbrauchern* entstehen.

Tabelle 1: Zeitverbraucher im Überblick

| Zeitverbraucher | Steuerung / Gerätetechnik | Steuerung / Logik |
|------------------------|--------------------------------------|---------------------------|
| Datenerfassung | <i>lesezeit</i> | -- |
| Kommunikation | <i>medienzugriffszeit</i> | <i>kommunikationszeit</i> |
| | <i>übertragungszeit</i> | |
| Datenverarbeitung | <i>synch.: zykluszeit</i> | <i>entscheidungszeit</i> |
| | <i>asynch.: programmschrittdauer</i> | |
| Wirkung | <i>schreibzeit</i> | -- |
| | <i>stellzeit</i> | |

Eine gute Abschätzung für viele geräteabhängige *Zeitverbraucher* kann aus technischen Datenblättern entsprechender Geräte entnommen werden (z. B. Sensorlatenzzeit). Andere können berechnet (z. B. Medienzugriffszeit) oder gemessen werden. Solche Zeitfaktoren können als statische Werte gesehen werden, die allein von der Konfiguration und Leistung der Automatisierungskomponenten und Kommunikationsmedien abhängen.

3.3 Das RTL-Modell

Das Realtime-Logistics-Modell (RTL-Modell) kombiniert die identifizierten *Zeiterzeuger* und *Zeitverbraucher* mit dem Materialflussgraphen. Jeder Abschnitt der Fördertechnik erhält einen eigenen konsolidierten *Zeiterzeuger* (ze_i), welcher die Durchlaufzeit durch diesen Förderabschnitt kennzeichnet. Die höchste Anforderung an die Reaktion der Steuerung ist dann vorhanden, wenn sich das Fördergut, ohne angehalten zu werden, bewegt. In diesem Fall kann die Echtzeitanforderung für den verantwortlichen lokalen Steuerungsknoten i wie folgt formuliert werden:

$$ze_i \geq \sum_{m=1}^M zv_{i,m} \quad (2)$$

Hier gibt der *Zeiterzeuger* das Maximum für die Summe aller statischen und dynamischen *Zeitverbraucher* dieses Förderabschnitts und seiner lokalen Steuerung vor. Die *Zeitverbraucher* werden dabei mit zwei Parametern charakterisiert: dem Zeitwert und der relativen Position auf dem Förderabschnitt (bzw. auf dem *Zeiterzeuger*).

Die klassische Graphendarstellung ist für die Darstellung von Zeitfaktoren des RTL-Modells nur bedingt geeignet. Aus diesem Grund wurde ein eigenes Konzept erarbeitet, welches den Materialflussgraph mit neuen grafischen Elementen erweitert. In diesem Konzept wird ein *Zeiterzeuger* als Kreissegment über der Kante des Materialflussgraphen abgebildet. Die Länge des Kreisbogens entspricht dem nach der Fördergeschwindigkeit normierten Zeitwert des *Zeiterzeugers*. Für die Normierung wird die minimale Fördergeschwindigkeit gleich Null gesetzt ($v = 0$), was einem vollen Halbkreis mit der Bogenlänge $b = \pi \cdot (l_{\text{förderabschnitt}} / 2)$ entspricht. Die maximale Geschwindigkeit für diese Art der Fördertechnik ($v = v_{\text{max}}$) entspricht dagegen dem Kreissegment eines Kreises mit dem Radius $r \rightarrow \infty$, so dass die Bogenlänge $b \rightarrow l_{\text{förderabschnitt}} + \text{lang}$ ist.

Zeitverbraucher werden als Kreissektoren mit entsprechender Länge des Kreisbogens dargestellt. So können beispielsweise dynamische Zeitfaktoren durch Sektoren variabler Größe modelliert werden. Unterschiedliche Färbung von Sektorenflächen verbessert die Übersicht bei der Visualisierung verschiedener Arten von Zeitfaktoren.

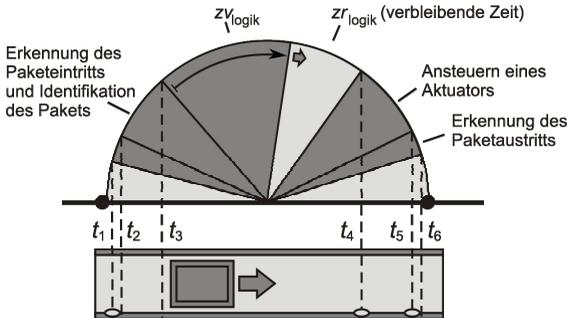


Abbildung 4: Abhängigkeiten von Zeitfaktoren im RTL-Modell

In Abbildung 4 wird das Visualisierungskonzept des RTL-Modells an einem einfachen Beispiel erläutert: Ein optischer Sensor am Anfang des Förderelements detektiert das Eintreffen eines Förderguts (t_1) und das AutoID-Gerät (z. B. ein RFID-Scanner) beginnt Daten vom RFID-Tag zu lesen (t_2). $z_{V_{\text{logik}}}$ ist die Zeit, die für die Steuerungsentcheidung benötigt wird. Diese Zeit ist im Fall einer asynchronen Datenverarbeitung ein dynamischer Faktor. Ähnlich dem Beispiel in Abbildung 2 soll die Entscheidung fallen, bevor der Trigger zur Ansteuerung der Weiche ausgelöst ist (t_4). Die Weiche wird aktiviert (t_5) und das Fördergut verlässt den Förderabschnitt (t_6). Dabei zeigt der Zeitraum $z_{r_{\text{logik}}}$ den noch nicht verbrauchten Zeitvorrat der Steuerung. Die Berücksichtigung solcher Zeiträume (zr), die von der Steuerung nicht beansprucht werden, vervollständigt die Echtzeitbedingung (2) und ermöglicht eine lückenlose Darstellung (3).

$$ze_i = \sum_{m=1}^M zV_{i,m} + \sum_{k=1}^K zR_{i,k} \quad (3)$$

Der nächste sinnvolle Entwicklungsschritt ist die Integration des RTL-Modells in eine Emulationsumgebung. Ziel dieser Integration ist die rechnergestützte Visualisierung und Analyse des zeitlichen Verhaltens einer dezentralen Materialflussteuerung.

3.4 Softwareintegration

Die industrieüblichen Materialflusssimulatoren (z. B. Arena, eM-Plant, AutoMod) werden für Tests und Optimierung von Steuerungsstrategien verwendet, eignen sich aber aufgrund fehlender Steuerungsschnittstellen schlecht für die Anbindung dezentraler, agentenbasierter Steuerungen. Andererseits bieten die auf dem Markt vorhandenen Emulatoren spezielle Schnittstellen für die Kopplung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen⁵. Offene Schnittstellen für höhere Programmiersprachen, wie C++, C# oder Java, sind auch hier selten. Die zusätzliche Schwierigkeit besteht darin, dass

⁵ Diese Kopplung erfolgt über OPC (OLE for Process Control) und Feldbussysteme.

das RTL-Modell ein Bestandteil des Emulators werden soll, da dieses mit dem emulierten technischen Prozess in einer engen Wechselwirkung steht.

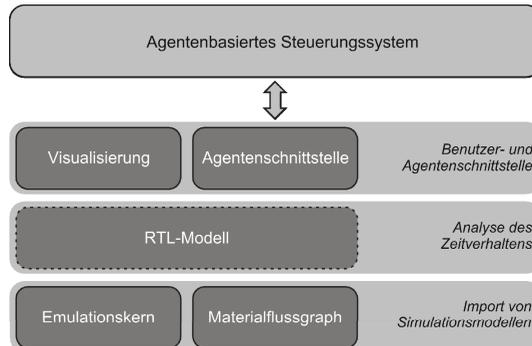


Abbildung 5: Integrationschichten des Emulators im Überblick

Um eine maximale Flexibilität zu erreichen, wurde das RTL-Modell in eine selbstentwickelte Emulationssoftware eingebettet, wobei die Integration in ein industrietaugliches Werkzeug (z. B. Demo3D oder taraVRcontrol) auf ähnliche Art und Weise möglich ist.

Die Schichtenarchitektur der Integration ist in Abbildung 5 dargestellt. Der zeitdiskrete Emulationskern versorgt alle anderen Komponenten mit einem Taktsignal, das z. B. zur Erzeugung und Visualisierung der Bewegung erforderlich ist. Die Topologie einer Förderanlage ist intern durch den Materialflussgraph repräsentiert. Die Übernahme weitere Layoutmodelle in gängigen Formaten erfordert zusätzlich Implementierung spezieller Importfunktion.

Die Schichtenarchitektur erlaubt das Zwischenschalten benutzerdefinierter Komponenten, die auf Prozessereignisse lauschen bzw. Steuerbefehle abfangen und weiterleiten. Das RTL-Modell ist als eine solche Schicht implementiert. Das RTL-Modell ergänzt den vorhandenen Materialflussgraph mit eigenen Elementen: Zeit- und Positionsangaben zu den installierten Sensoren und Aktuatoren. Falls vorhanden, können auch diese Informationen aus einem Layoutmodell direkt übernommen werden.

Eine grafische Benutzerschnittstelle ermöglicht eine animierte Darstellung des Förderprozesses. Über diese Schnittstelle können auch die Zeitfaktoren des RTL-Modells erzeugt und konfiguriert werden. Der Agentenanschluss ist eine weitere Schnittstellenkomponente, die die Anbindung einer agentenbasierten Materialflusssteuerung an den Emulator bewerkstelligt.

4 Testumgebung

Im Folgenden wird die Umgebung beschrieben, in der der Einsatz des RTL-Modells unter realen Bedingungen getestet wurde. Eine Analyse des Zeitverhaltens einer dezentralen Steuerung steht dabei nicht im Vordergrund. Vielmehr stehen im Mittelpunkt der Betrachtung die Integration des RTL-Modells selbst sowie das Zusammenspiel mit einer realen Anlagensteuerung.

4.1 Agentenbasierte Steuerung

Bei dem Steuerungssystem handelt es sich um eine Software, die auf Basis der Entwicklungs- und Laufzeitumgebung JADE⁶ erstellt wurde. Die Materialflusssteuerung wird in diesem System von drei Arten von Agenten übernommen:

- Fördergutagenten repräsentieren das zu transportierte Stückgut. Die Synchronisation zwischen den Agenten und dem Materialfluss erfolgt mittels RFID-Technologie. Dabei werden die an den Transportbehälter angebrachten RFID-Tags sowohl für die Identifikation als auch für das Speichern auftragsrelevanter Informationen verwendet.
- Fördermittelagenten repräsentieren die zu steuernden Abschnitte der Förder-technik inklusive Verzweigungs- und Zusammenführungselemente.
- Spezielle Dienstagenten realisieren Systemschnittstellen oder setzen Verwaltungsaufgaben um. Beispiele dafür sind ein Auftragsmanager (Schnittstelle zum Lagerverwaltungssystem) und ein Kommissionieragent.

Die JADE-Laufzeitumgebung erlaubt eine beliebige Verteilung von Steuerungsagenten auf mehrere Hardwareplattformen und unterstützt dabei die Mobilität von Agenten. Ein selbstentwickelter Kopplungsmechanismus ermöglicht sowohl die Anbindung der unterliegenden Feldsteuerung als auch die der Emulationssoftware auf dieselbe Art und Weise.

4.2 Tests mit realer Förderanlage

Die zu steuernde Materialflussanlage stellt eine Stetigförderanlage, die am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML installiert ist (Abbildung 6). Das System wird zu Demonstration eines Kommissionierungsszenarios verwendet und grenzt zu diesem Zweck an einem automatischen KLT-Lager⁷ am Eingang und einem fahrerlosen Transportsystem am Ausgang an.

⁶ Java Agent DEvelopment framework (JADE) ist eine Entwicklung von Telekom Italia Lab (<http://jade.tilab.com>).

⁷ Lager für kleine Ladungsträger (KLT).



Abbildung 6: Testanlage

Die Feldsteuerung ist auf mehreren Industrie-PC verteilt und dient allein dem Ziel, Sensorsignale an die Fördermittelagenten weiterzuleiten sowie Steuerbefehle für Aktuatoren umzusetzen. Die Realisierung einer Feldsteuerung ist überwiegend gerätespezifisch. Eine Anbindung der Materialflusssteuerung erfordert jedoch eine einheitliche Darstellung von Sensorsignalen und Steuerbefehlen. Dieses Problem wird mit der Einführung einer Hardwareabstraktionsschicht (HAS) gelöst, welche die Kopplung einer agentenbasierten Steuerung ermöglicht. Wird die reale Feldsteuerung durch ein Emulationsmodell ersetzt, so erfolgt die Kopplung über dieselbe Abstraktionsschicht (vgl. [LN09]).

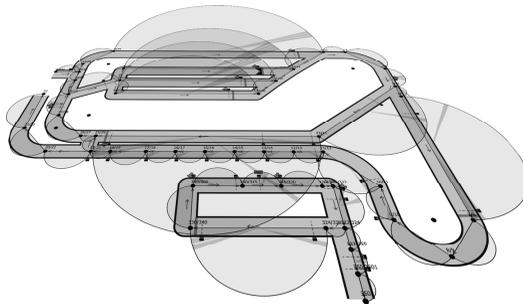


Abbildung 7: Emulationsmodell mit darüber liegendem RTL-Modell

Für die Untersuchung des Zeitverhaltens der agentenbasierten Materialflusssteuerung wurde ein RTL-Modell der Anlage erstellt. Abbildung 7 zeigt die Erweiterung des Emulationsmodells mit dem RTL-Modell. Die signifikanten, technischen (statischen) Zeitfaktoren sind im Modell bereits eingetragen. Die dynamischen Zeitfaktoren können in Simulationsläufen für variable Testszenarien und dezentrale Steuerungsstrategien ermittelt und analysiert werden. Die Aufstellung und Durchführung von Testszenarien ist jedoch der Gegenstand der Fortführung der aktuellen Arbeit.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Methode zur Erfassung und Analyse des Zeitverhaltens stetiger Fördersysteme und deren Steuerungen besteht aus zwei wesentlichen Schritten. Im ersten Schritt werden alle signifikanten statischen Zeitfaktoren sowie deren Zusammenhang ermittelt und in das RTL-Modell eingetragen. Im zweiten Schritt werden dynamische Zeitfaktoren der Steuerung mittels einer Simulation gemessen. Anhand dieser Messung können Aussagen über die Erfüllung der Echtzeitanforderung von der Steuerung für eine bestimmte Steuerungsstrategie gemacht werden. Eine selbstentwickelte Emulationssoftware unterstützt die beiden Schritte. Zu diesem Zweck integriert der Emulator das RTL-Modell und bietet eine offene Schnittstelle zu Anbindung dezentraler Steuerungen. Die vorgeschlagene Untersuchungsmethode kann zur frühzeitigen Erkennung von Flaschenhälsen bereits während der Planungs- und Entwicklungsphase beitragen. Eine Korrektur der Steuerungsimplementierung, der eingesetzten Automatisierungsgeräte und deren Installation ist somit sowohl im Forschungs- als auch im Industriefeld möglich.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse repräsentieren hauptsächlich den ersten Schritt der Methodik. Die Fortsetzung der Arbeit umfasst die Spezifikation des RTL-Modells für typische Geräteinstallationen und Betriebsszenarien. Die Durchführung von Simulationsläufen für vorhandene Demoanlagen sowie Integration des RTL-Modells in industrielle Emulatoren sind weitere denkbare Arbeitspunkte. Das Ziel der Forschungsarbeit ist dabei eine Methodologie zu entwickeln, welche eine umfassende Untersuchung der Leistung logistischer Systeme unter Echtzeitbedingungen ermöglicht und der Reduktion von Entwicklungs- und Betriebskosten beiträgt.

Literatur

- [BJW04] Busmann, S.; Jennings, N. R.; Wooldridge, M.: *Multiagent Systems for Manufacturing Control - A Design Methodology*. Berlin : Springer, 2004. - ISBN 3-540-20924-7.
- [BS01] Busmann, S.; Schild, K.: *An Agent-based Approach to the Control of Flexible Production Systems. : 8th IEEE Int. Conf. On Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001)*, Nice (France), 2001, S. 169 - 174.
- [FR08] Follert, G.; Roidl, M.: *Evaluation of Routing Strategies for Decentralized Self-Organisation in Large Scale Conveyor Systems*. In: Kimberly E. et al. (Hrsg. Bd.): *Progress in Material Handling Research: 2008*, Charlotte (NC, USA) : The Material Handling Institute of America, 2008.

- [HD06] Hallenborg, K.; Demazeau, Y.: *Dynamical Control in Large-Scale Material Handling Systems through Agent Technology*. : *Proceedings of the IEEE/WIC/ACM international conference on Intelligent Agent Technology*, Washington, DC, USA : IEEE Computer Society, 2006, S. 637-645 - ISBN 0-7695-2748-5.
- [HSS79] Heger, D.; Steusloff, H.; Syrbe, M.: *Echtzeitrechnersystem mit verteilten Mikroprozessoren*. Als Ms. Aufl., Eggenstein-Leopoldshafen : Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, 1979.
- [Kle96] Klehmet, U.: *Mathematisch-heuristische Leistungsbewertung des Medienzugangsverfahrens beim Profibus*. In: *Automatisierungstechnik (at)*, Ausgabe 3, 1996, S. 108-119.
- [LMT99] Lian, F.-L.; Moyne, J.; Tilbury, D.: *Performance Evaluation of Control Networks: Ethernet, ControlNet, and DeviceNet*. *IEEE Control Systems Magazine*, 21 (1), 1999, S. 66-83.
- [LtH+07] Libert, S.; ten Hompel, M.; Nettsträter, A.: *Modell zur Beschreibung von Zeitfaktoren in der automatisierten Stetigfördertechnik*. In: *Logistics on Demand*, 2007, S. 167-188.
- [LN09] Libert, S.; Nettsträter, A.: *Steuerungsschnittstelle für Fördertechnik*. : *Software in der Logistik - Klimaschutz im Fokus*, 1. Aufl. Aufl., München : Huss-Verlag, 2009, S. 79-82 - ISBN 978-3-941418-09-7.
- [LN+08] Libert, S.; Nettsträter, A.; ten Hompel, M.: *Das RTL-Modell für dezentrale Materialflusssteuerung*. In: *Crostack, H.-A.; ten Hompel, M. (Hrsg. Bd.): Berichte aus dem SFB 696, Dortmund : Praxiswissen*, 2008, S. 137-161.
- [Ros02] Rostan, M.: *Zykluszeit ist nicht alles: zur Performance von Feldebussystemen in der Fertigung*. : *SPS/IPC/DRIVES Nürnberg*, 13. Fachmesse und Kongress., Heidelberg : Hüthig, 2002, S. 99-108.
- [tH07] ten Hompel, M. et al.: *Internet der Dinge: www.internet-der-dinge.de*. Bullinger, H.-J. ten Hompel, M. (Hrsg. R.), Berlin : Springer, 2007.
- [tHS+05] ten Hompel, M.; Sondhof, U.; Libert, S.: *Distributed control nodes for material flow system controls on the example of unit load conveyor and sorter facilities*. In: *C. Grote, R. Ester (Hrsg. Bd.): Embedded World 2005*, Nürnberg : Weka Fachzeitschriften, 2005, S. 998-1007.

- [TV99] Tovar, E.; Vasques, F.: Analysis of the worst-case real token rotation time in PROFIBUS networks. Proceedings of the Fieldbus Conference (FeT'99), Magdeburg (Germany), 1999, S. 359-366.
- [UWG04] de A. Urbano, P. G.; Wagner, T.; Gohner, P. et al.: *Introducing reliability and real-time features in flexible agent-oriented automation systems. : 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics INDIN '04*, Berlin, 2004, S. 89-94.
- [Wil08] Wilke, M.: *Control Concept for Autonomous Changeable Material Flow Systems*. In: *Logistics Journal*, (2008).
- [WBP07] Windt, K.; Böse, F.; Philipp, T.: *Autonomy in Production Logistics - Identification, Characterisation and Application*. In: *International Journal of Robotics and CIM*, 24Nr.4 (2007), S. 572-578.
- [Zha06] Zhang, L.: *Development Method for Multi-Agent Real-Time Systems*. In: *International Journal of Information Technology*, 12Nr.6 (2006).

Dezentrale Koordination und Kooperation im Internet der Dinge

Dipl.-Inf. R. Chisu, Dipl.-Ing. F. Kuzmany, Prof. W. A. Günthner

Technische Universität München

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik fml

Das Internet der Dinge als neuartiges Modell für eine dezentrale und hierarchielose Steuerung innerbetrieblicher Materialflusssysteme beginnt, in der Welt der Logistik Fuß zu fassen. Dieser Beitrag befasst sich dabei mit zwei technischen Fragestellungen, ohne deren Beantwortung ein industrieller Einsatz dieser Steuerungsarchitektur aber als wenig sinnvoll erscheint. Im ersten Teil wird gezeigt, wie ein Baukasten aus standardisierten, funktionsorientierten Modulen für die Umsetzung kunden- und projektspezifischer Abläufe herangezogen werden kann: Transporteinheiten werden dabei zu den Trägern der Geschäftslogik eines Systems und arbeiten logistische Prozesse ab, die als Folge einzelner Funktionen modelliert werden. Der zweite Teil adressiert komplexe und für logistische Anlagen typische Materialflusstrategien. Anhand konkreter Beispiele wird aufgezeigt, wie autonome Entitäten bzw. Fördertechnikmodule in der Lage sind, durch relativ einfache und szenariounabhängige Kostenfunktionen und Verhaltensregeln auch komplexe Strategien dezentral umzusetzen.

Einleitung

Das Umfeld produzierender Unternehmen hat sich in den letzten Jahren stark verändert. Viele Unternehmen konzentrieren sich zunehmend auf ihre Kernkompetenzen, beigeordnete Bereiche oder solche mit niedrigem Wertschöpfungsgrad werden ausgegliedert. Zusammen mit der Globalisierung der Absatz- und Beschaffungsmärkte hat dies zu einer viel stärkeren Vernetzung von Unternehmen und einer Zunahme des Transportaufkommens geführt. Dies macht die Organisation logistischer und produktionstechnischer Prozesse zu einer immer komplexeren Aufgabe, Prognosen und feste Annahmen werden zunehmend unrealistisch. Dieser Effekt wird durch Entwicklungen auf der innerbetrieblichen Ebene weiter verstärkt. Um in übersättigten Märkten bestehen zu können, müssen Unternehmen ihre Produktpalette immer weiter diversifizieren – die Anzahl angebotener Varianten steigt, Innovations- und Produktlebenszyklen werden kürzer. Individualisierte Produkte stellen dabei die extremste Form variantenreicher Produktion dar: Der Kunde gestaltet sein Produkt selbst und bestellt im Regelfall ein einziges Exemplar. Die marktorientierte Fertigung wird somit immer mehr von der auftragsorientierten Fertigung abgelöst – im immer häufiger werdenden Extremfall in Losgröße eins.

Besonders betroffen ist hierbei die Logistik. Diese muss zunehmend komplexe Abläufe und Materialflüsse steuern, flexibel und hochdynamisch reagieren und dabei möglichst geringe Kosten verursachen. Vor allem im innerbetrieblichen Bereich hat es die Technik aber nicht geschafft, mit den sich schnell verändernden Anforderungen Schritt zu halten. Hochautomatisierte Materialflusssysteme bieten zwar Effizienz- und Kostenvorteile, sind aber in ihrer heutigen Ausführung sehr starr und unflexibel gegenüber Änderungen. Dies liegt größtenteils an der zentralen und projektspezifisch ausgelegten Steuerungsarchitektur, die zudem für größere Anlagen eine kaum durchschaubare Komplexität erreichen kann. Zentrale Steuerungen sind sehr weit verbreitet, aber angesichts der immer wichtiger werdenden Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nicht mehr zeitgemäß. Zu groß ist der finanzielle und zeitliche Aufwand für die Programmierung des zentralen Materialflussrechners, für die Integration und Inbetriebnahme der verschiedenen Subsysteme und Bereichssteuerungen und vor allem für den Umbau.

Das Internet der Dinge

Als Alternative zu herkömmlichen Steuerungsarchitekturen werden schon seit einigen Jahren dezentrale Systeme untersucht oder schon eingesetzt [Beu-06, Gün-00, Hom-05, May-09, Rit-03, Sau-00]. Dieses Konzept beruht auf der Gliederung der Gesamtaufgabe der Materialflussteuerung in kleinere, überschaubare Teilprobleme und ihrer Verteilung auf möglichst standardisierte Funktionskomponenten bzw. Module. Diese kapseln eine bestimmte logistische Funktion [Wil-06] und können beliebig miteinander kombiniert werden, um so kooperativ den Materialfluss zu steuern. Materialflussanlagen verhalten sich dem entsprechend immer mehr wie ein Datennetzwerk, in dem autonom agierende Switches und Router Datenpakete selbständig weiterleiten und sich kontinuierlich über Veränderungen der Topologie oder Auslastungen von Verbindung austauschen. In einem „Internet der Dinge“ werden Logik bzw. Steuerungskompetenzen aus den verschiedenen Hierarchieebenen herkömmlicher zentraler Architekturen zusammengefasst und auf autonom agierende Materialflussmodule und Transporteinheiten verteilt [Gün-08a] (siehe Abbildung 1).

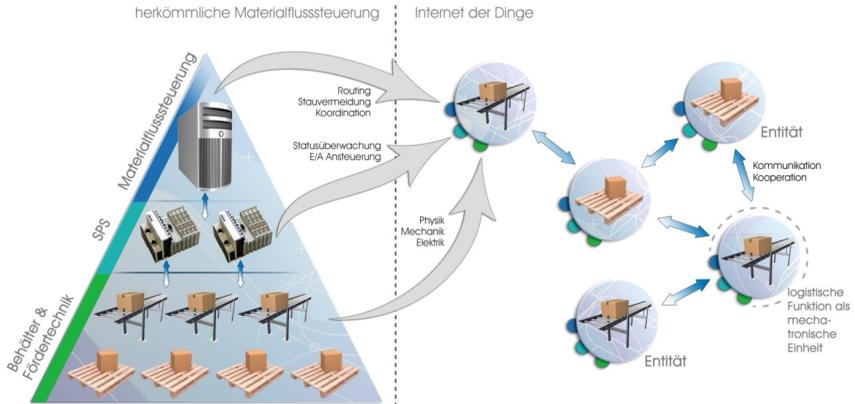


Abbildung 1 Das Internet der Dinge ist eine dezentrale und hierarchielose Materialflusssteuerung

Darüber hinaus können auch Softwareprogramme, so genannte „Dienste“, zum Einsatz kommen. Diese haben im Regelfall keinen Einfluss auf die Materialflusssteuerung an sich, sind aber notwendig, um Aufgaben wie Visualisierung, Backups oder die Verwaltung von Verzeichnissen umzusetzen oder um Datenschnittstellen zu externen Systemen zu realisieren. Die elementare Einheit dieser kooperativen Materialflusssteuerung wird dabei als Entität bezeichnet und kann in den genannten drei Ausprägungen – Modul, Transporteinheit oder Dienst – vorkommen (siehe Abbildung 2). Jede Entität wird mit einer eigenen Programmlogik – beispielsweise einem Softwareagenten – ausgestattet, die für die Verwaltung und Abarbeitung aller Funktionen der jeweiligen Entität sorgt. Damit greifen auch Transporteinheiten – anders als passive Datenpakete oder E-Mails im Internet – aktiv in die Materialflusssteuerung ein. Sie suchen sich selbst ihr Ziel, wählen bei mehreren Alternativen selbständig die günstigste davon aus und veranlassen und überwachen ihren Transport. Die Förderertechnikmodule hingegen können als Dienstleister aufgefasst werden, die die von den Transporteinheiten erteilten Aufträge erfüllen. Dabei setzen die Module die eigentliche Materialflusssteuerung um: sie berechnen Routen, berücksichtigen Förderstrategien und führen Optimierungen durch.

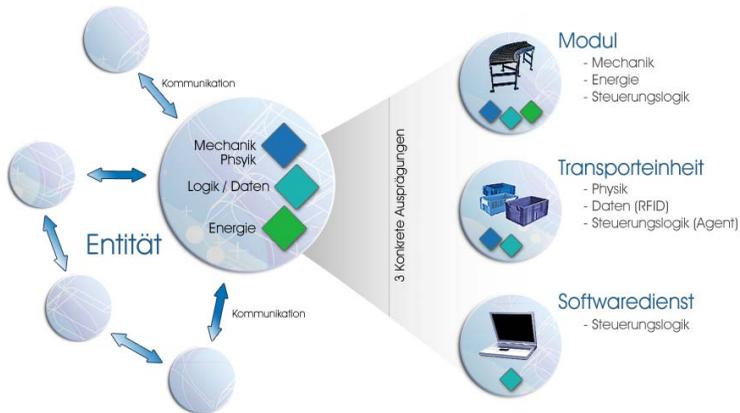


Abbildung 2 Entitäten: Der grundlegende Baustein im Internet der Dinge

Entitäten sind vollständig autonom und interagieren miteinander nur über standardisierte Kommunikationsprotokolle und -inhalte. Diese Kapselung erlaubt die Behandlung von Modulen, Transporteinheiten und Diensten als „Black Box“ – ihre interne Gestaltung und die lokal verwendeten Softwarealgorithmen und Datenstrukturen sind anderen Entitäten unbekannt und für das Gesamtsystem irrelevant. Dies ermöglicht die einfache Austauschbarkeit von Entitäten, was gerade im Fall der (Fördertechnik-)Module von großem Vorteil ist, und erleichtert somit die Integration.

Die Leistungsfähigkeit des Internet der Dinge wurde simulativ bereits für sehr große Materialflusssysteme nachgewiesen [Roi-07], Demonstrationsanlagen haben auch die technische Machbarkeit dieses Modells gezeigt [Wil-06]. Bisherige Arbeiten betrachten aber größtenteils nur die Auftragsdisposition und die Wegplanung. Diese sind zwar sehr grundlegende Funktionen, genügen in den meisten Fällen jedoch nicht, um die teils sehr komplexen intralogistischen Prozesse abzudecken. Dieser Beitrag adressiert daher zwei bisher weitgehend offen gebliebene Fragestellungen dezentraler Materialflussteuerung:

1. Die Realisierbarkeit nicht standardisierbarer, anlagenspezifischer Abläufe mittels eines Baukastens aus standardisierten Modulen
2. Die dezentrale Implementierung von Materialflussteuerungen über das einfache Routing hinaus, z.B. für das Sortieren von Transporteinheiten oder die Ressourcenallokation

Umsetzung projektspezifischer Abläufe

Der Einsatz eines Baukastens aus Standardkomponenten bietet zwar viele technische und auch wirtschaftliche Vorteile [Gün-08b], wirft aber gleichzeitig die Frage auf, ob bzw. wie die von System zu System stark unterschiedliche Geschäftslogik einer Anlage implementiert werden kann, ohne dass dabei die Umprogrammierung aller Module notwendig wird. Um das Internet der Dinge industriell einsetzbar zu machen, ist also neben den Aspekten der Materialflusssteuerung an sich auch die einfache Realisierbarkeit anlagenspezifischer Prozesse von großer Relevanz.

Die Module des Internet der Dinge werden anhand standardisierbarer logistischer Grundfunktionen, beispielsweise Fördern, Verteilen oder Lagern [Arn-95], identifiziert und gestaltet. Für den Anlagenbetreiber ist aber letztlich nur die (nicht standardisierbare) Funktion des Gesamtsystems, die sich aus der zielgerichteten Kombination und Verkettung einzelner Grundfunktionen ergibt, von Bedeutung. Als Beispiel für eine solche Geschäftslogik soll hierbei ein (vereinfachter) Arbeitsablauf für ein Gepäckstück am Flughafen dienen:

1. Ein eingetragener Koffer muss zuerst in einer Röntgenanlage gescannt werden.
2. Besteht Verdacht auf einen gefährlichen Inhalt des Gepäckstücks, wird dieses in einer zweiten Röntgenanlage mit höherer Genauigkeit überprüft.
3. Zum wiederholten Mal als unsicher eingestufte Koffer werden ausgeschleust und manuell weiterbearbeitet. Im ersten oder zweiten Schritt für sicher befundene Gepäckstücke werden zum Verladen freigegeben.
4. Ist das korrekte Flugzeug für den Verladevorgang geöffnet, kann das Gepäck sofort zum Ziel transportiert werden.
5. Ist dies nicht der Fall, muss der Koffer in einem Frühgepäckspeicher zwischengelagert werden.
6. Sobald der Flug verladen werden kann, muss der Koffer den Frühgepäckspeicher verlassen und zum Ziel befördert werden.

Dieser Prozess kann als Sequenz einzelner Funktionen aufgefasst werden, die jeweils von einzelnen Modulen erbracht werden können – beispielsweise Durchleuchten oder Zwischenlagern. Um solche Abläufe flexibel modellieren und dezentral implementieren zu können, sind zwei Dinge notwendig:

- die projektspezifische Geschäftslogik muss von der standardisierten Steuerungslogik der Module getrennt werden,
- es muss eine Methode zur aufwandsminimalen Definition und Veränderung von Arbeitsabläufen bzw. Workflows gefunden werden.

Transporteinheiten als Träger der Geschäftslogik

Die Geschäftslogik eines Systems bezieht sich auf Transporteinheiten und gibt an, was wann und unter welchen Umständen mit dem Stückgut zu geschehen hat. Die Materialflusssteuerung hingegen hat die Aufgabe, die dafür notwendigen Transporte umzusetzen und dabei optimale Durchlaufzeiten und Durchsätze zu erreichen. So wie die Materialflusssteuerung auf Fördertechnikmodule verteilt wird, wird im Internet der Dinge die Umsetzung der Geschäftslogik den Transporteinheiten zugewiesen.

Transporteinheiten werden zu Anfang ihrer Bearbeitung – beispielsweise am Check-In, am Wareneingang oder bei der Auslagerung – mit der Abarbeitung eines entsprechenden Arbeitsablaufs bzw. Workflows beauftragt. Dieser besteht aus einer Sequenz einzelner funktionaler Schritte („Durchleuchten“, „Zwischenlagern“, „Verladen“ ...), wobei auch Verzweigungen („Wenn Koffer sicher, verladen, sonst ausschleusen.“) und Prioritäten („Wenn möglich, verladen, sonst zwischenlagern.“) vorkommen können.

Jede Transporteinheit erhält einen eigenen, individuellen Workflow – es ist also durchaus möglich, verschiedenen TEs unterschiedliche Arbeitsabläufe zu erteilen, was beispielsweise in einem Kommissionierlager für die Umsetzung verschiedener Kommissionierstrategien notwendig sein kann. Die interne Abarbeitung eines solchen Arbeitsablaufs, also das Durchlaufen der Sequenz und das bedingte Entscheiden über den nächsten auszuführenden Schritt, wie auch die notwendige Kommunikation mit Modulen sind durch einfache, universell einsetzbare Mechanismen zu implementieren. Der Softwareagent einer Transporteinheit benötigt zum einen eine so genannte Workflow-Engine, die in der Lage ist, beliebige Arbeitsabläufe zu durchlaufen (siehe auch nächsten Abschnitt „Modellierung von Workflows“). Zum anderen muss er das Gesamtsystem nach Modulen durchsuchen können, die eine bestimmte Funktion – z.B. „Durchleuchten“ – erbringen, und aus den eventuell mehreren Alternativen die günstigste auswählen. Das UML-Sequenzdiagramm in Abbildung 3 zeigt die dabei notwendige Kommunikation zwischen Transporteinheit und anderen Entitäten.

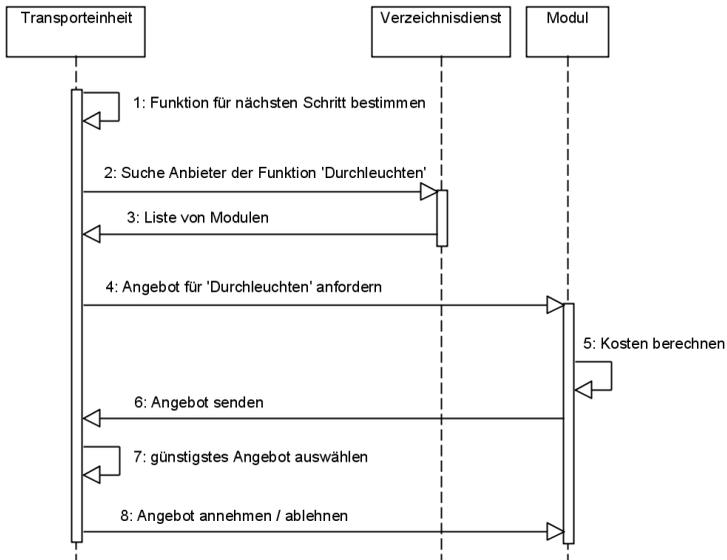


Abbildung 3 Abarbeiten eines Workflows durch eine Transporteinheit

Modellierung von Workflows

Workflows müssen wie auch in zentralen Systemen vom Anlagenprogrammierer oder –bediener festgelegt werden, da es einem technischen System unmöglich ist, aus sich selbst heraus seine eigentliche Funktion und die dafür notwendigen Abläufe zu erkennen. Eine Modellierungssprache für Arbeitsabläufe muss also sowohl maschinenlesbar bzw. für Transporteinheiten automatisiert interpretierbar als auch für einen Bediener intuitiv verwendbar sein. Eine geeignete Methode für die Beschreibung von Workflows sind daher so genannte High-Level Petri Netze. Petri Netze sind ein graphisch darstellbares und formal abgesichertes mathematisches Modell zur Darstellung von Systemtransitionen [Abe-90, Bau-96]. Petri Netze sind bipartite Graphen mit folgenden Elementen (siehe auch Abbildung 4):

- **Stellen** entsprechen den Zuständen eines Systems und werden als Kreise dargestellt. Die in einem Zustand des Gesamtsystems aktiven Stellen werden mit einer oder mehreren Marken gekennzeichnet.
- **Transitionen** repräsentieren einen Zustandsübergang im System und werden als Vierecke dargestellt.
- **Kanten** verbinden eine Stelle mit einer Transition, jedoch nie zwei Transitionen oder zwei Stellen. Sie werden als gerichtete Pfeile dargestellt.

- **Marken** werden als Punkte innerhalb von Stellen dargestellt und kennzeichnen die gerade aktiven Zustände im System. Marken sind nicht unterscheidbar.

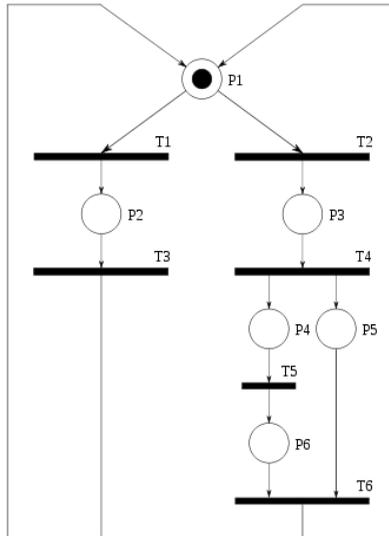


Abbildung 4 Einfaches Petri Netz

Als Erweiterung zur klassischen Version definieren High-Level Petri Netze zusätzliche Mechanismen, die für die Definition deterministischer intralogistischer Workflows notwendig sind. Besonders wichtig sind hierbei:

- Die Priorisierung von Transitionen bzw. Zustandsübergängen („Verladen ist wichtiger als Zwischenlagern“),
- Das Zuweisen von „Farben“ bzw. unterschiedlichen Eigenschaften zu den Marken, die bei Zustandsübergängen geprüft werden [Jen-91, Jen-92] („Wenn Koffer unsicher, ausschleusen“).

Obwohl Petri Netze vor allem für die Analyse nebenläufiger Systeme herangezogen werden und somit mehrere Marken bzw. mehrere aktive Systemzustände gleichzeitig existieren können, wird für die Modellierung eines Workflows eine einzige Marke benötigt. Diese gibt den aktuellen bzw. nächsten Schritt an, den eine Transporteinheit zu bearbeiten hat. Abbildung 5 stellt den eingangs beschriebenen Workflow als High-Level Petri Netz dar. Die im Systemzustand bzw. Workflowschritt „Durchleuchten 1“ befindliche Marke gibt an, was mit dem Koffer geschehen muss. Die Transporteinheit muss also ein Modul suchen, welches diese Funktion (zu möglichst günstigen Kosten) anbietet und sich dann dort hin transportieren lassen. Nach Abschluss der

Sicherheitsprüfung wird, in Abhängigkeit von deren Ergebnis, der nächste Schritt bestimmt und auf dieselbe Art bearbeitet.

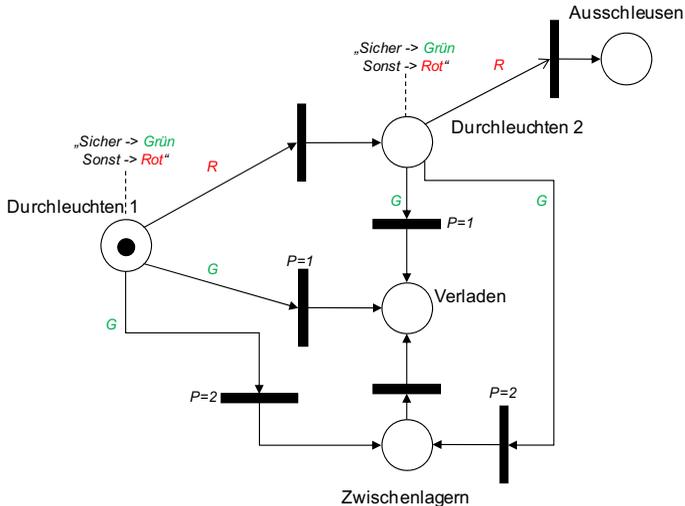


Abbildung 5 High-Level Petri Netz für einen Workflow zur Abarbeitung eines Gepäckstücks am Flughafen

Dezentrale Materialflusststrategien

Workflows wurden als Sequenz von Funktionen, die jeweils von einem einzigen Modul erbracht werden, definiert. Dabei sind aber unter Umständen Strategien zu beachten, die zwar der Transporteinheit unbekannt, für die Materialflusststeuerung aber von Bedeutung sind. So stellt sich bezüglich des voran gegangenen Flughafenbeispiels die Frage, wie der Schritt „Zwischenlagern“ tatsächlich durchgeführt wird, bzw. welche Randbedingungen und Lagerstrategien dabei berücksichtigt werden müssen. Eine der dabei wichtigsten Vorgänge ist das Sortieren von Transporteinheiten nach verschiedenen Kriterien – z.B. nach ihrer Flugnummer oder Abflugzeit.

Ein anderes Beispiel dafür, dass die Erbringung einer Funktion nicht immer durch rein lokale Entscheidungen und Aktionen möglich ist, ist der Transport. Um bspw. eine Palette zu einem von ihr gewählten Ziel zu befördern, müssen sich mehrere Module in ihrem Handeln abstimmen. Interessant ist hierbei vor allem der Fall, in dem mehrere Module um eine Ressource konkurrieren, beispielsweise wenn mehrere Querverschiebewägen (oder Regalbediengeräte) auf derselben Schiene fahren.

Die nächsten Abschnitte greifen diese Herausforderungen auf und zeigen Möglichkeiten zur dezentralen Realisierung einer Sorterverwaltung und der Ressourcenallokation bzw. Koordination mehrere Module.

Sortieren

Das Sortieren von Transporteinheiten ist immer dann notwendig, wenn Stückgut für die Vereinfachung oder Beschleunigung nachfolgender Prozesse in eine bestimmte Ordnung gebracht werden muss (siehe Abbildung 6). Dabei werden die Sortierkriterien je nach Anwendung unterschiedlich festgelegt und beziehen sich beispielsweise auf das Ziel, den Inhalt, die Priorität oder sonstige Attribute einer Transporteinheit.

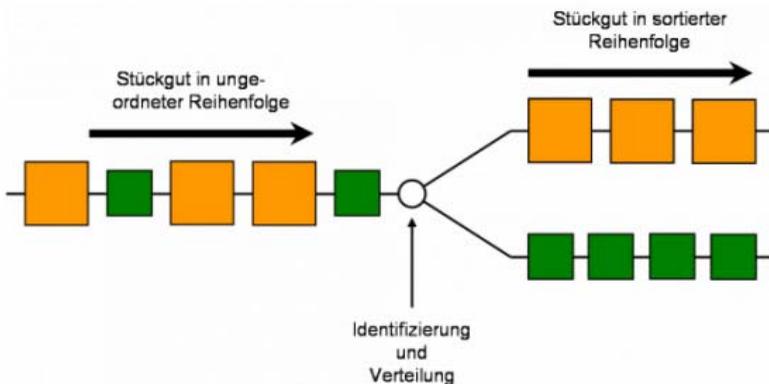


Abbildung 6 Sortieren von Stückgut

Im beschriebenen Flughafenszenario steht für das Zwischenlagern ein so genannter Frühgepäckspeicher zur Verfügung. Dieser besteht oftmals aus mehreren Pufferbahnen mit unterschiedlichen Rollen:

- einige Sorterbahnen werden je einem Flug zugeordnet und nehmen nur für das entsprechende Flugzeug bestimmte Gepäck auf,
- andere Bahnen werden einem Zeitfenster zugeordnet und nehmen Gepäckstücke auf, die in dem jeweiligen Zeitraum verladen werden, unabhängig von deren Flug.

Gemäß der funktionsorientierten Modularisierung wird nun jede einzelne Bahn als eigenständiges und selbststeuerndes Modul aufgefasst. Die Sortierlogik muss also auf die einzelnen Sorterbahnen so verteilt werden, dass jede Bahn für sich und mit keinem oder nur minimalem Wissen über den Zustand der anderen Bahnen entscheiden kann, ob sie einen Koffer aufnimmt bzw. zu welchen Kosten. Zur Berechnung dieser Kosten wertet jede Sorterbahn unabhängig von allen anderen

Modulen eine Kostenfunktion aus, wobei der Flug und der Verladezeitpunkt des Koffers die Grundlage für die Berechnung bilden. Diese Kostenfunktion kann sehr einfach gestaltet werden und bildet dezentral die gewünschte Sortierlogik ab (siehe Formel 1):

- Kosten = 0, wenn die Bahn bereits für den Flug reserviert ist, in den die Transporteinheit verladen werden muss,
- Kosten = 1, wenn die Bahn einem Zeitfenster zugeordnet ist, in dem der Koffer voraussichtlich verladen wird,
- Kosten = 2, wenn die Bahn noch frei ist, den Koffer aber prinzipiell aufnehmen darf,
- Kosten = ∞ in allen anderen Fällen – wenn die Bahn z.B. voll ist oder für einen anderen Flug reserviert ist.

$$k(TE) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } b \triangleq z(TE) \text{ und Bahn nicht voll} \\ 1, & \text{wenn } b \triangleq t(TE) \text{ und Bahn nicht voll} \\ 2, & \text{wenn } b = \emptyset \text{ und Bahn reservierbar für } z(TE) \text{ oder } t(TE) \\ \infty, & \text{sonst} \end{cases}$$

Formel 1 Kostenfunktion für einen einfachen Sorter

Dabei sind:

- b die aktuelle Belegung der die Funktion berechnenden Bahn (für eine freie Bahn sei $b = \emptyset$)
- $z(TE)$ das Ziel der Transporteinheit TE bzw. der Flug, in den der Koffer verladen werden muss
- $t(TE)$ das Abflugzeitfenster des Gepäckstücks TE

Darüber hinaus ist es ebenso möglich, den Belegungsgrad einer Bahn in die Kostenfunktion mit einfließen zu lassen. Sollen beispielsweise mehrere Bahnen mit identischem Sortierkriterium gleichmäßig befüllt werden, ist es möglich, die aktuelle Auslastung der Bahn im Nachkommabereich der bereits beschriebenen Kosten darzustellen: Eine zu 10% volle Bahn berechnet beispielsweise ein Angebot von 1,1, eine zu 25% volle ein Angebot 1,25. Auf diese Weise wird eine Transporteinheit immer die am wenigsten ausgelastete und gemäß der Sortierlogik optimale Bahn anfahren.

Sortieren mit Paarbildung

Eine vor allem in der Lagerlogistik anzutreffende komplexere Variante des Sortierproblems ist ein Sorter mit Paarbildung. Bei diesem gilt die zusätzliche Anforderung, dass zwischen Transporteinheiten, die nebeneinander befindlichen Bahnen zugeordnet werden, ein gewisser Zusammenhang bestehen muss. Abbildung 7 zeigt ein solches Beispiel: die auf sechs Sorterbahnen verteilten Transporteinheiten werden von einem Doppelquerverschiebewagen abgeholt und anschließend über weitere Förderer zu insgesamt vier AKLs weitertransportiert.

Da ein optimaler Durchsatz nur dann erreicht werden kann, wenn möglichst immer ein doppelter Lastwechsel zwischen Sorter und Querverschiebewagen und zwischen Querverschiebewagen und den anschließenden Förderern durchgeführt werden kann, müssen die Transporteinheiten so vorsortiert werden, dass sie in Bezug auf ihr Transportziel (AKL1 bis AKL4) paarweise auf benachbarten Sorterbahnen liegen. In diesem konkreten Beispiel muss also eine Transporteinheit mit Ziel AKL1 immer links (in Förderrichtung) neben einer Transporteinheit mit Ziel AKL2 einsortiert werden, während eine Transporteinheit mit Ziel AKL3 immer rechts von einer Einheit mit Ziel AKL4 liegen muss.

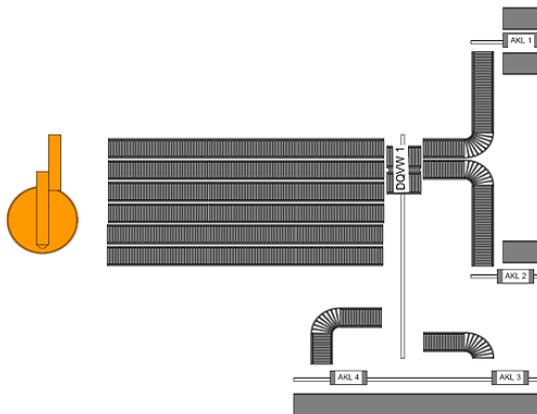


Abbildung 7 Sorter mit Paarbildung

Auch in diesem Fall lässt sich die Sorterverwaltung mittels einer relativ einfachen Kostenfunktion dezentral umsetzen. Dabei zu beachten ist aber, dass die Sorterbahnen in diesem Fall über weitere Daten verfügen müssen, und zwar

- die zu realisierenden Paare,
- die Namen ihrer direkten Nachbarbahnen (soweit vorhanden),
- die aktuelle Belegung der direkten Nachbarbahnen.

Während die ersten zwei Informationen statisch sind und sich nur mit einem Umbau der Anlage ändern, verändert sich der dritte Punkt recht häufig während des Betriebs. Jede Bahn muss also, vor Berechnung der Kostenfunktion, seine direkten Nachbarn über deren aktuelle Belegung befragen oder diese Information beispielsweise über eine zentrale Datenaustauschplattform beziehen.

Die Kostenfunktion gestaltet sich dann wie folgt:

$$k(TE) = \begin{cases} 0, & \text{wenn } b \triangleq z(TE) \text{ und } b_n \triangleq c(z(TE)) \\ 1, & \text{wenn } b = \emptyset \text{ und } b_n \triangleq c(z(TE)) \\ 2, & \text{wenn } b \triangleq z(TE) \text{ und } b_n = \emptyset \\ 3, & \text{wenn } b = \emptyset \text{ und } b_n \neq \emptyset \\ 4, & \text{wenn } b \triangleq z(TE) \text{ und } b_n \neq c(z(TE)) \text{ und } b_n \neq \emptyset, \text{ ODER} \\ & \text{wenn } b \neq z(TE) \text{ und } b \neq \emptyset \text{ und } b_n \triangleq c(z(TE)), \text{ ODER} \\ & \text{wenn } b = \emptyset \text{ und } c(b_n) \neq \emptyset \text{ und } c(b_n) \neq z(TE) \\ 5, & \text{wenn } b \neq \emptyset \text{ und } b \neq z(TE) \text{ und } b_n \neq \emptyset \text{ und } b_n \neq c(z(TE)) \\ \infty, & \text{wenn Bahn } i \text{ voll} \end{cases}$$

Formel 2 Kostenfunktion für einen Sorter mit Paarbildung

Dabei sind:

- b die aktuelle Belegung der die Funktion berechnenden Bahn (für eine freie Bahn sei $b = \emptyset$)
- b_n die Belegung einer Nachbarbahn
- $z(TE)$ das Ziel der Transporteinheit TE
- $c(z(TE))$ das Ziel, welches eine Transporteinheit haben muss, um mit TE ein Paar zu bilden

Diese Funktion gewährleistet die korrekte Befüllung des Sorters mit den gewünschten Paaren (Kosten 0, 1 und 2), ermöglicht aber gleichzeitig das Ausnutzen der gesamten Sorterkapazität: Ist die Realisierung der gewünschten Paare nicht möglich, weil die dafür notwendigen Bahnen voll sind, wird eine Transporteinheit auf eine andere, noch nicht volle Bahn umgeleitet (Kosten 4 und 5). Durch diese Vernachlässigung der Paarbildungsvorschrift wird zwar der Durchsatz am Punkt des Doppelverschiebewagens vom Optimum abweichen, andererseits wird das Entstehen eines Staus am Verteilelement vor dem Sorter verhindert. Leere Bahnen mit leeren Nachbarbahnen – was dem Initialisierungszustand des Systems entspricht – sind mit Kosten = 3 eine schlechtere Option als Bahnen, bei denen eine korrekte Paarbildung möglich ist, aber immernoch dem Zerstören der Paarbildungsvorschrift vorzuziehen. Bereits voll besetzte Bahnen werden wegen der unendlichen Kosten von einer Transporteinheit niemals als Ziel ausgewählt.

Sequenzbildung

Die Bildung von Sequenzen von Transporteinheiten – wie sie Beispielsweise bei der Kommissionierung oder beim Versand notwendig ist – kann als Sonderfall des Sortierens aufgefasst werden. Der Unterschied besteht darin, dass das „Sortierkriterium“ dynamisch ist und sich mit Aufnahme einer Transporteinheit jedes Mal ändert.

Für die Kostenfunktion genügen im einfachsten Fall zwei Werte: 0, wenn eine Transporteinheit die nächste Position in der gewünschten (und von einem externen System, z.B. dem LVS oder einem Kommissionierer vorzugebenden) Sequenz darstellt und unendlich in allen anderen Fällen. Auch hier sind Verfeinerungen

möglich, beispielsweise um Prioritäten verschiedener Kommissionieraufträge abzubilden oder um zu unterscheiden, ob die genaue Sequenz der Transporteinheiten eingehalten werden muss, oder ob die Anlieferung der gewünschten Güter in korrekter Anzahl schon genügt.

Dezentrales Ressourcenmanagement

An vielen Stellen in einem Materialflusssystem ist es notwendig, die Aufteilung von Ressourcen zwischen verschiedenen Systemteilnehmern zu organisieren. Beispiele hierfür sind Zusammenführungen des Materialflusses oder von mehreren Regalbediengeräten, Elektrohängebahnkatzen oder Querverschiebewägen gemeinsam genutzte Fahrwege. Eine Grundvoraussetzung für den störungsfreien Betrieb ist hier die Verhinderung von Blockadesituationen, die in der Regel dadurch aufgelöst werden, dass ein Ressourcennutzer einem anderen Vorrang gewähren muss. Die Vorfahrt wird dabei durch den Nutzern zugeordnete Prioritäten geregelt, welche meist noch durch übergeordnete Ziele beeinflusst sind. Dies kann z.B. die Verfolgung einer LIFO- bzw. FIFO-Strategie bzw. die bevorzugte Abarbeitung von Eilaufträgen sein.

In herkömmlichen Materialflusssystemen werden diese Vorgaben durch einen Bereichs- oder Materialflussrechner umgesetzt, der gegenüber dezentral gesteuerten Systemen den Vorteil hat, jederzeit auf ein konsistentes Datenmodell zugreifen und wie ein „Absolutherrscher“ die ihm unterstellten Fördersteuerelemente befehligen zu können. Dies kann jedoch, wie eingangs beschrieben, zu komplexen und schwer überschaubaren Steuerungsprogrammen führen, welche nur schwer erweiterbar sind. Im Folgenden soll am Beispiel mehrerer, auf einer gemeinsamen Schiene fahrenden Querverschiebewägen gezeigt werden, dass auch in diesem Fall eine dezentrale und auf relativ einfachen Regeln aufbauende Steuerung möglich und erstrebenswert ist.

Ein Querverschiebewagen (QVW) hat die Aufgabe, Transporteinheiten (TE) von einer oder mehreren Ankunftstrecken auf eine oder mehrere Abtransportstrecken zu befördern. Dazu bewegt er sich auf einer Schiene senkrecht zu den Zuführ-/Abtransportstrecken und verfügt selbst über einen Förderer, welcher die Lastübergabe durchführt.

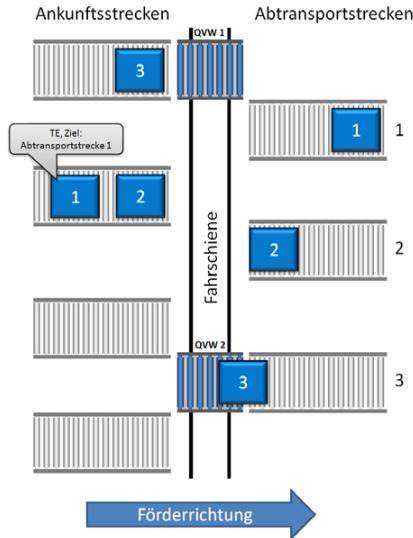


Abbildung 8 Querverschiebewagen

Liegt ein Transportauftrag vor, so sei das Arbeitspiel eines QVW wie folgt:

1. Fahrt zur Ankunftsstrecke
2. Lastaufnahme
3. Fahrt zur Abtransportstrecke
4. Lastabgabe

Im konkreten Beispiel soll davon ausgegangen werden, dass die ankommenden Transporteinheiten nach dem FIFO Prinzip weitergefördert werden. Warten also auf verschiedenen Ankunftsstrecken TEs auf ihren Transport, so ist diejenige bevorzugt zu befördern, welche am längsten gewartet hat. Zusätzlich soll immer derjenige freie QVW den Auftrag übernehmen, welcher den kürzesten Anfahrtsweg hat, um so die Transportwege und damit die Transportzeit zu minimieren. Diese Vorgaben führen zu einer ersten Prioritätsregelung:

$$P(TE, QVW) = t_W(TE) - t_{Anfahrt}(QVW)$$

Die Auftragsdisposition läuft damit wie folgt ab:

Jede Transporteinheit überwacht ihre Wartezeit t_W und meldet diese an die Querverschiebewagen. Diese berechnen ihre Anfahrtszeit $t_{Anfahrt}$ und berechnen $P(TE, QVW)$, welche wiederum an die Transporteinheit übermittelt wird. Auf diese Weise verfügen zum einen die Transporteinheiten über eine priorisierte Liste von

möglichen Transporteuren und zum anderen die Querverschiebewägen über eine Liste von bevorzugten TE. Der QVW kann dann unter den TE, welche sein Gebot angenommen haben, die für ihn günstigste auswählen. Nun wird die TE zum Transport reserviert und der QVW beginnt mit der Zielfahrt.

Während dieser Zielfahrt kann es bereits zu konkurrierenden Zielen der QVW und dadurch zu Blockadesituationen kommen. Ab jetzt gilt:

$$P_{\text{Zielfahrt}}(\text{QVW}) = t_w(\text{TE}) + c \cdot t_{\text{QVW}}(\text{TE}) - \rho(\text{QVW}) + R$$

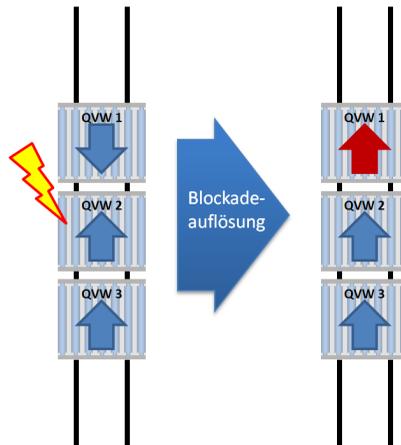
Hierbei fließt neben der Wartezeit $t_w(\text{TE})$ zusätzlich mit Gewichtung $c > 1$ die Zeit ein, welche eine TE bereits auf dem QVW verbringt $t_{\text{QVW}}(\text{TE})$. Dies führt dazu, dass ein beladener QVW immer eine höhere Priorität besitzt als ein unbeladener, so dass ein bereits begonnener Auftrag beendet werden kann, ohne dass ein freier QVW die Ausführung behindert. $\rho(\text{QVW})$ beschreibt die Auslastung eines QVW und sorgt in der Prioritätsgleichung dafür, dass bei einem Patt immer der QVW zum Zuge kommt, welcher bisher die geringere Auslastung hatte, was eine gleichmäßige Auslastung der QVW garantiert. Um den unwahrscheinlichen Fall zu verhindern, dass trotz Allem zwei QVW die gleiche Priorität erhalten, geht schließlich eine Zufallszahl R in die Berechnung mit ein. Diese sollte so klein gewählt werden, dass sie zwar eine Pattsituation verhindert, die anderen Faktoren aber nicht überträgt.

Tritt nun ein Zielkonflikt auf, so verhält sich jeder QVW nach folgenden Regeln:

- Falls der blockierende QVW eine höhere Priorität hat, fahre auch in dessen Richtung
- Wenn du einem Blockierer ausweichst, addiere die Priorität des Blockierers zu deiner eigenen, d.h.:

$$P_{\text{Blockade}}(\text{QVW}) = P(\text{Blockierer}) + P_{\text{Zielfahrt}}(\text{QVW})$$

Die zweite Regel führt in größeren Systemen dazu, dass die Priorität quasi von einem Fahrzeug zum nächsten „vererbt“ wird und auf diese Weise eine gewichtete Mehrheitsentscheidung bzgl. der Fahrtrichtung getroffen wird. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 9 zu sehen. Zwar wäre QVW1 in der Lage, QVW2 zu verschieben. Dazu müsste aber zusätzlich QVW3 seine geplante Fahrtrichtung ändern. Die beiden QVW 2 und 3 sind aber gemeinsam „stark genug“, um QVW 1 zu überstimmen, so dass dieser ausweichen muss.



Wobei:

$$P_{\text{Zielanfahrt}}(\text{QVW3}) > P_{\text{Zielanfahrt}}(\text{QVW1}) > P_{\text{Zielanfahrt}}(\text{QVW2})$$

$$P_{\text{Zielanfahrt}}(\text{QVW1}) < P_{\text{Zielanfahrt}}(\text{QVW2}) + P_{\text{Zielanfahrt}}(\text{QVW3}) = P_{\text{Blockade}}(\text{QVW1})$$

Abbildung 9 Blockadeauflösung

Sobald die Blockade beendet ist bzw. ein Blockierer seinen Auftrag erledigt hat, sinkt dessen Priorität schlagartig, da er nun unbeladen ist. Nun kann der bis dato unterlegene QVW zum Zuge kommen.

Die bisher beschriebenen Prioritäts- und Verhaltensregeln führen zwar schon zu einem blockadefreien Ablauf, jedoch keineswegs zu einem hohen Durchsatz, da ein Konflikt erst aufgelöst wird, wenn die QVW schon auf Kollisionskurs sind. Es ist daher möglich, das bisherige Verhalten noch zu optimieren. Dazu sind verschiedene zusätzliche Verhaltensregeln denkbar, welche sowohl einzeln als auch in Kombination einsetzbar sind:

1. Auftrag bei Blockade stornieren

Falls du auf dem Weg zur Ankunftsstrecke von einem anderen QVW blockiert wirst, suche dir, falls möglich, einen neuen Auftrag, dessen Startpunkt in Fahrtrichtung des Blockierers liegt. Diese Regel verhindert, dass die Ziele der einzelnen QVW über Kreuz liegen, so dass sie sich nicht unnötig gegenseitig behindern.

2. Anfahrtsweg reservieren

Reserviere den Weg zur Ankunftsstrecke im Voraus, so dass andere QVW diesen nur noch in der gleichen Fahrtrichtung befahren dürfen. Diese Regel verfolgt die Idee, Blockaden nicht aufzulösen, sondern sie bereits im Vorfeld zu verhindern.

3. Zielanfahrt reservieren

Reserviere den Weg von der Ankunftsstrecke bis zum Zielpunkt im Voraus, so dass andere QVW diesen nur noch in der gleichen Fahrtrichtung befahren dürfen.

4. Schätze Auftragsbearbeitungszeit

Die eingangs beschriebene Auftragsdisposition bezog ausschließlich freie QVW mit ein. Diejenigen, welche gerade mit der Abarbeitung eines Auftrags beschäftigt sind, sind daran noch nicht beteiligt. Daher kann die Berechnung der Priorität zur Auftragsdisposition $P(TE, QVW)$ so erweitert werden, dass sich auch belegte QVW an der Auftragsvergabe beteiligen können. Die Berechnung der Priorität wird dann wie folgt erweitert:

$$P(TE, QVW) = t_W(TE) - t_{Anfahrt}(QVW) - t_{Auftragsbearbeitung}(QVW)$$

Wobei $t_{Auftragsbearbeitung}$ der Zeit entspricht, die voraussichtlich verstreicht bis der QVW wieder zur Verfügung steht. Je nachdem, in welcher Phase seines Arbeitsspiels sich dieser befindet, gehen dabei Lastübergabezeiten und/oder noch verbleibende Fahrzeiten in die Berechnung mit ein.

Im Rahmen einer Simulation wurde die Leistungsverbesserung durch diese Strategien anhand eines Systems, das über drei QVW mit 10 Ankunftsstrecken und 8 Abtransportstrecken verfügt, überprüft. Dazu wurde der Durchsatz beim Betrieb ohne Verhaltensregeln mit demjenigen, der durch Anwendung einer zusätzlichen Verhaltensregel erzielt wird, verglichen (siehe Abbildung 10).

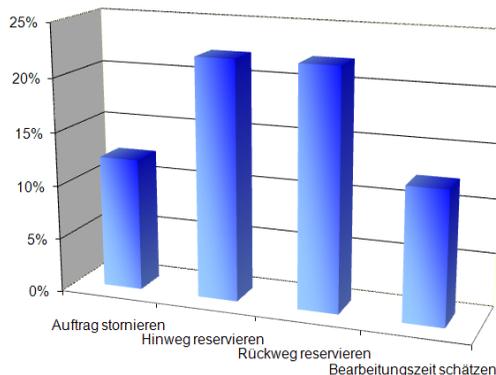


Abbildung 10 Durchsatzsteigerung durch Anwendung von Verhaltensregeln (einzeln)

Dabei zeigt sich, dass die Verhaltensregeln 2 und 3 jeweils die größten Auswirkungen auf den Durchsatz haben. Hier bestätigt sich die Vermutung, dass diejenigen Regeln, die Blockaden schon im Vorfeld verhindern, am wirkungsvollsten sind.

Anschließend wurde eine kombinierte Anwendung der Verhaltensregeln untersucht. So bewirkt die Kombination von Regel 1 & 2 bereits eine Durchsatzsteigerung von 40%. Alle Regeln zusammen erreichen sogar 54% (siehe Abbildung 11).

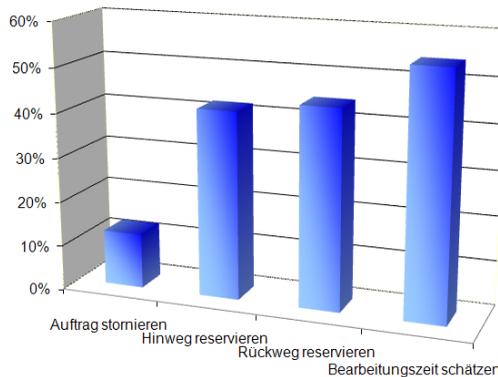


Abbildung 11 Durchsatzsteigerung durch Anwendung von Verhaltensregeln (kombiniert)

Die Auslastung der QVW ist in diesem System, das unter Überlast betrieben wurde, (theoretisch unendlicher Stau auf den Ankunftsstrecken) bei ca. 76%. Dieser im Vergleich zu einem einzeln betriebenen QVW niedrige Auslastungsgrad ist darauf zurückzuführen, dass sich Zielkonflikte und dadurch bedingte Behinderungen nicht gänzlich vermeiden lassen, wenn drei Fahrzeuge um einen Schienenweg konkurrieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich auch in einem dezentral gesteuerten System mit relativ einfachen Mitteln komplexe Verhaltensweisen umsetzen lassen, die den Vergleich mit zentraler Steuerung nicht scheuen müssen. Darüber hinaus haben aber dezentral gesteuerte Systeme den Vorteil einer übersichtlicheren Programmierung und der problemlosen Erweiterbarkeit. Die vorgestellten Regeln sind unabhängig von der Anzahl der QVW im System und der Ankunfts- bzw. Abtransportstrecken. Die Implementierung der Steuerungslogik ist damit nicht nur auf unterschiedliche Einsatzszenarien von Querverschiebewägen übertragbar, sondern ist auch für die Ansteuerung von Regalbediengeräten oder Elektrohängebahnkatzen einsetzbar.

Zusammenfassung

Materialflusssysteme müssen immer höheren Anforderungen gerecht werden. Dazu zählen vor allem die Flexibilität bzw. Wandelbarkeit und die Dynamik. Das Internet

der Dinge als eine neuartige, dezentrale und hierarchielose Materialflusssteuerung verspricht hier große Vorteile gegenüber heutigen Systemen: Anlagen können aus standardisierten und selbststeuernden Fördertechnikmodulen aufgebaut werden, intelligente Transporteinheiten beteiligen sich aktiv an der Steuerung logistischer Prozesse. Zentrale Instanzen wie der Materialflussrechner entfallen, projektspezifische Programmieraufwände werden stark verringert, die Inbetriebnahme wird vereinfacht.

Dieser Artikel hat gezeigt, wie es eine getrennte Betrachtung der Geschäftslogik und der Materialflusssteuerung erlaubt, beliebige logistische Abläufe mit standardisierten Modulen umzusetzen. Für die Modellierung beliebiger logistischer Workflows können beispielsweise High-Level Petri Netze herangezogen werden. Mit einer „Workflow-Engine“ ausgestattete Transporteinheiten sind dann in der Lage, die so beschriebenen Prozesse abzuarbeiten und gewährleisten auf diese Weise das zielgerichtete Zusammenspiel der autonomen Einheiten im Internet der Dinge.

Darüber hinaus wurde gezeigt, wie auch komplexe Materialflussstrategien dezentral umgesetzt werden können. Koordinations- und Kooperationsmuster für Module ergeben sich dabei aus einfachen lokalen Entscheidungsregeln und Kostenfunktionen, Transporteinheiten benötigen nur einfache und universell einsetzbare Service-Discovery Mechanismen für das Auffinden von Zielen und das Durchführen von Auktionen.

Literaturverzeichnis

- [Abe-90] Abel, D.: Petri-Netze für Ingenieure – Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme, Berlin: Springer Verlag, 1990, ISBN 3-540-51814-2
- [Arn-95] Arnold, D.: Materialflußlehre, Vieweg, 1995, ISBN 3-528-03033-X
- [Bau-96] Baumgarten, B.: Petri-Netze - Grundlagen und Anwendungen, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996, ISBN 3-8274-0175-5
- [Beu-06] Das BEUMER autover®-System – ein aktives DCV System, Prospekt der Beumer Maschinenfabrik GmbH & Co. KG Deutschland, http://www.beumer.com/htcms/get_file.php4?pid=346&ref=pdf&lang=de (Abgerufen am 11.11.2008)
- [Gün-00] Günthner W.A.; Reinhart, G. (Hrsg.): Abschlussbericht MATVAR - Materialflusssysteme für variable Fertigungssegmente im dynamischen Produktionsumfeld, Herbert Utz Verlag Wissenschaft, München 2000.

- [Gün-08a] Günthner, W.A.; Chisu, R.; Kuzmany, F.: Internet der Dinge - Steuern ohne Hierarchie, IN: F+H Fördern und Heben, Ausgabe September 2008, S. 494-497
- [Gün-08b] Günthner, W.A.; Chisu, R.; Kuzmany, F.: Internet der Dinge – Zukunftstechnologie mit Kostenvorteil, IN: F+H Fördern und Heben, Ausgabe Oktober 2008, S. 556-558
- [Hom-05] ten Hompel, M.; Liekenbrock, D.; Stuer, P.: Realtime Logistics: echtzeitnahe Steuerung von Materialflusssystemen auf Basis autonomer Agenten und Entitäten, IN: Logistics Journal: Nicht referierte Veröffentlichungen, 2005, ISSN 1860-5923
- [Jen-91] Jensen, K.; Rosenberg, G.. High-level Petri-Nets: Theory and Application. Springer Verlag, Berlin. 1991. ISBN 038754125X.
- [Jen-92] Jensen, K.: Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use. Springer Verlag, Berlin. 1992. ISBN 0387555978.
- [May-09] Mayer, S. H.: Development of a completely decentralized control system for continuous conveyors, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), April 2009
- [Rit-03] Ritter, A.: Ein Multi-Agenten-System für mobile Einrichtungen in Produktionssystemen, Diss., Universität Stuttgart, Jost Jetter Verlag Heimsheim, ISBN 3-936947-07-4, 2003
- [Roi-07] Roidl, M.; Follert, G.: Simulation von multiagentenbasierten Materialflusststeuerungen; Beiträge der 37. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V.; Bremen 2007
- [Sau-00] Sauer, J.; Freese, T.; Teschke, T.: Towards agent-based multi-site scheduling; In: Jürgen Sauer, Jana Köhler (Hrsg.): Proc. of the ECAI 2000 Workshop on the New Results in Planning, Scheduling, and Design, S.123-130, 2000
- [Wil-06] Wilke, M.: Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen, Dissertation, TU München, 2006

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Internet der Dinge“, in dessen Rahmen die hier vorgestellten Konzepte entstanden sind, wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des

Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA) betreut.

Entwicklung optimierter mehrrilliger Magnettreibscheiben für Aufzüge

Dipl.-Ing. Rüdiger Herhold, Dipl.-Ing. Martin Anders
Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt
Technische Universität Dresden
Professur für Technische Logistik

Abstract: Gegenstand der Forschungsarbeiten am Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme der TU Dresden sind neuartige Treibscheiben, bei denen es gelingt, durch den Einbau von Hochleistungs-Permanentmagneten im Umfangsbereich die Treibfähigkeit zu erhöhen. Dadurch wird es möglich, auf Rillenprofile zu verzichten, die eine hohe Treibfähigkeit mit einer erhöhten Seilbeanspruchung und damit zu Lasten der Seillebensdauer erkaufen, und den Einsatz von Leichtbau-Aufzugskabinen zu realisieren.

Forschungsschwerpunkte sind dabei die Berechnung der Treibfähigkeit von Treibscheiben, ihre experimentelle Testung und die Abschätzung der Seilschädigung. Zur Berechnung der Treibfähigkeit von Magnettreibscheiben wurde die bekannte Euler-Eytelweinsche Gleichung $F_1 / F_2 = e^{\mu\beta}$ so erweitert, dass die Wirkung der Permanentmagnete als magnetische Streckenlast Berücksichtigung findet. Diese ist analytisch und experimentell bestimmt worden, wobei die analytische Bestimmung der magnetischen Streckenlast zugleich Voraussetzung für eine gezielte konstruktive Optimierung bei mehrrilligen Magnettreibscheiben ist. Dabei werden verschiedene Einflussfaktoren wie die Geometrie des Seiles und der Treibscheibe inkl. der Treibscheibenrille sowie Werkstoffeigenschaften auf die Kraftwirkung untersucht.

1 Ausgangslage

Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete) gehören zu den Seltene-Erden-Magneten und sind derzeit die leistungsstärksten Magnetwerkstoffe. Sie werden in einem anspruchsvollen Press- und Sinterverfahren in geschützter Atmosphäre hergestellt. NdFeB-Magnete müssen sorgfältig vor Feuchtigkeit geschützt werden, da sie in feuchter Atmosphäre zu Oxidation und Korrosion neigen. Ihre Einsatztemperatur liegt zwischen -40 °C bis $+100\text{ °C}$, in Sonderfällen bis zu 180 °C .

Durch die extrem hohe Haftkraft ist das Neodym-Haftmagnetsystem ideal für Anwendungen mit begrenztem Einbauraum geeignet. Verbesserte Materialeigenschaften und die Entwicklung von preisgünstigen Beschichtungsverfahren haben dem Werkstoff weltweit zum Durchbruch verholfen. Besonders im Aufzugsbau und bei Befahranlagen ist ihr Einsatz interessant zur Erhöhung der Treibfähigkeit von Treibscheiben. Im Kran- und Windenbau eröffnen sie unter bestimmten Bedingungen Innovationsansätze.

Die Forschung zum Verhalten von Seilen in Seiltrieben bei den unterschiedlichsten Einsatzfällen hat am Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme (TLA) eine lange Tradition. Schwerpunkte waren und sind dabei die Berechnung der Treibfähigkeit von Treibscheiben und die Abschätzung der Seilschädigung.

Beim Antrieb von Aufzügen und Befahranlagen mit Seilen über Treibscheiben ist die Kraft F_1 an der auflaufenden Seite mit der Kraft F_2 an der ablaufenden Seite über die Eytelweinsche Gleichung verknüpft (siehe Abschnitt 3). Wird F_2 sehr klein, z.B. durch den Leichtbau von Aufzugskabinen oder das Versagen der Vorspannung bei Befahranlagen, sinkt die mögliche Nutzlast bzw. es besteht Absturzgefahr. Durch den Einsatz von Hochleistungspermanentmagneten im Umfangsbereich einer Treibscheibe kann die Treibfähigkeit erhöht und dauerhaft garantiert werden. Magnetsysteme mit Hochleistungspermanentmagneten, gefertigt aus Seltenen Erden, weisen eine bis zu 20-fache Haftkraft gegenüber herkömmlichen Dauermagneten auf. Diese Tatsache soll zur Erhöhung der Treibfähigkeit genutzt werden. Zur Normalkraft infolge der Aufzugs- bzw. Gegengewichtsmasse kommt die Magnetkraftwirkung hinzu. Für die Dimensionierung und konstruktive Ausbildung solcher Magnettreibscheiben wurden im Rahmen eines DFG-Forschungsprojekts die Berechnungsgrundlagen entwickelt und experimentell abgesichert.

Die Treibfähigkeit ist in hohem Maße von der Form der Seilrille abhängig. Von technischer Bedeutung sind dabei im Wesentlichen die unterschrittene Rundrille und die Keilrille. Dabei stellt der Einsatz des Unterschnitts bei Rundrillen eine zusätzliche Erhöhung des Reibwertes (und damit der Treibfähigkeit) gegenüber einer Rundrille ohne Unterschnitt dar (vgl. Scheffler 1998). Die dadurch auftretende Seildeformation erfordert eine Begrenzung der Unterschnittbreite auf das 0,75 bzw. 0,8-fache des Seildurchmessers (TRA 2003) und verursacht einen erhöhten Seilverschleiß.

Durch die Verringerung der örtlichen Pressung bei der Verwendung von unterschrittenen Rundrillen statt Keilrillen wird zwar eine höhere Betriebsdauer der Seile erreicht, die Treibfähigkeit ist jedoch geringer. Dieser Nachteil kann durch den Einsatz von Magnettreibscheiben ausgeglichen werden.

Für die Erhöhung der Treibfähigkeit einer Treibscheibe sind zurzeit zwei konstruktive (mechanisch wirkende) Lösungen realisiert (vgl. F. Kurth 1987):

- am Umfang der Treibscheibe angebrachte Klemmen (siehe Abbildung 1a)
- Treibscheiben mit kleinen Keilwinkeln γ im Bereich von 30° bis 45° und Unterschritt (siehe Abbildung 1b)

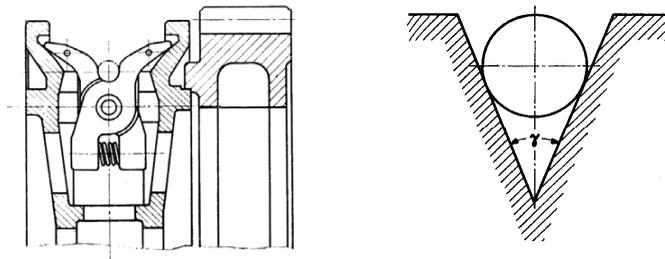


Abbildung 1: a) Seilklemmscheibe (F. Kurth 1987)

b) Keilrille

Die erste Lösung führt infolge des Klemmprinzips zu starken örtlichen Druckbeanspruchungen im Seil. Das hat eine bedeutende Verringerung der Seillebensdauer zur Folge (vgl. Feyrer 2000). Außerdem besteht die Klemmvorrichtung selbst aus einer Vielzahl verschleißender Bauteile und ist damit sehr anfällig für Ausfälle.

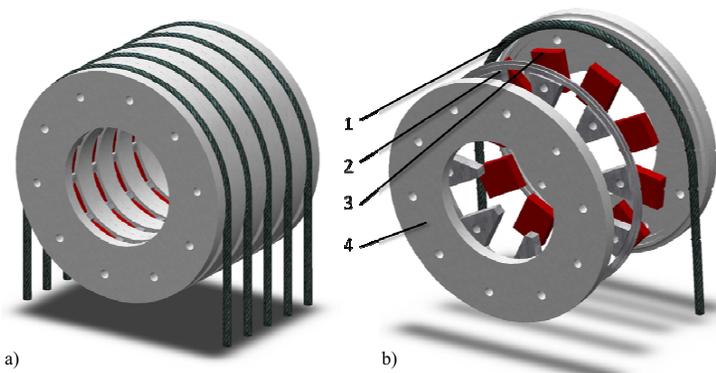


Abbildung 2: Grundaufbau einer mehrrilligen Magnettreibscheibe

a) Treibscheibenpaket

b) Komponenten für eine Rille:

1 Seil, 2 Distanzscheibe,

3 Permanentmagneten, 4 Polscheiben

Eine neue Lösung basiert im Ergebnis theoretischer Voruntersuchungen (Gräbner 2008) auf dem Einsatz von Hochleistungspermanentmagneten, die im Umfangsbereich von Treibscheiben konstruktiv angeordnet werden (Gräbner 2004). Die Abbildung 2 zeigt den Grundaufbau am Beispiel einer fünfrilligen Magnettreibscheibe. Hier nimmt der geteilte Rillenkörper das Magnetsystem, bestehend aus Permanentmagneten und Distanzscheibe, auf.

2 Theoretische Untersuchungen

2.1 Grundlagen

Unter einer Treibscheibe versteht man eine Seilrolle, die angetrieben wird. Mit ihrer Hilfe werden das Seil und die angeschlagenen Lasten bewegt. Dies setzt einen Kraftschluss zwischen Seil und Treibscheibenrille voraus, der bei einer klassischen Treibscheibe durch Reibung realisiert wird.

Betrachtet man das Berechnungsmodell einer Treibscheibe mit Seil (siehe Abbildung 3), so gilt dafür für das Verhältnis der Seilkräfte F_1 vom auflaufenden und F_2 vom ablaufenden Seil - im Folgenden als Treibfähigkeit bezeichnet - die Eytelweinsche Gleichung

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu \cdot \beta} \quad (1)$$

mit

- F_1 maximale Zugkraft, bei der das Rutschen des Seils beginnt
- F_2 Vorspannkraft
- μ Reibwert in der Treibscheibenrille; abhängig von Werkstoffen und Rillenform
- β Umschlingungswinkel.

Gl. (1) gilt für das biegeschlaffe Seil, in Scheffler (2004) wird ihre Herleitung umfassend erläutert. Die maximal übertragbare Umfangskraft der Treibscheibe – sie ergibt sich aus der Differenz von F_1 und F_2 – wird durch die Parameter β , μ und F_2 bestimmt. Aus Umfangskraft und Treibscheibendurchmesser ergibt sich das Antriebsmoment M_t . Es kann bei der klassischen Treibscheibe nur erhöht werden, wenn mindestens ein Parameter vergrößert wird. Hier stößt man aber auf physikalisch bzw. technisch bedingte Grenzen.

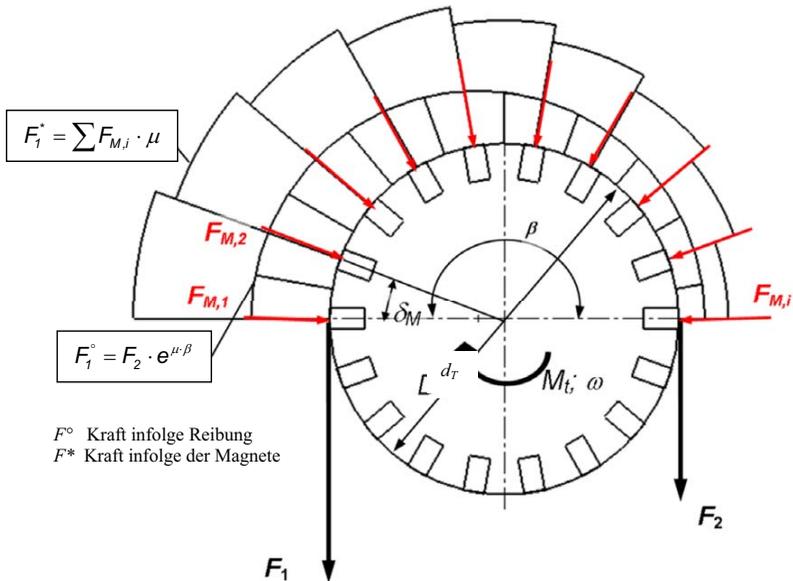


Abbildung 3: Modell zur Berechnung der Seilkraftkomponenten an der Magnetreibscheibe

Die maximal übertragbare Umfangskraft der Treibscheibe kann durch den Einsatz von Permanentmagneten mit zusätzlichen inneren Kräften $F_{M,i}$ (siehe Abbildung 3) radial zur Treibscheibe erhöht werden. Durch gleichmäßiges Verteilen der Einzelkräfte längs des vom Seil umschlungenen Teils der Treibscheibe ergibt sich die magnetische Streckenlast q_M . Für die Magnetreibscheibe mit dem Nenndurchmesser d_T gilt dann

$$F_1 = F_2 \cdot e^{\mu \cdot \beta} + q_M \cdot \frac{d_T}{2} \cdot (e^{\mu \cdot \beta} - 1). \quad (2)$$

Unter der Annahme, dass der Reibwert μ unabhängig von der Belastung der Treibscheibenrinne ist, können aus zwei vorgegebenen Belastungswerten F_{21} und F_{22} am Seilablauf und den dazu gemessenen maximalen Zugkräften F_{11} und F_{12} am auflaufenden Seil die magnetische Streckenlast q_M und der Reibwert μ berechnet werden:

$$\mu = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left(\frac{F_{11} - F_{12}}{F_{21} - F_{22}} \right) \quad (3)$$

$$q_M = \frac{2}{d_T} \cdot \left(\frac{F_{11} - F_{21} \cdot e^{\mu \cdot \beta}}{e^{\mu \cdot \beta} - 1} \right). \quad (4)$$

2.2 Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente (FEM)

Für die statischen Magnetfeldberechnungen an der Magnettreibscheibe wurde das FEM-Programmsystem ANSYS verwendet. Im Folgenden wird das prinzipielle Vorgehen dieser Berechnungen vorgestellt.

Ziel der Analysen ist es, den magnetischen Fluss der Dauermagnete sowie die daraus resultierende Kraftwirkung auf das über die Magnettreibscheibe laufende Seil zu untersuchen, um grundlegende Erkenntnisse für die Konstruktion von Magnettreibscheiben zu gewinnen. In der statischen Magnetfeldanalyse mit ANSYS werden in erster Linie die physikalischen Größen des Magnetismus, wie die magnetische Feldstärke und die Flussdichte, berechnet. Weiterhin können aus diesen Größen Kräfte, die entlang eines Pfades oder auf eine Oberfläche wirken, berechnet werden.

Eine statische Magnetfeldanalyse ist sowohl mit einem 2D- als auch mit einem 3D-Modell (siehe Abbildung 4) möglich. In beiden Fällen ist zu beachten, dass im Modell nicht nur die Bauteile enthalten sind.

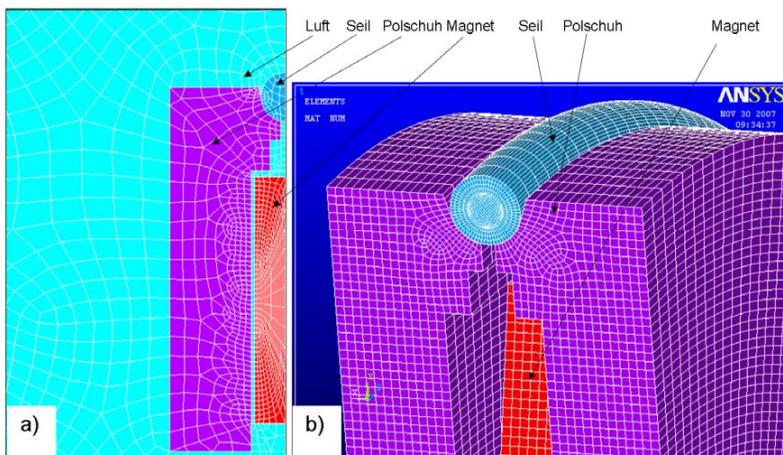


Abbildung 4: Vernetzte FEM-Modelle a) 2D b) 3D (Luftelemente nicht gezeichnet)

Es muss vor allem auch die umhüllende Luft mit modelliert werden, da ansonsten keine Feldberechnung über das gesamte Modell möglich ist. Neben der Beschreibung der geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Bauteile ist die Beschreibung der magnetischen Eigenschaften erforderlich. Zu berücksichtigen sind die relative Permeabilität, die Remanenz und die Koerzitivfeldstärke (auch Entmagnetisierung genannt), die den vom Hersteller zur Verfügung gestellten Entmagnetisierungskennlinien entnommen werden können.

Da die Koerzitivfeldstärke neben dem Werkstoff auch von der Geometrie der Magnete abhängt, muss ein Arbeitspunkt (AP) ermittelt werden. Dieser liegt bei einem Permanentmagneten auf der Entmagnetisierungskennlinie, welche der magnetischen Hystereschleife im zweiten Quadranten entspricht. Um den richtigen Arbeitspunkt eines beliebigen Permanentmagneten zu finden, kann die Grafik zur Dimensionierung nach IBS Magnete (2008) herangezogen werden (Abbildung 5). Der Arbeitspunkt ist abhängig vom Verhältnis der Dicke L des Magneten in Magnetisierungsrichtung zu seinem Durchmesser D . Im vorliegenden Fall werden quaderförmige Magnete verwendet, bei denen die Seitenflächen senkrecht zur Magnetisierungsrichtung verlaufen. Hier wird nach Herstellerangaben ein äquivalenter Durchmesser bestimmt.

Für das Seil wird, da es nicht als Vollkörper aus Stahl betrachtet werden kann, eine modifizierte Magnetisierungskennlinie benutzt.

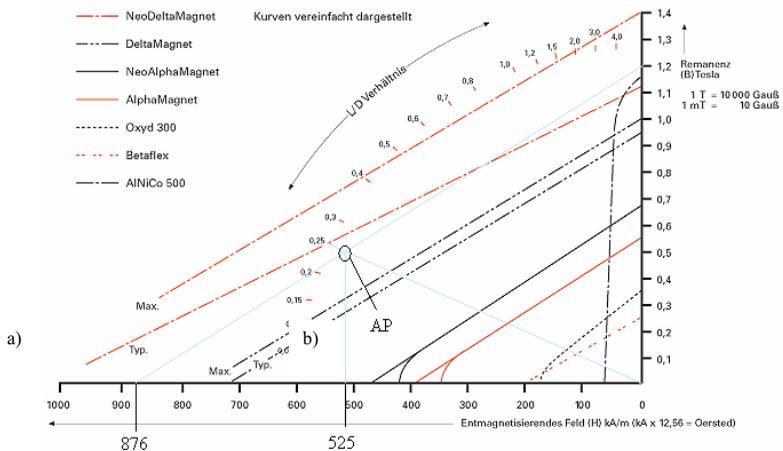


Abbildung 5: Entmagnetisierungskennlinien verschiedener Magnetwerkstoffe und Arbeitspunktbestimmung (IBS Magnete 2008)

Primäresultat der FEM-Berechnung ist der Verlauf der Flussdichte (siehe Abbildung 6a). Aus ihr kann die magnetische Pressung längs des Berührungspfad s (siehe Abbildung 6b) berechnet werden und damit wiederum die magnetische Streckenlast q_M . Diese wiederum kann zum Nachweis der Treibfähigkeit mit Hilfe von Gl. (2) verwendet werden.

Mit Hilfe der im Labor gewonnenen Messergebnisse werden sowohl die verwendeten magnetischen Parameter überprüft als auch die Berechnungsmodelle validiert. Die experimentellen Untersuchungen – auf sie wird im Abschnitt 3 näher eingegangen – haben die Berechnungen bestätigt.

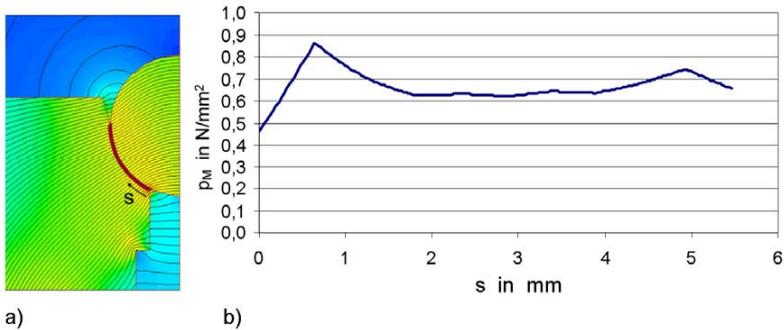


Abbildung 6: FEM-Berechnungsergebnisse
 a) Flussdichte; b) magnetische Pressung längs des Pfades s

2.3 Geometriebetrachtungen mit dem FEM-Programmsystem ANSYS

Die erste nahe liegende Untersuchung an der Magnetreibscheibe, die vorgenommen werden kann, ist die Variation des verwendeten Unterschnittes in der Seilrille. Die ausreichende räumliche Trennung der beiden Polscheiben einer Seilrille und die damit erfolgte Schließung des magnetischen Kreises über das Seil kann sowohl durch eine nichtleitende Distanzscheibe als auch durch den Einsatz eines Unterschnittes (mit der entsprechenden Reibwerterhöhung) erfolgen. Bei den durchgeführten Untersuchungen wird von den Vorteilen des Einsatzes eines Unterschnittes ausgegangen. Vergleichende experimentelle Untersuchungen mit einer Rundrille ohne Unterschnitt werden trotzdem durchgeführt.

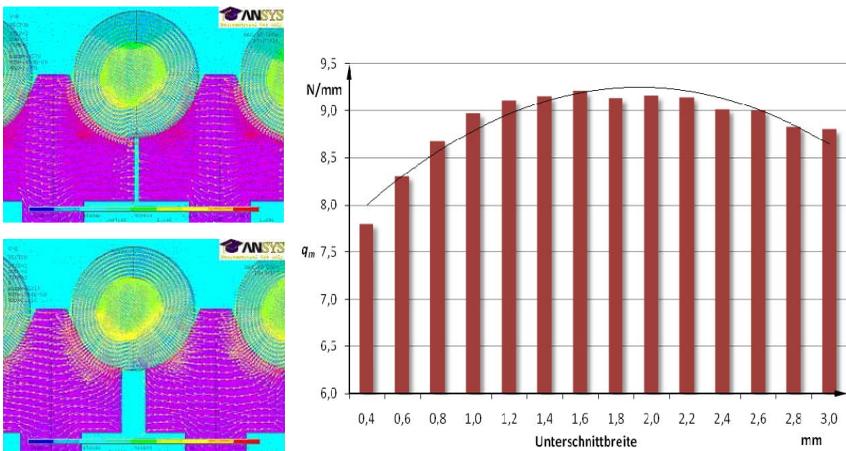


Abbildung 7: magnetischer Fluss und magnetische Streckenlast q_m bei variiertem Unterschnittbreite

Dementsprechend wurde für unterschiedliche Seil- und Treibscheibendurchmesser bei Konstanthalten aller Eingangsgrößen der Querschnitt variiert (siehe Abbildung 7). Anhand des aufgezeigten Beispiels sind im Bereich von 0,8 bis 3,0 mm Querschnittsbreite keine großen Schwankungen zu verzeichnen (6% Schwankungsbreite). Dennoch ist eine Tendenz zu einem optimalen Bereich zu erkennen, der für bestimmte vorgegebene Seil- und Treibscheibendurchmesser ermittelt wurde und bei der Konstruktion von Magnettreibscheiben als Richtwert dient.

Für die Umsetzung einer kompakten Bauweise der Magnettreibscheiben sind Untersuchungen der Polungsrichtung der axial hintereinander liegenden Permanentmagnete der einzelnen benachbarten Rillen von entscheidender Bedeutung. Es stehen zwei sinnvolle Möglichkeiten für die Richtung der Polung zur Verfügung. Die Permanentmagnete von zwei benachbarten Rillen können mit der gleichen oder mit entgegengesetzter Polungsrichtung vorgesehen werden. Mit Hilfe eines FEM-Modells für einen Seildurchmesser von 8 mm wurden mit den zwei Möglichkeiten statische Magnetfeldanalysen durchgeführt, um den Einfluss der Polungsrichtung zu bestimmen. Die grundlegende Erkenntnis der Untersuchung ist die unterschiedliche Ausbildung der magnetischen Kreise innerhalb des Treibscheibenpaketes. Bei entgegengesetzter Polung bilden sich für jede Rille separate magnetische Kreise, wohingegen bei gleicher Polungsrichtung vorwiegend ein magnetischer Kreis pro Magnetenreihe vorliegt (siehe Abbildung 8), der jede Rille mit einschließt.

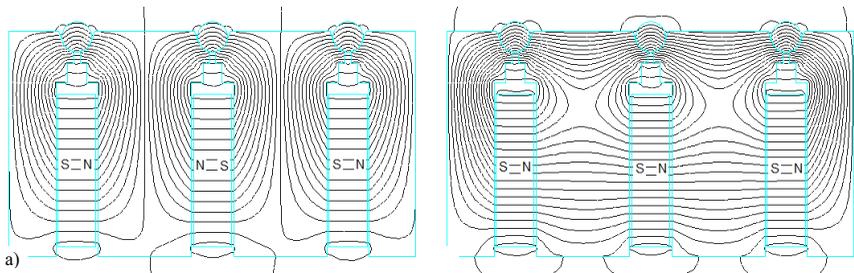


Abbildung 8: Polungsmöglichkeiten der Magnete bei mehrrilligen Magnettreibscheiben
a) entgegengesetzte Polung; b) gleiche Polung

Hinsichtlich der magnetischen Kraftwirkung auf das Seil ergaben sich keine Abhängigkeiten von der Polungsrichtung der Magnete. Bei gleicher Polung der Permanentmagnete kommt in den äußeren Rillen aufgrund der Asymmetrie eine kleine Kraftkomponente in axialer Richtung bezüglich der Treibscheibe hinzu, welche mit kleiner werdenden Rillenabstand zunimmt aber dennoch im Vergleich zur radial bezüglich der Treibscheibe wirkenden Last q_m vernachlässigbar ist. Der Einfluss dieser Komponente wird noch geringer, wenn die wirkenden Seilkräfte hinzukommen. Vorteilhaft für die Praxis stellt sich die gleiche Polung der Permanentmagnete bei der Montage des

Treibscheibenpaketes dar, da die anziehenden Kräfte besser zu handhaben sind als die Abstoßung der Permanentmagnete bei entgegengesetzter Polung.

Um die Baubreite eines mehrrilligen Treibscheibenpaketes möglichst gering zu halten (Materialersparnis und Verringerung des Biegemomentes an der Getriebeabtriebswelle), wurde bei gleicher Polung der Magnete zunächst versucht, die Polscheiben dünner zu gestalten. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Dicke der innen liegenden Polscheiben keinen Einfluss auf die magnetische Kraftwirkung hat, wohingegen die außen liegenden eine Mindestdicke des Stahls aufweisen müssen, um die Leitung des magnetischen Flusses in vollem Maße zu gewährleisten. Die minimale Dicke der inneren Polscheiben ist somit durch die hinreichende strukturmechanische Festigkeit gegeben. Entsprechend dieser Erkenntnis kann die Baubreite des Treibscheibenpaketes entscheidend verringert werden, sodass kleine Abstände der Seile, wie bei klassischen Treibscheiben, erreicht werden können.

Ein weiteres Untersuchungsfeld stellt die Modifikation der Rillenhöhe dar. Die Polscheiben der untersuchten Magnettreibscheiben haben zwei wichtige Hauptfunktionen. Zum einen bilden sie mit ihrer Kontur und Festigkeit den Hauptbestandteil der Treibscheibe inklusive der Rillenform und zum anderen sorgen sie für die Leitung des magnetischen Flusses von den Magneten zum Seil und damit für die Ausbildung des magnetischen Kreises innerhalb der Magnettreibscheiben. Um eine möglichst große Kraftwirkung auf das Seil zu erreichen, muss eine hohe Flussdichte am Übergang Polscheibe zum Seil erreicht werden. In diesem Zusammenhang wurde die Rillenform bzw. die Form der Polscheiben überdacht. Um die Flussdichte, die in das Seil eingeleitet wird, zu erhöhen, wurden in drei Schritten Modifizierungen vorgenommen, bei dem Material von den Polscheiben, welches über den Kontakt zwischen Seil und Rille hinausgeht, entfernt. Die in Abbildung 9 dargestellten Schritte wurden hinsichtlich des magnetischen Flusses untersucht und mit der Ausgangsform verglichen.

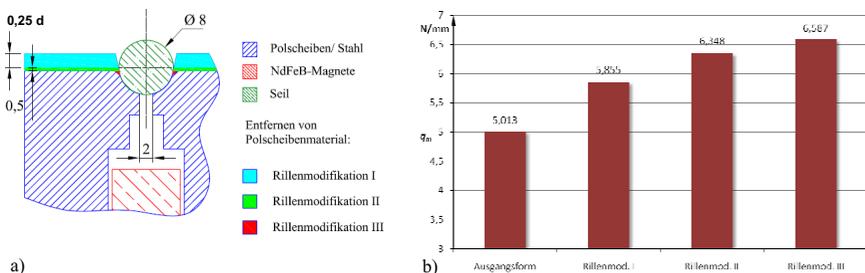


Abbildung 9: a) durchgeführte Modifikationen an den Polscheiben
b) magnetische Streckenlast q_m für die Rillenmodifikationen

Als günstigste Lösung ist die Rillenmodifikation II einzuschätzen, da die Kontaktfläche zwischen Rille und Seil nicht verändert wurde und eine gute Führung des Seiles in

der Rille gewährleistet bleibt. Hier ist eine Steigerung der magnetischen Streckenlast um ca. 25 % nach der Kraftauswertung der durchgeführten Magnetfeldanalysen möglich. Die hierbei geänderte Rillenform gegenüber der üblichen Rillenform nach Feyrer (in Scheffler 1998) kann als unkritisch betrachtet werden, da die reduzierte Überhöhung der Rille ursprünglich als Sicherheit gegenüber dem Herausrutschen des Seiles in Zuständen, wie z.B. Schlaffseil, diente. Diese Sicherheit wird durch die permanente Magnetkraftwirkung auf das Seil übernommen. Daher ist, aufgrund der Möglichkeit der wesentlichen Steigerung der magnetischen Streckenlast, ein Abweichen von der ursprünglichen Rillenform zu bevorzugen.

3 Experimentelle Untersuchungen

Die im Rahmen des AiF-Forschungsvorhabens noch laufenden Arbeiten umfassen neben dem Entwickeln der Berechnungsgrundlagen für Magnettreibscheiben auch den experimentellen Nachweis des Betriebsdauerzuwachses für Seil und Treibscheibe, der durch den Übergang zu seil- und treibrillenschonenden Profilen bewirkt wird. Die Untersuchungen dienen der Klärung des Einflusses der Permanentmagnete auf die Kräfteverhältnisse an der Treibscheibe. Die Erkenntnisse aus den theoretischen Betrachtungen sollen überprüft und die Berechnungsmodelle verbessert werden.

Die experimentelle Bestimmung der magnetischen Streckenlast erfolgte auf indirektem Wege. Den verwendeten Prüfstand für Magnettreibscheiben zeigt Abbildung 10.



a)



b)

Abbildung 10 Prüfstand für Magnettreibscheiben

a) Gesamtansicht; b) Antrieb mit Magnettreibscheibe und Seil

Neben anderen Versuchen wurde für eine Bewertung hinsichtlich der magnetischen Kraftwirkung vor allem der Rutschversuch für die jeweils vorliegenden Magnettreibscheiben durchgeführt. Dabei wird die jeweilige Magnettreibscheibe unter einem feststehenden Seil gedreht (Rille satt geölt) und gleichzeitig mit Hilfe von Kraftmessdosen die Seilkräfte F_1 und F_2 gemessen. Mit Hilfe der erweiterten Euler-Eytelweinschen Gleichung (2) kann ein Schluss auf die magnetische Streckenlast erfolgen. Dies wurde für jede Rille jeder Treibscheibe einzeln durchgeführt. Die wichtigsten Versuchsergebnisse sind in Abbildung 11 zusammengefasst.

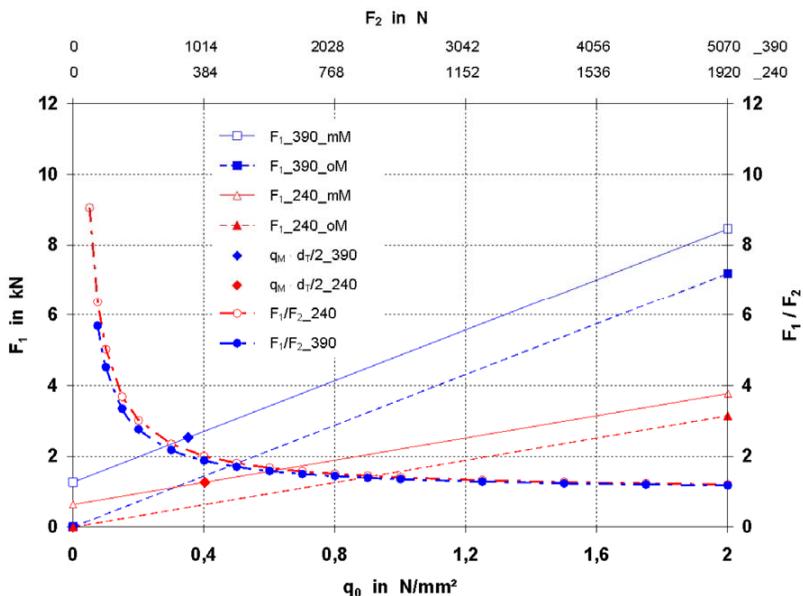


Abbildung 11 Treibfähigkeit von Treibscheiben mit Rundrille

Es gibt Auskunft über die Kraftverhältnisse für Treibscheiben mit Durchmessern von 240 mm und 390 mm. Die Seildurchmesser d_s betragen 8 mm bzw. 13 mm. Für beide Treibscheibengrößen sind die möglichen Übertragungskräfte F_1 mit und ohne Permanentmagnete in Abhängigkeit von der Vorspannkraft F_2 und von der Vergleichsrillenpressung q_0

$$q_0 = \frac{2 \cdot F_2}{d_T \cdot d_s} \tag{5}$$

dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass mit der Magnettreibscheibe $d_T = 390$ mm auch ohne eine Vorspannung ($F_2 = 0$ kN) bereits eine Kraft $F_1 = 1,27$ kN und mit $d_T = 240$ mm eine Kraft $F_1 = 0,63$ kN übertragen werden kann. Den Funktionsverläufen für das Verhält-

nis F_1 / F_2 ist zu entnehmen, dass für die Treibscheibe $d_T = 390$ mm bis zur Vergleichsrillenpressung $q_0 \leq 0,352$ N/mm² ($F_2 = 892$ N) eine Vergrößerung der Treibfähigkeit auf $F_1 / F_2 \geq 2$ zu erwarten ist, die Treibscheibe $d_T = 240$ mm liefert bis zur Vergleichsrillenpressung $q_0 \leq 0,403$ N/mm² ($F_2 = 386$ N) eine Vergrößerung der Treibfähigkeit $F_1 / F_2 \geq 2$.

Ein effektiver Einsatz der Magnettreibscheiben mit sehr starker Vergrößerung der Treibfähigkeit ist bis zu den genannten Vergleichsrillenspannungen sinnvoll. Bei der Vergleichsrillenpressung von $q_0 = 2$ N/mm² beträgt die Vergrößerung der Treibfähigkeit für $d_T = 390$ mm $F_1 / F_2 = 1,18$ und für $d_T = 240$ mm $F_1 / F_2 = 1,20$.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen an mehrrilligen Magnettreibscheiben betten sich in die jahrelangen Aktivitäten auf dem Fachgebiet der Seilforschung am TLA ein.

Für die Lösung der Aufgabe, ein Berechnungsverfahren zur Auslegung des magnetischen Gesamtsystems einer Magnettreibscheibe zu entwickeln, sind sowohl theoretische Betrachtungen als auch experimentelle Untersuchungen durchgeführt worden. Es wurden für das FEM-Programmsystem „ANSYS“ unterschiedliche Modelle entwickelt, bei denen die Magnet- und Geometrieparameter mehrrilliger Magnettreibscheiben sowie die Seilparameter variiert werden können. Ein Vergleich mit Messungen gestattet es, die Modelle sowohl zu überprüfen als auch zu verbessern. Die entwickelten Berechnungsmodelle ermöglichen Variantenrechnungen, mit deren Hilfe für bestimmte Treibscheiben-Seilkombinationen günstige Systemparameter gefunden werden können.

Es ist gelungen, Grundaussagen über die Konstruktion von mehrrilligen Magnettreibscheiben für eine gute Ausnutzung der magnetischen Kraftwirkung auf Stahlseile zu gewinnen. So konnte durch die Anpassung der Rillenform (Unterschnitt, Rillenhöhe) eine größere Magnetkraftwirkung auf das Seil erreicht werden. Durch die Untersuchung der Polungsrichtung der eingesetzten Permanentmagnete konnte eine deutliche Verringerung der Baubreite (Rillenabstand) bei mehrrilligen Magnettreibscheiben realisiert werden. Weiterhin wurden Grundlagen für die Konstruktion der Polscheiben erarbeitet (Nabenaufnahme, äußere Polscheiben, Magnetaufnahmen), die in Konstruktionsrichtlinien für vorgegebene verschiedene Größenverhältnisse Berücksichtigung finden. Damit wurde eine Grundlage für die zukünftige konstruktive Gestaltung von Magnettreibscheiben geschaffen.

Der vorhandene Prüfstand zur Testung von Magnettreibscheiben kann zukünftig für Untersuchungen weiterer Treibscheibenkonstruktionen und Seilarten (vor allem hinsichtlich neuer Einsatzfelder) verwendet werden.

Quellenverzeichnis

DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2003): *TRA – Technische Regeln für Aufzüge*. Berlin-Wien-Zürich: Carl Heymanns Verlag, Beuth-Verlag.

FEYRER, KLAUS (2000): *Drahtseile, Bemessung, Betrieb, Sicherheit*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag

GRÄBNER, PETER (2004): *Treibscheibe für Hochleistungsreibpaarungen, Europäische Patentanmeldung*. Aktenzeichen AP 03 720 161.3-1022, Aug. 2004

GRÄBNER, PETER (2008): *Neue Wege bei der Anwendung des Leichtbaus in der Aufzugstechnik*. In: *Hebezeuge Fördermittel - Fachzeitschrift für Technische Logistik*, Berlin 48 (2008) 5., S.356-359

IBS Magnete – Herstellerinformationen.: <http://www.ibsmagnet.de>. Zugriff 10.08.2008

KURTH, F. (1987): *Grundlagen der Fördertechnik : Einführung, Elemente der mech. Ausrüstung, Antriebe, Grundlagen des Stahlbaus*. Berlin: Verlag Technik

SCHEFFLER, MARTIN (1994): *Grundlagen der Fördertechnik - Elemente und Triebwerke*. Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft

SCHEFFLER, MARTIN; FEYRER, KLAUS; MATTHIAS, MARTIN (1998): *Fördermaschinen. Hebezeuge, Aufzüge, Flurförderzeuge*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft

Numerische und experimentelle Analyse von Seilscheibenbelastungen

Dipl.-Ing. Christian Vorwerk und Dipl.-Ing. Thomas Kuczera

Universität Stuttgart

Institut für Fördertechnik und Logistik

Fachgebiet Fördertechnik

Abstract: Das Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) Uelzen plant zur Verbesserung der Transportkapazitäten auf dem Elbeseitenkanal eine Erhöhung des Trogwasserspiegels im Schiffshebewerk Lüneburg. Zur Beurteilung der Dauerfestigkeit nach einer Lasterhöhung um mehr als 150 t je Fördertrog wurde die Belastung der im Schiffshebewerk verwendeten Doppelseilscheiben mit Hilfe einer numerischen sowie experimentellen Spannungs- und Verformungsanalyse vom Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart ermittelt.

1 Einleitung

Bei der Festigkeitsberechnung und Auslegung von Seilscheiben wurde bisher von einer in Umfangsrichtung gleichmäßig verlaufenden Kraftverteilung (längenbezogene Anpresskraft) zwischen Seil und Seilscheibe ausgegangen. Beim Auf- und Ablauf des Seils auf die Seilscheibe entsteht jedoch wegen der Biegesteifigkeit des Seils eine teilweise drastische Überhöhung der längenbezogenen Anpresskraft [1]. Der dadurch verursachte lokal auftretende Maximalwert der Anpresskraft kann in Abhängigkeit z.B. der Seilkonstruktion, der Seilzugkraft und des Durchmesserverhältnisses von Seil und Seilscheibe leicht das 4-fache (!) des Mittelwertes betragen. Insbesondere bei Seilscheiben mit einer Speichenkonstruktion können diese Kraftüberhöhungen die Spannungsverteilung in der Seilscheibe negativ beeinflussen und müssen deshalb bei einer Analyse des Belastungszustandes berücksichtigt werden.

Da allerdings z. Zt. nur für sehr wenige Seilkonstruktionen und Einsatzgebiete quantitative (und im Laborversuch validierte) Erkenntnisse vorliegen [2], soll mit Hilfe der Mehrkörper-Simulation ein Werkzeug geschaffen werden, das es ermöglicht die Belastung der Seilscheibe zu simulieren, um die im Bauteil entstehenden Spannungen sowie Verformungen berechnen zu können.

2 Schiffeshebewerk Lüneburg

Nach jahrzehntelangen Planungen und einer acht-jährigen Bauphase wurde der 115 km lange Elbe-Seitenkanal als Verbindung zwischen Elbe und Mittellandkanal entlang der ehemaligen innerdeutschen Grenze im Juni 1976 in Betrieb genommen. Der dabei zu überwindende Höhenunterschied von insgesamt 61 m wird von der

Schleuse bei Uelzen und dem Schiffshebewerk Lüneburg (in Scharnebeck) überbrückt (Abbildung 1). Um dem steigenden Schiffsverkehr auf dem Elbe-Seitenkanal und dem damit erhöhten Schleusungsaufkommen auch im Schiffshebewerk Lüneburg Rechnung zu tragen, soll die Förderkapazität durch eine Anhebung des Trogwasserspiegels um 12 cm auf 3,50 m erhöht werden.



Abbildung 1: Schiffshebewerk Lüneburg

Durch die Verwendung zweier voneinander unabhängig arbeitender Tröge mit Nutzflächen von jeweils 12 m Breite und 100 m Länge bei derzeit noch 3,38 m Wassertiefe können Schiffe auch bei hohem Verkehrsaufkommen zügig abgefertigt werden. Ein Schleusungsvorgang dauert einschließlich der Ein- und Ausfahrt eines Schiffes in den Trog, des Schließens und Öffnens der Schleusentore und des Hebens, bzw. Senkens des Troges durchschnittlich nur 25 Minuten. Das enorme Gewicht des bei einem Fördervorgang zu hebenden mit Wasser gefüllten Troges und der ausgleichenden Gegengewichte von jeweils etwa 6.000 t macht es erforderlich, dass jeder Trog an 240 je 54 mm dicken Stahlseilen aufgehängt wird. In den obersten Stockwerken der jedem Trog zugeordneten 4 Führungtürme werden die Seile über insgesamt 120 Doppelseilscheiben umgelenkt (Abbildung 2). Die Seile sind an einem Seilende mit den Stützrahmen der Tröge und am anderen Seilende paarweise gelenkig gelagert mit den Gegengewichten aus Schwebbeton verbunden. Der Trogantrieb aus 4 Drehstrommotoren mit jeweils 160 kW Leistung ermöglicht über Getriebe und Zahnstangen ein Heben bzw. Senken des Troges um 38 m innerhalb von 3 Minuten.

Im Rahmen der geplanten Erweiterung des Schiffshebewerks wurde das IFT vom WSA Uelzen beauftragt, eine numerische und experimentelle Belastungsanalyse der teilweise neu konstruierten Doppelseilscheiben durchzuführen. Die Doppelseilschei-

ben des Schiffshebewerks bestehen aus zwei Seilkränzen, die über acht Peiner (Speichen in Form von IPEo-330 Trägern) mit der Nabe verbunden sind. Die Peiner sind über Knotenbleche mit den Seilkränzen verschweißt und mit den Nabenhälften durch eine GV-Schraubverbindung verbunden.



Abbildung 2: Seilscheiben des Schiffshebewerks Lüneburg

3 Kraftverteilung zwischen Seil und Seilscheibe

Erste Messungen zur Bestimmung der längenbezogenen Anpresskraft wurden von Molkow [3], der Keilrillen betrachtete und von Wiek [4] der Rundrillen untersuchte, durchgeführt. Sie haben aufgrund ihrer verwendeten Messeinrichtungen nur Anhaltswerte über den Verlauf der längenbezogenen Anpresskraft gewinnen können.

Umfangreiche Untersuchungen mit deutlich aufwändigeren Messeinrichtungen hat Häberle [2] durchgeführt. Er verwendete eine Messseilscheibe mit kraftmessenden Rillenelementen. Dabei wurden 35 Lamellen in die Seilscheibe integriert, wovon die mittleren 9 zur Messung der längenbezogenen Anpresskraft dienen. Die restlichen, inaktiven Lamellen dienen dazu den Steifigkeitssprung zwischen massiver Rille und den aktiven Messlamellen auszuschalten.

Es wurde festgestellt, dass beim Lauf eines Seils über eine Seilscheibe eine ungleichmäßige Kraftverteilung, die als längenbezogene Anpreßkraft q bezeichnet wird, auftritt. Dabei entsteht eine starke Krafterhöhung beim Auflauf q_{auf} und eine etwas schwächere beim Ablauf des Seils q_{ab} (Abbildung 3). In Abbildung 3 ist als Vergleich (gestrichelt) der Kraftverlauf eingezeichnet, wie er sich zwischen einem biegeschlafem Faden und einer Seilscheibe verhalten würde und wie er bisher zur Berechnung von Seilscheiben angenommen wurde. Des Weiteren nimmt bei einem Seil im Ver-

gleich zu einem biegeschlaffen Faden der Kontaktwinkel bei Auf- und Ablauf ab. Für den vorliegenden Fall sind dies jeweils ca. 3°.

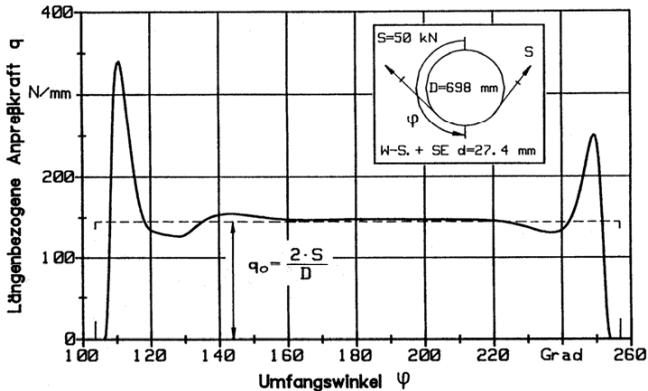


Abbildung 3: Pressung zwischen Seil und Seilscheibe [2]

Die längenbezogene Anpresskraft q_0 wird berechnet als Quotient aus Seilzugkraft S und Seilscheibendurchmesser D zu:

$$q_0 = \frac{2 \times S}{D}$$

Häberle hat aus seinen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Seilen (Warrington-Seale Seile mit Faser- oder Stahleinlage und unterschiedlichen Durchmessern d) und Seilkräften eine Berechnungsmethode für die Überhöhung der längenbezogenen Anpresskraft q_{auf} entwickelt.

Zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen der maximalen und mittleren längenbezogenen Anpresskraft q_{max} / q_0 für $20 < D/d < 70$ gilt nach Häberle:

$$\lg\left(\frac{q_{auf}}{q_0}\right) = c_0 + c_1 \times \lg\left(\frac{S \times d_e^2}{d^2 \times S_e}\right) + c_2 \times \lg\left(\frac{D}{d}\right) + c_3 \times \lg\left(\frac{S \times d_e^2}{d^2 \times S_e}\right) \times \lg\left(\frac{D}{d}\right)$$

mit den Koeffizienten:

$$c_0 = 1,887, c_1 = -0,607, c_2 = -0,939, c_3 = 0,316$$

In der Berechnungsformel bleiben unterschiedliche Einflüsse wie Seilkonstruktion, Einfluss der Biegefestigkeit des Seils sowie dynamische Einflüsse bisher noch unberücksichtigt.

4 Simulation der Belastung von Seilscheiben

Zur Ermittlung der Kräfte zwischen Seil und Seilscheibe (längenbezogenen Anpresskraft) wurde ein Mehrkörpersimulationsmodell der Seilscheibe und des Seiles erstellt, um die Kräfte zu ermitteln, die im Betrieb sowohl statisch als auch dynamisch auftreten.

Dazu konnten die von Häberle entwickelten Messergebnisse als erste Grundlage zur Entwicklung eines Mehrkörpersimulationsmodells verwendet werden.

Zunächst wurden die Messungen der längenbezogenen Anpresskraft von Häberle für die unterschiedlichen Seile und Seilzugkräfte ausgewertet. Mit diesen Daten wurde das erste MKS-Modell der in den Messungen von Häberle verwendeten Seilscheibe und Seile erstellt.

Um das Seil im MKS-Modell realitätsnah abzubilden wurde es durch so genannte „Beam-Elemente“ (elastische Körper, denen neben der Geometrie und Masse auch die Trägheitseigenschaften zugewiesen werden können) modelliert. Die Seilscheibe wurde als starrer Körper abgebildet. Durch zwei Massen wurde die Seilzugkraft eingepreßt und eine realitätsgetreue Drehung der Seilscheibe erzwungen, in dem die in Abbildung 4 rot dargestellte Kugel mit einer definierten Geschwindigkeit nach unten gezogen wird. Dadurch wird das orange dargestellte Seilstück (Beam-Elemente) um die Seilscheibe gebogen.

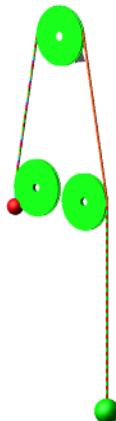


Abbildung 4: Simulation der Belastung von Seilscheiben mit der Mehrkörpersimulation

Mit diesem Modell wurde die längenbezogene Anpresskraft und insbesondere die Kraftüberhöhung berechnet und mit den Messergebnissen von Häberle verglichen.

Durch zahlreiche Berechnungen erfolgte eine Anpassung des MKS-Modells unter Variation der unterschiedlichen Einflussparameter (Beamlänge, Eindringtiefe des Kontakts, Reibwerte, Steifigkeiten, Dämpfungswerte, Trägheitsmomente etc.).

Es stellte sich heraus, dass die Trägheitsmomente der Beam-Elemente entscheidenden Einfluss auf die Überhöhung der längenbezogenen Anpresskraft haben und zur Anpassung des Modells an die Messung kalibriert werden müssen.

Mit diesen Erkenntnissen wurden Zusammenhänge zwischen den realen Geometrien (Seildurchmesser, Trägheitsmomente, E-Modul etc.) und Belastungen (Seilzugkräfte) mit den vereinfachten MKS-Modellen ermittelt, um diese zur Übertragung auf andere Situationen (wie die beispielsweise im Industrieprojekt) anwenden zu können.

Aus den MKS-Simulationen konnte eine Abhängigkeit zwischen dem Trägheitsmoment des Beam-Elements und der Seilzugkraft ermittelt werden (Abbildung 5). Aufgetragen in einem doppellogarithmischen Diagramm ergibt sich nahezu eine Gerade.

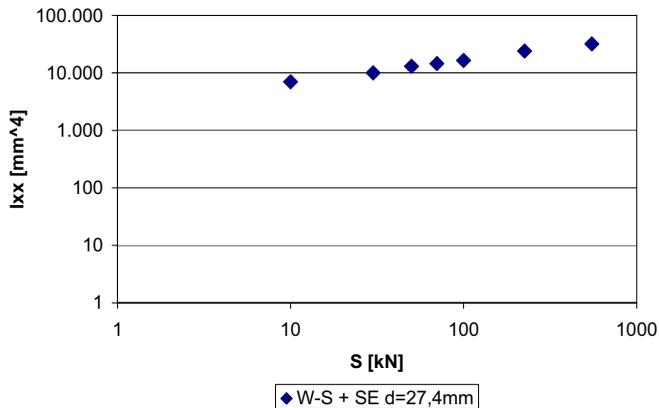


Abbildung 5: Zusammenhang Trägheitsmoment Beam-Element zu Seilzugkraft

Es zeigte sich, dass mit diesem MKS-Modell der in der Praxis auftretende Effekt der Überhöhung der längenbezogenen Anpresskraft beim Auf- und Ablauf des Seils qualitativ und quantitativ gut nachgebildet werden kann (Abbildung 6).

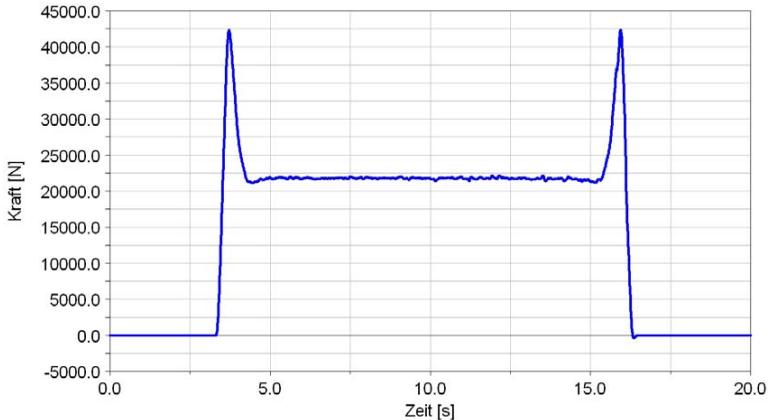


Abbildung 6: Berechnungsergebnisse des Verlaufs der längenbezogenen Anpresskraft

5 Spannungs- und Verformungsanalyse der Seilscheibe

Die aus der MKS-Simulation ermittelte Verteilung der Anpresskraft wurde anschließend, im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Uelzen genutzt, um eine Spannungs- und Verformungsanalyse der dort verwendeten Doppelseilscheibe mit Hilfe einer Finiten-Elemente-Berechnung (FE-Berechnung) durchzuführen.

Für die FE-Berechnung wurde ein Modell der Seilscheibe erstellt, das neben den aufgeführten Komponenten auch die Schweißnähte und die Schraubverbindungen berücksichtigt. Dabei wurde die zweiteilige Nabe der Seilscheibe mit den Pendelrollenlagern wegen des sehr großen Querschnitts als ideal starr angenommen. Um den Einfluss der maximal möglichen Schrägstellung des Stahlbaus im Schiffshebewerk auch im Modell zu berücksichtigen, wurde neben der längenbezogenen Anpresskraft eine zusätzliche (den Schrägzug auf die Seilscheibe repräsentierende) Kraft aufgebracht [5].

Zunächst wurde die kritische Dreh-Stellung der Seilscheibe ermittelt, in dem die Seilscheibe in 2,5°-Schritten gedreht und die maximale Vergleichsspannung ausgewertet wurde. Das Ergebnis dieser Berechnung ist, dass die kritische Stellung (max. Vergleichsspannung) der Seilscheibe bei 0° in den waagrechten Peinern ist.

Die Berechnung ergibt, dass sich der am höchsten belastete Bereich des Peiners in der Nähe des Knotenblechs befindet (Abbildung 7). Dieser Bereich wird durch eine

Zug-/Druckspannung und eine überlagerte Biegespannung wechselnd beansprucht, so dass sich der Peiner s-förmig verformt.

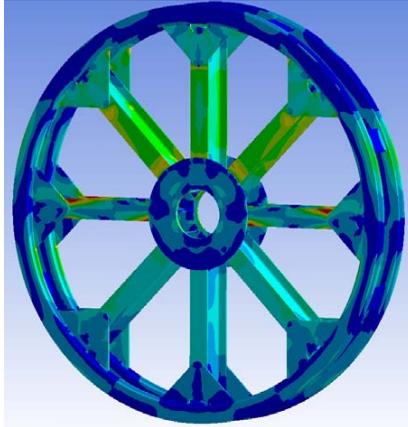


Abbildung 7: Finite-Elemente-Berechnung der Doppelseilscheibe im Schiffshebewerk

6 Verifikation durch Industrieprojekt

Um die Ergebnisse der zweistufigen numerischen Analyse zu verifizieren und eine valide Datenbasis für weiterführende Berechnungs- und Auslegungsverfahren zu erhalten, wurden die im Praxiseinsatz entstehenden Verformungen der Seilscheibe mit Dehnungsmessstreifen (DMS) erfasst (Abbildung 8). Die DMS wurden an vier unterschiedlichen Stellen auf einem Peiner der Doppelseilscheibe angebracht, um bei einer Drehung der Seilscheibe um 360° zusätzlich zu den Zug- und Druckspannungen auch die Biegespannung ermitteln zu können.

Um die nur durch die Eigenlast der Seilscheibe erzeugte Verformung als Bezugswert zu erhalten, wurde zunächst eine Messreihe ohne aufgelegtes Seil aufgezeichnet. Da die Messungen im belasteten Zustand wegen der umfangreichen Umbaumaßnahmen nicht am gleichen Tag erfolgen konnten, wurde eine DMS-Halbbrückenschaltung mit Temperaturkompensation verwendet.

Ein Vergleich zwischen der experimentell gemessenen und numerisch berechneten Seilscheibenbelastung ergab eine sehr gute Übereinstimmung für die Vollastbehahrungsfahrt des Troges. Es zeigte sich aber, dass die resultierende Spannungsverteilung in der Seilscheibe bspw. in der Beschleunigungs- und Verzögerungsphase sowie der Einfluss (hier nicht vorhandener) höherer Drehzahlen noch nicht ausreichend be-

schrieben werden können und in weiterführenden Forschungsprojekten untersucht werden sollten.



Abbildung 8: Messungen der Dehnungen an einer Speiche mit Dehnungsmessstreifen

Abbildung 9 stellt den Verlauf der Normalspannung an den beiden Messstellen auf dem Peiner bei einer Drehung um 360° dar.

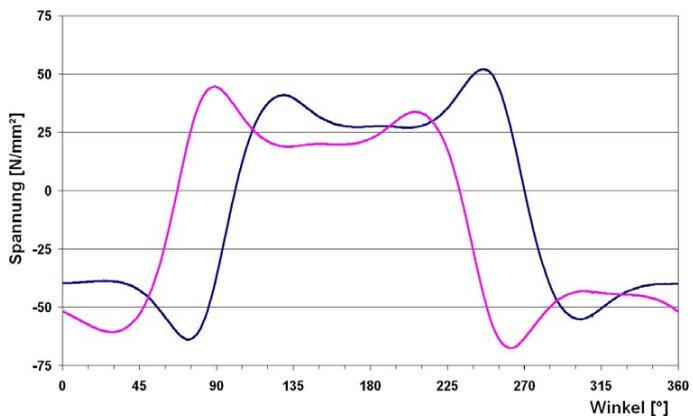


Abbildung 9: Messergebnisse der Normalspannung in den Speichen bei einer Drehung um 360°

7 Zusammenfassung

Beim Auf- und Ablauf eines Seils auf eine Seilscheibe kann die längenbezogenen Anpresskraft zwischen Seil und Seilscheibe das Vielfache des Mittelwertes betragen. Durch eine Kombination von experimenteller und numerischer Analyse konnte der resultierende Gesamtbelastungszustand der Doppelseilscheiben im Schiffshebewerk Lüneburg unter Berücksichtigung dieser Kraftüberhöhung vom IFT praxisgetreu ermittelt und die Dauerfestigkeit der Seilscheiben nachgewiesen werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in einem weiterführenden Forschungsprojekt z.B. auf alternative Seilkonstruktionen, Seilzugkräfte und dynamische Vorgänge erweitert werden.

8 Literatur

- [1] Feyrer, K.: Wire Ropes: Tension, Endurance, Reliability, Springer, 1st edition, November 2006.
- [2] Häberle, B.: Pressung zwischen Drahtseil und Seilscheibe, Dissertation, Universität Stuttgart, 1995.
- [3] Molkow, M.: Die Treibfähigkeit von gehärteten Treibscheiben mit Keilrillen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1982.
- [4] Wiek, L.: The distribution of the contact forces on steel wire ropes. OIPEEC-Bulletin 44, Nov. 1982, pp.10-25.
- [5] Schönherr, S.: Einfluss der seitlichen Seilablenkung auf die Lebensdauer von Drahtseilen beim Lauf über Seilscheiben, Dissertation, Universität Stuttgart, 2005.

Modellierung eines Lineardirektantriebes für Transportbänder

PROF. DR.-ING. LUDGER OVERMEYER¹⁾, DIPL.-ING. TOBIAS FROBÖSE¹⁾

PROF. DR.-ING. BERND PONICK²⁾, DIPL.-ING. JAN-PETER JASTRZEMBSKI²⁾

1)INSTITUT FÜR TRANSPORT- UND AUTOMATISIERUNGSTECHNIK, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

2)INSTITUT FÜR ANTRIEBSSYSTEME UND LEISTUNGSELEKTRONIK, LEIBNIZ UNIVERSITÄT HANNOVER

Abstract: Der Antrieb von Transportbandanlagen erfolgt bis heute nahezu immer durch eine oder mehrere Antriebstrommeln, die auf einer sehr kleinen Fläche große Zugkräfte übertragen müssen.

Das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA) arbeitet zusammen mit dem Institut für Antriebs- und Leistungselektronik (IAL) der Leibniz Universität Hannover im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes „LinTrans“ an einem neuen Antriebskonzept auf Basis eines Linearmotors, welcher die in ein Band eingebrachten Zugkräfte besser verteilt.

Dazu ist ein Testförderer für Kunststoffmodulbänder entworfen und gebaut worden, an dem zunächst grundlegende Untersuchungen zum Betrieb des Linearmotors durchgeführt werden. Die Anbringung der Läuferelemente erfolgt direkt am Gliederförderer. Ein Gleichstrommotor im generatorischem Betrieb dient zur Simulation der unter Normalbedingungen zu erwartenden Laufwiderstände.

Zum Antrieb des Testförderers kommt das Antriebskonzept der permanent erregten Synchronmaschine zum Einsatz, deren Auslegung und Simulation einen zentralen Punkt bei der Untersuchung darstellt. Mittels rechnergestützter FEM-Simulationen wird der angestrebte Entwurf soweit angepasst, dass er zum einen die im Voraus definierten Leistungsanforderungen erfüllt und zum anderen über ein möglichst gutes Betriebsverhalten verfügt.

1. Einleitung

Eine Transportbandanlage besitzt in ihrem einfachsten Aufbau ein endlos geschlossenes Band, welches um mindestens zwei Haupttrommeln umläuft. Durch diesen Aufbau resultieren große Gurtzugkräfte an der Antriebstrommel. Durch die Höhe dieser Gurtzugkräfte wird die erforderliche Festigkeit des Transportbandes bestimmt. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung der Gurtzugkräfte in einer Bandanlage. Dabei sind, aufgrund der Darstellbarkeit, die Kräfte senkrecht zu ihrer Wirkrichtung aufgetragen. Der blau gezeichnete Anteil der Gurtzugkraft resultiert aus der Vorspannung des Gurtes. Der rot gezeichnete Anteil ergibt sich aus den Bewegungswiderständen im Obertrum. Eventuelle Bewegungswiderstände im Untertrum wurden hier nicht berücksichtigt.

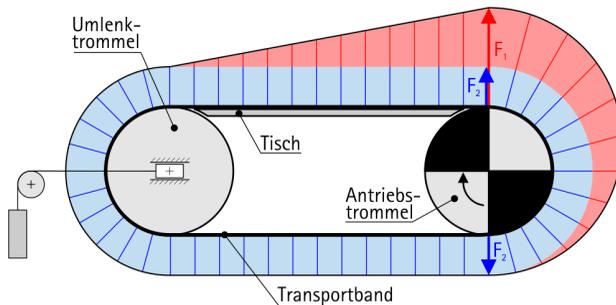
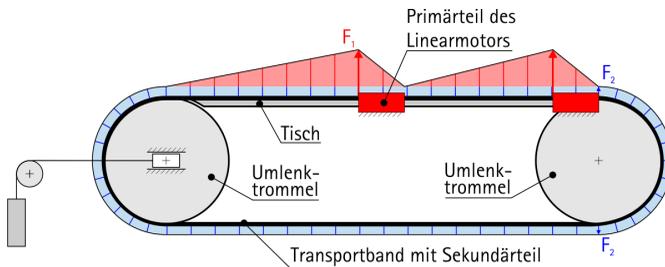


Abbildung 1: Gurtzugkräfte entlang eines horizontal verlaufenden Gurtförderers

Während dem Abbau der hohen Gurtzugkraft beim Umlaufen der Antriebstrommel reduziert sich die Dehnung des Transportbandes. Die durch diesen Vorgang entstehende Relativbewegung zwischen Antriebstrommel und Transportband wird als Dehnschlupf bezeichnet. Die Größe dieses Dehnschlupfes trägt entscheidend zur Lebensdauer eines Transportbandes bei.

Ein Antriebskonzept mit einem Linearmotor bietet den großen Vorteil, dass man Antriebe entlang eines Transportbandes verteilen kann. Somit können die Beanspruchungen des Transportbandes deutlich reduziert werden. Gleichzeitig werden die Laufeigenschaften des Transportbandes verbessert, da die Vortriebskraft an mehreren Stellen im Streckenverlauf eingeleitet werden kann. So könnte zum Beispiel der Stick-Slip Effekt, der häufig bei stark belasteten Werkerbändern auftritt, unterbunden werden.



© Institut für Transport- und Automatisierungstechnik 2004

Abbildung 2: Reduzierte Gurtzugkräfte durch Einsatz eines Direktantriebes

2. Antrieb

Für den direkten Antrieb des Transportbandes soll ein Linearmotor verwendet werden. Grundsätzlich ist es möglich, einen Linearmotor mit allen üblichen Funktionsprinzipien wie Induktions-, Synchron- oder Gleichstrommotoren aufzubauen.

Wie auch bei rotierenden Antrieben, kann es zur Funktion des Motors nötig sein, dass sich auf oder in dem bewegten Teil elektrische Leiter befinden, die während des Betriebes einen Strom führen. Im Falle eines Gleichstrom- oder elektrisch erregten Syn-

chronomotors muss elektrischer Strom z.B. über Schleifkontakte zugeführt werden, was den konstruktiven Aufbau aufwendig und verschleißbehaftet macht.

Im Falle eines Induktionsmotors ist ein großer Luftspalt nicht erwünscht. Jedoch lässt er sich beim Aufbau linearer Transportantriebe selten klein gestalten, da die Größe des Luftspaltes bei Induktionsmaschinen einen wesentlichen Einfluss auf den Leistungsfaktor und den Wirkungsgrad hat, [All76].

Durch den ohmschen Widerstand eines elektrischen Leiters kommt es zu zusätzlichen Wärmeeinträgen in den bewegten Teil, was für die Verwendung von kunststoff- oder gummiartigen Transportbändern problematisch ist. Da das Transportband um zwei Umlenkrollen umläuft, können Biegewechsel-Beanspruchungen einen Bruch der elektrischen Leiter zur Folge haben, wodurch der Antrieb ausfallen kann.

Die Auswahl der Antriebe, die prinzipiell für diese Antriebsaufgabe geeignet sind und bei denen kein elektrischer Strom im bewegten Teil zur Funktion nötig ist, wird daher auf die Bauformen entsprechender Synchronmaschinen begrenzt:

1. Permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM)
2. Synchron-Reluktanzmotor (RM)
3. Geschalteter-Reluktanzmotor (SRM)
4. Hybridmotor (HM)

Bei der PMSM werden Magnete ausschließlich im Läufer angeordnet. In Wechselwirkung mit einem vom bestromten Ständer generierten Wanderfeld (vergl. Drehfeld), wird eine nutzbare Vorschubkraft erzeugt.

Der grundsätzliche Aufbau des bewegten Teils der genannten Reluktanzmotoren und des Hybridmotors ist nahezu identisch. Alle Motoren erzeugen eine Vorschubkraft aufgrund einer konstruktiv herbeigeführten Leitwertänderung des Luftspaltes zwischen Ständer und Läufer. Diese wird z.B. über eine Zahnung von Ständer und Läufer erreicht. Ähnlich wie bei einem Induktionsmotor, sind auch der RM / SRM und HM auf einen sehr kleinen Luftspalt angewiesen, wenn ein möglichst effektiver Betrieb vorausgesetzt wird. Im Gegensatz dazu, bietet die PMSM einen größeren Gestaltungsspielraum bezüglich der Luftspalthöhe, da die Magnetisierung überwiegend von den Magneten aufgebracht wird.

Der Hybridmotor ist die Kombination einer PMSM und eines SRM, welche im Bereich der Kleinmaschinen als Schrittantrieb eingesetzt wird. Da es von der grundsätzlichen Funktionsweise eines HMs her egal ist, ob sich die Magnete im Ständer oder im bewegten Teil befinden, bietet dies speziell bei Linearmotoren einen nicht zu unterschätzenden Vorteil hinsichtlich der Herstellungskosten. Im bewegten Teil benötigt der HM nur verhältnismäßig günstige ferromagnetische Materialien zur Flussführung. Bei einem HM reichen dann wenige Magnete, die im Ständer angeordnet werden, zur Funktion des Antriebs aus, während bei einer PMSM das gesamte Transportband mit Permanentmagneten ausgerüstet sein muss. Deshalb werden die Kosten bei einer PMSM wesentlich durch die Länge des Bandes bestimmt.

Werden die vorgestellten Motoren nach ihrer Kraft- bzw. Drehmomentdichte eingeordnet, so ist die PMSM am leistungsfähigsten, gefolgt von dem HM und dem SRM bzw. RM. Der Reihenfolge nach nimmt das Verhältnis von Kraft zu Strom ab und damit auch der Wirkungsgrad. Da der Motor für den Antrieb des Transportbandes möglichst kompakt sein soll und ein möglichst kleiner Luftspalt konstruktiv verhältnismäßig schwierig auszuführen ist, wurde die PMSM als Direktantrieb des Transportbandes ausgewählt.

Zwischen Ständer und dem bewegten Teil eines Linearmotors entsteht konstruktionsbedingt eine Normalkraft, die im Falle eines einseitigen Aufbaus (Abbildung 3) für eine Anziehung von Ständer und Läufer sorgt. Die Normalkraft kann dabei 8 bis 12 mal so groß sein wie die generierte Vorschubkraft. Die Lagerung bei dieser Antriebstopologie muss dann in der Lage sein, diese Kräfte aufzunehmen. Für den Antrieb eines Transportbandes hätte dies für den Einbauort des Motors eine stark erhöhte Reibung zwischen Transportband und Tisch zur Folge, die unerwünscht ist (siehe auch Abschnitt 4.2).

Durch einen zweiseitigen Aufbau kann die Entwicklung einer Normalkraftkomponente verhindert werden. Dazu werden zwei Statorhälften so angeordnet, dass zwischen ihnen und dem Läufer jeweils gleich große Normalkräfte auftreten, welche jedoch in genau entgegengesetzter Richtung wirken. Dadurch werden die entstehenden Normalkräfte kompensiert und eine unerwünschte, erhöhte Reibung vermieden. Die Aufbauten, welche in Abbildung 4 bis Abbildung 6 gezeigt sind, gewährleisten eine weitgehende Kompensation der Normalkräfte.

Bei dem Aufbau nach Abbildung 4 befinden sich je eine Statorhälfte ober- und unterhalb des Transportbandes. Aus Gründen der Symmetrie muss an den gegenüberliegenden seitlichen Rändern des Transportbandes zwei derartige Antriebe das Band U-förmig umfassen. Damit ist jedoch die nutzbare Breite des Transportbandes begrenzt und der Transportgut-Durchsatz eingeschränkt.

Keine Einschränkung bieten hingegen die Aufbauten nach Abbildung 5 und Abbildung 6. Es ist statt eines zweiteiligen Stators auch ein zweiteiliger Läufer denkbar. Soll auf zusätzliche Luftspalte verzichtet werden, muss der magnetische Rückschluss bei einem zweiteiligen Läufer am Band angebracht und mitbewegt werden. Abgesehen von der aufwendigeren Konstruktion steigt dadurch auch die zu bewegende Masse aller Voraussicht nach um mindestens den Faktor zwei an. Aufgrund der größeren Masse hat dies auch eine erhöhte Reibung zwischen Band und Tisch zur Folge.

Die Topologie des Antriebs wird deshalb nach Abbildung 5 entworfen. Der Motor soll eine Vorschubkraft von 200 N liefern bei einer Vorschubgeschwindigkeit von ca. 2 m/s. Der Antrieb wird zwischen dem Ober- und Untertrum angeordnet. Auch wenn an dieser Stelle nicht näher auf den Berechnungs- und Optimierungsgang [Jas09] eingegangen werden kann, sollen doch die groben Dimensionen des Antriebs kurz umrissen werden.

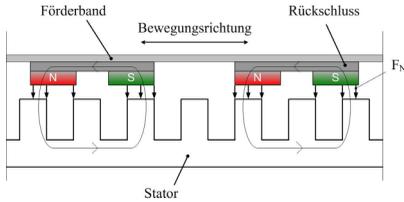


Abbildung 3: Einseitiger Aufbau, Seitenansicht

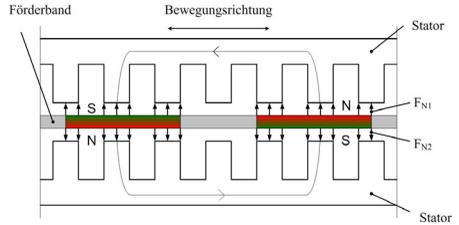


Abbildung 4: Doppelseitiger Aufbau, ober- und unterhalb des Transportbands, Seitenansicht

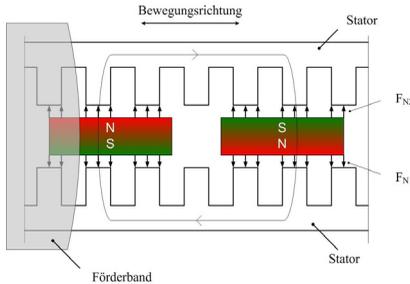


Abbildung 5: Doppelseitiger Aufbau seitlich des Transportbands, einteiliger Läufer, Ansicht von oben

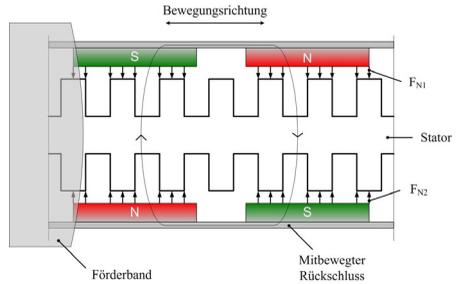


Abbildung 6: Doppelseitiger Aufbau, zweiteiliger Läufer, Ansicht von oben

Durch die Verwendung des Kunststoffkettenmodulbandes stehen wichtige Parameter bei der Antriebsauslegung bereits fest. Die Polteilung ist gleich der Modulbandteilung, hier 50 mm. Weiterhin begrenzt der vorhandene Bauraum und der Durchmesser der Trommeln die Höhe, die der Antrieb maximal einnehmen darf. Um die Bauhöhe zu begrenzen wird die Wicklung als Zahnspulenwicklung ausgeführt. Anders als eine in Nuten eingelegte Wicklung zeichnet sich die Zahnspulenwicklung durch kompakte Wickelköpfe aus. Zusammen mit dem Statorblechpaket (Höhe 25 mm) liegt die Gesamtbauhöhe bei 74 mm. Da der Ständer-Strombelag in Verbindung mit der vorgegebenen Luftspaltinduktion die mittlere Flächenkraftdichte bestimmt, ist es demzufolge möglich, über eine Luftspaltflächenberechnung auf die gewünschte Vorschubkraft zu kommen. Eine derartige Abschätzung ergibt unter der Zuhilfenahme einiger gebräuchlicher Designparameter eine Statorlänge von ca. 500 - 550 mm.

Besonderes Augenmerk wird bei der Optimierung auf die Reduktion von Rastkräften gelegt, die bei allen permanentmagneterregten Maschinen in Erscheinung treten [Ste05]. Die Rastkräfte überlagern sich mit der generierten Vorschubkraft und können das Gleichlaufverhalten des Motors negativ beeinflussen. Daher gilt es, die Größe der Rastkräfte für einen möglichst gleichmäßigen Lauf des Motors zu minimieren. Weil es sich um einen linearen Aufbau handelt, spielen bei diesen Untersuchungen speziell die beiden Stirnflächen und ihre geometrische Gestaltung eine wichtige Rolle. Hierbei wird der Ansatz einer gegenseitigen Kompensation verfolgt. Die positionsabhängige Rastkraft, die die Magnete beim Durchlaufen des Stators generieren, ist in erster Nä-

herung sinusförmig. Die Idee besteht darin, eine weitere Quelle von Rastkräften zu integrieren, die einen gleichartigen Rastkraftverlauf wie der Stator zur Folge hat, jedoch gegenüber diesem so verschoben ist, dass sich die anteiligen Rastkräfte kompensieren. Für die Entstehung einer zusätzlichen Rastkraft sorgt im einfachsten Fall auch ein zusätzlicher, unbewickelter und vom Stator getrennter Zusatzzahn. Die Vorstellung der Untersuchungsergebnisse soll, wegen des großen Umfanges, nur auf diese bevorzugte Lösung begrenzt bleiben.

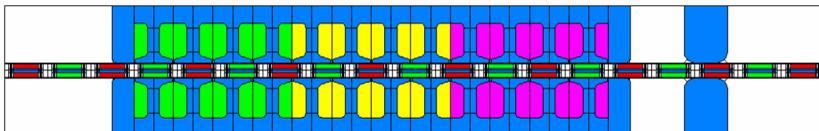


Abbildung 7: Linearmotor mit Zusatzzahn zur Reduzierung der Kraftwelligkeit

Die Abbildung 7 zeigt den Gesamtaufbau des Linearmotors (von oben gesehen). Horizontal in der Mitte sind die Läuferelemente erkennbar, wobei rechts außen der Zusatzzahn angeordnet ist. Die unterschiedlich eingefärbten Bereiche innerhalb der Statornuten kennzeichnen die jeweils einem Strang zugehörigen Spulengruppen.

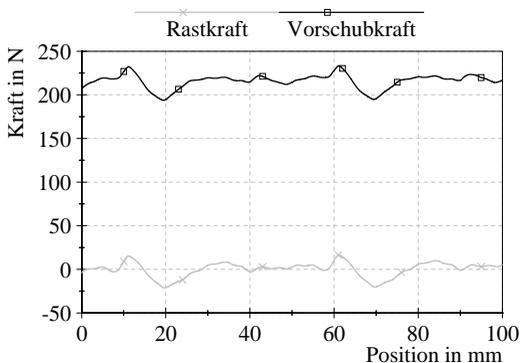


Abbildung 8: Resultierende Verläufe der Rast- und Vorschubkraft

In Abbildung 8 ist der zugehörige Verlauf der Rast- und Vorschubkraft über der Position dargestellt. Der quadratische Mittelwert der Rastkraft beträgt 8,3 N, der der Vorschubkraft beträgt 216 N. Wird das Verhältnis aus diesen beiden Größen gebildet, ergibt dies 3,8 %. Zum Vergleich: Werden keine Maßnahmen zur Reduzierung der Kraftwelligkeit ergriffen, ergäbe dies ein Verhältnis von bis zu 23 %.

Um die Rechenergebnisse zu verifizieren, wurde der konstruktive Aufbau des Antriebs mit einigen Verstellmöglichkeiten versehen. Sowohl der Abstand der Zusatzzähne zum Statorblechpaket als auch der Abstand der Statorhälften zu den Läuferelementen ist einstellbar. Diese Stellmöglichkeiten wurden nicht zuletzt auch wegen einiger mechanischer Unsicherheiten vorgesehen. So ist es z.B. denkbar, dass die Magnete aus der Mittellage ausscheren und das Statorblechpaket berühren, was auf

jeden Fall verhindert werden muss. Aus diesem Grund ist eine mittlere Führungsschiene vorgesehen worden. Den Gesamtaufbau veranschaulicht Abbildung 9.

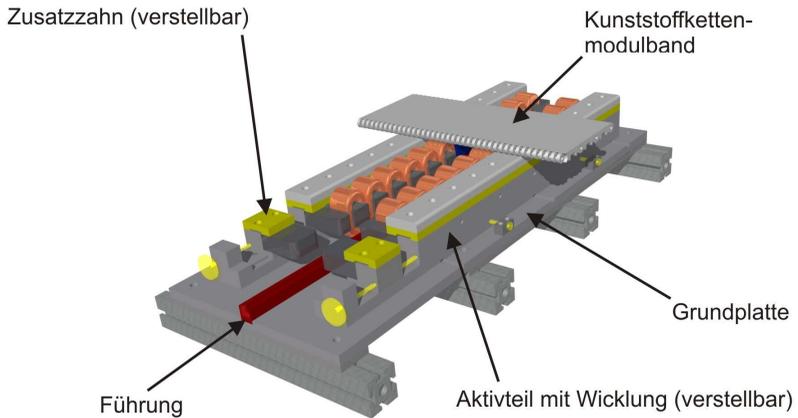


Abbildung 9: Gesamtaufbau des Linearmotors

3. Testförderer

Für die praktischen Untersuchungen des neuen Antriebskonzeptes wurde ein Versuchsförderer konstruiert und gebaut (Abbildung 10).

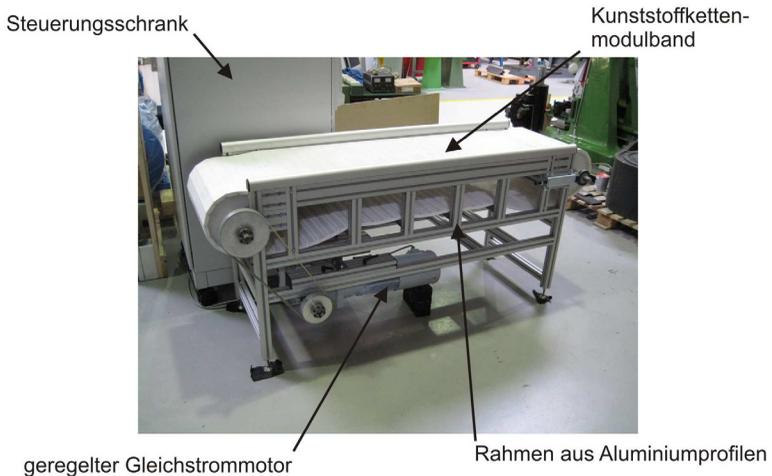


Abbildung 10: Versuchsförderer

Der Versuchsförderer ist mit einem Gleichstrommotor versehen. Dieser bringt bei den späteren Versuchen mit dem Linearmotor das benötigte Lastmoment auf. Der Motor

kann in ersten Vorversuchen mit verschiedenen Läuferelementen bereits als Antrieb wirken und erfüllt damit mehrere Funktionen. Zusätzlich ist der Förderer mit Einrichtungen versehen, um das aufgebrachte Moment zu messen um somit auf die erreichte Vorschubkraft Rückschlüsse zu ziehen.

Als Transportband für Versuche zum neuen Antriebskonzept wird ein Kunststoffkettenmodulband der Fima Forbo Siegling verwendet. Dieses besitzt gegenüber flexiblen Transportbändern den großen Vorteil, dass es über eine geringe Dehnung verfügt. Somit ist ein konstanter Abstand der Läuferelemente, was eine konstante Teilung für den Linearmotor bedeutet, gewährleistet. Ausgewählt wurden die Module der Serie 1, die eine Teilung von 50 mm besitzen, wodurch sich unmittelbar Parameter für die Auslegung des Linearmotors ableiten. In ersten Funktionsuntersuchungen des Antriebskonzeptes werden Läuferelemente sowohl aus Stahl mit aufgeklebten Magneten als auch Läuferelemente aus Kunststoff mit befestigten Magneten oder mit bereits magnetischen Eigenschaften untersucht. In diesen Fällen bietet das Kunststoffkettenmodulband Vorteile, da sich die Befestigung der Anbauteile, z.B. über Verschraubungen, deutlich einfacher gestalten lässt.

4. Läuferelemente

4.1. Geometrischer Aufbau

Eine Herausforderung besteht in der Konstruktion der Läuferelemente. Diese müssen genug Fläche zur Aufnahme der Magnete bieten, gleichzeitig aber auch eine Umlenkung des Transportbandes ermöglichen. Zusätzlich müssen sie die aufgebrachte Vorschubkraft sicher auf das Band übertragen. Abbildung 11 zeigt einen Konstruktionsentwurf für die Läuferelemente.

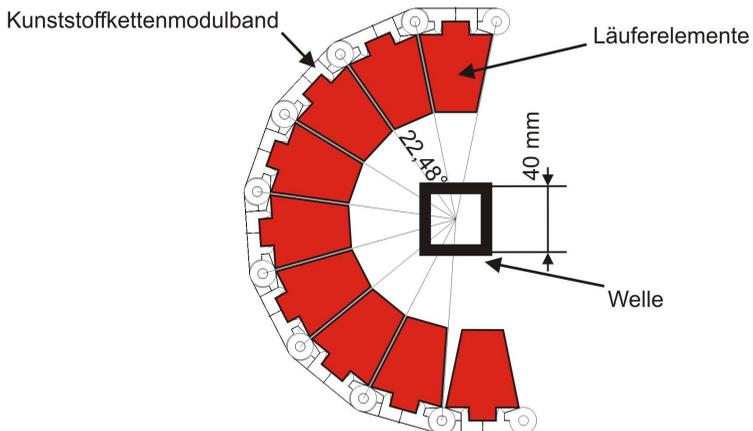


Abbildung 11: Vorüberlegungen für die Läuferelemente

Die Läuferelemente müssen aus einem magnetisch leitfähigen Material bestehen. Um die Herstellung möglichst wirtschaftlich zu gestalten, dient als Ausgangsprofil ein

T-Profil nach EN-10055, welches nur an den Funktionsflächen bearbeitet werden muss. Ein weiterer Aspekt ist die Führung der Elemente. Für den Betrieb als Linearmotor muss ein gleichmäßiger Luftspalt zwischen den Wicklungen und den Magneten der Läuferelemente eingehalten werden. Gleichzeitig werden beim Betrieb große Querkräfte auf die Läufer ausgeübt. Um eine sichere Führung zu gewährleisten, ist der Linearmotor so konzipiert, dass er diese Funktion ebenfalls erfüllt. Eine innenliegende Führungsschiene ist zu diesem Zweck an der Grundplatte des Motors angebracht (vgl. Abbildung 12). Somit ist durch die Konstruktion des Motors und das verwendete Kunststoffkettenmodulband die Gesamthöhe der Läuferelemente auf 75 mm festgelegt.

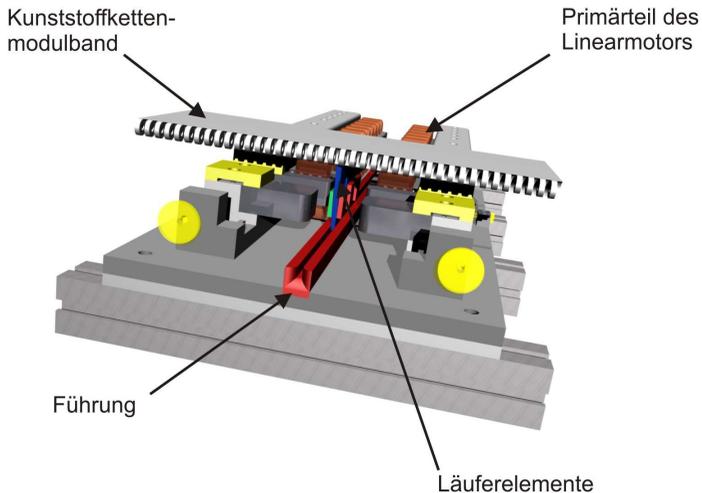
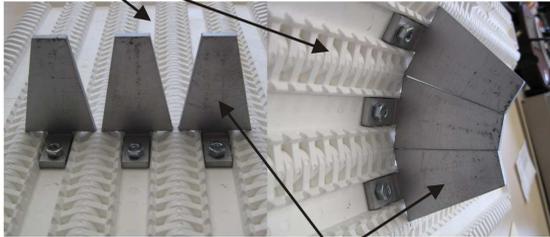


Abbildung 12: Konzeption Linearmotor mit mittiger Führungsschiene

Eine Umsetzung der Läuferelemente zeigt Abbildung 13. Diese gezeigte Variante bietet zum einen genügend Fläche zur Aufnahme der Magnete. Zum anderen kann durch die Verschraubung die aufgebrachte Vorschubkraft an das Band übertragen werden.

Versuche mit dieser Variante und aufgeklebten Magneten zeigen allerdings, dass in der Umlenkung (siehe Abbildung 13 rechts) die gegenüberliegende Fläche zu groß ist. Damit ist die Anziehung zwischen den Elementen so groß, dass sich diese beim Auslaufen aus der Umlenkung trotz hoher Bandspannung nicht wieder voneinander lösen.

Kunststoffketten-
modulband

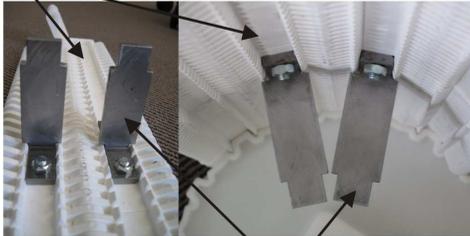


Läuferelemente

Abbildung 13: 1. Variante der Läuferelemente

Somit wird eine neue Geometrie gewählt. Diese bietet in der Umlenkung einen größeren Abstand der Seitenflächen zwischen den Läuferelementen. Gleichzeitig erfüllt sie alle Anforderungen zur Aufnahme der Magnete und zur Führung durch den Motor (Abbildung 14).

Kunststoffketten-
modulband



Läuferelemente

Abbildung 14: endgültige Variante der Läuferelemente

4.2. Gewichtsproblematik

Die Gewichte der einzelnen Bauteile der Läuferelemente ergeben sich nach Tabelle 1.

Tabelle 1: Einzelgewichte der Elemente des Läufers

| Bauteil | Gewicht | Anzahl pro Glied | Gewicht [g] |
|-----------------------------|---------|------------------|-------------|
| Läuferelement | | 1 | 96 |
| Schraube mit Mutter | | 2 | 6 |
| Magnet 25 mm x 25 mm x 5 mm | | 2 | 23,125 |

Das Kunststoffkettenmodulband auf dem verwendeten Versuchsförderer besteht aus 88 Kettengliedern. Daraus ergibt sich, dass insgesamt 13,6 kg als zusätzliches Gewicht an das Band angebracht werden. Bei einem Grundgewicht des Kunststoffkettenmodulbandes von 21 kg bedeutet das eine Gewichtssteigerung von 64,6 %. Die größte Reibung wirkt zwischen der Bandauflage und dem Band. Auf dieser Bandauflage befinden sich während des Betriebes 28 Kettenglieder. 28 Glieder bedeuten ein Zusatzgewicht von 4,3 kg. Das ergibt eine zusätzliche Normalkraft von 42,4 N. Geht man davon aus, dass zwischen der Bandauflage und dem Gliedern ein Reibkoeffizient von 0,1 - 0,2 [Nen06] vorliegt, ergibt sich eine zusätzliche Reibkraft von 4,2 N – 8,4 N. Die hier vorliegende Bandauflage hat eine Gesamtlänge von 1,4 m. Anlagen im realen Betrieb können durchaus die 40 – 50 fache Länge erreichen [Sch03]. Dadurch liegt der Verlust durch das Zusatzgewicht in einem nicht mehr vertretbaren Rahmen. Deshalb sollen in einer weiteren Versuchsphase Läuferelemente aus Kunststoff erprobt werden. Auf diese werden wie im vorliegenden Fall die Magnete aufgebracht oder das magnetische Material wird direkt in den Läufer eingespritzt werden. Durch die Verwendung von Kunststoff-Läuferelementen mit herkömmlichen Magneten ist für den Versuchsaufbau eine Gewichtsreduktion des Bandes von bis zu 50 % möglich. Da sich der Demonstrator derzeit noch im Aufbau befindet, können an dieser Stelle noch keine praktischen Ergebnisse präsentiert werden.

5. Ausblick

Im nächsten Schritt soll in dem Projekt der Antrieb eines flexiblen Gewebeförderbandes mittels eines Linearmotors realisiert werden. Dieses stellt eine neue Herausforderung dar, da sich bei Transportbändern aufgrund ihrer hohen Dehnung nur schwer gleichmäßige Teilungen erreichen lassen. Gleichzeitig dürfen Läuferelemente, die unterhalb des Bandes angebracht werden, eine Umlenkung nicht behindern und müssen in ausreichender Weise mit dem Transportband verbunden sein. Bei der Realisierung dieses Vorhabens wird vor allem auf die Möglichkeit eingegangen, Kunststoffe mit ferromagnetischem Material zu kombinieren [Dru04][KlÜ93], um so zum einen die erforderlichen Eigenschaften für den Antrieb zu erhalten und zum anderen Gewicht einzusparen.

Dieses lässt völlig neue Möglichkeiten in der Antriebstechnik für Transportbandanlagen zu. So könnten zum Beispiel Transportbänder, bei denen aufgrund eines Aufbaus kein Mehrtrommelantrieb möglich ist, mit einem Zwischenantrieb versehen werden, um mehr Leistung zu erbringen.

Die Autoren bedanken sich bei der DFG für die Unterstützung dieses Projekts.

6. Literatur

[All76]

Aller, R.: Zum Zwischenantrieb von Gurtförderern mittels angetriebener Tragrollen und Linearmotoren, Institut für Fördertechnik, Technische Universität Hannover, (1976)

- [Dru04] Drummer, D.; Eimeke, S.; Ehrenstein, G.W.: Kunststoffgebundene Dauermagnete. PLUS. Produktion von Leiterplatten und Systemen Band 6 Heft 9. Seite 1530-1534 (2004)
- [Jas09] Jastrzembski, J.-P.; Froböse T.; Overmeyer L.; Ponick B.: Direktantrieb eines Förderbandes durch einen permanentmagnet-erregten Synchron-Linear-Motor, Angenommener, jedoch noch nicht publizierter Beitrag im Rahmen des VDE ETG-Kongress, Düsseldorf (2009)
- [Klü93] Klüting, D.: Starke Kräfte. Herstellen von magnetischen Bauteilen aus reinen Werkstoffen und Mischungen. Maschinenmarkt, Würzburg Band 99 Heft 12. Seite 32-35 (1993)
- [Nen06] Nendel, K.; Mitzschke, F.: Kunststoffgleitpaarungen in der Fördertechnik – Methoden zur Messung von Reibungswerten. 2.Fachkolloquium der WGTL, S. 185-194 (2006)
- [Sch03] Schüßler, H.: "Stern"-Förderer. Kunststoffmodulbänder im harten Einsatz. Fördermittel Journal Band 35 Heft 7/8, S. 28-29 (2003)
- [Ste05] Steinbrink, J.: Kraftwirkungen in permanentmagnetenerregten Maschinen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Nr.370 (2005)

Der variable Fahrtrieb – Eine neue Lösung für die Gestaltung von FTF-Fahrwerken

Matthias Könemann

*Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund*

Michael ten Hompel

*Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund*

Abstract: Aufgrund der zunehmend kürzer werdenden Produktionslebenszyklen wird von automatischen Transportsystemen verstärkt eine Erhöhung der Layout- und Einsatzflexibilität gefordert. Insbesondere durch die Entwicklung der freien Navigation entlang virtueller Leitlinien wurde durch die Steuerungstechnik bereits ein großer Beitrag zur Flexibilisierung von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) geleistet (vgl. /1/). Im Bereich der Fahrwerktechnik werden hingegen zumeist linienbewegliche Fahrwerke mit entsprechend eingeschränkter Manövrierfähigkeit eingesetzt. Hieraus resultiert in der Praxis ein erhöhter Flächenbedarf im Bereich von Kurven und Lastübergabestellen, der die Layoutflexibilität deutlich einschränken kann.

Für das Bewegungsverhalten eines fahrerlosen Transportfahrzeuges (FTF) sind die Freiheitsgrade des Fahrwerks maßgeblich. Um eine hohe Manövrierfähigkeit zu erreichen, können flächenbewegliche Fahrwerke eingesetzt werden. Am Fraunhofer IML wurde ein neues Konzept für ein flächenbewegliches Fahrwerk entwickelt, dessen Ursprünge der Seefahrt entstammen. Dieses erzeugt in der Verfaberebene Geschwindigkeitsvektoren mit beliebiger Richtung. Zudem lässt sich die Verfahrgeschwindigkeit durch die Drehzahl und die Auslenkung des Antriebes stufenlos variieren.

1 Einleitung

Bei einem linienbeweglichen Fahrzeug sind die Bewegungsfreiheitsgrade in der Ebene – ähnlich einem Kraftfahrzeug – voneinander abhängig. Somit sind bestimmte Fahrmanöver, wie beispielsweise das Traversieren quer zur Fahrzeugrichtung, prinzipbedingt nicht möglich. Flächenbewegliche Fahrwerke ermöglichen im Gegensatz dazu – vergleichbar mit einem Luftkissenfahrzeug – beliebige Fahrmanöver in der Ebene.

Der derzeitige Stand der Technik im Bereich der flächenbeweglichen Fahrwerke /2/, wird durch Radnaben-Lenkantriebe /3/ in mehrfacher Ausführung, drehbare Differentialantriebe und den so genannten „Mecanum-Drive“ repräsentiert. Der geringe Verbreitungsgrad flächenbeweglicher Fahrwerke bei manuellen Flurförderzeugen (FFZ) und in der mobilen Automation begründet sich vor allem durch die hohe

Komplexität und die zahlreichen funktionalen Nachteile der bestehenden Lösungen. Die Entwicklung des neuen Fahrwerkskonzeptes wurde daher mit der vorrangigen Zielsetzung der Flächenbeweglichkeit bei gleichzeitig hoher Variabilität und geringen Systemkosten verknüpft.

Neben dem Einsatz für FTF ergeben sich für das neue Funktionsprinzip – vor allem aufgrund der erwartungsgemäß hohen Tragfähigkeit – zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in den Marktsegmenten der mobilen Handhabungstechnik und der innerbetrieblichen Schwerlast-Transportsysteme. Ein weiteres potenzielles Anwendungsfeld stellen manuell betriebene FFZ – und hier besonders die derzeit mit aufwändiger Fahrwerktechnik ausgestatteten Vier- und Mehrwege-Stapler – dar.

2 Beschreibung des Funktionsprinzips

Die Grundidee basiert auf der bereits aus der Schiffstechnik bekannten Kinematik des Voith-Schneider-Propellers (VSP) /7/ /8/ /9/. Anstatt der Propellerflügel des VSP kommen passive – also nicht angetriebene – Räder zum Einsatz. Anstelle der Strömungskräfte an den Flügeln des VSP werden beim variablen Fahrtrieb die Seitenführungskräfte der Räder für den Vortrieb genutzt. Über diese Seitenführungskräfte wird – vergleichbar mit der Abstoßbewegung eines Inline-Skaters – die Rotationsbewegung des Antriebes in eine Vortriebsbewegung umgesetzt.

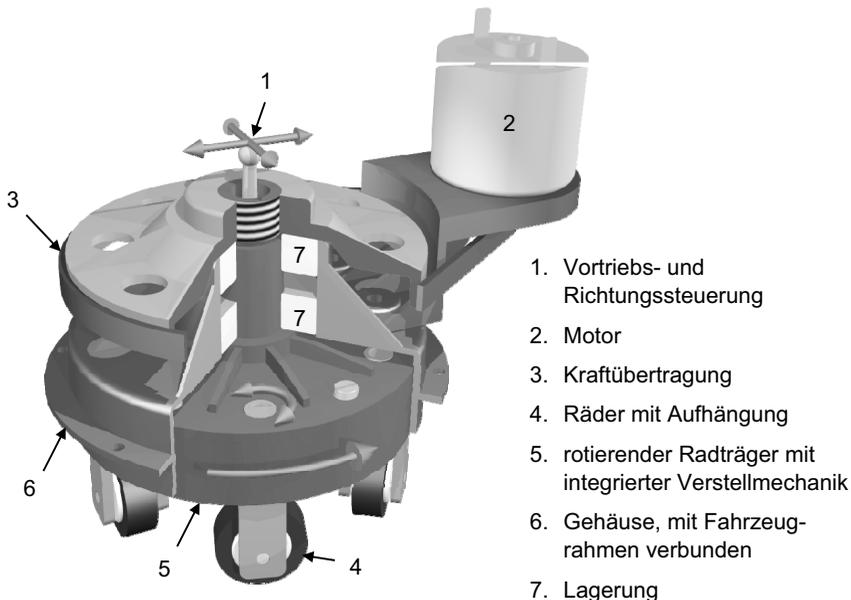


Abb. 1: prinzipieller Aufbau des variablen Fahrtriebes

die Vorderseite des Rades nach außen bzw. vom Kreiszentrum weg. In den Positionen a) und d) stimmen Rollrichtung und Bewegungsrichtung des Rades überein, so dass hier kein Vortrieb entsteht. Die Ursache des Vortriebs wird durch die Zerlegung der Umfangsgeschwindigkeit u in eine in Rollrichtung wirkende Komponente r und eine Vortriebskomponente v deutlich. Für jede Radposition entsteht eine nach Betrag und Richtung einheitliche Vortriebsgeschwindigkeit v , die stets senkrecht zur Auslenkung des Steuerpunktes orientiert ist.

Der Steuerpunkt kann entgegen der in Abb. 2 dargestellten Position auch in jede beliebige andere Lage innerhalb des Radkreises verschoben werden, wobei sich die Vortriebsgeschwindigkeit mit zunehmender Auslenkung vergrößert. Die Verfahrensgeschwindigkeit in der Ebene kann so bei konstanter Drehzahl des Radträgers nach Betrag und Richtung stufenlos variiert werden.

3 Grundlagen

3.1 Kinematik

Die Vortriebsgeschwindigkeit v für jede Position des Rades während der Umdrehung entspricht der vektoriellen Differenz der Geschwindigkeit r des Rades in Rollrichtung und der Umfangsgeschwindigkeit u .

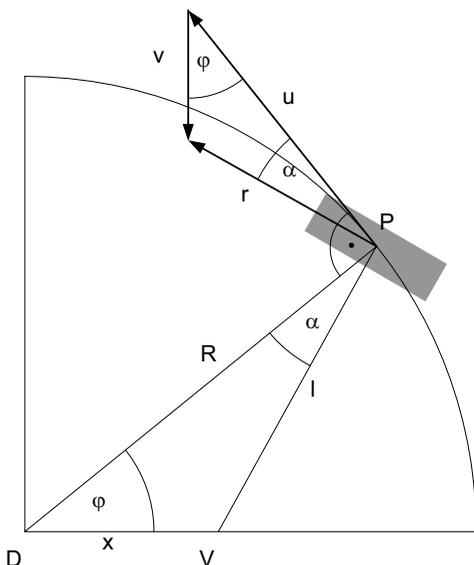


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Vortrieb und Auslenkung

Abb. 3 zeigt den Geschwindigkeitsplan für ein Rad, dass sich an einer durch die Polarkoordinaten R und φ beschriebenen Position befindet. Der Radius R entspricht dabei dem Radius des Radkreises, die Koordinate φ kennzeichnet die Winkelauslenkung bezogen auf die Ausgangslage des Rades. Der Steuerpunkt V liegt um die Auslenkung x vom Drehzentrum D des Radträgers entfernt. Da die Radachsen aller Räder durch den Steuerpunkt verlaufen, stellt sich zwischen Umfangsgeschwindigkeit und Rollgeschwindigkeit der Versatzwinkel α ein. Dieser entspricht dem Versatz der Radachse zur Verbindungslinie des Drehzentrums D zum Radmittelpunkt C .

Aus Abb. 3 geht hervor, dass für eine definierte Auslenkung des Steuerpunktes der resultierende Geschwindigkeitsvektor während einer Umdrehung des Radträgers in seiner Größe und in seiner Richtung konstant bleibt. Die begründet sich durch das so genannte Normalenschnittgesetz, aus dem sich die geometrische Ähnlichkeit der durch die Strecken l , R und x und die Geschwindigkeiten u , v und r definierten Dreiecke ergibt. Aus den festen Seitenverhältnissen der beiden Dreiecke kann die folgende Gleichung abgeleitet werden:

$$\frac{\overline{D\vec{V}}}{\overline{DP}} = \frac{x}{R} = \frac{v}{u} = \lambda \quad (\text{Gl. 1})$$

Diese Gleichung gilt unter der Voraussetzung, dass der Antrieb schlupffrei arbeitet (idealisierte Betrachtung). Das Verhältnis λ der Auslenkung x zum Radius R des Radkreises wird auch als Fortschrittsgrad bezeichnet. Die in Gleichung 1 enthaltene Umfangsgeschwindigkeit ergibt sich aus dem Produkt der Winkelgeschwindigkeit und dem Radius des Radkreises. Für die Vortriebsgeschwindigkeit des Fahrwerkes ergibt sich somit die folgende Beziehung:

$$v = u \cdot \lambda = \frac{u \cdot x}{R} = \omega \cdot x \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{d\varphi}{dt} \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Größe der Vortriebsgeschwindigkeit wird also durch das Produkt aus der Drehzahl des Radträgers und der Auslenkung x des Steuerpunktes bestimmt. Bei gegebener Drehzahl ist die Vortriebsgeschwindigkeit somit unabhängig vom Radkreishalbmesser. Für die Geschwindigkeitsvorwahl des Fahrantriebes ergibt sich eine Regelungsmöglichkeit durch zwei voneinander unabhängige Parameter. Bei einer Änderung der Drehrichtung des Antriebes dreht sich der Vektor der Vortriebsgeschwindigkeit entsprechend um 180° . Ein Fahrtrichtungswechsel ist also sowohl durch eine geänderte bzw. spiegelverkehrte Auslenkung des Steuerpunktes als auch durch eine Drehrichtungsumkehr des Antriebes möglich.

Beispielhaft wird im Folgenden die Vortriebsgeschwindigkeit für eine Drehzahl von 60 min^{-1} und eine Auslenkung von $x = 0,2 \text{ m}$ berechnet:

$$v = \omega \cdot x = \frac{n \cdot \pi}{30} \cdot x = \frac{60 \text{ min}^{-1} \cdot \pi \cdot 0,2 \text{ m}}{30 \text{ s} \cdot \text{min}^{-1}} = 1,26 \text{ m/s}$$

Die Berechnung zeigt, dass sich durch das Antriebskonzept Vortriebsgeschwindigkeiten erzeugen lassen, die im Bereich typischer Geschwindigkeiten automatisierter Flurförderzeuge liegen. Aus Gleichung 2 lässt sich durch Integration auch der Weg s des Fahrtriebes, der während einer Umdrehung des Radträgers zurückgelegt wird, berechnen:

$$v = \omega \cdot x \Rightarrow \frac{ds}{dt} = \frac{d\varphi}{dt} \cdot x \xrightarrow{\text{Integration}} s = \varphi \cdot x \quad (\text{Gl. 3})$$

Für eine komplette Umdrehung mit $\varphi = 2\pi$ ergibt sich also ein Weg von

$$s = 2 \cdot \pi \cdot x \quad (\text{Gl. 4})$$

Diese Strecke entspricht dem Umfang eines Kreises mit dem Radius x . Die Vortriebsbewegung des Fahrtriebes kann daher als ein Abrollen des Radkreises auf einem Grundkreis mit dem Radius x interpretiert werden. Wird der Boden als Bezugssystem definiert, führen die Räder eine Bewegung entlang einer Zykloide aus. Diese Zykloide ergibt sich durch die Überlagerung der translatorischen Vortriebsbewegung mit der Rotationsbewegung des Radkreises.

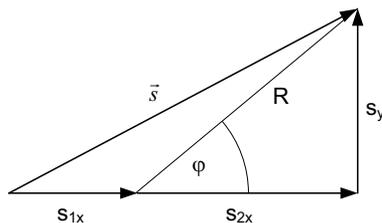


Abb. 4: Ortsvektor der Zykloide

Mit den Nebenbedingungen

$$s_{1x} = \varphi \cdot x, \quad s_{2x} = R \cdot \cos \varphi, \quad s_y = R \cdot \sin \varphi$$

kann in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ der Ortsvektor der Zykloide bezogen auf ein kartesisches Koordinatensystem wie folgt angegeben werden:

$$\vec{s}(\varphi) = \begin{pmatrix} s_x(\varphi) \\ s_y(\varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1x}(\varphi) + s_{2x}(\varphi) \\ s_y(\varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi \cdot x + R \cdot \cos \varphi \\ R \cdot \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 5})$$

In Gleichung 5 wird der translatorische Weganteil durch s_{1x} repräsentiert. Die überlagerte Rotation wird durch s_{2x} und s_y ausgedrückt. In Abb. 5 ist die von den Rädern des Fahrwerkes während einer Umdrehung des Radträgers zurückgelegte Zykloidenbahn dargestellt.

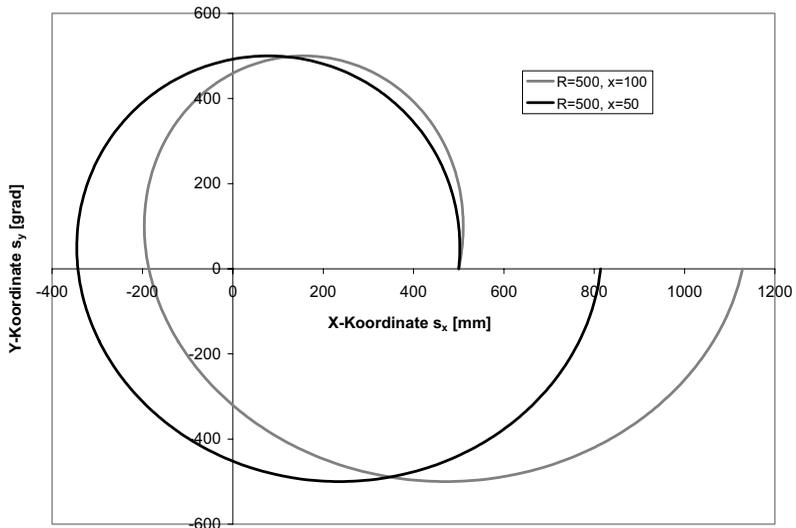


Abb. 5: Darstellung der Zykloide

Die Krümmung der Zykloide nimmt während eines Radträger-Umlaufes unterschiedliche Werte an. Der Krümmungsradius r_z der Zykloidenbahn in Abhängigkeit vom Drehwinkel φ kann aus Gl. 5 wie folgt ermittelt werden:

$$r_z(\varphi) = \left| \frac{(s'_x(\varphi)^2 + s'_y(\varphi)^2)^{3/2}}{s'_x(\varphi) \cdot s''_y(\varphi) - s''_x(\varphi) \cdot s'_y(\varphi)} \right| \quad (\text{Gl. 6})$$

Mit den Ableitungen der Koordinaten des Ortsvektors s_x und s_y ergibt sich daraus:

$$r_z(\varphi) = \left| \frac{(x^2 - 2xR \cdot \sin \varphi + R^2)^{3/2}}{R^2 - xR \cdot \sin \varphi} \right| \quad (\text{Gl. 7})$$

Die zugehörige Funktion ist in Abb. 6 dargestellt. Die Bahnkrümmung erreicht ihre Extremwerte bei $\varphi=90^\circ$ bzw. $\varphi=270^\circ$. Es fällt auf, dass der mittlere Krümmungsradius mit zunehmender Auslenkung x anwächst und stets größer als der Radkreishalbmesser R ist. Dies muss beispielsweise beachtet werden, wenn die aus der Bahnkrümmung resultierende Radreibung, z.B. durch konisch ausgeführte Räder, minimiert werden soll.

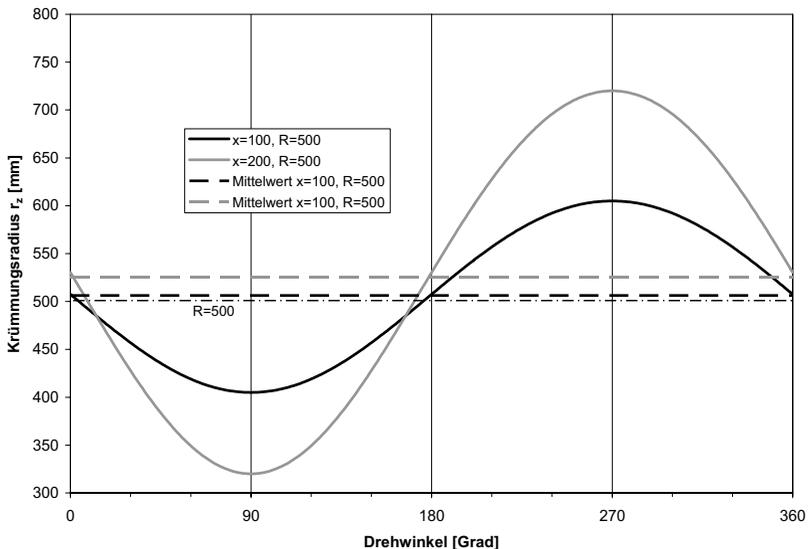


Abb. 6: Krümmung der Zykloide

3.2 Vortriebskräfte

Die nachfolgend dargestellte Betrachtung legt einen statischen Zustand zugrunde, bei dem dynamische Effekte der Rad/Boden-Kontaktfläche, wie z.B. Querschlupf, zunächst ausgeblendet werden. Der Antrieb wird mit einer äußeren Kraft F senkrecht zur Auslenkungsrichtung x beaufschlagt und durch das Moment M im Gleichgewicht gehalten.

Abb. 7 zeigt die Kräftebilanz beispielhaft für einen Fahrtrieb mit drei Rädern. Da die Räder Kräfte nur senkrecht zur Rollrichtung aufnehmen können, wirken an den Aufstandsflächen die Normalkräfte N_1 , N_2 und N_3 . Aufgrund der Lage des Schnittpunktes der Radachsen ergibt die Vektorsumme der Normalkräfte im Steuerpunkt V wiederum die Kraft F . Die quer zur Bewegungsrichtung an den Rädern wirkenden Komponenten der Normalkräfte gleichen sich dabei aus. Das Moment wirkt somit dem an dem Hebelarm x angreifenden Kräftepaar entgegen. Es ergibt sich demzufolge das Moment zu $M = F \cdot x$. Die Analogie zu einem auf dem Radius x abrollenden Rad kann daher auch für die Betrachtung der Vortriebskräfte bestätigt werden.

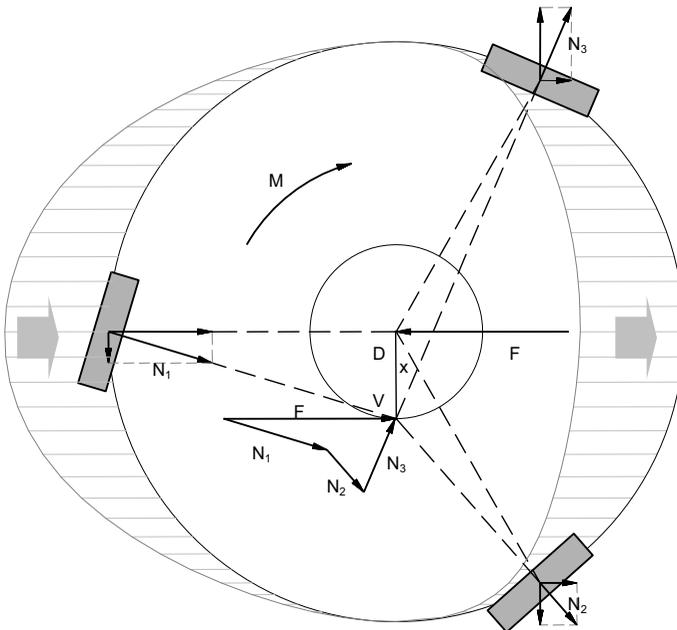


Abb. 7: statische Kräftebilanz

Je nach Stellung der Radbasis ändert sich die Aufteilung der Normal- und Vortriebskräfte auf die einzelnen Räder. Da das System bei einer Radanzahl > 2 statisch überbestimmt ist, erfolgt die Berechnung mit Hilfe von Methoden der Elastostatik [6].

Jedem Rad wird somit eine – vereinfachend als konstant angenommene – Federsteifigkeit in Querrichtung zugeordnet. Aus dem Prinzip der virtuellen Kräfte kann im Anschluss daran für jede Winkelposition der Radbasis die Aufteilung der Normalkräfte auf die Räder abgeleitet werden. Die von den Rädern in Vortriebsrichtung erzeugte Kraft (Vortriebskomponente der Normalkraft) ist in Abb. 7 maßstäblich dargestellt. Dabei sind die zum Drehpunkt zeigenden Komponenten auf der Außenseite des Radkreises angetragen („Druckseite“). Die bezogen auf das Drehzentrum in Gegenrichtung wirkenden Kräfte sind entsprechend im Kreisinneren dargestellt („Zugseite“). Das Winkelinkrement zwischen den dargestellten Kraftlinien beträgt jeweils 5°.

Wenn davon ausgegangen wird, dass die Antriebsleistung $P_{an} = M \cdot \omega$ in die Vortriebsleistung $P_v = F \cdot v$ umgesetzt wird, ergibt sich unter Berücksichtigung der auftretenden Verluste die Beziehung

$$P_v = \eta \cdot P_{an} \Rightarrow F = \frac{M \cdot \omega \cdot \eta}{v} = \frac{M \cdot \eta}{x} \quad (\text{Gl. 8})$$

In dieser Leistungsbilanz sind alle auftretenden Verluste durch den Wirkungsgrad η ausgedrückt. Bei einem konstanten Antriebsmoment lässt sich demzufolge die Vortriebskraft durch die Auslenkung x beeinflussen. Bei kleiner Auslenkung des Steuerpunktes und großer Drehzahl stellen sich hohe Vortriebskräfte ein, während große Auslenkungen in Kombination mit kleinen Drehzahlen geringe Vortriebskräfte bewirken. Damit übernimmt das Fahrwerk die Funktion eines Getriebes mit stufenloser Drehzahl- und Momentenwandlung. In der Praxis verursacht der Gesamtwirkungsgrad eine gegenüber dem Idealzustand verminderte Vortriebskraft und/oder verminderte Vorschubgeschwindigkeit (Schlupf). Die Quantifizierung des Wirkungsgrades unter Berücksichtigung dynamischer Einflüsse ist Gegenstand der aktuellen Forschungsaktivitäten.

4 Systemtechnische Gestaltung

4.1 Verstellmechanik

Bezüglich der Realisierung der Verstellmechanik existieren im Bereich der Nautik unterschiedliche Lösungsansätze. Das Ursprungspatent /10/ von Ernst Schneider basiert auf einer einfachen lineargeführten Kinematik (Abb. 8a). Im Gegensatz dazu arbeitet die so genannte Schubkurbelkinematik (Abb. 8c, vgl. /7/) ausschließlich mit Stangen und Drehgelenken und kommt daher ohne Linearführungselemente aus. Aus Gründen des günstigeren Verschleißes und der Anpassbarkeit des Anstellwinkels der Schaufeln hat sich im Bereich der Seefahrt die Schubkurbelkinematik gegenüber den linear geführten Kinematiken durchgesetzt. Gemeinsames Merkmal der derzeit umgesetzten Funktionsprinzipien ist, dass sie eine Übersetzung der Steuerbewegung beinhalten. Geringe Verschiebungen des realen Steuerpunktes führen so zu vergrößerten Auslenkungen x des kinematischen Steuerpunktes. Eine linear geführte Kinematik, die – wie auch die Schubkurbelkinematik – eine solche Übersetzung be-

sitzt, ist in Abb. 8b dargestellt. Anwendungen für diese Art der Verstellmechanik bestehen derzeit noch im Bereich des Schiffsmodellbaus /11/.

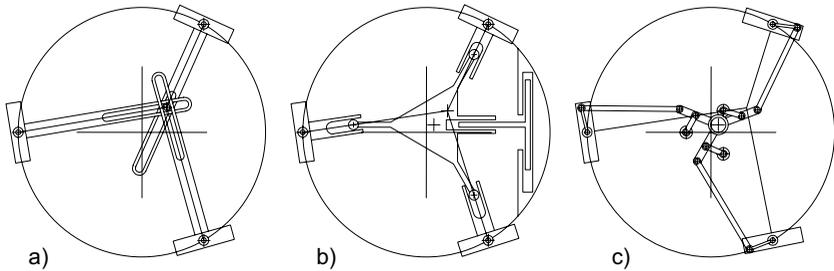


Abb. 8: prinzipielle Möglichkeiten zur Realisierung einer Verstellkinematik

4.2 Fahrwerkvarianten

Die Rotationsbewegung des Fahrantriebes verursacht – vergleichbar mit dem Rotor eines Hubschraubers – ein Reaktionsmoment, das in geeigneter Weise kompensiert werden muss (vgl. auch Abschnitt 3.2). Daraus ergeben sich für den Bau eines kompletten Fahrwerkes verschiedene mögliche Anordnungsvarianten. Der Ausgleich des Reaktionsmomentes kann beispielsweise durch zusätzliche passive Stütz- bzw. Kompensationsräder geschehen. Es entsteht dann ein linienbewegliches Fahrwerk, bei dem die zusätzlichen Räder zusammen mit dem Fahrtrieb ein Dreieck aufspannen (Abb. 9a).

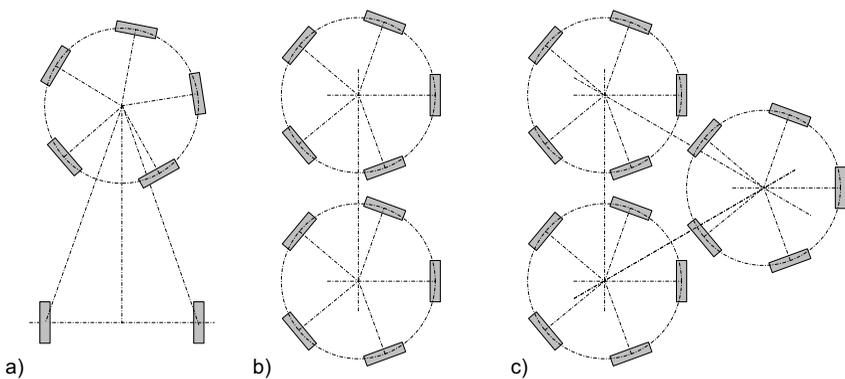


Abb. 9: mögliche Ausführungen für Fahrwerke

Falls die Aufstandsfläche des Radkreises eine ausreichende Kippstabilität des Fahrzeuges gewährleisten kann, ist ein Fahrweraufbau mit einem Fahrtrieb und nur einem zusätzlichen Rad (innerhalb oder außerhalb des Radkreises) denkbar. Eine vollständige Flächenbeweglichkeit wird durch die Kombination zweier (Abb. 9b) oder mehrerer (Abb. 9c) Fahrtriebe erreicht. Die entstehenden Reaktionsmomente können bei diesen Fahrwerkvarianten durch eine geeignete Ansteuerung der Antriebe kompensiert werden.

5 Erprobung

Die prinzipielle Machbarkeit des Antriebskonzeptes „variabler Fahrtrieb“ wurde in verkleinertem Maßstab anhand zweier Konzeptfahrzeuge nachgewiesen. Eines der Fahrzeuge besitzt eine Linienkinematik (vgl. Abb. 9a) mit einem Fahrtrieb und zwei ergänzenden passiven Rädern. Das andere Fahrzeug (Abb. 10) ist im Gegensatz dazu mit einem flächenbeweglichen Doppelantrieb (vgl. Abb. 9b) ausgerüstet. Die Verstellkinematik der verwendeten Antriebe entspricht dem in Abb. 8b dargestellten Grundprinzip. Die theoretischen Vorbetrachtungen können – insbesondere bezüglich der linearen Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit von der Auslenkung des Antriebes und der Drehzahl – bestätigt werden. Für beide Fahrwerksvarianten konnte eine herausragende Manövrierfähigkeit in Verbindung mit einer guten Regelbarkeit und Umsteuerbarkeit der Fahrtriebe nachgewiesen werden. Beide Konzeptfahrzeuge zeigen insbesondere bei Richtungswechseln, Beschleunigungen und Verzögerungen ein agiles Verhalten. Das flächenbewegliche Fahrwerk ermöglicht komplexe Fahrmanöver wie Drehungen um die Fahrzeug-Hochachse und Traversierbewegungen in beliebiger Richtung. Filmaufnahmen dieser Fahrzeuge finden sich auf der Website www.variabler-fahrtrieb.de.



Abb. 10: Konzeptfahrzeug mit Doppelantrieb

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der bisherigen IML-Aktivitäten konnten bereits zahlreiche Potenziale des Konzeptes „Variabler Fahrtrieb“ erkannt werden. Das Alleinstellungsmerkmal des Konzeptes im Bereich der Fahrwerktechnik besteht in der Kombination eines omnidirektionalen Vortriebes mit einer stufenlosen mechanischen Regelbarkeit. Von diesen grundsätzlichen Vorteilen des Konzeptes, die in der Seefahrt bereits genutzt werden, können auch Flurförderzeuge profitieren.

Im Bereich der Fahrzeugtechnik können vom Fahrtrieb zahlreiche Aufgaben übernommen werden. So besteht die Möglichkeit, die Funktionen „Vortrieb“, „Lenkung“, und „Getriebe“ in einer Baugruppe zu vereinen. Da der Fahrtrieb bei voller Drehzahl aus dem Stillstand beschleunigen kann, ist der Wegfall der Anfahrkupplung bei derzeit entsprechend ausgerüsteten Fahrzeugen denkbar. Da sich die Räder eines Antriebes im Stillstand gegenseitig blockieren wird zudem die Funktion einer Betriebs- und Haltebremse übernommen. Speziell für Flurförderzeuge ergeben sich Vorteile durch die Verteilung der Last auf mehrere Räder. Insbesondere bei größeren Radanzahlen sind hohe erreichbare Tragfähigkeiten zu erwarten. Aufgrund der Rotationsbewegung der Radbasis kann davon ausgegangen werden, dass eine Fahrspurbildung – die bei fahrerlosen Transportsystemen ein bekanntes Problem darstellt – vermieden werden kann.

Bezüglich der theoretischen Grundlagen wurden erste Modellierungsansätze formuliert, die jedoch eine vollständige Beschreibung des Systems noch nicht zulassen. Insbesondere die Systemgestaltung im Bereich der Verstellmechanik und die dynamischen Vorgänge in der Rad/Boden-Kontaktzone bedürfen der weiteren Untersuchung.

Für die Realisierung einer geeigneten Verstellgeometrie existieren bereits zahlreiche Lösungen aus dem Bereich der Nautik. Diese beziehen sich jedoch zumeist auf die spezifischen Anforderungen der Schiffstechnik (hydrodynamische Optimierung, Abdichtung, etc.), die für eine Anwendung im Bereich der Fahrwerktechnik größtenteils irrelevant sind. Das Ziel weiterer Schritte ist es daher – unter Berücksichtigung der bereits existierenden Lösungen – eine für ein Landfahrzeug geeignete Verstellmechanik zu finden und näher zu untersuchen. Aufgrund des großen Einflusses auf die Komplexität und die Kosten des Fahrtriebes soll vor allem die Frage nach dem kinematischen Grundprinzip (Schubkurbelkinematik vs. lineargeführte Kinematik) beantwortet werden.

Die Kontaktkräfte zwischen Rad und Boden stellen ein zentrales Auslegungskriterium für den Verstellmechanismus, die Radaufhängungen und die Räder dar. Ein prinzipbedingter Unterschied zu üblichen radbasierten Trag-/ Führungssystemen ergibt sich aus der permanenten zeitliche Änderung der Querkraft bezogen auf das Rad. Auf den Grundmodellen der Fahrzeugdynamik /5/ aufbauend sollen daher – unter Berücksichtigung dieser Problematik – Aussagen bezüglich der Tragfähigkeit, der erzielbaren Vortriebskräfte, der Spurstabilität und der Energieeffizienz abgeleitet werden. Zur experimentellen Absicherung der Ergebnisse und zur Erprobung der Gesamtfunktion ist die Schaffung einer Testumgebung in Form eines Versuchstandes geplant.

7 Literatur

- /1/ ten Hompel, M., Schmidt, T., Nagel, L.: Materialflusssysteme, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007
- /2/ VDI 2510 Fahrerlose Transportsysteme, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 2005; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- /3/ VDI 4451/3 Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) – Fahr- und Lenkantrieb, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf 1998; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- /4/ Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und mobile Roboter: Chancen, Technologie, Wirtschaftlichkeit. Neueste Erkenntnisse und Trends in Materialfluss und mobiler Automation. Fraunhofer IPA Technologieforum, 06. Mai 2009, Stuttgart
- /5/ Popp, K, Schiehlen, W.: Fahrzeugdynamik, Verlag B. G. Teubner, Stuttgart 1993
- /6/ Meskouris, K, Hake, E: Statik der Stabtragwerke, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
- /7/ Jürgens B., Fork W.: Faszination Voith-Schneider-Propeller – Geschichte und Technik. Hamburg 2002
- /8/ Bartels J.-E., Jürgens,B.: Voith-Schneider-Propeller – Gegenwärtige Anwendungen und neue Entwicklungen, Handbuch der Werften, Band XXVI, 2002
- /9/ Baer, W.: Der Voith-Schneider-Propeller heute und seine Entwicklungstendenzen, STG-Vortrag, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1973
- /10/ Patentschrift DE 453 823 A, Anmeldetag: 07.12.1925, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 01.12.1927, Bezeichnung: Schaufelrad, Erfinder: Schneider, Ernst
- /11/ Gebrauchsmuster DE 8 202 898 U1, Anmeldetag 04.02.1982, Bekanntmachung 24.06.82, Bezeichnung: Voith-Schneider-Propeller für ein Modellfahrzeug, Inhaber: Ludwig Bergdorf KG, Vöhringen

Onlineanalyse der im Betrieb von Flurförderzeugen auftretenden Belastungen

Dipl.-Ing. Christian Vorwerk
Universität Stuttgart
Institut für Fördertechnik und Logistik
Fachgebiet Fördertechnik

Abstract: Beim Betrieb von Flurförderzeugen treten in der Praxis unterschiedlichste Situationen auf, die das Fahrzeug einer Schwingungs- bzw. Schockemission aussetzen. So werden beispielsweise beim Überfahren von Kopfsteinpflaster Fahrer und Fahrzeug zu (hauptsächlich) vertikalen Schwingungen angeregt. In Abhängigkeit z.B. der Expositionsdauer, des Untergrundes, der Fahrgeschwindigkeit, des Fahrzeugtyps, der aufgenommenen Last und der Bereifung bestimmen diese im Betrieb auftretenden Belastungen den Verschleiß der Fahrzeugkomponenten. Weiterhin kann das Fahrzeug durch singuläre Ereignisse, wie beispielsweise das Überfahren einer hohen Schwelle oder den Aufprall auf ein Hindernis, so stark beschädigt werden, dass eine sofortige Schadensbehebung notwendig wird.

Mit dem im Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart entwickelten System zur Onlineanalyse der auftretenden Belastungen wurden die Voraussetzungen geschaffen, neben den Dauerbelastungen des Fahrzeugs auch kritische Betriebszustände automatisch zu erkennen und hinsichtlich der zu erwartenden Folgen zu bewerten, um damit z.B. den Umfang und den zeitlichen Abstand zwischen Instandhaltungsintervallen optimal planen und überwachen zu können.

1 Einleitung

Wegen des ansteigenden Anteils an Flurförderzeugen, die im Full-Service betrieben, bzw. vermietet werden (bis zu 60%) wächst sowohl bei den Herstellern als auch den Betreibern der Wunsch nach einer individuellen Ermittlung der Wartungs- und Instandsetzungskosten der Fahrzeuge (nutzungsabhängige Lifecycle-Costs). Eine valide, verursachungsgerechte Kalkulation der auftretenden Wartungskosten in Abhängigkeit der Fahrzeugnutzung kann von den Flurförderzeugherstellern jedoch nicht nur über die Betriebsstundenerfassung erfolgen, sondern erfordert eine genauere Kenntnis über die Betriebsparameter und die Belastungskollektive in der Praxis. Für eine transparente und nutzungsabhängige Ermittlung der auftretenden Kosten müssen deshalb weitere Parameter bekannt sein, die die Fahrzeugbelastung im praktischen Einsatz realitätsgetreu widerspiegeln können. Bisher ist jedoch die automatische Erfassung und Auswertung dieser Zustandsgrößen nicht möglich.

Trotz der in modernen Flurförderzeugen immer besser realisierten Schwingungsdämpfung und -entkopplung zur Minimierung der auf den Bediener einwirkenden Humanschwingungsemissionen, zwingt die in Deutsches Recht umgesetzte EU Verordnung Vibration 2002/44/EG die Unternehmen zur Überwachung und Limitierung der Gefährdung durch Lärm und Vibration. Um in Abhängigkeit der in der Praxis auftretenden realen Schwingungseinwirkungen die auf einen Bediener wirkende Tagesexposition ermitteln zu können, soll zukünftig insbesondere bei wechselnden Betriebsbedingungen und Fahrzeugen eine Onlineerfassung der Schwingungsvibrationen ermöglicht werden [1].

Als Maß für die auftretenden Schwingungsbelastungen ist in DIN EN 1032:2003 der „Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung der vertikalen Ganzkörper-Schwingung“ festgelegt. Um die Frequenzbewertung der Beschleunigung vornehmen zu können, werden die Messwerte zunächst mit einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt. Anschließend werden die durch die FFT erstellten frequenzabhängigen Fourier-Koeffizienten des Beschleunigungssignals mit dem Bewertungsfaktor aus der Frequenzbewertungskurve multipliziert (Abb. 1).

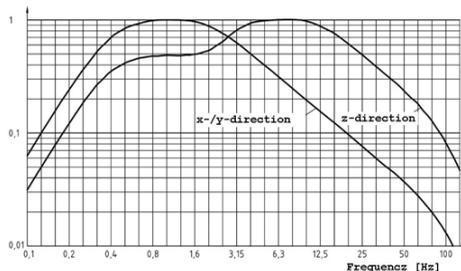


Abbildung 1: Frequenzbewertungskurve [2]

Mit diesem Vorgehen können die Auswirkungen einer mechanischen Schwingung auf den menschlichen Körper in Abhängigkeit von der Frequenz bewertet werden. Als Maß für die Belastung des Bedieners gilt nach der Richtlinie 2002/44/EG die tägliche Schwingungsbelastung als Summe der auftretenden Einzelbelastungen und Einwirkdauern. Befindet sich die Tagesexposition oberhalb des Auslösegrenzwertes von $A(8) = 0,5 \text{ m/s}^2$, muss der Arbeitgeber präventive Maßnahmen zur Schwingungsreduzierung einleiten und den Arbeitnehmer über die Gefährdung unterrichten. Eine Überschreitung des Expositionsgrenzwertes von $A(8) = 1,15 \text{ m/s}^2$ in horizontaler bzw. $A(8) = 0,8 \text{ m/s}^2$ in vertikaler Schwingungsrichtung führt zu einem Beschäftigungsverbot bzw. zu einer Senkung der Einwirkdauer.

Weiterhin statten die Hersteller ihre Fahrzeuge tw. mit zusätzlichen Schockerfassungssystemen aus. Die zur Schwingungs- und Schockerfassung benötigten Beschleunigungssensoren sind deshalb im Fahrzeug teilweise schon vorhanden.

Um aus der Fülle der im Feldeinsatz auftretenden möglichen Betriebssituationen eine Aussage über möglicherweise für das Fahrzeug schädliche Situationen (bzw. Unfälle) treffen zu können, ist die Auswertung der in den 3 Raumrichtungen auftretenden Fahrzeugbeschleunigungen jedoch nicht ausreichend. Versuche mit einem Gegengewichtsstapler am IFT lassen aber den Schluss zu, dass mit einer parallelen Auswertung weiterer Informationen (beispielsweise Fahrzeuggeschwindigkeit, Lenkwinkel, Beladung, Lasthöhe) und unter Einbeziehung weiterer Sensorsignale eine praxistaugliche Unfallerkennung entwickelt werden kann.

Wegen der Vielzahl von gleichzeitig zu berücksichtigenden Größen, die zur Beschreibung des Gesamtzustandes notwendig sind, wird eine „manuelle“ Festlegung von Grenzwerten, bzw. die a-priori-Formulierung von Zustandskombinationen, die ein bestimmtes Systemverhalten repräsentieren, kaum möglich sein [3]. Dies wird besonders deutlich, wenn man sich vor Augen führt, dass je nach Fahrzeugtyp und -nutzung und auch in Abhängigkeit der Nutzlast diese Grenzwerte in einem großen Bereich variieren können. Deshalb müssen zur Detektierung und Bewertung von Unfallsituationen im Flurförderzeugbereich völlig neue Analyseverfahren entwickelt und eingesetzt werden.

2 Ziel des Forschungsprojektes

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Neu- und Weiterentwicklung von Schockerkennungssystemen in Flurförderzeugen. Es sollen zuverlässige und leistungsfähige Algorithmen entwickelt werden, die in der Lage sind, eine automatische Unfall- und Belastungserkennung im Labor- und Feldeinsatz unabhängig von den eingesetzten Flurförderzeugen und den Umgebungsbedingungen durchzuführen. Im Vordergrund des Forschungsvorhabens steht die Ermittlung und Analyse von allen Parametern, die für eine praxistaugliche Beschreibung des Fahrzeugverhaltens und zur zuverlässigen Unfallerkennung benötigt werden.

Beim Betrieb von Flurförderzeugen (z.B. Gabelstapler oder Schubmaststapler) treten in der Praxis unterschiedlichste Situationen auf, die das Fahrzeug und damit auch den Bediener einer Schwingungs- bzw. Schockemission aussetzen. So werden beispielsweise beim Überfahren von Kopfsteinpflaster Fahrer und Fahrzeug zu (hauptsächlich) vertikalen Schwingungen angeregt. In Abhängigkeit z.B. des Untergrundes, der Fahrgeschwindigkeit, des Fahrzeugtyps, der aufgenommenen Last und der Bereifung, können diese auf den Fahrer einwirkenden Humanschwingungen bei dauerhafter Einwirkung Schäden am Bediener hervorrufen. Singuläre Ereignisse, wie beispielsweise das Überfahren einer Schwelle (Abb. 2) oder das Fahren des Gabelstaplers gegen ein Hindernis, können nicht nur das Fahrzeug durch die auftretenden Bauteilbelastungen beschädigen, sondern auch Schäden an der Umgebung (bspw. an einem Regal) erzeugen.

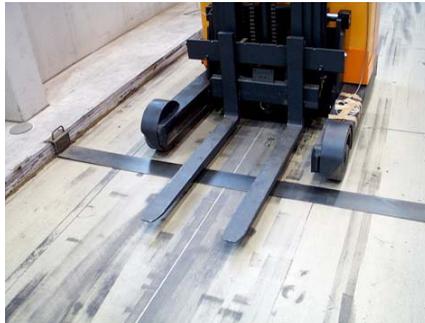


Abbildung 2: Schwellenüberfahrt nach [4]

In diesem Forschungsprojekt sollen die Voraussetzungen geschaffen werden, neben den Dauerbelastungen von Fahrer und Fahrzeug auch diese kritischen Betriebszustände automatisch zu erkennen und hinsichtlich der zu erwartenden Folgen zu bewerten. In der ersten Projektphase wurde mit Labor- und Feldversuchen ermittelt, welche Parameter für die Analyse des Fahrzeugverhaltens bei unterschiedlichen Flurförderzeugen und Umgebungsbedingungen benötigt werden (z.B. Fahrzeugvibrationen - Beschleunigungssensoren, Bauteilbelastungen - DMS, Fahrverhalten - CAN-Bus-Daten, etc.). Im weiteren Projektverlauf werden Strategien zur Unfall- und Belastungserkennung auf Basis einer adaptiven Kennfeldgestützten Beschreibung von Betriebszuständen entwickelt. Die Bewertungsgrundlage soll dabei nur anhand von linguistischen Regeln (z.B. „Maximalbelastung des Fahrzeughrahmens ist geringfügig überschritten“) formuliert werden, um eine automatische Generierung der für einen bestimmten Fahrzeugtyp benötigten Kennfelder zu ermöglichen. Anschließend sollen die entwickelten Algorithmen an einem mit der benötigten Sensorik ausgestatteten Flurförderzeug verifiziert und damit die Voraussetzungen für ein universell einsetzbares Werkzeug zur Belastungsanalyse geschaffen werden.

3 Belastungsmessung im Laborversuch

Um zunächst einige reproduzierbare Szenarien zur Belastungserfassung generieren zu können, wurden unterschiedliche Standardsituationen als Laborversuch definiert, die das Fahrzeug oder den Fahrer im täglichen Betrieb einer Dauerbelastung oder Schockemission aussetzen. In Anlehnung an [2] und [4] wurden dazu Versuche festgelegt, die eine qualitative und quantitative Bewertung der resultierenden Schwingungssituation bei Schwellenüberfahrt zulassen. Hierzu soll mit einer variablen (auch Fahrzeugabhängigen) Geschwindigkeit eine Schwelle von z.B. 5 cm Höhe überfahren und die Belastung von Fahrer und Fahrzeug gemessen werden. Weiterhin wurde der Aufprall des Fahrzeuges auf ein festes Hindernis und die dynamische Aufnahme einer Last (Palette) untersucht. Um den Einfluss verschiedener Fahrsituationen bewert-

ten zu können, sollten alle Versuche mit unterschiedlichen Kurvenradien (Geradeausfahrt und Kurvenfahrt) durchgeführt werden können.

Um ein zunächst möglichst einfaches Modell für die Belastungssituation erstellen und auswerten zu können, sollten nur die in Tabelle 1 dargestellten Parameter erfasst und ausgewertet werden. Als Versuchsträger standen ein Gabelstapler und ein Schubmaststapler mit einer Tragfähigkeit von je 2 t zur Verfügung. Diese Kombination gestattet eine Bewertung der entstehenden Beschleunigungen bei völlig unterschiedlichen Rädern und den daraus resultierenden Feder- und Dämpfungsdaten zwischen Fahrzeugrahmen und Boden.

Tabelle 1: Zur Versuchsbewertung erfasste Parameter

| Physikalische Größe | Erfassung |
|---|---|
| Fahrstrecke, Fahrzeuggeschwindigkeit, Beschleunigung | Raddrehzahlen |
| Lenkwinkel, Fahrtrichtung | Differenz der Raddrehzahlen |
| Beladung | Kettenkraft (beidseitige Erfassung) |
| Lastschwerpunkt (x/y) | Gabelverformung (beidseitige Erfassung) |
| Lastschwerpunkt (z) | Statische Messung bei Versuchsstart |
| Vertikale Beschleunigung des Fahrersitzes | Beschleunigungssensor (z-Richtung) |
| Beschleunigung des Fahrzeugrahmens | Beschleunigungssensoren (x-/y-/z-Richtung) |

Auf eine Auswertung z.B. der Daten aus dem Antriebs- oder Hydrauliksystem der Fahrzeuge wurde im Rahmen dieses Projektschrittes bewusst verzichtet, um eine Fahrzeug- und Steuerungsunabhängige Aussage generieren zu können. In Folgeprojekten sollen (wie Eingangs erläutert) im Steuerungssystem der Fahrzeuge bereits vorhandene Daten mit in die Auswertung einfließen. Dieses Vorgehen erfordert dann jedoch eine erheblich größere Anzahl von Versuchsfahrzeugen und Versuchen.

3.1 Erfassung erforderlicher Parameter

Eine maßgebliche Größe für die Bewertung der entstehenden Belastungen stellt die Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrtrichtung dar. Durch den beim Fahrbetrieb entstehenden Schlupf kann die Fahrtrichtung durch eine Messung des Lenkwinkels nicht immer korrekt bestimmt werden. Deshalb werden zur Bestimmung die Einzelgeschwindigkeiten der beiden nichtangetriebenen Vorderräder gemessen. Um die notwendigen Maßnahmen zur Messwerterfassung so gering wie möglich zu halten, wurden dazu die Drehzahlen der Räder optisch erfasst (Abb. 3).



Abbildung 3: Messung von Lastschwerpunkt, Fahrzeuggeschwindigkeit und -fahrtrichtung [4]

Um eine Beeinflussung des Messprinzips durch Fremdlicht (z.B. durch das 100Hz-Flackern von Leuchtstoffröhren) zu vermeiden, wird die auf der einen Seite angebrachte IR-Sendediode mit einer Frequenz von 10 kHz getaktet. Die sich an den Fototransistoren auf der Empfangsseite (in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke der Basis) am Kollektor einstellenden Spannungswerte werden über einen 20dB-Bandpass bei einer Resonanzfrequenz von $f_{\text{Res}} = 10 \text{ kHz}$ gefiltert, so dass die Wechselspannung am Filterausgang lediglich durch das von der Fotodiode ausgesendete Licht verursacht wird (Abb. 4).

Die spektrale Empfindlichkeit der Fototransistoren ist an die Frequenz des von der IR-Sendediode emittierten Lichtes im Bereich von $\lambda = 875 \text{ nm}$ angepasst. Nach Gleichrichtung und Verstärkung stehen analoge Signale im Bereich zwischen 0 V und 10 V als Maß der Ausleuchtung jedes Fototransistors zur Verfügung.

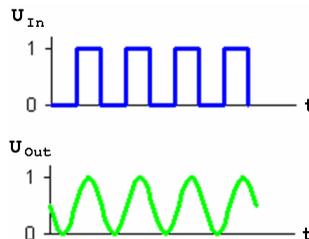


Abbildung 4: Signal am Ein-/Ausgang des 20dB-Bandpasses

Da Versuche mit dynamischer Lastaufnahme durchgeführt werden sollten, musste eine Onlineerfassung der Beladung und der Verteilung der Last auf den Gabeln erfolgen. Die horizontale Verteilung der Last wird dabei direkt an den Gabelzinken mit Dehnungsmessstreifen gemessen (Abb. 3). Dazu geeignete Messstellen wurden mit Hilfe einer Finiten-Elemente-Berechnung vorher bestimmt und die zu erwartende Verformung der Gabelzinken ermittelt, um die notwendige Signalverstärkung zu berechnen (Abb. 5). Bei Verwendung einer Wheatstonschen Halbbrückenschaltung ergibt sich die Differenzspannung in der Messbrücke zu:

$$U_D = \frac{1}{2} \cdot U_B \cdot k \cdot \varepsilon \quad (1)$$

bei einer relativen Verformung von:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

Der analoge Messverstärker erzeugt daraus bei einer Verstärkung von i_M eine Messspannung von:

$$U_M = i_M \cdot \frac{1}{2} \cdot U_B \cdot k \cdot \frac{\sigma}{E} \quad (3)$$

Durch eine Auswertung beider aus den Verformungen der Gabelzinken resultierenden Messspannungen lässt sich bei bekannter Gesamtbelastung der Lastschwerpunkt in horizontalen Koordinaten berechnen. Dabei bestimmt die Differenz der Messsignale die seitliche Entfernung vom Mittelpunkt und die Gesamtdurchbiegung der Gabelzinken ist abhängig von der Entfernung des Schwerpunktes vom Hubgerüst.

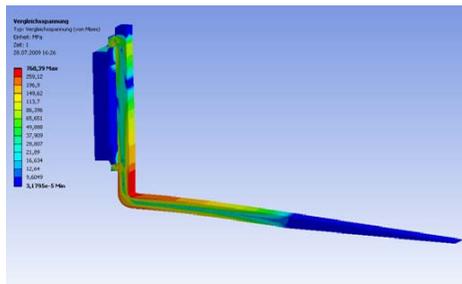


Abbildung 5: FEM-Modell der Verformungen

Da eine Messung der Gesamtlast aus dem hydraulischen System relativ ungenau ist, wurden auch hier Dehnungsmessstreifen eingesetzt (Abb. 6). Da die aus der Belastung resultierende Kraft über die Ketten in das Hubgerüst eingeleitet wird, kann aus der Summe beider Kettenkräfte die Gesamtlast ermittelt werden. Auch hier wurden Halbbrücken zur Erfassung eingesetzt und eine Temperaturkompensation der Messsignale über zusätzliche Dehnungsmessstreifen sichergestellt.

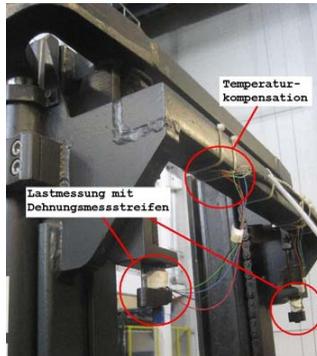


Abbildung 6: Messung der Gesamtlast mit Dehnungsmessstreifen

Zur Erfassung der auf den Fahrer und das Fahrzeug einwirkenden Schwingungsemissionen, bzw. Schockbelastungen wurden unterschiedliche Beschleunigungssensoren eingesetzt (Abb. 7). Es zeigte sich, dass die vertikale Beschleunigung des Fahrersitzes auch bei Schwellenüberfahrt keine Werte oberhalb von 2 g erfährt, so dass hier eine genaue Erfassung mit einem kapazitiven Beschleunigungssensor mit einem Messbereich von bis zu 2 g erfolgen konnte.

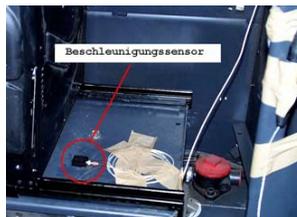


Abbildung 7: Schockerfassung mit Beschleunigungssensoren

Da im Bereich des Fahrzeugrahmens teilweise erheblich höhere Beschleunigungswerte gemessen wurden, kamen hier Sensoren mit einem Messbereich von mindestens 10 g zum Einsatz. Wegen der schockartigen Belastung mit hohen Frequenzanteilen wurden hier piezokeramische Sensoren eingesetzt.

4 Auswertung und Analyse

Um bei der Abtastung der Analogsignale mit einer AD-Wandlerkarte auch hochfrequente Anteile der Messsignale sicher und mit möglichst geringem Digitalisierungsfehler erfassen zu können, wird eine Abtastrate von mindestens 10 kHz mit einer AD-Auflösung von 16 Bit verwendet und die Messwerte in einer MS-Access-Datenbank abgelegt. Ferner verfügt die gewählte USB-Schnittstellenkarte über digitale Eingänge zur Erfassung und Steuerung weiterer Signalzustände (z.B. Inkrementalgebersignale, etc.).

Als Voraussetzung für eine praxistaugliche Analyse des Fahrzeugzustandes müssen die gemessenen Zustandsgrößen in geeigneter Weise miteinander verglichen bzw. verknüpft werden. Die dazu erforderlichen Verknüpfungsregeln werden in einem System von Kennfeldreglern auf Basis der Fuzzy-Logic abgebildet. Um möglichst viele a-priori-Informationen einfach integrieren zu können (linguistisch formulierbares Wissen über Zusammenhänge von Zustandsgrößen wie z.B. Kraft und Beschleunigung oder Achslastverteilung und Beladung) und eine übersichtliche Reglerstruktur zu schaffen, soll ein mehrstufiges, adaptives Verknüpfungsmodell für die Kennfeldregler verwendet werden [7,9]. Die Reglerstruktur soll am Ausgang linguistische oder analytische Informationen über die qualitative und quantitative Belastungsbewertung von Fahrer, Flurförderzeug und Umgebung liefern (z.B. „hohe Belastung des Flurförderzeugrahmens“ => Rahmenbelastung = x,y).

Die Festlegung der quantitativen Zuordnung zur linguistischen Beschreibung (x=...; y=...) kann nicht im Rahmen der Modellierung erfolgen, da z.B. für jeden Fahrzeugtyp völlig andere Werte gelten müssen. Deshalb wird das Verknüpfungsmodell prototypisch (mit einem handelsüblichen PC) an einem Flurförderzeug im Rahmen von Labor- und Praxisversuchen eingesetzt und damit nachgewiesen, dass die Reglerstruktur in der Lage ist, den linguistischen Beschreibungen der Belastungssituationen quantitative Merkmale zuzuordnen.

Ein Fuzzyregler kann mehrere Eingänge und verschiedene Ausgänge beinhalten und besteht aus drei verschiedenen Blöcken:

- Fuzzyfizierung,
- Inferenz und
- Defuzzyfizierung.

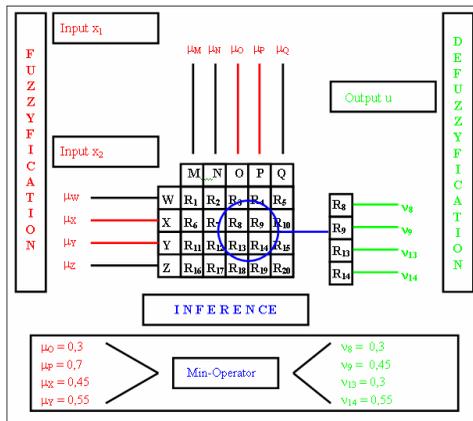


Abbildung 8: Blöcke eines Kennfeld-basierten Fuzzyreglers

Die Ein- und Ausgänge eines Fuzzyreglers sind als „scharfe“ Parameter definiert. Der Fuzzyfizierungs-Block legt die Aktivierungslevel für alle Fuzzy-Sets am Eingang fest. Der Aktivierungslevel jeder Regel kann Werte von 0 bis 1 annehmen. Er kann als Erfüllungsggrad des Wertes interpretiert werden, der die Regel repräsentiert. In der Inferenz werden die Aktivierungslevel der Regeln am Ausgang des Fuzzyreglers in Abhängigkeit der Aktivierungslevel der Regeln am Eingang berechnet. Jede einzelne Regel am Eingang wird nur dann Teil des Inferenzprozesses, wenn der Level größer als Null ist (Abb. 8). Der finale Prozess der Defuzzyfizierung bestimmt die Ausgangsgrößen des Fuzzyreglers durch eine Interpretation der Level der aktivierten Ausgangsregeln.

Ein einzelner Fuzzyregler oder ein System von verknüpften Fuzzyreglern kann Expertenwissen abbilden und zu einer Wissensbasis verdichten. Deshalb können mit Fuzzyreglern Regel-basierte Systeme implementiert werden und eine adaptive Wissensbasis geformt werden.

Die Funktionalität eines einfachen Fuzzyreglers mit zwei Eingängen und einem Ausgang kann durch einen Graphen beschrieben werden, der den Ausgang u als Funktion von den beiden Eingangswerten x_1 and x_2 darstellt (Abb. 9).

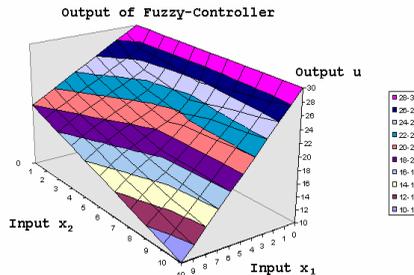


Abbildung 9: Ausgangsgröße eines zweidimensionalen Kennfeld-basierten Fuzzyreglers

Um ein strukturiertes System von Kennfeld-basierten Fuzzyreglern mit verifizierbaren (Zwischen-)Ausgangsgrößen zu entwickeln, wurden die verschiedenen Signale für die Lasterfassung kombiniert und in einem einzelnen Regler mit zwei Ausgangswerten zusammengefasst (Gesamtlast und Vektor des Lastschwerpunktes – Abb. 10).

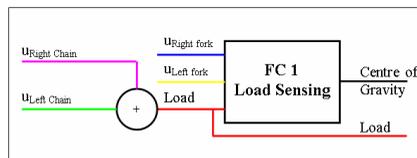


Abbildung 10: Fuzzyregler zur Lasterkennung

Dieses Vorgehen ermöglicht dem Benutzer die ermittelten Ausgangsgrößen ohne den Einfluss des kompletten Systems aus Fuzzyreglern zu interpretieren. Die Validierung und Kalibrierung kann deshalb mit einer statischen Last einfach erfolgen.

Die Ausgangsgrößen des Fuzzyreglers zur Lasterkennung und ferner alle anderen gemessenen Parameter werden als Eingangsgrößen des Gesamtsystems aus Fuzzyreglern benutzt. Das Gesamtsystem soll die linguistischen Ausgangsgrößen für die Belastungsanalyse liefern. Aus den Messergebnissen kann die Gabelzinkenbelastung direkt abgeleitet werden. Deshalb konnte die Definition und Kalibrierung der Ausgangsregeln für die Gabelbelastung einfach erfolgen und gestattet eine präzise Interpretation der Belastung (Tabelle 2).

Tabelle 2: Defuzzy-Sets

| Defuzzy-Set | Lingustische Beschreibung |
|-------------|---|
| A | Keine/niedrige Gabelbelastung |
| B | Normale Gabelbelastung, keine Verkürzung des Instandhaltungsintervall erforderlich |
| C | Hohe Gabelbelastung, Verkürzung des Instandhaltungsintervall wird ggf. erforderlich |
| D | Gabelbeschädigung möglich, sofortige Inspektion erforderlich |
| E | Zerstörung der Gabel möglich, sofortige Beendigung der Fahrzeugnutzung |

Eine Analyse der Ausgangsregeln zeigt einen ausgedehnten Bereich für „normale“ Gabelbelastung, der noch keine Verkürzung des Instandhaltungsintervall erforderlich macht (Set B in Abb. 11). Die Sets C, D, E repräsentieren Kombinationen der Eingangsgrößen mit höherer Gabelbelastung und möglicher Beschädigung, die eine Inspektion teilweise sofort erforderlich machen (z.B. wird die Ausgangsgröße $u(t)$ in Abb. 11 aus den beiden Defuzzy-Sets B und C bestimmt). Die Validierung der berechneten Werte zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen.

Die Ermittlung und Kalibrierung weiterer Instandhaltungs-relevanter Ausgangsgrößen (z.B. Belastung des Fahrzeugrahmens) soll in Folgeprojekten erfolgen.

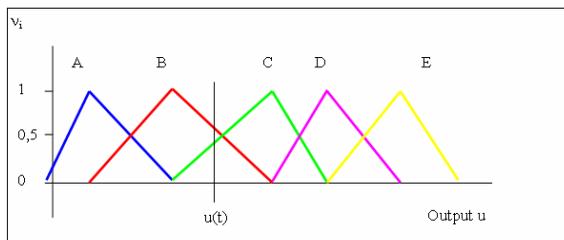


Abbildung 11: Defuzzy-Sets des Controllers zur Belastungserkennung der Gabelzinken

5 Zusammenfassung

Durch eine Kombination von experimenteller und numerischer Analyse der Belastungssituation in Flurförderzeugen konnte ein System von Kennfeld-basierten Fuzzy-reglern entwickelt werden, das eine Interpretation der Auswirkungen auf den Bediener und das Fahrzeug im Praxiseinsatz ermöglicht und damit die Voraussetzungen für die benutzungsabhängige Instandhaltung von Flurförderzeugen schafft.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen genutzt werden, um in weiterführenden Forschungsprojekten ein universelles Werkzeug zur nutzungsabhängigen, flexiblen und wirtschaftlichen Instandhaltung von Flurförderzeugen für verschiedenartige Fahrzeugkonstruktionen (z.B. mit unterschiedlichen Räderwerkstoffen, Fahrwerksaufbauten, Lastaufnahmemitteln) zu entwickeln.

6 Literatur

- [1] Vorwerk, C.; Nikic, I.; Wehking, K.-H.: Schwingungsemissionen an Flurförderzeugen Beurteilung im Laborversuch. In: Hebezeuge und Fördermittel 47 (2007) Sonderheft Flurförderzeuge, S. 52-53.
- [2] DIN EN 1032:2003 Mechanische Schwingungen - Prüfverfahren für bewegliche Maschinen zum Zwecke der Bestimmung des Schwingungsemissionswertes.
- [3] Lages, U.; Timm, K.; Vowork, C.; Et. Al.: Direct adaption of the driver behaviour on control strategies for ACC-vehicles, including warning strategies. In: Proceedings 6th European Congress EAEC 1997, Vol.1 - Vehicle Dynamics. Cernobbio: ATA, 1997.
- [4] DIN EN 13059:2002 Sicherheit von Flurförderzeugen - Verfahren zur Schwingungsmessung.
- [5] Vorwerk, C.; Batha, A.; Wehking, K.-H.: Experimentelle Untersuchungen - Schwingungsverhalten von Schubmaststaplern. In: Hebezeuge und Fördermittel 45 (2005) 12, S. 666-669.
- [6] Vorwerk, C.; Nikic, I.; Wehking, K.-H.: Von der Optimierung zum Prototypen - Schwingungsreduzierung von Schmalgangstaplern. In: Schweizer Logistikkatalog 2008
- [7] DE 196 24 614.8-09: Verfahren zum Entwurf oder zur Adaption eines Fuzzy-Reglers oder eines Systems von verknüpften Fuzzy-Reglern.
- [8] Vorwerk, C.: Adaptive Fuzzy-Abstandsregelung für Kraftfahrzeuge. Diplomarbeit, Universität der Bundeswehr Hamburg, 1996.
- [9] DE 196 24 615.6-09: Verfahren zur Abstandsregelung für ein Kraftfahrzeug.

7 Formelzeichen und Abkürzungen

| | | |
|-------------------|---|----------------------|
| A(8) | Tägliche Schwingungsexposition (bez. auf 8 Stunden) | [m/s ²] |
| B | Bandbreite | [Hz] |
| f _{Res} | Resonanzfrequenz | [Hz] |
| k | Verstärkungsfaktor (k-Faktor) eines Dehnungsmessstreifens | |
| i _M | Spannungsverstärkung des Messverstärkers | |
| u _{1..m} | Ausgangswert eines Fuzzyreglers | |
| U _B | Brückenspannung | [V] |
| U _D | Differenzspannung der Brückenabgriffe | [V] |
| U _M | Messspannung | [V] |
| x _{1..m} | Eingangswert eines Fuzzyreglers | |
| ε | Relative Verformung | |
| λ | Wellenlänge des emittierten Lichtes | [nm] |
| μ _i | Aktivierungslevel der Eingangsfunktion i | [%] |
| v _j | Aktivierungslevel der Ausgangsfunktion j | [%] |
| σ | Mechanische Spannung | [N/mm ²] |

Das Reifenmodell als Schlüsselement der Fahrdynamiksimulation von Gabelstaplern

Dipl.-Ing. (FH) N. Busch, Dipl.-Ing. O. Höppner, Prof. Dr.-Ing. R. Bruns
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
Professur für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL)

Abstract: Das Reifenmodell nimmt in der Fahrdynamiksimulation durch die Abbildung der Kraftübertragung vom Fahrzeug auf den Boden eine zentrale Rolle ein. Die Eigenschaften von Industriereifen hinsichtlich der Übertragung von Horizontalkräften sind bisher jedoch weitgehend unbekannt. Zudem liegt für den speziellen Anwendungsfall der Querdynamik von Gegengewichtstaplern (im Folgenden: Gabelstapler) keine geeignete Modellierungsart der Reifen vor. In einem derzeit am MTL bearbeiteten Forschungsprojekt wird ein Reifenmodell für die Querdynamik von Gabelstaplerreifen in einem Mehrkörpersystem (MKS)-Gesamtfahrzeugmodell entwickelt. Zur Ermittlung des Reifenverhaltens als Modelleingabe wird ein Reifenprüfstand realisiert, der speziell auf Industriereifen im beschriebenen Anwendungsfall ausgelegt ist.

1 Einleitung

Moderne, leistungsstarke Gabelstapler erreichen ein hohes Maß an Fahrdynamik bei gleichzeitig hoher Fahrstabilität in Kurven. Das fahrdynamische Verhalten dieser Fahrzeuge wird zunehmend bereits in der Entwicklungsphase mithilfe computergestützter Simulation untersucht. Als geeignete Methode wird dabei die Mehrkörpersystem-Simulation (MKS-Simulation) angewandt, die außerdem zur frühzeitigen Optimierung weiterer wichtiger Fahrzeugeigenschaften, wie z. B. Schwingungskomfort oder Bauteilbeanspruchung, eingesetzt werden kann. Die Fahrstabilität bei Kurvenfahrt wird maßgeblich durch die Kraftübertragungseigenschaften der Reifen auf den Boden bestimmt. Daher kommt dem verwendeten Reifenmodell für die Güte und Aussagekraft der fahrdynamischen Simulation eine besondere Bedeutung zu. In einem abgeschlossenen Forschungsprojekt am MTL [1, 2] wurde die dynamische Standsicherheit von Gabelstaplern sowohl experimentell als auch mithilfe der MKS-Simulation untersucht. Dabei wurde zur Verbesserung der MKS-Simulation weiterer Forschungsbedarf zum fahrdynamischen Verhalten von Industriereifen und deren Abbildung festgestellt. Das Ziel des aktuellen, von der Forschungsgemeinschaft Intralogistik, Fördertechnik und Logistiksysteme (FG IFL) des VDMA geförderten Gemeinschaftsforschungsprojektes ist eine weitere Erhöhung der erreichbaren Simulationsgenauigkeit durch ein verbessertes Reifenmodell. Dabei wird die Art der Modellierung auf die funktionellen Anforderungen der speziellen Aufgabenstellung ausgerichtet. Zur Verifikation und Validierung des Modells sowie zur Ermittlung der Modellparameter unter möglichst geringem Aufwand müssen die benötigten Daten mit einem Reifenprüfstand experimentell ermittelt werden.

Außerdem sollen die Kenntnisse der Reifeneigenschaften erweitert werden. Während Kfz-Reifen schon seit Jahrzehnten Gegenstand der Forschung sind und ihre Modellierung ein hohes Niveau erreicht hat, sind die Eigenschaften von Industriereifen hinsichtlich der Kraftübertragung noch weitgehend unbekannt. Über das Verhalten der überwiegend verwendeten Superelastikreifen (SE-Reifen) im fahrdynamischen Grenzbereich sowie bei großen Schräglaufwinkeln bestehen bisher nur sehr geringe Kenntnisse. Da bislang kein geeigneter Reifenprüfstand für Industriereifen existiert, wird ein solcher im Rahmen des Projektes konzipiert und realisiert.

2 Grundlagen der Querdynamik von Gabelstaplern

2.1 Kurvenfahrt von Gabelstaplern

Als Querdynamik wird die Kinetik und Kinematik der veränderlichen bzw. dynamischen Kurvenfahrt eines Fahrzeugs bezeichnet. Sie grenzt sich als Teil der Horizontaldynamik von der Vertikaldynamik (z. B. Schwingungskomfort) ab. Mit der Einfederung der Reifen und dem Pendeln der Hinterachse sind auch vertikale Bewegungen im Fahrwerk zu berücksichtigen. Allerdings treten alle dynamischen Effekte im niederfrequenten Bereich unter 4 Hz [7] auf. Der grundlegende Fahrzustand für querdynamische Betrachtungen ist die stationäre Kreisfahrt. Dabei muss zur Einstellung eines Kurvenradius R der Lenkwinkel δ aufgebracht werden. Dieser benötigte Lenkwinkel enthält eine dynamische Komponente, die von den Schräglaufsteifigkeiten $c_{\alpha i}$ an Vorder- und Hinterachse sowie von der Schwerpunktlage in Längsrichtung abhängig ist. Die Schräglaufsteifigkeit einer Achse bildet das Verhältnis der Summe der an der Achse übertragenen Seitenführungskräfte zum Schräglaufwinkel der Achse. Sie wird durch die Reifen bestimmt. Für ein grundsätzlich stabiles, untersteuerndes Fahrverhalten muss erfüllt sein:

$$c_{\alpha h} * l_h > c_{\alpha v} * l_v \quad (1)$$

Diese Bedingung ist bei einem unbeladenen Gabelstapler jedoch nicht sicher gegeben, da der Schwerpunkt durch das Gegengewicht hinter der Fahrzeugmitte liegt, l_v also größer ist als l_h (s. Abbildung 1). Ein übersteuerndes Fahrverhalten ist möglich, dadurch kann die Spurhaltung des Fahrzeugs bei dynamischer Kurvenfahrt instabil werden.

Bei Gabelstaplern in Kurvenfahrt sind starke laterale Radlastdifferenzen bis hin zur Entlastung der kurveninneren Räder möglich. Da die übertragbaren Seitenführungskräfte eines Reifens degressiv über der Radlast ansteigen, stellt sich an der betroffenen Achse ein größerer Schräglaufwinkel ein. Dieser dynamische Effekt ist in Gleichung (1) zusätzlich zu berücksichtigen.

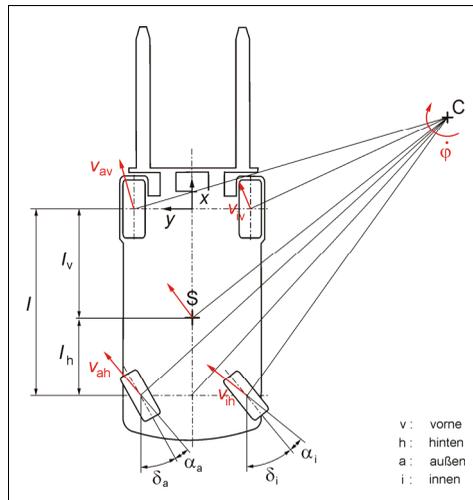


Abbildung 1: Kinematik der Kurvenfahrt

Die einzelnen Reifen unterliegen in der dynamischen Kurvenfahrt also unterschiedlichen Belastungen. Das Verhalten des Gesamtfahrzeugs kann nur bestimmt werden, wenn die Zusammenhänge der Einflussgrößen der Reifen bekannt sind und im MKS-Fahrzeugmodell berücksichtigt werden.

Besonderheiten des Gabelstaplers im Vergleich zu Kfz, die sich auf die beschriebenen querdynamischen Fahreigenschaften auswirken, sind:

- Hinterradlenkung
- Starke Varianz der Schwerpunktlage bei Beladung
- Lage der Wankachse durch die Pendelachse (bei Vierrad-Gabelstapler)

Die Massenkonzentration im Gegengewicht eines Gabelstaplers führt zu einem hohen Massenträgheitsmoment um die Fahrzeughochachse. Dadurch findet eine träge Anpassung des Fahrkurses an schnelle Änderungen der Hinterradlenkung statt. Befindet sich das Fahrzeug in schneller Kurvenfahrt, so kann durch Gegenlenken, also ein Querstellen der Hinterräder zu deren Bewegungsrichtung, ein Fahrzeugkippen begünstigt werden.

2.2 Einfluss der Bereifung

Als Industriereifen für Gabelstapler werden in Europa überwiegend SE-Reifen verwendet; sie bilden daher den Schwerpunkt dieser Untersuchung. SE-Reifen sind Vollgummireifen, die in der Querschnittsgeometrie den Luftreifen ähneln. Sie sind

aus mehreren radialen Schichten unterschiedlicher Gummimischungen aufgebaut, welche zur Einstellung verschiedener Eigenschaften, wie Felgensitz, Rollwiderstand, Schwingungskomfort und Abriebfestigkeit dienen (s. Abbildung 2). Historisch entstanden die SE-Reifen aus voll ausgefüllten Luftreifen. Dadurch sollte Luftverlust vermieden werden. Ferner ist die geringere Einfederung bei Lastaufnahme günstig für die Verwendung an Gabelstaplern. Luftgefüllte Reifen werden weiterhin bevorzugt verwendet, wenn der Anteil der Fahraufgaben in einem hohen Verhältnis zum Anteil der Stapelaufgaben steht, da längere Fahrstrecken zur thermischen Zerstörung eines SE-Reifens führen können. Als wichtige Eigenschaft eines Industriereifens tritt neben Merkmalen wie Rollwiderstand, Verschleiß und Preis zunehmend auch die Fahrstabilität in den Vordergrund. Die Fahrstabilität wird durch die Kraftübertragung des Reifens in der Fahrbahnebene und durch seine Verformungen in seitlicher und vertikaler Richtung beeinflusst. Die Kombination dieser Eigenschaften entscheidet im Zusammenhang mit Schwerpunktlage und Fahrwerkskinematik des Gabelstaplers darüber, ob im Grenzbereich der Fahrstabilität ein Schleudern oder ein Kippen des Fahrzeugs auftritt.

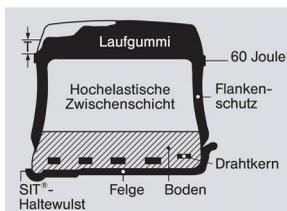


Abbildung 2: Aufbau eines SE-Reifens [9]

2.3 MKS-Simulation der Querdynamik

Die Querdynamik von Gabelstaplern wurde in [2, 8] mithilfe der MKS-Simulation untersucht. Dabei lag der Untersuchungsschwerpunkt auf der seitlichen dynamischen Standsicherheit. In den bestehenden MKS-Fahrzeugmodellen werden Kfz-Reifenmodelle verwendet, die hinsichtlich ihres Funktionsumfangs und der verfügbaren Modellparameter nicht optimal geeignet sind. Durch eine Verbesserung in diesen Punkten kann eine noch höhere Simulationsgenauigkeit erzielt werden.

Zur Validierung eines MKS-Gesamtfahrzeugmodells werden für die vorliegende Aufgabenstellung Testmanöver der Querdynamik von Kfz verwendet. In früheren Forschungsarbeiten am MTL [1, 2] hat sich die stationäre Kreisfahrt sowie die Aufbringung eines Lenkwinkelsprungs als geeignete Testmanöver für Gabelstapler erwiesen. Die Verläufe charakteristischer Fahrzeugdaten wie Querbeschleunigung, Wankwinkel und Gierrate eignen sich generell zur Validierung der Simulation durch

experimentelle Messdaten. Zur Prüfung der dynamischen Standsicherheit wurde in [2] ein definiertes Fahrmanöver entwickelt, das ein Abbiegen um 90° vorsieht. Dieses Testmanöver kann sowohl mit experimentellen Tests als auch mithilfe der MKS-Simulation durchgeführt werden. Als Beurteilungskriterium für die Genauigkeit der MKS-Simulation im Vergleich zum Fahrversuch eignet sich die Abweichung der zurückgelegten Fahrspur, der so genannten Trajektorie.

3 Modellierung des Reifens

3.1 Anforderungen

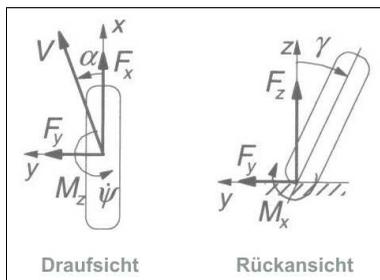


Abbildung 3: Koordinatendefinition im Radaufstandspunkt nach ISO 8855

Die Querdynamik eines Gabelstaplers wird maßgeblich durch die Kraftübertragungseigenschaften der Reifen auf die Fahrbahn bestimmt. Die qualitativen Zusammenhänge der Einflussgrößen mit der Seitenführungskraft F_y sind für Industrie-Vollreifen weitgehend unbekannt. Allerdings kann von einem grundlegenden Verhalten ausgegangen werden, das den Luftreifen ähnlich ist. Zudem sind Ansätze solcher Kenntnisse aus der Literatur [4] und aus exemplarischen Messungen auf einem modifizierten LKW-Reifenprüfstand vorhanden.

Die Seitenführungskraft eines Reifens hängt in erster Linie vom Schräglaufwinkel α ab. Bisher vorliegende, exemplarisch aufgenommene Messdaten beschränken sich auf einen Schräglaufwinkel-Bereich von 0° bis 15° , da dieser Messbereich für Kfz ausreichend ist. Bei der Kurvenfahrt im Grenzbereich der Standsicherheit von Gabelstaplern können an den gelenkten Hinterrädern jedoch maximal mögliche Schräglaufwinkel von 90° auftreten, wenn in der Kurve gegengelenkt wird.

Eine weitere Abhängigkeit der Seitenführungskraft des Reifens besteht mit der Radlast F_z . Sie ist nach heutiger Kenntnis degressiv steigend. Die Belastung der einzel-

nen Reifen kann bei dynamischer Kurvenfahrt zwischen der Gewichtskraft des Gesamtfahrzeugs und der vollständigen Entlastung variieren.

Eine zusätzliche Seitenkraftkomponente tritt auf, wenn ein Radsturz γ vorliegt. Bei Gabelstaplerfahrwerken tritt allerdings nur positiver Radsturz zur Kurvenaußenseite als Folge des Fahrzeugkippen auf. Bei positivem Sturz wird die Sturzseitenkraft negativ, die übertragbare Seitenkraft sinkt.

Der Schubspannungsverlauf in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn ist mit Ausnahme des vollständigen Gleitens nicht symmetrisch. Aus dem Produkt von Seitenkraft F_y und Reifennachlauf η_R entsteht ein Rückstellmoment M_z um die Hochachse des Rades:

$$M_z(\alpha) = F_y(\alpha) * \eta_R(\alpha) \tag{2}$$

Das Rückstellmoment hat ein ausgeprägtes Maximum und strebt in hohen Seitenschlupfbereichen mit dem Reifennachlauf gegen Null.

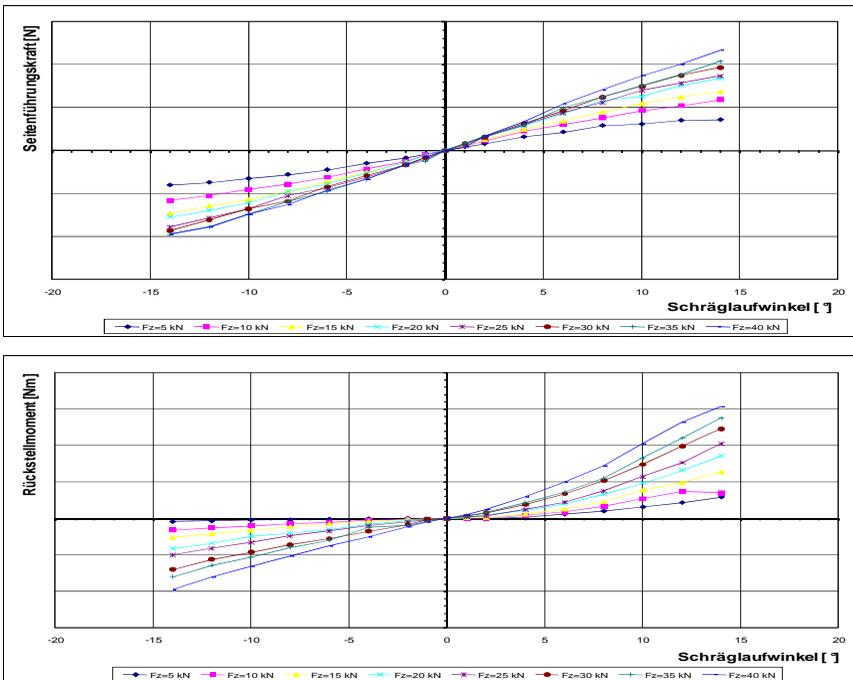


Abbildung 4: Seitenkraft (oben) und Rückstellmoment über Schräglaufwinkel für verschiedene Radlaststufen

Die maximal übertragbare Seitenkraft $F_{y\max}$ eines einzelnen Reifens wird durch den Rollreibungwert μ im Rad-Boden-Kontakt begrenzt. Falls während der Kurvenfahrt Antriebs- oder Bremskräfte F_x übertragen werden, reduziert sich die übertragbare Seitenkraft nach dem Kammschen Kreis zu:

$$F_{y\max} = \sqrt{(\mu \cdot F_z)^2 - F_x^2} \quad (3)$$

Der Rollreibungwert ist von der Reibpaarung Reifen-Fahrbahn abhängig. Das bedeutet, dass die zur Spurhaltung nötigen Seitenführungskräfte der Reifen bei zu geringem Rollreibungwert nicht auf die Fahrbahn übertragen werden können. Ein seitliches Gleiten tritt auf und führt zu einem instabilen Fahrzustand.

Die vertikale Einfederung Δz und die seitliche Verformung Δy der Reifen wirken sich auf die Lage des Schwerpunkts und der Kippkante des Fahrzeugs aus. Bei Fahrversuchen am MTL mit Gabelstaplern wurden zum Teil deutliche seitliche Deformationen der Reifen beobachtet. Der Einfluss dieses Effekts auf die Fahrzeugkippkante und auf die übertragbaren Kräfte ist noch zu untersuchen.

3.2 Bestehende Reifenmodelle

Für unterschiedliche Fragestellungen existieren in der Fahrzeugtechnik bereits verschiedene Reifenmodelle, z. B. zur Untersuchung der Fahrdynamik, des Komforts oder der Akustik. Diese Modelle lassen sich hinsichtlich des verwendeten methodischen Ansatzes klassifizieren. So finden Finite Elemente-Modelle, kennlinienbasierte Modelle und MKS-Modelle mit unterschiedlichem Modellierungsgrad Anwendung. Die verwendeten Modellparameter können mathematisch oder physikalisch begründet sein.

In der Regel bestimmt die Art der Fragestellungen die Komplexität der mechanischen Modellstruktur. Für fahrdynamische Untersuchungen, die vergleichsweise niederfrequente Vorgänge darstellen, sind Modellansätze niedriger Komplexität ausreichend. Einfache Modelle können jedoch oftmals komplizierte Zusammenhänge nicht ausreichend gut abbilden, so dass auch einfache mechanische Strukturen durch aufwendige mathematische Zusammenhänge abgebildet werden müssen.

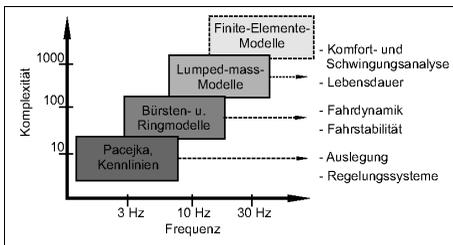


Abbildung 5: Einordnung der Modellierungsansätze nach Komplexität und Dynamik

Die direkte Verwendung von experimentell ermittelten Reifenkennfeldern wird bei der numerischen Simulation aufgrund des hohen Rechenaufwandes bei der Interpolation der Werte vermieden. Stattdessen werden die Reifeneigenschaften bevorzugt durch mathematische Funktionen approximiert, die bei der Berechnung schnell gelöst werden können. Ein häufig verwendeter kennlinienbasierter Ansatz ist das Magic Formula (MF)-Modell [6]. In diesem Modell werden die charakteristischen Funktionsverläufe von Seitenführungskraft F_y , Rückstellmoment M_z und Sturzmoment M_x durch trigonometrische Funktionen wiedergegeben. Die Seitenführungskraft berechnet sich zu:

$$F_y(\alpha) = D \cdot \sin\left(C \cdot \arctan\left(B \cdot \alpha - E \cdot (B \cdot \alpha - \arctan(B \cdot \alpha))\right)\right) \quad (4)$$

Darin sind B, C, D und E die Modellparameter, welche aus Messwerten ermittelt werden.

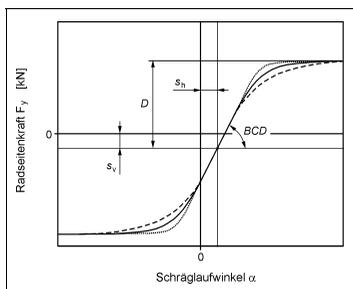


Abbildung 6: Qualitativer Seitenkraftverlauf nach MF-Modell mit Modellparametern [6]

Bei kennlinienbasierten Modellen werden die Eigenschaften des gesamten Reifens in einem einzigen Punkt, dem Kontaktpunkt bzw. Schwerpunkt der Radaufstandsfläche, abgebildet. Zur Berücksichtigung eines unebenen Kontaktes wird zusätzlich ein mehrdimensionales Kontaktmodell benötigt. Ist die Eigendynamik des Reifenkörpers von Interesse, so werden Mehrkörper-Radmodelle mit geeignetem Detaillierungsgrad verwendet. Dazu wird der Reifen in mehrere Starrkörper zerlegt, die räumlich beweglich miteinander gekoppelt sind. Solche Modelle sind durch ihr physikalisches Verhalten

ten definiert, da eine kennlinienartige Abbildung der vielen Einzelkörper nicht praktikabel ist. Der Reifen wird daher als ein System gekoppelter Masse-Feder-Dämpfer-Elemente modelliert. Beispiele für Mehrkörper-Reifenmodelle sind das MF-SWIFT-Modell und das Ftire-Modell [7].

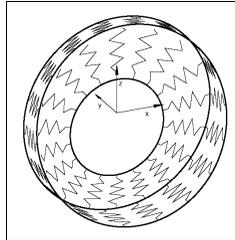


Abbildung 7: MKS-Ringmodell MF-SWIFT [7]

Für Fragestellungen, die das Deformationsverhalten oder das akustische Verhalten des Reifens betreffen sind Finite Elemente-Modelle geeignet. Diese meist sehr aufwändigen Modelle führen allerdings zu hohen Rechenzeiten.

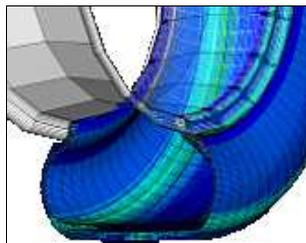


Abbildung 8: FE-Modell eines Luftreifens [10]

Zur Erfüllung der gestellten Aufgabe eignen sich besonders empirisch parametrisierte Kennlinienmodelle, da nur das Verhalten im Kontaktpunkt von Interesse ist. Die Rechenzeiten und der Aufwand zur Parameterermittlung sind vergleichsweise gering. Eine Berücksichtigung direkter physikalischer Modellparameter ist nicht nötig. Allerdings sind bestehende Modelle auf die Verhaltensbandbreite von Luftreifen ausgelegt. Die Kombination der in Kapitel 3.1 dargestellten Anforderungen für Gabelstaplerreifen soll durch ein spezielles Modell erfüllt werden. Dadurch kann auch ein Verhalten modelliert werden, das sich qualitativ von dem der Luftreifen unterscheidet.

4 Neuer Reifenmodell-Ansatz mit Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN)

Zur Abbildung der relevanten Zusammenhänge der beschriebenen Aufgabenstellung wird ein Modellansatz aufgestellt, der auf empirischen Kennlinien basiert. Da insbesondere für die Seitenführungskraft eine Abhängigkeit von mehreren anderen Parametern besteht, für deren Verläufe keine beschreibenden Gleichungen vorliegen, werden für den Ansatz künstliche neuronale Netze verwendet.

KNN sind eine Abbildung der menschlichen Gehirnfunktion. Bei dieser Abbildung sind Neuronen in verschiedenen Schichten angeordnet. Zwischen der Eingabeschicht und der Ausgabeschicht liegen i. d. R. ein oder mehrere verdeckte Neuronenschichten. Ein Neuron kann über eine zugewiesene Erregungsschwelle und Aktivierungsfunktion zu einer Werteausgabe angeregt werden. Die Neuronen sind mit gewichteten, gerichteten Graphen miteinander verbunden. Der Zusammenschluss der Neuronen zu einem Netzwerk ermöglicht ein komplexes, trainierbares Systemverhalten.

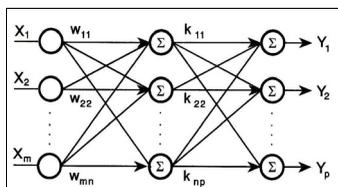


Abbildung 9: Struktur eines Feed-Forward-Netztes

Wie in Abbildung 9 gezeigt, werden Feed-Forward-Netze verwendet, die keine Rückkopplungen zu jeweils vorigen Schichten aufweisen. KNN eignen sich dazu, die gesuchten Ausgabewerte aus einem mehrdimensionalen Kennfeld von Eingangsgrößen anzunähern. Die Modellparameter werden derart mit exemplarischen Datensätzen trainiert, dass die Zusammenhänge zufriedenstellend abgebildet werden. Durch dieses Anlernen ist die Netzstruktur in der Lage, auch richtige Ergebnisse für nicht trainierte Betriebszustände auszugeben. Dabei ist zu beachten, dass die Bandbreite vorherzusehender Betriebszustände durch die Trainingsdaten abgedeckt ist, um Extrapolationen zu vermeiden. In Abbildung 10 sind die Eingaben und Ausgaben des Modells gezeigt, die durch neuronale Netze verbunden werden.

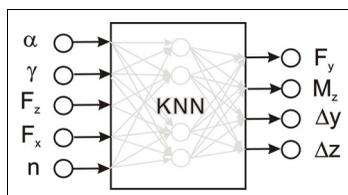


Abbildung 10: Oberste Modellebene des KNN-Ansatzes

Das Verhalten in vertikaler Richtung wird durch diesen Modellansatz nur quasistationär modelliert, Schwingungsuntersuchungen können ohne Ergänzungen des Modells nicht vorgenommen werden.

5 MTL-Reifenprüfstand

Zur experimentellen Ermittlung der Modelleingaben wird am MTL ein neuer Reifenprüfstand realisiert, der speziell zur Ermittlung der Eigenschaften von Gabelstaplerreifen ausgelegt ist. Die Bauart entspricht einem Außen-Trommelprüfstand.

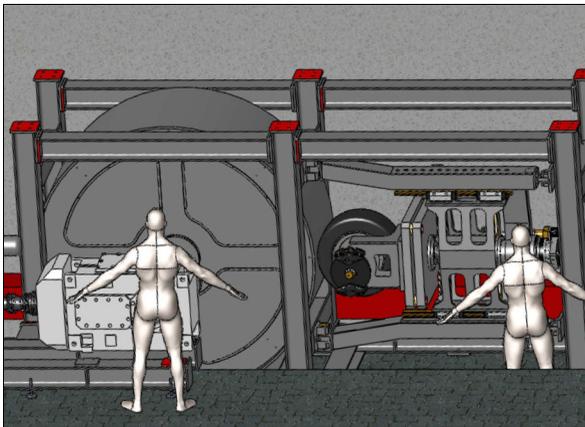


Abbildung 11: MTL-Reifenprüfstand für Industriereifen

Die in Kapitel 3.1 dargestellten funktionellen Anforderungen an das Reifenmodell müssen als Betriebszustände auch durch den Prüfstand darstellbar sein. Die Zustände werden einem Prüfreifen zur Aufnahme von Kennlinien aufgeprägt. Das Prüfrad wird durch eine Einarmschwinge geführt, die eine Messung aller 6 Kraftkomponenten am Rad ermöglicht. Der Prüfstand ist für eine ungewöhnliche Kombination aus kleinen Rädern (Felgendurchmesser: 8'' bis 15'') unter hohen Radlasten (bis zu 35kN) und hohen Schräglaufwinkeln (bis zu 90°) ausgelegt. Für den Schräglaufwinkel ist mit 90% eine hohe Dynamik gefordert. Außerdem kann ein Radsturz von bis zu 10° sowie Bremsschlupf aufgebracht werden. Mithilfe dieses Prüfstandes ist es einerseits möglich, das Wissen über das Verhalten von Industriereifen zu erweitern. Andererseits können Trainingsdatensätze für das Reifenmodell ermittelt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Bei der Betrachtung der Querdynamik von Gabelstaplern werden durch die besonderen Eigenschaften des Fahrwerks spezielle Anforderungen an das Reifenmodell gestellt. Ein neuer Ansatz für ein querdynamisches Reifenmodell für Gabelstaplerreifen wurde aufgestellt. Zur Verknüpfung der mehrdimensionalen Zusammenhänge werden Künstliche Neuronale Netze eingesetzt. Die Modell-Eingabeparameter werden mithilfe eines neuen Reifenprüfstandes ermittelt, der in der Forschungsstelle realisiert wird. Dadurch ist es ferner möglich, das Wissen über das Verhalten der überwiegend verwendeten SE-Reifen zu erweitern. Durch dieses Vorgehen soll die Genauigkeit der MKS-Simulation der Kurvenfahrt von Gabelstaplern weiter erhöht werden.

Zum Abschluss des Forschungsprojektes wird das erstellte Reifenmodell in eine Gesamtfahrzeugsimulation eingebunden werden. Das Modellverhalten wird durch experimentelle Tests mit einem Versuchsgabelstapler validiert. Dazu werden für die vorliegende Aufgabenstellung Testmanöver der Querdynamik von Fahrzeugen verwendet. Die Simulationsgenauigkeit bei dynamischer Kurvenfahrt kann durch ein definiertes Testmanöver quantifiziert werden. Als Beurteilungskriterium muss die Trajektorie in der Simulation möglichst geringe Abweichungen aufweisen.

Literatur

- [1] Bruns, R.; Höppner, O.: Dynamische Standsicherheit als Herausforderung für die Konstruktion von Flurförderzeugen. Tagungsband 2. WGTL-Fachkolloquium, S. 95-105, Dresden, 8./9. Juni 2006
- [2] Busch, N.; Höppner, O.; Bruns, R.: Beurteilung der Standsicherheit. Hebezeuge Fördermittel, Sonderheft Flurförderzeuge 2007, S. 56-58
- [3] Shibli, F.: Untersuchung zur Erhöhung der Kippstabilität von Gabelstaplern. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb. 395, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1985
- [4] Rappen, J. Eigenschaften kleiner Industriereifen insbesondere im Hinblick auf Kipp- und Fahrstabilität von Gabelstaplern. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb. 554, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1988
- [5] Gim, G.: Vehicle Dynamic Simulation with a Comprehensive Model for Pneumatic Tires. Diss., University of Arizona (USA) 1988
- [6] Pacejka, H.B.: Tyre and Vehicle Dynamics. 2. Auflage, Butterworth-Heinemann, Oxford (UK) 2006
- [7] Meywerk, M.: CAE-Methoden in der Fahrzeugtechnik. Springer. Berlin 2007
- [8] Rebelle, J., Mistrot, P., Poirot, R.: Development and validation of a numerical model for predicting fork lift truck tip-over. Vehicle System Dynamics, Taylor&Francis, DOI: 10.1080/00423110802381216, London 2008

[9] Continental AG

[10] Fraunhofer ITWM Kaiserslautern

Der FlexFörderer – ein vollständig dezentral gesteuerter, modularer und ortsungebundener Stetigförderer

Dipl.-Wi.-Ing. D. Berbig, Dr.-Ing. F. Schönung, Prof. Dr.-Ing. K. Furmans, Dr.-Ing. S. Mayer

KIT / Universität Karlsruhe (TH)

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme

Abstract

Heute verfügbare Stetigfördertechnik hat insbesondere zwei gravierende Nachteile: Sie erfordert ortsfeste Installationen sowie eine zentrale, oftmals komplexe Steuerung. Dadurch verursachen sowohl der Aufbau neuer als auch der Umbau bereits bestehender Förderstrecken hohe Kosten und das System ist unflexibel bezüglich Änderungen des Layouts. Um diese Probleme zu umgehen, wurde am IFL ein neuartiges Stetigfördererkonzept entwickelt: der Flexförderer. Es handelt sich hierbei um einen ortsungebundenen, vollständig dezentral gesteuerten, modular aufgebauten Stetigförderer. Die einzelnen Module verfügen über die notwendige Hard- und Software, sodass sie, vergleichbar mit der „plug-&-play“-Strategie, einfach aneinander gekoppelt werden können und Förderstrecken flexibel und beliebig gestaltbar sind. Das Layout wird anschließend automatisch erkannt und überwacht. Transportaufträge werden autonom von den einzelnen Modulen verwaltet und Fördermittel sicher an den gewünschten Zielort transportiert, wobei die Steuerungssoftware Behinderungen, Kollisionen sowie Deadlocks vermeidet. Dieser Artikel stellt dieses neuartige Konzept dar, von der Mechanik bis hin zur verwendeten Algorithmetik.

1 Einleitung

Produzenten sehen sich vielfältigen, neuen Herausforderungen gegenüber: Es ist zu erwarten, dass die Artikelvielfalt steigt, die Lebenszyklen einzelner Produkte kürzer werden und dass es somit häufig zu Layoutänderungen in den Prozessen kommt. In den einzelnen Abschnitten der Produktlebenszyklen wiederum ändern sich ständig die Durchsätze. Es ist oftmals bereits nach wenigen Jahren – in neuartigen Produktionssystemen sogar noch kurzfristiger – erforderlich, den Materialfluss neuen Randbedingungen anzupassen. Ein schnelles Rekonfigurieren des Materialflusssystems ohne Einbußen der Betriebsbereitschaft und ohne kostspielige und risikoreiche Inbetriebnahmen und Tests ist hier die einzige Alternative zu einer Anlagenneukonzeption. Neben den üblichen Forderungen nach hohen Durchsätzen und Wirtschaftlichkeit treten daher weitere Merkmale wie Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit, Modularität, sowie insbesondere auch Wandlungsfähigkeit in den Vordergrund. Mit heute verfügbaren Stetigförderern kann man diesen Anforderungen jedoch nur be-

dingt gerecht werden: Aufgrund der notwendigen Installationen sind sie ortsgebunden und daher unflexibel. Somit erfordern sie einen erheblichen Aufwand für die Integration in die bestehende Infrastruktur oder für Veränderungen derselben. Zusätzlich erfolgt die Steuerung des Materialflusses über eine zentrale, mehrstufig hierarchisch aufgebaute Struktur, die sehr aufwendige Softwarelösungen erfordert. Sehr oft sind jedoch gerade die Eingriffe in eine bestehende Softwarelösung zur Änderung und Anpassung fehlerträchtig und kostspielig. Darüber hinaus verursacht diese Steuerungstechnik, bedingt durch einen hohen Installationsaufwand für die zentrale Struktur, einen Großteil der Gesamtsystemkosten. Um diesen gravierenden Nachteilen (hohe Kosten, Zentralität und ortsgebundenen Installationen) begegnen zu können, wurde am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) der Universität Karlsruhe (TH) ein neuartiges, dezentrales und autonomes Stetigfördererkonzept entwickelt: der Flexförderer. Mit ihm steht ein flexibles Stetigförderersystem bereit, das keinerlei Hauptrechner oder zentrale Infrastrukturen benötigt und aus baugleichen Modulen besteht. Durch den modularen Aufbau sowie dadurch, dass jedes einzelne Modul über die erforderliche Soft- und Hardware verfügt, ist es möglich, Förderstrecken durch einfaches „Aneinanderreihen und Verbinden“ der Module zum gewünschten Layout (vergleichbar mit dem „Plug-& Play“-Prinzip) zu bilden. Das Layout wird automatisch erkannt, überprüft und gegebenenfalls selbstständig aktualisiert. Die Routenreservierung und -überwachung sowie der eigentliche Transport erfolgen ebenso dezentral und autonom. Die einzelnen Module kommunizieren dabei dauerhaft über entsprechende Nachrichten, sogenannte Tokens, miteinander. In den folgenden Kapiteln werden die hierzu verwendeten Steuerungsalgorithmen sowie die konstruktive Gestaltung der einzelnen Module beschrieben.

2 Mechanik

2.1 Genereller Aufbau

Ein Grundgedanke bei der Realisierung des Flexförderers war, dass er als Förderantrieb auf ein KARIS-Einzelelement montiert werden kann (weitere Informationen zu KARIS, dem kleinskaligen, autonomen, redundanten Intralogistiksystem, sind in [1], weiteren Veröffentlichungen sowie auf der Homepage des IFL zu finden). Somit ergaben sich die folgenden Spezifikationen für die Module des Flexförderers: Sie weisen eine quadratische Grundfläche von 500 * 500 mm auf, bei einer Höhe von 120 mm (ohne Standfüße gerechnet). Somit ist das Fördern von Kleinladungsträgern (KLT) mit einer Kantenlänge von 200 - 400 mm bei einem Maximalgewicht von 30 kg möglich. Damit aus den einzelnen Modulen eine vollständige Förderstrecke aufgebaut werden kann, müssen sie die folgenden Grundfunktionen beinhalten: Zur Erkennung des Förderguts muss eine Identifikation möglich sein. Hier wurde auf das RFID-

Konzept zurückgegriffen, sodass die Module jeweils über ein RFID-Lesesystem verfügen. Zu transportierende Behälter müssen daher mit RFID-Tags und einer eindeutigen Behälter-ID ausgestattet sein, auf denen mindestens die Zielinformation gespeichert ist. Ein Transport in vier horizontale Richtungen muss möglich sein. Damit zusätzlich erkannt werden kann, aus welcher Richtung das Fördergut kam, ob es vollständig auf das Modul gefördert wurde oder ob es das Modul wieder verlassen hat, sind vier Lichtschranken an den Ecken der Module montiert. Des Weiteren müssen die einzelnen Module miteinander kommunizieren können und mit Energie versorgt werden. Zur Kommunikation wurden die einzelnen Module mit je vier seriellen Schnittstellen ausgestattet. Somit müssen benachbarte Module nur entsprechend der aneinandergrenzenden Ports miteinander verbunden und damit aktiviert werden, das Layout wird anschließend von den Modulen automatisch erkannt. Hierdurch wird es den Modulen darüber hinaus ermöglicht, zu erkennen, aus welcher Richtung eine ankommende Nachricht stammt. Die Energieversorgung erfolgt über 230 V Wechselstrom. Die Systemkomponenten arbeiten auf 24 V. Es ist möglich, nur ein Element an das Stromnetz anzuschließen und die Stromversorgung von Modul zu Modul durchzuschleifen oder mehrere bzw. alle Module separat an eine Stromquelle anzuschließen. Zur internen Datenverarbeitung, zur eigenen Steuerung und der Kommunikation verfügen die Einzelmodule über einen Mini-PC. Es ist geplant, diesen durch einen Mikrocontroller zu ersetzen. Abbildung 1 zeigt eine Prinzipskizze eines Moduls mit den genannten Funktionen.

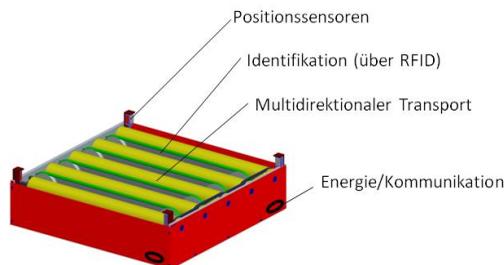


Abbildung 1: Prinzipskizze und Grundfunktionen eines Flexförderermoduls [4]

2.2 Der Förderantrieb

Wie bereits erwähnt wurde, müssen die Module in der Lage sein, KLTs in vier Richtungen fördern zu können. Hierzu wurde eine Hauptförderrichtung, die Vorzugsrichtung, realisiert sowie eine Ausschleusrichtung quer dazu. Der Materialtransport in Vorzugsrichtung erfolgt über fünf Walzen, von denen die mittlere angetrieben ist. Der Antriebsmotor der Walze ermöglicht hierbei eine Fördergeschwindigkeit von ca. 0,4

m/sec bei einem Drehmoment von 0,3 Nm. Die sich anschließenden passiven Walzen werden über sogenannte „Poly-V“-Riemen, mit denen die Walzen miteinander verbunden sind, angetrieben. Die Bewegung in Ausschleusrichtung erfolgt über quer zu den Walzen angeordnete, angetriebene Rundriemen. Um für diesen Antrieb auf einen zusätzlichen Motor verzichten zu können, wird ein Reibradkonzept verwendet: Sämtliche Gummibänder werden über Riemenscheiben angetrieben, die über eine Kegelfradwelle miteinander verbunden sind. Die Kegelfradwelle wiederum ist mittels eines Kegelfradpaares mit einem Reibrad verbunden. Dieses Reibrad ist parallel zu den Walzen angeordnet und wird beim Fördern in Ausschleusrichtung gegen die angetriebene Walze gedrückt. Hierdurch werden das Reibrad und somit sämtliche Rundriemen vom Antriebsmotor der Walze angetrieben. Die in Ausschleusrichtung erzielbare Fördergeschwindigkeit beträgt dabei ungefähr 0,3 m/sec. Damit die Rundriemen nicht dauerhaft angetrieben werden und sich die Förderebenen nicht überschneiden, sind die Förderebenen gegeneinander um 6 mm vertikal versetzt. Sollte ein Transport in Ausschleusrichtung nötig werden, so werden die Ausschleuselemente mittels eines Hubantriebs um 12 mm angehoben. Hierfür wird ein Exzenter mit separatem Motor verwendet. Dieser Exzenter treibt Keile mit einem Keilwinkel von 30° zwischen die Grundplatte des Moduls und die Aufnahmeplatte der Ausschleuser (=Rundriemen). Sie hebt sich somit und das Reibrad wird gegen die Walze gedrückt. Durch diese Konstruktion werden für den Antrieb von drei Bewegungsachsen nur zwei Motoren benötigt, die jeweils nur bei Bedarf aktiviert werden.

Abbildung 2 zeigt zusammenfassend die einzelnen Bestandteile des Förderantriebs.

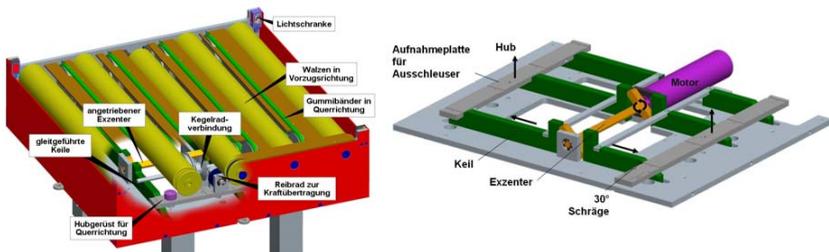


Abbildung 2: Elemente des Förderantriebs (links) und der Hubvorrichtung (rechts) [4]

3 Beschreibung ausgewählter Algorithmen

Damit ein solches, dezentrales und autonomes System funktionieren kann, muss es über die notwendigen Steuerungsmechanismen verfügen. Im Folgenden werden hierzu die wesentlichen Algorithmen vorgestellt.

3.1 Generierung der Topologieinformation

Zum Transport von Gütern müssen die einzelnen Module Routingtabellen besitzen, anhand derer (und eventueller weiterer Informationen wie der Streckenbelegung) sie die entsprechende Transportstrecke wählen können. Die Routingtabellen leiten sich aus den aktuellen Topologieinformationen ab. Die Tabellen müssen selbstständig von den Modulen erstellt und das Layout jederzeit automatisch erkannt werden. Dazu wird der Standort eines Moduls relativ zu den anderen in Form eines Graphen erfasst. Hierfür wird der sogenannte „Distance Vector Algorithmus“ mit der Erweiterung zum „Path Vector Algorithmus“ verwendet, wobei grob gesagt zwei Schritte zu unterscheiden sind: das erstmalige Erstellen der Routingtabellen und die Aktualisierung derselben. Zur Kommunikation der Module untereinander werden dabei die seriellen Ports verwendet.

3.1.1 Erstmalige Generierung der Routingtabelle

Die Routingtabelle besteht aus den folgenden drei Einträgen: dem Zielmodul, der Entfernung/Kosten dahin sowie dem Port, über den es erreicht werden kann. Eine Rahmenbedingung des Flexförderers ist dabei, dass jedes Modul eine eigene, eindeutige und unverwechselbare Adresse (Modul-ID) besitzt. Somit können sie zweifelsfrei identifiziert werden und das Generieren der Routingtabellen wird ermöglicht: Bevor ein Modul aktiviert wird, besitzt es eine Routingtabelle mit einem einzigen Eintrag, der eigenen Modul-ID mit der Entfernung 0. Wird das Modul schließlich aktiviert, so versendet es in zufälligen Zeitabständen diese Information („Topologie-Token“). Dabei wird die Entfernung um 1 erhöht. Wird dieses Token von einem anderen Modul empfangen, ergänzt es seine Routingtabelle um den entsprechenden Eintrag (Modul-ID, Entfernung, Ankunftsport des Token) und setzt den Port, über den das Token empfangen wurde, auf „aktiv“. Daraufhin sendet dieses Modul das neue Topologie-Token an die anderen benachbarten Module, wobei die Entfernung wiederum um 1 erhöht wird. Das empfangende Modul verfährt daraufhin genauso. Hierdurch wird nach und nach das vollständige Layout erkannt. Sollten sich im Verlauf der Generierung der Tabelle Strecken mit geringeren Kosten ergeben, so werden die schlechteren Einträge gelöscht und die Einträge mit den geringsten Kosten übernommen. Damit auch eventuelle Kreisverkehre erkannt werden, wird das folgende Vorgehen angewandt: Ankommende Topologie-Tokens werden nur dann verarbeitet

und weitergeleitet, wenn nicht bereits ein Eintrag mit gleichen oder gar geringeren Kosten für denselben Port vorhanden ist. Ebenso wird beim Versenden eines Topologie-Tokens gespeichert, welche Module bereits durchlaufen wurden, sodass es beim Erreichen eines bereits „besuchten“ Moduls ebenso gestoppt wird. Somit werden Endlosschleifen vermieden. Es bleibt noch anzumerken, dass es auch möglich ist, die Entfernungskosten nicht pro neues Modul jedes Mal um „1“ zu erhöhen, sondern um die tatsächliche Durchlaufzeit für ein Modul. Diese muss dann manuell einprogrammiert werden.

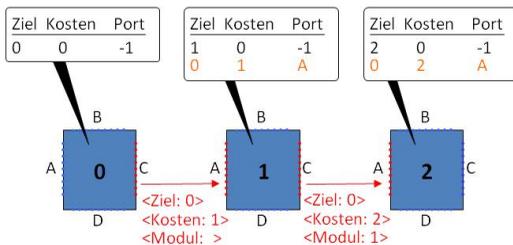


Abbildung 3: Erzeugung der Routingtabellen

3.1.2 Aktualisierung der Routingtabelle

Eine Aktualisierung der Routingtabelle wird nötig, wenn sich das Layout ändert. Hier können zwei Fälle unterschieden werden: Änderungen des Layouts durch Hinzufügen neuer Elemente oder Änderungen durch Entfernen bzw. Ausfall von Modulen. Im ersten Fall, dem Hinzufügen neuer Elemente, verschickt das neue Modul seinen Routingeintrag an benachbarte Elemente. Diese erkennen das neu hinzugekommene Modul, schicken ihm die eigene Routingtabelle und teilen den anderen Modulen die Änderung mit.

Sollte es zum Ausfall oder zum Entfernen eines Moduls kommen, wird dies folgendermaßen erkannt: Die Module aktualisieren regelmäßig ihre Routingtabellen und schicken Nachrichten an benachbarte Module. Sollte daraufhin über einen Port, über den Nachrichten verschickt wurden, während eines längeren Zeitraums (bspw. 10 Sekunden) keine Antwort erhalten werden, wird der entsprechende Port auf „passiv“ gesetzt und sämtliche Einträge, die das ausgefallene Modul enthalten, gelöscht. Somit erkennt das Modul, dass das benachbarte Element nicht mehr verfügbar ist, und leitet diese Information in einem sogenannten „Reset-Token“ an die anderen Module weiter. Über diese Logik kann somit jederzeit das aktuelle Layout erkannt werden.

3.2 Routing und Routenreservierung

Der Flexförderer ist ein dezentrales System. Dies hat zur Folge, dass es keinerlei überwachende zentrale Stelle gibt, die den Modulen jederzeit genaue Informationen über die Anzahl und den Standort der im System befindlichen Fördereinheiten liefert. Ebenso wird beim Flexförderer auf eine starre Einbahnstraßenregelung verzichtet. Damit Fördereinheiten sicher zum Ziel befördert werden können, ohne dass es dabei zu Deadlocks oder Kollisionen kommt, muss das Routing sicher und eindeutig erfolgen. Dafür bieten sich zwei Prinzipien an:

- Reservierung der vollständigen Strecke von der Quelle bis zur Senke
- „Zeitdiskrete“ Reservierung

Da die „zeitdiskrete“ Reservierung auf demselben Grundprinzip basiert wie die Reservierung der vollständigen Strecke von der Quelle bis zur Senke, wird zuerst die vollständige Reservierung näher betrachtet: Eine Fördereinheit wird in das System eingelastet. Das Quellmodul liest daraufhin die auf dem RFID-Tag gespeicherten Informationen aus. Damit kennt es die Ziel-ID der Einheit und versendet ein Reservierungs-Token in Richtung der geringsten Entfernung zum Zielmodul (diese Strecke ist aus der erzeugten Routing-Tabelle bekannt). Dieses Token ist eine Nachricht, die die Ziel-ID, die Quell-ID sowie die Paket-ID enthält. Empfängt ein Modul dieses Token, so prüft es, ob seine Modul-ID der Ziel-ID entspricht. Ist dies nicht der Fall, so leitet es die Nachricht weiter. Ebenso wird der Ausgangsport der Nachricht für ankommende Reservierungs-Token gesperrt, sodass es keine Reservierungen in entgegengesetzter Richtung mehr zulässt. Ist das Modul das Zielmodul, erkennt es dies. Daraufhin vertauscht dieses Modul im Token die Start- und die Ziel-ID des Tokens, ergänzt eine Freigabeinformation und versendet diese Nachricht zurück zum Quellmodul. Dort angekommen erkennt dieses, dass die Route vollständig reserviert ist und der Versand erfolgen kann, sofern Deadlocks (s. Kapitel 3.3) ausgeschlossen und die folgenden Module empfangsbereit sind. Dieser Punkt muss unter anderem deshalb geprüft werden, da nur Transporte in der entgegengesetzten Richtung unzulässig sind. In derselben Richtung können sich jedoch weitere Fördereinheiten befinden. Hierbei ist zu beachten, dass ein Mindestabstand zwischen den einzelnen Fördereinheiten eingehalten werden muss und ein Modul nur eine Fördereinheit aufnehmen kann. Damit es auch bei Reservierungen im Falle von Kreisverkehren nicht zu „Endlosschleifen“ kommt, wird auch beim Versand des Reservierungs-Tokens gespeichert, welche Module bereits durchlaufen wurden (vgl. Abschnitt 3.1). Nach erfolgreicher Reservierung der Strecke beginnt der Versand der Fördereinheit entlang der reservierten Strecke.

Sollte ein Versand aufgrund einer bereits erfolgten Reservierung der Strecke in Gegenrichtung nicht möglich sein, ergibt sich der folgende Ablauf: Das Quellmodul

versendet ein Reservierungs-Token, das so lange weitergeleitet wird, bis es an einem Modul über einen bereits blockierten Port ankommt. Dieses Modul löscht daraufhin das Reservierungs-Token und sendet ein „X-Token“ („Strecke ist bereits gesperrt“) an das Ursprungsmodul zurück. Erhält ein Modul ein X-Token, so sucht es nach einer alternativen Route (analoges Vorgehen durch Versand eines Reservierungs-Tokens). Existiert eine solche Route und ist diese frei, so wird sie zum Transport genutzt. Hierbei wird allerdings aufgrund des dafür notwendigen, hohen Kommunikationsaufwands nicht beachtet, ob es sinnvoller und kürzer wäre, auf das Freiwerden des belegten Streckenabschnitts zu warten. Sollte keine Alternativroute existieren, so wird das X-Token zurück zum ursprünglichen Quellmodul geschickt. Dieses wartet dann eine gewisse Zeit und verschickt danach erneut eine Reservierungsanfrage. Anhand dieses Ablaufs wird deutlich, dass er zu Durchsatzverlusten führen kann (vgl. folgende Abbildung):

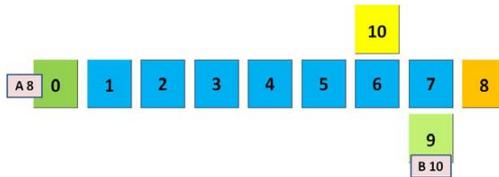


Abbildung 4: Zeitdiskrete Reservierung

Paket A muss von Modul 0 zu Modul 8 gefördert werden. Hierzu wurde die gesamte Strecke (08) gesperrt. Paket B ist von Modul 9 zu Modul 10 zu fördern. Da es hierfür über eine kurze Strecke in entgegengesetzter Richtung zur Förderrichtung für Paket A gefördert werden muss, muss es so lange warten, bis die Strecke wieder frei ist, obwohl es prinzipiell ohne eine Behinderung von Paket A die Strecke passieren könnte. An diesem Punkt setzt die zeitdiskrete Reservierung an. Hier wird zwar auch die gesamte Strecke reserviert, die entsprechenden Module sind jedoch nur für den erwarteten Zeitraum der Ankunft der Fördereinheit gesperrt. Somit können entgegenkommende Fördereinheiten prinzipiell reservierte Routen kurzzeitig nutzen, solange sich die Reservierungszeitfenster nicht überschneiden. Der erzielbare Gesamtdurchsatz kann erhöht werden. Weitergehende Untersuchungen zur zeitdiskreten Reservierung sind derzeit Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten am IFL.

3.3 Vermeidung von Deadlocks

„Deadlock“ ist ein Begriff aus der Informatik und wird nach [2] als der folgende Zustand definiert: „Eine Menge von Prozessen ist in einem Deadlock, wenn jeder Prozess auf eine Ressource wartet, welche durch einen anderen Prozess freigegeben werden muss.“ Nach [3] müssen die folgenden vier Bedingungen für das Auftreten eines Deadlocks erfüllt sein:

- a) **Mutual Exclusion:** Eine Ressource/Betriebsmittel kann nicht von mehr als einem Prozess gleichzeitig belegt werden.
- b) **Hold and Wait:** Ein Prozess belegt bereits eine Ressource und fordert neue Ressourcen an.
- c) **No Preemption:** Betriebsmittel können nur von den sie belegenden Prozessen wieder freigegeben werden.
- d) **Circular Wait:** Zwei oder mehr Prozesse bilden einen Kreis, in dem jeder Prozess auf eine Ressource wartet, die der folgende Prozess belegt.

Beim Flexförderer sind hiervon die ersten drei Bedingungen immer erfüllt: (a) ein Modul kann nur eine Fördereinheit aufnehmen, (b) sie beginnen erst mit dem Transport der Fördereinheit, wenn sie die Freigabe des Nachbarmoduls erhalten haben und (c) wird ein Modul erst dann wieder freigegeben, wenn es die Fördereinheit weitergefördert hat, wozu ausschließlich das Modul selbst in der Lage ist. Somit können Deadlocks sicher vermieden werden, wenn die Voraussetzung (d) nie erfüllt ist. Zu welchen kritischen Systemzuständen kann es bei einem Einsatz des Flexförderers nun kommen? Es sind die im Folgenden genannten vier Zustände:

1. Die Fördereinheit kann nicht identifiziert werden.
2. Es existiert keine Route zum gewünschten Zielort.
3. Eine Reservierung gelingt während eines längeren Zeitraumes nicht.
4. Ein Modul empfängt dauerhaft keine Versandfreigabe.

Die ersten beiden Zustände können durch eventuelle Ausfälle, fehlerhafte Bedienung oder einer falschen mechanischen Auslegung der Module auftreten. Daher werden sie zur Vermeidung von Deadlocks nicht weiter betrachtet. Der dritte Zustand wird von selbst wieder verlassen, wenn der Durchsatz reduziert wird, sodass auch eine Reservierung in eine entgegengesetzte Richtung möglich wird und Blockierungen so aufgehoben werden. Zur Auflösung dieses kritischen Zustandes können auch Priorisierungsregeln festgelegt werden, die Gegenstand weiterer Forschungen sind. Somit ist nur der vierte Zustand „wirklich“ deadlockkritisch: Dadurch, dass das Modul selbst keine Versandfreigabe erhält, blockiert es auch andere Module, die gerne eine Einheit über dieses Modul transportieren würden. So kann es nach und nach zu einem Stillstand des Systems, sprich einem Deadlock, kommen. Weiterführende Untersuchungen haben gezeigt, dass es drei Grundformen von Layouts gibt, aus denen sämtliche deadlock-gefährdete Situationen abgeleitet werden können. Diese Layouts beinhalten alle mindestens einen „Kreisverkehr“. Ein Layout ist somit dann anfällig für Deadlocks, wenn es:

- genau einen (beliebig großen) Kreisverkehr beinhaltet,
 - aus mehreren Kreisverkehren besteht, die sich in mehreren Modulen überlappen,
- oder
- mehrere Kreise beinhaltet, die sich in einem Modul überschneiden.

Damit Deadlocks vermieden werden können, werden sogenannte „Deadlock-Token“ versendet. Es wird geprüft, ob es sich um ein gefährdetes Layout handelt und falls ja, ob der Versand einer Einheit zu einem Zusammenbruch des Systems führen würde. Abbildung 5 zeigt dieses Prinzip anhand eines einfachen Kreisverkehrs:

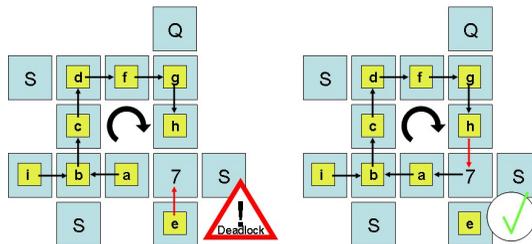


Abbildung 5: Deadlockvermeidung [4]

Einheit „e“ würde gerne in den Kreis einfahren. Wird ihr dies jedoch erlaubt, so kommt es im Kreisverkehr zu einem Deadlock, da daraufhin sämtliche Module des Kreises belegt sind. Daher muss solange verhindert werden, dass Einheit „e“ einfahren darf, bis mindestens eine weitere Lücke im Kreisverkehr frei wird. Dies wird mittels Deadlock-Token überprüft, die nach der „Anfrage“ von Fördereinheit e, in den Kreis einfahren zu dürfen, unter den Modulen versendet werden. Die Module erkennen dadurch, dass bei Eintritt von Einheit e in den Kreis ein Deadlock entstünde und die Anfrage wird abgelehnt. Weitere Details finden sich in [4], sowie eventuell in folgenden Veröffentlichungen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den modularen Aufbau und durch die Vereinigung der oben beschriebenen Funktionen in den einzelnen Modulen gelang es, einen dezentralen und flexiblen Stetigförderer zu konstruieren, der keinerlei ortsfeste Installationen oder zentrale Steuerungseinheiten erfordert. Hierdurch ist es möglich, Layouts einer Förderstrecke beliebig und innerhalb weniger Minuten zu ändern, ohne dabei den Betrieb anhalten zu müssen und ohne zusätzlichen Aufwand für die Anpassung der zentralen

Steuerung. Somit kann eine bisher nicht gekannte Flexibilität in der Stetigförderertechnik erreicht und ein großes Kosteneinsparpotenzial realisiert werden.

Abbildung 6 zeigt zusammenfassend den Steuerungsablauf des Flexförderers.

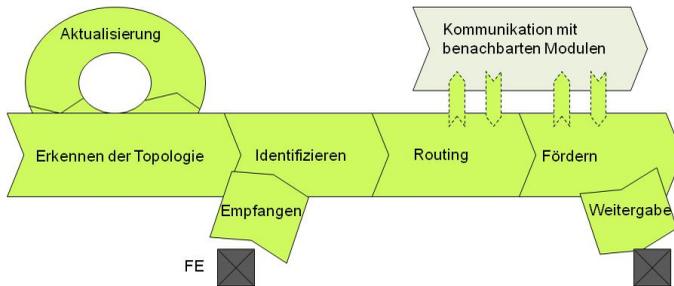


Abbildung 6: Ablaufschema des Steuerungsprozesses

Um des Weiteren erste Erfahrungen sammeln zu können und um das Konzept zu demonstrieren, wurden bereits die ersten neun Module in der Werkstatt des IFL fertiggestellt und können auf der Versuchsfläche des Instituts besichtigt sowie getestet werden. Abbildung 7 zeigt ein Bild einer damit realisierbaren Förderstrecke. Ziel der weiteren Entwicklung wird es sein, den Flexförderer industrietauglich zu machen.

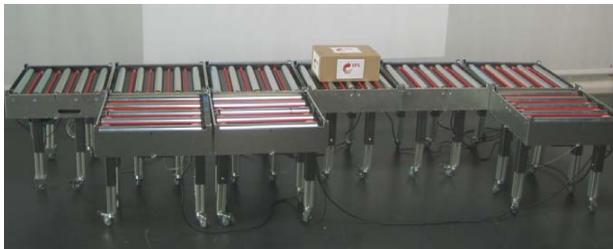


Abbildung 7: Der Flexförderer in Aktion

Literatur

- [1] Hippenmeyer, H.; Schönung, F.; Furmans, K., Berbig, D.: „KARIS – Kleinskaliges Autonomes Redundantes Intralogistiksystem“, VDI-Berichte 2066, S. 163-175, 18. Deutscher Materialfluss-Kongress 2009
- [2] Tanenbaum, Andrew S.: „Moderne Betriebssysteme“, Pearson Studium, 2002
- [3] Coffman, E.C.; Elphick, M.J.; Shoshani, A.: “System Deadlocks,” Computing Surveys, vol. 3, pp. 67-78, Juni 1971

[4] Mayer, S. (2009): „ Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors“, Wissenschaftliche Berichte des Institutes für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH), Band 73

Ein System zur automatisierten Kommissionierung unterschiedlicher Artikel – Einsatz von Bildverarbeitung und Künstlicher Intelligenz in der Logistik

Dipl.-Math. (FH) Björn Cleves

Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns

Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Fakultät für Maschinenbau / Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik

Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik

Abstract: Der vorliegende Artikel stellt ein flexibles System zur vollautomatisierten Kommissionierung vor. Im Vergleich zu Kommissionierroboter werden dabei keine Restriktionen an die Artikel bzw. an die Lagerhaltung gestellt. Hauptkomponenten sind ein optische System zur berührungsfreien Objektvermessung und ein neuartiges Lasthebemittel, der sogenannte Toroidgreifer.

1 Kommissionierung

Laut VDI-Richtlinie 3590 (Kommissioniersysteme) hat die Kommissionierung das Ziel, aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen auf Grund von Anforderungen (Aufträge) zusammenzustellen.

Abhängig von der Branche betragen die Kosten der Kommissionierung bis zu 50% der Gesamtlagerkosten. Gründe dafür sind wachsende Sortimente und ein verändertes Kundenverhalten. Durch die Realisierung von JIT-Konzepten nehmen die Bestellzyklen bei fallendem Bestellumfang zu. Ein weiterer Grund sind die steigenden Qualitätsanforderungen.

Das Kommissionieren wird heute durch Techniken wie Pick by Light und Pick by Voice unterstützt, bleibt aber weitestgehend eine manuelle Tätigkeit. Die Schwierigkeiten bei der Automatisierung entstehen durch die hohe Produktvielfalt und damit verbunden durch unterschiedliche geometrische Maße und physikalische Oberflächeneigenschaften der Artikel. Eine weitere Unbekannte ist die Ausrichtung der Artikel auf dem Ladungsträger.

2 Bildverarbeitung

Optische Systeme werden zunehmend zur Automatisierung eingesetzt. Der Grund dafür sind fallende Preise für Hardware und flexible und leistungsstarke Softwareprodukte, die leicht in bestehende Systeme integriert werden können. Laut VDMA ist der Branchenumsatz ‚Industrielle Bildverarbeitung‘ in Deutschland in den vergangenen zehn Jahren um mehr als 300% auf 1,2 Milliarden Euro gestiegen.

Im vorliegenden Artikel wird ein optisches System zur berührungslosen Vermessung von Objekten auf einem Ladungsträger vorgestellt. Neben der ebenen Vermessung bzw. Objekterkennung wird zur Bestimmung der optimalen Greifpunkte ein Verfahren zur Tiefenbestimmung aus ebenen Informationen eingesetzt.

2.1 Stereo-Vision

Der Mensch nimmt seine Umgebung räumlich durch Überlappung der Bilder des linken und des rechten Auges wahr. Dieses Prinzip wurde für die vorliegende Arbeit adaptiert. Die Szene wird von zwei identischen parallel angeordneten Industriekameras erfasst. Im Unterschied zum menschlichen Sehen können die Tiefeninformationen im Bereich der Bildüberschneidung exakt berechnet werden.

Die Aufnahmen liegen als zweidimensionale Grauwert-Matrizen vor, die Aufnahme der ersten Kamera wird als Ausgangsbild, die der zweiten Kamera als Suchbild bezeichnet. Jeder Pixel im Ausgangsbild wird entlang einer Geraden, der sogenannten Epipolarlinie, mit dem entsprechenden Pixel im Suchbild verglichen [vgl. Abbildung 1]. Der Vergleich erfolgt über eine normierte Kreuzkorrelation. Der Einfluss der Nachbarpixel wird über die Größe des Korrelationsfensters berücksichtigt:

$$S(r, c, d) = \frac{\sum_{r'=r-m}^{r+m} \sum_{c'=c-n}^{c+n} (g_l(r', c') - \bar{g}_l(r, c)) \cdot (g_r(r', c'+d) - \bar{g}_r(r, c+d))}{\sqrt{\sum_{r'=r-m}^{r+m} \sum_{c'=c-n}^{c+n} (g_l(r', c') - \bar{g}_l(r, c))^2 \cdot (g_r(r', c'+d) - \bar{g}_r(r, c+d))^2}}$$

mit r – Zeilenkoordinaten, c – Spaltenkoordinaten, d – Disparität [pxl], g_{lr} – Grauwert im linken bzw. im rechten Bild, \bar{g}_{lr} – mittlerer Grauwert im Korrelationsfenster, m – halbe Fensterbreite – 0.5, n – halbe Fensterhöhe – 0.5

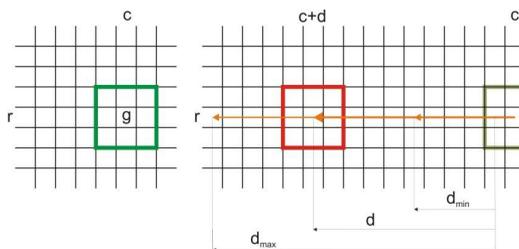


Abbildung 1: Kreuzkorrelation zur Bestimmung der Disparität

Die Länge der Epipolarlinie bzw. die Größe des Suchraums wird abhängig von der minimal und der maximal zu erwartenden Objekthöhe begrenzt. Als Ergebnis der Korrelation erhält man eine Grauwert-Matrix mit den besten Korrelationswerten (1 – gute Korrelation, -1 – negative Korrelation) und eine Grauwert-Matrix mit den entspre-

chenden Disparitätswerten. Die Disparitäten können leicht über Strahlensätze in metrische Tiefeninformationen umgerechnet werden:

$$H_{\text{Obj}} = \frac{H_{\text{Cam}} \cdot (b + d)}{d}$$

mit H_{Obj} – Objekthöhe [mm], H_{Cam} – Abstand der Kameras zur Arbeitsfläche [mm], b – relativer Kameraabstand (Basis) [pxl], d – Abstand der Punkte auf Epipolarlinie (Disparität) [pxl]

Die Auflösung des Höhenprofils pro Grauwert ist abhängig von der Objekthöhe und ergibt sich aus dem Verhältnis $\frac{H_{\text{Cam}}}{H_{\text{Cam}} - H_{\text{Obj}}}$.

In der industriellen Praxis werden häufig Laserscanner zur berührungslosen dreidimensionalen Objektvermessung eingesetzt. Bei diesen Geräten wird ein Laserstrahl über Spiegel entlang einer Geraden gelenkt und durch die Reflektionsdauer der punktuellen Abstand bestimmt.

Das verwendete Verfahren bietet folgende Vorteile:

- **Zusätzliche Informationen**
Durch den Einsatz von (Farb-) Kameras können zusätzliche Oberflächeninformationen wie beispielsweise Barcodes, Artikelnummern oder Adressen erfasst und ausgewertet werden.
- **Skalierbarkeit**
Durch den Einsatz von mehreren Kameras oder durch verfahrbare Kameras beispielsweise an einem Industrieroboter können beliebig große Flächen erfasst und ausgewertet werden.
- **Kosten**
Das Verfahren benötigt zwei handelsübliche Industriekameras und eine geeignete Beleuchtungsquelle. Je nach Qualität der Komponenten liegen die Anschaffungskosten im Vergleich zu einem Laserscanner bei 10 – 20%.
- **Performance**
Gute Laserscanner benötigen zur Erfassung des Profils einer Europalette ca. 5 Sekunden (Herstellerangaben). Dabei muss die Palette senkrecht zur Laserlinie verfahren werden. Das vorgestellte Verfahren benötigt für die Erfassung zweier 1392 x 1040 pxl² großer Aufnahmen und Auswertung des Höhenprofils mit einem Intel Core 2-Prozessor mit 2,4 GHz Taktfrequenz und 2 GB Arbeitsspeicher ca. 3,5 Sekunden.

2.2 Flächensegmentierung

Die Segmentierung der Arbeitsfläche bzw. die Detektion der einzelnen Objekte wird aus dem Höhenprofil abgeleitet. Zur Validierung der Ergebnisse wird eine ebene Flä-

chensegmentierung durchgeführt, bei der die Gesamtfläche in Bereiche ähnlicher Farb- bzw. Grauwerte aufgeteilt wird.

In der aktuellen Version entspricht der höchste Punkt innerhalb eines Segmentes dem besten Greifpunkt des Objektes. Der optimale Greifpunkt soll zukünftig unter Berücksichtigung der gesamten Oberflächenkontur abgeleitet werden. Zusätzlich kann der optimale Greifpunkt abhängig von der Objektart in einer Datenbank hinterlegt werden.

3 Artikelklassifizierung

Die Objektvermessung liefert ebene geometrische Maße der Objekte und Tiefeninformationen. Man spricht von einer 2,5-dimensionalen Objektvermessung. Aus den Maßen werden Kenngrößen gebildet, die zur Klassifizierung bzw. Erkennung der Objekte verwendet werden. Die vorgestellten Verfahren sind Teilgebiete der Künstlichen Intelligenz.

3.1 Wissensbasierte Systeme

Wissensbasierte Systeme bzw. Expertensysteme bezeichnen Software, die Wissen in einer geeigneten Form repräsentiert und Verfahren enthält, die dieses Wissen verknüpft. Die Systeme eignen sich für einen klar definierten und begrenzten Aufgaben- bzw. Problembereich und beinhalten das Wissen von Experten.

Zur Klassifizierung der Objekte wird eine Untergruppe der wissensbasierten Systeme verwendet, sogenannte regelbasierte Systeme. In ihnen wird das Wissen in Form von Wenn-Dann-Regeln (wenn Prämisse erfüllt dann folgt Konklusion) abgelegt. Ein Beispiel für die Verwendung ist das Verhältnis aus ebener Grundfläche eines Objektes zum kleinsten umschließenden Quadrat:

- WENN Verhältnis = $\pi / 4$ DANN kreisförmige Grundfläche
- WENN Verhältnis = $\sqrt{3} / 4$ DANN dreieckige (gleichseitige) Grundfläche
- WENN Verhältnis = 1 DANN quadratische Grundfläche

Die Regeln können beliebig kombiniert werden.

3.2 Künstliche Neuronale Netze

Künstliche Neuronale Netze, kurz KNN, sind dem biologischen Gehirn nachempfunden. Sie bestehen aus einer Eingabeschicht, keiner, einer oder mehrerer verdeckter Schichten und einer Ausgabeschicht [vgl. Abbildung 2]. Jede Schicht besteht aus einer endlichen Anzahl von Neuronen, die durch die Neuronen der vorgelagerten Schicht aktiviert werden und einen Impuls an die Neuronen der nachgelagerten Schicht abgeben.

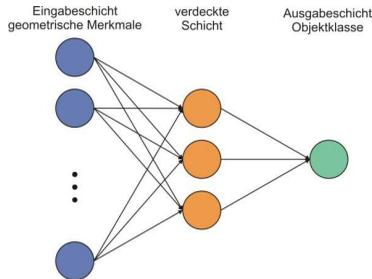


Abbildung 2: schematische Darstellung eines KNN

KNN sind in der Lage, komplexe Problemstellungen zu lernen. Dazu werden dem Netz Trainingsdaten mit bekanntem Funktionswert präsentiert. Die Kantengewichte des Netzes werden solange angepasst, bis die Summe der Netzfehler über alle Trainingsdaten minimal geworden ist.

Im o.g. Beispiel hätte das KNN zwei Neuronen in der Eingabeschicht, denen die Grundfläche und die Fläche des umschließenden Quadrats präsentiert werden, und ein Neuron in der Ausgabeschicht, dem zum Training die Objektart (1 – Kreis, 2- Dreieck, 3 – Quadrat) präsentiert wird.

Ein trainiertes Netz kann zwischen den Trainingsdaten interpolieren. Dabei ist die Netzausgabe Element der reellen Zahlen. Die Differenz zur nächst kleineren bzw. größeren natürlichen Zahl ist eine Kenngröße für die Qualität der Zuordnung. Unge-
naue Zuordnungen werden dem Benutzer zur Bestätigung präsentiert. Zur Verbesserung der Klassifizierungsqualität wird das Netz mit jedem neuen Datensatz nachtrainiert.

Zur Generierung von Trainingsdaten wird das regelbasierte System verwendet. Nach ausreichendem Training übernimmt das KNN die Klassenzuordnung, das wissensbasierte System wird weiter zur Validierung der Netzausgaben verwendet.

4 Toroidgreifer

Durch ein wachsendes Spektrum an Artikeln mit unterschiedlichen Maßen und Oberflächeneigenschaften werden in der Logistik flexible Lasthebemittel benötigt. Eine hohe Positioniergenauigkeit wie in der Montage beispielsweise beim Bahnschweißen ist hingegen nicht erforderlich. Der am Lehrstuhl entwickelte Toroidgreifer kommt dieser Anforderung nach. Zusätzlich zeichnet er sich durch einen einfachen Aufbau und den damit verbundenen geringen Herstellkosten aus. Ein weiterer Vorteil ist die sanfte Gutaufnahme.

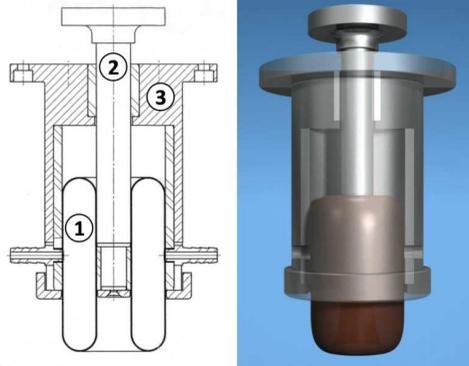


Abbildung 3: Toroidgreifer mit 1 - doppelwandiger Schlauch, 2 - Stempel, 3 – Außenhülse

Hauptkomponente des Greifers ist ein doppelwandiger Schlauch, der mit einem fließfähigen Material wie beispielsweise Wasser oder Luft gefüllt ist. Der Schlauch ist in eine zylindrische Hülse eingeklebt. Die Innenseite des Schlauches ist mit einem stabförmigen Stempel verklebt, der axial in der Außenhülse gelagert ist [vgl. Abbildung 3].

Zum Greifen wird die Unterseite des Schlauches über das Greifobjekt gestülpt. Durch Relativbewegung des Stempels zum Außenteil wird der Schlauch in den Greifer rein- bzw. rausgestülpt. Dadurch wird das Greifgut reibschlüssig in das Greiferinnere gezogen bzw. vom Greifer gelöst.

Mit einem Prototyp konnten bereits Textilien, Bücher, Getränkeflaschen, rohe Eier und viele weitere Objekte ohne Werkzeugwechsel gegriffen werden. Durch konstruktive Veränderungen am Greifer und Erprobung unterschiedlicher Schlauchmaterialien und –füllungen soll das Greifverhalten weiter verbessert werden.

5 Versuchsaufbau

Als Versuchsstand dient ein dreiaxsig verfahrbarer Portalroboter mit einer zusätzlichen Achse für den Toroidgreifer. Für eine schnelle Erfassung des Arbeitsbereiches werden fünf Kameras eingesetzt, die in einem äquidistanten Abstand an der Portalbrücke montiert sind.

Als Ergebnis der Objekterkennung und –klassifizierung wird der Robotersteuerung eine Koordinatenliste der Greifpunkte (X, Y, Z) aller gefundenen Objekte incl. der Objektklasse bzw. Objektart übergeben. Zusätzliche Informationen wie beispielsweise das Gewicht und die Zielkoordinaten werden aus einer Datenbank entnommen. Die Abarbeitungsreihenfolge erfolgt nach Benutzervorgaben.

6 Ergebnisse und Aussicht

Die Kombination aus Objektvermessung, Objektklassifizierung und Toroidgreifer ermöglicht eine vollautomatisierte Kommissionierung von Artikeln mit unterschiedlichen Maßen und Oberflächeneigenschaften. Das System lässt sich leicht in bestehende Prozesse integrieren. Durch die geringen Kosten amortisieren sich die Komponenten schon nach kurzem Einsatz.

Zur Steigerung der Performance werden die drei Komponenten Bildverarbeitung, Artikelklassifizierung und Toroidgreifer permanent weiterentwickelt. Um die Objekterfassung und die Lastaufnahme flexibler gestalten zu können wird der Portalroboter durch einen Knickarmroboter ausgetauscht. Für den praktischen Einsatz soll der Roboter auf Schienen am Boden oder an der Hallendecke längs des Kommissionierganges verfahren werden.

Bestimmung der mittleren Fahrzeit bei Kommissionierumdfahrten an einem Regal mit verschobener Schnellläuferzone

Sebastian Mühlenbrock

*Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund*

Michael ten Hompel

*Fraunhofer Institut für Materialfluss und Logistik
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund*

Durch die Einrichtung von Schnellläuferzonen lassen sich die Spielzeiten von Regalbediengeräten bei der Paletten-Ein- und -Auslagerung im Mittel verkürzen, wobei die Schnellläuferzone möglichst nahe am Palettenübergabepunkt liegen sollte. Für Kommissionierumdfahrten sollte eine Schnellläuferzone jedoch, wie in diesem Beitrag gezeigt wird, im Zentrum der Regalfläche liegen. Können in einem System beide Betriebsarten durchgeführt werden, so ist die optimale Lage der Schnellläuferzone irgendwo zwischen diesen beiden Extrema angesiedelt. In der vorliegenden Arbeit wird deshalb ein analytisches Modell zur Berechnung des Einflusses der Lage der Schnellläuferzone auf die mittlere Wegzeit beim Kommissionieren an der Regalwand vorgestellt. Es wird gezeigt, dass bei einer zu weit vom Zentrum der Regalwand entfernten Zone unter bestimmten Randbedingungen die mittlere Fahrzeit sogar größer werden kann als in einem Lager ohne Zone. Das Modell erlaubt die Analyse der Zusammenhänge zwischen mittlerer Fahrzeit, Anteil der Schnellläufer am Artikelspektrum, Umschlagshäufigkeit der Schnellläufer und Lage der Schnellläuferzone.

Einleitung

Die Einrichtung von Schnellläuferzonen ist ein übliches und in der Fachliteratur vielfach untersuchtes Verfahren zur Verringerung der Spielzeiten von Regalbediengeräten (RBG) (vgl. hierzu z.B. [Gud79], [Pret81], [LBA01], [HSN07]). Für die Ein- und Auslagerungen ganzer Paletten (im Folgenden Palettenspiel genannt) ist eine solche Zone möglichst nahe am Übergabepunkt am Ende der Regalgasse anzuordnen, während für Kommissionierumdfahrten die Anordnung der Schnellläuferzone im Zentrum der Regalwand nahe liegt. Der am Fraunhofer IML entwickelte und 2008 vorgestellte Regalpicker kombiniert nun diese beiden Spielarten

in einem vollautomatischen System (Abbildung 1). Hierzu ist er neben dem bei Regalbediengeräten üblichen Lastaufnahmemittel für Paletten zusätzlich mit einer Greiftechnik (Traction Gripper) ausgestattet, welche die Kommissionierung einzelner Kollis direkt von im Hochregal eingelagerten Paletten erlaubt. Die kommissionierten Artikel werden über eine integrierte Vertikal- und Horizontal-Fördertechnik direkt aus der Regalgasse transportiert, so dass eine Fahrt zum Übergabepunkt entfällt und theoretisch unendlich lange Kommissionierumdfahrten möglich sind. Für den Betrieb des Regalpickers (sowie jeglicher Systeme, die Paletten- und Kommissionierspiele durchführen können) wird die optimale Lage der Schnellläuferzone also zwischen der Mitte der Regalfläche und dem Palettenübergabepunkt liegen. Diese Lage wird abhängen vom Verhältnis der geforderten Palettenspiele zu den geforderten Kommissionierspielen. Als erster Schritt zur Ermittlung der optimalen Lage der Zone wird in diesem Beitrag ein Verfahren zur Bestimmung der mittleren Spielzeit bei Kommissionierumdfahrten mit in Richtung Regalwandmitte verschobener Schnellläuferzone vorgestellt.

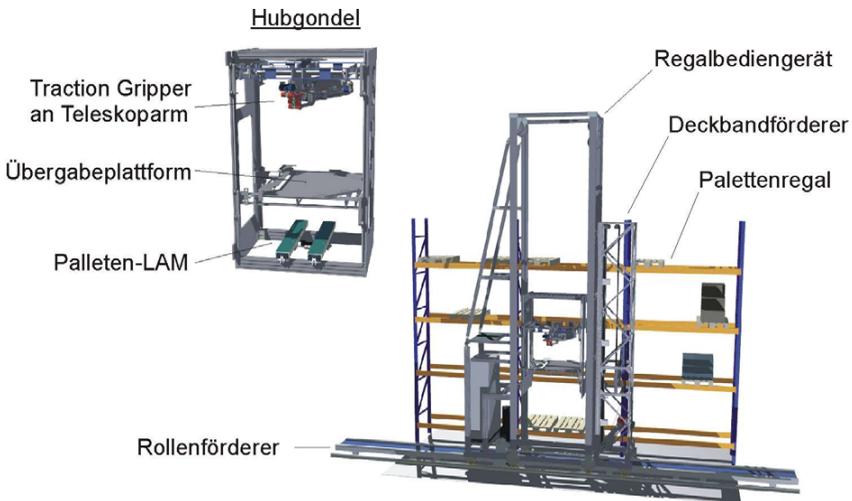


Abbildung 1: Aufbau des Regalpickers nach [MuS08]

Modell der Regalwand

Das hier verwendete Regalwandmodell mit normierten Zeitkoordinaten stellt eine Erweiterung des von [BoW84] vorgestellten Modells dar. Die Koordinaten t_x und t_y geben dabei nicht räumliche Entfernungen, sondern Fahrzeiten vom Ursprung an.

Beschreibt nun $t_{x,max}$ die maximale Fahrzeit entlang des Regals in x-Richtung und $t_{y,max}$ die maximale Fahrzeit in y-Richtung, und ist

$$(1) \quad T = \text{Max}\{t_{x,max}, t_{y,max}\},$$

so ergeben sich durch Teilung durch T die normierten Zeitkoordinaten x und y :

$$(2) \quad (3) \quad x = \frac{t_x}{T}, \quad y = \frac{t_y}{T}.$$

Der Formfaktor b des Regals kann dann mit

$$(4) \quad b = \text{Min}\left\{\frac{t_{x,max}}{T}, \frac{t_{y,max}}{T}\right\}$$

definiert werden. Zur Vereinfachung wird für den Rest dieser Arbeit einschränkend ein Formfaktor von $b=1$ vorausgesetzt, so dass die Geschwindigkeitsdiagonale des RBG mit der Regalwanddiagonalen zusammenfällt und die Regalfläche in der gewählten Darstellung quadratisch erscheint. Abbildung 2 zeigt die Verhältnisse an einer entsprechenden Regalwand mit Schnellläuferzone (A-Zone). Die Grenzen der A-Zone werden mit den Variablen f und g bezeichnet. Mit den Gleichungen

$$(5) \quad g = (b + \sqrt{pb})\beta + \sqrt{pb}$$

und

$$(6) \quad f = (b + \sqrt{pb})\beta$$

lässt sich die Lage der Schnellläuferzone nun eindeutig über den Faktor β definieren, der Werte zwischen null (A-Zone befindet sich in der linken unteren Ecke des Regals) und 0,5 (A-Zone befindet sich im Zentrum der Regalfläche) annehmen kann. Die Größe der Schnellläuferzone wird dabei direkt durch den Anteil p der Schnellläufer bestimmt.

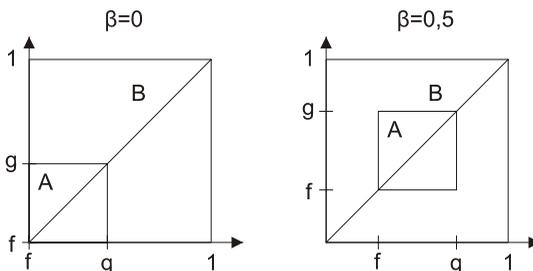


Abbildung 2: Wegzeitnormierte Regalwand mit $b=1$ und verschobener A-Zone

Einfluss der Schnellläuferzone im Kommissionierspiel

[Gud72] zeigt, dass sich eine Regalfäche mit Schnellläuferzone mathematisch als Kombination eines großen Normalläufers mit einem kleineren Schnellläufer betrachten lässt (siehe Abbildung 3). Dazu wird das Artikelsortiment wie in Abbildung 4 dargestellt in einen Anteil von p A-Artikeln und einen Anteil von $1-p$ B-Artikeln aufgeteilt. Die Umschlagshäufigkeit der A-Artikel sei dabei um n größer ist als die der B-Artikel. Damit lässt sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Artikel aus einer der beiden Flächen angefordert wird, durch die Gleichungen (7) und (8) beschreiben. Diese Art der Aufteilung hat den Vorteil, dass sowohl das kleine Schnellläuferlager als auch das Normalläuferlager rechteckig sind und sich deshalb die Spielzeiten für Spiele innerhalb eines Lagerbereichs einfach mit bekannten Verfahren berechnen lassen (siehe hierzu auch [Gud79]).

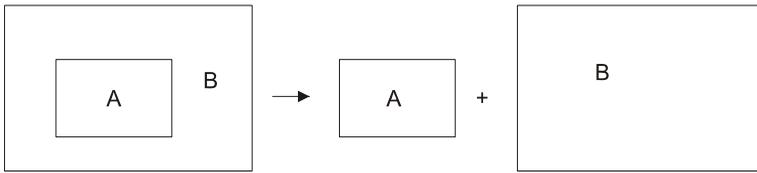


Abbildung 3: Aufteilung der Regalfäche in ein großes Normalläuferlager und ein kleines Schnellläuferlager in Anlehnung an [Gud72] und [Gud79]

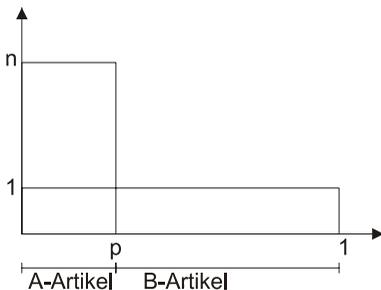


Abbildung 4: Aufteilung des Sortiments in einen Anteil p von Schnellläufern mit einem um n höheren Umschlag in Anlehnung nach [Gud72] und [Gud79]

$$(7) \quad p(A) = \frac{p(n-1)}{1+p(n-1)}$$

$$(8) \quad p(A) = \frac{1}{1+p(n-1)}$$

Da der Regalpicker bei seinen Kommissionierrundfahrten nie zum Übergabepunkt am Ende der Regalgasse fahren muss, entspricht die durchschnittliche Fahrzeit zwischen zwei Lagerfächern der durchschnittlichen Fahrzeit von einem *beliebigen* Punkt der Regalwand zu einem anderen *beliebigen* Punkt. Diese Fahrt wird im Folgenden Querfahrt genannt. Zur Bestimmung der mittleren Querfahrzeiten müssen je nach Lage der Artikel die in Tabelle 1 dargestellten Fälle unterschieden werden. Durch Addition der Produkte der mittleren Wegzeiten der einzelnen Fälle mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit $P(i)$ für ihr Eintreten lässt sich die mittlere Querfahrzeit nach Gleichung (9) berechnen.

$$(9) \quad \begin{aligned} \bar{i} &= P(A)^2 \bar{i}_{AA} + P(B)^2 \bar{i}_{BB} + 2P(A)P(B) \bar{i}_{AB} \\ &= \frac{p^2(n-1)^2 \frac{7}{15} \sqrt{p} + \frac{7}{15} + 2p(n-1) \bar{i}_{AB}}{(1+p(n-1))^2} \end{aligned}$$

Die mittleren Querfahrzeiten innerhalb der A- und B-Zone entsprechen dabei den Querfahrzeiten für rechteckige Regalflächen der entsprechenden Größe, wie sie bereits von [Lip03] und [BoW84] bestimmt wurden. Die mittlere Fahrzeit von der A- in die B-Zone und umgekehrt ist offensichtlich für beide Fahrrichtungen gleich und wird im Folgenden hergeleitet.

Tabelle 1: Mögliche Querfahrten in einer Regalwand mit Schnellläuferzone

| Fall i | Start | Ziel | \bar{i}_i | $P(i)$ |
|----------|-------|------|-------------------------|-----------------------------------|
| AA | A | A | $\frac{7}{15} \sqrt{p}$ | $\frac{p^2(n-1)^2}{(1+p(n-1))^2}$ |
| BB | B | B | $\frac{7}{15}$ | $\frac{1}{(1+p(n-1))^2}$ |
| AB | A | B | \bar{i}_{AB} | $\frac{p(n-1)}{(1+p(n-1))^2}$ |
| BA | B | A | \bar{i}_{AB} | $\frac{p(n-1)}{(1+p(n-1))^2}$ |

Querfahrzeit zwischen A- und B-Zone

Die Ermittlung der Fahrzeit zwischen zwei beliebigen Punkten in der A- und B-Zone erfolgt basierend auf dem von [BoW84] sowie [Lip03] verwendeten statistischen Ansatz zur Fahrzeitermittlung. Dabei wird die Verteilungsfunktion für die mittlere zeitliche Entfernung k zwischen zwei Punkten bestimmt nach

$$(10) \quad F_{xy}(k) = P(|x_1 - x_2| < k) \cdot P(|y_1 - y_2| < k),$$

wobei in einem Lager mit Formfaktor $b=1$

$$(11) \quad P(|x_1 - x_2| < k) = P(|y_1 - y_2| < k)$$

ist. Mit Hilfe der zugehörigen Dichtefunktion

$$(12) \quad f_{xy}(k) = \frac{dF_{xy}(k)}{dk}$$

lässt sich der Erwartungswert für die mittlere Fahrzeit zwischen zwei Punkten über das Integral

$$(13) \quad E(k) = \int_0^1 k \cdot f_{xy}(k) dk$$

bestimmen.

Zur Berechnung von Gleichung (10) für eine rechteckige Regalwand ohne Zonung verwendet [Lip03] ein geometrisches Verfahren in Anlehnung an [WMS08, S.298], welches hier auf die Anwendung auf ein Regal mit Schnellläuferzone erweitert wird. Hierzu muss zunächst die Einschränkung

$$(14) \quad f < x_1 < g$$

eingeführt werden. Dadurch wird berücksichtigt, dass der Startpunkt der Fahrt in der A- und der Zielpunkt in der B-Zone liegt, was bedeutet, dass x_1 in der Schnellläuferzone liegt und x_2 auf der gesamten Regalfläche liegen kann (oder umgekehrt).

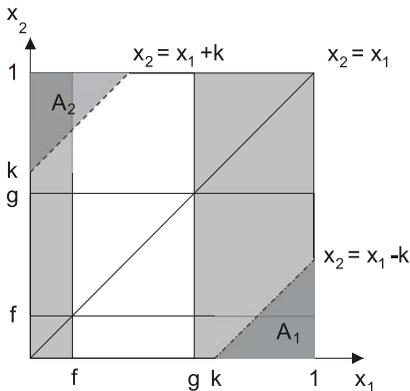


Abbildung 5: Illustration zur geometrischen Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der mittleren Entfernung in x-Richtung zwischen je einem Fach der A- und B-Zone.

Die in Abbildung 5 hell dargestellte Fläche A_{zul} zwischen den beiden Senkrechten $x_1=f$ und $x_1=g$ enthält alle zulässigen Kombinationen von x_1 und x_2 :

$$(15) \quad A_{zul} = 1 \cdot (g - f)$$

Die durch die Geraden

$$(16) \quad x_2 = x_1 - k$$

und

$$(17) \quad x_2 = x_1 + k$$

abgegrenzten Dreiecksflächen A_1 und A_2 enthalten nun all die Punkte, für die die Bedingung

$$(18) \quad |x_1 - x_2| < k$$

nicht erfüllt ist. Überschneidet sich mindestens eine diese Dreiecksflächen mit A_{zul} , so entsteht eine Fläche A_0 , deren Punkte zwar zulässig sind, die die Bedingung (18) jedoch nicht erfüllen. Dann gilt

$$(19) \quad P(|x_1 - x_2| < k) = \frac{A_{zul} - A_0}{A_{zul}}.$$

Abhängig von k setzt sich A_0 aus A_1 und A_2 zusammen, die sich wiederum aus verschiedenen Dreiecken und Rechtecken zusammen setzen können, so dass verschiedene Fälle unterschieden werden müssen. Die durch die Gerade (16) erzeugte Fläche A_1 ist

$$(20) \quad A_1 = \begin{cases} 0 & \text{für } g \leq k \leq 1 \\ \frac{(g-k)^2}{2} & \text{für } f \leq k < g \\ \frac{(g-k)^2}{2} + (g-f)(f-k) & \text{für } 0 \leq k < f \end{cases}$$

und für die durch die Gerade (17) erzeugte Fläche A_2 gilt

$$(23) \quad A_2 = \begin{cases} 0 & \text{für } 1-f \leq k \leq 1 \\ \frac{(1-k-f)^2}{2} & \text{für } 1-g \leq k < 1-f \\ \frac{(g-f)^2}{2} + (g-f)(1-k-g) & \text{für } 0 \leq k < 1-g \end{cases}$$

Damit lässt sich Gleichung (10) abschnittsweise definieren. Entsprechend muss auch für jeden Abschnitt separat die zugehörige Dichtefunktion nach (12) gebildet und nach (13) abschnittsweise integriert werden. Da aber je nach Lage und Größe der A-Zone

$$(24) \quad g < 1-g \quad \text{für} \quad \beta + \sqrt{p} \cdot (1-\beta) < 0,5$$

oder

$$(25) \quad g \geq 1-g \quad \text{für} \quad \beta + \sqrt{p} \cdot (1-\beta) \geq 0,5$$

sein kann, müssen hier wieder zwei Fälle unterschieden werden. Es gilt für $g < 1-g$

$$(26) \quad E_1(k) = \int_0^1 kf(k)dk \\ = \int_0^f kf_{0f}(k)dk + \int_f^g kf_{fg}(k)dk + \int_g^{1-g} kf_{g(1-g)}(k)dk + \int_{1-g}^{1-f} kf_{(1-g)(1-f)}(k)dk + \int_{1-f}^1 kf_{(1-f)1}(k)dk$$

und für $g \geq 1-g$

$$(27) \quad E_2(k) = \int_0^1 kf(k)dk \\ = \int_0^f kf_{0f}(k)dk + \int_f^{1-g} kf_{f(1-g)}(k)dk + \int_{1-g}^g kf_{(1-g)g}(k)dk + \int_g^{1-f} kf_{g(1-f)}(k)dk + \int_{1-f}^1 kf_{(1-f)1}(k)dk$$

Nach Ausrechnen der Integrale lauten die Lösungen für $g < 1-g$

$$(28) \quad \bar{t}_{AB1} = \frac{1}{60\sqrt{p^2}} [10\sqrt{p}(1-2\beta)^4(\beta-1) - (2\beta-1)^5 \\ - 20\sqrt{p}^2(-4+19\beta-50\beta^2+72\beta^3-56\beta^4+16\beta^5) \\ + 10\sqrt{p}^3(1-2\beta)^2(-11+18\beta-24\beta^2+8\beta^3) \\ - 5\sqrt{p}^4(-17+82\beta-176\beta^2+208\beta^3-144\beta^4+32\beta^5) \\ + 2\sqrt{p}^5(-9+45\beta-100\beta^2+120\beta^3-80\beta^4+16\beta^5)]$$

und für $g \geq 1-g$

$$(29) \quad \bar{t}_{AB2} = \frac{2-3\beta+4\beta^3}{3} + \sqrt{p} \cdot \left(-\frac{1}{2} + \beta + 2\beta^2 - 4\beta^3 \right) \\ + \sqrt{p}^2 \left(\frac{1}{12} + \frac{7\beta}{6} - 4\beta^2 + 4\beta^3 \right) + \sqrt{p}^3 \left(\frac{7}{30} - \frac{7\beta}{6} + 2\beta^2 - \frac{4\beta^3}{3} \right)$$

Ergebnisse und Interpretation

Die mittlere Querfahrzeit zwischen A- und B-Zone

In den Abbildungen 6 und 7 sind mit den Gleichungen (28) und (29) erzeugte Kurvenscharen für verschiedene Werte von p bzw. β aufgetragen. Die Plausibilität der Ergebnisse kann gut für den bekannten Fall einer in der linken unteren Ecke der Regalwand angeordnete A-Zone nachvollzogen werden. Für diesen Fall ist $\beta=0$, und ist der Anteil der Schnellläufer p ebenfalls null, so beschreibt die Rechnung eine Fahrt

von der linken unteren Ecke des Regals zu einem beliebigen Punkt der Regalfläche. Dies entspricht aber genau einem halben Einzelspiel (ES). Die mittlere Fahrzeit eines ES in normierten Zeitkoordinaten bei einem Formfaktor von $b=1$ beträgt $4/3$ (vergleiche hierzu [BoW84] und [Lip03]), so das hier $2/3$ zu erwarten sind. Für $p=1$ hingegen erstreckt sich die A-Zone über die gesamte Regalfläche, und zwar unabhängig von β . Dies muss zu einer mittleren Querfahrzeit von $7/15$ führen, dem Wert für die Querfahrt auf einer Rechteckfläche (siehe oben). Abbildung 6 zeigt, dass die ermittelten Gleichungen zu den erwarteten Ergebnissen führen. In Abbildung 7 ist zu erkennen, wie für steigenden Anteil der A-Artikel die Abhängigkeit der Querfahrzeit von der Lage der A-Zone abnimmt, bis sie schließlich für $p=1$ unabhängig von β ist. Auch dies ist so zu erwarten, da in diesem Fall die A-Zone unabhängig von β die gesamte Regalwand einnimmt.

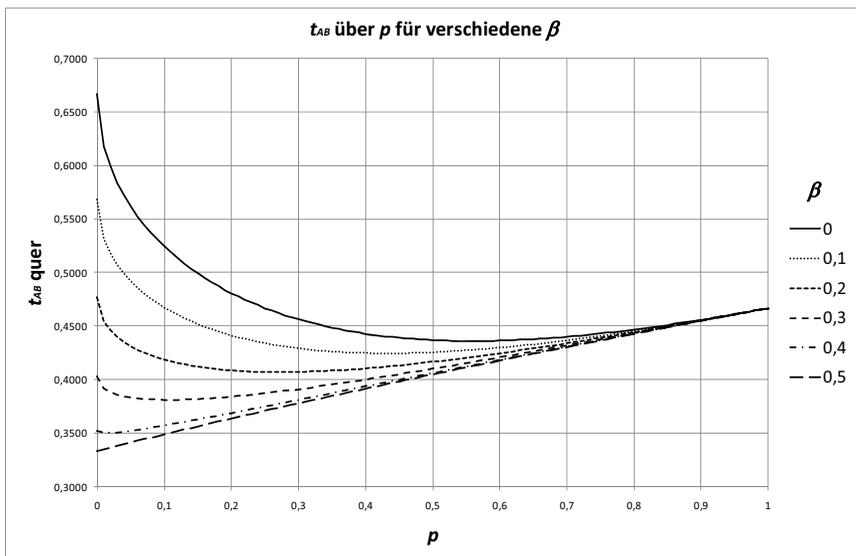


Abbildung 6: Kurvenschar der mittleren Querfahrzeit t_{AB} über den Schnellläuferanteil p für verschiedene Lagen der A-Zone, beschrieben durch β .

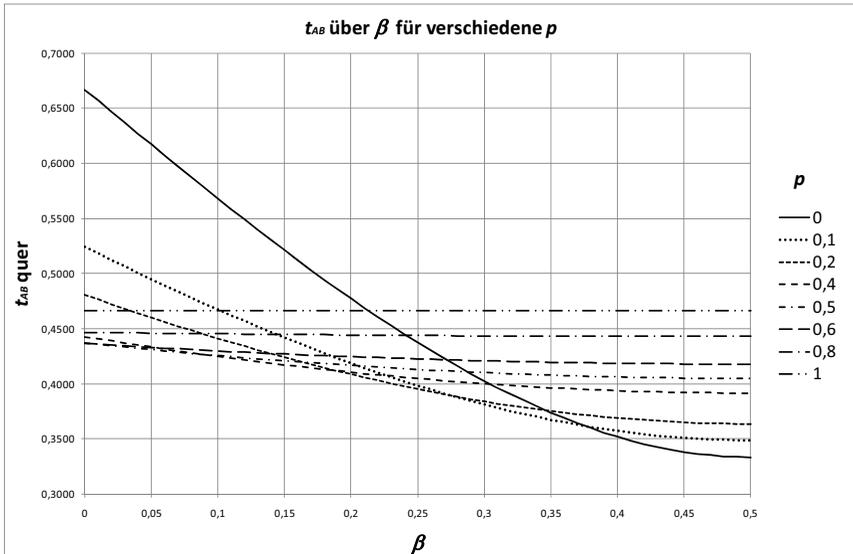


Abbildung 7: Kurvenschar der mittleren Querfahrzeit t_{AB} über dem Lageparameter β für verschiedene Schnellläuferanteile p .

Die mittlere Querfahrzeit im Regal mit verschobener A-Zone

Durch Einsetzen der Gleichungen (28) und (29) in Gleichung (9) erhalten wir nun die mittlere Querfahrzeit im Regal mit einer beliebig um β verschobenen Schnellläuferzone. In Abbildung 8 sind die Querfahrzeit und ihre Bestandteile über β aufgetragen. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Lage der Zone einzig Fahrten zwischen der A- und der B-Zone beeinflusst. Für die gewählten Randbedingungen $p=0,25$ und $n=2$ ist die mittlere Querfahrt bei niedrigen β , also für eine nahe der linken unteren Regalwanddecke angeordnete Zone, sogar größer als die mittlere Querfahrt innerhalb der B-Zone. Eine Verschiebung der Zone zur Regalwandmitte ist für Kommissionierfahrten also nicht nur sinnvoll, sondern unter Umständen sogar notwendig, damit die Einrichtung der Schnellläuferzone überhaupt Sinn macht.

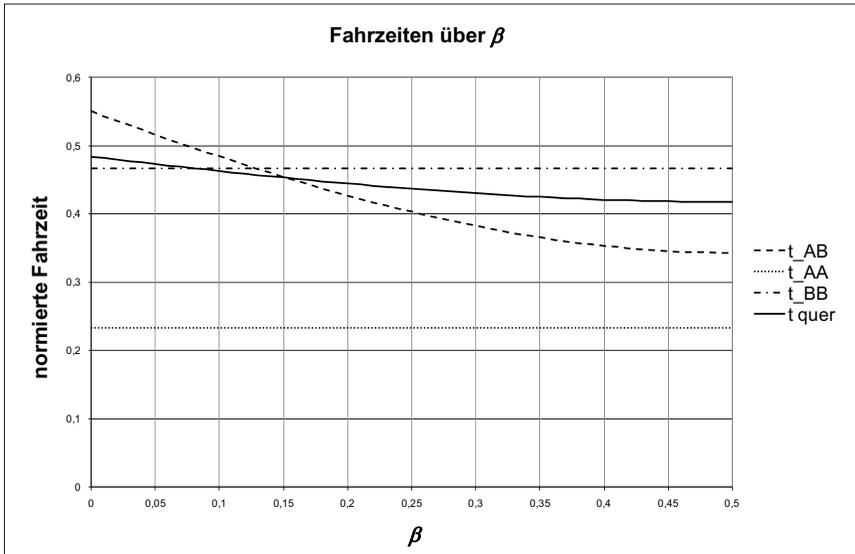


Abbildung 8: Mittlere Querfahrzeit und ihre Bestandteile in Abhängigkeit von β , mit $p=0,25$ und $n=2$.

Eine Änderung des Schnellläuferanteils p beeinflusst neben den in Abbildung 10 über p dargestellten einzelnen Querfahrzeiten t_{AB} und t_{AA} auch die in Abbildung 9 dargestellte Wahrscheinlichkeiten $P(i)$ der verschiedenen Fahrten. Dabei ist $\beta=0$ und $n=2$ gewählt. Es ist zu beachten, dass auch für $p=1$ die Wahrscheinlichkeit, die B-Zone anzufahren, nicht null wird. Dies liegt an der gewählten Aufteilung des Regals in zwei überlagerte Rechteckflächen nach den Gleichungen (7) und (8), die die Anfahrwahrscheinlichkeit für A-Artikel auf die A- und die B-Zone aufteilen. Die Wahrscheinlichkeit einer Querfahrt von der A- in die B-Zone steigt zunächst mit wachsender A-Zone, sinkt jedoch wieder, da dieser Effekt durch die kleiner werdende Anfahrwahrscheinlichkeit der B-Zone überkompensiert wird. Die mittlere Querfahrzeit zwischen A- und B-Zone verhält sich wie zuvor beschrieben und bereits in Abbildung 6 dargestellt, während die mittlere Querfahrzeit innerhalb der B-Zone von p nicht unabhängig ist und die mittlere Querfahrzeit innerhalb der A-Zone mit wachsender Zone zunimmt. Für die mittlere Querfahrzeit insgesamt führt die Überlagerung dieser Effekte zu dem dargestellten Verlauf, bei dem diese zunächst ein Maximum durchläuft und sich dabei gegenüber einem Lager ohne Zone (entspricht der Querfahrt innerhalb der B-Zone) verschlechtert. Erst ab einem Schnellläuferanteil von etwa 20% ist eine Fahrzeiterparnis erreicht, die sich erwartungsgemäß wieder verschwindet, wenn sich die Größe der A-Zone der Größe des Regals nähert.

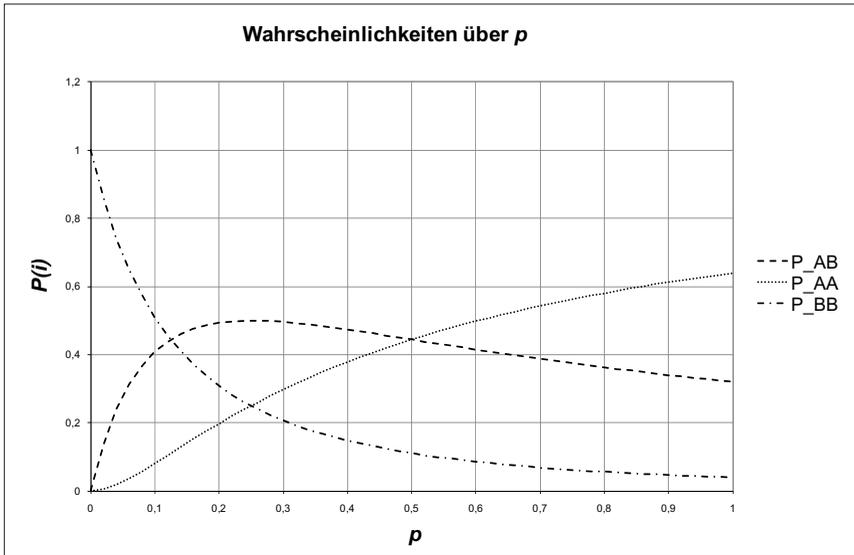


Abbildung 9: Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Querfahrten nach Tabelle 1 über p , mit $\beta=0$ und $n=5$.

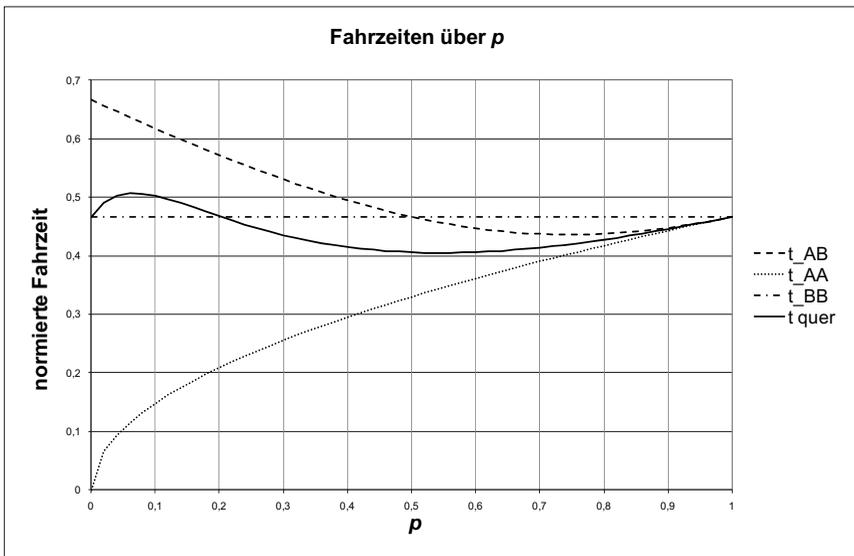


Abbildung 10: Mittlere Querfahrzeit und ihre Bestandteile über p , mit $\beta=0$ und $n=5$.

Fazit und Ausblick

Das vorgestellte Modell erlaubt die Berechnung von Querfahrzeiten in einem Regal mit beliebig zwischen Ursprung und Zentrum der Regalfläche verschobener Schnellläuferzone. Hierzu wurde der bereits von [BoW84] und insbesondere [Lip03] verwendete statistische Ansatz weiterentwickelt. Bislang ist das Modell auf Regale mit Formfaktor $b=1$ beschränkt. Die vorgestellten Rechnungen zeigen, dass für Kommissionierfahrten die optimale Lage der A-Zone im Zentrum der Regalfläche liegt. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass ist eine Verschiebung der Schnellläuferzone zum Zentrum der Regalfläche hin nicht nur vorteilhaft, sondern unter gewissen Randbedingungen sogar notwendig ist, um überhaupt einen positiven Effekt durch Einrichtung die A-Zone zu erzielen. Denn eine verhältnismäßig kleine, in der linken unteren Ecke der Regalwand angeordnete Schnellläuferzone kann bei ungünstigem Verhältnis der Zugriffshäufigkeiten von A- und B-Artikeln dazu führen, dass die mittlere Spielzeit für Querfahrten in diesem Lager höher ist als in einem Lager ohne Schnellläuferzone. Um die optimale Lage der Zone für ein hybrides System wie den Regalpicker zu ermitteln, soll das Modell im nächsten Schritt für die Errechnung der mittleren Fahrzeiten von Palettenspielen bei verschobener A-Zone angepasst werden. Darüber hinaus ist eine Verallgemeinerung für beliebige Formfaktoren b wünschenswert.

Literatur

- [BoW84] BOZER, Yavuz A.; WHITE, John A. (1984): Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. In: *IIE Transactions*, S. 329–338.
- [Gud72] GUDEHUS, Timm (1972): Analyse des Schnellläufereffektes in Hochregallagern. In: *fördern + heben*, Jg. 22, H. 2, S. 65–67.
- [Gud79] GUDEHUS, Timm (1979): Zur mittleren Spielzeit von Hochregallagern mit Schnellläuferzone. In: *fördern + heben*, Jg. 29, H. 9, S. 840.
- [HSN07] TEN HOMPEL, Michael; NAGEL, Lars; SCHMIDT, Thorsten: *Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik*. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin, 2007: Springer-Verlag. – ISBN 978-3-540-73235-8
- [LBA01] LIPPOLT, Christian; BLUNCK, Steffen; ARNOLD, Dieter (2001): Schnellläuferzonen in Hochregallagern - Geometrisches Verfahren erhöht den Umschlag. In: *fördern + heben*, Jg. 51, H. 1-2, S. 38-40.
- [Lip03] LIPPOLT, Christian: Spielzeiten in Hochregallagern mit doppelttiefer Lagerung. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2003. – ISSN 0171-2772
- [MuS08] MÜHLENBROCK, Sebastian; SCHMIDT, Thorsten (2008): Method for designing a hybrid rack picking system. In: *Progress in Material Handling Research: 2008*. Charlotte, NC: The Material Handling Institute, S. 513-525.
- [Pret81] PRETTENTHALER, Sepp (1981): Bestimmung eines optimalen Schnellläuferanteiles in RFZ-bedienten Lagern. In: *fördern + heben*, Jg. 31, H. 9, S. 683-687.
- [WMS08] WACKERLY, Dennis D.; MENDENHALL, William; SCHEAFFER, Richard L.: *Mathematical statistics with applications*. 6. Auflage. Belmont: Thomson, 2008. – ISBN 978-0-495-11081-1

Ganzheitliche Planung logistischer Systeme – Hilfestellung durch EDV-gestützte Assistenzsysteme

***DIPL.-KFM. T. O. BORIS JOBI, DIPL.-LOGIST. DANIEL NEUHÄUSER,
DIPL.-WI.-ING. TOBIAS SOMMER***
*INSTITUT FÜR FÖRDERTECHNIK UND LOGISTIK (IFT)
UNIVERSITÄT STUTTGART*

Abstract: Die Planung intralogistischer Systeme stellt hohe Anforderungen an die dabei verwendeten Modelle und Methoden. Zudem hat das Erfahrungswissen des jeweiligen Planers einen wesentlichen Einfluss auf das Planungsergebnis. Ausgehend von der Darstellung eines allgemeinen Planungsvorgehens werden in diesem Artikel verschiedene Ansatzpunkte diskutiert, um durch gezielte Formalisierungen im Planungsprozess Brüche zu vermeiden und Interpretationsspielräume zu verringern. Somit wird Punkt für Punkt eine durchgehende Systematik zur Verbesserung des Planungsprozesses vorgestellt. Insbesondere die formale Beschreibung logistischer Abläufe mit Hilfe von Statusvektoren und Prozessbausteinen ermöglicht die Nutzung eines durchgängigen Prozessmodells von der Grobplanung bis zur Optimierung bestehender Anlagen. Der Beitrag liefert somit Ansatzpunkte für die Erstellung eines rechnergestützten Assistenzsystems zur Planung intralogistischer Systeme.

Einleitung

Gegenwärtig sehen sich viele Unternehmen auf Grund von Marktveränderungen gezwungen, ihre Produkte, Produktions- und insbesondere Logistiksysteme kurzfristig anzupassen. Die notwendige Um- oder Neuplanung ist dabei ein komplexer, interdisziplinärer Prozess: Unter Nutzung von Modellen und Methoden sowie dem Erfahrungswissen der beteiligten Personen wird ein System entworfen, das zukünftigen Anforderungen gewachsen sein soll. Nachstehend sollen verschiedene Ansatzpunkte zur Verbesserung des Planungsprozesses intralogistischer Systeme vorgestellt werden. Daher folgt zunächst die allgemeine Beschreibung eines Ablaufes der Intralogistikplanung, um später diskutierte Potentiale einordnen zu können.

1 Vorgehen der Logistikplanung

Zur Strukturierung von Planungsprozessen wurden in unterschiedlichen Disziplinen, wie z. B. dem Maschinenbau oder der Informatik, Vorgehensmodelle entwickelt und angewendet. Unter einem Vorgehensmodell wird eine Folge von Schritten zur Durchführung von Entwicklungs- und Planungsprojekten verstanden [Ludewig, Lichter 2007]. Es bietet dem Nutzer ein Gerüst zur Strukturierung des Projekts von der Zieldefinition bis zur Realisierung des Systems. Den einzelnen Schritten eines

Vorgehensmodells werden spezifische Methoden zur Analyse, Gestaltung und Bewertung zugeordnet, deren Ergebnisse die Grundlage für den weiteren Projektablauf darstellen.

Etablierte Vorgehensmodelle zur Planung logistischer Systeme beinhalten die sequentielle Abfolge aufeinander aufbauender Planungsschritte, denen jeweils spezifische Methoden zur Verarbeitung gegebener Inputdaten zu entscheidungsrelevanten Ergebnissen zugewiesen sind. Der Planungsablauf wird dabei je nach Modell in meist fünf bis zehn einzelne Stufen untergliedert. Im Allgemeinen lässt sich folgender Ablauf abstrahieren: Zu Beginn sind Aufgabenstellung und Planungsziele zu ermitteln. Im Anschluss erfolgt die Generierung und Analyse der Planungsdatenbasis, gefolgt vom darauf aufbauenden Entwurf von Prozessvarianten, um die Strukturen des Materialflusses zu bestimmen. Den Prozessvarianten sind daraufhin Betriebsmittel zuzuordnen, die anschließend dimensioniert und bewertet werden. Das Ergebnis sind sogenannte Vorzugsvarianten, die im Folgenden detailliert auszuplanen sind. Die Systematiken enden mit der Realisierung des Systems bzw. umfassen als Folgeschritt notwendige Umplanungen während der Betriebsphase.

In ihrer Grundlogik ähneln diese Planungsschemata dem Wasserfallmodell nach Royce: Der Entwicklungsprozess besteht aus einer linearen Folge von Aktivitäten, wobei Rücksprünge zu der jeweils vorhergehenden Aktivität möglich sind – es ergibt sich ein iteratives Abarbeiten des Prozesses. Die einzelnen Aktivitäten des Modells enden mit dem Dokumentieren von Ergebnissen.

2 Ansatzpunkte für eine durchgängige Planungssystematik

Das methodische Vorgehen in der Planung ist hinreichend beschrieben, jedoch werden in jedem Planungsschritt Entscheidungen getroffen und fixiert, deren Begründung nicht formal hinterlegt ist. Die Planung ist hier abhängig vom Erfahrungsgrad des Planers. Dies bedeutet nicht zwangsläufig eine Minderung der Qualität des Planungsergebnisses, führt aber zu der Situation, dass auch in einem exakt beschriebenen Vorgehen an verschiedenen Stellen Unschärfen auftreten. Die Herausforderung ist, genau diese Stellen zu identifizieren und entsprechende Hilfsmittel und Systematiken zu entwickeln, die in diesem Bereich unterstützen. Es gilt Schnittstellen zu definieren, die die Planung beim Übergang zwischen den einzelnen Schritten erleichtern. Dadurch können erzielte Ergebnisse leichter und zuverlässiger für konsekutive Schritte verwendet werden, ohne fehlerträchtige Transformationen durchführen zu müssen.

Dies dient im Folgenden, um die Nachvollziehbarkeit von Planungsentscheidungen zu erhöhen – vor allem wenn verwendete Planungsalgorithmen lediglich die Basis für Entscheidungen liefern, die auf Erfahrung und persönlicher Einschätzung des Planers beruhen. Dessen implizites Wissen fließt in die Planungsentscheidung ein, kann jedoch aufgrund seines informalen Charakters nicht extern gespeichert und erneut abgerufen werden. Es wird deutlich, dass für eine nachvollziehbare und rationale Planung dieser Bereich der informalen Ergebnisfindung verkleinert werden muss.

Ein wichtiger Vorteil formalisierten Planungswissens zeigt sich im Hinblick auf Mitarbeiterfluktuation und Veränderung der Altersstruktur in der Belegschaft: Das Ausscheiden erfahrener Planer stellt für das betroffene Unternehmen einen Verlust dar, den es zu kompensieren gilt. Gerade in der Anlernphase neuer Mitarbeiter bietet somit die Abrufbarkeit existierenden Planungswissens einen entscheidenden Vorteil.

Im Folgenden sollen diejenigen Planungsschritte identifiziert werden, denen zur Erzielung eines optimalen und vor allem reproduzierbaren Planungsergebnisses besondere Aufmerksamkeit zukommen muss. Die dargestellten Lösungsansätze ermöglichen eine durchgängige Planungssystematik und damit die Unterstützung des Planers durch EDV-gestützte Hilfsmittel von der Anforderungsbeschreibung bis zur Lösungsgenerierung.

2.1 Anforderungsbeschreibung

Wie diskutiert, stützt sich der Planungsprozess intralogistischer Systeme auf die Festlegung von Aufgabenstellung und Planungszielen. Die Ziele, d. h. die Anforderungen an das zu erstellende System, gelten dabei sowohl für das Gesamtsystem als auch für dessen einzelne Prozesse: So können die Artikelabmessungen Planungsgrundlage für ein ganzes Distributionssystem sein, eine geforderte Einlagerungsleistung eines separaten Lagerbereiches jedoch nur prozessspezifische Dimensionierungsgrundlage für die dazu einzusetzende Fördertechnik (z. B. Regalbediengerät). Die Zusammenfassung der Anforderungen an ein zu erstellendes System kann dabei als Anforderungsprofil bezeichnet werden.

Es ist aus Sicht einer praktischen Anwendung nicht realistisch, von einem einzigen, allgemeingültigen Anforderungsprofil zu sprechen. Vielmehr existiert eine Abhängigkeit zwischen projektspezifischer Planungsaufgabe und einem zugeordneten Anforderungsprofil. Neben der Formalisierung ist hier auch die Syntax entscheidend. Betrachtet man eine mögliche Anforderung, dass ein System einen bestimmten Servicegrad erreichen soll, ist hier zuerst eine genaue Definition erforderlich, was jeder einzelne Projektbeteiligte unter diesem Begriff und den entsprechenden Konsequenzen versteht. Speziell bei arbeitsteiligen und

interdisziplinär besetzten Planungsprojekten ist das Finden eines gemeinsamen Verständnisses bei der Beschreibung des zu erstellenden Systems eine nicht zu unterschätzende Aufgabe. Zudem erfordert die Interdisziplinarität in der Klärung der Anforderung den Einsatz spezifischer Methoden, wie Untersuchungen in [Jung 2006] verdeutlichen.

Bei der Beschreibung von Anforderungen an ein zu erstellendes System treten in diesem Zusammenhang zwei grundsätzliche Probleme auf: Zum einen variiert je nach Planungsaufgabe die Menge und Art der gestellten Anforderungen, zum anderen schwankt die Qualität und Verwertbarkeit ihrer Formulierung:

Für den Planer resultiert aus der vom Planungsfall abhängigen Art und Menge von Anforderungen die notwendige Auswahl adäquater Planungswerkzeuge und – hilfsmittel, was einen erhöhten Planungsaufwand mit sich bringen kann. Dementsprechend ist die formal abgesicherte Definition von Anforderungen die erste Herausforderung bei der Entwicklung einer durchgängigen Systematik zur Unterstützung des Planers. Dabei ist die vorhandene Datenqualität von entscheidender Bedeutung, d. h. Menge, Zeitpunkt und Korrektheit der Daten. Es kann nicht nur eine Abhängigkeit der Datenqualität von der Planungsaufgabe, sondern auch vom gegenwärtigen Planungsschritt festgestellt werden.

So kann in einer Grobplanung beispielsweise nicht davon ausgegangen werden, dass bereits umfassende Daten zur Artikelstruktur vorhanden sind. Generell sollte daher das Ziel sein, die im Planungsprozess erfassten Anforderungen auf die tatsächlich benötigten zu minimieren, ohne jedoch die Ergebnisqualität zu mindern. Denn Daten, die benötigt werden, jedoch nicht vorhanden sind, führen zu Annahmen und Schätzungen. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Qualität des Planungsprozesses.

Die Verarbeitung von Anforderungen an das zu erstellende System und dessen Prozesse stellt des Weiteren erhöhte Ansprüche an deren Beschreibungsqualität. Die Umsetzung verbaler Systemziele wie „Flexibilität“, „Stabilität“ oder „Benutzerfreundlichkeit“, die gerade zu Beginn von Planungsprozessen häufig genannt werden, benötigt große Erfahrung seitens des Planers. Der Bedarf an eindeutig verarbeitbaren Systemanforderungen wird also deutlich. Hierbei bedeutet ein steigender Grad an Formalität zwangsläufig eine leichtere Verarbeitbarkeit. Im Optimalfall liegen verlässliche, quantitative Anforderungen vor, die mit mathematisch-statistischen Mitteln verarbeitet werden können. Ein absteigender Grad an Formalität muss demnach mit adäquaten Methoden kompensiert werden. So finden z. B. Fuzzy-Logic-Systeme oder Scoring-Modelle häufig Anwendung in Planungsprozessen. Diese in ihrer Entscheidungslogik deutlich unschärferen Werkzeuge basieren auf vorher von Experten ermittelten Algorithmen zur Ergebnisbestimmung. Es kann also festgehalten

werden, dass eine Formalisierung der Planungsziele die Unterstützung des Planers durch verlässliche Werkzeuge ermöglicht und diesen im Planungsprozess entlastet.

2.2 Formale Prozessbeschreibung

Nach Festlegung von Aufgabenstellung und Zielsetzung erfolgt der Entwurf von Prozessvarianten zur Umsetzung der geforderten logistischen Aufgaben. Unter einem Prozess soll hierbei eine definierte Folge von Schritten zur Erreichung eines definierten logistischen Zieles, z. B. ein Transport zur Erzielung einer Ortsveränderung des Gutes, verstanden werden. Etablierte Formen der Prozessbeschreibung, wie ereignisgesteuerte Prozessketten oder Prozessgraphen, können dabei zur Darstellung von verzweigten, komplexen Abläufen genutzt werden. Die Schwachstelle dieser Darstellungsmethoden liegt in ihrer Semiformalität: So bleibt es dem Nutzer überlassen, durch verbale Beschreibung die Prozessabläufe zu bilden. Dies kann zu einem unterschiedlichen Verständnis der horizontalen Prozessgrenzen je nach Betrachter führen: Während ein Nutzer unter dem Begriff Transportprozess lediglich die Ortsveränderung der Objekte versteht, subsumiert ein anderer Betrachter auch die Aufnahme und Abgabe der Objekte. Gerade in interdisziplinären Planungsprojekten kann dabei die unterschiedliche Auffassung und Abgrenzung von Prozessen zu Schwierigkeiten bei der Ablaufbeschreibung eines Systems führen. Zu einer verlässlichen und eindeutigen Beschreibung und Parametrisierung einzelner Prozesse bedarf es daher einer klaren Abgrenzung der konsekutiven Abläufe, also der Einführung formal beschriebener Prozessgrenzen. Diese Problematik wird der VDI-Richtlinie 3682 [VDI 2005] aufgegriffen:

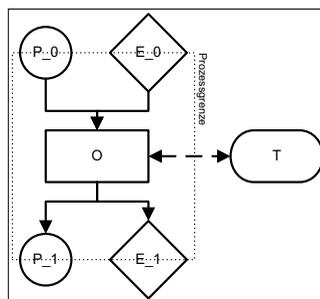


Abbildung 1: Grafische Beschreibung eines Prozesses in Anlehnung an [VDI 2005]

Die Autoren beschreiben Prozesse der chemischen und verfahrenstechnischen Industrie durch Produkt- (P_0) und Energiezustand (E_0) vor und nach der Prozessoperation (O) sowie durch zugeordnete technische Ressourcen (T) (Vgl.

Abbildung 1). Ein Prozess ist somit über seine Eingangs- und Ausgangszustände mit seinem Vorgänger und Nachfolger verbunden. Im Sinne einer klaren Prozessabgrenzung ist dieses Prinzip der Formalisierung auch auf logistische Abläufe anzuwenden.

Die Fixierung von Grenzen logistischer Prozesse findet bis jetzt kaum Beachtung. Vielmehr wird versucht, über die verbale Prozessbeschreibung Klarheit über die Abläufe zu schaffen.

Innerhalb eines Forschungsprojekts wurde daher am IFT eine Methodik zur formalen Beschreibung logistischer Abläufe entwickelt. Die Abläufe in logistischen Systemen sollen dadurch als alternierende Folge von Prozessen und Zuständen abbildbar sein, wobei Prozessen jeweils eine durchführende Ressource zugeordnet ist.

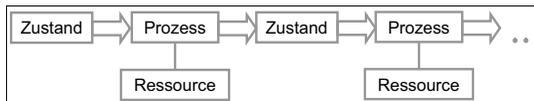


Abbildung 2: Ablaufbeschreibung in der erstellten Methodik mit Hilfe von Prozessen, Zuständen und Ressourcen

In Abbildung 3 findet sich hierzu ein modelliertes Beispiel: Auf Ebene der Prozesse transformiert das *Fördern* einen Eingangszustand in einen Ausgangszustand unter Nutzung einer Ressource – in diesem Falle eines Staplers. Hierbei verändert sich unter anderem der Ort der Transporteinheit von *Lagerplatz 17* zu *Lagerplatz 52*. Vor Beginn und nach Ende des Förderns ist die Transporteinheit *nicht aufgenommen*, also abgelegt am jeweiligen Lagerplatz. Diese Beschreibung ermöglicht eine klare Abgrenzung der Prozessinhalte und damit ein eindeutiges Prozessverständnis. Die Zustandsbeschreibung besteht dabei aus n statusbeschreibenden Elementen und soll daher im Folgenden als „Statusvektor“ bezeichnet werden. Dabei kann der Inhalt der Zustandsbeschreibung, also die Zusammensetzung der n Elemente, beliebig detailliert werden, um auch eine feinere Ablaufdarstellung zu ermöglichen.

So wurde im unteren Teil der Abbildung eine Darstellung des gleichen Ablaufes auf einer detaillierten Aktivitätsebene gewählt. Der Prozess *Fördern* lässt sich also in die Aktivitäten *Aufnehmen*, *Bewegen* und *Abgeben* untergliedern. Dabei zeigt sich, dass der Inhalt des Prozesses mit der Summe der Inhalte der einzelnen Aktivitäten übereinstimmen: Es erfolgt die Veränderung des Ortes von *Lagerplatz 17* nach *Lagerplatz 52*. Als Zwischenstatus können die Ergebnisse der Aktivitäten dienen: Durch *Aufnehmen* der TE bleibt der Ort gleich, jedoch ändert sich ihr Zustand von *nicht aufgenommen* zu *aufgenommen*. Nach *Bewegen* zum Zielort (*Lagerplatz 52*) ist die Transporteinheit immer noch aufgenommen. Dies ändert sich erst durch das

Abgeben am Zielort – wobei sich der Zustand wieder von *aufgenommen* in *nicht aufgenommen* ändert.

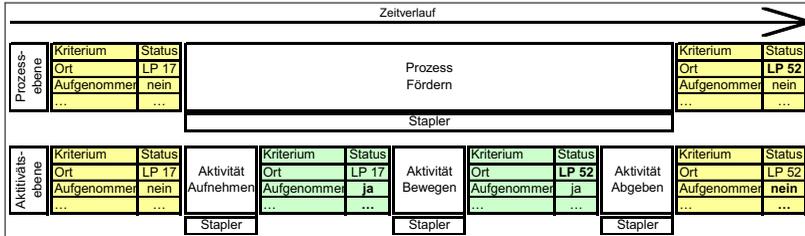


Abbildung 3: Modellierung am Beispiel

Wie in der Illustration angedeutet, lässt sich dieses Konzept formaler Prozessgrenzen beliebig erweitern. Dabei ist die Ableitung zustandsdefinierender Parameter eine zu lösende Aufgabe.

Als Kriterien können z. B. *Verpackung* (Spandexband, Folie, ...), *Kennzeichnung* (Barcode, RFID-Tag, ...) *Transporteinheitenebene* (Artikel, Blister, ...) aufgenommen werden. Dabei lässt sich aus der Änderung der Ausprägung eines Kriteriums eineindeutig auf die dazu durchgeführte Tätigkeit schließen. So verweist beispielsweise eine Änderung der „Verpackung“ von „Folie“ auf „nicht verpackt“ auf ein durchgeführtes Entpacken, etc. Die Nutzung von Statusangaben ist somit hinreichend zur Beschreibung von Prozessabläufen, da die verknüpfenden Prozesse aus den Veränderungen in den Statusvektoren abgeleitet werden können.

Das bedeutet, dass die Zahl der Elemente innerhalb der Statusbeschreibung gleich der Anzahl dadurch abbildbarer Prozesse ist. Diese Prozesse können als abstrakte Schablonen (d. h. als Referenzprozesse) zur Abbildung von Abläufen in logistischen Systemen genutzt werden.

In der Vergangenheit wurden verschiedene Ansätze zur Ermittlung von Referenzprozessen genutzt [vgl. exemplarisch Figgenger 2008]. Die dabei ermittelten Referenzprozesse dienen der abstrakten Beschreibung intralogistischer Systeme. In einem konkreten Anwendungsfall kann durch Verknüpfung unterschiedlicher Referenzprozesse, d. h. Schablonen, ein vorliegender Prozessablauf modelliert werden. Am IFT erfolgt gegenwärtig die Ermittlung ressourcenorientierter Referenzprozesse. Dies impliziert eine Festlegung der Prozessgrenzen nach den Fähigkeiten der dabei genutzten Ressourcen, so dass es zu einer Deckung der Anforderungen (Prozess) und der Fähigkeiten der durchführenden Betriebsmittel kommt. Am oben dargestellten Beispiel des Förderprozesses wird deutlich, dass die

eingesetzte Ressource (Stapler) alle Prozessinhalte (Aufnahmen, Bewegungen, Abgeben) abdeckt, somit also zur Durchführung der gewünschten Ortsveränderung genutzt werden kann.

Somit ermöglicht die formale Abgrenzung von Prozessen sowohl ein widerspruchsfreies Prozesscontrolling im Sinne einer Kennzahlenermittlung, als auch eine prozessadäquate Auswahl technischer Ressourcen (Betriebsmittel). Darüber hinaus wird erst durch feste Prozessgrenzen die datentechnische Verarbeitbarkeit des Prozessmodells gewährleistet.

Im Folgenden soll näher auf den Prozess der Ressourcenauswahl eingegangen werden.

2.3 Ressourcenbeschreibung und –auswahl

Wie bereits diskutiert unterteilen sich die gestellten Anforderungen an ein Logistiksystem in Anforderungen an das Gesamtsystem (z. B. geforderter Lieferservicegrad) sowie an dessen einzelne Prozesse (z. B. geforderte Ein- und Auslagerungsleistung) und ergeben sich unter anderem aus den vom System zu manipulierenden Gütern. Dem gegenüber stehen die technischen Fähigkeiten der bekannten Ressourcen, die sich ebenfalls auf Gut (z. B. Tragfähigkeit eines Bandförderers) und Prozess (z. B. maximale Ein- und Auslagerungsleistung eines Regalbediengerätes) beziehen und in ihrer Interaktion die Systemfähigkeiten determinieren. Den Input für die Planung intralogistischer Systeme bildet die Aufgabenstellung, bestehend aus Zielsetzungen und Nebenbedingungen. Anhand von formalen (z. B. Spielzeitberechnungen) und nicht-formalen (z. B. Erfahrung) Methoden, die in Vorgehensmodellen abgearbeitet werden, ordnet der Planer der Aufgabenstellung entsprechende Lösungsvarianten zu (z. B. Schubmaststapler für parametrisierten Förderprozess) und kombiniert diese zu einem funktionierenden Gesamtsystem. Im Bereich der nicht-formalen Methoden greift der Planer auf Erfahrungswissen zurück, das es in Katalogen von Regeln zu erfassen gilt. Bisherige Auswahlsystematiken finden sich beispielsweise bei [Fang 1996] zur Auswahl von Lagersystemen, [Fischer 1981] zur Bestimmung von Fördermitteln oder im Rahmen des Forschungsprojektes GroKoSys [o. V. 2009] zur Auswahl von Kommissioniersystemen. Diese Ansätze beschränken sich jedoch auf einzelne Teilbereiche innerbetrieblicher Logistik und sind demnach zu einer umfassenden und Funktionsbereich-übergreifenden Methodik auszubauen.

Die Auswahl von Ressourcen, also technischen Betriebsmitteln zur Erfüllung definierter logistischer Aufgaben, basiert sowohl auf qualitativen als auch auf quantitativen Entscheidungskriterien. So zählen zu den qualitativen Kriterien die

technischen Fähigkeiten der Ressourcen im Sinne einer Booleschen Bewertung: Welche Prozesse kann eine definierte Ressource ausführen? So ist ein handelsüblicher Handgabelhubwagen nicht in der Lage, Vertikalförderprozesse durchzuführen. Zu den quantitativen Kriterien zählt dann eine messbare Ausprägung der vorhandenen Fähigkeiten. Beispielhaft wäre bei einem Bandförderer der Bereich der einstellbaren horizontalen Fördergeschwindigkeit, bei einem Schubmaststapler u. a. Fahr- und Hubgeschwindigkeit zu erfassen.

Zur Sammlung, Verwaltung und Ausgabe dieser Daten je Materialflusselement sind herstellerübergreifende Kataloge anzulegen, auf die der Nutzer im Planungsprozess zugreifen kann. Anhand der technischen Möglichkeiten der hinterlegten Betriebsmittel sind diejenigen auszuwählen, die zu den ermittelten Anforderungen kompatibel sind. Unter den kompatiblen Ressourcen ist anschließend in einem festzulegenden Bewertungsprozess die geeignetste auszuwählen und in der weiteren Planung zu berücksichtigen. Zum Kostenvergleich zwischen verschiedenen Ressourcen sind monetäre Daten ebenfalls zu hinterlegen. Auch wenn in frühen Planungsphasen für gewöhnlich nicht ausreichend detaillierter, kostenbestimmender Planungsdaten zur Verfügung stehen, so können grobe Richtpreistabellen dennoch zur Ressourcenauswahl genutzt werden.

Anhand der vorher beschriebenen formalisierten Beschreibung von Anforderungen an System und Prozess ist somit die Auswahl geeigneter Ressourcen durch ein den Planer unterstützendes Assistenzsystem möglich, das auf Auswahlalgorithmen und einer Datenbank hinterlegter Ressourcen basiert. Eine vollständige Vernetzung von relevanten Planungsdaten und zugreifenden Anwendungen ist dabei notwendig. Dies bedarf einer eindeutigen programmtechnischen Schnittstellenbeschreibung. Die geforderte hersteller-übergreifende Hinterlegung der Ressourcen ermöglicht hierbei, dass lediglich eine Schnittstelle zum Ressourcenkatalog zu spezifizieren ist.

Für die Integration dieser hinterlegten Ressourcen ist eine flexible Detaillierung in Abhängigkeit von der Planungsaufgabe erforderlich. In einer Grobplanungsphase muss mit relativ abstrakten Ressourcenklassen gearbeitet werden, die jedoch in einer Feinplanung konkretisiert werden können. Es gilt also: Je weiter die Planung fortgeschritten ist, desto exakter wird auch die Ressourcenauswahl bis zur eindeutigen Typidentifizierung. Die Ressourcen können dazu in einzelne Klassen unterteilt werden, in die jeweils Funktionen und Datenstrukturen in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad integriert werden. Durch Auswahl einer Klasse kann auch das Anforderungsprofil einer Ressource aus dem hinterlegten Katalog spezifischer ausgewählt werden. Nicht hinterlegte Parameter werden – als nicht planungsrelevant – ignoriert. Falls diese in einem späteren Schritt allerdings integriert werden, kann die

Auswahl dadurch zielorientierter erfolgen, ohne jedoch strukturelle Änderungen im Modell zu erfordern.

3 Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurden verschiedene Vorschläge zur Vermeidung von Brüchen im Planungsprozess intralogistischer Systeme diskutiert.

Der dabei vorgestellte Ansatz ermöglicht die Entwicklung eines rechnergestützten Hilfsmittels, das in den unterschiedlichen Phasen der Logistikplanung den Planer unterstützen kann. Diese Einschränkung soll hier deutlich gemacht werden: Eine automatisierte Planung ist nach aktuellem Stand weder realistisch noch praxistauglich umsetzbar. Die hohe Variabilität im Planungsprozess, bezogen auf Planungsaufgaben, Planungsziele und logistische Komponenten sind hier Hinderungsgründe. Allein die Vielfalt förder technischer Speziallösungen würde die Lösungsvielfalt in unübersichtliche Dimensionen erweitern. Hinzu kommen Normen und Richtlinien, die in der Planung beachtet werden müssen, jedoch aufgrund ihrer Anzahl und Detailtiefe schwer in ein einzelnes elektronisches Planungstool implementierbar sind.

Letztlich dienen diese Ansätze, um das Vorgehen zur Planung logistischer Systeme strukturierter zu gestalten und formal abzusichern. Dabei steht der Nutzen für den Planer im Mittelpunkt, der insbesondere von der systematischen Erfassung von Anforderungen, der eindeutigen und rechnerverarbeitbaren Prozessbeschreibung und dem strukturierten Auswahlprozess technischer Ressourcen profitiert. Ziel dabei ist es, den Prozess der Ergebnisfindung für Planer und Kunden nachvollziehbar zu machen.

4 Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Forschungsvorhabens „RefPlan Logistik“. Dieses Projekt wird im Programm zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert.

Literatur

- [Fang 1996] Fang, D.: Entwicklung eines wissensbasierten Assistenzsystems für die Planung von Lagersystemen. Dortmund: Verlag Praxiswissen 1996, Hrsg.: A. Kuhn.
- [Figgenger 2008] Figgenger, O.: Beitrag zur Prozessstandardisierung in der Intralogistik. Dortmund: Verlag Praxiswissen 2008, Hrsg.: M. ten Hompel.
- [Fischer 1981] Fischer, W.: Planung von Transportsystemen für Stückgüter. Dissertation, Universität Stuttgart 1981.
- [Jung 2006] Jung, C.: Anforderungsklä rung in interdisziplinärer Entwicklungsumgebung. München: Verlag Dr. Hut 2006.
- [Ludewig, Lichter 2007] Ludewig, J.; Lichter, H.: Software Engineering. Heidelberg: dpunkt Verlag 2007.
- [o. V. 2009] GroKoSys: Modellbildung und Parametrierung von grossen Kommissioniersystemen hinsichtlich des Arbeitsbereiches. URL <http://www.fhnw.ch/technik/ibe/projekte/laufende-projekte/de/projekte/laufende-projekte/5fhnw_poster_grokoSYS.pdf>.
- [VDI 2005] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Richtlinie 3682 „Formalisierte Prozessbeschreibungen“. Berlin: Beuth-Verlag 2005.
- [Weilkiens 2008] Weilkiens, T.: Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design. Heidelberg: dpunkt Verlag 2008.

Toolgestützte effiziente Materialflussplanung

Dr.-Ing. Ingolf Meinhardt, Prof. Dr.-Ing. habil. Thorsten Schmidt
Technische Universität Dresden
Professur für Technische Logistik

Abstract:

Die optimale Gestaltung logistischer Systeme und Prozesse hat eine immens große Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen. Die effiziente Dimensionierung von Materialflusssystemen ist für Planer, Hersteller und Betreiber solcher Anlagen daher von grundsätzlicher Bedeutung. Für einzelne Funktionen von Materialflusssystemen können analytische Verfahren, Näherungslösungen, Ersatzmodelle wie Polynome und neuronale Netze oder zeitdiskrete Verfahren genutzt werden, um das Systemverhalten nachzubilden. Mit dem „Layout-Planning-Tool (LP-Tool)“ entstand eine Software-Infrastruktur, mit der sich diese Berechnungsverfahren und -modelle in die Systemplanung als Bausteine integrieren lassen.

The optimal design of logistic systems and processes has an immense importance for profitability and competitiveness of enterprises. An efficient dimensioning of material flow systems has fundamental importance for planners, manufacturers and operators of such facilities. For individual functions of material flow systems there are analytic procedures, approximation solutions, analogous models such as polynomials and neural nets or time-discrete procedures, which can be used to calculate system behaviour. With the „Layout Planning Tool (LP-Tool)“ a software infrastructure arose, which allows to integrate these calculation methods and models as components into the system planning.

1 Motivation

Materialflusssysteme realisieren die logistischen Prozesse des Transportierens, Lagerns, Sammelns und Verteilens von Gütern. Ihre technischen Realisierungen sind so vielfältig wie ihre Einsatzgebiete und die von ihnen zu erbringenden Ziele. Mit der Planung und Dimensionierung derartiger Systeme werden Funktionalität, Layout und Ausstattung festgelegt, eine Steuerungsstrategie wird entworfen und sorgt für die Koordinierung der logistischen Prozesse. Alles zusammen führt dazu, dass die Anlage später im Betrieb bestimmte Leistungskennzahlen (Durchsatz, Transportzeit, Sortierleistung, Verfügbarkeit usw.) erreichen kann.

Die Planung erfolgt in einzelnen Schritten und wird teilweise wiederholt durchlaufen. Dabei nimmt die Detaillierung jeweils weiter zu. Ausgehend von einer groben Gliederung der Anlage in Funktionsbereiche, deren Ausstattung und Topologie (Anzahl und

Verknüpfung mittels Transportstrecken) wird schrittweise ein Anlagenlayout entwickelt, für das am Ende mit Hilfe eines Simulationssystems eine Steuerung entworfen und am Computermodell der Gesamtanlage erprobt werden kann.

In der Konzeptions- oder Grobplanungsphase werden alle grundlegenden Entscheidungen zur Gestaltung einer Anlage getroffen. Einerseits sind weitreichende Änderungen an dieser Stelle noch am einfachsten möglich – andererseits haben auch nur kleine Planungsfehler in diesem Stadium später erhebliche Konsequenzen. Erschwerend kommt hinzu, dass erst viel später – durch die Simulation in der Feinplanungsphase – verlässliche Informationen über das dynamische Anlagenverhalten verfügbar werden.

Es werden mögliche Varianten für technische Realisierungen und zugehörige Netztopologien entwickelt. Sie werden schließlich bewertet, um Vorzüge und Nachteile vergleichen zu können (auch unter Kostenaspekten).

Für die Vorzugsvariante ist ein Funktionsnachweis zu erbringen. Das geschieht üblicherweise durch eine statische Betrachtung von Durchsatz und Auslastung der einzelnen Komponenten unter der Annahme bestimmter Lastszenarien. Das erweist sich in der Praxis auch heute noch trotz leistungsfähiger IT-Systeme und Software als recht aufwändig, weil jedes zu planende System eine individuelle Struktur und Spezifikation aufweist und grob vorliegende Ausgangsdaten (z. B. Stück pro Jahr) aufbereitet, in Bewegungsdaten transformiert (Materialflüsse) und in Bezug zum Layout gebracht werden müssen (Wegsuche).

Mit dem Layout-Planning-Tool (LP-Tool) entstand nunmehr eine Software-Infrastruktur, mit der Anlagenmodelle entwickelt und mit den genannten statischen Berechnungen überprüft werden können. Daneben lassen sich aber auch weitergehende Betrachtungen zum dynamischen Systemverhalten einbinden (vgl. MEINHARDT (2006)).

In SCHULZE (2000) und SCHLEYER (2007) werden Lösungen entwickelt, wie Ersatzmodelle (Polynome, neuronale Netze, zeitdiskrete Modellierung) zur Dimensionierung von Komponenten von Materialflusssystemen genutzt werden können. Dabei geht es vor allem um lokale Warteschlangen und das Verhalten der Einzelkomponenten. MARKWARDT (2003) hat gezeigt, dass durch Verknüpfung von Einzelkomponenten zu einem hybriden Modell der Informationsaustausch zwischen diesen genutzt werden kann, um das dynamische Verhalten des Gesamtsystems zu analysieren.

Das LP-Tool ist vorrangig auf einen Einsatz im Rahmen der Grobplanung orientiert: Der Aufwand für den Entwurf von Varianten wird durch die vorgefertigten Bausteine auf ein Minimum reduziert, gleichzeitig ist aber eine Parametrierung und Detaillierung der Komponenten möglich, die es erlaubt, die o.g. statischen und dynamischen Betrachtung vorzunehmen. Ziel ist es, dem Planer die bestmögliche Unterstützung bei der Bewertung seiner Planungsentscheidungen zu geben. Ihm sollen schon bei der

Konzeption Abschätzungen zum dynamischen Anlagenverhalten (z. B. auf Grund der Arbeitsweise von Einzelkomponenten wie Verteilungs- oder Zusammenführungselementen) verfügbar gemacht werden, die traditionell erst viel später die Simulation liefert. Für die Grobplanung ist es dabei nicht relevant, Ergebnisse mit hoher Genauigkeit unter exakter Berücksichtigung aller Einflussgrößen zu erhalten, vielmehr geht es um qualitative Aussagen, um frühzeitig mögliche Engpässe aufzuzeigen. Allein der Hinweis auf hohe Auslastungen von kritischen Bereichen und den damit verbundenen großen Warteschlangen ist für die Variantenbewertung äußerst wichtig, wird in der bisherigen Planungspraxis aber zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorgenommen.

2 Modellbildung

2.1 Prinzipien der Modellierung

Da sich die Zielstellung für den Einsatz des LP-Tools vorwiegend auf Fragen des Funktionsnachweises komplexerer Systeme orientiert, ist eine räumlich exakte oder gar maßstäbliche Anordnung der einzelnen Elemente nicht zwingend erforderlich. Die Herangehensweise ist mehr auf eine Strukturierung des Systems in einzelne Komponenten und deren Dimensionierung einschließlich Funktionsnachweis orientiert.

Grundsätzlich erfolgt die Modellierung als gerichteter Graph. Ein Knoten ist dabei eine Komponente des Materialflusssystems (im Folgenden als Baustein bezeichnet), und die Kanten des Graphen bilden die Förderstrecken (Verbindungen). Die Richtung einer Kante entspricht der Transport- oder Förderrichtung, so dass die Verbindung der Bausteine eine Vorgänger-Nachfolger-Relation beschreibt. Eine Folge von Kanten bildet einen Weg von einem Anfangsknoten zu einem Endknoten. Materialströme werden als spezielle Wege abgebildet, die die Bausteintypen Quelle und Senke miteinander verbinden und über die eine bestimmte Gütermenge pro Zeit bewegt wird.

Vergleicht man den Aufbau von existierenden oder in Planung befindlichen Materialflusssystemen, so lassen sich (trotz aller Unterschiede im Transportgut, verwendeter Technik, konkretem Layout und Abläufen) einige Gemeinsamkeiten erkennen.

Das führte letztendlich dazu, dass für die Modellierung ein hierarchischer Ansatz gewählt wurde. Dabei werden für die Knoten unterschiedliche Abstraktionen verwendet.

- **Komponente:** Als Komponente wird eine mechanische Einzelbaugruppe verstanden, die im Allgemeinen nur in Verbindung mit anderen Komponenten eine Funktion im Materialfluss übernehmen kann. So ist das Fahrwerk eines Regalbediengerätes nur in Verbindung mit dem Hubwerk, der Lastaufnahmevorrichtung, der Steuerung usw. in der Lage, die Funktionen Einlagern und Auslagern von Ladeeinheiten zu realisieren. Gleichwohl ist die Dimensionierung dieser Komponenten entscheidend für den Funktions- und Leistungsnachweis des Gesamtsystems.

Für die Modellierung wird diese Ebene allerdings nicht separat abgebildet. Es ist ausreichend, die leistungsrelevanten Kennwerte der Komponenten an der übergeordneten Ebene Funktionsgruppe als individuelle Parameter bereitzustellen.

- **Funktionsgruppe:** Eine Funktionsgruppe beschreibt eine einzelne Komponente oder einen Verbund von Komponenten, die eine Funktion im Materialfluss in definierter Weise realisiert und dadurch eine kalkulierbare Leistungsaussage bezüglich der Hauptkomponente zulässt (z. B. Regalbediengerät, Rollenhubtisch mit Zu- und Abförderstrecke).
- **Sub-System:** Sub-Systeme bestehen aus einer Gruppe zusammen gehöriger Funktionsgruppen und realisieren Grundfunktionen intralogistischer Systeme, z. B. ein Hochregallager, ein fahrerloses Transportsystem (FTS), eine Sortieranlage oder ähnliches. Sub-Systeme können häufig aus einer Menge vordefinierter Grundstrukturen (Layoutvarianten) generiert werden. Im Allgemeinen sind aber individuelle Anpassungen erforderlich.
- **System:** Das System ist die höchste Abstraktionsebene und beschreibt die Gesamtanlage. Ein System wird aus Sub-Systemen zusammengesetzt. Die Größe eines Systems ist je nach Betrachtungshorizont unterschiedlich, neben komplexen Lösungen mit erheblicher Ausdehnung (z. B. Gepäckförderanlagen in Flughäfen) können auch relativ kleine und überschaubare Anlagen (z. B. Lagervorzone auf Basis konventioneller Rollen-/Kettenförderer) als System betrachtet werden.

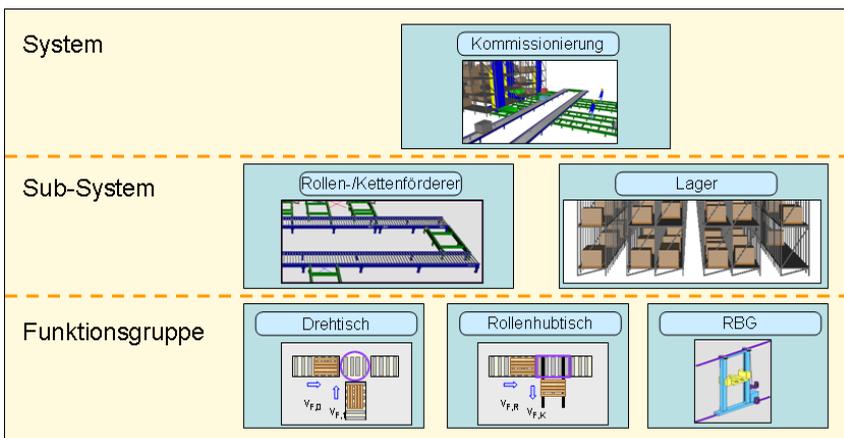


Abbildung 1: Modellierung als dreistufige Hierarchie

2.2 Materialströme

Zur Realisierung eines Materialstroms wird ein Weg durch den Graphen benötigt, um von einer Quelle zu einer Senke zu gelangen. Dieser Weg besteht aus einer Sequenz von Kanten, also Verbindungen zwischen Bausteinen. Zwischen dem Ende einer Verbindung und dem Beginn der nächsten Verbindung wird ein Baustein von dessen Eingang E_i zum Ausgang A_j durchlaufen. Ist dessen innere Struktur bekannt, so ergibt sich im Innern des Bausteins ein lokaler Weg (Abbildung 2). Je nach Detaillierungsgrad des Modells lassen sich demnach Materialströme auf der Basis von Sub-Systemen oder Funktionsgruppen darstellen.

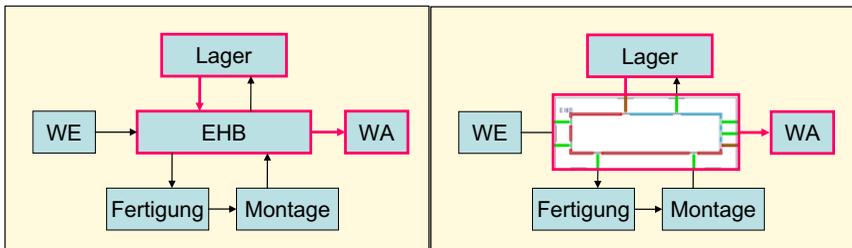


Abbildung 2: Materialstrom „Lager → WA“ auf Sub-System-Ebene (links). Die Detaillierung des Bausteins „EHB“ führt zu einem lokalen Materialstrom auf der Funktionsgruppen-Ebene (rechts)

Nicht immer ist jedoch ein direkter oder kurzer Weg zum Ziel gesucht, sondern es sind Zwischenziele zu passieren. Bei Gepäckförderanlagen sind beispielsweise verschiedene Sicherheitsstufen zu durchlaufen, wobei deren Anfahrwahrscheinlichkeit p_k mit zunehmender Stufe abnimmt. In diesem Fall werden jeweils zwei Teilströme gebildet, wobei ein Teilstrom mit Wahrscheinlichkeit p_k das Zwischenziel k ansteuert und der andere mit Wahrscheinlichkeit $1 - p_k$ nicht.

Auf Grund einer praktikablen Handhabung erfolgt die Definition von Materialströmen auf Ebene der Sub-Systeme, denn nur dafür sind in einer frühen Planungsphase auch Daten verfügbar. Daraus werden dann entsprechende Teilströme ermittelt, wobei die Kombination aller Quellen und Senken auf der Ebene der Funktionsgruppen betrachtet wird. Steht beispielsweise die Anforderung, 160 Paletten pro Stunde aus dem Lager (8 Regalgassen) zum Warenausgang (4 Ladestellen) zu bringen, so entstehen daraus $8 \times 4 = 32$ Teilströme mit je $160 / 32 = 5$ Paletten pro Stunde von jeder Gasse zu jeder Ladestelle. Sind zusätzlich noch k Zwischenziele zu berücksichtigen, so vergrößert sich die Zahl der Teilströme um maximal 2^k , wenn für die Anfahrwahrscheinlichkeit $0 < p_k < 1$ gilt.

2.3 Dimensionierung

Unter Dimensionierung soll die Festlegung bzw. Auslegung von Komponenten intra-logistischer Systeme verstanden werden. Eine geplante Systemleistung muss zu-

nächst durch die enthaltenen Funktionsgruppen und Komponenten erbracht werden. Üblicherweise umfasst das Dimensionieren aber nicht nur das Festlegen der Anzahl an Komponenten sowie deren technische, leistungsbestimmende Parameter (z. B. Fördergeschwindigkeit, Beschleunigung), sondern muss ausgehend vom Prozessablauf auch die System-Struktur sowie die Regeln für die Prozesssteuerung definieren. Dabei lassen sich zwei Vorgehensweisen erkennen:

- Top-down: ist die übliche Vorgehensweise, um eine geplante Anlagen- bzw. Systemleistung zu realisieren und bedeutet, dass auf Grund der Systemanforderung die Anforderungen für die Sub-Systeme festgelegt werden. Diese wiederum bestimmen die Leistungsanforderungen für die Funktionsgruppen und führen zur Dimensionierung der Komponenten.
- Bottom-up: Mögliche Leistungen von Funktionsgruppen werden auf die Sub-Systeme und von diesen wiederum auf das Gesamtsystem extrapoliert. Auf diese Weise kann eine maximale Systemleistung ermittelt und mit den Anforderungen verglichen werden.

Das Transformieren der Systemanforderungen bis hin auf die Ebene der Funktionsgruppen stellt im Rahmen der Grobplanung einen äußerst komplexen und weitgehend kreativen Prozess dar. Meist bestehen sehr unterschiedliche Alternativen für eine bestimmte Problemstellung. So können verschiedene Sub-Systeme für das Transportieren (Stetigförderer, Stapler, Elektrohängebahn o. ä.) oder Lagern (Bodenlagerung, Durchfahrregal, Hochregallager o. ä.) geeignet sein, die aber oftmals nicht in beliebiger Weise miteinander kombiniert werden können (zumindest nicht ohne zusätzlichen Aufwand). Hinzu kommen oft weitere Restriktionen durch vorhandene Gebäude, Einbauten, Produktionsanlagen, begrenzte Deckentraglasten, Sicherheitsanforderungen usw., die ebenfalls bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden müssen.

Das entwickelte Groblayout ist schließlich hinsichtlich der Erfüllung der Systemanforderungen zu überprüfen. Für Intralogistiksysteme bedeutet dies in aller Regel eine Durchsatzbetrachtung, die sich aber oftmals als nicht trivial erweist:

- Es gibt meist mehrere Materialströme mit unterschiedlichen Quellen und Senken. Die Zuordnung, welche Funktionsgruppen durch diese einzelnen Materialströme belastet werden, ist im Allgemeinen nicht schwierig, dafür aber sehr aufwändig zu ermitteln.
- Oft ist bekannt, dass sich einzelne Materialströme mit bestimmten prozentualen Anteilen auf unterschiedliche „Zwischenziele“ verteilen – es entstehen dann Materialteilströme, die den Aufwand für obige Zuordnung vervielfachen.
- Oftmals sind verschiedene Lastszenarien zu betrachten: In den Gepäckförderanlagen großer Flughäfen findet man in den frühen Vormittagstunden einen „departure peak“, d.h. es fliegen in dieser Zeit überdurchschnittlich viele Rei-

sende ab: Der Strom an Gepäckstücken vom Check-in zur Verladung in die Flugzeuge ist in dieser Zeit deutlich größer. Gegen Abend kommen dagegen deutlich mehr Reisende an, man spricht dann vom „arrival peak“. In beiden Szenarien kommt es immer wieder zu kurzzeitig starken Belastungen der Gepäckförderanlage, allerdings in entgegengesetzter Richtung.

- Ist der Transport nur mit Hilfe zusätzlicher Transportmittel (z. B. einem Fahrzeug, einem Gehänge einer EHB oder den Trays für das Gepäck auf Flughäfen) möglich, ist neben dem eigentlichen Materialstrom auch noch ein Strom von leeren Transportmitteln in die Gegenrichtung zu betrachten. Im operativen Betrieb sorgt ein Leerwagen-Management dafür, dass Leerfahrzeuge neue Transportaufträge nach definierten Regeln (z. B. kürzester Weg) zugewiesen werden und so eine Optimierung erfolgt. Generell kann aber angenommen werden, dass für jede Gutbewegung auch eine entsprechende Leerfahrt erforderlich ist und dies bereits bei der Planung berücksichtigt werden muss.

Über Durchsätze werden in aller Regel nur Mittelwerte betrachtet. Selbst in speziellen Lastszenarien wird nur beurteilt, ob eine bestimmte Menge pro Zeiteinheit einen Bereich passieren kann. Es ist jedoch bekannt, dass Schwankungen in der Ankunftszeit und der Bedienzeit zu Warteschlangen führen. Diese zusätzliche Wartezeit führt dazu, dass die gesamte Transportzeit von der Quelle zur Senke größer wird. Damit einher geht die längere Nutzung von Ressourcen (Fahrzeugen) für einen Transport, so dass eventuell die Leistungsfähigkeit des Systems reduziert wird, weil Fahrzeuge nicht rechtzeitig frei werden.

2.4 Parametrierung

Entsprechend der Festlegung realisieren Funktionsgruppen eine Funktion im Materialfluss in definierter Weise. So sind die Funktionsgruppen „Drehtisch“ und „Rollenhubtisch“ als Elemente für die Verzweigung oder Zusammenführung von Materialströmen einsetzbar. Sie unterscheiden sich technisch vor allem hinsichtlich der Art der Transferbewegung (rotatorisch bzw. translatorisch). Damit ergeben sich Unterschiede auf den Bewegungsablauf und die Bewegung der Transporteinheit, aber auch auf die Bestimmung der Grenzleistung dieser Elemente.

Drehtisch: Die Transfereinrichtung führt zu einer Änderung der Bewegungsrichtung, indem die Transporteinheit selbst in die gewünschte Richtung gedreht wird. Ein- und Ausfahrt erfolgen stets in Längsrichtung. Gutströme aus beiden Richtungen kommen zwar mit unterschiedlicher Intensität, aber gleichen Mindestabständen an. Die Zeit für das Einfahren in die Transfereinrichtung $t_{tr, Ein}$ sowie das Ausfahren aus der Transfereinrichtung $t_{tr, Aus}$ ist richtungsunabhängig und stets gleich. Die Richtungsänderung



selbst erfolgt durch eine Rotation und dauert jeweils t_{Dreh} . Nach der Ausfahrt muss der Tisch in die Ausgangsstellung zurückgedreht werden.

Rollenhubtisch: Die Transfereinrichtung bewirkt eine Änderung der Ausrichtung der Transporteinheit relativ zur Transportrichtung (Einfahrt in Längsrichtung, Ausfahrt geradeaus in Längs- oder seitlich in Querrichtung). Es ist von unterschiedlichen Mindestankunftsabständen sowie richtungsabhängig von unterschiedlichen Ein- und Ausfahrtszeiten $t_{tr, Ein1}$ und $t_{tr, Ein2}$ bzw. $t_{tr, Aus1}$ und $t_{tr, Aus2}$ auszugehen. Zusätzlich ist Zeit für das Heben und Senken des Tisches zu berücksichtigen.



Die Dimensionierung muss diese Unterschiede im Verhalten auch in individuellen technischen Parametern und Berechnungsmethoden berücksichtigen. Die Leistungsbemessung erfolgt in erster Linie auf der Basis von Spielzeiten, wobei für jeden Betriebsmodus (Durchfahrt, Abbiegen) die entsprechenden Einzelzeiten summiert werden. Für die Leistungsbewertung einer derartigen Funktionsgruppe sind diese Zeiten mit den entsprechenden Häufigkeiten zu multiplizieren.

Verallgemeinert man dieses Vorgehen, so ergeben sich im Wesentlichen vier Gruppen von Parametern für die Funktionsgruppen:

- Individuelle technische oder prozessbezogene Leistungsparameter.
 - Für den Drehtisch könnten dies zwei Zeiten (Drehzeit t_{Dreh} und Ein- und Ausfahrzeit t_{Ein}) sein. Es wäre aber auch denkbar, die Ein- und Ausfahrzeiten zu berechnen, dazu wären dann die Parameter Einfahrtsweg s_{Ein} , Fördergeschwindigkeit v_F und Beschleunigung a_F erforderlich.
 - Für den Rollenhubtisch sind drei Zeiten erforderlich: Hub-/Senkzeit t_{HS} und richtungsabhängige Ein- und Ausfahrzeiten t_{Ein1} und t_{Ein2}
- Eine lokale Transportmatrix für die Abbildung der internen Verbindung zwischen den Ein- und Ausgängen des Elements. Sie dient der Beschreibung der Materialströme innerhalb des Bausteins. Ihre Größe wird durch die Anzahl der Ein- und Ausgänge bestimmt.
- Flussgrößen zur Beschreibung der ankommenden und abgehenden Materialströme. Neben der Intensität (Ankunftsrate λ) und Variabilität (Schwankung der zeitlichen Abstände, darstellbar als Variationskoeffizient c) sollte auch ein zeitlicher Mindestabstand t_{mind} berücksichtigt werden.
- Im Ergebnis der Berechnungen können bedientheoretische Aussagen (Mittelwerte, Quantile, Verteilung) zu Warteschlangen oder Wartezeiten verwaltet werden, um z. B. System-Durchlaufzeiten zu ermitteln.

Die lokale Transportmatrix ergibt sich auf Grund der Belastung des Systems mit Materialströmen. Es werden jeweils Sequenzen von Funktionsgruppen von einer Quelle zu einer Senke durchlaufen und wegen deren internen Struktur jeweils bestimmte Betriebsmodi zugeordnet.

Eingangs-Flussgrößen werden durch die Funktionsgruppen in Ausgangs-Flussgrößen transformiert: Zusammenführungen beispielsweise erhöhen die Intensität des Flusses und verringern im Allgemeinen dessen Variabilität, weil Lücken im Ankunftsstrom aufgefüllt werden können. Sie werden prinzipiell durch die Abgangsströme der Vorgängerelemente bestimmt. Nur wo diese fehlen (Systemquellen), sind Angaben vom Nutzer erforderlich.

Für Sub-Systeme ist prinzipiell eine gleichartige Parametrierung vorhanden, wobei aber teilweise eine andere Verwendung der Parameter erfolgt. Sie werden zum Teil genutzt, um für das gesamte Sub-System gültige Parameter zu definieren und an die enthaltenen Funktionsgruppen zu übergeben.

Grundsätzlich gilt, dass die Leistungscharakteristik des Sub-Systems durch die enthaltenen Funktionsgruppen bestimmt wird: Ist beispielsweise eine Funktionsgruppe überlastet, so gilt auch das Sub-System als überlastet. Darüber hinaus können weitere Berechnungen erfolgen. Für ein Sub-System „EHB“ zum Beispiel ist der Transportbedarf in der lokalen Transportmatrix bekannt und kann (um notwendige Leerfahrten ergänzt) im Zusammenhang mit individuellen technischen Parametern zur Ermittlung der erforderlichen (statischen) Fahrzeuganzahl verwendet werden. Voraussetzung dafür ist aber, dass entweder das Layout so detailliert abgebildet ist, dass auf Grund der Anordnung der Elemente die Transportentfernungen mit ausreichender Genauigkeit ermittelbar sind, oder aber weitere individuelle Parameter vorhanden sind mit Angabe zu den Entfernungen zu benachbarten Elementen. Über technische Parameter (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Positionier- und Schaltzeiten usw.) lassen sich daraus Fahrt- und Spielzeiten ermitteln.

3 Aufbau des Layout-Planning-Tools

3.1 Übersicht

Das LP-Tool besitzt eine grafische Nutzeroberfläche (Abbildung 3) und ist in seiner Bedienung an weit verbreitete Systeme (Microsoft Office, AutoCAD) angelehnt.

Es besteht im linken Teil aus einer Zeichenfläche (Modell-Editor), im rechten Teil können verschiedene Datensichten (Modellstruktur, Materialfluss-Definition, Status-Information) ausgewählt werden.

Die Arbeit erfolgt interaktiv, zulässige Aktionen werden über ein Kontextmenü des angeklickten Objekts (Funktionsgruppe, Sub-System, System, Verbindung, Materialstrom) angezeigt.

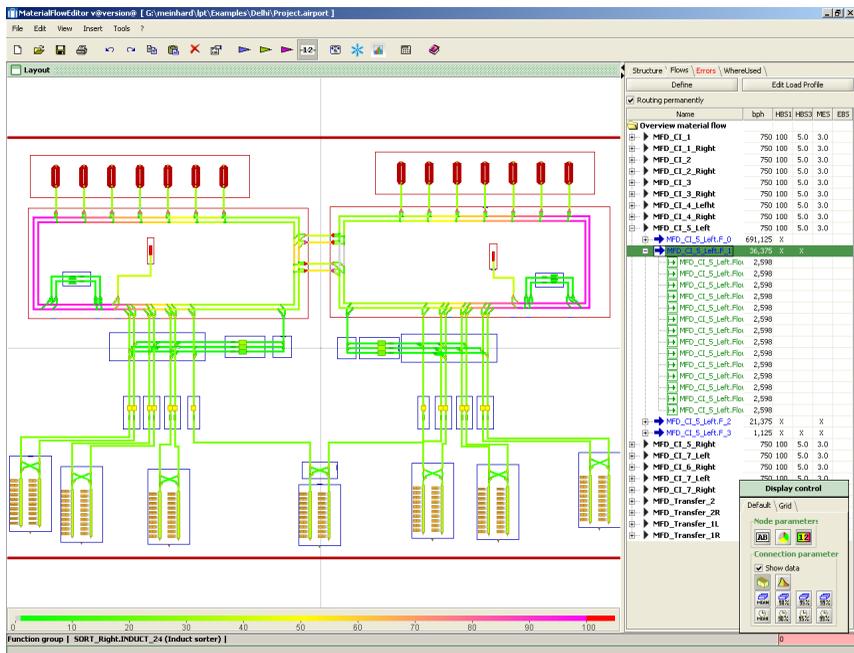


Abbildung 3: Screenshot LP-Tool

3.2 Baustein- und Designbibliothek

Alle Bausteine werden in einer externen Bausteinbibliothek verwaltet. Ziel ist die Sammlung, Verwaltung und Bereitstellung von Informationen über die vorhandenen Bausteine. Die Beschreibung umfasst allgemeine Informationen (Funktion, Restriktionen), Definition von Größe, Form und Farbe (für die Visualisierung), Anzahl und Lage der Bausteineingänge und -ausgänge sowie die Beschreibung der Baustein-Parameter. Die Einbindung ins Tool erfolgt über die Angabe eines Verweises auf die Implementierung.

Durch die Auslagerung dieser Informationen in eine externe Bibliothek wird eine offene und erweiterbare Struktur des Tools ermöglicht: Die Bibliothek kann in einfacher Weise um neue Bausteine erweitert werden, es sind dann lediglich die individuellen Berechnungen in einer neuen Klasse zu implementieren, wobei Eingangsdaten über die internen Baustein-Schnittstellen bereitgestellt werden und Ergebnisse in entsprechende Weise abgeleitet werden müssen.

Für eine Spezialapplikation des LP-Tools für Gepäckförderanlagen wurde eine eigenständige Bausteinbibliothek entwickelt. Sie enthält spezielle Modelle für Funktionsgruppen und Sub-Systeme eines Herstellers derartiger Systeme. So gibt es bei-

spielsweise die Sub-Systeme „Check-in“ und „Baggage Reclaim“, die die Schnittstelle zwischen Passagier und Gepäckfördersystem bilden. Untersetzt werden sie durch spezielle Funktionsgruppen, die weitgehend aus konventionellen Fördertechnikkomponenten bestehen. Die Anordnung und Anzahl dieser Komponenten (z. B. Taktbänder, Lichtschranken usw.) bestimmen maßgeblich die Grenzleistung dieser Funktionsgruppen.

Neben dieser formalisierten Darstellung der Bausteine gibt es für Sub-Systeme eine weitere Bibliothek. Sie enthält eine Sammlung von Designs (Anordnungsvarianten) für Funktionsgruppen. Die Nutzung dieser Designs erlaubt es, während der Modellierung unterschiedliche Layouts für ein Subsystem in einfacher Weise zu erzeugen (Abbildung 4). Diese Designs sollen lediglich die Modellierung erleichtern, die erzeugten Layouts können in beliebiger Weise editiert werden, um modellspezifische Anpassungen oder Sonderlösungen abzubilden.

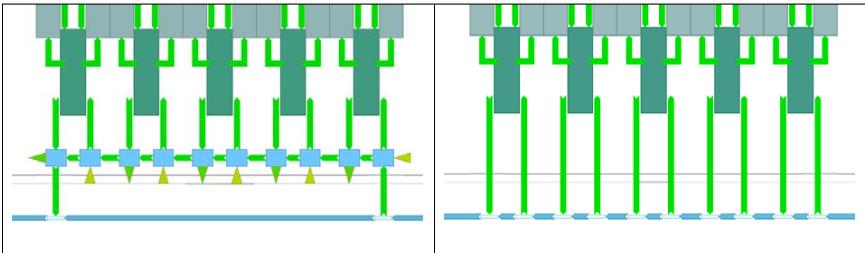


Abbildung 4: Designs im Sub-System Hochregallager: Links mit Rollenhubtischen in der Vorzone und zentraler Anbindung an eine EHB, rechts mit Haltestellen der EHB an jeder Regalgasse

3.3 Berechnungen

Berechnungen erfolgen jeweils in den Bausteinen, Verbindungen dienen lediglich der Informationsübertragung. Sie nehmen Ergebnisse aus den Vorgänger-Bausteinen auf und übergeben sie an den Nachfolger.

Generell erfolgt die Berechnung nach dem Bottom-Up-Prinzip: Zuerst werden die Berechnungen für die Funktionsgruppen vorgenommen, dann für die Sub-Systeme und abschließend für das Gesamt-System.

In einem ersten Schritt werden die Eingangsdaten aufbereitet und an die allgemeine Modell-Datenstruktur angepasst. Aus den baustein-spezifischen Parametern werden Spiel-, Belegungs-, Fahrzeiten o. ä. berechnet, mit denen Durchsatz und Auslastung bestimmt werden können. Außerdem erfolgt eine Überprüfung, ob die dem Berechnungsmodell zu Grunde liegenden Eingangsgrößen im zugehörigen Definitionsbereich liegen (für auf Bedienmodellen basierten Rechnungen bedeutet dies insbesondere, dass für die Auslastung gelten muss $0 \leq \rho \leq 1$).

Da die Modellierung von Materialflusssystemen meist zu zyklischen Graphen führt, werden die weiteren Berechnungen gegebenenfalls mehrfach vorgenommen. In einem ersten Durchlauf wird für die Variabilität der Flussgröße, so fern diese noch nicht bekannt ist, eine Annahme getroffen. Sie fließt als Eingangsgröße der ankommenden Ströme in die Berechnungen ein und wird für die abgehenden Ströme ermittelt. Mit den geänderten Werten werden in weiteren Durchläufen Verbesserungen erzielt. Bereits nach drei bis fünf Durchläufen ändern sich die Größen praktisch nicht mehr.

Im Weiteren können für jeden Baustein zusätzliche, individuelle Rechnungen integriert werden. Abbildung 5 zeigt einen Überblick über einige implementierte Verfahren.



Abbildung 5: Bausteinspezifische Berechnungen

Zu den Grundlagen gehören dabei u. a. kinematische Betrachtungen zum Bewegungsverhalten (speziell von Fahrzeugen wie Regalbediengeräten oder EHB-Gehängen) für die Fahrtzeitberechnung oder Heuristiken zur Ermittlung von erforderlichen Leerfahrten in Fahrzeugsystemen. Zu den wichtigsten Richtlinien im Bereich Hochregallager zählt FEM_9.851 (06.2003).

Werden Berechnungen zu Warteschlangen vorgenommen, beschränkt sich dies nicht nur auf bekannte Kennwerte wie Mittelwert und Varianz. Es lassen sich auch Quantile bestimmen. Das geschieht häufig auf der Basis von Bedienmodellen. In einigen Fällen können aber die bekannten Bedienmodelle keine Anwendung finden: So entsteht z. B. bei einer gemeinsamen Abfertigung von zwei Materialströmen (Zusammenführungen) in Abhängigkeit von der gewählten Steuerung entweder genau eine Warteschlange (eine Richtung hat absolute Vorfahrt und hält niemals an: Einschleusung auf einen Sorter), oder es entsteht vor jedem Bausteineingang eine Warteschlange (Abfertigung nach dem First-In-First-Out-Prinzip, relative Vorfahrt). In diesem Fall können über andere Modelle (z. B. neuronale Netze nach MARKWARDT (2003)) Abschätzungen vorgenommen werden. Die Dimensionierung der Vorzone von Hochregallagern erfolgt über ein Polynom nach SCHULZE (2000).

Die Ergebnisse lassen sich in numerischer Form oder als Diagramm darstellen (Abbildung 6). Für die Überprüfung von Auslastungen wurde speziell ein so genannter „Wärmebild“-Modus entwickelt, der über eine Farbskala die Baustein- und Streckenauslastung in einen Farbwert umwandelt. Höhere Rotanteile sollen auf die kritischen Komponenten verweisen.

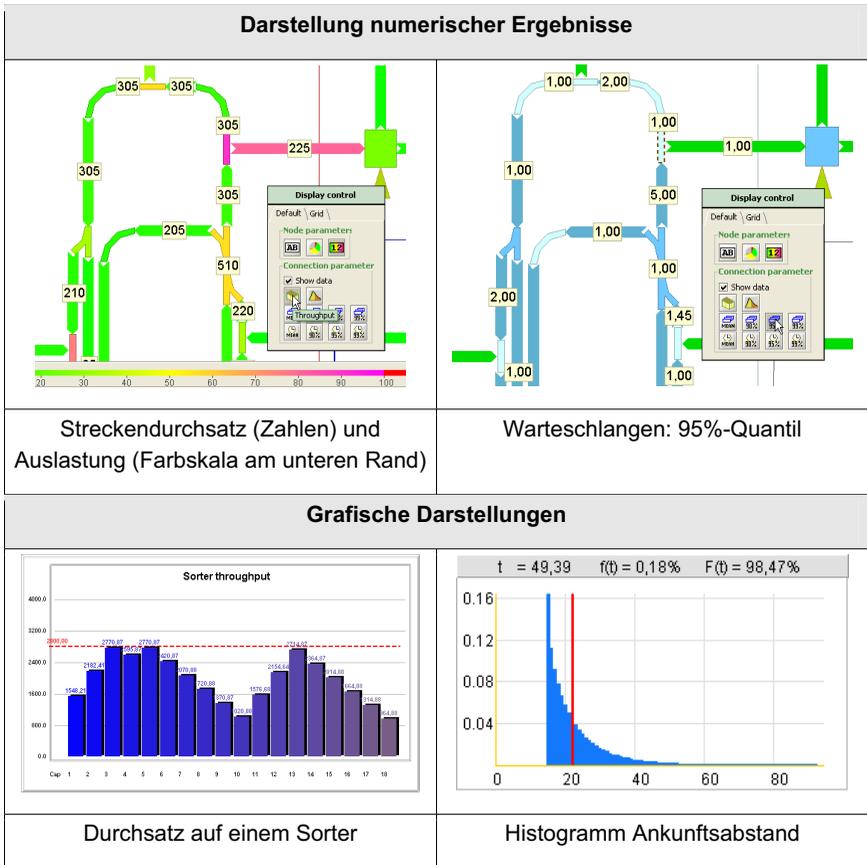


Abbildung 6: Darstellung von Ergebnissen

4 Anwendungsbeispiele

4.1 Kommissioniersystem

Ein kleines Hochregallager (3 Regalbediengeräte) und zwei Kommissionierplätze werden durch ein Transportsystem verbunden. Die Simulation basiert auf einer detaillierten, layoutbasierten Modellierung: Die einzelnen Fördererabschnitte beschreiben mit ihren Abmessungen den Transportweg. Die Bewegung der Transporteinheiten wird in ihrem zeitlichen Ablauf durch Geschwindigkeiten, Beschleunigung, Schaltzeiten usw. bestimmt. Pufferplätze ergeben sich aus dem tatsächlich vorhandenen Platz (Streckenlänge). Mit der Einlastung von Kommissionieraufträgen werden im Simulationsmodell die entsprechenden Transportaufträge generiert und abgearbeitet (Abbil-

dung 7). Dabei können Systemzustände (z. B. Warteschlangen) oder Belegungs- und Ankunftszeitverteilungen protokolliert und statistisch ausgewertet werden.

Das gleiche Problem kann mit dem LP-Tool modelliert werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 8 zu sehen.

Der Vorteil des Tools liegt selbst bei diesem recht einfachen Beispiel im Zeitvorteil: Für Erstellung und Test des Simulationsmodells und anschließende Simulationsläufe und Auswertungen wird ein Zeitaufwand von ca. 4-5 Stunden benötigt, das Modell im LP-Tool braucht für Erstellung und korrekte Parametrierung weniger als 0,5 Stunden, die Rechenzeit selbst ist vernachlässigbar gering.

Sollte im Ergebnis der Untersuchungen eine Änderung des Materialflusssystems notwendig werden, so führt das im Simulationsmodell teilweise zu erheblichen Änderungen (Abläufe, Steuerungsstrategien, Auswertungen) mit entsprechendem Zeitaufwand. Im LP-Tool können dagegen in einfacher Weise Baustein- oder Verbindungsparameter geändert, zusätzliche Elemente eingefügt oder vorhandene durch Elemente mit anderer Funktion oder Steuerung ersetzt werden. Strukturelle Änderungen am Materialflusssystem sind also mit deutlich geringerem Aufwand realisierbar.

Im konkreten Beispiel wird durch die Simulation für die beiden Zuführungen zu den Kommissionierplätzen (Komm_A bzw. Komm_B) eine mittlere Belegung von 1,56 bzw. 1,52 ermittelt. Mit dem Tool ergeben sich mittlere Warteschlangenlängen von 1,49 bzw. 1,41. Damit liefern beiden Verfahren nahezu identische Ergebnisse.



Abbildung 7: Lagerzone und Kommissionierplätze im Simulationsmodell

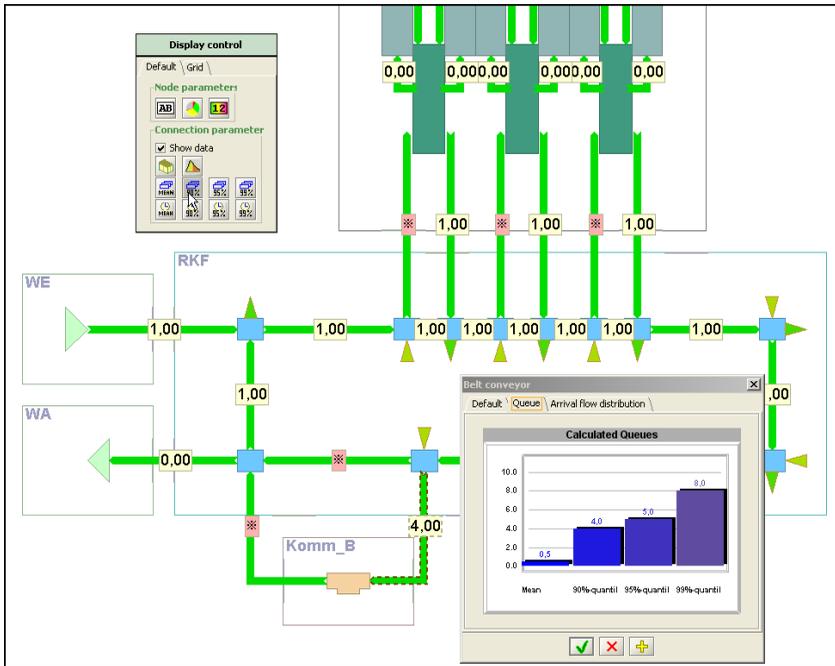


Abbildung 8: Lagervorzone und Kommissionierplätze im LP-Tool
 (Die Zahlen geben für die Warteschlange das 90%-Quantil an)

Der Mittelwert kann ein erster Anhaltspunkt für die Festlegung der Zahl der Pufferplätze sein. Es wird zunächst angenommen, dass 4 Warteplätze ausreichen.

Während der Simulation kommt es immer wieder dazu, dass alle Warteplätze belegt sind und ein Stau auf dem Hauptförderer entsteht. Auf Grund einer zeitlich begrenzten überdurchschnittlichen Anzahl von Ein- und Auslagerungen wird die begrenzte Kapazität auf der Zuführung zu Komm_A zum Engpass: Die Zuführung blockiert die Hauptstrecke, so dass sowohl die Zuführung von Waren für Komm_B als auch die Ein- und Auslagerung auf der gegenüberliegende Seite behindert werden. Es dauert einige Zeit, bis sich der Stau wieder aufgelöst hat. Für das reale System bedeutet dies eine verringerte Kommissionierleistung bzw. verspätete Bereitstellung der kommissionierten Waren.

Analysiert man in diesem Fall die Simulationsstatistiken, so ist die geschilderte zeitlich begrenzte Überlastung auf Grund der Kennwerte kaum nachzuweisen: Die betroffene Pufferstrecke ist zwar häufig mit der maximalen Anzahl von vier Paletten belegt, aber niemals mehr, weil dies simulationstechnisch gar nicht möglich ist. Die Simulation kann hier nur durch eine Betrachtung anderer Kennwerte (z. B. im zeitlichen Ver-

lauf reduzierter Systemoutput pro Zeiteinheit am Warenausgang) indirekt die Aussage liefern, dass Behinderungen aufgetreten sind, aber nicht die Ursachen zuordnen. Ebenso kann die Simulation bei dieser Modellierung nicht direkt zur Dimensionierung genutzt werden. Im Allgemeinen sind dazu viele Simulationsläufe erforderlich, bei denen jeweils einzelne Parameter variiert werden, bis schließlich eine zufriedenstellende Lösung vorliegt.

Abstrahiert man dagegen das Simulationsmodell und verwendet anstelle der tatsächlich vorhandenen Pufferstrecke eine virtuelle *Queue* mit stark vergrößerter Kapazität, kann natürlich auf Grund der Belegungsstatistik der *Queue* direkt eine Aussage für die Pufferdimensionierung abgeleitet werden. Allerdings wird durch die Abstraktion der tatsächliche Bewegungsablauf teilweise verfälscht, weil die Transporteinheiten mit dem Übergang in die Queue den vorhandenen physischen Transportweg verlassen.

Mit dem LP-Tool dagegen lassen sich zur Pufferbemessung leicht Aussagen ableiten: Neben den Mittelwerten der Warteschlangen werden auch Quantile berechnet. Für die betroffenen Strecken ergibt sich mit dem LP-Tool bei 90% Sicherheit, dass bis zu 4 Wartepplätze belegt sind (Zum Vergleich: Die Simulation liefert bei ausreichender Anzahl Wartepplätze eine Wahrscheinlichkeit dafür von ca. 87%). Wird ein weiterer Wartepplatz berücksichtigt, verringert sich das Restrisiko auf unter 5% (Simulation: ca. 8%).

Eine andere Variante, die mit dem LP-Tool untersucht werden kann, besteht in der Veränderung der Bearbeitungszeit: Es können sowohl Mittelwert als auch Variationskoeffizient (und damit Varianz) reduziert und die Auswirkungen überprüft werden. Beides reduziert die zu erwartenden Warteschlangen. Auf diese Weise lassen sich Anforderungen an die Prozessgestaltung an den Arbeitsplätzen ableiten.

4.2 Gepäckförderanlage Flughafen

Die Gepäckförderanlage eines Flughafens bringt das Gepäck vom Check-in zu den Sortierzielen, von wo sie über das Vorfeld dann weiter in das Flugzeug transportiert werden. Das Gepäck durchläuft dabei Sicherheits-Checks in bis zu drei Stufen (Röntgen, Computertomograph, manuelle Inspektion). Ist zum Check-in-Zeitpunkt das Gate für den Flug noch nicht geöffnet, wird es in Frühgepäckspeichern zwischengelagert. Transfer-Gepäck wird zu seinem Anschlussflug in analoger Weise gebracht, nur dass die Sicherheits-Checks ggf. entfallen (z. B. für inhereuropäische Flüge).

Die Gepäckförderanlagen größerer Flughäfen (Abbildung 9) werden als Tray-Systeme ausgeführt. Dabei wird das Gepäck kurz nach dem Check-in auf Schalen (sog. Trays) verladen, die eine sichere und schnelle Beförderung (mit bis zu 10 m/s) ermöglichen. Da das Transportziel und die Zwischenstationen eines Gepäckstücks auf einem RFID-Chip direkt in der Schale gespeichert sind und an Weichen dynamisch Entscheidungen über den weiteren Transportweg getroffen werden, können die

Schalen als „autonome Fahrzeuge“ aufgefasst werden. Die Anlagensteuerung hat damit die Aufgabe, eine riesige „Flotte“ von beladenen und leeren Fahrzeugen zu disponieren.

In modernen Gepäckförderanlagen werden zwischen 3.000 und 10.000 Schalen eingesetzt. Die Förderstrecken haben eine Gesamtlänge von bis zu 100 km und bestehen aus mehr als 10.000 Förderersegmenten mit eigenem Antrieb und eigener Steuerungstechnik. Sie verbinden 20 bis mehrere 100 Check-in-Counter mit einer zweistelligen Anzahl Zielstellen. Befördert werden teilweise mehr als 10.000 Gepäckstücke pro Stunde. Ein solches Transportnetz verbindet oft mehrere Terminals. Diese verfügen über mindestens einen Sortiererring sowie eigene Leerschalen- und Frühgepäckspeicher. Die Anlagen haben meist eine Lebenszeit von mehr als 20 Jahren und sind damit nicht nur im Tagesverlauf sondern auch über ihre Lebensdauer großen Anforderungsschwankungen unterworfen.

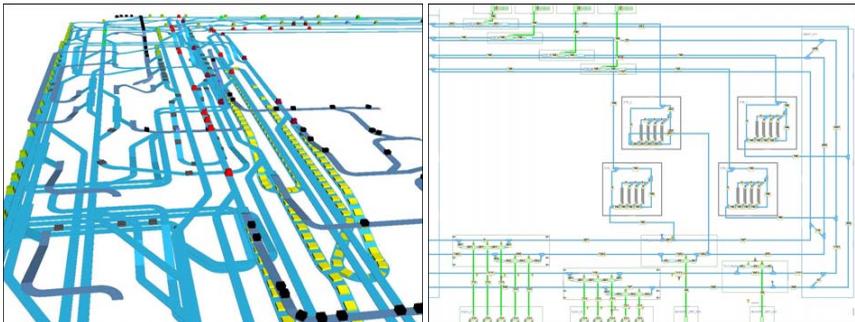


Abbildung 9: Gepäckförderanlage: links als Simulationsmodell, rechts im LP-Tool (Ausschnitt)

Beim Entwurf von Gepäckförderanlage besteht das Ziel darin, einen hohen Durchsatz, große Sortierleistung und kurze Transportzeiten mit möglichst geringem anlagentechnischen Aufwand zu erreichen. Vor allem die Frage einer kurzen „Reisezeit“ der Gepäckstücke auf der Anlage ist enorm wichtig: Zwischen dem Schließen des Check-in bis zum Abflug verbleibt meist weniger als eine Stunde Zeit, in der Gepäck noch zum Flugzeug gebracht und verladen werden muss; bei der Ankunft sollte das Gepäck die Ausgabebänder in der gleichen Zeit erreichen wie die Passagiere.

Dabei werden die Anlagen mit zeitlich stark schwankenden und oft unsymmetrischen Belastungen konfrontiert. Abbildung 10 zeigt die Zahl der aufgegebenen Gepäckstücke im Tagesverlauf in Form von Tagesganglinien für einzelne Materialströme. Kommt eine Aufteilung in Terminals für internationale bzw. Inlandsflüge hinzu oder erfolgt die Abfertigung der Passagiere (Check-in) in einem anderen Terminal als die der Flugzeuge (Gate), entstehen stark gerichtete Gepäckströme mit hohem Leerschalenbedarf einerseits und hohem Leerschalenaufkommen andererseits.

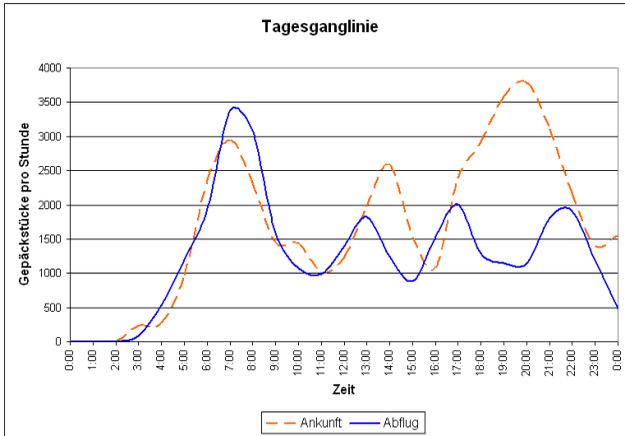


Abbildung 10: Tagesganglinien für zwei Gepäckströme eines Flughafens

Um Auswirkungen dieser Schwankungen im Tagesverlauf auf das Anlagenverhalten zu berücksichtigen, kann im LP-Tool dieses Tagesprofil hinzugeladen werden. Die Erstellung erfolgt gegenwärtig manuell, indem Lastszenarien angelegt und für jeden definierten Materialfluss entsprechende Faktoren angegeben werden, um die sich die Transportmenge gegenüber dem Ausgangswert für diesen Materialfluss ändert. Lastszenarien können dabei einzelne Spitzenbelastungen beschreiben, aber auch einen gesamten Tag, eingeteilt in Zeitscheiben definierter Länge.

Wenn das Tagesprofil aktiviert ist, kann über den Schieberegler (Abbildung 11) das entsprechende Szenario ausgewählt werden. Das führt dazu, dass die Berechnungen mit den geänderten Materialflussdaten neu vorgenommen und die Ergebnisse in gewohnter Weise visualisiert werden.



Abbildung 11: Wahl eines Szenarios im Tagesprofil

5 Zusammenfassung

Mit dem entwickelten „Layout-Planning-Tool“ ist eine schnelle, einfache und sichere und damit wirtschaftlichere Dimensionierung von Materialflusssystemen möglich. Der Einsatz orientiert sich vor allem auf den Bereich der Grobplanung. Für den Anwender sind sofort statistisch abgesicherte und ausreichend genaue Ergebnisse ohne zusätzliche und aufwändige Berechnungen verfügbar, womit sich die Planungsqualität erhöht. Die Ergebnisse spiegeln zwar nur bedingt mögliche dynamische Einflüsse des Gesamtsystems wider (es wird stets von stationären Zuständen ausgegangen, Übergänge zwischen ihnen haben ihre Auswirkungen aber zeitversetzt), dennoch lassen

sich damit bereits frühzeitig mögliche Problemsituationen und Systemengpässe erkennen. Die berechneten Ergebnisse weichen nach bisherigen Untersuchungen um weniger als $\pm 20\%$ von den durch diskrete Simulation ermittelten Ergebnissen ab. Damit wird eine für einen Grobentwurf von Materialflusssystemen weit über die heute gebräuchlichen statischen Berechnungsverfahren hinausgehende Qualität erreicht.

Es wird nicht angestrebt, die Bedeutung der Simulation für die Planung komplexer Materialflusssysteme zu verringern. Die Simulation wird auch künftig das wichtigste Werkzeug des Planers bleiben, weil auf Grund der Komplexität viele Einflussfaktoren (wie z. B. Steuerungs- und Reihenfolgestrategien, Störungen und Ausfall von Komponenten) Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben, die mit analytischen Verfahren nicht oder nur schwer zu erfassen sind. Allerdings kann die Simulation erst dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn die Planungen einen detaillierten und ausgereiften Stand erreicht haben. Um diese Detaillierung schneller und in besserer Qualität zu erreichen, ist das LP-Tool ein nützliches Werkzeug.

Literatur

MARKWARDT, ULF (2003): *Modellierung modularer Materialfluss-Systeme mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzen*. Dissertation. Dresden : Technische Universität, Fakultät Maschinenwesen

MEINHARDT, INGOLF; MARQUARDT, HANS-GEORG (2006): *Offenes Baukastensystem zur effizienten Dimensionierung von Materialflusssystemen*. Schlussbericht des geförderten Forschungsvorhabens (AiF-Nr. 14046 BR). Dresden : Technische Universität, Fakultät Maschinenwesen

Norm FEM 9.851 (06.2003): *Leistungsnachweis für Regalbediengeräte – Spielzeiten*.

SCHLEYER, MARC (2007): *Discrete Time Analysis of Batch Processes in Material Flow Systems*. Dissertation. Karlsruhe : Universität, Fakultät für Maschinenbau

SCHULZE, FRANK (2000): *Neue Methoden zur Modellbildung für die Planung und Steuerung von Materialflusssystemen*. Dissertation. Dresden : Technische Universität, Fakultät Maschinenwesen

Kennzahlen zur Bewertung der technischen Eigenschaften von RFID-Systemen

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Andreas Jungk

Institut für Transport- und Automatisierungstechnik

Leibniz Universität Hannover, Garbsen

Abstract: In dieser Arbeit wird ein Kennzahlensystem vorgeschlagen, mit dem die Leistungsfähigkeit eines RFID-Systems bestimmt werden kann. Bisher genutzte Maßzahlen werden diskutiert und die Notwendigkeit für den neuen Ansatz dargelegt. Die Kennzahlen werden auf Basis der gewünschten Applikation definiert und führen schließlich zu einer gemeinsamen Kennzahl Kommunikationssicherheit KS, welche als Basis für Auswahlentscheidungen genutzt werden kann.

Einleitung

Bei den potentiellen Anwendern von RFID-Systemen besteht Unsicherheit darüber, ob ein System für ihre konkrete Anwendung geeignet ist, da die Qualität solcher Systeme bislang nicht zufriedenstellend dargestellt werden kann. Gleichermaßen sind die Entwickler solcher Systeme von dieser Fragestellung betroffen. Häufig erfolgen Optimierungen eher an Einzelkomponenten eines Systems, ohne den Gesamtzusammenhang hinreichend zu analysieren.

In dieser Arbeit soll ein Vorschlag zur Bewertung von RFID-Systemen durch geeignete Kennzahlen gemacht werden. Dabei treten die Bedürfnisse des Anwenders in den Vordergrund und werden durch den Erfüllungsgrad zu definierender Funktionen ausgedrückt. Zuvor wird anhand bislang in der Praxis gebräuchlicher Maßzahlen nachgewiesen, warum diese neue Betrachtungsweise notwendig ist.

Messung der Leistungsfähigkeit von RFID-Systemen

Der Begriff der Leistungsfähigkeit von RFID-Systemen ist bislang nicht eindeutig bestimmt. Schon aus diesem Grund ist es schwierig, ein geeignetes Messverfahren zu definieren. In der Funktechnik gibt es Verfahren, mit denen gezielt Eigenschaften der eingesetzten Komponenten gemessen werden können. Praktisch orientierte Ansätze vernachlässigen wesentliche, für den Anwender relevante Eigenschaften.

Ein RFID-System muss jedoch als komplexes System betrachtet werden, bei dem sowohl die Einzelkomponenten miteinander als auch mit ihrer Umwelt interagieren. Die wesentlichen in der Literatur verwendeten Messverfahren sollen an dieser Stelle vorgestellt und diskutiert werden.

Maximale Reichweite

Unter der maximalen Reichweite einer Funkverbindung wird der maximale Abstand zwischen der Antenne des Schreib-/Lesegerätes und dem Transponder, bei dem eine Kommunikation gerade noch möglich ist, verstanden. Als erfolgreiche Kommunikation gilt dabei, dass der Transponder identifiziert wird.

In der Praxis zeigt sich jedoch häufig, dass es Bereiche gibt, in denen der Abstand zwischen Transponder und Antenne geringer als die maximale Reichweite ist und dennoch reproduzierbar keine Kommunikation zu Stande kommt.

In Abbildung 1 sind die physikalischen Effekte bei der Ausbreitung einer Freiraumwelle aufgetragen. Die Leistung fällt, aufgrund der angenommenen Ausbreitung auf einer Kugeloberfläche, nach einer Funktion zweiter Ordnung ab. Da der Transponder das Signal reflektiert und so ebenfalls wieder eine Strahlungsquelle darstellt, ist der Zusammenhang zwischen der Leistung und Reichweite sogar eine Funktion vierter Ordnung. Entsprechende Ableitungen finden sich beispielsweise bei Rappaport [Ra02].

Die Empfindlichkeit des Schreib-/Lesegerätes muss hinreichend hoch sein, um die vergleichsweise schwachen Transponder-Signale empfangen zu können. In der Regel wirkt dieser Faktor jedoch nicht begrenzend.

Die in Abbildung 1 eingetragene Chipempfindlichkeit zeigt die minimale Feldstärke, die benötigt wird um den Chip selbst betreiben zu können. Diese liegt wesentlich höher als die Empfindlichkeit des Schreib-/Lesegerätes und stellt so die limitierende Größe dar. Hierzu führten Nikitin und Rao Untersuchungen durch [NR06a].

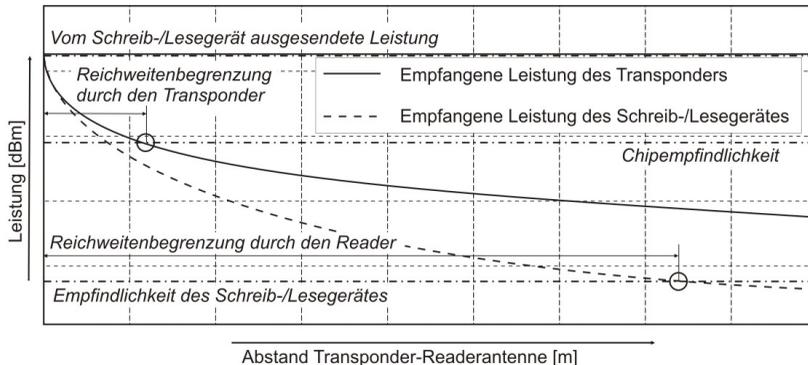


Abbildung 1 Feldausbreitung bei UHF-RFID-Systemen, adaptiert aus [NI07a]

Es liegt der Schluss nahe, dass die Reichweite durch Erhöhung der emittierten Leistung gesteigert werden könnte. Hierbei sind die in Frage kommenden Funkvorschriften (z.B. ETSI 302 208 [ET08]) zu berücksichtigen. Diese Annahme ist jedoch nur eingeschränkt richtig.

Lodewijks [Lo06] wies nach, dass der Transponder selbst häufig die begrenzende Größe ist. Die Antennenfläche und die Fähigkeit des Chips, Energie zu speichern limitieren die reflektierte Leistung. Selbst wenn die abgestrahlte Leistung des Schreib-/Leseegerätes weiter erhöht wird ergibt sich keine Steigerung der Reichweite. Ein Sättigungseffekt tritt ein.

Ein großes Problem stellt die inhomogene Feldverteilung in Folge von Reflexionen dar, die von den theoretischen Werten massiv abweicht. Als Beispiel sei das Anheben einer Gitterbox mit einem RFID-Transponder in der Mitte der Bodenplatte genannt. Die Identifikation soll in diesem Fall über eine im Gabelträger integrierte Antenne stattfinden.

Es zeigt sich beim schrittweisen Anheben des Ladungsträgers und gleichzeitiger Überprüfung der Kommunikationsfähigkeit durch Leseanfragen, dass in einigen Bereichen reproduzierbar keine Lesung möglich ist. Daraufhin wird der verwendete Transponderchip entfernt und die Transponderantenne über ein Impedanz-Anpassnetzwerk mit einem Spektrum-Analyzer verbunden.

In dieser Konfiguration werden nun Feldstärkemessungen durchgeführt. Die Ansprechschwelle bzw. Transponderempfindlichkeit wird gemessen, in dem die Feldstärke bestimmt wird, bei der der Transponder zu kommunizieren beginnt.

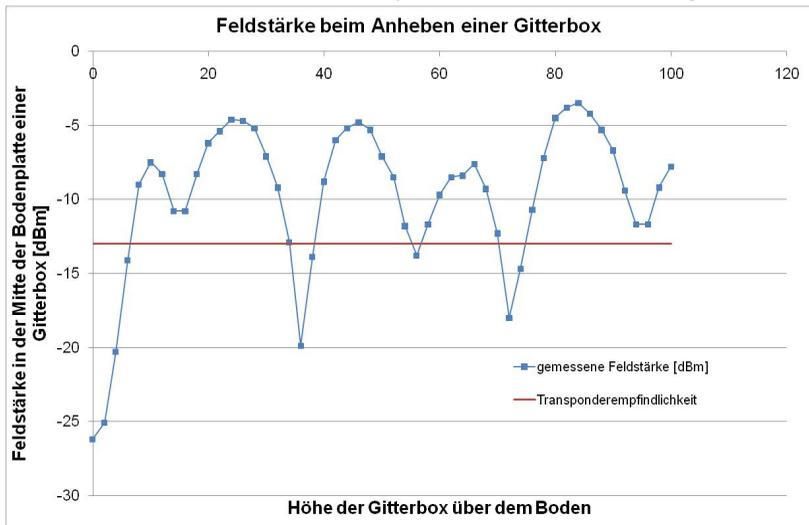


Abbildung 2 Messung der Feldstärke beim Anheben einer Gitterbox

Diese Empfindlichkeit ist in die Feldstärkemessung in Abbildung 2 als horizontale Linie eingetragen. In Bereichen, in denen die Feldstärke deutlich unterhalb der Ansprechempfindlichkeit liegt, ist keine Kommunikation möglich.

Zusammenfassend kann die Reichweite nicht als hinreichendes Instrument verstanden werden, um komplexe RFID-Systeme beurteilen zu können. Sie kann jedoch genutzt werden, um beispielsweise die Streuungen innerhalb einer Serie von Transpondern abschätzen zu können.

Abschließend muss zu diesem Punkt angemerkt werden, dass in den meisten praktischen Anwendungen hohe Reichweiten nicht erwünscht sind, dafür aber verlässliche Kommunikation in einem abgrenzbaren Bereich.

Leserate

In einigen Veröffentlichungen wird die Leserate als Maß für die Qualität von RFID-Systemen angegeben. Hierunter wird in der Regel die Anzahl der Antworten auf eine Inventory-Anfrage des Readers verstanden, die in einem bestimmten Zeiteabschnitt registriert werden können.

Der Transponder beginnt mit der Kommunikation mit dem Reader, sobald die zur Verfügung stehende Energie ausreicht um den Chip zu betreiben. Wenn die Feldstärke während der Kommunikation unter einen bestimmten Wert abfällt, kann die Kommunikation nicht erfolgreich abgeschlossen werden. Zum einen kann der Chip selbst nicht mehr betrieben werden, zum anderen kann keine ausreichende Welle reflektiert werden, um die Informationen zu übertragen.

Die Anzahl der Antworten pro Zeiteinheit hängt bei ausreichender Feldstärke im Wesentlichen von den Reader-Einstellungen ab, eventuell sind noch der Übertragungsweg zu einem Auswertungs-PC oder das Ansteuerprogramm zu berücksichtigen. Ist die Feldstärke unzureichend, kann keine Kommunikation stattfinden, die Leserate ist null.

In Grenzbereichen, in denen die zur Verfügung stehende Feldstärke stark um die Ansprechschwelle schwankt, sind einzelne erfolgreiche Kommunikationsversuche möglich.

Es lässt sich mit dieser Maßzahl unterscheiden, ob die Kommunikation prinzipiell möglich ist, ob sie unmöglich ist oder ob ein Grenzbereich vorliegt.

Die von einigen Autoren vertretene Auffassung, es würde ein kontinuierlicher Zusammenhang zwischen der Leserate und der Qualität eines RFID-Systems (oder auch einzelner Transponder) vorliegen [MM05], kann somit nicht nachgewiesen werden.

Rückstrahlquerschnitt

Der Rückstrahlquerschnitt ist eine Eigenschaft eines Transponders, mit der eine Aussage über seine Fähigkeit getroffen werden kann, empfangene Wellen zu reflektieren. Grundlage ist das Backscatter-Kommunikationsprinzip bei RFID-Systemen. Der RFID-Chip ist in der Lage, zwei unterschiedliche komplexe Impedanzen an seinen Eingangsklemmen einzustellen. Diese Impedanz bildet die

Lastimpedanz für die Antenne. Damit kann das reflektierte Signal moduliert werden. Entsprechende Ableitungen finden sich bei Nikitin und Rao [NR06b].

Betrachtet man neben der grundsätzlichen Eigenschaft der Signalreflektion noch die Modulation selbst, kann das Gütemaß noch weiter präzisiert werden.

Man setzt voraus, dass der Transponder über zwei unterschiedliche Rückstrahlquerschnitte p_1 und p_2 verfügt. Bei diesen Werten handelt es sich um konjugiert-komplexe Größen. Der skalare Abstand zwischen diesen beiden Werten ist ein Maß dafür, wie gut der Transponder das Signal modulieren kann.

Bei der Messung wird der Transponder in einer Absorber-Kammer mit einem Signal bestrahlt. Gleichzeitig wird das vom Transponder reflektierte Signal gemessen. Der Quotient der reflektierten Leistung und der ausgesendeten Strahlungsleistungsdichte ist der Rückstrahlquerschnitt. Soll die Modulationseigenschaft, der sogenannte differentielle Rückstrahlquerschnitt bestimmt werden, ist es notwendig eine Kommunikation durchzuführen. Vielfach wird dabei mit einer Reader-Emulation gearbeitet. Untersuchungen hierzu finden sich bei Pentilla et al. [PK06]. Relevanz hat dieses Verfahren vor allem, um Transponder zu charakterisieren. Dazu gehört auch das Verhalten von Transpondern auf verschiedenen Untergründen. Einen Rückschluss auf das Systemverhalten lässt dieses Verfahren nicht zu, da nicht alle Komponenten in die Messung einbezogen werden und die Umwelteinflüsse ausgeschlossen werden.

Feldstärkemessungen

Feldstärkemessungen dienen dazu, um das von einer Antenne ausgesendete Signal charakterisieren zu können. Vereinzelt wird auch die Antwort des Transponders im Seitenband vermessen. Ziel ist es, im gewünschten Kommunikationsbereich durchgehend eine ausreichend hohe Feldstärke zur Verfügung zu stellen, um den Transponder betreiben zu können. Dazu muss die Feldstärke oberhalb der Ansprechschwelle des Transponders, der Transponder-Empfindlichkeit, liegen.

Die Praxis zeigt jedoch, dass die Feldstärkeverteilung massiv von den Umgebungsbedingungen abhängt. Die Messung der Feldstärke ist gut geeignet, um festzustellen, warum ein System an bestimmten Stellen nicht funktioniert, so zum Beispiel von Mitsugi gezeigt [Mi05]. Auch können bestimmte Effekte durch Simulation der Feldstärke mit geeigneter Software im Vorfeld erkannt werden.

Leistungsfähigkeit von RFID-Systemen auf Basis einer konkreten Aufgabenstellung

Die Dimensionen der Leistungsfähigkeit eines RFID-Systems werden in dieser Arbeit aus der Anwendung heraus abgeleitet. Würde diese Ableitung jedoch mit zu großer Orientierung an allgemeinen Anforderungen geschehen, so wäre die Leistungsfähigkeit mit zu vielen Einflussdimensionen versehen, als dass eine

nachvollziehbare Aussage getroffen werden kann. Daher erfolgt die weitere Ableitung an einer konkreten Aufgabenstellung.

Inhalt der weiteren Betrachtungen ist die Ausrüstung von Flurförderzeugen mit RFID-Schreib-/Lesegeräten und Antennen. Weiterhin sollen Ladungsträger und Lager- sowie Umschlagplätze mit entsprechenden RFID-Transpondern ausgerüstet werden. Eine genaue Diskussion dieses Themas findet sich in [Ju07]. Dabei sind folgende Fragestellungen zu berücksichtigen:

- Da Flurförderzeuge im Idealfall hohe Umschlaggeschwindigkeiten aufweisen, muss der Lesevorgang schnell und sicher erfolgen. Es sollte nach Möglichkeit schon bei der Einfahrt in den Ladungsträger gelesen werden.
- Denkbar ist, dass auch Informationen auf den Transponder zurückgeschrieben werden. Dieses Schreiben erfolgt im Regelfall während der Fahrt.
- Es muss vermieden werden, dass benachbarte Ladungsträger oder Lager- und Umschlagplätze fälschlicherweise identifiziert werden. Es ist somit notwendig, den Arbeitsbereich des Systems zu begrenzen.
- Ladungsträger können in der Regel von allen vier Seiten aus aufgenommen werden. Es ist sicherzustellen, dass das Verhalten des Systems für alle Einfahrtrichtungen gleich ist.

Folgende Definition für die Leistungsfähigkeit wird daher in dieser Arbeit gewählt:

Die Leistungsfähigkeit eines RFID-Systems ist ein Maß dafür, wie gut ein konkretes System geeignet ist, eine bestimmte Aufgabenstellung innerhalb einer gegebenen Umwelt zu erfüllen, ohne andere Systeme mehr als notwendig zu beeinträchtigen. Somit ist die Leistungsfähigkeit im Kontext zur konkreten Aufgabenstellung zu bestimmen, und es müssen geeignete Maßzahlen festgelegt werden, mit denen die Leistungsfähigkeit messbar gemacht wird.

Anwendung von Kennzahlen zur Messung der Leistungsfähigkeit

Kennzahlen erlauben es, aus elementaren Messungen Maßzahlen zu aggregieren, mit denen komplexere Sachverhalte beschrieben werden können. Die Betriebswirtschaftslehre nutzt Kennzahlen intensiv, um beispielsweise Erfolgskontrollen in Unternehmungen zu installieren.

In dieser Arbeit werden zunächst Messungen durchgeführt, mit denen eine reproduzierbare Datenbasis geschaffen wird. Die in den Messwerten enthaltenen Informationen werden aufbereitet und dienen als Grundlage für den Erfüllungsgrad bestimmter Kennzahlen. Diese Kennzahlen definieren die Anforderungen aus

Sicht eines Anwenders. Die Kennzahlen werden in dieser Arbeit lediglich textuell beschrieben. Eine ausführliche mathematische Ableitung findet sich in [Ov08].

Messungen als Datenbasis

Ziel der Messungen ist es festzustellen, in welchem Bereich um einen Transponder eine Kommunikation möglich ist und in welchem nicht. Dazu wird im Vorfeld geplant, welche Kommunikationsbereiche in der gewählten Applikation sinnvoll sind.

Es wird ein Messbereich definiert, in dem die einzelnen Messpunkte liegen. Dieser Messbereich wird in einen Bereich sicherer Kommunikation und in einen Bereich ohne Kommunikation unterteilt. An jedem dieser Messpunkte wird 15-mal geprüft, ob eine Kommunikation mit dem Transponder möglich ist. Damit werden die Forderungen aus der ISO 18046 übertroffen [IS05].

In der Datenbasis werden schließlich die Punkte als erfolgreich markiert, an denen jeder dieser 15 Kommunikationsversuche erfolgreich war. Gleichzeitig werden nur die Punkte als ohne Kommunikation markiert, bei denen bei jedem dieser 15 Versuche keine Kommunikation aufgetreten ist.

Lesefähigkeit LF

Ziel der Kennzahl Lesefähigkeit LF ist es festzustellen, wie gut ein RFID-Transponder gelesen werden kann. Es werden innerhalb des Bereiches sicherer Kommunikation diejenigen Messstellen summiert, bei denen eine Kommunikation bei allen Messungen möglich ist und auf die Gesamtzahl der Messstellen innerhalb des Bereiches sicherer Kommunikation bezogen.

Die Lesefähigkeit LF ist der Quotient aus der Anzahl der Inkremente im Bereich sicherer Kommunikation, in dem Kommunikation immer möglich ist, bezogen auf die Gesamtzahl der Inkremente in diesem Bereich.

Schreibfähigkeit SF

Die Schreibfähigkeit SF ist der Quotient aus der Anzahl der Inkremente in dem Bereich, in dem Schreiben möglich sein soll, bezogen auf die Gesamtzahl der Inkremente in diesem Bereich.

Beispielsweise kann beim Transport eines zinkengängigen Ladungsträgers mit einem Flurförderzeug die Definition nach den vorangegangenen Erläuterungen vereinfacht werden. Da hier nur ein Inkrement betrachtet wird, nämlich das bei vollständiger Aufnahme des Ladungsträgers relevante, ist nicht der Kommunikationsbereich zu betrachten, sondern der Bereich, in dem das Schreiben erfolgen soll. Auch in diesem Fall werden alle Messpunkte mit erfolgreicher Kommunikation auf die Gesamtzahl der verfügbaren Messpositionen in diesem Bereich bezogen.

Kommunikationsunfähigkeit KU

Die Notwendigkeit, Kommunikation außerhalb des Bereichs sicherer Kommunikation zu vermeiden, wurde in dieser Arbeit bereits dargelegt. Die dazugehörige Kennzahl Kommunikationsunfähigkeit KU beinhaltet die Information darüber, ob außerhalb des Bereichs sicherer Kommunikation auch tatsächlich keine Kommunikation stattfindet. Der zu untersuchende Bereich ist also der gewünschte Bereich ohne Kommunikation. Dieser erstreckt sich über den Teil des Messbereiches, welcher nicht zum Bereich sicherer Kommunikation gehört.

Die Kommunikationsunfähigkeit KU ist der Quotient aus der Anzahl der Inkremente in dem Bereich, in dem Kommunikation nie stattfinden soll, an denen tatsächlich keine Kommunikation stattfindet, bezogen auf die Gesamtzahl der Inkremente in diesem Bereich.

Im günstigsten Fall, d.h. wenn es keinerlei Kommunikation im Soll-Bereich ohne Kommunikation gibt, beträgt dieser Wert 1. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist auch vom gewählten Messbereich abhängig. Wird dieser unverhältnismäßig groß gewählt, so ist der Bereich ohne Kommunikation groß gegenüber dem Bereich sicherer Kommunikation. Da bei hohen Reichweiten tendenziell eher eine Lesung vermieden wird, tendiert KU gegen 1. Deshalb sollte der Messbereich nur den Bereich umfassen, der für die Betrachtung relevant ist.

Orientierungsempfindlichkeit OE

In vielen Situationen ist es wünschenswert, dass die Leistungsfähigkeit eines RFID-Systems nicht von der Ausrichtung der Komponenten zueinander abhängt. Als Beispiel dient hier die Aufnahme eines zinkengängigen Ladungsträgers mit einem Flurförderzeug. Der Ladungsträger verfügt über einen RFID-Transponder im Bereich des Mittelklotzes, das Flurförderzeug über eine entsprechende Antennenausrüstung.

In diesem Fall gibt die Orientierungsempfindlichkeit OE an, wie stark sich die Wahl der Einfahrtrichtung in den Ladungsträger auf die zuvor abgeleiteten Kennzahlen auswirkt. Daher werden für diese Kennzahl Messungen für alle Einfahrtrichtungen benötigt, wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben. Für jede dieser Messungen werden, wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt die Kennzahlen Lese- und Schreibfähigkeit (LF und SF) sowie Kommunikationsunfähigkeit KU abgeleitet. Es wird nun geprüft, wie stark sich diese Kennzahlen im Mittel ändern, wenn eine andere Einfahrtrichtung gewählt wird. Dazu werden die quadrierten Abweichungen der jeweiligen Kennzahl von ihrem Mittelwert berechnet und für alle Einfahrtrichtungen zu summiert.

Nikitin hat ein Verfahren definiert, um die Orientierungsempfindlichkeit von Transpondern zu bestimmen [NR07b]. Anders als bei dem in der Literatur genannten

Verfahren werden hier jedoch alle vier Seiten berücksichtigt. Das von Nikitin vorgeschlagene Verfahren betrachtet nur das Minimum und das Maximum aus einem kontinuierlich gemessenen Wertebereich.

Die Orientierungsempfindlichkeit OE sollte möglichst gering sein, d.h. das Verhalten soll zu allen Seiten möglichst gleich sein. Daher ist ein Wert für die Orientierungsempfindlichkeit gleich oder nahe 0 als optimal anzusehen. Die drei ermittelten Orientierungsempfindlichkeiten aus der Schreibfähigkeit, der Lesefähigkeit und der Kommunikationsunfähigkeit sollen nun noch zu einer Gesamtorientierungsempfindlichkeit zusammengefasst werden, um die Handhabbarkeit zu verbessern. Da alle drei Kennzahlen bestimmte, vom Anwender gewünschte Eigenschaften beschreiben, jedoch nur schwer abgeschätzt werden kann bei welcher dieser Eigenschaften die Orientierungsempfindlichkeit besonders kritisch ist, wird der Mittelwert dieser drei Werte gebildet.

Kommunikationssicherheit KS

Um die automatische Auswertung von großen Datenmengen zu erleichtern, soll hier eine Gesamtkennzahl definiert werden. Die Überführung der gemessenen Werte in eine Gesamtkennzahl dient der einfacheren Vergleichbarkeit unterschiedlicher Szenarien. Als interessierende Merkmale wurden in den vorangegangenen Kapiteln die Schreibfähigkeit, die Lesefähigkeit und die Kommunikationsunfähigkeit im Bereich ohne Kommunikation genannt. Zusätzlich kam im letzten Abschnitt die Orientierungsempfindlichkeit hinzu. Bei der Gesamtbewertung muss das konkrete Einsatzszenario, also der Prozess berücksichtigt werden. Es muss geprüft werden, ob auf den Transponder geschrieben wird oder ob eine Anfahrt von unterschiedlichen Seiten tatsächlich stattfindet. Zu diesem Zweck sollen bei der Ermittlung der Gesamtkennzahl Bewertungsgewichte eingeführt werden, die dem Anwender eine entsprechende Anpassung erlauben.

Tabelle 1 Bewertungsgewichte

| Merkmal | Bewertungsgewicht | Wertebereich |
|------------------------------|-------------------|--------------|
| Orientierungsempfindlichkeit | a_{OE} | 0..1 |
| Schreibfähigkeit | a_{SF} | 0..1 |
| Lesefähigkeit | a_{LF} | 0..1 |
| Kommunikationsunfähigkeit | a_{KU} | 0..1 |

Zusammengefügt zur Gesamtkennzahl *Kommunikationssicherheit KS* ergibt sich somit

$$KS = \frac{(1-OE) \cdot a_{OE} + SF \cdot a_{SF} + LF \cdot a_{LF} + KU \cdot a_{KU}}{a_{OE} + a_{SF} + a_{LF} + a_{KU}} \quad (1)$$

Diese Kennzahl erlaubt, wiederum im Wertebereich zwischen 0 und 1, die Bewertung von verschiedenen RFID-Systemen.

Die hier abgeleiteten Kennzahlen wurden für das Beispiel der Einfahrt eines Flurförderzeuges in eine Europoolpalette abgeleitet. Durch Anpassung der Parameter „Bereich sicherer Kommunikation“ und „Bereich ohne Kommunikation“ können auch andere Szenarien bewertet werden.

Bei der Bildung der Kennzahl werden nur Messwerte berücksichtigt, die im Rahmen der Messungen reproduzierbar sind, d.h. im Bereich sicherer Kommunikation erfolgt stets eine Lesung, im Bereich ohne Kommunikation findet diese nicht statt. Für einige Anwendungen kann diese Aussage zu restriktiv sein. Es ist dann sinnvoll, eine Schwelle der Lesewahrscheinlichkeit einzuführen, ab der eine Lesung als reproduzierbar gewertet wird.

Praktische Versuchsergebnisse

Regallagerplätze werden in der Regel durch einen Transponder an der vorderen Quertraverse gekennzeichnet. Die Quertraverse bildet den Abschluss zur Gasse. Dieses Bauteil kann auf unterschiedliche Art ausgeführt sein. Das unterste Lagerfach soll hier nicht betrachtet werden, sofern die Lagerung direkt auf dem Boden erfolgt. Die zur Kennzeichnung von Bodenlagerplätzen verwendeten RFID-Systeme unterscheiden sich grundsätzlich im Aufbau und in den Einflussfaktoren. In den üblichen Anwendungen werden den Lagerplätzen keine dezentralen Zusatzinformationen zugeordnet, welche aktualisiert werden müssen. Somit werden die Transponder im Betrieb nicht beschrieben, und die zuvor entwickelte Kennzahl Schreibfähigkeit SF hat keine Relevanz. Notwendig ist jedoch eine Begrenzung des Kommunikationsbereichs, da in der Praxis beispielsweise Lesungen benachbarter Lagerplätze oder benachbarter Gassen zu vermeiden sind.

Die Anfahrt eines Lagerplatzes erfolgt frontal, die Kennzahl Orientierungsempfindlichkeit OE ist somit ebenfalls obsolet. Es müssen lediglich die Kennzahlen Lesefähigkeit LF und Kommunikationsunfähigkeit KU berücksichtigt werden.

Im hier gezeigten Beispiel handelt es sich um Regalplatztransponder, mit denen Regalplätze an der Frontseite der Querstrebe zur Gasse hin gekennzeichnet werden, um mit an einem Flurförderzeug befestigten RFID-Antennen identifiziert zu werden.

In Abbildung 3 sind die Punkte eingezeichnet, an denen eine jeweils eine Messung durchgeführt werden soll. Um die Aussagefähigkeit dieser Messungen zu erhöhen, werden 15 Messungen durchgeführt.

Weiterhin ist in dieser Abbildung der Kommunikationsbereich eingezeichnet. Bei Regalplätzen ist es besonders wichtig, nicht aufgrund von Strahlablenkungen einen anderen Lagerplatz zu lesen. Regallagerplätze müssen insbesondere in stark verdichteten Lagerbereichen mit geringem Querversatz angefahren werden. Der Ladungsträger befindet sich während der Einfahrtvorgangs in geringem Abstand über dem Fachboden bzw. der entsprechenden Aufnahmen. Daher ist die Kommunikation sehr stark eingegrenzt.

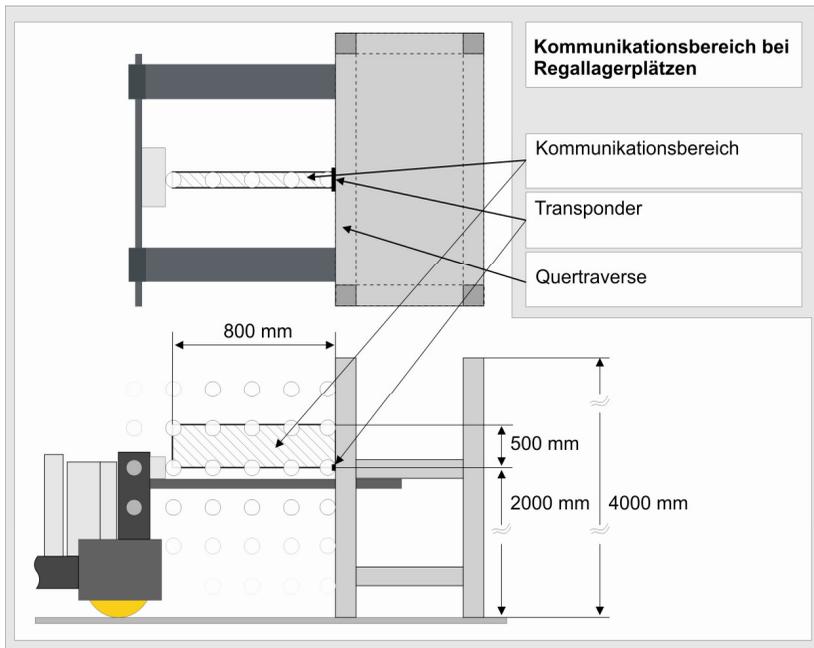


Abbildung 3 Messpunkte und Kommunikationsbereich bei Regallagerplatztranspondern

Auf eine Automatisierung des Versuchsablaufs wird verzichtet. Ein Regalfach in der Mitte eines Regallagers trägt den zu prüfenden Transponder. Der Transponder wird in der Mitte des Lagerortes auf der Mitte der Quertraverse angebracht. Ein Flurförderzeug ist mit einer Gabelträgerantenne ausgerüstet. Die Ansteuerung des Schreib-/Lesegerätes geschieht automatisch. Der Fahrer verringert sukzessive den Abstand zum Regalfach und prüft, ob eine Kommunikation mit dem Transponder möglich ist. Zur späteren Auswertung werden zwei Auftragungen benötigt: In eine werden nur die Punkte notiert, an denen bei jedem Versuch Kommunikation möglich war. Aus dieser Tabelle wird die Kennzahl Lesefähigkeit abgeleitet. Eine zweite Tabelle enthält die Punkte, an denen niemals eine Kommunikation

möglich war. Aus dieser Tabelle wird die Kennzahl Kommunikationsunfähigkeit KU abgeleitet. Es werden zehn Wiederholungen durchgeführt.

Aufgrund der hohen praktischen Relevanz wird das Versuchsszenario mit unbeladener Gabel, mit einer mit Wasserkanistern beladenen Palette und mit einer Metallplatte auf einer Palette durchgeführt.

Eine Auswahl der unterschiedlichsten Lagerplatztransponder steht zur Verfügung. Diese Transponder liegen alle in gehauster Form vor. Anders wäre eine Kommunikation auf dem Metalluntergrund nicht möglich. Die Praxis hat über die hier beschriebenen Versuche hinaus gezeigt, dass unter harten Umweltbedingungen - beispielsweise in Kühlhäusern - viele Standardtransponder an ihre mechanischen Grenzen stoßen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse (Abbildungen 4 und 5) wird deutlich, dass zwei Transponder besonders gut für diese Applikation geeignet sind. Um eine abschließende Entscheidung treffen zu können, welcher Transponder besonders geeignet ist, wird für beide die Kommunikationssicherheit bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass dem Anwender beide Kennzahlen, die Lesefähigkeit LF und die Kommunikationsfähigkeit KU gleichermaßen wichtig sind.

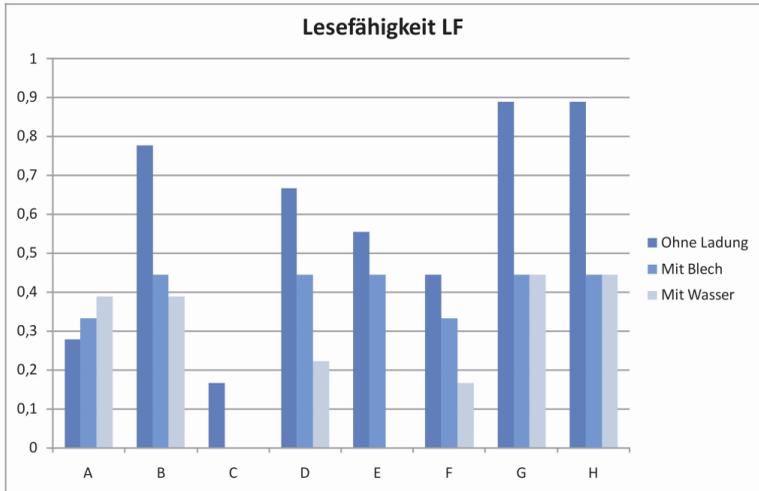
Am Beispiel der Leistungsfähigkeit ohne Beladung folgt

$$KS_G = \frac{0,5 \cdot 0,88 + 0,5 \cdot 0,33}{0,5 + 0,5} = 0,605 \quad (2)$$

$$KS_H = \frac{0,5 \cdot 0,88 + 0,5 \cdot 0,33}{0,5 + 0,5} = 0,605 \quad (3)$$

Beide Transponder sind also bezüglich der hier gewählten Kriterien in der Applikation ohne Beladung indifferent. Zu einer endgültigen Entscheidung müssten nun alle geprüften Beladungen herangezogen werden oder ökonomische Größen (Verfügbarkeit, Preis) mit berücksichtigt werden.

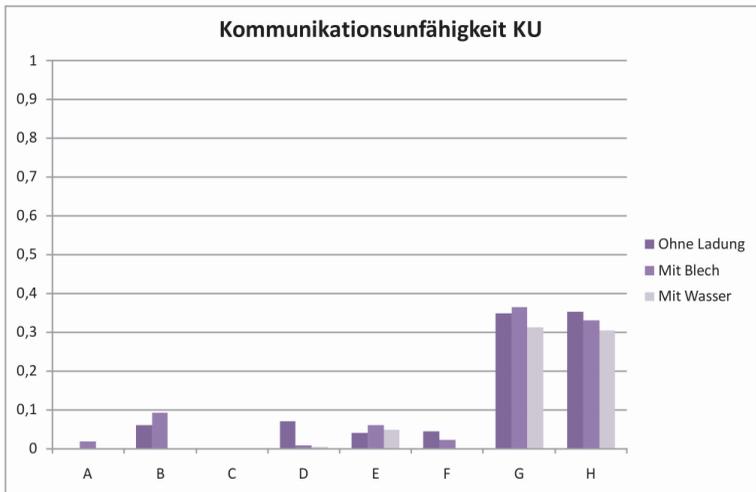
Auswirkung der Transponderart auf die Leistungsfähigkeit



A-H: Transpondertypen

Abbildung 4 Bestimmung der Kennzahl Lesefähigkeit

Auswirkung der Transponderart auf die Leistungsfähigkeit



A-H: Transpondertypen

Abbildung 5 Bestimmung der Kennzahl Kommunikationsunfähigkeit

Ausblick

Kennzahlen stellen ein gut anwendbares Mittel dar, um die Leistungsfähigkeit von RFID-Systemen darzustellen. Es muss jedoch kritisch angemerkt werden, dass bei der Definition der Kennzahl mit Augenmaß gearbeitet werden muss. Illusorische Vorstellungen über das Leistungsvermögen führen bei der Anwendung der Kennzahlen zu Ergebnissen, die nur den Schluss zulassen dass alle Systeme ungeeignet sind.

Ein einfach handhabbares System, zusammen mit fest vereinbarten Messvorschriften wird jedoch bei den Anwendern von RFID-Systemen zu einer verbesserten Akzeptanz und so einer besseren Marktumsetzung zuträglich sein.

Wenn Produkte nach den Wünschen der Anwender entwickelt werden, so stellt dies sicherlich einen wünschenswerten Zustand dar. Es ist also sinnvoll, dass auch die Hersteller von RFID-Komponenten solche Kennzahlen nutzen, um ihre Systeme in applikationsnahen Umfeldern auf ihre Leistungsfähigkeit hin zu überprüfen.

Literaturverzeichnis

- [ET08] ETSI (2008): Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Radio Frequency Identification Equipment operating in the band 865 MHz to 868 MHz with power levels up to 2 W.
 - [IS05] ISO (2005): IEC Technical Report 18046:2005, Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Radio frequency identification device performance test methods, Erste Ausgabe, 01.02.2005.
 - [Ju07] Jungk, A. & Overmeyer, L. (2007): Forklift Trucks as Mobile Radio Frequency Identification Antenna Gates in Material Flow. Proceedings of the 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC 2007), ISBN 1-4244-1396-6, Seattle, 2007.
 - [Lo06] Lodewijks, G., Veeke, H. P. M. & López de la Cruz, A. M. (2006): Reliability of RFID in Logistic Systems. IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), 2006: 971 - 976.
 - [Mi05] Mitsugi, J. (2005): Experimental Study on UHF passive RFID Readability Degradation. International Symposium on Applications and the Internet Workshops. 23-27 Jan. 2006: 4 ff.
-

- [MM05] Michael, K. & McCathie, L. (2005): The Pros and Cons of RFID in Supply Chain Management, Proceedings of International Conference on Mobile Business 2005: 623 – 629.
- [Ni06a] Nikitin, P. & Rao, K. V. S. (2006a): Performance Limitations of Passive UHF RFID Systems. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2006, 9-14 July 2006: 1011 – 1014.
- [NR06b] Nikitin, P. & Rao, K. V. S. (2006b): Theory and Measurement of Backscattering from RFID Tags. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 48, Issue 6, December 2006: 212 – 218.
- [NR07a] Nikitin, P. & Rao, K. V. S. (2007): An Overview of Near Field UHF. IEEE International Conference on RFID, March 2007:167 – 174.
- [NR07b] Nikitin, P. & Rao, K. V. S. (2007): Performance of RFID Tags with Multiple RF Ports. Antennas and Propagation Society International Symposium 2007, 9-15 June 2007: 5459 – 5462.
- [Ov08] L. Overmeyer, A. Jungk, H. C. Pfohl (Hrsg.), T. Wimmer (Hrsg.): Bewertung der Übertragungssicherheit von RFID-Systemen am Beispiel eines Flurförderzeuges. Wissenschaft und Praxis im Dialog; Robuste und sichere Logistiksysteme. Hamburg: Deutscher Verkehrs-Verlag, 2008. – ISBN 978-3-87154-381-4
- [PK06] Penttilä, K., Keskilampi, L., Sydänheimo, L. & Kivikoski, M. (2006): Radar cross-section analysis for passive RFID systems. IEEE Proceedings on Microwaves, Antennas and Propagation, Vol. 153, Issue 1, February 2006: 103 - 109.
- [RN05a] Rao, K. V. S., Nikitin, P. V. & Lam, S. F. (2005a): Impedance Matching Concepts in RFID Transponder Design. Fourth IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies, 2005, October 2005: 39 – 42.
- [RN05b] Rao, K.V.S., Nikitin, P. V. & Lam, S. F. (2005b): Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application. IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 53, Issue 12, December 2005: 3870 - 3876.
- [Ra02] Rappaport, T.S. (2002): Wireless Communications – Principles and Practice. Prentice Hall, Second Edition, 2002.

Abnahmeprozeduren mit dem neuen Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“ angewandt auf die durchschnittliche, deutsche Kleinanlage

Dipl.-Ing. Martina M. Maier

Technische Universität Ilmenau

Institut für rechnerunterstützte Produktion

Fachgebiet Fabrikbetrieb

Zusammenfassung: Der Fachbereich „Zuverlässigkeit in der Intralogistik“ der VDI-Fachgesellschaft „Produktion und Logistik“ (ehemals „Fördertechnik, Materialfluss, Logistik“) erarbeitete in den letzten beiden Jahren eine Richtlinie zur Beurteilung der Verfügbarkeit von intralogistischen Anlagen mithilfe des neuen Kennwerts „Leistungsverfügbarkeit“. Die Richtlinie leitet die Leser an, für die betrachtete Anlage, ausgehend vom Geschäftsziel des Betreibers und unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des Layouts, eine sinnvolle Leistungsverfügbarkeitsanforderung zu erstellen. Die Mehrzahl der in Deutschland installierten Hochregallager verfügen über drei bis vier Regalbediengeräte. Im folgenden Beitrag wird gezeigt, wie das Konzept der „Leistungsverfügbarkeit“ auf ein solches kleines Lager angewandt werden kann. Dabei wird sowohl auf die Anforderungserstellung als auch auf die konkrete Durchführung eingegangen.

1 Der Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“

In der VDI-Gesellschaft „Fördertechnik Materialfluss Logistik“ (VDI-FML), die zwischenzeitlich in der neugegründeten VDI-Gesellschaft „Produktion und Logistik“ (VDI-GPL) aufgegangen ist, wurde im Mai 2007 der Fachbereich „Zuverlässigkeit in der Intralogistik“ unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Michael ten Hompel gegründet [1]. Der Fachbereich erarbeitete in einem ersten Projekt eine Richtlinie über einen neuen Kennwert zur Beurteilung der Verfügbarkeit von intralogistischen Anlagen. Die Richtlinie wurde auf der letzten Sitzung am 1. April 2009 in Garching fertiggestellt und wird derzeit für den Gründruck vorbereitet.

Der Kennwert „Leistungsverfügbarkeit“ stellt eine Alternative zum Kennwert „technische Verfügbarkeit“ dar, wie er in den VDI-Richtlinien VDI 3581 [2], VDI 3649 [3] und der FEM-Regel FEM 9.222 [4] beschrieben wird. Dieser wird ausgehend vom Anlagenlayout berechnet, was aber in der Praxis immer wieder zu Problemen führt [5]. Die Leistungsverfügbarkeit legt über die Anlage eine „Blackbox“ (vgl. Abb. 1) und betrachtet nur die wesentlichen Schnittstellen, meistens die Arbeitsplätze (weitere Schnittstellen sind denk- und definierbar). Damit werden die Geschäftsziele des Anlagenbetreibers in den Mittelpunkt gestellt.

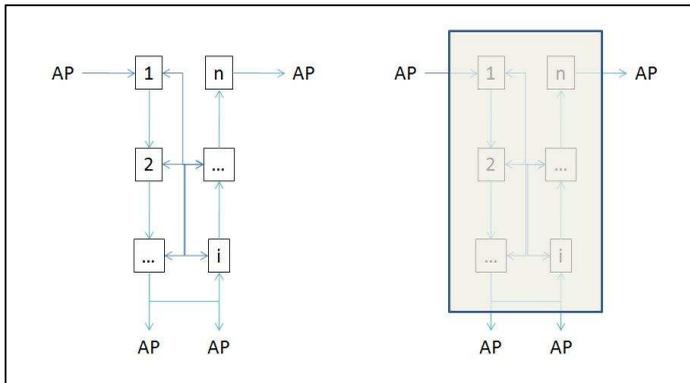


Abbildung 1: Die Anlage als Blackbox (eigene Darstellung)

Definition:

Die Leistungsverfügbarkeit gibt den anforderungs- und termingerechten Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen an. [6]

Zur Quantifizierung des Erfüllungsgrades werden in der Richtlinie zwei Varianten definiert: Wird der Schaden durch die Nichtverfügbarkeit eines Prozesses stetig mit seiner Dauer größer, wird die Leistungsverfügbarkeit mit der Wartezeit an den entsprechenden Schnittstellen gemessen. Die Leistungsverfügbarkeit η_W berechnet sich in diesem Fall an einem Arbeitsplatz aus der Betriebszeit T_B und der Wartezeit T_W wie folgt:

$$\eta_W = \frac{T_B - T_W}{T_B} \quad (1)$$

Tritt ein Schaden ein, wenn der Prozess zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht abgeschlossen wurde und verändert sich dann nicht mehr mit fortschreitender Zeit, berechnet sich die Leistungsverfügbarkeit η_L über die Stückzahl n der Güter, die nicht rechtzeitig zu ihrem Ziel gefördert wurden (N : Gesamtstückzahl):

$$\eta_L = \frac{N - n}{N} \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung der individuellen Geschäftsziele des Betreibers einer Anlage wird in der Richtlinie auf konkrete Handlungsempfehlungen zur Durchführung der Messung verzichtet. Die Durchführung soll sich ebenfalls nach den Bedürfnissen des Betreibers ausrichten und so individuell ausgehandelt werden. Dabei dachten die Autoren der Richtlinie vor allem an große, vollautomatisierte Anlagen, die sich in ihrer Ausführung stark voneinander unterscheiden können.

Ein Großteil der in Deutschland installierten Anlagen ist allerdings weitaus kleiner und weist untereinander eine Reihe von Gemeinsamkeiten auf. Für diese Fälle ist es durchaus sinnvoll, eine Handlungsempfehlung für die Messung der Leistungsverfügbarkeit an der Hand zu haben.

2 Das Standardlager

Das Fachgebiet Fabrikbetrieb der Fakultät Maschinenbau an der TU Ilmenau verfolgt seit 1962 die Entwicklung der Lagerlandschaft in Deutschland. Es werden detaillierte Daten über alle in Deutschland installierten Hochregallager gesammelt und ausgewertet. So zeigt Abbildung 2 den Anstieg an neuinstallierten Anlagen pro Jahr in den letzten vier Jahrzehnten.

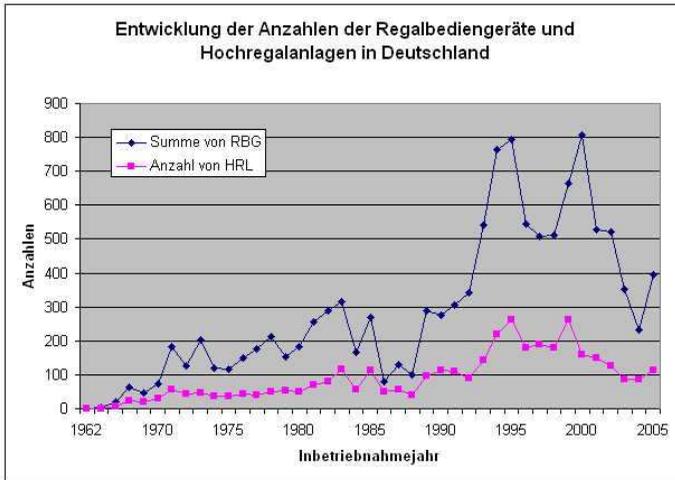


Abbildung 2: Entwicklung der Hochregallager und Regalbediengeräte von 1962 bis 2005 [7]

Wie Abbildung 3 darstellt, ist die durchschnittliche Gassenzahl pro Lager aber vergleichsweise stabil und liegt zwischen drei und vier Gassen mit je einem Regalbediengerät.

In den VDI Richtlinien VDI 4480-1 [8] und VDI 3581 [2] wird ein Hochregallager mit drei Gassen vorgestellt. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, wird das Lager über den Einlagerstich 1 befüllt und über den Auslagerstich 2 geleert. Außerdem werden zwei Kommissionierarbeitsplätze aus dem Lager ver- und entsorgt. Ein Verfahrwagen verteilt die Paletten auf die jeweiligen Förderstrecken und die Ein- und Auslagerpunkte (EP, AP) überwachen den Materialfluss (vgl. Tab. 1).

Da sich die Leistungsverfügbarkeit nicht am Layout orientiert, sondern am Geschäftsziel des Betreibers müssen nun noch eine Reihe von Annahmen getroffen werden. So soll das Lager vor eine Endmontage vorgelagert sein. An den Kommissionierarbeitsplätzen werden die Einzelteile auftragsgerecht zusammengestellt und zum richtigen Zeitpunkt ausgelagert. Die Versorgung der Montageabteilung erfolgt in einem vom Lager unabhängigen Materialfluss. Das Geschäftsziel des Betreibers ist demnach die

auftragsgerechte Montage der Erzeugnisse mit anschließendem termingerechten Versand.

Für die Hochregalanlage folgt daraus das primäre Ziel, die beiden Kommissionierarbeitsplätze auftragsgerecht zu versorgen und die Auftragspaletten termingerecht für die Montage bereit zu stellen. Ein nachrangiges Ziel ist die Aufnahme der am Wareneingang angelieferten Warenpaletten.

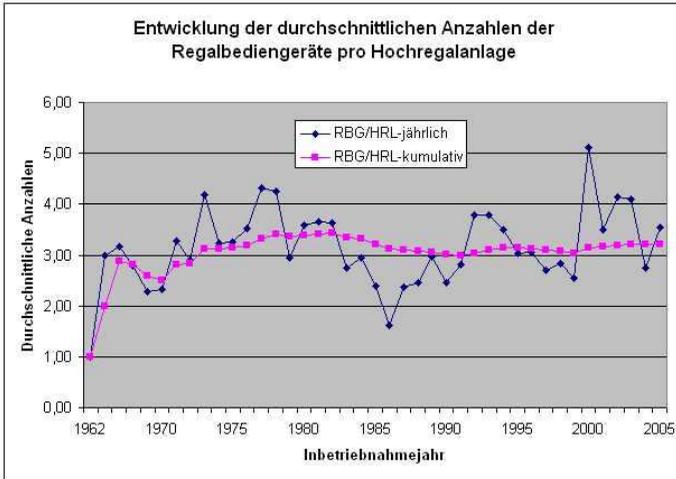


Abbildung 3: Entwicklung der durchschnittlichen Anzahl von Regalbediengeräten pro Hochregallager [7]

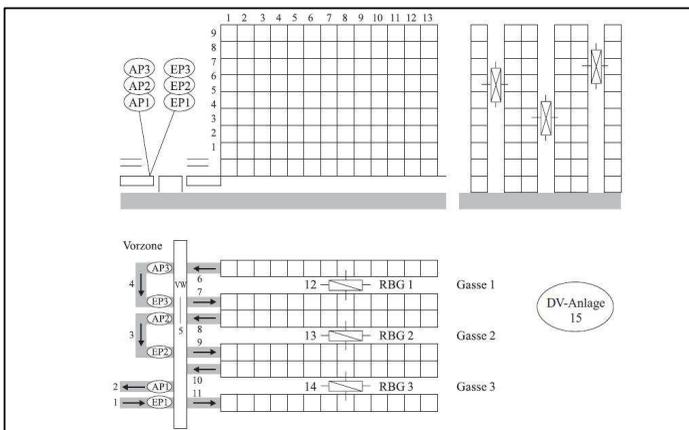


Abbildung 4: Layout [2]

Tabelle 1: Materialflussmatrix

| | WE | HRL | K1 | K2 | AL | Palettenart | Summe |
|-------|----|-------------|------|------|------|-----------------------------------|--------|
| WE | | 10+2 | | | | Warenpaletten | 10+2 |
| HRL | | | 25+5 | 25+5 | 10+2 | Warenpaletten | 60+12 |
| K1 | | 20+4 5+1 | | | | Warenpaletten Auftragspaletten | 25+5 |
| K2 | | 20+4 5+1 | | | | Warenpaletten Auftragspaletten | 25+5 |
| AL | | | | | | | 0 |
| Summe | 0 | 60+12 | 25+5 | 25+5 | 10+2 | 0 | 120+24 |

Die Laufzeit der Anlage beträgt 16 Stunden pro Tag. Die drei Regalbediengeräte sind für eine Leistung von 20-25 Doppelspiele pro Stunde ausgelegt. Die Auslagerungen folgen der FiFo-Strategie. Für die Instandhaltung sind während der Betriebszeit durchgängig zwei Mitarbeiter vor Ort.

Die Leistungsverfügbarkeit des Lagers wird an den Arbeitsplätzen, Wareneingang, Kommissionierarbeitsplatz 1 und 2 und am Auslagerpunkt gemessen.

2.1 Der Wareneingang (WE)

In Summe werden pro Tag zwischen 160 und 200 Warenpaletten angeliefert, die Lieferungen sind über den Tag verteilt. Vor der Förderanlage sind ausreichend Pufferplätze vorhanden. Der Aufgabearbeitsplatz ist für eine Leistung von 10 bis maximal 12 Paletten pro Stunde ausgelegt. Der Takt für die Einlagerung einer Palette beträgt 2 Minuten. Die Anzahl der Pufferplätze (siehe Abb. 5) ist dabei abhängig von der Arbeitsplatzbeschreibung des Einlagerers.

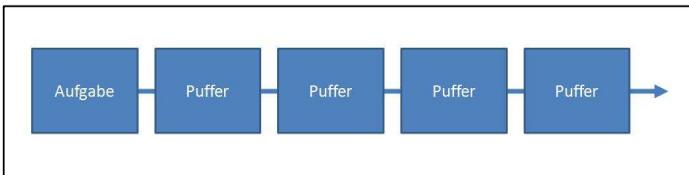


Abbildung 5: Gestaltung des Wareneingangsarbeitplatzes (eigene Darstellung)

Diese richtet sich nach den individuellen Bedürfnissen des Betreibers und bewegt sich zwischen den beiden Extremen:

Ein Extrem wäre die schnellstmögliche Einlagerung der Waren, z. B. um die Kühlkette einzuhalten. In diesem Fall würden viele Pufferplätze gebraucht. Im anderen Extremfall ist am Ende des Tages alles eingelagert und der Mitarbeiter lagert immer dann ein, wenn er sonst nichts zu tun hat. In diesem Fall kommt man mit weniger Pufferplätzen aus. Auch die Leistungsverfügbarkeit berechnet sich dann anders. Für das angenommene Beispiel gehen wir davon aus, dass jeweils zum Schichtende, also nach 8 und nach 16 Stunden alle bis dahin angelieferten Paletten auf die Fördertechnik aufgeben sein sollen. Die Leistungsverfügbarkeit misst sich demnach an den nicht aufgegebenen Paletten gemäß Formel 2 bezogen auf die angelieferten Stück.

2.2 Die Kommissionierarbeitsplätze (K1,K2)

Im Durchschnitt werden an den beiden Kommissionierarbeitsplätzen pro Stunde je 5 Aufträge mit je 5 Positionen bearbeitet.

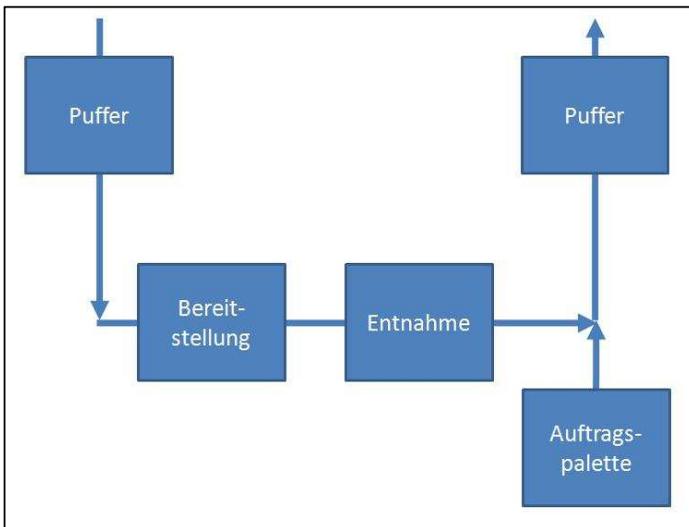


Abbildung 6: Gestaltung der Kommissionierarbeitsplätze (eigene Darstellung)

Aus dem Lager werden also jeweils ca. 25 Warenpaletten zu den Arbeitsplätzen gefördert. Davon gehen 20 angebrochene Warenpaletten zurück ins Lager, die leergeordneten Paletten werden separat entsorgt. Die jeweils 5 fertig kommissionierten Auftragspaletten gehen ebenfalls in das Lager und von dort aus später in die Montageabteilung. In Spitzenzeiten erhöht sich die Leistung um 10% auf 30 Warenpaletten pro Stunde und Arbeitsplatz. Die Arbeitsplätze sind gleichartig gemäß Abb. 6 gestaltet. Die minimale Taktzeit für die Bereitstellung bzw. Entsorgung einer Palette beträgt demnach 2 Minuten. Für die Kommissioniermitarbeiter entsteht Wartezeit, wenn die

geforderte Warenpalette nicht bereitsteht, oder die fertige Kundenpalette nicht weggefordert werden kann. Die Leistungsverfügbarkeit berechnet sich nach Gleichung 1.

2.3 Die Auslagerung (AL)

In Summe werden pro Tag zwischen 160 und 200 Produkte montiert, deren Einzelteile auf Auftragspaletten das Lager verlassen. Die Auslagerungen erfolgen relativ gleichmäßig über den Tag. Der Mitarbeiter bringt die ausgelagerten Paletten direkt zum jeweiligen Montagearbeitsplatz. Die Taktzeit beträgt demnach ca. 5 Minuten pro Auslagerung. Der Entnahmearbeitsplatz ist analog zum Aufgabearbeitsplatz für eine Leistung von 10 bis maximal 12 Paletten pro Stunde ausgelegt, siehe Abb. 7.

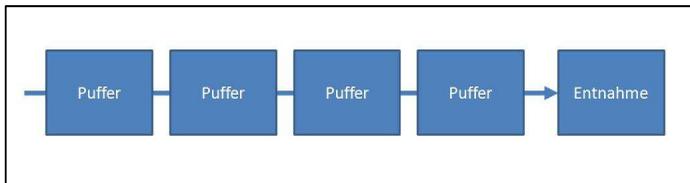


Abbildung 7: Gestaltung des Auslagerarbeitsplatzes (eigene Darstellung)

Tabelle 2: Anforderungen an den Arbeitsplätzen

| Arbeitsplatz | Gleichung | Messzeit | Toleranz | Leistungsverfügbarkeit |
|--------------|-----------|-----------------|--------------|------------------------|
| WE | 2 | Zum Schichtende | Max. 3 Stück | 97% |
| K1, K2 | 1 | Pro Stunde | Max. 2 min | 96,7% |
| AL | 1 | Pro Stunde | Max. 1 min | 98,3% |

3 Durchführung der Abnahme

Für die Abnahme sind folgende Fragen zu klären:

1. Welche Messdaten werden benötigt?
2. Wie werden die Messdaten gewonnen?
3. Wann und über welchen Zeitraum werden sie gewonnen?
4. Nach welchen Regeln werden die Daten interpretiert?

5. Wie ist das Vorgehen nach nicht geglückten Leistungsverfügbarkeitsnachweisen?

3.1 Benötigte Messdaten

Für die Messung am **Wareneingang** benötigt man gemäß Gleichung 2 die Anzahl N aller angelieferten Paletten pro Schicht und die Anzahl n der zu Schichtende noch nicht eingelagerten Paletten. Außerdem muss die Zeit $T_{B,WE}$ aufgenommen werden, in der der Arbeitsplatz tatsächlich besetzt war, um zu überprüfen, ob die nötigen Personalressourcen zur Erfüllung des Prozesses während der Messung gegeben waren.

An den beiden **Kommissionierarbeitsplätzen** und am **Auslagerarbeitsplatz** werden zum einen auch hier die Betriebszeit $T_{B,AP}$ aufgenommen und die Summe der Wartezeit $T_{W,AP}$. Außerdem muss die Anzahl $N_{A,AP}$ der offenen Aufträge beobachtet werden, um zu verhindern, dass Wartezeit angerechnet wird, obwohl kein Auftragsvorrat mehr vorhanden ist und daher der jeweilige Prozess nicht ablaufen kann. Hier ist vor allem die Unterscheidung zwischen $N_A = 0$ und $N_A > 0$ von Bedeutung.

3.2 Datenaufnahme

Tabelle 3: Übersicht über die benötigten Messdaten

| Zeichen | Bezeichnung | Einheit | Arbeitsplatz |
|---------------|-------------------------------------|---------|----------------|
| N | Anzahl gelieferter Paletten | Stück | WE |
| n | Anzahl nicht eingelagerter Paletten | Stück | WE |
| $T_{B,AP}$ | Betriebsdauer am Arbeitsplatz | min | WE, K1, K2, AL |
| $T_{W,K1/K2}$ | Wartezeit am Arbeitsplatz | min | K1, K2, AL |
| N_A | Anzahl Arbeitsvorrat | Stück | K1, K2, AL |

Wesentlicher Bestandteil der Abnahme ist die Sammlung der benötigten Messdaten (vgl. Tab. 3). Dafür sind verschiedene Varianten denkbar:

3.2.1 manuelle Protokollierung

Bei einer Manuellen Datenaufnahme ist keinerlei zusätzliche Ausrüstung nötig, allerdings ist der Personalaufwand hoch, die Messqualität schwankt und ist manipulationsanfällig. Insgesamt besteht hier keine wesentliche Verbesserung im Vergleich zur Datenaufnahme bei herkömmlichen Abnahmetests.

| | |
|-------|---|
| N | Auswertung der Lieferschein |
| n | Zählen bei Schichtende |
| T_B | Listenprotokoll: Anfang und Ende der Pausen, anschließend invertieren |
| T_W | Listenprotokoll: Anfang und Ende der Wartezeit, anschließend aufsummieren |
| N_A | Listenprotokoll: Anfang und Ende der Zeiten, in denen keine Auftragspapiere vorliegen |

3.2.2 Videoaufnahme

Eine Möglichkeit zur Einsparung von Personal während des Tests ist die Videoaufnahme des Arbeitsplatzes. Hier entsteht allerdings hinterher ein schlecht abzuschätzender Auswerteaufwand. Außerdem muss die Videoüberwachung hinsichtlich des Arbeitsrechtes abgesichert werden. Für die Auswertung am Wareneingangsarbeitsplatz bringt die Videoüberwachung keinen Vorteil gegenüber der manuellen Protokollierung.

| | |
|-------|--|
| N | Zählen, evtl. überprüfen über die Lieferscheine (siehe manuell) |
| n | Zählen bei Schichtende |
| T_B | Suchen der Zeitpunkte: Anfang und Ende der Pausen, anschließend invertieren |
| T_W | Suchen der Zeitpunkte: Anfang und Ende der Wartezeit, anschließend aufsummieren |
| N_A | Suchen der Zeitpunkte: Anfang und Ende der Zeiten, in denen keine Aufträge vorliegen |

3.2.3 automatisierte Datenaufnahme

Die automatisierte Datenaufnahme bietet sich an, wenn der Materialfluss im Betrieb mithilfe einer entsprechenden Software überwacht wird. Der große Vorteil einer automatisierten Aufnahme ist die einfache und langfristige Auswertung mit sehr geringem Personalbedarf. Es gibt zwei Möglichkeiten: Mit und ohne Beteiligung der Mitarbeiter.

Bei Beteiligung des Mitarbeiters gibt dieser über entsprechende Schalter den Start- und Endzeitpunkt von Betriebs- und Wartezeit an. Diese Signale lassen sich leicht automatisiert auswerten, allerdings ist - wie bei der manuellen Datenaufnahme - die Genauigkeit der Messung abhängig vom jeweiligen Mitarbeiter und manipulierbar.

| | |
|-------|--|
| N | Summe der im System gebuchten gelieferten Paletten |
| n | Summe der gelieferten, aber nicht eingelagerten Paletten zum Schichtende |
| T_B | MA meldet sich am AP an und ab, |
| T_W | MA betätigt Schalter bei Anfang und Ende der Betriebszeit |
| N_A | Summe der im System vorhandenen Aufträge |

Um die Messung weiter vor subjektiven Einflüssen zu schützen, können mithilfe einer programmierten Auswertung allerdings für die Aufnahme der Wartezeit die vorhandenen Sensorsignale genutzt werden.

An den Kommissionierarbeitsplätzen bieten sich die Signale der Belegungserkennung an: Ist zum Zeitpunkt der Quittierung eines erledigten Auftrages der Bereitstellungsplatz nicht belegt, beginnt die Wartezeitmessung und endet bei der Belegung des Bereitstellungsplatzes. Zusätzlich beginnt die Wartezeitmessung auch, wenn bei Ende eines Auftrages der nachgelagerte Pufferplatz nicht frei ist, und endet, wenn er frei wird. Allerdings wird Wartezeit nur einfach angerechnet.

Am Auslagerarbeitsplatz beginnt die Wartezeit wenn nach Ablauf einer Taktzeit der letzte Pufferplatz nicht belegt ist, und endet bei dessen Belegung.

Der Aufwand für die Programmierung fällt nur einmalig an, sodass er sich vergleichsweise schnell amortisiert. Ein Programmablauf zur Orientierung ist im Anhang der Richtlinie vorhanden. Die automatisierte Datenaufnahme wird demnach empfohlen.

| | |
|-------|--|
| N | Summe der im System gebuchten gelieferten Paletten |
| n | Summe der gelieferten, aber nicht eingelagerten Paletten zum Schichtende |
| T_B | MA meldet sich am AP an und ab |
| T_W | Auswertung der Sensorendaten |
| N_A | Summe der im System vorhandenen Aufträge |

3.3 Testzeitpunkt und -dauer

Bei der automatisierten Datenaufnahme können die Daten von Inbetriebnahme an aufgenommen und ausgewertet werden. Dies bietet zudem den Vorteil, auftretende Startschwierigkeiten schnell zu finden und zu beheben. Zur Abnahme als Vertragsbestandteil gibt es einerseits die Möglichkeit, vorab einen Zeitraum (z.B. 5 Betriebstage, 3 Monate nach Inbetriebnahme) festzulegen, dessen Auswertung dann maßgeblich für die Abnahmeentscheidung ist. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, eine Bedingung festzulegen, wie beispielsweise: „Die Leistungsverfügbarkeit erfüllt fünf Betriebstage lang durchgängig die Anforderungen“. Tritt dieser Fall ein, ist die Anlage automatisch abgenommen.

Entscheiden sich die Vertragspartner für die manuelle und visuelle Datenaufnahme, wird wie bisher ein Testzeitraum vorab vereinbart.

3.4 Dateninterpretation

Die Leistungsverfügbarkeit ist stark auf die Bedürfnisse des Anlagenbetreibers zugeschnitten, da es auch für die Lieferanten vorrangiges Ziel ist, ihren Kunden zufrieden zu stellen. Dies birgt allerdings die Gefahr, dass die Lieferanten ungerechtfertigten Forderungen der Betreiber gegenüberstehen. So können beispielsweise Wartezeiten entstehen, auf die der Lieferant keinen Einfluss hat und die er deshalb nicht verantworten muss. Ursachen für solche Wartezeiten können beispielsweise Bedienungs-

fehler sein, eine fehlerhafte Auftragssteuerung durch eine externe Software, mangelnde Personalressourcen oder eine ungeeignete Instandhaltungsstrategie. Aus diesem Grund wird ein Vorgehen empfohlen, dass die entsprechenden Randbedingungen definiert und quantifiziert werden, auf deren Grundlage dann die Planung der Anlage erst erfolgt. Die Einhaltung der Randbedingung ist Voraussetzung für die Berechnung der Leistungsverfügbarkeit:

So berechnet sich am Wareneingang die Leistungsverfügbarkeit gemäß Gleichung 1. Voraussetzung für die Wertung der Daten ist, dass zum einen der Arbeitsplatz ausreichend lange besetzt war und die Anzahl der angelieferten Paletten die definierte Maximalzahl nicht übersteigt ($N_{max} = 200$, siehe Kapitel 2.1). Dafür wird die Betriebszeit $T_{B,WE}$ mit der benötigten Zeit verglichen, die sich aus der Anzahl N der angelieferten Paletten und der dem Einlagertakt $t = 2$ min berechnet. Sind folgende Bedingungen für den jeweiligen Betrachtungszeitraum erfüllt, gilt die Wartezeit und die Leistungsverfügbarkeit wird berechnet:

$$T_{B,WE} > N \cdot t \quad (3)$$

$$N \leq N_{max} \quad (4)$$

Nicht alle Randbedingungen lassen sich allerdings so leicht definieren. Ein häufig auftretendes Problem bei herkömmlichen Abnahmen ist flatternde Plastikfolie, die die Spaltkontrolle blockiert und so einen Stillstand des Regalbediengerätes auslöst. Tritt im Anschluss daran eine Wartezeit auf, so wird diese abhängig von den Vereinbarungen bewertet: Wurden gemäß den Empfehlungen des Lieferanten entsprechende Investitionen getätigt, um diese Gefahr zu minimieren, und sie tritt trotzdem einmal auf, so zählt die Wartezeit ganz normal. Hat der Betreiber sich allerdings gegen die Investitionen entschieden, so wird als Bedingung aufgestellt, dass Wartezeiten in einem bestimmten Zeitraum nach dem Auftreten der entsprechenden Fehlernummern nicht gewertet werden. Dazu muss ein Abgleich mit den Störungsdaten der Instandhaltung erfolgen.

4 Fazit

Das Konzept der Leistungsverfügbarkeit ist geeignet, auch bei kleinen Lageranlagen die Bedürfnisse des Betreibers abzubilden und auf die Erfüllung der vereinbarten Werte zu testen. Folgt man den Empfehlungen der Richtlinie und investiert den anfallenden Aufwand für die Definition der Bedürfnisse des Betreibers, der Randbedingungen und des Berechnungsalgorithmus, kann man davon ausgehen, dass der Aufwand für die Abnahme deutlich geringer ist, als für die Abnahme der herkömmlichen störungszeitbasierten Verfügbarkeit.

5 Literatur

- [1] Wolf, Josefa: *FA303 - Zuverlässigkeit in der Intralogistik*.
<http://www.vdi.de/7928.0.html>. Version: 2007
- [2] VDI-Richtlinie VDI 3581 12.2004. *Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente*. – Berichtigung der Richtlinie: Oktober 2006
- [3] VDI-Richtlinie VDI 3649 01.1992. *Anwendung der Verfügbarkeitsrechnung für Förder und Lagersysteme*. – Inhaltlich überprüft und unverändert weiterhin gültig: August 2003
- [4] FEM-Regel FEM 9.222 06.1989. *Regeln über die Abnahme und Verfügbarkeit von Anlagen mit Regalbediengeräten und anderen Gewerken*
- [5] Maier, Martina M.: Definitionen der Verfügbarkeit reichen in der Praxis nicht aus: FML-Fachbereich A3 will neue Richtlinien zur Verfügbarkeit erarbeiten. In: *Logistik für Unternehmen* 22 (2008), Nr. 1/2, S. 48–50
- [6] VDI-Richtlinie VDI xxxx Arbeitsstand 01.04.2009. *Leistungsverfügbarkeit*
- [7] TU Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, Fachbereich Fabrikbetrieb: *Hochregallagerstatistik*. 1962-2005
- [8] VDI-Richtlinie VDI 4480 Blatt 1 02.1998. *Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen*

Eigenschaftsermittlung zur optimalen Auslegung von Staurollenketten

Dipl.-Ing. Uwe Dombek

Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel

Technische Universität Chemnitz

Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik

Professur Fördertechnik

Abstract: Fördersysteme mit Staurollenketten werden in immer mehr Anwendungsbereichen eingesetzt. Vor allem in Verkettungssystemen mit Zwischenspeichern werden Staurollenketten zunehmend verwendet. Selbst in Förderanlagen ohne geplanten Staubetrieb können verschiedenste Faktoren zum Stillstand des Fördergutes führen. Besonders für einen Mischbetrieb aus Transport- und Staubetrieb ist die Staurollenkette durch ihre günstigen Fördereigenschaften hervorragend geeignet. Das Hauptziel besteht darin, Wissenslücken über die Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Staurollenketten zu beseitigen und dadurch eine richtige Auslegung der entsprechenden Fördersysteme mit hoher Zuverlässigkeit zu ermöglichen. Durch die Entwicklung eines Überwachungssystems sollen vorzeitige Verschleißerscheinungen erkannt und beseitigt werden können.

1 Einleitung

Die Planung und Auslegung von Fördersystemen mit Staurollenketten setzt die Kenntnis der verschiedenen Kettenkennwerte voraus. Nur doch eine richtige Dimensionierung solcher Systeme kann man den Wünschen nach hoher Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit bei möglichst geringen Kosten nachkommen. Staurollenketten gibt es in den verschiedensten Arten und Größen. Die verschiedenen Kettenarten sind mit stark unterschiedlichen Eigenschaften verbunden. Je nach Anwendungsgebiet und Belastungsfall kommen die unterschiedlichen Bauarten zum Einsatz.

Aktuell basieren nahezu alle Kennwerte von Staurollenketten auf Erfahrungswerten. Mit einem Versuchsstand und entsprechender Messtechnik sollen relevante Kenngrößen der schonenden Transportkette ermittelt werden. Durch eine Selektion der ausfallrelevanten Kenngrößen ist eine Überwachungsstation zu entwickeln, welche während des Einsatzes des Transportsystems auftretende Fehler detektiert und somit ein Ausfall rechtzeitig verhindert werden kann. Dieses System lässt sich in neue, aber auch in bestehende Systeme integrieren.

2 Die Staurollenkette

Bei Staukettenfördersystemen wird das Fördergut auf mindestens zwei Kettensträngen transportiert. Als Mitnehmerelemente dienen hierzu auf den Kettenbuchsen angebrachte Förderrollen. Eines der größten Anwendungsgebiete solcher Systeme ist die Verkettung von verschiedenen Montagestationen. Da es zwischen den einzelnen Stationen oft zu gewünschten und unerwünschten Unterbrechungen des Transportes kommt, zeichnet sich die Staurollenkette mit ihrer Eigenschaft der problemlosen Pufferung als bestens geeignet aus. Ebenfalls finden sie Anwendung im Bereich des Paletten- und Behältertransportes. Da zur Staurollenkette keine Norm existiert, gibt je nach Anwendung unterschiedliche Bauarten, welche sich konstruktiv unterscheiden. Der Grundaufbau einer Staurollenkette entspricht prinzipiell dem Aufbau einer standardisierten Rollenkette (DIN 8187). Jede zweite Rolle zwischen den Innenlaschen einer Rollenkette wird durch eine große Förderrolle ersetzt. Dadurch ist eine Führung auf den Laschen durch die bei Rollenketten nach DIN 8187 genutzten Schienen nicht mehr möglich. Durch die Verlängerung der Bolzen der Kette können zusätzliche Rollen an der Kette angebracht werden. Diese Laufrollen ermöglichen eine Führung auf speziell dafür angefertigten Profilen. Die Grundabmessungen der Stauförderketten orientieren sich an den Standard-Rollenketten, wobei bei den Staurollenketten nur $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ " und 1 Zoll Ketten gefertigt und verwendet werden. Die Abbildung 1 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Staurollenkette.

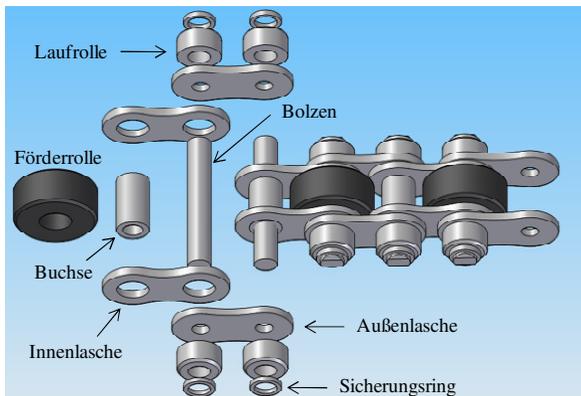


Abbildung 1: Aufbau einer Staurollenkette mit Kunststoffförderrollen

Aus dem konstruktiven Aufbau ergeben sich folgende Merkmale:

- schonender Transport des Fördergutes
- im Staubetrieb nur Rollreibung

- kostengünstig schwere Lasten transportierbar
- zwischen den parallelen Ketten ist Platz für Zusatzelemente frei
- einfacher und zuverlässiger Transport von Werkstücken
- Ketten äußerlich sauber, da nur in Gelenkstellen geschmiert
- Förderrollen aus gehärtetem Stahl oder Kunststoff wählbar
- große Auswahl an verschiedenen Staurollenkettentypen
- modularer Aufbau des Fördersystems

2.1 Funktionsprinzip

Durch die auf den Buchsen angebrachten Förderrollen kann das Fördergut einfach transportiert und schonend gestaut werden. Die Abbildung 2 verdeutlicht diesen Prozess des Abrollens der Förderrollen durch eine angebrachte Haltevorrichtung.

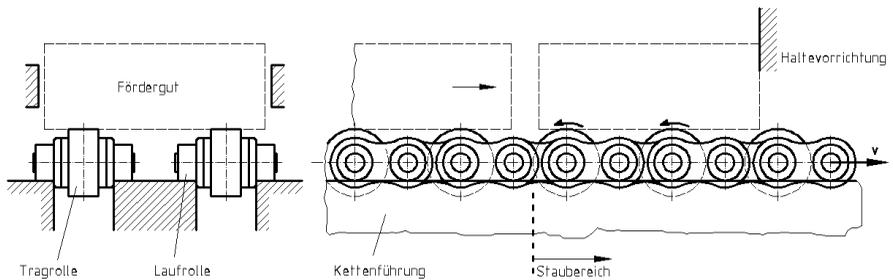


Abbildung 2: Funktionsprinzip „Stauen“

2.2 Klassifizierung und Arten

Da Staurollenketten keinen Normungen unterliegen, gibt es mittlerweile schon eine Vielzahl an Bauarten. So wurden zunächst nur einzelne Komponenten verbessert. Später erschienen immer mehr unterschiedliche Bauarten. Somit lassen sich Staurollenketten nach folgenden Kriterien klassifizieren:

- | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| - nach der Lage der Förderrollen: | - innerhalb des Kettengliedes |
| | - außerhalb des Kettengliedes |
| - nach Anzahl der Kettenstränge: | - Einstrang-Staurollenkette |
| | - Mehrstrang-Staurollenkette |
| - nach Anzahl der Förderrollen: | - eine Rolle je Kettenbolzen |
| | - Rolle auf jedem zweiten Bolzen |
| - nach Art der Förderrollen: | - Stahlförderrollen |
| | - Kunststoffförderrollen |

- nach Schmierungsstatus:
 - vorgeschmiert
 - ungeschmiert
- nach Größe der Kettenteilung:
 - $\frac{1}{2}''$, $\frac{3}{4}''$ Teilung usw.

Standard-Staurollenkette: Diese Bauart der Staurollenkette ist die in der Praxis am häufigsten eingesetzte Kette. Der Aufbau ist in Abbildung 3 grafisch dargestellt. Jeweils eine Förderrolle aus Stahl oder Kunststoff ist in der Mitte des Kettengliedes auf jedem zweiten Bolzen angeordnet. Die Laufrollen befinden sich außen auf den Bolzen, welche im Gegensatz zur Standardrollenkette nach DIN 8187 extra zur Aufnahme der Rollen verlängert sind. Zur Funktionserweiterung und Steigerung der Sicherheit gibt es verschiedene Elemente, die nachträglich oder bei der Fertigung der Ketten auf die Buchsen ohne Förderrolle montiert werden können. So gibt es neben verschiedensten konstruktiven Ausführungen von Füllstücken zum Teile- und Fingerschutz auch unterschiedliche Bürstenelemente, welche zur Reinigung und zur Verhinderung von elektrostatischen Ladungen angebracht werden. Der Antrieb der Kette erfolgt mit Hilfe von speziellen Kettenrädern, welche an den Laufrollen angreifen.

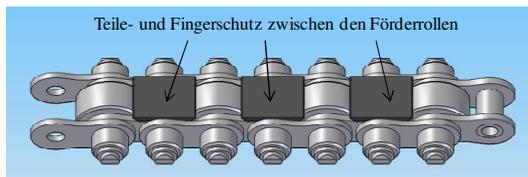


Abbildung 3: Standard-Staurollenkette

Staurollenkette mit versetzten Förderrollen: Bei dieser Art einer Staurollenkette handelt es sich im Grundaufbau um eine Standard-Staurollenkette. Die Breite der Förderrollen ist hierbei jedoch halbiert. Dadurch ist es möglich, auf jeden Bolzen eine Förderrolle zu montieren. Dies ist durch eine Versetzung, dieser zur Förderung verwendeten Rollen, realisiert. Ein ruhiger und schonender Transport des Fördergutes ist das Ergebnis dieser konstruktiven Umgestaltung. Die Gewichtskraft des zu fördernden Gutes verteilt sich somit bei gleicher Auflagefläche auf mehr Rollen. Als Nachteil können die fehlende Möglichkeit zur Umrüstung mit Zusatzelementen und die reduzierte Belastbarkeit der einzelnen Förderrollen genannt werden. Auch bei dieser Staurollenkettentart gibt es die Förderrollen aus Kunststoff oder Stahl.

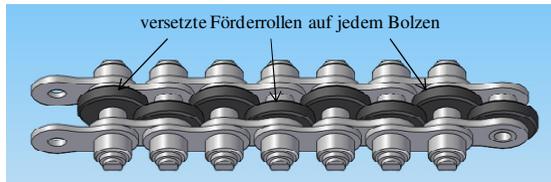


Abbildung 4: Staurollenkette mit Kunststoffförderrollen auf jedem Bolzen

Mehrstrang-Staurollenketten: Mehrstrang-Staurollenketten bestehen aus mehreren aneinander geketteten Einzelsträngen, welche durch einen gemeinsamen Bolzen verbunden sind. Der größte Vorteil dieser Kettenart ist die erhöhte Leistungsfähigkeit. Wie bei Rollenketten ist jedoch nicht von einer mit der Strängigkeit linear steigenden Leistungsfähigkeit auszugehen. Je mehr Einzelstränge verwendet werden, desto größer ist der prozentuale Abfall der Leistungsfähigkeit im Vergleich zu einer Einstrangkette [1].

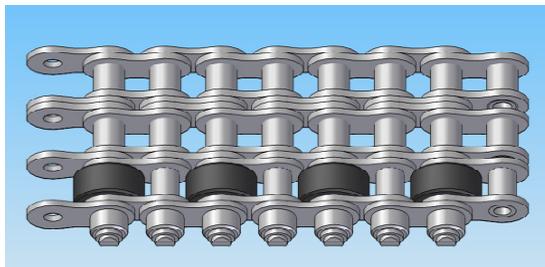


Abbildung 5: Mehrstrangstaurollenkette

Staurollenketten mit Förderrollen außerhalb des Kettengliedes: Der Antrieb dieser Bauart der Staurollenkette kann aufgrund der Lage der Förderrollen durch ein Kettenrad für Standardrollenketten erfolgen. Die Bolzen der Ketten sind richtungswechselnd einseitig verlängert, um so die Förderrollen außerhalb des Kettengliedes befestigen zu können.

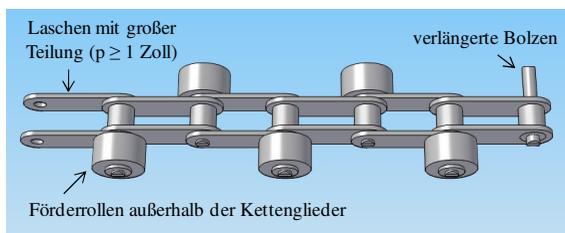


Abbildung 6: Langgliederstaurollenkette mit äußeren Förderrollen

Wartungsfreie Kunststoff-Staurollenketten: Gemeinsam mit einem Kettenhersteller wurde eine neuartige wartungsfreie Staurollenkette, die größtenteils aus Kunststoff besteht, entwickelt. Dadurch ist es möglich, die Materialien mit unterschiedlichen Gleitmitteln usw. zu modifizieren, um die Ketten an die jeweiligen Anwendungsgebiete anpassen zu können. Ein Kettenglied besteht aus einem Laschenblock mit bzw. ohne (leichte Ausführung) stahlverstärkten Gleitschuhen, Stahlbolzen und einer Kunststoffförderrolle. Die Vorteile dieser Kettenart sind die Wartungsfreiheit, die niedrigen Laufgeräusche, eine verlängerte Lebensdauer und die dadurch reduzierten Wartungskosten.

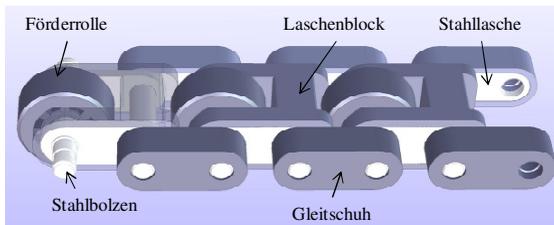


Abbildung 7: Wartungsfreie Staurollenkette aus Kunststoff

3 Auslegung der Fördersysteme

Aktuell werden Fördersysteme nur sehr überschlägig nach folgender Formel [2] berechnet.

$$F = \frac{\mu \cdot g \cdot F_G \cdot 1,4}{n} [\text{N}]$$

μ = Reibwert (aktuell zwischen 0,08 und 0,3 angesetzt)

F_G = Gesamtfördergewicht [kg]

n = Anzahl der Kettenstränge

Diese Formel setzt eine gleichmäßige Verteilung der Gewichtsbelastung auf die Kettenstränge voraus. Die Wichtigkeit der Ermittlung von Kettenkennwerten verdeutlicht der Reibwert μ , welcher zwischen 0,08 und 0,3 je nach Werkstoffpaarung, Schmierzustand und Verschmutzungsgrad angenommen wird. Diese Werte basieren jedoch nur auf Erfahrungswerten und sind nicht ausreichend überprüft. Ebenso steigt der Reibwert schon nach kurzer Laufzeit der Fördersysteme stark an. Weiterhin wird für die Auslegung der Ketten lediglich die maximale Zugkraft (Bruchkraft) angewendet, wobei dies nicht die wirklich zulässige Kettenzugkraft der unterschiedlichen Kettentypen ist. Jedoch ist diese die relevante Größe für die Auslegung der Ketten, wobei sie noch unbekannt ist und aktuell nur überschlägig geschätzt wird. Aufgrund dieser lückenhaften Voruntersuchung ist eine genaue Ermittlung der Kettenkenngrößen für eine korrekte Auslegung notwendig.

4 Versuchsstand und Versuchsprogramm

4.1 Versuchsstand

An der TU Chemnitz/Professur Fördertechnik wurde ein Versuchsstand konzipiert, gebaut und mit Messtechnik ausgerüstet, mit dessen Hilfe realistische Versuchsbedingungen geschaffen werden können. Bei der Konzeption des Versuchsstandes wurden folgende Anforderungen berücksichtigt:

- Möglichkeit des Testens verschiedener Staurollenkettentypen
- Möglichkeit des Testens von verschiedenen Kettengrößen
- stufenlos regelbare Drehzahl bzw. Fördergeschwindigkeiten
- Möglichkeit des Aufbringens unterschiedlichen Fördermassen
- Möglichkeit unterschiedlicher Belastung der Ketten
- dauerhafte Messung von Zugkraft, Drehzahl, Kettenlängung und Staukraft
- Möglichkeit der Messung der Temperaturentwicklung durch Thermokamera bzw. berührungslose Sensoren
- Möglichkeit zur Messung des Laufverhaltens der Werkstückträger

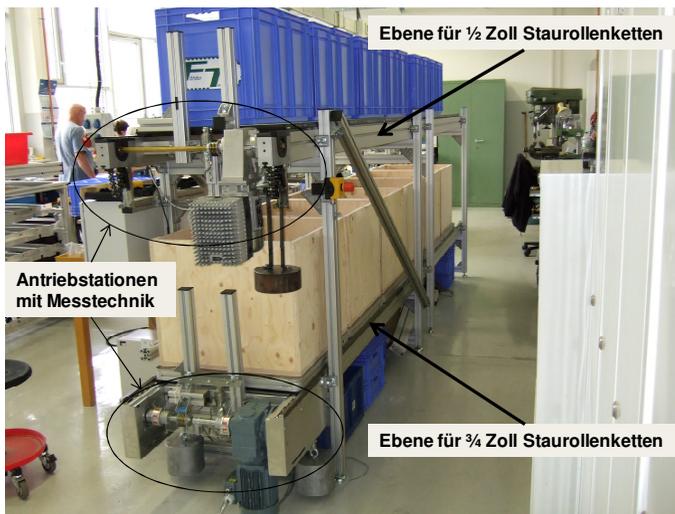


Abbildung 8: Versuchsstand zur Kennwertermittlung

4.2 Messtechnik

Zur Ermittlung der spezifischen Kennwerte des Fördersystems (z.B. Kettenlängung, Reibwerterhöhung, Temperaturerhöhung) ist die Ausrüstung des Versuchstandes mit

entsprechender Messtechnik erfolgt. Die Abbildung 9 zeigt die am Versuchsstand angebrachte Messausrüstung zur Realisierung der unter Punkt 4.1 erwähnten Anforderungen:

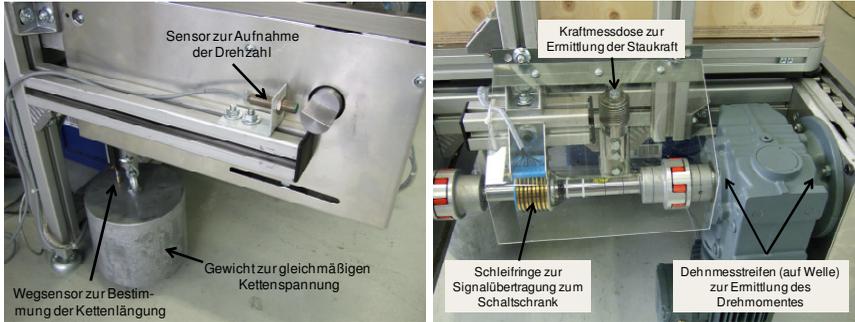


Abbildung 9: Messtechnik an der Antriebstation für 3/4 Zoll Ketten

4.3 Versuchsprogramm und erste Ergebnisse

Zunächst wurden die Ketten auf ihre Zug- bzw. Dauerfestigkeit mit der dynamischen Werkstoffprüfmaschine INSTRON getestet. Aufgrund des gleichen Aufbaus wie Standard-Rollenketten ist die Bruchfestigkeit der Staurollenketten nahezu identisch mit den Werten der Rollenkette. Die Dauerfestigkeit nach ISO15654 weist jedoch deutliche Unterschiede auf. Diese liegt im Gegensatz zur Rollenkette bei nur ca. 7% der Bruchfestigkeit. (ca.14% bei Rollenketten)

Bruchfestigkeit

| | 1/2 Zoll | 3/4 Zoll |
|---|----------|----------|
| Standardstaurollenkette | 19,9 kN | 30,6 kN |
| Vergleichbare Antriebskette (DIN8781-1) | 18,0 kN | 29,0 kN |
| Staurollenkette mit versetzten Rollen | 10,6 kN | 17,8 kN |



Dauerfestigkeit nach ISO15654

| | 1/2 Zoll |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Standardstaurollenkette | 1,458 kN (7,3% Bruchfestigkeit) |
| Vergleichbare Antriebskette (ISO606) | 2,480 kN (13,8% Bruchfestigkeit) |
| Staurollenkette mit versetzten Rollen | 0,761 kN (7,2 % Bruchfestigkeit) |

Abbildung 10: Bruch- und Dauerfestigkeitsermittlung

Zur Ermittlung relevanter Kenngrößen für eine Staurollenkette im Einsatz wurde zunächst die in der Praxis am häufigsten eingesetzte Staurollenkettentart gewählt. Diese als Standard-Staurollenkette bezeichnete Ausführung wird zunächst mit einer Gesamtlast von 1t (1/2 Zoll) bzw. 1,4t (3/4 Zoll) auf 4,5m Förderlänge belastet. Die nachfolgenden ersten Ergebnisse beziehen sich auf den Dauerversuch der 3/4 Zoll Kette. Hierbei hat sich das Drehmoment als relevanteste Ausfallgröße gezeigt. Die Abbildung 11 zeigt die Entwicklung des Drehmomentes im Dauerversuch der beiden Kettenstränge. Hierbei wird nach ca. einem Tag Einlaufzeit eine Verdoppelung des Drehmomentes aufgrund der Änderung der Reibwertes der Laufrollen erreicht.

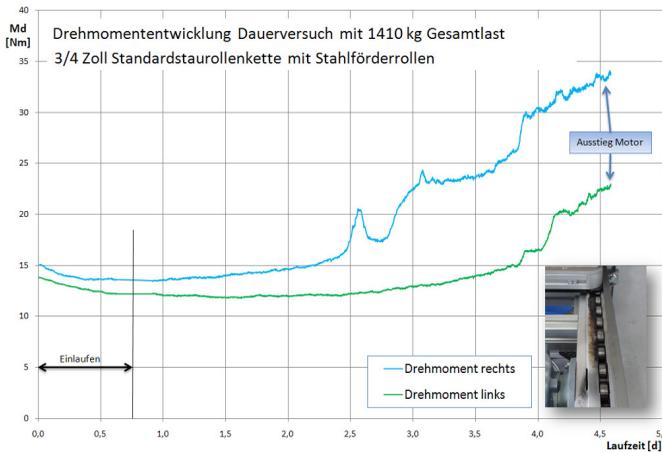


Abbildung 11: Entwicklung des Drehmomentes bei 3/4 Zoll Standard-Staurollenketten

Bei der Betrachtung der Kettentemperatur zeigte sich bereits nach den 5 Tagen Dauerversuch, dass sich die Laufrollen stark unterschiedlich erwärmen und sie somit unterschiedliche Reibwerte aufweisen. Die Auswertung der gemessenen Kettenlänge zeigte weiterhin, dass diese Eigenschaft nicht relevant für die Auslegung bzw. die Ausfallwahrscheinlichkeit des Kettensystems ist (Tabelle 1).

Tabelle 1: Kettenlänge nach Dauerversuch

| | Längung | Erlaubte Längung [1] |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 1/2 " Standardstaurollenkette | 0,52 % (65 Tage Dauerversuch) | 3 % |
| 3/4 " Standardstaurollenkette | 0,04 % (5 Tage Dauerversuch) | 3 % |

Die aus den ersten Versuchen gewonnenen Ergebnisse verdeutlichen die Wichtigkeit einer dauerhaften Überprüfung des Reibwertes der Rollen. Somit wurde eine Überwachungsstation entwickelt, welche durch spezielle Druckfedern die Kraft pro Rolle

des Dauerversuchs simuliert. Diese Überwachungsstation (Abbildung 12) ermittelt während des Betriebes der Transfersysteme die Gesamtheit der Reibwerte von Stau- bzw. Laufrollen ohne den laufenden Betrieb zu behindern. Somit können rechtzeitig feste bzw. schwer laufende Rollen detektiert werden und der Reibwert durch Nachschmierung bzw. Austausch des Kettengliedes wieder gesenkt werden, um so einen Ausfall des Systems zu verhindern. Nachfolgend ist die Überwachungsstation mit unten angebrachter Vorrichtung für einen Biegebalken zur Ermittlung der wirkenden Kräfte dargestellt.

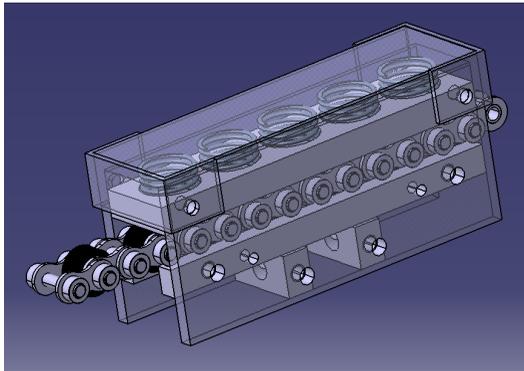


Abbildung 12: Überwachungseinheit für Staurollenketten

5 Zusammenfassung und Ausblick

Erste am Versuchsstand gewonnene Kennwerte lassen auf relevante Parameter zur Beschreibung von Kettenausfällen schließen. Somit konnten erste Kettengrößen favorisiert bzw. ausgeschlossen werden. Durch diese Untersuchungen war es möglich eine konstruktive einfache Station zur Überwachung von Staurollenketten im praktischen Einsatz zu entwerfen und zu konstruieren.

Die entwickelte Überwachungsstation für Staurollenketten ist auf ihre Funktionalität ausführlich zu testen und an bestehende Randbedingungen anzupassen. Weiterhin sollte die für den Prototypen verwendete Kraftmessdose durch Dehnmessstreifen ersetzt werden, um somit eine wirtschaftliche Überwachung der Parameter durchführen zu können. Um für die Auslegung der Fördersysteme weitere Kenndaten hinterlegen zu können, sind weitere Untersuchungen bzw. Dauerversuche an Staurollenketten durchzuführen. Hierbei ist es notwendig die gängigsten Staurollenkettentypen und -größen heranzuziehen, um somit eine bessere Überwachung bzw. im Vorfeld eine bessere Auslegung von Staurollenketten zu ermöglichen.

Literatur:

- [1] Flexon GmbH: Technisches Handbuch für Rollenketten und Flyerketten, Auflage 2003
- [2] iwis antriebssysteme GmbH: Gesamtkatalog, Auflage 08/2007

Bewegung eines Fördergutes auf einer dynamischen Gleitfördermembran

Dipl.-Wi.-Ing. Melf Gerthsen

Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns

Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg

Professur für Maschinenelemente und Technische Logistik

Abstract: Der Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (MTL) entwickelt mit der Gleitförderung eine neue Materialflusstechnologie, die unterschiedliche Fördergüter handhaben und alle grundlegenden logistischen Funktionen durchführen kann. Nach der erfolgreichen Erprobung eines Prototyps wird derzeit eine bildverarbeitungsgestützte Regelung der Gutbewegung entwickelt. Erstes Ergebnis dieser Arbeit ist die mathematische Modellierung der Regelstrecke für eine translatorische Fördergutbewegung durch die Bewegungsdifferentialgleichung eines rutschenden Objektes auf einer gekrümmten und zeitveränderlichen Bahn.

Handhaben von Objekten mit einem Gleitförderer

Das grundlegende Prinzip der Gleitförderung ist das Gleiten von Objekten auf einer Fördermembran. Dazu sind unter der Membran Stellelemente angeordnet, die in der Oberfläche temporäre Deformationen erzeugen (siehe Abb. 1). Diese führen zu einer Neigung der Oberfläche und die Fördergüter beginnen zu rutschen. Durch das gezielte Steuern der Stellelementbewegungen können die Auslenkungen, wie z.B. Hügel, Wellen oder Senken, in der Fördermembran bewegt werden. Die Fördergüter werden durch diese Bewegung mitgenommen und können flexibel transportiert oder orientiert werden.

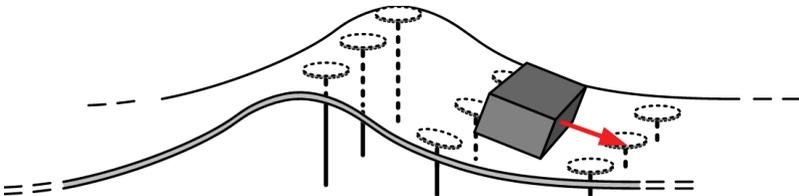


Abbildung 1: Prinzip der Gleitförderung

Umgesetzt wurde dieses Prinzip in dem in Abb. 2(a) dargestellten Prototyp, mit dem Objekte translatorisch und rotatorisch verfahren werden können. Die Stellelemente werden durch eine Aktorik aus Schrittmotoren und Zahnriementrieben realisiert. Je vier

der insgesamt 60 Aktoren sind in einem Modul zusammengefasst (siehe Abb. 2(b)) und werden über einen Schrittmotorverstärker angesteuert. An den Stellelementen sind elastische Polyurethan-Stäbe angebracht, die die vertikalen Bewegungen an ein technisches Gewebe übertragen und dadurch die Deformationen, wie die in Abb. 2(a) zu sehende Senke, erzeugen. Die Berechnung der Aktorbahnen erfolgt durch eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und wird über einen CAN-Bus an die Schrittmotorverstärker gesendet. Das Steuerungsprogramm ist voll parametrisiert, so dass lediglich die Soll-Trajektorie für das Objekt und die Deformations-Parameter der Oberfläche vorgegeben werden müssen.



Abbildung 2: Erster Prototyp für die Gleitförderung (a) und dessen Stellelemente (b)

Auf diesem System aufbauend wird derzeit eine bildverarbeitungsgestützte Regelung der Fördergutbewegung entwickelt. Zur Erfassung der Objektposition (Regelgröße) wird der Prototyp durch eine Kamera erweitert und die Bildverarbeitungssoftware in der SPS implementiert. Für die Formulierung der Regelstrecke ist eine mathematische Beschreibung der komplexen Fördergutbewegung notwendig, die Bestandteil der nächsten Abschnitte ist.

Herleitung der Bewegungsdifferentialgleichung

Die Bewegung der Objekte auf einem Gleitförderer kann geradlinig und/oder drehend erfolgen. Als Ausgangspunkt für die Betrachtung komplexer Bewegungen wird im ersten Schritt die geradlinige Bewegung analytisch untersucht.

Das grundlegende Prinzip des Gleitens der Güter auf der Fördermembran ist die Schwerkraftförderung. Für Rutschen und Fallrohre ist dieses physikalische Prinzip erforscht und hinreichend genau durch das Gleiten eines Objektes auf einer schiefen Ebene beschreibbar. Die Herleitung der Bewegungsgleichung für dieses Modell erfolgt

üblicherweise durch das Erstellen eines Freikörperbildes (vgl. Abb. 3) und dem Aufstellen des Kräftegleichgewichts.

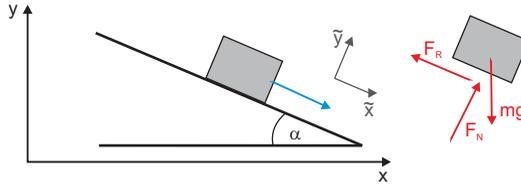


Abbildung 3: Rutschendes Objekt auf einer schiefen Ebene und das zugehörige Freikörperbild

Das Aufstellen des Kräftegleichgewichts kann in einem globalen oder einem lokalen Koordinatensystem erfolgen. Bei dem Modell der schiefen Ebene (SE) ist es zweckmäßig ein in die Bewegungsrichtung gedrehtes, unbewegtes lokales Koordinatensystem (\tilde{x}, \tilde{y}) einzuführen. Hiermit kann die Beschleunigung im lokalen Bezugssystem bestimmt und in das globale Koordinatensystem (x, y) transformiert werden. Mit dem *Coulombschen Reibungsgesetz*¹ folgt für die Beschleunigungen des Körpers in \tilde{x}, x -Richtung:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{SE} &= g \cdot \sin(\alpha) - \mu \cdot g \cdot \cos(\alpha), \\ \ddot{x}_{SE} &= \ddot{\tilde{x}}_{SE} \cdot \cos(\alpha) = (g \cdot \sin(\alpha) - \mu \cdot g \cdot \cos(\alpha)) \cdot \cos(\alpha).\end{aligned}\quad (1)$$

Bei der Gleitförderung ist das Nutzen eines lokalen Koordinatensystems nicht ohne Weiteres möglich. Ursache ist die Krümmung der Oberfläche, die sich zusätzlich durch das Verfahren der Deformationen zeitlich ändert. Dies würde zu einem bewegten Bezugssystem und damit dem Auftreten von Scheinkräften führen. Um dies zu vermeiden, wird für das weitere Vorgehen ein globales Koordinatensystem als Inertialsystem gewählt.

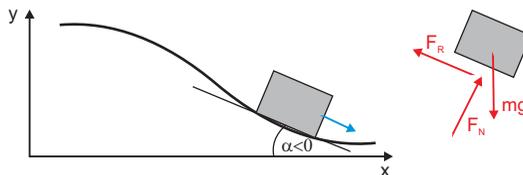


Abbildung 4: Körper auf einer Wellenfunktion und das zugehörige Freikörperbild

Betrachtet man einen beliebigen Körper auf einer frei wählbaren Wellenfunktion und setzt einen Punktkontakt zwischen Körper und Oberfläche voraus, ergibt sich für einen

¹C.A. Coulomb (1736-1806) zeigte durch Versuche, dass die Reibkraft in guter Näherung proportional zur Normalkraft F_N ist und dass sie der Gleitgeschwindigkeit entgegengerichtet und unabhängig von deren Betrag ist. Dies führte zu der Formulierung seines Reibungsgesetzes $F_R = \mu \cdot F_N \cdot \text{sign}(\dot{x})$ [1].

definierten Zeitpunkt das aus Abb. 3 bekannte und in Abb. 4 dargestellte Freikörperbild. Da die Neigung der Fördermembran sich zeitlich und örtlich ändert, ist der abgebildete Winkel α sowohl von x als auch von t abhängig. Zudem ist $\alpha(x,t)$ als Steigung der Tangente am Berührungspunkt zwischen Welle und Körper negativ. Aus den Gleichgewichtsbedingungen und dem *Coulombschen Reibungsgesetz* ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{x}(t) &= F_N \cdot \sin(-\alpha(x,t)) - F_R \cdot \cos(-\alpha(x,t)) \\ &= -F_N \cdot \sin(-\alpha(x,t)) - F_R \cdot \cos(-\alpha(x,t)), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m \cdot \ddot{y}(t) &= F_N \cdot \cos(-\alpha(x,t)) + F_R \cdot \sin(-\alpha(x,t)) - m \cdot g \\ &= F_N \cdot \cos(\alpha(x,t)) - F_R \cdot \sin(\alpha(x,t)) - m \cdot g, \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_R = \mu \cdot F_N \cdot \text{sign}(\dot{x}). \quad (4)$$

Dieses Gleichungssystem mit vier unbekanntenen Größen ($\ddot{x}, \ddot{y}, F_N, F_R$) und drei Gleichungen ist nicht eindeutig lösbar. Um eine vierte Gleichung zu bestimmen, werden die Bewegungsfreiheitsgrade $x(t)$ und $y(t)$ miteinander gekoppelt. Dazu wird ein stetiger Kontakt zwischen Fördergut und Membran beim Gleiten vorausgesetzt. Das bedeutet,

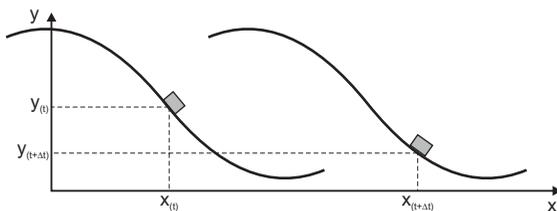


Abbildung 5: Körper und Welle zum Zeitpunkt t und $t + \Delta t$

dass die Höhe des Körpers y zum Zeitpunkt t , vergleiche Abb. 5, stets der y -Koordinate der Welle y_W an der Position x des Körpers zum Zeitpunkt t ist. Damit gilt:

$$\begin{aligned} y(t) &= y_W(x(t), t), \\ y(t+\Delta t) &= y_W(x(t+\Delta t), t+\Delta t) = y_W(x(t), t) + \frac{\partial y_W(x(t), t)}{\partial x} \cdot \Delta x + \frac{\partial y_W(x(t), t)}{\partial t} \cdot \Delta t. \end{aligned}$$

Die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Körpers in y -Richtung lassen sich aus den Ableitungen des Ortes nach der Zeit gewinnen:

$$\begin{aligned}
\dot{y}(t) &= \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{y_W(x_{t+\Delta t}, t+\Delta t) - y_W(x_t, t)}{\Delta t} \right] = \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{\partial y_W(x, t)}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial y_W(x, t)}{\partial t} \right], \\
\Rightarrow \dot{y}(t) &= y'_{W(x, t)} \cdot \dot{x}(t) + \dot{y}_{W(x, t)}, \\
\Rightarrow \ddot{y}(t) &= \left[y''_{W(x, t)} \cdot \dot{x}(t) + \dot{y}'_{W(x, t)} \right] \cdot \dot{x}(t) + y'_{W(x, t)} \cdot \ddot{x}(t) \\
&\quad + \dot{y}'_{W(x, t)} \cdot \dot{x}(t) + \ddot{y}_{W(x, t)}. \tag{5}
\end{aligned}$$

Mit den Gleichungen 2 bis 5 ist es möglich das Gleichungssystem zu lösen. Das Ergebnis der Berechnungen liefert eine inhomogene nichtlineare Differentialgleichung zweiter Ordnung mit nicht-konstanten Koeffizienten, die nur noch von der Gravitationskonstante g , der Geschwindigkeit des Fördergutes $\dot{x}_{GM(t)}$ und den einzelnen Ableitungen der Wellenfunktion y_W abhängt. Die neu gewonnene *Wellengleitgleichung* für das translatorische Gleiten eines Körpers auf einer zeitveränderlichen und gekrümmten Bahn lautet:

$$\ddot{x}(t) = \frac{\mu \cdot \text{sign}(\dot{x}(t)) + y'_{W(x, t)}}{-y_{W(x, t)}^2 - 1} \cdot \left[y''_{W(x, t)} \cdot \dot{x}(t)^2 + 2 \cdot \dot{y}'_{W(x, t)} \cdot \dot{x}(t) + \dot{y}_{W(x, t)} + g \right]. \tag{6}$$

Modellvalidierung

Die Überprüfung der Bewegungsdifferentialgleichung wird an zwei Spezialfällen durchgeführt. Zuerst an der schiefen Ebene, bei der die Übereinstimmung der Wellengleitgleichung analytisch für eine statische und ungekrümmte Bahn geprüft wird. Für den Fall der gekrümmten Bahn wird das reibungsfreie Gleiten auf einer Kreisbahn durch eine Simulation untersucht.

Das Modell der schiefen Ebene ist bereits aus Abb. 3 bekannt. Im Unterschied zur oben aufgestellten Gleichung 1, wird der Winkel α , äquivalent zu der Wellengleitgleichung, als Steigung der Geraden negativ eingeführt. Damit folgt für die Bewegungsgleichung:

$$\ddot{x}_{SE} = (g \cdot \sin(-\alpha) - \mu \cdot g \cdot \cos(-\alpha)) \cdot \cos(-\alpha) \tag{7}$$

Zum Vergleich der aus Gleichung 6 bekannten Wellengleitgleichung mit \ddot{x}_{SE} müssen zuerst deren Parameter bestimmt werden. Grundlage dafür bildet die Wellenfunktion, die für die schiefe Ebene als Geradengleichung $y_{SE} = b + m \cdot x$ gegeben ist. Der Summand b beschreibt die Starthöhe der Geraden und der Faktor $m < 0$ deren Steigung. Damit können die einzelnen Parameter bestimmt und die Bewegungsgleichungen aufgestellt werden. Die Bewegungsgrößen des gleitenden Objektes werden mit GM indiziert,

um für weitere Berechnungen die Herkunft der Größen aus dem Gleitfördermodell zu verdeutlichen.

$$\begin{aligned}
 y_{W(x,t)} &= y_{W(x)} = b + m \cdot x \\
 y'_{W(x)} &= m = \tan \alpha \\
 y''_{W(x)} &= y'_{W(x)} = \ddot{y}_{W(x)} = 0 \\
 \text{sign}(\dot{x}) &= 1 \\
 \Rightarrow \ddot{x}_{GM} &= \frac{\mu + m}{-m^2 - 1} \cdot g \quad (8)
 \end{aligned}$$

Wenn das Modell valide ist, müssen die Beschleunigungen \ddot{x}_{GM} und \ddot{x}_{SE} identisch sein, da sie für dasselbe globale Koordinatensystem aufgestellt wurden. Zur Überprüfung werden die Ausdrücke 7 und 8 gleichgesetzt. Nach einigen trigonometrischen Umformungen folgt:

$$\frac{\mu + m}{-m^2 - 1} = \frac{\mu + m}{-m^2 - 1}$$

Damit ist bewiesen, dass die für gekrümmte und zeitveränderliche Bahnen hergelitene Wellengleichung für den Spezialfall einer ungekrümmten und statischen Bahn Gültigkeit hat.

Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Bewegungsgleichung auch für gekrümmte Bahnen Gültigkeit hat. Als Vergleichsbewegung wird das Gleiten eines Körpers in dem in Abb. 6 zu sehenden Halbkreis mit dem Radius $R = 1$ m gewählt. Die Bewegung soll bei $P_0 = (-1 \text{ m}, 0 \text{ m})$ mit der Geschwindigkeit $v_0 = 0$ m/s beginnen und bei $P_2 = (1 \text{ m}, 0 \text{ m})$ enden. Der Reibungskoeffizient μ soll 0 sein.

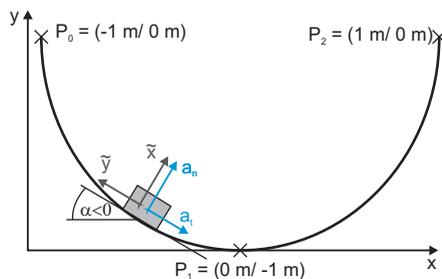


Abbildung 6: Körper auf einer Kreisbahn mit den Beschleunigungsanteilen a_n, a_t

Die einzelnen Parameter der Wellenfunktion werden aus der Kreisgleichung für den Einheitskreis bestimmt, wobei für den nach oben geöffneten Halbkreis lediglich der

dritte und vierte Quadrant betrachtet wird. Mit den Parametern können dann die Bewegungsgleichungen $\ddot{x}_{GM(t)}$ und $\ddot{y}_{GM(t)}$ aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} y_W &= \sqrt{1-x^2}, \\ \Rightarrow y'_W &= -\frac{x}{y_w}, y''_W = -\frac{1}{y_w^3}, \dot{y}_W = \ddot{y}_W = y'_W = 0, \\ \Rightarrow \ddot{x}_{GM(t)} &= \frac{\mu \cdot \text{sign}(\dot{x}_{GM(t)}) - \frac{x_{GM(t)}}{y_w}}{-\left(\frac{x_{GM(t)}}{y_w}\right)^2 - 1} \cdot \left[-\frac{1}{y_w^3} \cdot \dot{x}_{GM(t)}^2 + g \right], \\ \Rightarrow \ddot{y}_{GM(t)} &= -\frac{1}{y_w^3} \cdot \dot{x}_{GM(t)}^2 - \frac{x}{y_w} \cdot \ddot{x}_{GM(t)}. \end{aligned}$$

Diese Gleichungen sind mit den bekannten Beschleunigungen für kreisförmige Bewegungen zu vergleichen. Nach [2] lassen sich die Tangentialbeschleunigung a_t und die Normalbeschleunigung a_n des Objektes zum Kreismittelpunkt aus

$$\begin{aligned} a_t &= r \cdot \dot{\omega} = \dot{v}_t, \\ a_n &= r \cdot \omega^2 = \frac{v_t^2}{R}, \end{aligned}$$

bestimmen. Die noch unbekannt Tangentialgeschwindigkeit v_t wird aus der Energieerhaltungsbilanz bestimmt. Danach müssen die Summe der kinetischen und potentiellen Energie des Objektes stets gleich sein. Daraus folgt mit den gegebenen Anfangsbedingungen:

$$v_{t(t)} = \sqrt{-2 \cdot g \cdot h_{(t)}}.$$

Da der analytische Vergleich der Beschleunigungen sehr aufwendig ist, wird die Bewegung mit *Matlab/Simulink* simuliert und dann die Beschleunigungsanteile verglichen. Dazu wird folgendes Vorgehen gewählt:

1. Berechnung von \ddot{x}_{GM} und \ddot{y}_{GM} .
2. Transformation von \ddot{x}_{GM} und \ddot{y}_{GM} , mit $\beta = \frac{\pi}{2} + \alpha$, ($\alpha < 0$), in ein lokales Koordinatensystem, das normal und tangential auf dem Kreis am Berührungspunkt des Objektes steht (vgl. Abb. 7). Damit sind a_n , \ddot{x}_{GM} gleichgerichtet und a_t , \ddot{y}_{GM} entgegengerichtet.

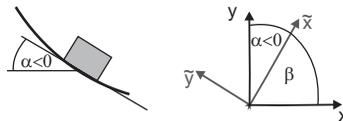


Abbildung 7: Transformation von (x, y) in (\tilde{x}, \tilde{y})

3. Berechnung der Tangentialgeschwindigkeit des Objektes aus:

$$a_{t(t)} = -\ddot{y}_{GM},$$

$$\Rightarrow v_{GM(t)} = \int_0^t -\ddot{y}_{GM} dt = \int_0^t -(-\ddot{x}_{GM(t)} \cdot \sin \beta + \ddot{y}_{GM(t)} \cdot \cos \beta) dt.$$

4. Überprüfung der Ergebnisse anhand der Kriterien:

$$\ddot{x}_{GM} = a_n,$$

$$v_{GM(t)} = v_t.$$

Die Ergebnisse der Simulation sind in den Grafiken 8(a) und 8(b) dargestellt. Bis auf geringfügige Abweichungen in dem Bereich der Simulationsanlaufphase ist die gute Übereinstimmung der Tangentialgeschwindigkeit und Normalbeschleunigung zu erkennen. Dies führt zu dem Schluss, dass die Wellengleitgleichung für dieses Modell anwendbar ist.

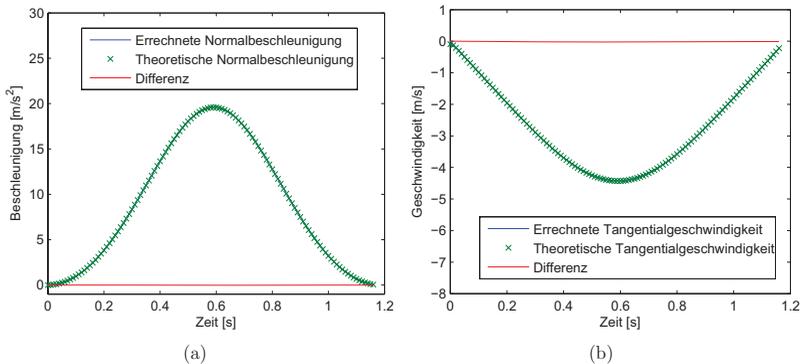


Abbildung 8: Simulation der theoretischen und aus dem Gleitfördermodell berechneten Normalbeschleunigungen (a) und Tangentialgeschwindigkeiten (b).

Vergleichsmodelle für das Rutschen auf einer dynamischen und gekrümmten Bahn sind bisher aus der Literatur nicht bekannt und aufgrund der vielen schwankenden Einflussparameter für die Bewegungsgleichung, z.B. μ oder der reale Oberflächenverlauf, experimentell kaum durchführbar.

In diesem Abschnitt wurde aber gezeigt, dass das Modell sowohl für ungekrümmte als auch gekrümmte statische Wellenfunktionen richtige Ergebnisse liefert. Dies erlaubt den Schluss, dass das Gleitfördermodell für die gängigen Anwendungsfälle bei der Gleitförderung zur Modellierung der Regelstrecke geeignet ist.

Anwendung der Wellengleichung

Nach der erfolgreichen Validierung wird ein Beispiel für die Anwendung der Wellengleichung gegeben. In diesem Beispiel wird ein translatorischer Fördervorgang mit *Matlab/Simulink* simuliert, bei der das Fördergut durch eine Sinuswelle der Form

$$y_W(x,t) = y_m + y_a \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x_{GM(t)} - \omega \cdot t + \varphi\right)$$

transportiert wird. Die Wellenlänge λ , der Mittelwert der Welle y_m und die Wellenamplitude y_a bestimmen die Wellenform auf dem Gleitförderer. Der Faktor ω errechnet sich aus der Fördergeschwindigkeit. φ bestimmt die Phasenverschiebung der Welle und damit den Startpunkt des Objektes für $x_{GM(t=0 \text{ s})} = 0 \text{ mm}$. Abb. 9 veranschaulicht die Förderwelle.

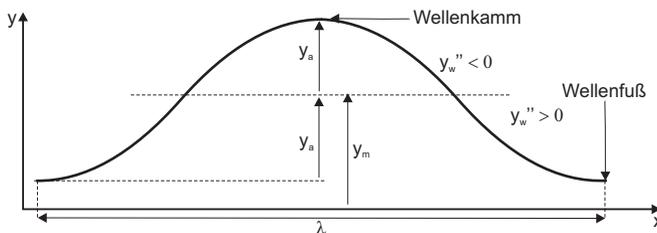


Abbildung 9: Visualisierung der Sinuswelle zum Transportieren des Fördergutes

Die einzelnen Ableitungen der Wellenfunktion werden in der Simulation zu jedem Zeitschritt berechnet und daraus die Beschleunigung des Objektes $\ddot{x}_{GM(t)}$ bestimmt. Das Integrieren von $\ddot{x}_{GM(t)}$ liefert die Geschwindigkeit $\dot{x}_{GM(t)}$ und nochmaliges Integrieren schließlich den Ort des Fördergutes $x_{GM(t)}$ zum Zeitpunkt t . Zwischen Haften und Gleiten wird nicht unterschieden.

Das Objekt startet zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ mit den gegebenen Anfangsbedingungen im Wellenfuß. Wird die Welle über der Fördermembran verfahren, so nähert sich das Fördergut dem Wellenkamm an (vgl. Abb. 10(a)). Das Objekt wird somit die Welle in den Bereich höherer Neigungen hinauf gehoben. Dadurch steigt die Beschleunigung des Objektes in x-Richtung. Ab $\ddot{x}_{GM(t)} > 0$ beginnt das Gut zu Rutschen und die Geschwindigkeit steigt (siehe Abb. 10(b)). Übersteigt die Fördergutgeschwindigkeit die Wellengeschwindigkeit, rutscht das Objekt die Flanke wieder herunter und die Neigung der Welle nimmt ab. Dadurch sinkt die Beschleunigung des Fördergutes bis die Wellengeschwindigkeit die Fördergutgeschwindigkeit übersteigt und das Fördergut wieder die Welle hinaufgehoben wird.

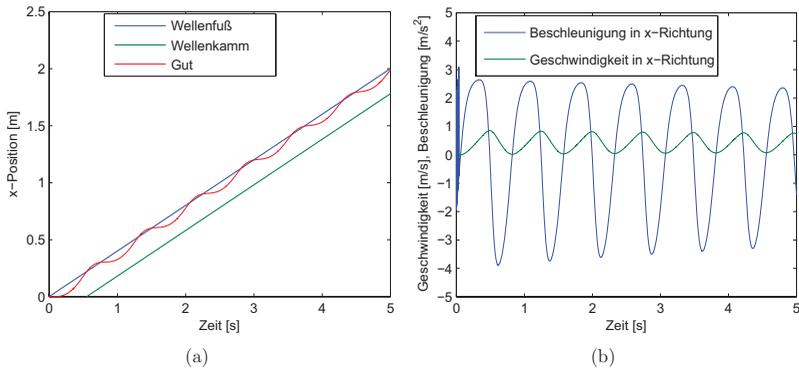


Abbildung 10: Simulationsergebnis der Trajektorie eines Gutes (a) und den zugehörigen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten (b) auf einer Sinuswelle mit $v_W = 0.4$ m/s, $\dot{x}_{GM}(t=0 \text{ s}) = 0$ m/s, $\mu = 0.2$, $\lambda = 440$ mm, $y_m = 45$ mm, $y_a = 40$ mm und $\varphi = 3/2 \cdot \pi$.

Für die durchgeführte Simulation schwingt das Fördergut in der unteren Hälfte der Flanke. Weitere Versuche ergaben, dass die Schwingungsamplitude von der Wellengeschwindigkeit und die Schwingungsfrequenz von der Krümmung der Welle bestimmt werden.

Erste Schlussfolgerungen aus diesen Betrachtungen lassen sich für die maximal zulässige Fördergeschwindigkeit treffen. Bei zu hohen Fördergeschwindigkeiten kann die Schwingungsamplitude soweit groß werden, dass das Fördergut den Bereich der unteren Flanke übersteigt. Dadurch wird es in den Bereich gehoben, in dem die Neigung der Sinuswelle wieder fällt. Die damit sinkenden Beschleunigungen können dazu führen, dass das Gut nicht ausreichend beschleunigen kann und von der Welle nicht transportiert wird.

Ob der Bereich steigender Neigungen überschritten wird, ist jedoch durch die Relativgeschwindigkeit zwischen Welle und Gut und nicht durch die Absolutgeschwindigkeit der Welle bedingt. Daher können hohe Fördergeschwindigkeiten dadurch erreicht werden, dass die Wellengeschwindigkeit von $v_W = 0$ m/s auf ihr Maximum langsam beschleunigt wird und zum Erreichen des Zielortes für das Objekt wieder sinkt (siehe Abb. 11(a) und 11(b)).

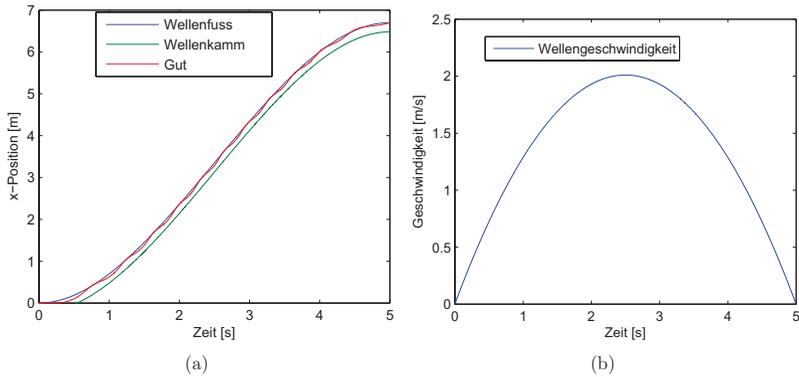


Abbildung 11: Simulationsergebnis der Trajektorie eines Gutes (a) und der zugehörigen Wellengeschwindigkeit (b) auf einer Sinuswelle mit $v_{WA} = v_{WE} = 0$ m/s, $v_{Wmax} = 2$ m/s, $\dot{x}_{GM}(t=0) = 0$ m/s, $\mu = 0.2$, $\lambda = 440$ mm, $y_m = 45$ mm, $y_a = 40$ mm und $\varphi = 3/2 \cdot \pi$.

Zusammenfassung

Für den Entwurf einer Regelung für Gleitfördermodule war der Fördervorgang (Regelstrecke) mathematisch zu beschreiben. Nach der allgemeinen Betrachtung wurde die rein translatorische Bewegung als Ausgangspunkt für weitere Betrachtungen untersucht. Ergebnis dieser Arbeit ist die Wellengleitgleichung als Bewegungsdifferentialgleichung zweiter Ordnung für translatorische Bewegungen von Körpern auf gekrümmten und zeitveränderlichen Bahnen. Nach der Herleitung wurde geprüft, ob das Modell valide ist. Dies wurde anhand zweier Spezialfälle für translatorische Bewegungen untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass das Modell für ungekrümmte und gekrümmte Bahnen richtige Ergebnisse erbringt. Abschließend wurde noch ein Beispiel für die Anwendung der Wellengleitgleichung gegeben.

In weiteren Arbeiten wird die Regelung der Gleitfördermodule detailliert ausgelegt. Durch die Linearisierung der Wellengleitgleichung um einen Arbeitspunkt und dem Ermitteln der Übertragungsfunktion der Regelstrecke können verschiedene Regeltypen und -parameter hinsichtlich des Führungs- und Störungsverhaltens für den geschlossenen Regelkreis untersucht werden. Nach Abschluß dieser Arbeiten wird die Regelung auf dreidimensionale Bewegungen erweitert.

Die resultierenden Regelalgorithmen werden dann mit der parallel entwickelten Bildverarbeitung auf der bereits genutzten SPS implementiert. In realen Materialflusssystemen wird es dadurch möglich einzelne Gleitfördermodule durch die Anbindung einer Kamera zu Materialflusssmitteln für komplexe Anwendungen hoher Genauigkeit aufzuwerten.

Literatur

[1] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.; Schröder, J.: *Technische Mechanik 1*. 8. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2004.

[2] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.; Schröder, J.: *Technische Mechanik 3*. 8. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer, 2004.

Innovative Zug- und Tragmittel für die Fördertechnik

*Dipl.-Ing. Ingo Berbig, Dipl.-Ing. Sindy Subbert, Dipl.-Ing.(FH) Enrico Putzke,
Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel*

*Technische Universität Chemnitz,
Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik*

1 Einleitung

Für den innerbetrieblichen Transport von Stückgütern kleinerer Masse und Abmessung häufig in Verbindung mit Handhabe- und Verkettungsprozessen werden derzeit vornehmlich Gleitkettenfördersysteme mit raumbeweglichen Kunststoffketten eingesetzt. Dieses Anwendungsfeld kann mit einem neuen Konzept für das Zug- und Tragmittel erweitert und auch wesentlich energieeffizienter gestaltet werden. Durch eine spezielle Funktionstrennung der Trag- und der Zugfunktion gelingt es, die Antriebsenergie durch Gewichtseinsparung und die Funktionalität des gesamten Systems zu verbessern. Dadurch können die Form der Kettenglieder vereinfacht und folglich auch sämtliche Peripheriebauteile optimiert werden.

Die Tragplatten werden im neuen System nicht auf Zugbeanspruchung, sondern besonders gute Gleiteigenschaften ausgelegt. Im neuen System können durch den Einsatz entsprechender Materialien höhere Zugkräfte erreicht werden und die Gelenke zwischen den Kettengliedern entfallen. Gegebenenfalls ist ein simpler Austausch der Ketten an bestehenden Systemen realisierbar. Durch die Anwendung des beschriebenen neuen Systems erhält die bisherige Gleitkette einen weiteren möglichen Freiheitsgrad. Dieser ermöglicht zusätzliche Funktionen in Verbindung mit der Gutbewegung, z. B. ein Wenden des Fördergutes, bei der Verwendung von Gleitkettenfördersystemen. Durchaus ist ein Synergieeffekt hin zu anderen Anwendungsfeldern zu erkennen.

Die Umsetzung der Funktionstrennung und die Erzielung eines weiteren Freiheitsgrades, der möglichen Rotation entlang der Antriebsrichtung, erfolgt durch die Verwendung eines textilen Zugmittels. Dieses Zugmittel ist durch sein spezielles Herstellungsverfahren so konfiguriert, dass beim Erreichen der Betriebskraft eine Dehnung entsteht, die mit üblichen Antriebsrädern realisiert werden kann. Die textile Seilstruktur auf Basis von synthetischen Hochleistungsfasern besitzt in teilungsgenauen Abständen Funktionselemente in Form von Stahlbolzen, die zum einen die Tragplatten aufnehmen, zum anderen die Antriebsmomente in das Zugmittel übertragen. Eine der Hauptaufgaben der automatisierten Herstellungstechnologie ist es, die Funktionselemente teilungsgenau, mit einer hohen Verschiebefestigkeit der Funktionselemente sowie dehnungsarm in die textile, seilartige Struktur einzuarbeiten.

Es werden neben dem neuen Basiselement für die technische Logistik auch verschiedene textile Herstellungsverfahren mit der notwendigen Veredlungstechnologie aufgezeigt, die zur Lösung der Aufgabe beitragen.

2 Grundlagen

2.1 Anlagen mit herkömmlichen Kettenfördersystemen

In den letzten Jahren haben sich für den Transport von Stückgütern kleinerer Abmessungen und Massen dreidimensionale Gleitkettenfördersysteme durchgesetzt. Hierbei gleitet die Kette sowohl als Zug- als auch als Tragorgan auf Führungsschienen. Verstärkt werden dabei schmierungsfrei zu betreibende Kunststoffketten, deren Verwendung gegenüber den noch oft benutzten Stahlketten viele materialspezifische Vorteile bietet, wie z. B. geringes Gewicht und günstige Gleiteigenschaften. Durch das Zusammenspiel von geraden Streckenmodulen, horizontalen und vertikalen Kurven sowie Bogenrädern können dreidimensionale Fördersysteme gestaltet werden. Dies wiederum beinhaltet eine hohe Anpassungsfähigkeit. Die Eigenschaften von Kunststoffketten stehen deutlich hinter denen von Stahlketten zurück. Dies betrifft sowohl die für die Auslegung der Förderer bedeutsame zulässige Zugkraft als auch die hohe elastische Dehnung sowie das negative Kriechverhalten.

Die geringe Dauerfestigkeit der Zugmittel aus thermoplastischem Kunststoff in Verbindung mit der geringen Steifigkeit führt bei den Fördersystemen dazu, dass nur kleine Achsabstände realisierbar sind und somit sehr viele Übergabestellen für das Gut entstehen. Somit ist auch die Anzahl der notwendigen Antriebe sehr groß. Es können darüber hinaus bestimmte Anwendungsfelder nicht für die Kunststoffketten erschlossen werden.

Auf dieser Grundlage gilt es die Vorteile von Kunststoffgleitketten mit den Merkmalen von Stahlelementen zu verknüpfen und in einem neuen System zu integrieren.

2.2 Textile Kette

Die Möglichkeit textile Stranggebilde herzustellen ist nahezu unbegrenzt. Neben dem Flechten von Seilen und dem Weben von Bändern können schmale Textilien auch gewirkt und auch gestrickt werden. Hier gilt es das bestmögliche Herstellungsverfahren zu finden, welches eine optimale Interaktion zwischen den mechanischen Elementen und dem tatsächlichen „Seil“ ermöglicht. Dadurch ergeben sich verschiedene Merkmale, die das fertige Produkt in sich vereinen muss und die jeweiligen Herstellungsverfahren vorziehen, bzw. ausschließen lassen.

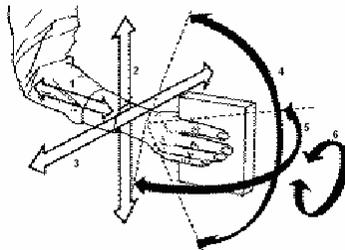


Abb. 1: Freiheitsgrade der Kette im Raum

Neben einer möglichst geringen Gesamtdehnung der textilen Struktur von max. 3 % bei einer max. Antriebskraft von 2500 N existiert noch eine Vorgabe an die Geometrie. Diese verlangt aufgrund der Raumbeweglichkeit eine Form nahe dem Kreis- bzw. Quadratquerschnitt. Die Wahl der Antriebskraft von 2500 N entspricht einer Steigerung von ca. 100% gegenüber bestehenden Kunststoffkettensystemen.

Eine textile Kette bietet zusätzlich den Vorteil eines weiteren Freiheitsgrades im gesamten System. So sind nicht nur die Translation, der Vorschub in Antriebsrichtung, sondern auch alle drei Rotationen im Raum möglich. In Abbildung 1 sind alle möglichen Bewegungen im Raum dargestellt.

3 Textile Herstellungsverfahren

3.1 Vorbetrachtung

Alle verfügbaren Herstellungsverfahren sind nach der Möglichkeit der Integration mechanischer Elemente in eine textile Struktur zu untersuchen. Dabei ist nicht nur die Einbindung bezüglich der Teilungsgenauigkeit Bestandteil der Betrachtungen, sondern auch die statisch dynamischen Eigenschaften der textilen Trägerstruktur. Somit werden die Herstellungsverfahren im Hinblick auf die Möglichkeit der Einbindung und die Grundeigenschaften unterschieden. Im Vorfeld werden zwei wesentliche Eckdaten festgelegt. Dabei soll die relative Dehnung bei einer angelegten Kraft von 2500 N drei Prozent nicht übersteigen auf Grund der Funktionalität möglichst aber bei ca. 1% liegen.

3.2 Gestrick

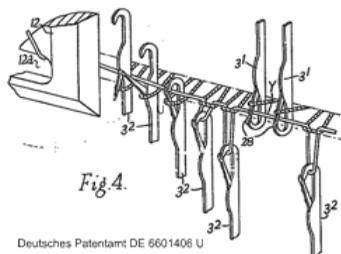


Abb. 2: Prinzipbild Stricken [Quelle DPA]

Gestricke bestehen aus mindestens einem Fadensystem. Dabei werden Fäden quer zur Entstehungsrichtung des textilen Gutes durch Maschenbildung reihenweise verarbeitet. Im Bezug auf die Verwendung einer textilen Kette zeigen sich Schwachstellen auf, die die Eignung diesbezüglich nicht gewährleisten. So existiert zwar die Möglichkeit Zugkraftaufnehmer in Längsrichtung zu integrieren, jedoch ist die Bindung zwischen beiden Fadensystemen nur begrenzt und auf Basis einer Reibpaarung gewährleistet. Weiterhin stellt sich eine Schwierigkeit im Bezug auf die Einarbeitung von mechanischen Komponenten dar.

Da der Materialeintrag wie bereits erwähnt quer erfolgt, kommt demnach eine Integration von diesen Elementen nicht in Frage.

3.3 Gewirke

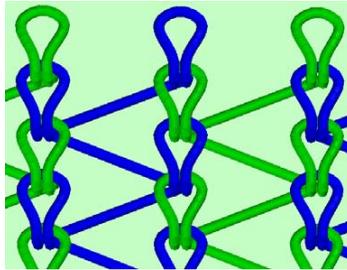


Abb. 3: Gewirke Bindung Trickot [Quelle Wikipedia]

Die Herstellung von gewirkten Strukturen erfolgt durch eine Schar von Fadensystemen. Hierbei werden der Wirkstelle Fäden in Herstellungsrichtung zugeführt und durch Maschenbildung verarbeitet. Der Unterschied zum Stricken besteht darin, dass die Maschen einer Reihe nicht nacheinander, sondern parallel hergestellt werden. Ein Gewirke kann nur durch eine Maschine produziert werden. Bezüglich der Verwendung für eine textile Kette hat sich die Verwendbarkeit derart dargestellt, dass die Einbindung eines Bolzens bzw. eines mechanischen Elements sowohl in einem Rechts-Rechts Gewirke, also auch in einem Rechts-Links Gewirke erfolgen kann. Der Unterschied besteht darin, dass der Bolzen einerseits zwischen die Maschen gelegt wird, andererseits direkt in der Masche abgebunden wird. Weitere Betrachtungen werden zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt.

3.4 Gewebe

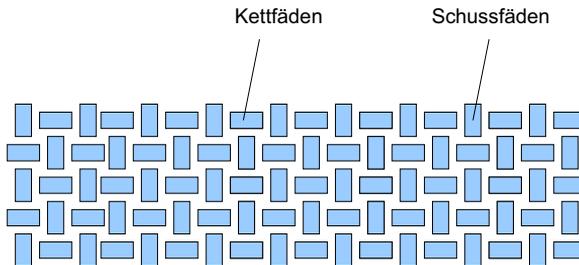


Abb. 4: Gewebe Bindung Leinwand

Gewebe bestehen aus zwei unterschiedlichen Fadensystemen, dem Schuss- und dem Kettfadensystem. Diese erzeugen durch die Verkreuzung untereinander die textile Fläche bzw. das textile Gebilde. Für die weitere Betrachtung bzgl. der Eignung im Seilkettensystem

müssen verschiedene Dinge beachtet werden. Der Zusammenhalt in den einzelnen Bindungspunkten entsteht auf Grundlage der Reibpaarung. Somit ist in diesem Fall keine genaue Teilung realisierbar. Jedoch besteht die Möglichkeit darin mit mehreren Kettfadensystemen zu arbeiten. Somit erzielt man ein dreidimensionales Gewebe und dadurch auch formschlüssige Komponenten. Der Eintrag eines mechanischen Elementes ist seitlich in Schussrichtung gewährleistet.

3.5 Geflecht



Abb. 5: 12fach Flechtmaschine [Quelle TU Chemnitz]

Geflechte sind textile Flächen- oder Körpergebilde, deren Flechtfäden sich in schräger Richtung zu den Warenkanten verkreuzen. Auf Grund der späteren Anordnung im textilen Erzeugnis ist eine Integration mechanischer Elemente ausgeschlossen. Ohne zusätzliche Arbeitsgänge ist die Fixierung in teilungsgenauen Abständen nicht möglich.

4 Bisherige Ergebnisse

4.1 Gewirkte Seilkette

Bisherige Untersuchungen mit gewirkten Strukturen von textilen Seilketten konnten aufzeigen, dass ein Einsatz von textilen Zugträgern in fördertechnischen Anwendungen grundsätzlich möglich ist. Es ist gelungen ein bestehendes System (siehe Abb. 6) mit dem neuen System auszurüsten und die Funktionalität in Langzeitversuchen zu untermauern. Es wurden sowohl Versuche mit Rechts-Rechts Strukturen, als auch mit Rechts-Links Strukturen unternommen. Dabei konnte die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Variante der Wirkstruktur Rechts-Links zu bevorzugen ist. Diese erzielt beste Ergebnisse im Hinblick auf die Struktur- und elastische Dehnung.

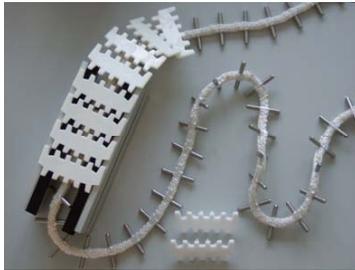


Abb. 6: Muster gewirkte Trageilketten mit Führungsprofil und Tragplatten [Quelle TU Chemnitz]

Somit ist die Einhaltung der Teilungsgenauigkeit gegeben. Einschränkungen müssen allerdings hinsichtlich der maximal angelegten Antriebskraft und der minimalen Dehnung hingenommen werden. Somit wird in diesem System bei einer Antriebskraft von ca. 1500 N eine Dehnung von 10 % erreicht. Diese Ergebnisse wurden trotz Thermofixierung, die zur Reduzierung der Dehnung beiträgt, ermittelt.

Die Endverbindungen der gewirkten Seilketten wurden ohne mechanische Elemente realisiert. Diese Seilschlösser wurden so konzipiert, dass sie die Hälfte des Querschnitts der Hauptkette besitzen. Weiterhin wurden in der gleichen Teilung wie sie in der Kette zu finden ist, Aufnahmen für die Bolzen vorgesehen. Damit ist es möglich die beiden Enden durch beiderseits seitlichen Aufschiebens der Verbindungselemente zu schließen.

4.2 Ergebnisse zu mechanischen Kennwerten

Es wurden sowohl fixierte als auch unfixierte Seile getestet. Grundsätzlich ergaben sich nach umfangreichen Untersuchungen optimale Prozessparameter für die Thermofixierung dieser Trageilketten. Dabei wurden Parameter wie Badtemperatur, Vorspannkraft des Seils und Verweildauer im Metallbad betrachtet. Ergebnis dieser Untersuchungen ist eine deutliche Verbesserung der Kraft-Dehnungs-Verläufe. So wurden beispielsweise durch die thermische Fixierung eines PP-Seils (siehe Abbildung 7) Verringerungen in der Strukturdehnung von 35 auf 7 % und in der Materialdehnung von 12 auf 8 % erzielt. Diese Werte beziehen sich auf eine Belastung von 1500 N.

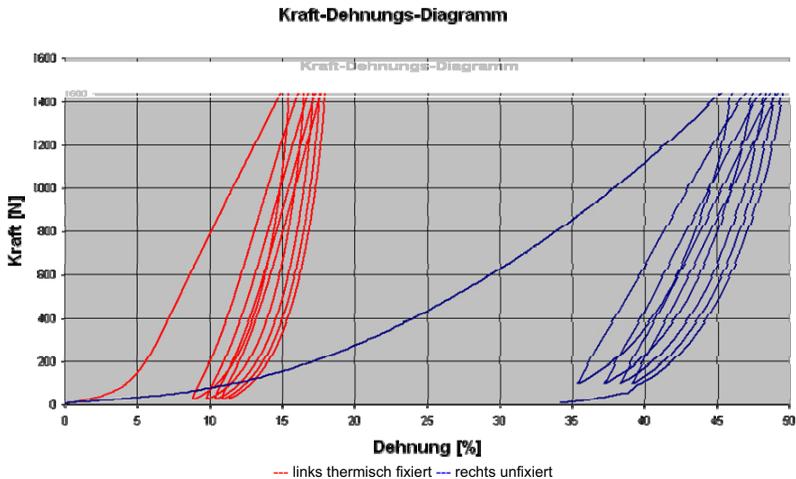


Abb. 7: Kraft-Dehnungs-Diagramm fixierter und unfixierter Seile

Weitere Untersuchungen beinhalteten die Form des mechanischen Elementes. Hierbei wurde besonderes Augenmerk darauf gelegt, eine möglichst hohe Sicherheit gegen axiales Verschieben zu gewährleisten. Im Zuge dessen wurden verschiedene Elemente wie Kerben oder Nuten in den Bereich der Einbindung in das textile Gut eingebracht. Dabei zeigte sich, dass ein Optimum zwischen hoher Ausdrückkraft und Zerstörung der textilen Kette gefunden werden musste. Zur Lösung dieses Problems wurde die Form der Tragplatten so gewählt, dass sie die Position des Seils definiert und somit eine Verschiebung des Bolzens verhindert haben.

4.3 Anpassung der fördertechnischen Anlage

Grundsätzlich ist das neue Tragseil so gewählt, dass bestehende Systeme mit geringem Aufwand umgerüstet werden können. Es ist lediglich die Kette zu tauschen. Auf Grund der Flexibilität der Textilmaschine können Anlagen unterschiedlicher Teilungen bedient werden. Für neue Systeme werden auch neue Führungsprofile entwickelt, die eine Verdrehung der Kette entlang der Bewegungsrichtung ermöglichen.

Die Form der Tragplatten bezüglich der ursprünglichen Form ist so verändert, dass dieses nach vollständiger Montage nur aufgeschnappt werden müssen. Grundsätzlich wurde für die Tragplatten eine Ausführung in Fingerform gewählt, um ein Einklemmen von Gütern, bzw. die Verletzungsgefahr zu verhindern.

4.4 Zusammenfassung der Arbeiten mit gewirkten Strukturen

Die bereits erwähnte Technologie des Wirkens einer Seilkette hat gezeigt, dass es möglich ist eine textile Kette zu verwenden. Jedoch besteht hinsichtlich der

Teilungsgenauigkeit und der Struktur- bzw. Materialdehnung noch Forschungsbedarf. Aus diesem Grund wird im Folgenden Augenmerk auf eine andere Herstellungstechnologie, das Weben, gelegt. Alle Peripheriebauteile sind durch die Vorarbeiten gegeben und können selbst im neuen Verfahren angewendet werden.

5 Gewebte Seilkette

5.1 Vorbetrachtung

Wichtig für die Verwendung von gewebten Strukturen ist die Umsetzung eines nahezu quadratischen Querschnitts. Dieser ermöglicht eine Kurvengängigkeit, die eine ungünstige Kräfteverteilung verhindert. Somit ist eine lange Lebensdauer gegeben. Ein anderer Querschnitt (linien- bzw. rechteckförmig) erzielt eine ungünstige Kräfteverteilung in Kurven. In diesem Fall trägt nur ein Bruchteil des gesamten Querschnitts und die gesamte Kette verschleißt schnell. Alle weiteren Betrachtungen befassen sich mit mehrlagigen Geweben. Diese haben nicht nur den Vorteil einen nahezu quadratischen Querschnitt zu ermöglichen sondern können unter Umständen das mechanische Element fest und möglichst formschlüssig einbinden.

5.2 Untersuchungen an gewebten Strukturen

Für den Nachweis der Eignung von Geweben für die Nutzung in Seilketten wurden erste Muster verschiedener Bindung hergestellt. Diese Muster ermöglichen das Einbinden von mechanischen Funktionselementen. Voraussetzung für die Fertigung dieser Ketten ist allerdings die Anpassung der Textilmaschine. Diese Anpassung konnte bis zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht umgesetzt werden.

Die Trägerstrukturen wurden nach folgenden Angaben konzipiert:

- Arbeitslast 2,5 kN
- Arbeitsdehnung max. 3 %
- Kurvengängigkeit durch nahezu quadratische Struktur
- Muster ohne Bolzen

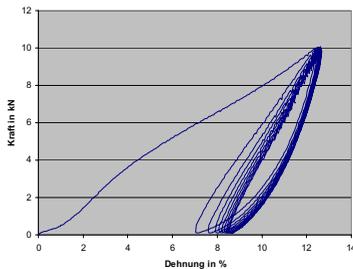
Daraus wurden zwei verschiedene Muster mit Querschnittanteilen von ca. 100 und 75 % mit den jeweiligen Abmessungen 7 x 10 mm und 5 x 10 mm hergestellt (siehe Abbildung 8).



Abb. 8: Gewebe Trägerstruktur [Quelle: TU Chemnitz]

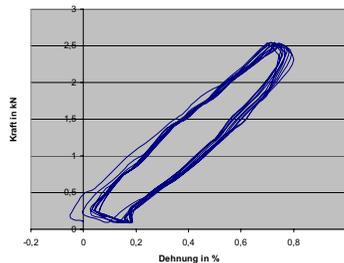
Weitere Muster unterscheiden sich in der Art der Webkante, die auf die Ergebnisse der Dehnung keinen Einfluss hat. Beide Trägerstrukturen wurden einem Prüfprogramm unterzogen, welches die Einsetzbarkeit im späteren System untermauert. Dabei wurden die Trägerstrukturen folgenden Prüfungen, wie in der Abbildung 9 dargestellt, unterzogen:

- Vorstrecken mit 4facher Arbeitslast (10 kN)
- Untersuchung Arbeitsdehnung bei 2,5 kN
- Bruchuntersuchung



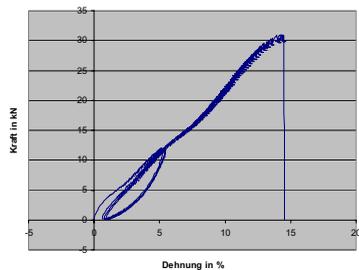
Vorstrecken mit 4facher Betriebskraft

- Reduzierung Strukturdehnung



Untersuchung der Dehnung bei Betriebslast

- 0,8 % Dehnung bei kleinem Querschnitt
- 0,6 % Dehnung bei großem Querschnitt
- nach Vorstrecken mit 90 % der Bruchkraft nochmals Reduzierung um 0,2 - 0,3 %



Bruchkraftuntersuchung

- 10 bis 12fache Sicherheit gegen Bruch
- notwendig für Kurvengängigkeit und Bolzeneintrag

Abb. 9: Kraft-Dehnungs-Untersuchungen zu gewebten Strukturen

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von textilen Strukturen im Bereich der Fördertechnik ist selbst in Form von Antriebs-elementen möglich. Dies konnte bereits in den Vorarbeiten (AiF-Projekt) nachgewiesen werden. Nach Analyse der mechanischen Eigenschaften zeigten sich Schwachstellen auf, aufgrund derer der endgültige Einsatz textiler Strukturen noch offen ist.

Anhand der gezeigten Betrachtungen wurde eine neue Möglichkeit gefunden dennoch dehnungsarme Hochleistungstextilien mit teilungsgenau eingearbeiteten Funktionselementen herzustellen. Ein weiterer noch notwendiger Arbeitsschritt ist die möglichst prozesssichere und vollautomatisierte Einbindung von mechanischen Funktionselementen während der Herstellung eines gewebten Stranges. An dieser abgeschlossenen Forschungs Kooperation sind Textilmaschinenbauer, Kettenhersteller sowie die Technische Universität Chemnitz, Professur Fördertechnik beteiligt.

Die Vorteile eines Fördersystems mit einer textilen Kette bestehen darin, dass keinerlei Gelenke notwendig sind und somit auch kein Gelenkverschleiß auftritt. Des Weiteren kann durch die integrierte Bauweise Gewicht und dadurch auch Energie eingespart werden. Durch die flexible Gestaltung der Textilien ist es möglich, das gesamte System auf eine wesentlich höhere Antriebskraft auszulegen. Auf Grund des weiteren Freiheitsgrades können neue Anwendungen gefunden werden. Die neue Seilkette ist frei von metallischer Korrosion und besitzt durch die Funktionstrennung, in den eigentlichen Zugstrang, das biegeflexible Seil, und die abgestützten Tragplatten, die reibungsoptimierte Gleitpaarungen aufweisen, ein enormes Optimierungspotential für verschiedene Prozessabläufe in der Technischen Logistik.

Literatur

- [1] KF0016210PK5 Entwicklung eines modularen 4D-Tragseilfördersystems in Leichtbauausführung für den Stückguttransport, 2008
- [2] Arbeitgeberkreis Gesamttextil/Industrieverband Deutscher Bandweber und Flechter e.V.; Flechttechnologie, 1996
- [3] Essig, Erich; Nadelbandwebtechnik; JAKOB MÜLLER INSTITUTE OF NARROW FABRICS, 2005
- [4] Mitzschke, Frank; Neues Tragseilfördersystem für den Stückguttransport, 11. Textiltechnik Tagung Chemnitz, 2007

Analyse instandhaltungsbedingter Retouren und Prognose der Beeinflussung bestehender Mehrwegsysteme

Dipl.-Logist. Benjamin Cebulla

Institut für Distributions- und Handelslogistik (IDH) des Vereins zur Förderung innovativer Verfahren in der Logistik (VVL) e.V., Dortmund

Abstract

Das Institut für Distributions- und Handelslogistik (IDH) des Vereins zur Förderung innovativer Verfahren in der Logistik (VVL) e.V. in Dortmund untersucht im Rahmen des Forschungsvorhabens „Analyse der durch Instandhaltung bedingten Retourenabläufe in Mehrwegsystemen und Entwicklung eines Modells zur Prognose der Beeinflussung“ die Gesetzmäßigkeiten der durch die Instandhaltung ausgelösten Retouren. Dabei werden die Chancen und Risiken bei der Eingliederung von Retouren in Mehrwegsysteme identifiziert, ein Prognosemodell erstellt sowie die Retourenabläufe darin simuliert, um somit die Integration von Retouren in die Systemstruktur zu optimieren. Die Ergebnisse stellen die erste wissenschaftlich fundierte Erforschung der Auswirkung der durch die Instandhaltung bedingten Retourenabläufe auf den normalen Ablauf von Mehrwegsystemen dar. Darüber hinaus ist es für Unternehmen möglich, mithilfe des hierauf aufbauenden Modells, die Auswirkungen für geschlossene, verteilte und offene Mehrwegsysteme prognostizieren zu können.

Einleitung

Die Instandhaltung komplexer industrieller Anlagen entwickelt sich zunehmend weg vom reinen Kostenfaktor hin zum geplanten Bestandteil der Supply Chain. Dennoch sind integrierte Prozesse der Instandhaltung und die Auswirkungen dieser auf die unternehmensübergreifende Supply Chain bisher wenig erforscht und dementsprechend nur schwer quantifizierbar.

Speziell die immer höhere Anzahl und Variantenvielfalt von Bauteilen, die mitunter für den störungsfreien Betrieb komplexer Anlagen unabdingbar sind, veranlassen das betreffende Unternehmen oder – sofern Instandhaltungsaufgaben nicht im Unternehmen selber, sondern durch Fremdfirmen durchgeführt werden (Outsourcing) – die mit der Instandhaltung der Anlagen beauftragten Dienstleistungsunternehmen eine stetig steigende Menge von Ersatzteilen vorzuhalten und zu transportieren. Neben der Bindung von Kapital werden durch die Zunahme der zu lagernden und transportierenden Ersatzteile vermehrt Mehrwegtransportverpackungen (MTV) gebunden. Die Nutzung der MTV endet jedoch nicht mit der Auslieferung der benötigten Ersatzteile, sondern erstreckt sich darüber hinaus auch auf die Retournierung zu reparierender oder gar defekter Bauteile an die jeweiligen

Hersteller. Durch eben diesen Versand im Rahmen der Redistributionsprozesse werden die Kapazitäten der Mehrwegsysteme zusätzlich belastet.

Hauptteil

Aufgrund der im Vorfeld geschilderten Problematik hat sich das IDH des VVL e.V. im Rahmen des von dem Deutschen Forschungsverbund Verpackungs-, Entsorgungs- und Umwelttechnik (DVEU) e.V., Hamburg geförderten und mit finanzieller Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (BMWA) sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) durchgeführten Forschungsprojekts Nr. 03123/08 „Analyse der durch Instandhaltung bedingten Retourenabläufe in Mehrwegsystemen und Entwicklung eines Modells zur Prognose der Beeinflussung“ das Ziel gesetzt, die Gesetzmäßigkeiten der durch die Instandhaltung ausgelösten Retouren in Mehrwegsystemen zu analysieren. Dabei werden die Chancen und Risiken bei der Eingliederung von Retouren in Mehrwegsysteme identifiziert, ein Prognosemodell erstellt sowie die Retourenabläufe darin simuliert, um somit die Integration von Retouren in die Systemstruktur zu optimieren. Die Ergebnisse stellen die erste wissenschaftlich fundierte Erforschung der Auswirkung der durch die Instandhaltung bedingten Retourenabläufe auf den normalen Ablauf von Mehrwegsystemen dar. Darüber hinaus ist es für Unternehmen möglich, mithilfe des hierauf aufbauenden Modells, die Auswirkungen für geschlossene, verteilte und offene Mehrwegsysteme prognostizieren zu können. Mit diesem Vorhaben werden insbesondere kmU in ihrer Marktpräsenz gestärkt. Als Folge ergeben sich eine erhöhte Planungssicherheit, eine Senkung von Investitionskosten, eine Reduzierung der Kapitalbindung und somit eine Minimierung von Kosten und eine Herabsetzung von Markteintrittsbarrieren bzw. Barrieren zur Erschließung neuer Marktsegmente.

Insgesamt zählt die Instandhaltung zu den umsatzstärksten volkswirtschaftlichen Industriezweigen, die mitunter Kosten zwischen zwei und zwölf Prozent des Umsatzes eines Industrieunternehmens verursacht. Diese Kosten gliedern sich in direkte Kosten (bspw. Personal-, Material- und Ersatzteilkosten) sowie in indirekte Kosten (bspw. Maschinenausfallzeiten, Mindermengen, Lieferunfähigkeit oder Imageverlust). Demgegenüber erhöht eine optimierte Instandhaltung komplexer Anlagen den Nutzungsgrad und die Verfügbarkeit und stellt die Werterhaltung der Produktionsmittel sicher. Hieraus resultiert der zunehmende Wandel der Instandhaltung von einer eher vernachlässigten Nebentätigkeit zu einer gefragten Kernkompetenz der Unternehmen. Als Kerntrend zeichnet sich ein allgemeines Outsourcing, speziell vor dem Hintergrund der derzeitigen Finanzkrise und damit verbundenen Rezession, der Instandhaltung ab, welcher die Instandhaltung – optimalerweise die vorbeugende Instandhaltung – zunehmend zu einer Dienstleistungsaufgabe werden lässt. Dieser Trend, verbunden mit den durch

steigenden Preiskampf und Wettbewerbsdruck vor dem Hintergrund der wachsenden Globalisierung und Verschärfung der Gesetze verstärkt eingesetzten MTV, bildet den Kernpunkt dieses Forschungsprojektes.

Neben der Analyse bereits vorhandener Systeme – hierzu zählt die Aufschlüsselung der darin existenten Akteure, Retourenobjekte und Retourenstrategien und die Darstellung vorhandener Materialfluss- und Informationsströme – werden anhand der systemdynamischen Modellierung, verschiedenartige Mehrwegsysteme modelliert und anschließend simuliert.

Die Unterteilung der Mehrwegsysteme lehnt sich hierbei an die gängige Gliederung an, die in zahlreichen Forschungsinstitutionen thematisiert wurde, und differenziert Mehrwegsysteme zu geschlossenen, verteilten und offenen Mehrwegsystemen. Diese geschilderte Unterteilung ist Abbildung 1 zu entnehmen. Maßgeblich für eine derartige Gliederung sind einerseits die Art des Systembetreibers und andererseits die Zugänglichkeit des jeweiligen Mehrwegsystems.

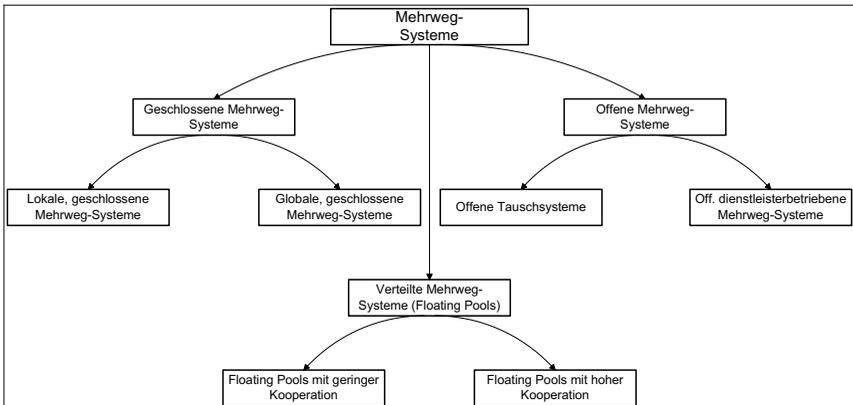


Abbildung 1: Gliederung von Mehrwegsystemen

Geschlossene Mehrwegsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie zentral durch einen Systembetreiber gesteuert werden und einen schwer zugänglichen Nutzerkreis aufweisen. Oftmals sind geschlossene Mehrwegsysteme branchenspezifisch, so dass einigen potenziellen Nutzern aufgrund der unternehmerischen Ausrichtung der Zugang zu diesen Systemen verwehrt bleibt. Verteilte Mehrwegsysteme – auch als Floating Pools bezeichnet – weisen hingegen mehrere Systembetreiber auf, welche jeweils zentral einen bestimmten Kundenstamm bearbeiten. Demzufolge können jeweils einzelne geschlossene Mehrwegsysteme – als Subsysteme eines Verbundes – gemeinsam ein verteiltes Mehrwegsystem darstellen. Bei einer derartigen Konstellation ist der Übergang von MTV von einem Subsystem in ein benachbartes

Subsystem möglich. Jedoch gelten analog zu den geschlossenen Mehrwegsystemen auch bei den verteilten Mehrwegsystemen Zugangsrestriktionen, durch die interessierten Nutzern die Teilnahme versagt bleibt. Den geschlossenen – teilweise auch den verteilten – Mehrwegsystemen stehen die offenen Mehrwegsysteme gegenüber. Diese können entweder zentral oder dezentral gesteuert sein und prinzipiell von jedem interessierten Unternehmen genutzt werden. Aus einem offenen Mehrwegsystem leiten sich viele bilaterale Beziehungen ab, da Empfänger einer Ware dieselbe MTV wiederum als Versender einsetzen können.

Insgesamt bestehen innerhalb der Systemstrukturen zwischen den Akteuren Versender, Empfänger und Poolbetreiber eine Reihe von Material- und Informationsflüssen, die sich aus dem Versand der Mehrwegbehälter ergeben. Diese werden sowohl als Vollgut, wechselseitig zwischen Versender und Empfänger als Sendung bzw. Retoure, oder als Leergut, zwischen Empfänger und Poolbetreiber oder zwischen Poolbetreiber und Versender, ausgetauscht. Als Empfänger wird hier derjenige Akteur innerhalb des Pool-Systems bezeichnet, der zu Beginn das Vollgut vom Versender erhält.

Neben diesem Materialfluss besteht zusätzlich ein Informationsfluss. Dieser beinhaltet die Informationen, die zwischen den einzelnen Akteuren bereits vor dem Versand, meist in elektronischer Form, oder mit dem Versand, in Form von Warenbegleitpapieren oder kurzer Beschreibung der Retoure, ausgetauscht werden. Ein weiterer Aspekt ist der monetäre Fluss. Es werden, je nach abzugrenzendem Poolsystem, unterschiedliche Geldmengen unter den einzelnen Akteuren transferiert. In Abbildung 2 und 3 sind die grundlegenden Beziehungen zwischen den Akteuren und eventuell entstehende Störungen durch instandhaltungsbedingte Retouren schematisch dargestellt.

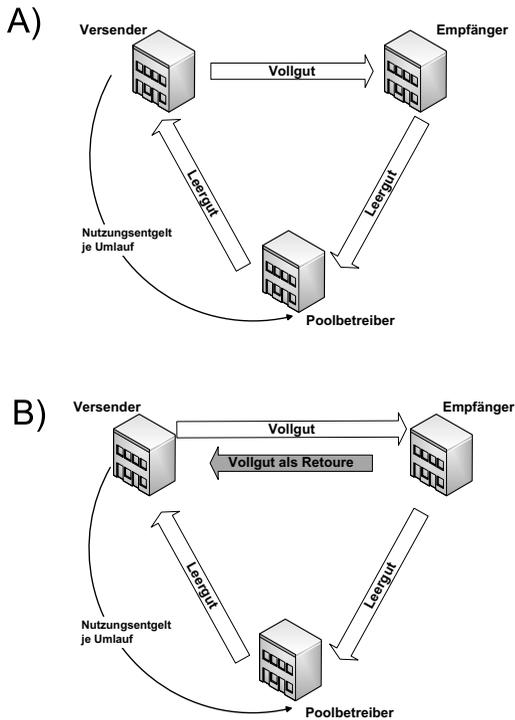


Abbildung 2: Störungsfreier Betrieb (A) und Störungen durch instandhaltungsbedingte Retourenaufkommen (B) in Nutzungsentgelt-Systemen

In Nutzungsentgelt-Systemen wird vom Poolbetreiber jeder Umlauf einer Mehrwerttransportverpackung dem Versender in Rechnung gestellt. Treten Retouren in Nutzungsentgelt-Systemen auf, wird die Mehrwerttransportverpackung jedoch nicht vom Empfänger an den Poolbetreiber übergeben, welcher diese im rekonditionierten Zustand wieder an den Versender übergibt, sondern der Empfänger übergibt die Ware in der Mehrwerttransportverpackung zurück an den Versender. Durch den so entstehenden zweiten Kreislauf gehen dem Poolbetreiber Einnahmen.

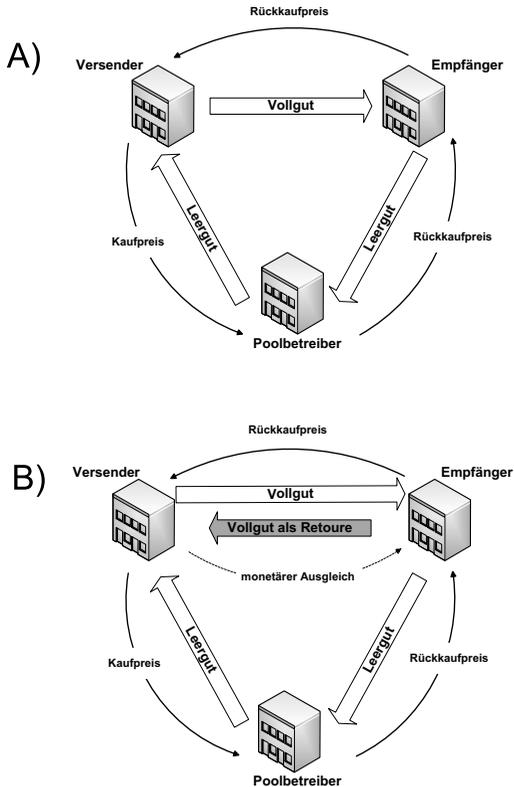


Abbildung 3: Störungsfreier Betrieb (A) und Störungen durch Retourenaufkommen (B) in Kauf-Rückkauf-Systemen

Im Rahmen eines Kauf-Rückkauf-Systems wird die Mehrwegtransportverpackung zum Zeitpunkt der Übergabe vom Poolbetreiber an den Versender, vom Versender an den Empfänger und anschließend vom Empfänger zurück an den Poolbetreiber zu einem im Vorfeld festgesetzten Preis verkauft. Tritt in einem solchen System eine Retoure auf, müsste die Mehrwegtransportverpackung vom Empfänger zurück an den Versender verkauft werden. Hierfür existieren weder Regeln, noch festgelegte Preise. Somit ist eine Störung des Mehrwegsystembetriebes zu erwarten.

Durch den Versand der Retoure als Vollgut – zwischen Empfänger und Versender – wird also die Systemkapazität des Mehrwegkreislaufs beeinträchtigt. Der Materialfluss läuft nun nicht mehr in gerichteten Bahnen, sondern erfährt einen Gegenfluss. Um diese Beeinträchtigung prognostizieren zu können, werden die Basisprozesse

innerhalb des Mehrwegkreislaufs erfasst und in die systemdynamische Modellierung übertragen. Somit können durch Veränderung der internen Variablen und somit der relevanten Gleichungen, Veränderungen durch das Auftreten von Retouren identifiziert und fassbar gemacht werden. Anhand der Häufigkeit und des Volumens der Retourierung kann der Grad der Beeinflussung mit Hilfe der systemdynamischen Modellierung visualisiert und qualitativ sowie quantitativ erfasst werden. Hierzu wurden innerhalb des Forschungsprojektes bereits die Gesetzmäßigkeiten – d.h. die Verbindung von Fluss-, Zustands- und Hilfsvariablen – offener, geschlossener und verteilter Mehrwegsysteme aufgezeigt und die Systematik dieser dynamischen Systeme abgebildet. Ein noch zu leistender Aspekt ist die Modellierung des Einflusses der instandhaltungsbedingten Retouren auf die genannten Systeme. Mit Hilfe dieses Modells ist es abschließend möglich – durch eine entsprechende Belegung der Variablen – die Beeinträchtigungen qualitativ und quantitativ zu erfassen und erstmals reale Zahlenwerte zu erhalten, um diese innerhalb der Strategiefindung zu berücksichtigen.

Container-Pooling: Optimierung der Leercontainerbereitstellung in Seehäfen

*Prof. Dr.-Ing. Nina Vojdani, Dipl.-Wirt.-Inf. Arne Rajchowski,
Dipl.-Wirt.-Ing. Felix Lootz, Manuela Pickel
Universität Rostock, Lehrstuhl für Produktionsorganisation und Logistik*

Abstract:

Leercontainerungleichgewichte innerhalb von Handelsrelationen stellen ein strukturelles Problem der Containerlogistik dar. Induziert durch unterschiedliche, ggf. gegensätzliche, Import- und Exportvolumina der Handelsrelationen ist dieses Problem persistent vorhanden und bedarf adäquater Optimierungsansätze und Logistikprozesse. Das Container-Pooling stellt einen geeigneten Ansatz dar, dieser Problematik zu begegnen. Die vorliegende Arbeit präsentiert ein sachdienliches theoretisches Konzept für das Container-Pooling in Seehäfen. Ein Prozessvergleich belegt die Potenziale dieses Konzeptes und die positiven ökonomische Effekte für Seereedereien, Häfen und Leasingunternehmen. Das Konzept bietet die Grundlage für empirische Untersuchungen und die Integration bestehender OR-Ansätze.

1 Einleitung

Die Einführung standardisierter Frachtcontainer im Jahr 1956 hat die Prozesse des seeseitigen Stückgut-Transportes revolutioniert. Diese wieder verwendbaren Seetransportbehälter unterliegen als Leercontainer vor dem Lasteinsatz und während des lastfreien Rücklaufs Transport-, Umschlag-, Lager- und Aufbereitungsprozessen. Dies führt zu erhöhten Transportaufwendungen, bindet Ressourcen für den Vollcontainerumschlag und ist mitverantwortlich für ein zunehmendes Verkehrsaufkommen im Hafengebiet. Zielstellung des Leercontainermanagements sollte es demnach sein, den richtigen Container, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, im richtigen Zustand und zu den richtigen Kosten zur Verfügung zu stellen. Auf einen Vollcontainertransport muss in der Regel die Repositionierung des Leercontainers folgen, entweder zum nächsten Beladeort, zur Lagerung in einem Depot oder als Rücklauf zum ursprünglichen Versender. Dies bindet Ressourcen für den Vollcontainerumschlag. Leercontainerprozesse zählen zu den Stützprozessen und erbringen keinen geldwerten Kundennutzen. Die Kosten eines Leercontainertransportes entsprechen aber nahezu denen eines Vollcontainertransportes. Die Optimierung dieser Prozesse ist folgend wirtschaftlich zwingend.

Existierende Leercontainerungleichgewichte zwischen den Seeverkehrsrelationen stellen ein strukturelles Problem der Containerlogistik dar [Theofanis 09]. Induziert durch unterschiedliche, ggf. gegensätzliche, Import- und Exportvolumina der Handelsrelationen ist dieses Problem persistent vorhanden und bedarf adäquater Lösungsansätze. Die einfachste Lösung der Leercontainerproblematik wäre ein direkter Leercontainertransport vom Überschuss zum Bedarf innerhalb einer Region. Folgen-

de Gründe stehen dieser Lösung in der Betriebspraxis entgegen und verlagern die Leercontainerproblematik in die Seehäfen:

- 1) Leercontainer müssen regelmäßig gereinigt und -instandgesetzt werden. Hierfür dienen Containerdepots, die sich vielfach im Hafengebiet befinden.
- 2) Es bestehen Mengenunterschiede zwischen dem Leercontainerbedarf der Quellen (Exportregion) und dem Leercontainerangebot der Senken (Importregionen). Die Container-Neubeschaffung bzw. -Verwertung ist kein passendes Lösungsmittel; im Regelfall werden Leercontainer-Ströme aus bzw. nach Übersee ausgelöst.
- 3) Aufgrund unterschiedlicher Transportzeiten zwischen den Quellen und Senken sind Pufferbestände und Zwischenlagerungsplätze zu berücksichtigen
- 4) Weiterhin ist das Vorhandensein verschiedener Container-Eigner von Relevanz. Versendet ein Exporteur mit Reederei A und ein Importeur empfängt durch Reederei B, muss A ein Leercontainer aus dem Depot bzw. aus Übersee beschaffen, während gleichzeitig B ein Leercontainer in ein Depot bzw. nach Übersee transportiert.

Die Containerseehäfen stellen als Umschlagplatz für den seeseitigen Leercontainer-Transport, als Sammelstelle für rücklaufende Leercontainer, als Verteilstelle für bereitzustellende Leercontainer sowie mit den angeschlossenen Containerdepots den zentralen Knotenpunkt für die Leercontainerlogistik dar. In dieser Eigenschaft sind sie mit konkreten Problemstellungen konfrontiert. Zum Einen besitzen Leercontainer aus Sicht der Logistik eine Transportspezifika (z.B. Masse, mögliche Transportmittel, Zielort), welche sie von Vollcontainern unterscheidet. Mit Ausnahmen (z.B. Leercontainerstapler) kommen die gleichen logistischen Prozesse wie beim Vollcontainer zur Anwendung. Zum Anderen beanspruchen Leercontainer Stellflächen, deren Umfang in Beziehung zum gesamten Containerumschlag gesetzt werden kann [Brinkmann 05, S. 279ff]. Dieses Problemfeld kommt besonders bei Häfen in urbanen Ballungsräumen und bei Hafenerweiterungen zum Tragen. Vor dem Hintergrund eines in Zukunft weiter zunehmenden Containerumschlags sind Konzepte abzuleiten, die eine Entkopplung dieser Beziehung erlauben und auch zukünftig eine funktionierende Leercontainerlogistik gewährleisten.

1.1 Stand der Forschung

Einen Ansatz für das Leercontainermanagement in Containerseehäfen stellt die gemeinsame Nutzung eines Container-Pools durch mehrere Reedereien und Containerleasinggesellschaften dar. Die Definition und Umsetzung eigenständiger und bedarfsgerechter Bereitstellungsprozesse in den Seehäfen sowie konzeptuelle Gestaltungsansätze zum Container-Pooling sind kaum vorhanden. Die Ausführungen zur Lösung der Leercontainerproblematik beschränken sich auf strategische Herangehensweisen, informationstechnische und konstruktive Ansätze sowie mathematisch-formale Optimierungsmodelle. Aus der untersuchten Literatur lassen sich zwei wesentliche Gestaltungsaspekte für ein Container-Pooling in Seehäfen ableiten. Zum Einen können sowohl geografische Faktoren, wie die Berücksichtigung von Häfen und Fahrtgebieten sowie dem Hinterland als auch statische Aspekte, wie Anzahl und Größe beteiligter Akteure, die Containerarten im Pool, die Eigentumsverhältnisse und

letztlich die Farbgestaltung, kennzeichnend für den Pool-Aufbau sein. Zum Anderen sind für einen möglichen Pool-Betrieb die Verwaltung durch eine Betreuungsgesellschaft sowie der Informationsfluss in Form eines Steuerungskonzepts maßgebend. Im Rahmen der Betrachtung von Häfen und Fahrtgebieten sowie dem Hinterland ist zwischen globaler, regionaler und lokaler Ebene zu unterscheiden [vgl. Boile 06; Theofanis 09]. Neben dieser geografischen Pool-Ausdehnung sind die Größe der beteiligten Partner und Containeraufkommen im Pool entscheidend für den Aufbau eines Pools [vgl. Boile 06; Theofanis 09]. Die Anzahl und Art der Containertypen haben einen signifikanten Einfluss auf den Pool-Aufbau [vgl. Theofanis 09; Crainic 93]. Darüber hinaus muss die Möglichkeit zur Instandhaltung, Wartung und zum Umschlag der Container im Pool-Depot beachtet werden [Jula 04]. Aus den Berechnungen von Jula hat sich weiterhin ergeben, dass ein ‚Off-Dock‘-Depot als zentrale Lieferstätte für Leercontainer geeignet ist [Jula 04]. Inhaber der Container sind in der Regel Reedereien und Leasingunternehmen [vgl. Theofanis 09; Lopez 03]. Die Möglichkeit eines begrenzten Container-Poolings zwischen Reedereien besteht bereits im Bereich des Leasingcontainereinsatzes. Ein bekanntes Instrument einer Kooperation findet sich unter der Bezeichnung „Grey-Box“ [Theofanis 09]. Dieser Begriff ist auf die neutrale, graue Farbgebung des Containers zurückzuführen, die es unmöglich macht, den Pool-Container einem bestimmten Transporteur zuzuordnen. Anwendung findet dieses Programm jedoch nur beim Tausch größerer Containerkapazitäten. Im Falle von Individualtransporten kommt es nicht zum Einsatz. Ein weiterführendes System, das auch einen Individualtausch gestatten würde und diesen gegebenenfalls routinieren könnte, ist die Entwicklung einer voll austauschbaren „Grey-Box“ [Boile 06; Theofanis 09].

Als Grundlage für den Informationsfluss beim Container-Pooling dienen Container-Informationssysteme. Gegenwärtig sind jedoch nur dedizierte Systeme eingeführt. Wang empfiehlt für den Betrieb ein internetbasiertes Containerbestandsmanagement- und Informationssystem [Wang 08], das als Pool-Management-System bezeichnet werden kann. Weitere mit dem Container-Pooling kombinierbare Ansätze sind im Operations Research zu finden. Diese reichen von Lagerhaltungs- und Bedienmodellen bis hin zu eigens für die Leercontainer-Problematik entwickelten Modellen mit dem Ziel, Transport- und Bestandsoptimierungen in Seehäfen- oder Hinterland-Depots zu realisieren [Crainic 93; Jula 04; Olivo 05; Shintani 07].

1.2 Forschungshypothese und Untersuchungsdesign

Die Ausführungen zum Container-Pooling in der Literatur beschränken sich, wie aufgezeigt, derzeit auf grundsätzliche Gestaltungsprinzipien mit ihren allgemeinen Effekten auf den Leercontainerfluss. Lediglich vorgestellt, aber nicht untersucht, wurden die Varianten Grey-Boxing, Depot-Lösungen und Hinterlandverkehre. Eine wissenschaftliche Untersuchung und Konzeption des Material- und Informationsflusses in der Leercontainerlogistik ist kaum vorhanden.

Als leitende Fragestellung für eine derartige Untersuchung wird folgende Forschungshypothese zugrunde gelegt: Das Container-Pooling ist ein geeigneter Ansatz, die Anzahl notwendiger Bewegungs- und Lagerungsoperationen in Containerseehäfen bei gleich bleibender Logistikleistung zu reduzieren. Bereitstellungsprozesse im

lastfreien Lauf ergeben sich automatisch durch Handelsungleichgewichte und können logistisch nicht vollständig gelöst werden. Daraus ergibt sich zwingend der Optimierungsansatz.

Der erste Schritt zur Untersuchung der Forschungshypothese beinhaltet eine systematische Analyse des Leercontainer- und zugehörigen Informationsflusses. Hierüber ist die Leercontainerproblematik für Seehäfen zu konkretisieren. Im zweiten Schritt wird ein geeignetes Konzept für das Container-Pooling entwickelt. Auf dieser Grundlage erfolgt die Konzeptentwicklung. Als vorteilhaft bei komplexen Zusammenhängen erweist sich in der Regel ein gestuftes Vorgehen (z.B. Unterscheidung in Grund- und Feinkonzept). Das erarbeitete Pooling-Konzept enthält Aussagen zu den Bereichen Leercontainerfluss und Informationsfluss und verbindet beide Aspekte zu einem ganzheitlichen Ansatz. Als abschließender Untersuchungsschritt werden die zu erwartenden Potenziale durch Prozessvergleiche analysiert.

2 Container-Pooling Konzeption

2.1 Prämissen

Für das vorliegende Pooling-Konzept bestehen vier Annahmen. Die Forderung nach Transparenz ist unter zwei Aspekten zu betrachten. Erstens ist eine vollständige und jederzeitige Einsichtnahme in die Geschäftsprozesse der Pool-Betriebungsgesellschaft ausschlaggebend dafür, ob die kooperierenden Partner eine Pool-Lösung akzeptieren. Zum Zweiten müssen von jedem am Pool beteiligten Unternehmen die für den Pool-Betrieb notwendigen Informationen zur Verfügung stehen. Die Gleichbehandlung der Partner fokussiert auf die Verhinderung von Bevorzungen bzw. Benachteiligungen. Beispielhaft seien an dieser Stelle die gleichberechtigte Bedienung der Kunden in Bezug auf Gestellungszeiten, Gestellungskosten oder den Containerzustand genannt.

Die in einem Pool zusammenarbeitenden Unternehmen müssen sich auf eine Vereinheitlichung von Prozessen verständigen. Diese Vereinheitlichung umfasst alle zur Bereitstellung erforderlichen Prozesse im physischen Containerfluss, die dazugehörigen TUL-Prozessschritte, Containervorgaben und Informationsflüsse und -prozesse. Die Kosten- und Gewinnverteilung zwischen den Poolpartnern muss die eingebrachte Containeranzahl, die abgerufenen Leercontainer und die notwendigen, weil nicht vollständig durch den Pool kompensierbaren Leercontainertransporte, berücksichtigen.

Aufbauend auf diesen Voraussetzungen existieren mit Blick auf die Effektivität der Pool-Lösung weitere Kriterien die für den Aufbau des Pools wesentlich sind. Dazu zählen die Durchmischung des Pools mit Containerakteuren mit untereinander möglichst gegenläufigen Güterströmen, die Gewinnung von Akteuren mit einem großen Containervolumen sowie die Berücksichtigung der Fahrtgebiete und beteiligten Häfen der Pool-Teilnehmer.

2.2 Ansatz für ein Container-Pooling in Seehäfen

2.2.1 Grundkonzept

Das Grundkonzept für ein Container-Pooling in Seehäfen unterscheidet die Bereiche Pool-Aufbau und Pool-Betrieb, siehe Abbildung 1. Die formulierten Prämissen fungieren hierbei als Zielstellungen und Randbedingungen. Der Pool-Aufbau charakterisiert die statischen Aspekte des Pools. Diese beinhalten die geographische Anwendung des Pool-Konzepts, z.B. Begrenzung auf einen Hafen, mehrere Häfen in der Nordrange, die Auswahl der Fahrtgebiete, die beteiligten Reedereien und Containerleasinggesellschaften, die im Pool vertretenen Containerarten, die Eigentumsverhältnisse an den Pool-Containern, die Farbgestaltung sowie die Zugänglichkeit des Pools. Der Pool-Betrieb betrifft insbesondere die Verwaltung durch eine Pool-Betreibungsgesellschaft oder durch die Reedereien, Depotbetreiber, Leasinggesellschaften. Hiermit in Verbindung stehen weiter Festlegungen zum Steuerungskonzept der Leercontainergestellung, zur Ertrags- und Kostenteilung, zur Gestaltung der Leercontainerprozesse sowie zur infrastrukturellen Einbindung auf dem Containerterminal und dem Vollcontainerumschlag.

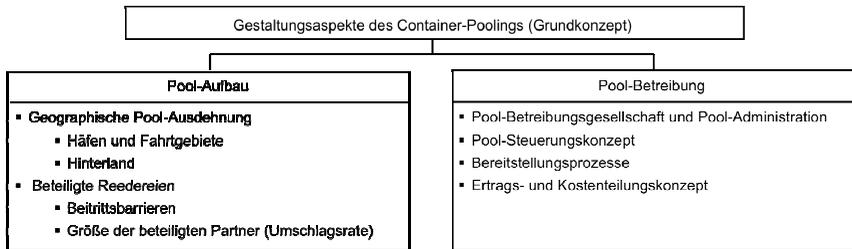


Abbildung 1: Ausgewählte Determinanten für das Grundkonzept eines Container-Poolings

Die aufgeführten Aspekte der Pool-Gestaltung führen mit ihren möglichen Merkmalsausprägungen zu jeweils unterschiedlichen Pooling-Grundkonzepten. Die Anwendung eines morphologischen Schemas ermöglicht unterschiedliche Pool-Ausprägungen systematisch abzuleiten. Das Pooling-Konzept wird beispielhaft unter Verwendung dieses Schemas erarbeitet, Tabelle 1. Die gewählten Ausprägungen sind grau hinterlegt. Das Konzept enthält keine Ausführungen zur Ertrags- und Kostenteilung.

| Merkmal | | Merkmalsausprägung | | | | |
|---------|--------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | Häfen und Fahrtgebiete im Pool | Ein Hafen | Häfen einer Region | Hafen-Hafen-Relation | Hafen-Region-Relation | Region-Region-Relation |
| 2 | Hinterlanddepots im Pool | Nur Hafendepots | | Hafendepots und Hinterlanddepots | Nur Hinterlanddepots | |
| 3 | Zugänglichkeit zum Pool | Geschlossener Pool | | | Offener Pool | |

Tabelle 1: Ausschnitt des morphologischen Schemas für das Grundkonzept eines Container-Poolings

Der hier entwickelte Ansatz eines Container-Poolings bezieht sich auf einen Seehafen. Hinterlanddepots werden im Grundmodell nicht berücksichtigt. Weiter soll ein

geschlossener Pool mit hohen Beitrittsbarrieren und mit einem hohen Anteil am gesamten Leercontaineraufkommen in dem betrachteten Hafen unterstellt werden. Die Zugänglichkeit des Pools gegenüber neuen Teilnehmern ist in zwei Bereiche differenziert. Der Pool kann nach der Findungsphase für neue Mitglieder partiell oder allgemein geschlossen sein. Ein Neubeitritt und damit die Erweiterung ist generell auch möglich. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen geschlossenen Pool. Es vereinfacht die erarbeiteten Prozesse, da eine Anpassung in der Poolsteuerung nicht notwendig ist. Der zweite Bereich betrifft die Gestaltung der Beitrittskriterien. Die Entscheidungskriterien betreffen die Aspekte Fahrtgebiet, eingebrachte Containeranzahl, voraussichtliche Containerbedarfe und angefahrene Häfen. Der Zusammenhang zwischen Pool-Offenheit und Beitrittsvoraussetzungen ist zwingend. Es wird vermutet, dass ein offener Pool der Pool-Performance entgegenwirkt.

2.2.2 Feinkonzept für den Leercontainerfluss im Hafen

Für den Leercontainerfluss sollen als Verfeinerung des Grundkonzepts nachstehende Festlegungen gelten. Zur Veranschaulichung werden eine Prinzipskizze des Hafens und der daraus ableitbare Grobprozess des Leercontainerflusses vorangestellt, Abbildung 2.

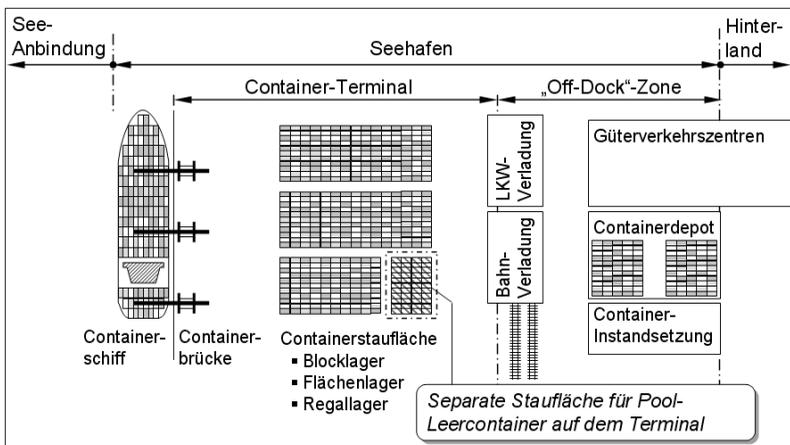


Abbildung 2: Skizze Seehafen mit Pooling-Infrastruktur

Festlegungen zum physischen Leercontainerfluss bei der Anwendung des Pooling-Konzepts:

- 1) Bei den Containerstaufflächen auf den Terminals wird eine separate Stauffläche für leere Pool-Container vorgehalten. Somit entsteht ein Containerbestand, welcher ohne Auslagerung aus dem Terminal und ohne Umweg über das Depot direkt seeseitig weiterverladen werden kann.
- 2) In Verbindung mit Punkt 1 sollten Leercontainer des Pools möglichst vor ihrer Verschiffung hinsichtlich des Zustands untersucht und beurteilt werden.

- 3) Die Bestands- bzw. Bedarfsüberwachung von Leercontainern ist, neben den Puffern auch auf die Schiffe auszuweiten. Damit kann das Löschen von Leercontainern entfallen.
- 4) Die Bestandsanpassung des Leercontainerpuffers auf den Stauflächen wird vorzugsweise auf die dritte Schicht verschoben [Hautau 08]. Vorteil dieser Lösung ist, dass keine Kapazitäten des Vollcontainertransports beansprucht werden.

2.2.3 Feinkonzept für die Containerbereitstellung

Kernelement des Pool-Betriebs ist eine effiziente Poolsteuerung. Für die Realisierung werden nachfolgend ein stufenweiser Abfrageprozess sowie Ansätze für ein Pool-Management-System beschrieben. Die Optimierung der physischen Leercontainerbestände auf der Containerstaufläche im Depot ergänzt die Steuerung. Dazu notwendige Operations Research-Methoden existieren bereits.

Das Pool-Management-System setzt teilweise die Anforderungen aus den Merkmalen des morphologischen Schemas um. Dazu zählen die Verwaltung der eingebrachten Container, die Kosten- und Erlösteilung, das Austarieren der Containerströme sowie die informationstechnische Gestaltung. Das Management-System enthält aktuelle Informationen über die Pool-Container im Hinblick auf Containerart, -ID, -eigner, -zustand, sowie Containertransport und -lagerung.

Der Abfrageprozess beinhaltet die Implementierung bestimmter Abfrageroutinen bei den Poolpartnern, welche auf die mögliche Nutzung eines Pool-Containers und die damit verbundenen Vorteile hinweisen. Ausgehend von der Meldung eines Leercontainerbedarfs an einer Senke wird eine stufenweise Abfrage über die lokal vorhandenen Containerbestände angestoßen. Auf jeder Stufe ist zu prüfen, ob ein Leercontainer des Reeders verfügbar ist und wenn nicht, ob stattdessen ein Leercontainer eines Poolpartners genutzt werden kann. Die Reihenfolge der Abfrage resultiert aus dem erforderlichen Prozessaufwand für die Bereitstellung. Bei einem seeseitigen Bedarf ergibt sich folgende Reihenfolge: Schiff, Terminal, Depot. Je nach Integrationsgrad der eigenen Container eines Teilnehmers muss zusätzlich zwischen eigenem und Pool-Container unterschieden werden. Die Abbruchbedingung ist gegeben, sobald der gemeldete Bedarf mit einem in Art, Zustand etc. geeigneten Leercontainer gedeckt werden kann. Kommt es im Rahmen der beschriebenen Abfragen nicht zu einer Deckung des Bedarfs, muss ein Leercontainerfluss von einer weiter entfernten Quelle initiiert werden. Für landseitige Leercontainerbedarfe gestaltet sich der Abfrageprozess analog, muss aber die Reederanforderungen für den Vor- und Nachlauf berücksichtigen.

2.2.4 Effekte des Container-Poolings

Für einen beliebigen Seehafen leiten sich maximal neun Aufgabenstellungen für Leercontainerbewegungen ab. Die Quellen und Senken variieren dabei seeseitig in Form eines oder mehrerer Schiffe, landseitig durch beliebige Orte sowie innerhalb des Hafens durch die Containerdepots, Abbildung 3.

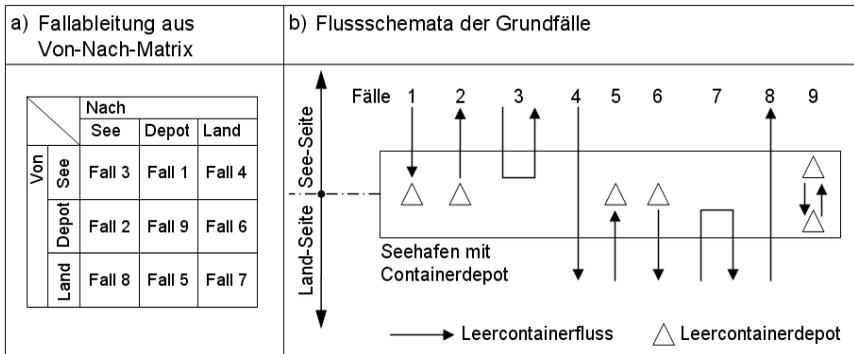


Abbildung 3: Mögliche Aufgabenstellungen der Leercontainerbewegung für Seehäfen

Die Fälle 1 bis 6 sowie 8 und 9 stellen typische Aufgabenstellungen der Leercontainerlogistik dar. Der Fall 7 des direkten landseitigen Weitertransports der Leercontainer tritt bei Reinigung und Prüfung der Leercontainer an zentraler Stelle ein. Hierzu wird in der Regel das im Hafen gelegene Containerdepot beansprucht.

Das entwickelte Pooling-Konzept hat einen positiven Effekt auf den Leercontainerfluss bei einzelnen und bei Kombinationen der Grundaufgabenstellungen. Die Gesamtzahl möglicher Kombinationen ergibt sich aus der Kombinatorik. Wird angenommen, dass insgesamt nur ein Schiff, im Hafen nur ein Depot, landseitig nur ein Abnehmer bzw. nur eine Quelle sowie insgesamt nur zwei Leercontainer betrachtet werden, existieren 35 zu untersuchende Fälle (Kombinationen mit Wiederholung; Ausschluss der Fälle 3 und 9). Der Effekt des Container-Poolings auf Bewegungs- und Lagerungsvorgänge im Hafen wird nachstehend anhand eines ausgewählten Beispiels belegt. Hierbei werden zwei gegenläufige Leercontainerströme der Fälle 1 und 2 in der Variante „zwei Schiffe“ betrachtet, Abbildung 4.

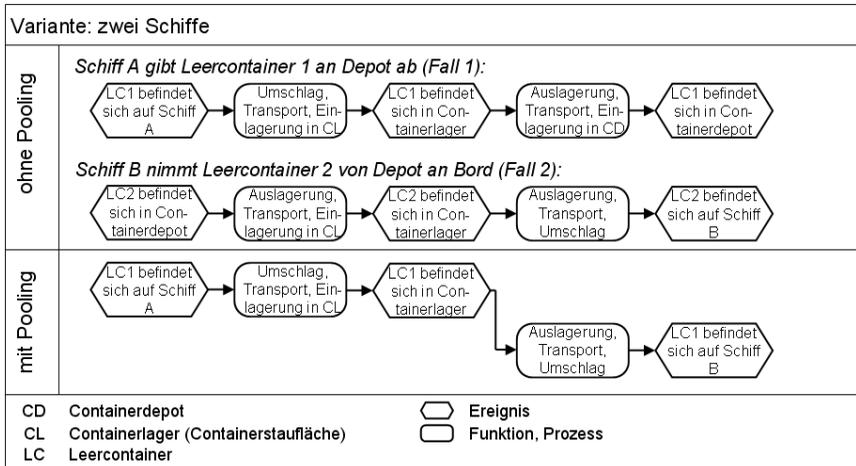


Abbildung 4: Effekte des Container-Poolings auf Bewegungs- und Lagerungsoperationen im Hafen

Das Beispiel zeigt, dass das Container-Pooling zu einer Reduzierung von Bewegungsprozessen im Seehafen führen kann. Die vorgestellte Variante verdeutlicht die Notwendigkeit und den Nutzen des Containerlagers auf dem Terminal. Voraussetzung für diese Optimierung ist die Überprüfung der Leercontainer vor dem Versand mit Schiff A. Die Vorteile für den Versender und den Reeder muss eine separate Prozessanalyse unter Beweis stellen. Die Vermeidung von Stütz- und Blindprozessen für die Containerbereitstellung beider Akteure vereinfacht dieses Konzept zwingend. Es stellt einen standardisierten Abfrage- und Bereitstellungsprozess zu definierten Kosten und Zeiten bereit.

3 Fazit

Circa 20 Prozent der in den Seehäfen umgeschlagenen Container sind dem lastfreien Vor- bzw. Nachlauf zuzuordnen [Drewry 06]. Das vorgestellte Pooling-Konzept ist ein geeigneter Ansatz zur Reduzierung der dafür erforderlichen Bewegungs- und Lagerungsoperationen. Es integriert die bestehenden theoretischen und praktischen Erkenntnisse zu dem Thema Leercontainermanagement und erweitert diese um die notwendige prozessorientierte Perspektive. Die Herleitung durch das vorgestellte morphologische Schema ermöglicht im nächsten Schritt den Test unterschiedlicher Gestaltungsformen eines Poolings. Insgesamt ergeben sich durch das Pooling eine Vielzahl von positiven und negativen Effekten. Durch die separate Containerstaufläche reduziert sich die Anzahl der Umstapelungen und erhöht die Ressourcen für den Vollcontainerumschlag (Hafeneffekt). Die Ausnutzung der Potenziale durch das unterschiedliche örtliche, zeitliche und mengenmäßige Leercontaineraufkommen der Poolteilnehmer erhöht den Servicegrad und reduziert die individuell vorzuhaltenden Container (Reedereieffekt). Kritisch zu untersuchen ist die Ausgestaltung des Grey-Boxings. Zur Frage der tatsächlichen Werbewirkung von Containermarkierungen bedarf es weiterer Forschung. Die Anwendbarkeit des Poolings hängt im hohen Maße von der Poolzusammenstellung ab. Für Regionen mit einem stark dominanten Im-

port- oder Exportanteil erscheint die Umsetzung schwierig. Bündelungseffekte durch den gemeinsamen Leercontainertransport müssen zusätzlich untersucht und mitgerechnet werden.

4 Literatur

- [Boile 06] Boile, M.: Empty marine container management, Global trends and challenges, in: Shipping International Monthly Review. 2006. S. 60-63
- [Brinkmann 05] Brinkmann, B.: Seehäfen – Planung und Entwurf. Springer: Berlin. 2005
- [Crainic 93] Crainic, T. G.; Gendreau, M.; Dejax, P.: Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers, Special Issue on Stochastic and Dynamic Models in Transportation, in: Operations Research 41(1). 1993. S. 102-126
- [Drewy 06] Drewry Shipping Consultants (Hrsg.): The Drewry Annual Container Market Review and Forecast. 2006/2007
- [Hautau 08] Hautau, U.; Hüttmann, B.; Kasiske, F.: Bedeutung der Leercontainerlogistik für die Hamburger Hafenwirtschaft. Internationales Verkehrswesen: 1+2. 2008. S. 54-59
- [Jula 04] Jula, H.; Chassiakos, A.; Ioannou, P.: Port dynamic empty container reuse, in: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 42(1). 2004. S. 43ff
- [Pumpe 00] Pumpe, D.: Ein Referenzmodell zur Planung und Steuerung der Abläufe in Seehäfen-Containerterminals. Mensch und Buch: Berlin. 2000
- [Olivo 05] Oliva, A.; Zuddas, P.; Di Francesco, M.; Manca, A.: An operational model for empty container management. Maritime Economics & Logistics. 7(3). 2005. S. 199-222
- [Shintani 07] Shintani, K.; Imai, A.; Nishimura, E.; Papadimitriou, S.: The container shipping network design problem with empty container repositioning. In: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation review. 43(1). 2007. S. 39-59
- [Theofanis 09] Theofanis, S.; Boile, M.: Empty marine container logistics: facts, issues and management strategies. GeoJournal: 74(1). 2009. S. 51-65
- [Wang 08] Wang, R.; Zhao, X.; Yu, W.; Zou, W.: The Study on Empty Containers Allocation in the Container Transportation. IEEE. Industrial Engineering und Engineering Management. Singapore. 2008

RFID-Einsatz in der Baubranche

Dipl.-Ing. O. Schneider, Prof. W. A. Günthner

Technische Universität München

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Die RFID-Technologie ist eine der am meisten diskutierten Auto-ID-Methoden der letzten Jahre und hat in vielen Industriebereichen bereits erfolgreich Einzug gehalten. Auf Grund der rauen Umgebungsbedingungen und der komplexen Prozesslandschaft konnte die Technologie jedoch in der Bauindustrie bisher kaum Fuß fassen. Um für diesen Industriezweig neue Nutzenpotenziale zu erschließen, beschäftigte sich das von der IGF (Industrielle Gemeinschaftsforschung) geförderte Forschungsprojekt 15288 daher mit den Möglichkeiten eines Einsatzes von RFID in der Baubranche. Über einen Zeitraum von zwei Jahren wurden Kennzeichnungslösungen für die zeitnahe und aufwandsarme Identifikation und Dokumentation der Betriebsmittel und deren Materialflüsse entwickelt. Auch wurden verschiedene Identifikationspunktkonzepte erstellt und in Form von Funktionsmustern umgesetzt.

Einleitung

Die Bauindustrie ist seit Jahren durch einen immer stärkeren Wettbewerbsdruck geprägt, der einen harten Preiskampf zur Folge hat. Bedingt durch die historisch gewachsenen Prozesse und die zunehmende Vielfalt der für die verschiedensten Verwendungszwecke eingesetzten Betriebsmittel gestaltet sich deren Verwaltung und Abrechnung jedoch sehr personal- und kostenintensiv. Die bisher nahezu ausschließlich anzutreffende manuelle Buchung in Form von Lieferscheinen ist diesen Anforderungen nicht mehr gewachsen. Durch die steigende Zahl der Buchungsvorgänge unter hohem Zeitdruck nimmt der Anteil fehlerhafter Abrechnungen stark zu. Die damit verbundene eingeschränkte Datenqualität bedingt Schwund und Fehlmengen durch falsch oder nicht angelieferte Betriebsmittel, welche aufwändig nachträglich beschafft werden müssen. Um die Materialversorgung der Baustelle vor diesem Hintergrund zu gewährleisten und Bauverzögerungen zu vermeiden sind die Bauunternehmen gezwungen, in zusätzliche Betriebsmittel zu investieren und überdimensionierte Lagerbestände zu unterhalten. Es ist daher nicht verwunderlich, dass nach einer Studie der TU München im Umfeld der Bauindustrie ca. 67% die Materialverfügbarkeit durch Planungsfehler gefährdet sehen [1].

Unter diesen Voraussetzungen war das Ziel des Forschungsprojekts die Steigerung der Prozesstransparenz in der Materialversorgung und damit auch die Optimierung der Lieferqualität. Die Basis hierfür bildet eine zeitnahe, eindeutige und vollständige Dokumentation der Betriebsmittel und deren Nutzung in einer zentralen Datenbasis. Dabei stellt RFID eine geeignete Technologie dar, die verschiedenen Betriebsmittel auch unter den rauen Umwelteinflüssen und mitunter starken mechanischen Belastungen, wie sie in der Bauindustrie auftreten, zu identifizieren. Als Folge können

durch die Automatisierung der Buchungsvorgänge sowohl die Vollständigkeit und Korrektheit von Materialbewegungen aufwandsarm überprüft und kontrolliert als auch die Auslastung der Betriebsmittel gesteigert werden. Diese Potenziale lassen sich insbesondere auch von kleinen und mittelständischen Unternehmen umsetzen.

Nachdem Anwendungen von RFID in der Baubranche bisher kaum anzutreffen sind, galt es, im Rahmen des Forschungsprojekts Nutzenpotenziale und Einsatzszenarien für die Technologie zu identifizieren. Gemäß den vorherrschenden Anforderungen durch die Umgebungsbedingungen oder die Prozesslandschaft sollten Anforderungen an die Technologie abgeleitet und anhand ausgewählter Betriebsmittel Kennzeichnungslösungen ausgearbeitet werden. Eine weitere Zielsetzung bestand in der Entwicklung und Umsetzung geeigneter Identifikationspunkt-konzepte für den Einsatz auf der Baustelle und dem Bauhof und der Ausarbeitung der entsprechenden Systemarchitektur. Die erzielten Ergebnisse galt es, in Form eines Leitfadens, welcher den Anwender schrittweise bei der Einführung von RFID in der Bauindustrie unterstützt, zusammenzufassen.

Stand der Forschung

Auf Grund seiner Vorteile gegenüber anderen Auto-ID-Technologien wie dem Barcode konnten sich RFID-Anwendungen in der Intralogistik bereits erfolgreich etablieren. So findet RFID vermehrt Einzug im Warenein- und -ausgang zur Vollständigkeitskontrolle von Warensendungen oder wird zur Prozessdokumentation und -steuerung, Kommissionierung und das Lagerplatzmanagement verwendet.

In der Baulogistik konnte sich die RFID-Technologie jedoch wegen der anspruchsvollen Umgebungsbedingungen und der mitunter stark restriktiven Prozesseigenschaften bisher kaum durchsetzen. Bisherige Lösungen beschränken sich daher vorrangig auf die Kennzeichnung und Identifizierung einzelner Objekte. So wird RFID bereits zur Diebstahlsicherung von Werkzeugmaschinen wie Bohrmaschinen oder Bohrmeißeln eingesetzt. Auch findet RFID bei der Überwachung und Kontrolle von Betontragwerken Verwendung. Die einzelnen Betonteile werden dabei mit aktiven Transpondern bestückt und eindeutig gekennzeichnet. Des Weiteren verfügt der Transponder über einen Feuchtigkeitssensor, der die Trocknung und damit Aushärtung des Tragwerks überwacht und zeitnah kommuniziert. Darüber hinaus beschäftigen sich Forschungsaktivitäten mit der Definition RFID-fähiger Datenschichten oder Personenkontrollsystemen für die Zutrittskontrolle auf Baustellen.

Ein großes Problem für die RFID-gestützte Baulogistik stellt jedoch die enorme Vielfalt und Divergenz der verschiedenen Betriebsmittel dar. Ohne entsprechende Identifikationskonzepte können diese nicht hinreichend gekennzeichnet und die Prozesssicherheit gewährleistet werden. Auf Grund dessen hatte das Forschungsprojekt die Entwicklung von Kennzeichnungslösungen für verschiedene, ausgewählte Betriebsmittel und geeigneten Erfassungspunkt-konzepten zum Ziel, da diese die Grundlage für eine erfolgreiche Implementierung der RFID-Technologie in der Bauindustrie darstellen.

Klassifizierung der Betriebsmittel und Ableitung von Einsatzszenarien

Um die möglichen Vorteile von RFID in der Bauindustrie zu bestimmen, wurden zu Anfang des Projekts im Rahmen eines Workshops und zahlreicher Gespräche mit den beteiligten Industriepartnern sinnvolle Nutzenpotenziale bestimmt. Durch die Einbeziehung von Unternehmen sowohl aus der Baubranche als auch RFID-Systemanbietern und Hardware-Herstellern wurden dabei sowohl Nutzenpotenziale aus Sicht der Baupartner als auch anderer Branchen eingebracht und vorab bewertet.

Die hauptsächlichen Nutzenpotenziale in der Bauindustrie liegen demnach in schnellen, fehlerfreien Waren- und Warenausgangskontrollen sowie aktuellen Bestandslisten durch eine zeitnahe Verbuchung. Darüber hinaus wurden ein geringerer Aufwand für die Verwaltung und Inventur der Betriebsmittel, aber auch eine zeitnahe Projektbewertung auf Grund aktueller Statusberichte genannt. In der Folge ergeben sich eine detaillierte Datenbasis und eine bessere Planbarkeit für spätere Projekte. Auch der Reduzierung von Schwund und Fehllieferungen und der daraus hervorgehenden geringeren Sicherheitsbestände wird eine große Bedeutung beigegeben.

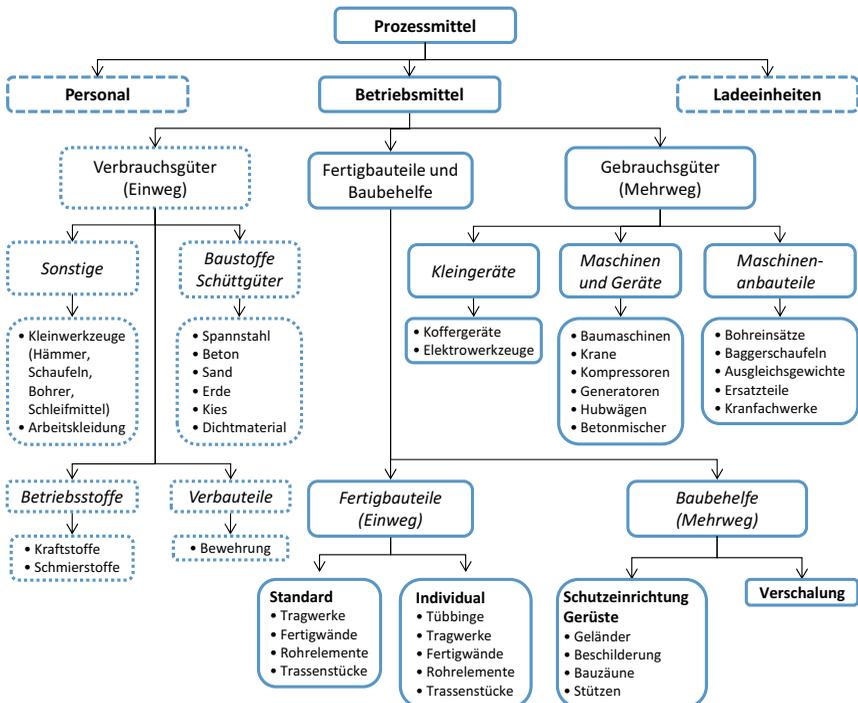


Abb. 1: Klassifizierung der Betriebsmittel

Bei der Ausarbeitung der Nutzenpotenziale und darauf basierender Einsatzszenarien fiel schnell auf, dass diese mitunter entscheidend von den jeweiligen Betriebsmitteln abhängig sind. Wegen deren großer Vielfalt musste daher zunächst eine sinnvolle Einteilung gefunden werden. Die Klassifizierung der Betriebsmittel orientiert sich dabei an gängigen Gruppierungen wie bspw. der Baugeräteleiste, wurde jedoch im Hinblick auf einen späteren RFID-Einsatz angepasst (siehe Abb. 1).

Betrachtet wurden nur einzelne Betriebsmittel, die direkt gekennzeichnet werden können. Dabei wurde als erstes deren Wertigkeit betrachtet. Diese lässt sich qualitativ bspw. anhand des Investitionsumfangs, Folgekosten durch verzögerte Anlieferung auf der Baustelle oder der Dauer einer Wiederbeschaffung bewerten. Verbrauchsgüter stellen hierbei Betriebsmittel mit Einweg-Charakter und geringer Wertigkeit dar, weshalb sie nicht weiter betrachtet wurden. Im Fokus standen Fertigbauteile, Baubehelfe sowie Maschinen, Geräte und Anbauteile. Diese unterscheiden sich des Weiteren in ihren Eigenschaften wie Material, grober Geometrie oder Abmessung, die die Anbringung bzw. Integration von Transpondern beeinflussen sowie der Beanspruchung oder den Prozesseigenschaften.

In einem weiteren Schritt wurden für die einzelnen Betriebsmittelgruppen auf Grundlage der Nutzenpotenziale Einsatzszenarien abgeleitet. Von allgemeinem Interesse ist dabei die Ortung und Verfolgung der Objekte, das so genannte Tracking und Tracing, wo das jeweilige Objekt mit dem Ort und der Zeit der Erfassung verknüpft wird. Insbesondere für Maschinen und Geräte ist die Erfassung der Mietdauer und automatische Rechnungsstellung von Interesse. Ähnliches gilt für Schutzeinrichtungen oder Verschaltungen. Speziell die Einhaltung von Wartungsintervallen und die Dokumentation der Auslastung, Einsatzzeiten und Reparaturen spielt in erster Linie bei Maschinen, Geräte und Anbauteilen sowie Verschaltungen eine Rolle. Durch die Verknüpfung mit den Maschinendaten können die Einsatzbedingungen klar erfasst und Wartungsintervalle und -umfänge angepasst werden. Dahingegen versprechen sowohl die Fertigungs- als auch die Lebenslaufdokumentation bei Fertigbetonteilen wegen deren hoher Lebensdauer einen großen Nutzen. Darüber hinaus ist durch den Einsatz von RFID eine Zuordnung zwischen Anbauteilen und den entsprechenden Maschinen, aber auch zwischen Fertigbetonteilen und deren Einbauort möglich.

Anforderungsanalyse

Die Bauindustrie stellt an die RFID-Technologie deutlich andere Anforderungen als bspw. der Handel oder die Automobil- und Bekleidungsindustrie, die RFID bereits in zahlreichen Anwendungen nutzen (siehe Abb.2).

Diese resultieren zum Einen aus den direkten Umwelteinflüssen, die ein Outdoor-Einsatz mit sich bringt. Neben der Temperatur ist dabei insbesondere die Witterung für die Kommunikation zwischen Transponder und Schreib-/Lesegerät von Bedeutung. So absorbieren Flüssigkeiten durch ihr hohes Dämpfungsmaß einen Teil des elektromagnetischen Feldes und bewirken damit eine Reduzierung der Reichweite.

Auch Verschmutzungen durch Schlamm oder Beton können ähnliche Effekte zur Folge haben.

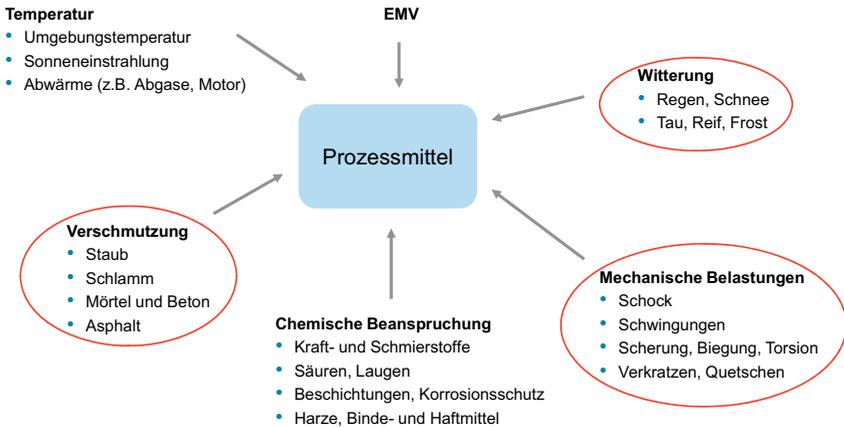


Abb. 2: Anforderungen in der Bauindustrie

Die größte Herausforderung stellt jedoch der hohe Anteil an metallischen Betriebsmitteln dar, da RFID hier an seine physikalischen Grenzen stoßen kann. So reflektiert jede Metalloberfläche auf Grund der hohen Dielektrizitätskonstante das auftreffende elektromagnetische Feld und kann bei ungünstiger Anbringung eines Transponders dessen Auslesen verhindern. Abhilfe schaffen speziell für die Anbringung auf Metall entwickelte Transponder sowie eine intelligente Anbringung oder Integration der Datenträger.

Definition einer RFID-Systemarchitektur für die Bauindustrie

Nachdem RFID eine neue Technologie in der Bauindustrie nahezu ohne Umsetzungen und Erfahrungen darstellt, mussten in einer frühen Projektphase die erforderliche Systemarchitektur definiert und Anforderungen an die Datenhaltungs- und Datenübertragungsschicht abgeleitet werden.

Die zentrale Aufgabe eines RFID-Systems in der Bauindustrie besteht in der Verfolgung und Dokumentation der einzelnen Betriebsmittel. Dazu müssen das Objekt innerhalb des Materialflusses an fest vorgegebenen Punkten identifiziert und dessen Identifikationsnummer (EPC) zusammen mit den Orts- und Zeitinformationen des Erfassungsvorgangs an eine zentrale Datenverwaltung übergeben werden. Die zentrale Datenverwaltung ist vorzugsweise ein übergeordnetes Warenwirtschaftssystem, das die Daten der einzelnen Erfassungspunkte synchronisiert. Auf diese Datenplattform können vernetzte Rechner webbasiert und damit zeitnah zugreifen (siehe Abb. 3). Der Bauhof und die verschiedenen Baustellen sind die einzelnen Prozessstationen, die Betriebsmittel durchlaufen. Innerhalb der Prozessstationen existieren verschiede-

ne Bereiche wie Lager, Werkstatt, Montage, Verladezone oder Warenein- und -ausgang. Je besser diese voneinander abgegrenzt werden, desto genauer lässt sich der Materialfluss abbilden. Jeder Bereich bietet darüber hinaus weitere Tätigkeiten, die sich mit RFID unterstützen lassen, bspw. die Buchung, Kontrolle, Verladung oder Kommissionierung von Aufträgen.

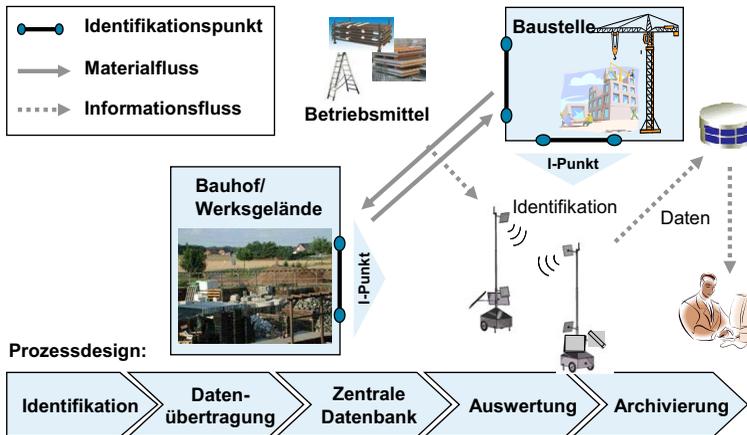


Abb. 3: RFID-Systemarchitektur

Datenhaltung, -erfassung und -übertragung

Zentrale Fragestellungen sind in diesem Zusammenhang die erforderliche Informationsgehalt der Datenträger sowie die der Systemfunktionalität zu Grunde liegenden RFID- und Datenübertragungstechnologien. Prinzipiell können objektbezogene Daten dezentral auf dem mit dem Objekt verknüpften Transponder gespeichert werden. Diese Lösung erfordert jedoch hohe Speicherkapazitäten und Datenübertragungsraten sowie eine redundante Datenhaltung für den Fall des Verlusts oder der Zerstörung des Transponders. Die dezentrale Datenhaltung wird daher zumeist dort eingesetzt, wo keine durchgängige Verbindung zu einer zentralen Datenschicht vorhanden aber notwendig ist. Typische Anwendungen sind die Unterstützung von Wartungs- oder Montagearbeiten oder die Lebenslaufdokumentation eines Bauteils. Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde daher in Rücksprache mit den Industriepartnern die Bevorratung der Daten in Form einer zentralen Datenbank gewählt. Auf dem Transponder wird folglich nur die eindeutige Identifikations- oder Seriennummer eines Betriebsmittels gespeichert. Durch diese Minimierung der Speicheranforderung kann zudem bei der späteren Hardware-Auswahl auf ein deutlich größeres Spektrum zugegriffen werden.

Als zielführende RFID-Technologie fiel die Wahl auf das UHF-Band. Neben der theoretischen Reichweite von mehreren Metern bietet es eine im Vergleich zu LF und HF hohe Datenübertragungsrate und Pulkfähigkeit. Diese sind für eine mögliche Automa-

tisierung der Erfassung von großem Vorteil. Auch sind in den letzten Jahren enorme Fortschritte mit dem EPCglobal-Protokoll enorme Fortschritte im Bereich der Standardisierung und beim Einsatz in metallischer Umgebung gemacht worden.

Für die Kommunikation zwischen Identifikationspunkt und zentraler Datenhaltungsschicht müssen auf Grund der auf Baustellen zumeist nicht ausreichenden LAN- oder WLAN-Infrastruktur Datenfernübertragungstechnologien eingesetzt werden. Diese müssen zudem in der Lage sein, die empfangenen Daten zeitnah weiterzugeben. Entscheidende Kriterien für eine Technologieauswahl sind dabei neben den Investitions- und Betriebskosten die maximale Rate der Datenübertragung und die Störanfälligkeit bzw. Übertragungszeit. Nach dem Vergleich und der Bewertung verschiedener Lösungen wurde für die Datenübertragung GPRS oder UMTS ausgewählt.

Definition von Datenprotokollen

Eine weitere Fragestellung bestand in der Definition sinnvoller Datenprotokolle für den Datenaustausch zwischen Erfassungspunkt und zentraler Datenhaltungsschicht. Für die durchgängige Materialflussdokumentation müssen die Daten im Protokoll hierarchisch strukturiert werden, wofür XML-Dateien eine effektive und standardisierte Lösung sind. Hierbei wurden vier Hauptknoten definiert. Der erste Knoten enthält die einzelnen EPC der Betriebsmittel einer Erfassung, im zweiten Knoten sind Längen- und Breitengrad des Erfassungsortes und im dritten Knoten der Zeitstempel mit Datum und Uhrzeit hinterlegt. Im vierten Knoten kann die Bewegungsrichtung des Materialflusses als Warenein- oder -ausgang abgelegt werden (siehe Abb.4).

| EPC/ID | Objekt | Ort | Datum | Zeitpunkt | Richtung |
|---------------------------|-------------|----------------|------------|-----------|--------------|
| 30F505D7DC05004000000002 | Verschalung | Gate1 BauSt_27 | 02.02.2008 | 13:07:31 | Wareneingang |
| 30F505D7DC05004000000002 | Verschalung | Gate1 BauSt_27 | 13.02.2008 | 05:23:10 | Warenausgang |
| 30F505D7DC05004000000002 | Verschalung | Bauhof | 15.02.2008 | 17:30:21 | Wareneingang |
| 30F505D7AD050040000000056 | Bohrhammer | HH35 BauSt_3 | 17.03.2008 | 13:15:01 | Warenausgang |

Abb. 4: Durchgängige Materialflussdokumentation

Im Gegensatz zur Materialflussdarstellung können Ausleihe, Wartung und Reparatur, die einzeln für die Betriebsmittel dokumentiert werden und daher keine hierarchische Struktur erfordern, gut mit csv- oder Text-Dateien abgebildet werden. Auch dieses Dateiformat stellt eine neutrale Schnittstelle zwischen Erfassungspunkt und zentraler Datenschicht dar. Durch definierte Satzzeichen wie Kommata oder Strichpunkte lassen sich die einzelnen Positionen eines Datensatzes wie EPC, Projekt, Gerät, Liefer- oder Reparaturdetails klar zuordnen, interpretieren und in der Datenablage speichern.

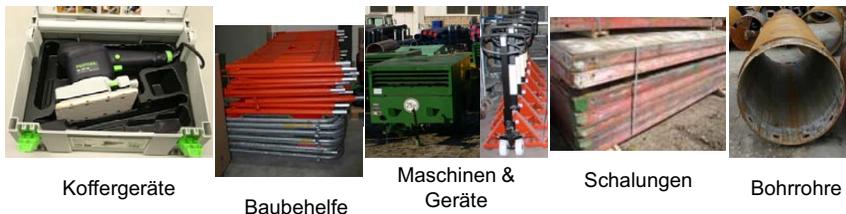
Hardware-Auswahl und Kennzeichnungskonzepte für die Bauindustrie

Die aufgeführten Anforderungen bildeten die Grundlage für die Recherche von für das Bauumfeld geeigneter RFID-Hardware. Hierzu wurden in einem ersten Schritt Normen, Richtlinien und Standards sowie Datenblätter von Transpondern und Schreib-/Lesegeräten analysiert und mit den Anforderungen abgeglichen.

Zunächst wurden die für jedes Elektronikgerät geltenden Gehäuseschutzklassen (International Protection Class IP) nach EN 60529 herangezogen. Diese werden gerätespezifisch in Form einer zweistelligen Zahlenfolge angegeben und beschreiben die Widerstandsfähigkeit des Gehäuses gegen das Eindringen von Fremdkörpern oder Feuchtigkeit in das Gerät. Dabei gibt es am Markt zahlreiche Schreib-/Lesegeräte aber auch Transponder, deren Gehäuse Schutzklassen bis IP 69 erfüllen und demnach auch im Freien betrieben werden können. Auch die in der Bauindustrie gängigen Temperaturspektren stellen in der Regel keine großen Herausforderungen an die RFID-Hardware.

Eine wesentliche Herausforderung für Elektronikgeräte in der Bauindustrie sind mechanische Belastungen. Bei der Recherche von verschiedenen Datenblättern konnten typische Grenzwerte für Transponder zu Belastungen durch Stöße, Schock, Schwingungen und Vibrationen erarbeitet werden. Diese werden zumeist nach der Norm EN 60068-2 festgelegt, die Verfahren für Umweltprüfungen vorgibt. Die recherchierten Grenzwerte liegen dabei für die meisten Transponder deutlich über den üblicherweise auftretenden Beanspruchungen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass gerade in der Bauindustrie oft unvorhersehbare mechanische Belastungen auf die Betriebsmittel wirken, die deutlich über den sonstigen Grenzwerten liegen und schlecht einzugrenzen sind. Auch fehlen bei vielen Betriebsmitteln funktionsneutrale Flächen für das Anbringen der Transponder auf deren Oberfläche, was die Ableitung intelligenter Integrationskonzepte erforderlich macht.

Weitere Beanspruchungen wie die elektromagnetische Verträglichkeit oder Druck können dagegen nur schwer quantifiziert werden. Zwar gibt es verschiedene Normen zur Beschreibung von Prüfverfahren, jedoch nicht zur Definition von zulässigen Grenzwerten für RFID-Geräte. Das Gleiche gilt für die langfristige chemische Beständigkeit gegenüber Schmiermitteln, Kraftstoffen oder Laugen. Nach Rücksprache mit Herstellern und Anbietern sind jedoch nach deren Erfahrung bei beiden Anforderungen kaum Beeinträchtigungen zu erwarten.



Koffergерäte

Baubehelfe

Maschinen & Geräte

Schalungen

Bohrrohre

Abb. 5: Ausgewählte Betriebsmittel

Insgesamt kann die verfügbare RFID-Hardware die Anforderungen der Bauindustrie erfüllen. Keine allgemein gültigen Aussagen können jedoch auf den Einfluss der metallischen Betriebsmittel und der Witterung auf die Kommunikation zwischen Schreib-/Lesegerät und Transponder getroffen werden. Erschwerend hinzu kommt das Fehlen

von hinreichenden Anbringungsflächen für die Transponder an den verschiedenen Prozessmitteln. Ein Schwerpunkt des Forschungsprojekts stellte daher die Entwicklung geeigneter Kennzeichnungskonzepte dar. Hierzu wurden repräsentative Betriebsmittel (siehe Abb. 5) auf Basis der getroffenen Klassifizierung ausgewählt, anhand derer umfassende Versuchsreihen für die praxisnahe Kennzeichnung durchgeführt und Identifikationsmöglichkeiten erarbeitet wurden. Durch die sinnvolle Auswahl können die Ergebnisse auch auf andere Prozessmittel übertragen werden.

Kennzeichnung von Schalungen

Eine schwierige Anwendung stellen metallische Schalungen (siehe Abb. 6), wie sie für die Fertigung von Decken- oder Wandelementen verwendet werden, dar. Sie verfügen über keine funktionsneutralen Flächen, weshalb Transponder nicht direkt auf der Schalung angebracht werden können. Auch unterliegen sie beim Zusammenfügen und der Demontage der Schalflächen sowie der Reinigung starken Beanspruchungen. Die einzige Möglichkeit der Kennzeichnung besteht daher in der Integration der Transponder in die Schalung. In einer ersten Versuchsreihe wurde die Schalung mittels einer Schlitzantenne versehen. Dazu wurde in die metallische Trägerstruktur eine Aussparung gefräst, auf die eine geschlitzte Metallplatte als Modul aufgesetzt und verschraubt wird. In der Platte ist ein Schlitz angebracht, dessen optimale Länge abhängig von der zu Grunde liegenden Arbeitsfrequenz ist. Die Transponder wurden geschützt auf der Innenseite der Platte auf dem Schlitz befestigt. Die erzielbaren Reichweiten betragen dabei in Abhängigkeit vom gewählten Transponder und dessen Orientierung und Ausrichtung auf dem Schlitz bei optimaler Schlitzlänge mitunter deutlich über fünf Meter. Problematisch an der Lösung stellt sich jedoch nach Expertenaussagen die Praktikabilität dar, da ein Schlitz in der hoch beanspruchten Schalhaut eine Materialschwächung darstellt und zudem leicht verformt werden kann, wodurch die Identifikation negativ beeinflusst wird.



Abb. 6: Versuchsreihe Schalung

Aus diesem Grund wurde eine weitere Möglichkeit zur Schalungskennzeichnung erarbeitet, wobei die Transponder in einen Gummistopfen gegossen sind, der in eine zusätzliche Verbindungsbohrung eingebracht wurde. Diese dienen dem formschlüssigen Zusammenbau mehrerer Schalelemente und sind durch eine Metallhülse, die in das Hohl-Profil eingesetzt wird, verstärkt. Für die Versuchsreihen wurden speziell für den Einsatz in metallischer Umgebung konzipierte Transponder ausgewählt, die in

der kleinen Bohrung Platz finden. Bei den anschließenden Versuchsreihen konnte der Transponder bis zu einer Entfernung von etwa einem Meter ausgelesen werden.

Im Gegensatz zu metallischen Schalungen sind Systemschalungen aus Holz deutlich einfacher zu kennzeichnen. Diese werden in der betrieblichen Praxis zumeist im Bauhof montiert und mit einem Schild versehen, das die Bezeichnung und den geplanten Einbauort angibt. In oder an dieses Schild kann ein Transponder einfach ein- bzw. angebracht und ausgelesen werden. Da die Auslesbarkeit bei feuchtem oder nassem Holz in Folge der Dämpfung des elektromagnetischen Feldes stark vermindert werden kann, wurden für die Testreihen Kunststoffplatten verwendet. Bei entsprechender Dimensionierung bieten diese für den Transponder einen ausreichenden Abstand zum Holz.

Kennzeichnung von Bohrrohren

Ebenfalls hohe Anforderungen an eine Kennzeichnungslösung stellen Bohrrohre als Beispiel für Anbauteile (siehe Abb. 7). Prinzipiell können dabei zwei Typen unterschieden werden. Für das Fördern von Erdaushub werden Rohre mit geringerem Durchmesser verwendet, die sich konisch nach dem Mutterstück verjüngen und an ihren Mantelflächen kaum beansprucht sind. Ein Erfassungskonzept besteht daher in Form einer ringförmigen Rohrmanschette, die nach der Verjüngung um das Rohr verschraubt wird. Wegen der geschützten Einbringung des Transponders in die Manschette und dem definierten Abstand zur metallischen Rohroberfläche konnten in den Versuchsreihen handelsübliche Labels eingesetzt und bis zu einer Entfernung von knapp zwei Metern während der Drehung des Rohres gelesen werden.



Abb. 7: Versuchsreihe Bohrrohre

Gegenüber den Förderrohren werden Bohrrohre direkt in den Untergrund getrieben und unterliegen dabei hohen mechanischen Belastungen, denen eine aufgesetzte Kennzeichnungslösung nicht gewachsen ist. In Form einer Bohrrohrschraube aus Kunststoff, in der sich der Transponder befindet, wurde daher eine Möglichkeit zur integrativen Kennzeichnung entwickelt. Gewöhnlich werden mit metallischen Bohrrohrschrauben Vater- und Mutterstück zweier Rohre zusammengefügt. Durch die deutliche Überdimensionierung der Verbindung können jedoch zwei Bohrungen für

die Integration der Rohrschraube verwendet werden. Diese hat die gleiche Wandstärke wie das Rohr selbst, wird in das Gewinde im Mutterstück geschraubt und damit dauerhaft mit dem Bohrrohr verbunden. Bei Testreihen auf der Baustelle und praxisnaher Befestigung der RFID-Antenne am Bohrgerät konnte das Rohr erfolgreich erkannt werden. Die Kunststoffschrauben waren auch nach der Ausbringung des Rohres aus dem Erdreich unbeschädigt und funktionsfähig im Gewinde verschraubt.

Kennzeichnung von Maschinen und Kleingeräten

Als weitere Prozessmittel konnten Geräte und Maschinen erfolgreich mit Transpondern ausgerüstet werden. Durch die prinzipielle Möglichkeit der äußeren Anbringung gestaltet sich die Kennzeichnung von Großgeräten wie Hubwägen, Stromkästen, Kühlschränken oder Baumaschinen recht einfach. Sie verfügen in der Regel über ausreichende funktionsneutrale Flächen und Geometrien, an denen der Transponder geschützt befestigt werden kann. Optimal für diesen Einsatz sind Hardtags für Metall, so genannte On Metal Tags, geeignet.

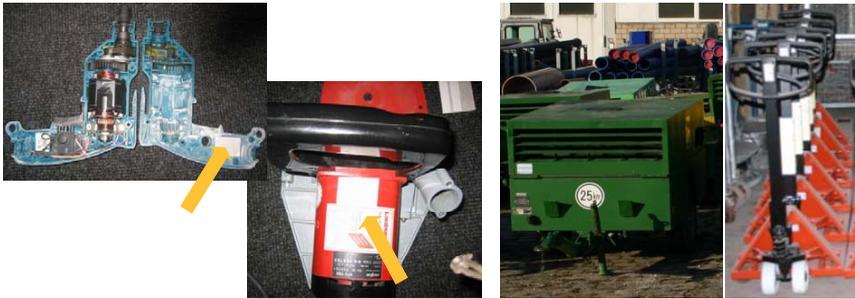


Abb. 8: Versuchsreihe Geräte und Maschinen

Bei Kleingeräten wie Bohrmaschinen, Handkreissägen oder Schleifgeräten, die über ein Kunststoffgehäuse verfügen, wurden sowohl Anbringungs- als auch Integrationskonzepte entwickelt (siehe Abb. 8). Bei der Befestigung auf dem Gehäuse darf der Transponder vom Benutzer nicht als Fremdkörper wahrgenommen werden und ihn bei der Handhabung des Geräts behindern. Eine gute Lösung hierfür ist das Aufkleben eines Labels direkt unter das Typenschild. Aber das Label kann auch in das Gerät integriert werden, wenn ausreichende Hohlräume, beispielsweise im Griffstück, vorhanden sind. Beide Kennzeichnungsmöglichkeiten konnten in den Versuchsreihen sogar im Kunststoffkoffer in Kombination mit der RFID-Theke (siehe Abb. 11) gut ausgelesen werden. Jedes Gerät erfordert jedoch eine genaue Prüfung des Anbringungsortes, da metallische Motoren, Spulen oder Schalter die Leserate stark beeinflussen können.

Kennzeichnung metallischer Rohrkörper

Das Konzept der Schlitzantenne, das bei der Schalung bereits gute Ergebnisse geliefert hat, wurde im Rahmen einer weiteren Versuchsreihe genauer betrachtet (siehe

Abb. 9). Die Zielstellung war die Kennzeichnung von metallischen Rohrelementen, wie sie bei Absperrungen, Bauzäunen oder Baugerüsten Verwendung finden. Zunächst wurde in das Rohr an einem Ende ein offener Schlitz gefräst, dessen Schlitzlänge im Laufe der Testreihen stufenweise variiert wurde. Die eigentliche Kennzeichnungslösung bildet ein Kunststoff-Stopfen, der in das Rohr geschoben wird und in den ein kleines Label integriert ist. Bei einer optimalen Ausrichtung und Position des Transponders auf dem Schlitz kann dieser mit der Antenne koppeln. Eine Nase legt dabei die genaue Lage fest. Bei optimaler Kopplung zwischen Schlitzantenne und Transponder konnten in Abhängigkeit von der Schlitzlänge Leseentfernungen zwischen einem halben und mehreren Metern erreicht werden.

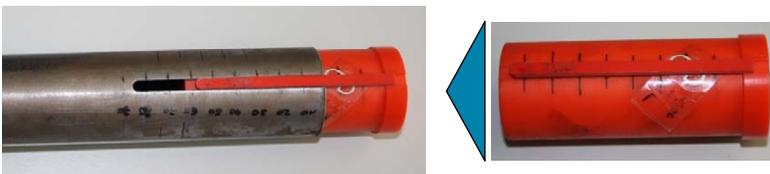


Abb. 9: Versuchsreihe metallische Rohrkörper

Die beschriebene Stopfenlösung wurde am Lehrstuhl unter praxisnahen Versuchsbedingungen bereits erfolgreich getestet. Bei der Durchfahrt von mit dem Stopfen gekennzeichneten Absperrvorrichtungen auf einer Palette durch ein stationäres Gate konnten die Betriebsmittel auch bei großzügiger Bemessung der Gate-Breite sicher identifiziert werden.

Entwicklung von Identifikationspunkt Konzepten für die Bauindustrie

Ein weiterer Projektschwerpunkt bestand in der Konzeption und Umsetzung von für die Bauindustrie geeigneten Identifikationspunkten in Form von Funktionsmustern. Zunächst wurden hierfür bereits bestehende Lösungen recherchiert und hinsichtlich eines Baustelleneinsatzes bewertet. Die gesammelten Erkenntnisse bildeten die Basis für die anschließende Konzeptfindung.

Eine gängige Lösung für die RFID-gestützte Objekterfassung stellt das Handheld dar. Deren Basis bildet eine Art erweitertes PDA-Modul, mit dem in Abhängigkeit von der gewünschten Arbeitsfrequenz verschiedene RFID-Module kombiniert werden können. Die Geräte verfügen zumeist über eigene Windows-Betriebssysteme und ausreichend Speicherkapazität, um eigene Anwendungen auszuführen und Daten zu speichern. Diese können über WLAN oder GPRS zeitnah versendet oder in stationären Docking-Stationen zyklisch ausgelesen und übertragen werden. Der große Vorteil solcher mobilen Geräte liegt in deren Flexibilität. Spezielle Ausführungen sind zudem auch für den Einsatz unter rauen Bedingungen ausgelegt und verfügen über GPS-Empfänger. Nachteilig kann sich zum Einen der Vorgang der Identifikation gestalten, da die Geräte nur über eine geringe Sendeleistung und damit Reichweite verfügen. Zum Anderen erfordert die Identifikation nach wie vor den Einsatz von Personal, die mit dem Gerät

umgehen und dafür geschult werden müssen. Dabei sind verbindliche Verantwortlichkeiten zu definieren, welcher Mitarbeiter in welchem Bereich der Baustelle die Erfassung der Betriebsmittel vornimmt und durchgehend über ein solches Gerät verfügt. Diese Einschränkung dürfte nach intensiver Diskussion mit den Forschungspartnern auf Grund der dynamischen Prozesslandschaft auf Baustellen das größte Problem darstellen. Deshalb wird die durchgängige Materialflusssdokumentation mit solchen Geräten aktuell als nicht realisierbar erachtet.

In der Intralogistik werden seit einiger Zeit auch RFID-Lösungen für den Einsatz am Stapler angeboten, die einfach für den Betrieb am Radlader adaptiert werden können und damit auch für die Baustelle geeignet sind. Dabei werden die Antennen zur Erfassung von Ladungsträgern zwischen den Gabelzinken oder zur Identifikation des Inhalts eines Ladungsträgers seitlich abstehend am Hubmast befestigt. Im rauen Umfeld der Bauindustrie sind beide Konzepte jedoch sehr anfällig für Beschädigungen oder Zerstörung und dort daher nur bedingt einsetzbar. Aus diesem Grund integriert eine am Lehrstuhl fml entwickelte und patentierte Lösung die RFID-Antenne direkt in die Gabelzinke, um einzelne Ladungsträger sicher erfassen zu können. Durch die Kommunikation zwischen Schreib-/Lesegerät und Staplerterminal kann der Materialfluss jeder Ladeinheit durchgängig verfolgt werden. Eine Erfassung einzelner Objekte oder Betriebsmittel ist mit der Gabelzinkenantenne jedoch nur in Kombination mit deren Ladeinheit möglich.

Zur automatisierten, gleichzeitigen Erfassung von Objekten werden in der Intralogistik bspw. im Warenein- oder -ausgang häufig Gates verwendet. Dabei sind an einem torartigen Hilfsrahmen mehrere Antennen oder Schreib-/Lesegeräte verteilt, deren Felder sich überschneiden und Objekte bei einer Durchfahrt nahezu unabhängig von deren Lage identifizieren zu können. Bisherige Gate-Lösungen dienen jedoch hauptsächlich der Anwendung im Indoor-Bereich an stationären Materialflusstationen und sind nicht für einen Einsatz auf der Baustelle geeignet. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Forschungsprojekts ein mobiles Gate mit autarker Energieversorgung speziell für den Einsatz im Umfeld der Bauindustrie entwickelt und in Form eines Demonstrators umgesetzt. Dabei handelt es sich um eine beispielhafte Darstellung der Gesamtfunktionalität.

Konzeption und Umsetzung eines mobilen Baustellengates

Zunächst wurden die Anforderungen wie Mobilität, autarke Energieversorgung, Datenübertragung, RFID-Erfassung und Umwelteinflüsse an ein mobiles Gate definiert und gewichtet. Diese bildeten die Basis für die Beschreibung von Teilproblemen wie Steuerung, Arbeitsfrequenz oder Energieversorgung, die paarweise verglichen und ebenfalls gewichtet wurden. Für die einzelnen Teilprobleme wurden anschließend Teillösungen abgeleitet und nach gewichteten Kriterien bewertet. In der Konzeptauswahl wurden die besten Teillösungen schließlich zu einem Gesamtsystem kombiniert, das in Abb. 10 dargestellt ist.

Die primäre Energieversorgung wird durch Akkus sichergestellt, die durch Solarmodule und einen Solarladeregler zur Anpassung der Ladespannung gespeist werden. Ein Benzingenerator mit Elektrostarter dient als Backup-Lösung für den Fall einer längerfristigen unzureichenden Solarladespannung und lädt die Akkus über einen eigenen Laderegler. Der Generator wird von einer Kompaktsteuerung in Abhängigkeit von der Batteriespannung zu- oder abgeschaltet. Dabei kann die Akku-Spannung als analoger Wert interpretiert werden. Der Steuerungsalgorithmus schaltet auf der Ausgangsseite drei Relais, die den Generator starten bzw. abschalten und den Choke regeln. Der 12V-Ausgang des Generators dient zu dessen Funktionskontrolle. Im Falle eines fehlgeschlagenen Startversuchs, bspw. auf Grund Benzinmangels, meldet ein Alarm optisch und akustisch dessen Fehlfunktion. Die Spannungsgrenzwerte sind dabei so bemessen, dass auch im Fall einer Generatorfehlzündung ein ausreichendes Zeitfenster für Gegenmaßnahmen zur Verfügung steht und dessen Betriebszeit trotzdem minimal ist. An die Akkus sind sämtliche Verbraucher des Gates angeschlossen. Ein vorgeschalteter Lastabwurf trennt beim Unterschreiten einer Tiefenentladeschwelle die Verbraucher von der Energieversorgung.



Abb. 10: Mobiles Baustellengate

Die eigentliche Funktionalität des Gates besteht in der Kombination von Erfassungs-, Ortungs- und Datenübertragungsmodulen, die ein auf dem Lokalrechner hinterlegter, modular aufgebauter Algorithmus realisiert. Das erste Modul steuert über die entsprechende serielle Hardware-Schnittstelle des Rechners die angeschlossenen Schreib-/Lesegeräte der Firma Deister an. Die innerhalb eines Leseintervalls erfassten EPC der Transponder werden im Gerätespeicher abgelegt und von dort vom Programmcode ausgelesen. Das zweite Modul kommuniziert ebenfalls über eine serielle Schnittstelle mit einer GPS-Maus. In Form einer NMEA-Datei gibt diese fortlaufend Längen- und Breitengrad sowie Datum und Uhrzeit der Lokalisierung aus. Durch die klare Struktur dieser Datei kann der Algorithmus diese Daten auslesen und im Ab-

gleich mit der Datenbank durch den Vergleich von Längen- und Breitengrad den aktuellen Ort des Gates bestimmen. Das dritte Modul integriert die erhaltenden RFID- und GPS-Daten in einer bereits zuvor erwähnten XML-Datei, die mittels WLAN-Verbindung oder Datenfernübertragung an das zentrale Warenwirtschaftssystem übermittelt wird.

Entscheidend für die vollständige Materialflussdokumentation ist die Bestimmung der Bewegungsrichtung der erfassten Betriebsmittel, also ob es sich um einen Warenein- oder -ausgang handelt. Eine Möglichkeit hierfür bieten Bewegungsmelder oder Lichtschranken, die zusätzlich die Schreib-/Lesegeräte triggern, um den Energiebedarf zu reduzieren und Fehlerfassungen zu vermeiden. Deren exakte Auslegung ist jedoch auf Grund von Schmutz und Staub mitunter schwierig. Eine Alternative bieten softwareseitige Lösungen. Innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls stellt eine Erfassung einen Wareneingang, im folgenden Zeitintervall einen Warenausgang dar.

RFID-Theke zur Unterstützung der Dokumentation von Mietgeräten

Ein allgemeines Problem ist für viele Bauunternehmen die Verbuchung von Mietgeräten bei deren Ausgabe, Wartung oder Reparatur. Der Hauptgrund hierfür ist die fehlende eindeutige Identifizierbarkeit der Mietgeräte, die in der bauindustriellen Praxis in der Regel lediglich über ihre jeweilige Bauteilgruppe gekennzeichnet sind. Durch die mangelnde gerätespezifische Kennzeichnung ist weder eine Dokumentation der Ausleihhistorie noch der Wartungs- oder Reparaturhistorie möglich. In der Folge werden Reparaturkosten sowie Ersatzinvestitionen durch Schwund nicht projekt- oder kundenbezogen verbucht und die Geräteauslastung innerhalb einer Bauteilgruppe ist inhomogen. Zudem ist die bisherige manuelle Verbuchung der Geräte im Lager oder der Werkstatt sehr aufwändig und anfällig für Fehler, die sich in der Lieferqualität niederschlagen.

Im ersten Schritt wurde daher ein Konzept für eine RFID-Theke zur Unterstützung der Verbuchung von Mietgeräten im Lager und in der Werkstatt entwickelt. Diese ist in Form einer Bedientheke, wie sie üblicherweise für die Materialausgabe Verwendung findet, aufgebaut, in die die RFID-Hardware integriert wird (siehe Abb. 11). Deren Steuerung übernimmt ein in die Theke eingebauter Rechner, auf dem eine lokale Datenbank hinterlegt ist. Über eine LAN- oder WLAN-Schnittstelle können die dort gespeicherten Daten in Form einer neutralen Schnittstelle, bspw. einer Textdatei, mit dem übergeordneten Warenwirtschaftssystem ausgetauscht werden.

Während die seitliche Antenne für die Erfassung größerer Lagergüter wie Kühlschränke oder Hubwägen gedacht ist, werden Kleingeräte, die wie in Abb. 9 beschrieben gekennzeichnet sind, für die Identifizierung auf die obere Antenne aufgelegt. Dem Anwender zeigen sich auf dem Bildschirm die notwendigen Geräteinformationen als genaue Beschreibung mit Foto, Zubehör im Koffer und etwaige Kommentare zum vorangehenden Buchungsvorgang an. Dabei wird der Nutzer in der Thekensoftware durch verschiedene Formulare bei der Ausgabe, Rücknahme, Wartung oder

Reparatur unterstützt oder mit statischen Informationen über das Gerät versorgt. Beispielhaft wird hierfür der Rückgabeprozess eines entliehenen Gerätes beschrieben.

Bei der Übergabe wählt der Mitarbeiter die entsprechende Maske aus und legt den Koffer mit dem Gerät auf die obere Antenne. Die mit dem EPC des Transponders im Gerät über eine Datenbank verknüpften Informationen zeigen sofort, um welche Maschine es sich handelt, wer diese ausgeliehen hatte und welches Zubehör ausgegeben wurde. Nach Prüfung der Vollständigkeit der Rückgabe, gegebenenfalls durch Kommentare ergänzt, wird der Vorgang abgeschlossen und das Gerät wieder zurück in das System gebucht. Im Rahmen der Qualitätssicherung wird es weiter in die Werkstatt gebracht. Dort wird es nach Erhalt ebenfalls gebucht und der Status im System entsprechend aktualisiert. Treten bei der Wartung Defekte am Gerät auf, werden die nötigen Reparaturumfänge im entsprechenden Formular vom Mitarbeiter eingetragen. Nach erfolgreicher Wartung wird das Gerät wieder freigegeben und dessen Status aktualisiert. Zurück im Lager ist das Gerät im System wieder für die Ausgabe verfügbar.



Abb. 11: RFID-Theke zur Unterstützung des Gerätemanagements

Die Vorteile der RFID-Theke liegen zum Einen in der Unterstützung und Vereinfachung der Verwaltung des gesamten Mietgerätebestands. Durch die klare Definition der einzelnen Prozesse können fehlerhafte Buchungen minimiert und die Prozesssicherheit deutlich erhöht werden. Zum Anderen kann für jedes Gerät dessen Verleih-, Wartungs- und Reparaturhistorie hinterlegt werden. Die Folgen sind neben einer gleichmäßigeren Auslastung und Steigerung der Qualität die exakte Identifizierung von Mängelgeräten sowie die Zuordnung der anfallenden Reparaturkosten zu konkreten Projekten. Darüber hinaus wird der Materialfluss des Geräteparks durch die ständige Aktualisierung des Status an den einzelnen Prozessstationen transparent.

Zusammenfassung

Die RFID-gestützte Erfassung von Betriebsmitteln entlang der Wertschöpfungskette bietet auch in der Bauindustrie vor dem Hintergrund des steigenden Outsourcings vielfältige Einsatzszenarien, stellt jedoch völlig neue Anforderungen an die Technologie. Aus diesem Grund fehlen konkrete Anwendungen von RFID insbesondere zur Dokumentation des Materialflusses in der Baulogistik. Hier setzt die Zielsetzung des vorliegenden Forschungsprojekts an. Auf Basis der Klassifizierung der Betriebsmittel im Hinblick auf RFID wurden Einsatzszenarien und Anforderungsprofile erarbeitet. Anhand repräsentativer Betriebsmittel wurden Kennzeichnungslösungen entwickelt und im Industriebetrieb versuchsweise mit Erfolg eingesetzt. Die Definition einer sinnvollen Systemarchitektur stellt die Voraussetzungen für eine durchgängige Betriebsmittelverfolgung umfassend dar. Mit dem mobilen Gate und der RFID-Theke stehen darüber hinaus zwei Konzepte zur Verfügung, die die Funktionalität von Identifikationspunkten für verschiedene Einsatzbereiche und auch über die Bauindustrie hinaus gut aufzeigen. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse in Form eines Leitfadens zusammengefasst, der auch mit der RFID-Technologie weniger vertraute Anwender aus der Bauindustrie dabei unterstützen soll, RFID-Anwendungen vorab zu planen und erfolgreich umzusetzen.

Die Voraussetzung für einen erfolgreichen RFID-Einsatz in der Bauindustrie ist jedoch nicht nur die Bewältigung der mitunter äußerst schwierigen, bauspezifischen Randbedingungen, sondern auch eine einsatzindividuelle, prozessorientierte Betrachtungsweise. Durch RFID können Prozesse lediglich unterstützt, nicht jedoch bestimmt werden, wodurch insbesondere bei der automatisierten Erfassung für eine ausreichende Prozesssicherheit eine klare und eindeutige Prozessdefinition erforderlich ist. In der Bauindustrie wird dieser Punkt historisch bedingt noch nicht konsequent genug umgesetzt. Ein weiteres Problem in der Bauindustrie stellt die schwierige monetäre Erfassung der tatsächlich anfallenden Kosten dar, da eine durchgängige Kostenzuordnung kaum vorhanden ist. Deshalb ist aktuell eine verlässliche quantitative Bestimmung von Kosteneinsparungen durch den Einsatz von RFID nicht gegeben.

Um RFID zukünftig gewinnbringend in der Bauindustrie einsetzen zu können, müssen wirtschaftliche Grundmodelle auf Basis von Standardprozessen entwickelt werden, wie sie in der stationären Industrie zunehmend zu finden sind. Hierauf aufbauend empfiehlt sich eine schrittweise Einführung von RFID in einzelnen abgegrenzten Anwendungen in Form von Pilotprojekten, die einfach wirtschaftlich und technologisch bewertet werden können. Auch stellen RFID-Lösungen Anforderungen an die Datenehaltungsschicht und erfordern klar definierte Schnittstellen und Datenformate, die eine intensive, frühe Zusammenarbeit mit kompetenten Partnern voraussetzen.

Quellenverzeichnis

- [1] Günthner, W. A.; Zimmermann, J.; Eber, W.; Haas, B.; Lügger, M.; Sanladerer, S.; Schorr, M.: Logistik in der Bauwirtschaft – Status quo, Handlungsfelder, Trends und Strategien. Nürnberg 2008. ISBN: 978-3-9811819-8-2.

Das Forschungsprojekt „RFID-Einsatz in der Bauindustrie“, in dessen Rahmen die hier vorgestellten Konzepte entstanden sind, wurde von der Forschungsvereinigung Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Kopplung von FEM und DEM zur Simulation des Durchgangs eines Fördergurtes

Dipl.-Ing. Mathias Dratt, Jun.-Prof. Dr.-Ing. Andre Katterfeld

Otto-von-Guericke Universität Magdeburg

Institut für Logistik und Materialflusstechnik (ILM)

Fachgebiet Schüttgutördertechnik

Abstract: Die Weiterentwicklung von Lastannahmen für die Bauteilberechnung von fördertechnischen Anlagen ist eine Aufgabenstellung, die im Rahmen der neu gegründeten Jun.-Professur „Stetigförderer“ am ILM bearbeitet wird. Die mit Hilfe von Computersimulationen erweiterten Lastannahmen können z.B. auf die Berechnung von Fördergurten angewandt werden.

Ziel des Projekts ist die Erstellung eines FE – Simulationsmodells auf Grundlage experimenteller Daten eines mit Schüttgut belasteten Textilfördergurtes mit Textileinlagen. Dabei liegt das Hauptinteresse in der Abbildung des Gurtdurchhanges und der damit verbundenen Kalibrierung aller dazu notwendigen Eingangsdaten, wobei zunächst von einem statischen Beladungszustand ausgegangen werden soll.

Des Weiteren wird versucht eine quasi Kopplung zwischen dem FE – Programm ANSYS Classic und dem DEM – Programm PFC3D zu ermöglichen. Dabei soll auf Grundlage des mit der FEM erstellten und exportierten Anfangsmodells ein Berechnungsdurchlauf mit Hilfe der DEM durchgeführt werden. Die sich daraus ergebenden Daten werden dann, für eine Strukturanalyse, in das FE – Programm zurückgeführt.

1 Einleitung

Aus der heutigen Sicht ist der Einsatz der Finiten Elemente Methode (FEM) als Simulationswerkzeug, gerade im Bereich der strukturmechanischen Untersuchungen bei der Auslegung und Konstruktion von Förderern nicht mehr wegzudenken.

Ein Weiteres noch relativ neues numerisches Verfahren, welches den Einzug als Simulationswerkzeug in die Schüttgutördertechnik gefunden hat, ist die Diskrete Elemente Methode (DEM). Mit Hilfe dieses Verfahrens kann die Interaktion zwischen dem granularen Medium, also dem Schüttgut selbst, und angrenzenden primären und sekundären Bauteilen eines Förderers untersucht werden. So ist es z.B. möglich den Schüttgutstrom auf Grundlage der vorgegebenen Geometrie eines Förderers zu simulieren und gegebenenfalls notwendige Optimierungsmaßnahmen, die sich z.B. infolge eines Gutstaus als Konstruktionsfehler äußern, durchzuführen.

Der Nachteil der FEM im Bereich der Schüttgutfördertechnik liegt darin, dass die Interaktion zwischen Schüttgut und angrenzenden Bauteilen des Förderers nur empirisch betrachtet werden kann. Der Grund dafür liegt in der Komplexität der inneren und äußeren Spannungszustände des Schüttgutes. Anders als für Festkörper und Flüssigkeiten ist das Fließverhalten dieses Mediums vom Spannungszustand abhängig. Dieses Verhalten lässt sich mit kontinuumsmechanischen Methoden nur näherungsweise beschreiben. Die DEM hat den Vorteil diese Zustände des Schüttgutes simulationstechnisch realitätsnah dazustellen. Der Nachteil aber besteht darin, Spannungen und Verformungen interagierender Bauteile des Förderers, infolge der Belastung mit Schüttgut, nicht abbilden zu können.

Als primäres Bauteil ist der Fördergurt eines Gurtförderers i.d.R. eines der investitionsintensivsten Bauteile. Diese Tatsache lässt es als zweckmäßig erscheinen, eine möglichst lange Lebensdauer des Gurtes zu gewährleisten. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Untersuchung der Interaktion des Gurtes mit anderen mechanischen Bauteilen des Förderers (z. B. den Tragrollen) und speziell die Interaktion mit dem Schüttgut von großer Bedeutung. In Bezug auf den schon angesprochenen Nachteil der DEM besteht das Problem in der momentan noch verwendeten vereinfachten Darstellung eines mit Schüttgut beladenen Fördergurtes, da dieser simulationstechnisch lediglich als starre Wand implementiert werden kann. Gerade aber die Analyse der Gurtbelastung infolge der Gurtverformung, d.h. infolge des Durchhangs sowie des „Öffnen“ und „Schließens“ des Gurtes zwischen zwei Tragrollenstationen könnte zu einer Optimierung der Gurteigenschaften bzw. der Muldungsgeometrie beitragen. Gelingt es die Gurtverformung infolge des Guteinflusses im stationären Zustand der Förderung zu beschreiben, erscheint die Analyse der Gurtverformung (und -schädigung) im Aufprallbereich einer Gutübergabestelle ebenfalls möglich. Da ca. 80% der Gurt-schäden aus dem Gurtaufprall im Aufgabebereich resultieren, wird der Simulation dieses Problems in aktuellen Forschungsarbeiten besondere Bedeutung beigemessen [1,2].

2 Vorbetrachtungen

Als Vergleich bzw. zur Kalibrierung des zu erstellenden Gurtsimulationsmodells dienen im Vorhinein experimentell bestimmte Gurtverformungsverläufe, die an einem eigens dafür zur Verfügung stehenden Versuchstand in Abhängigkeit vom Tragrollenabstand, der Gurtvorspannkraft und der Beladung des Gurtes mit Schüttgut gemessen wurden.

Hierbei handelt es sich um die Nachbildung eines Gurtfördererabschnittes, der durch zwei fest eingespannte vereinfacht angenommene Tragrollenstationen und einer beweglich angeordneten Tragrollenstation begrenzt ist. Die für die Gurtdurchgangsermittlung verwendete Messeinrichtung besteht aus einer verschiebbaren Messlatte auf

der induktive Wegaufnehmer angebracht sind, die die Verschiebung des belasteten Gurtes relativ zur vorgegebenen Tragrollengeometrie messen.



Abbildung 1: Versuchstand (beladen) mit quasi eingespanntem Gurtende

3 Verifikation des FE – Modells

In der Modellierungsphase sind, in Anlehnung an den Versuchstand, nicht nur dessen geometrische Vorgaben, sondern auch Last- und Randbedingungen des zu berechnenden Systems umzusetzen und das Materialverhalten des Gurtes zu bestimmen. Grundsätzlich wird versucht das Modell so nah wie möglich den am Versuchstand vorliegenden Bedingungen anzupassen.

Für die Beschreibung des Gurtmaterials in der FE-Simulation kann in Anlehnung an [3] ein orthotropes Materialverhalten im zweiachsigen bzw. ebenen Spannungszustand verwendet werden, da die Dicke des Fördergurtes im Verhältnis zu seiner Längen- und Breitendimension verschwindend gering ist. Die dazu notwendigen Parameter wurden experimentell bestimmt.

Bei der Vernetzung der Gurtgeometrie werden Schalenelemente genutzt. Hierbei handelt es sich um 2,5D Elemente, die sowohl Lasten senkrecht zur Ebene als auch in der Ebene aufnehmen können und im Allgemeinen für dünnwandige Bauteile verwendet werden. Diese Elementart vereint die Eigenschaften der Platten- sowie Scheibentheorie und besitzt in Bezug auf die Schalenebene sowohl Längs- als auch Biegetragfähigkeit. Wird ein Schalenelement auf seine Längstragfähigkeit reduziert, ergibt sich ein Scheibenelement und wenn nur die Biegetragfähigkeit aktiviert wird, liegt ein Plattenelement vor [4]. Diese grundlegenden Eigenschaften sind besonders für die Realisierung der Lastbedingungen notwendig, da bei der Simulation des belasteten Gurtes Lasten sowohl normal als auch tangential zur Gurtfläche auftreten. Die Normallasten resultieren aus dem Eigengewicht des Gurtes sowie aus dem Schüttgut selbst, wobei Tangentiallasten die in der Gurt- bzw. Elementebene auftreten sich u.a. aus der Gurtvorspannung und ebenfalls aus dem Schüttgutgewicht ableiten.

Um die Randbedingungen und die globale Verformung des Gurtes so realitätsnah wie möglich darstellen zu können, geht das Simulationsmodell von einem flachen aufliegenden Gurt aus, dessen Enden durch definierte Knotenverschiebungen in z-Richtung beaufschlagt werden. Die Werte dieser einzelnen Verschiebungen orientieren sich hierbei an der vorgegebenen Geometrie der gedachten Tragrollenanordnung des genutzten Versuchstands.

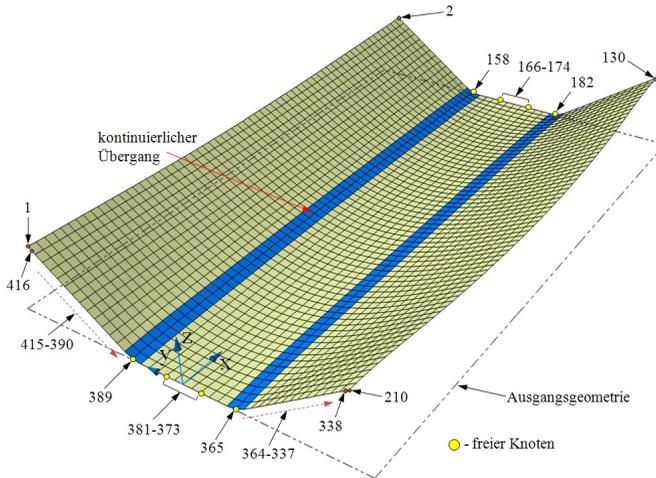


Abbildung 2: Vorverformungsprozess des Fördergurtes durch definierte Knotenverschiebungen

Nach dem Vorverformungsprozess werden, in Anlehnung an den Versuchstand, alle Freiheitsgrade, der sich an den Gurtenden befindlichen Knoten, behindert bzw. einseitig in x-Richtung mit einer vorgegebenen Knotenverschiebung zur Simulation der Gurtvorspannung belegt.

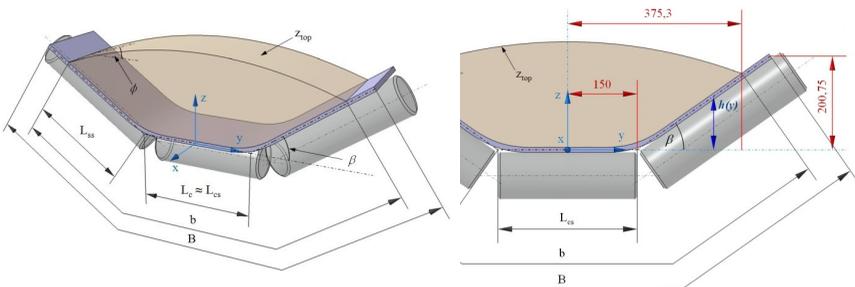


Abbildung 3: Tragrollenstation mit Gutquerschnitt und geometrischen Randbedingungen

Die Lastbedingungen ergeben sich u.a. aus der Höhenverteilung des Schüttgutes nach dem Beladungsprozess. Nach [3,5] kann dieser Höhenverlauf mit folgender Funktion beschrieben werden:

$$z_{top}(y) = L_{SS} \sin \beta + \frac{(L_C + 2L_{SS} \cos \beta) \tan \varphi}{4} - \frac{y^2 \tan \varphi}{L_C + 2L_{SS} \cos \beta}. \quad (3.1)$$

Bezogen auf die vorgegebene Geometrie der Tragrollenstation können vereinfacht zwei Lastbereiche eingeteilt werden. Für den Kontaktbereich der mittleren Tragrolle ergibt sich unter Verwendung von (3.1) nachfolgende Lastfunktion, die auf alle finiten Elemente in diesem Bereich wirkt:

$$p_{z1}(y) = \rho_{Gut} \cdot g \cdot z_{top}(y). \quad (3.2)$$

Für die Lastfunktion in den Kontaktbereichen der seitlichen Tragrollen wird eine weitere Höhenfunktion eingeführt, die die Muldung des Gurtes berücksichtigt.

$$p_{z2}(y) = \rho_{Gut} \cdot g \cdot [z_{top}(y) - h(y)] \text{ mit } h(y) = \tan \beta \cdot \left(y - \frac{L_{CS}}{2} \right) \quad (3.3)$$

Die eigentliche Umsetzung der Lastbedingungen erfolgt über die Ansteuerung jedes einzelnen finiten Elements in Form einer Lastdatei im Text – Format. Da sich die Lasteinleitungsmöglichkeiten der finiten Elemente auf deren Elementkoordinatensystem beschränken, wird mit Hilfe spezieller Surface-Elemente die notwendige Lasteinleitungsrichtung in globaler z-Richtung angepasst.

Die Ergebnisse dieser Simulation dienen zum Vergleich mit dem experimentell ermittelten Gurtverformungsverlauf und den nachfolgenden Simulationen auf Basis einer FEM-DEM Kopplung.

4 Kopplungsvoraussetzung

Die Grundvoraussetzung für die DEM – Simulation beinhaltet den Import der verformten Gurtgeometrie als Wandmodell im STL – Format. Dabei ist es notwendig die Punkt- und Flächenidentifizierung bzw. -nummerierung ausgehend vom FE – Modell zu erhalten. Das bedeutet, dass ein Export der vorverformten, unter Eigenlast stehenden und vorgespannten Gurtgeometrie aus einer FEM - Simulation realisiert werden muss. Hierfür wird das vorher erstellte FE – Modell im unbeladenen Zustand verwendet.

Nach der Berechnung der Gurtvorverformung, -eigenlast und -vorspannung kann über ein speziell erstelltes Makro eine Ableitung der Einzelelementflächen im IGES – Format ausgegeben werden. Hierfür werden die einzelnen Elementflächen jeweils in zwei Dreieckflächen zerlegt, dessen Dimensionen auch nach der Triangulierung, also der Umwandlung vom IGES ins STL – Format, erhalten bleiben.

Um die gleiche Punkt- und Flächenidentifizierung bzw. -nummerierung des Gurtflächenmodells zu gewährleisten, ist eine festgelegte Abfolge bei der IGES - Flächenableitung einzuhalten. Dieser Vorgang garantiert die eindeutige geometrische Korrespondenz zwischen den abgeleiteten Dreiecksflächenpaarungen und den dazugehörigen finiten Elementen.

5 Kopplung

Die Interaktion zwischen den Partikeln (diskrete Elemente) untereinander oder mit abschließenden Wandungen in einer DEM – Simulation wird mit Hilfe mathematischer Kontaktmodelle beschrieben. Da die diskreten Elemente in ihrer Definition als starr angenommen werden, dient die Überlappung zweier kugelförmiger Partikel in einem Kontakt als Maß für die Deformation, wobei dessen mathematische Umsetzung mit dem Hertz – Mindlin Theorem erfolgt. Hierbei wird die Kontaktkraftkomponente in Normalenrichtung zwischen zwei Elementen bzw. einer Wand mit den Hertz'schen Beziehungen und die Scherkräfte, also die Kontaktkraftkomponente in Tangentialrichtung, nach dem Mindlin Theorem errechnet.

Grundsätzlich handelt es sich bei den in einer DEM – Simulation (PFC3D) entstehenden Kräften, um vektorielle Größen, die sich nach [6] in die schon erwähnten Normal- und Tangential- bzw. Scherkraftkomponenten aufteilen lassen.

$$\vec{F}_i = \vec{F}_i^n + \vec{F}_i^t \quad (5.1)$$

Die eigentliche Kopplung zwischen FEM und DEM beruht auf der einfachen Umsetzung der entstehenden Kontaktkräfte, auf die jeweilig korrespondierenden Elementflächen bzw. -kanten. Betrachtet man hierzu ein ruhend liegendes Partikel auf einer starren Ebene und einen vom Volumen und seiner Dichte ausgehend äquivalenten Quader, erzeugen beide Körper dieselbe Gewicht- bzw. Kontaktkraft. Der Unterschied beider Systeme liegt also nicht in der resultierenden Kraft sondern in der Kontaktfläche bzw. dem dazugehörigen Kontaktdruck.

Für die DEM – Simulation wird, wie eingangs beschrieben, das aus der vorhergehenden FEM – Simulation abgeleitete unter Vorverformung, Gurteigenlast und Vorspannung stehende STL – Flächenmodell genutzt. Die eigentliche DEM – Simulation erfolgt mit den gleichen Parametern, wie vorher die FEM – Simulation auf Grundlage analytischer Lastannahmen. D.h. es wird eine Partikelansammlung generiert, die den

selben Höhenverlauf nach (3.1) beschreibt (siehe Abbildung 4) und materialtechnisch dieselbe Schüttgutedichte aufweist.

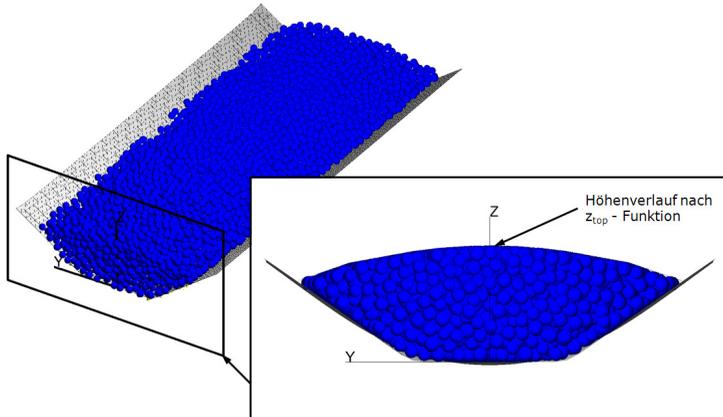


Abbildung 4: DEM – Partikelmodell mit definiertem Schüttguthöhenverlauf

Die sich aus einer DEM – Simulation ergebenden Kontaktkraftvektoren werden mittels Vektorrechnung in Normal- und Tangentialkraftkomponenten zerlegt und deren Beträge auf die jeweiligen Flächen bzw. Kanten bezogen (siehe Abbildung 6). Diese notwendige Vorgehensweise ergibt sich aus den vorgegebenen Lasteinleitungsvorgaben der verwendeten finiten Schalenelemente.

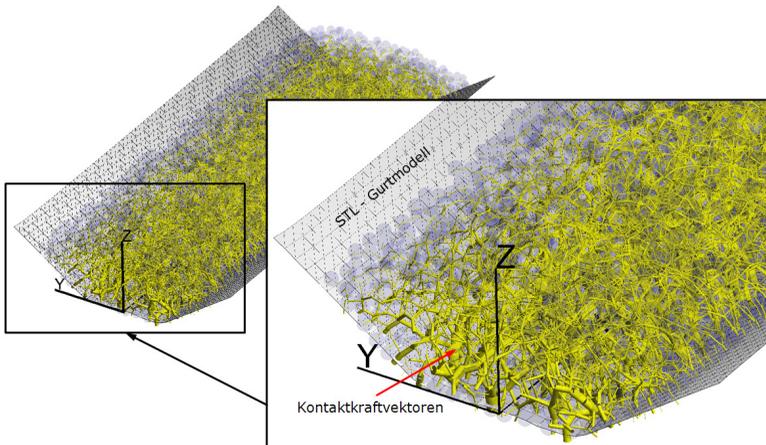


Abbildung 5: DEM – Simulationsmodell mit angezeigten Kontaktkraftvektoren

Dieser Vorgang wird für alle vorhandenen Dreiecksflächenpaarungen automatisiert und in eine Lastdatei im Text – Format geschrieben. Die neuen Lastbedingungen werden als nächstes in die FEM – Simulation zurückgeführt und dabei automatisch den korrespondierenden finiten Elementen zugewiesen.

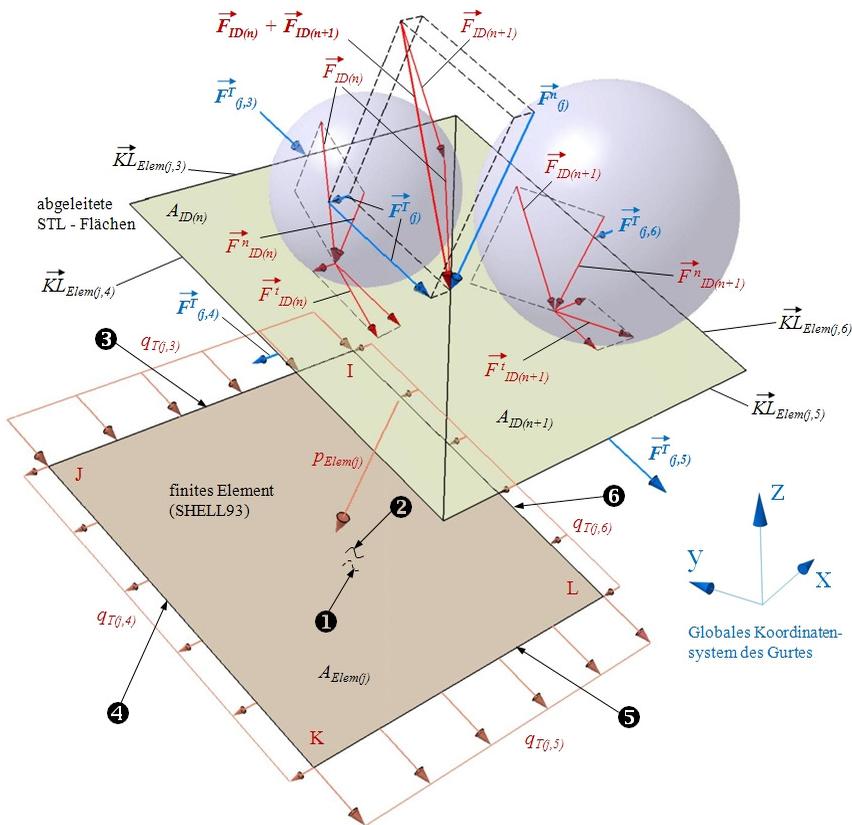


Abbildung 6: FEM – DEM – Kopplung

6 Erste Ergebnisse

Die folgenden Ergebnisse basieren auf einem 1,6m langen, 1m breiten und 11 mm dicken Textilfördergurt, der mit einer Kraft von 16kN vorgespannt ist. Der maximale Durchhang des FE – Simulationsmodells mit rein analytischen Lastannahmen ergibt im Vergleich zum experimentell ermittelten Durchhang einen prozentualen Fehler von ca. 23% (siehe Abbildung 7). Das Ergebnis auf Basis der hier vorgestellten FEM –

DEM Kopplung verringert den auftretenden Fehler zum experimentell ermittelten Durchhang auf nur noch ca. 4% (siehe Abbildung 8).

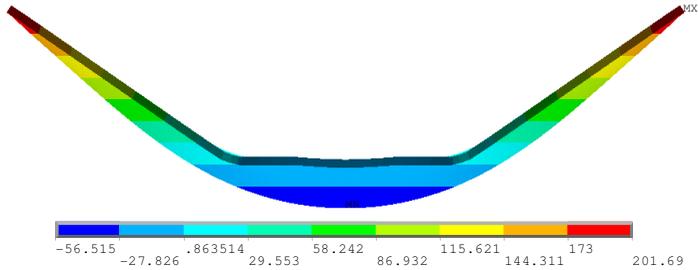


Abbildung 7: Gurtverformungsverlauf aus FE – Analyse mit rein analytischer Lastannahme

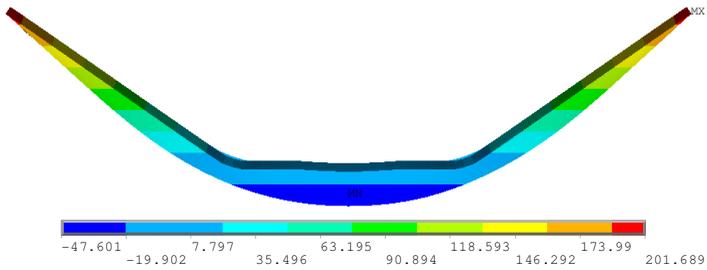


Abbildung 8: Gurtverformungsverlauf aus FEM – DEM Kopplung

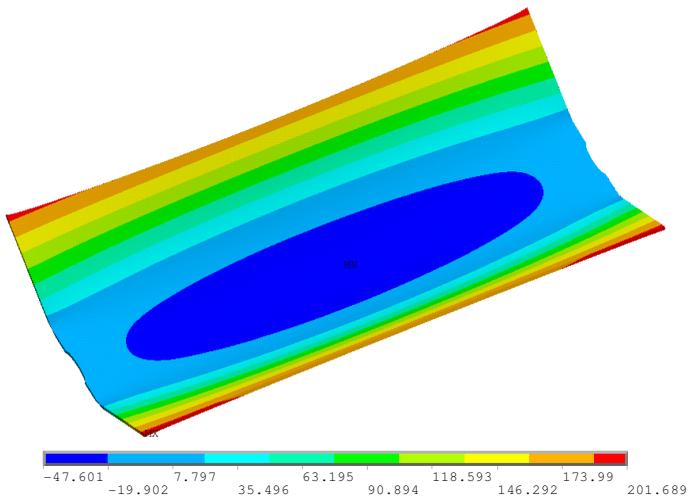


Abbildung 9: globaler Gurtverformungsverlauf (FEM – DEM Kopplung)

Die folgenden Diagramme zeigen ergänzend die Ergebnisse des Gurtverformungsverlaufes aller Simulationen im Vergleich zu den experimentell ermittelten Werten im Querschnitt bei einer x-Position von 750mm und im Längsschnitt bei einer y-Position von 0mm (Symmetrieschnitt).

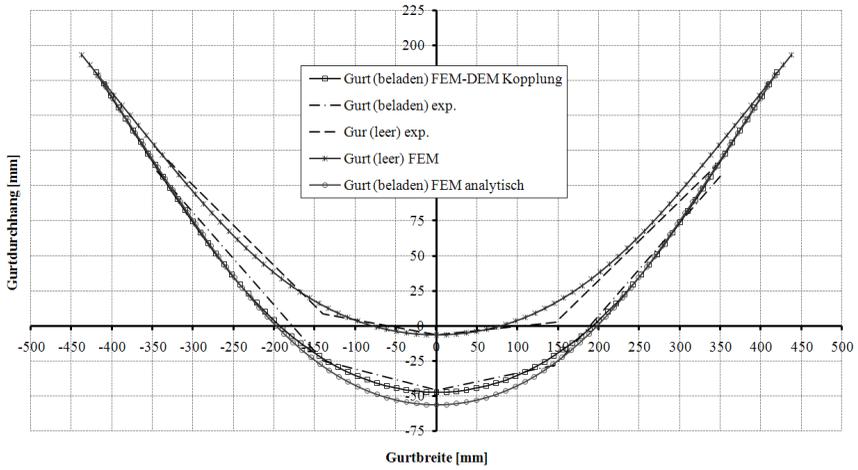


Abbildung 10: Gurtverformungsverlauf im Querschnitt bei $y = 750\text{mm}$

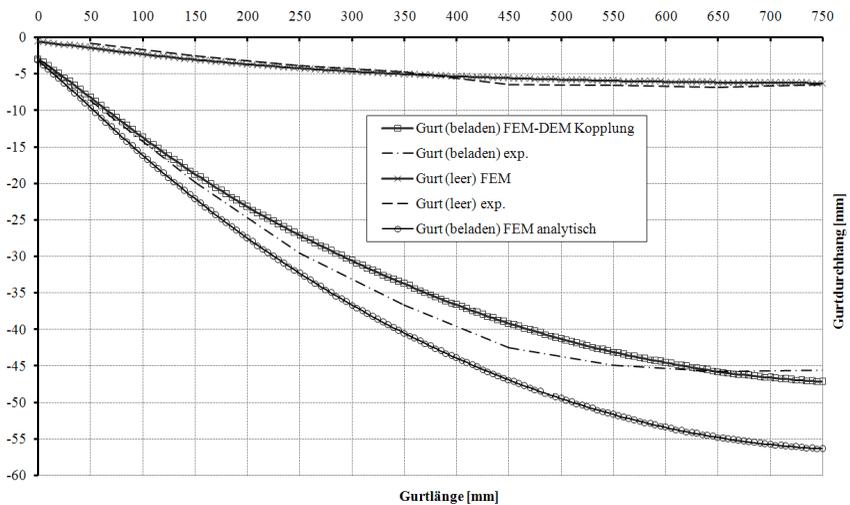


Abbildung 11: Gurtverformungsverlauf im Längsschnitt bei $x = 0\text{mm}$

7 Ausblick

Die Ergebnisse zeigen das Potential einer Kopplung zwischen der Finite Elemente Methode und der Diskrete Elemente Methode. Gerade die Abbildung der komplexen inneren und äußeren Zustände des Schüttgutes lassen sich mit den rein analytischen Lastannahmen nur vereinfacht darstellen. Die DEM kann diese Zustände wesentlich realitätsnäher abbilden und bietet somit in Verbindung mit der FEM einen Ansatz die primären Bauteile eines Gurtförderers (unter Belastung mit Schüttgut) strukturmechanisch wesentlich genauer zu analysieren.

Die Analyse der weitaus wichtigeren dynamischen Zustände eines Gurtförderers könnte in Hinsicht auf die Verifikation des Simulationsmodells im stationären Zustand über zeitabhängige Iterationen erfolgen, und wird zukünftig Hauptbestandteil weiterführender Untersuchungen sein.

8 Literatur

- [1] Katterfeld, A.: Verifizierung von Computersimulationen auf Basis der diskreten Elemente Methode zur Optimierung von Gurtförderanlagen, Newcastle, Australien, 2006
- [2] Pajer, G.; Kuhnt, H.; Kurth, F.: Stetigförderer 5.Auflage, Verlag Technik Berlin, 1988
- [3] Wheeler, C.: Analysis of the main resistances of belt conveyors, Newcastle, Australia, University of Newcastle, 2003
- [4] Groth, C.; Müller, G.: FEM für Praktiker, 8. Auflage, Renningen, Expert Verlag, 2007
- [5] DIN 22101 Teil 1 und 2 – Gurtförderer für Schüttgüter – Grundlagen für die Berechnung und Auslegung, Aug. 2002
- [6] Itasca: PFC3D Theory and Background, Minneapolis, Minnesota USA, Itasca Consulting Group, Inc., 2003

Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren mit dem Kennzahlensystem des „Distribution Center Reference Model“ (DCRM)

Dipl.-Wi.-Ing. Melanie Schwab, Dipl.-Wi.-Ing. Judith Weiblen, Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Universität Karlsruhe (TH)

Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme

Abstract: Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren ist ein geeignetes Kennzahlensystem nötig. Zu diesem Zweck wurde das DCRM-Kennzahlensystem entwickelt. Es ist auf die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren ausgerichtet. Es enthält Kennzahlen zur Messung der Effizienz sowie Strukturkennzahlen zur Erfassung der gestellten Anforderungen. Für die Top-Ebene und die definierten Prozesse Wareneingang, Lagern und Kommissionieren, Konsolidieren und Verpacken, Warenausgang, Added Value und Overhead wird die Struktur des Kennzahlensystems übernommen und mit Kennzahlen gefüllt, die auf die jeweilige Betrachtungsebene zugeschnitten sind. Der Warehouse-Excellence-Index (WEI) dient zur aggregierten Bewertung. Er liefert einen schnellen Überblick über die eigene Leistung im Vergleich mit der Leistung Anderer und gibt Aufschlüsse über die Strategie des Distributionszentrums. Der Beitrag erläutert den Aufbau des Kennzahlensystems, die Funktionsweise des WEI und Erkenntnisse für den Prozess Lagern und Kommissionieren.

1 Einleitung

Effiziente und leistungsfähige Logistikstrukturen stellen einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor für Unternehmen dar. Insbesondere Distributionszentren als Knotenpunkte in Logistiknetzen haben darauf einen entscheidenden Einfluss. Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren ist eine strukturierte und standardisierte Vorgehensweise nötig, die geeignete Kennzahlen zur Bewertung des Distributionszentrums erfasst und die eigene Leistung zur Leistung Anderer in Relation setzt [1]. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der Warehouse Excellence Studie am Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme der Universität Karlsruhe (TH) das Distribution Center Reference Model (DCRM) entwickelt. Zu diesem Referenzmodell gehört ein Kennzahlensystem, das die Basis für die Datenerhebung sowie die Analyse und Bewertung des Distributionszentrums darstellt. Ein geeignetes Kennzahlensystem ist für die Ableitung von aussagekräftigen Ergebnissen und Handlungsempfehlungen nötig [2] [3]. Ein Kennzahlensystem besteht aus einer Kombination von Einzelkennzahlen, die in einem sachlichen Zusammenhang zueinander stehen und auf ein Gesamtziel

ausgerichtet sind [3]. Zum besseren Verständnis des DCRM-Kennzahlensystems soll hier zunächst das zugrunde liegende Referenzmodell DCRM erläutert werden.

2 Aufbau des Distribution Center Reference Model

Das DCRM stellt nicht die technischen Einrichtungen in den Mittelpunkt, sondern die im Distributionszentrum ausgeführten Aufgaben. Es besitzt hierzu einen modularen hierarchischen Aufbau, der untergliedert ist in eine Top-, Prozess-, Aufgaben- und Ausführungs-Ebene (siehe Abbildung 1) [4] [5] [6]. Das DCRM stellt mit seinem Aufbau ein Baukastensystem zur Strukturierung individueller Distributionszentren bereit. Auf jeder Ebene werden die Informationen mit unterschiedlichem Aggregationsgrad bereitgestellt, so dass die Strukturierung des Distributionszentrums den Anforderungen unterschiedlicher Benutzergruppen gerecht wird (Topmanagement, Projektmanager, Bereichsverantwortliche, Planungsspezialisten).

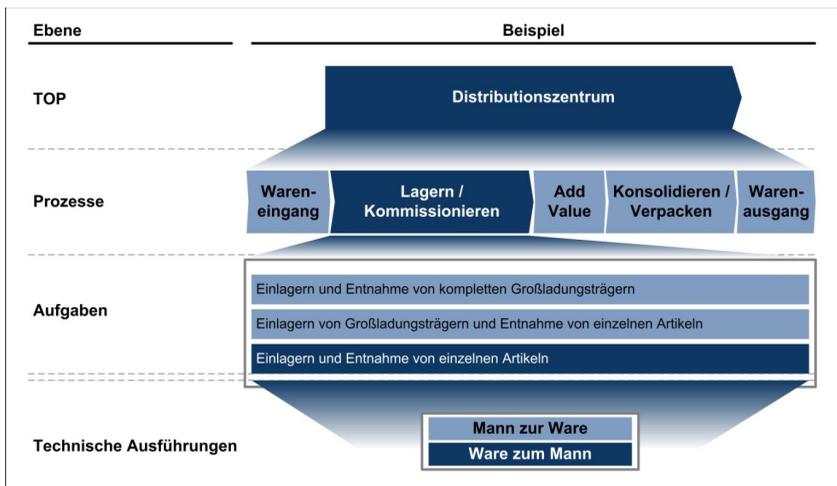


Abbildung 1: Aufbau des Distribution Center Reference Model

Die oberste Top-Ebene liefert einen aggregierten Gesamtüberblick über das Distributionszentrum. Diese Ebene liefert wichtige Erkenntnisse über die Ausrichtung des kompletten Distributionszentrums, die vorhandenen Strukturen sowie die eingesetzten Ressourcen und die erzielte Leistung.

Auf der Prozessebene werden die Abläufe in die definierten Materialflussprozesse Wareneingang, Lagern und Kommissionieren, Konsolidieren und Verpacken, Warenausgang und Added Value strukturiert. Zusätzlich werden mit dem Prozess Overhead die Verwaltungstätigkeiten abgebildet, die in keinem direkten Zusammenhang zum

Materialfluss stehen. Auf dieser Ebene erlaubt das Distribution Center Reference Model eine isolierte Bewertung einzelner Prozesse.

In der dritten Ebene, dem Herzstück des Distribution Center Reference Models, werden die Prozesse mit Hilfe des Baukastensystems weiter in Aufgaben untergliedert. Die Aufgaben fassen bestimmte Prozessausprägungen (z.B. Einlagern, Bereitstellen, Entnehmen) zusammen, die notwendig sind, um ausgehend von bestimmten externen Anforderungen (z.B. Sortimentsanforderungen, einlager- und entnahmespezifische Anforderungen) zu einem definierten Ergebnis (Bereitstellung für den nachfolgenden Prozess) zu gelangen. Bei ähnlichen Strukturen ist damit die technikenabhängige Vergleichbarkeit zweier Aufgaben aufgrund der gleichen Aufgabenstellung sichergestellt. Es lässt sich auf der Aufgabenebene auch eine Aussage über die Eignung von technischen Realisierungen machen, da aus dem Datenpool „Best Practices“ abgeleitet werden können. Diese geben einen Hinweis auf anforderungsrechte technische Lösungen.

Auf der Ebene der technischen Ausführungen werden die Aufgaben mit Hilfe mathematischer Modelle einem "virtuellen Vergleichspartner" gegenübergestellt. Für jede Aufgabe existieren mehrere mathematische Modelle, die jeweils eine mögliche technische Ausführung repräsentieren. Sie bilden idealisierte Zustände ab und repräsentieren ein "theoretisches Best Practice".

3 Struktur des DCRM-Kennzahlensystems

Das DCRM-Kennzahlensystem ist speziell auf die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren ausgerichtet und in seiner Struktur an die VDI-Richtlinie 4400 Blatt 3 angelehnt [7]. Das Zielsystem verfolgt die Messung der Effizienz des Distributionszentrums. Die Effizienz wird herunter gebrochen auf die verursachten Kosten, die erzielte Leistung und die erreichte Qualität. Zu ihrer Beurteilung werden Kennzahlen erhoben, deren Ausprägung das Distributionszentrum maßgeblich beeinflussen kann und die damit Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit des Distributionszentrums ermöglichen. Zusätzlich werden Strukturkennzahlen erhoben, welche die Anforderungen, die an ein Distributionszentrum gestellt werden, widerspiegeln und auf die das Distributionszentrum daher nur geringen oder keinen Einfluss hat.

Im Bereich der Kosten-, Leistungs- und Qualitätskennzahlen sind Spitzenkennzahlen definiert, die für die Leistung des Distributionszentrums von besonderer Bedeutung sind. Diese dienen zur aggregierten Bewertung der Leistungsfähigkeit des Distributionszentrums mit Hilfe des Warehouse Excellence Index (WEI). Dieser ist eine Maßzahl zur Bewertung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Spitzenkennzahlen. Basierend auf den Rängen für die Spitzenkennzahlen wird eine Normierung auf das Intervall $[0;1]$ durchgeführt. Der beste Wert (Rang 1) erhält dabei den Wert 1 und der schlechteste Wert den Wert 0. Die übrigen Ränge werden linear auf das Intervall $[0,1]$

verteilt. Der WEI bezüglich der einzelnen Spitzenkennzahlen zeigt die Ausrichtung des Distributionszentrums und seine Leistungsfähigkeit hinsichtlich der einzelnen Kriterien auf. Zusätzlich liefert der Gesamt-WEI als Mittelwert der einzelnen Werte eine Maßzahl für die Leistungsfähigkeit des Distributionszentrums. Die grafische Darstellung des WIE ermöglicht eine gute Übersicht über die eigene Leistungsfähigkeit sowie einen schnellen Vergleich mit anderen (siehe Abbildung 2).

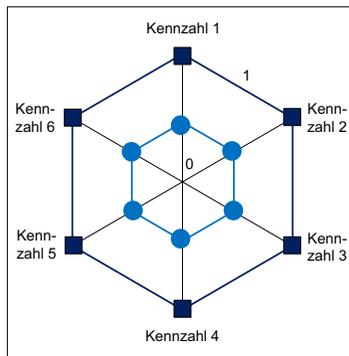


Abbildung 2: Grafische Darstellung des Warehouse Excellence Index für einen Teilnehmer mit mittlerem Rang und einem Teilnehmer mit dem ersten Rang für alle Kennzahlen

4 Spezialisierung des Kennzahlensystems

Die Struktur des DCRM-Kennzahlensystems ist auf der Top-, der Prozess- und der Aufgabenebene identisch. Es wurde jedoch jeweils ein angepasstes System für die Top-Ebene sowie die definierten Prozesse Wareneingang, Lagern und Kommissionieren, Konsolidieren und Verpacken, Warenausgang, Added Value und Overhead definiert. Innerhalb der einzelnen Systeme werden unterschiedliche Kennzahlen benutzt, die speziell auf die Top-Ebene bzw. den jeweils betrachteten Prozess zugeschnitten sind.

Der Datenpool zeigt dabei, dass der Prozess Lagern und Kommissionieren innerhalb der Distributionszentren im Mittel die höchste Bedeutung hat (siehe Abbildung 3). Daher soll das hier das Kennzahlensystem für den Prozess Lagern und Kommissionieren näher erläutert werden und Ergebnisse aus der Anwendung des Kennzahlensystems aufgezeigt werden.

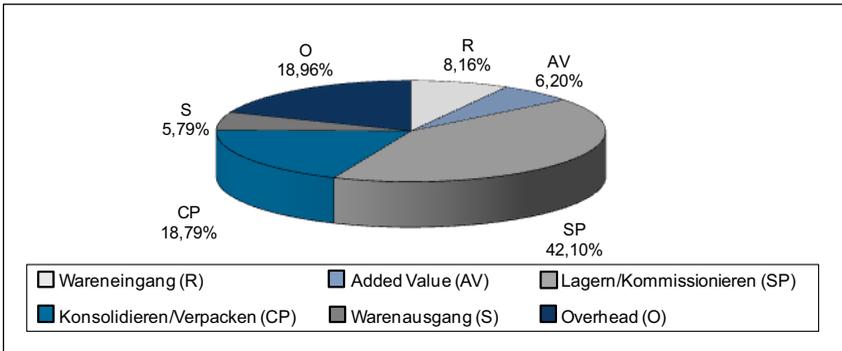


Abbildung 3: Verteilung der Gesamtkosten im Datenpool auf die Prozesse

5 Anwendung auf den Prozess Lagern und Kommissionieren

Als wichtigste Treiber für die Menge, die Fläche und die Investition sind im Prozess Lagern und Kommissionieren die tägliche Anzahl an Kommissionierpositionen, die Anzahl der gelagerten Ladeeinheiten und die Anzahl der Lagerplätze definiert. Die eingesetzten Kennzahlen sind speziell auf die Tätigkeiten und Anforderungen des Prozesses Lagern und Kommissionieren ausgerichtet, während die Struktur des Kennzahlensystems der beschriebenen Struktur für alle Prozesse entspricht. Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus dem entsprechenden Kennzahlensystem.

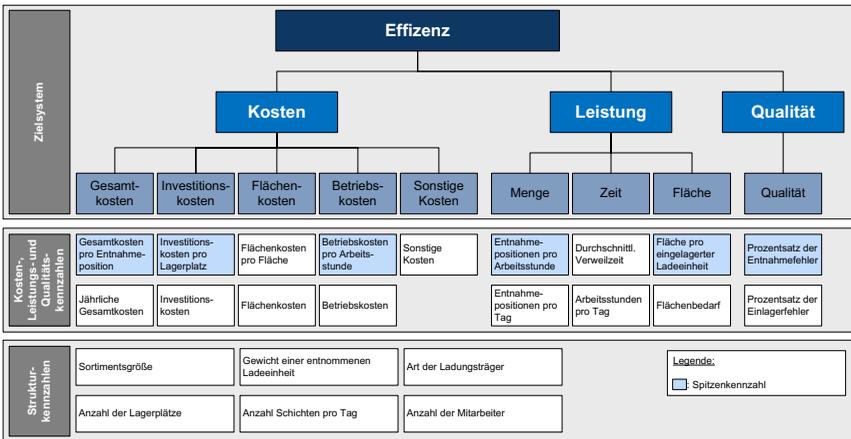


Abbildung 4: Ausschnitt aus dem Kennzahlensystem für den Prozess Lagern und Kommissionieren

Im Kennzahlensystem für den Prozess Lagern und Kommissionieren sind die folgenden Spitzenkennzahlen definiert für die der Warehouse Excellence Index (WEI) berechnet wird:

- Gesamtkosten pro Entnahmeposition [€/Entnahmeposition]
- Investitionskosten pro Lagerplatz [€/Lagerplatz]
- Betriebskosten pro Arbeitsstunde [€/h]
- Entnahmepositionen pro Arbeitsstunde [Entnahmepositionen/h]
- Fläche pro eingelagerter Ladeinheit [m²/Ladeinheit]
- Prozentsatz der Entnahmefehler

Der WEI ermöglicht Rückschlüsse auf die Leistungsfähigkeit sowie über die Ausrichtung des Prozesses. Abbildung 5 zeigt die Einzel- sowie den Gesamt-WEI für den Prozess Lagern und Kommissionieren zweier Distributionszentren des Datenpools.

| Warehouse Excellence Index (Normierung auf [0,1]) | | DZ 1 | DZ 2 |
|---|--------------------------------------|-------------|-------------|
| A_CTOP | Gesamtkosten pro Entnahmeposition | 1,00 | 0,67 |
| A_CIRC | Investitionskosten pro Lagerplatz | 0,00 | 0,89 |
| A_COTP | Betriebskosten pro Arbeitsstunde | 0,89 | 1,00 |
| A_OLTP | Entnahmepositionen pro Arbeitsstunde | 1,00 | 0,44 |
| A_SPUT | Fläche pro eingelagerter Ladeinheit | 0,00 | 0,89 |
| S_QOSP | Prozentsatz der Entnahmefehler | 1,00 | k.A. |
| Gesamt-WEI | | 0,65 | 0,78 |

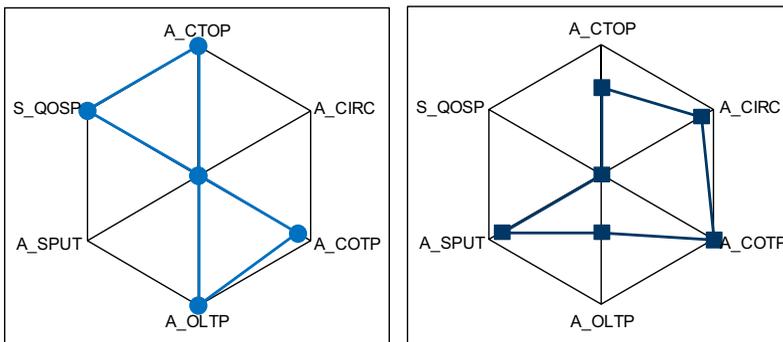


Abbildung 5: Einzel- und Gesamt-WEI für den Prozess Lagern und Kommissionieren für Distributionszentrum 1 (DZ1) und Distributionszentrum 2 (DZ 2)

Bei Distributionszentrum 1 (DZ 1) handelt es sich um den Best-Practice für den Prozess Lagern und Kommissionieren für die Anforderungen einer mittleren Sortimentsgröße und eines hohen Durchsatzes im Datenpool. DZ 1 hat hierfür ein System mit hohem Investitions- und Flächenbedarf gewählt. Dies zeigt sich am geringen WEI und der damit verbundenen hinteren Platzierung im Datenpool. Diese hohe Investition erfolgte mit dem Ziel einer hohen Entnahmeleistung, die nötig ist, um den hohen Durchsatz kostengünstig zu erreichen. Die hohe Entnahmeleistung pro Mitarbeiter-

stunde und die hohe Kommissionierqualität zeigen sich anhand des sehr hohen WEI für diese Kennzahlen. Insgesamt erreicht DZ 1 so eine sehr gute Position in Bezug auf die Gesamtkosten pro Entnahmeposition.

Distributionszentrum 2 (DZ 2) sieht sich den Anforderungen eines sehr großen Sortiments und eines mittleren Durchsatzes gegenübergestellt und ist für diese Anforderungen der Best Practice des Datenpools. Hierfür wurde ein flexibles manuelles System gewählt, das einen geringen Investitionsbedarf aufweist. Weiterhin wurde zur Lagerung des großen Sortiments mit eher geringer Lagerumschlagsrate eine Lagerform mit geringem Flächenbedarf gewählt. Dies zeigt sich am hohen WEI für diese Kennzahlen. Mit diesem System erreicht DZ eine mittlere Entnahmeleistung pro Mitarbeiterstunde insgesamt geringe Gesamtkosten pro Entnahmeposition.

Es zeigt sich also, dass sich die Strategie der Distributionszentren mit dem WEI nachvollziehen lässt, ohne Kenntnisse über das System zu haben. Weiterhin ist eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit mit dem WEI möglich.

6 Fazit und Ausblick

Die Struktur des DCRM-Kennzahlensystems ist auf die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren zugeschnitten. Neben Kennzahlen zur Messung der Effizienz enthält es auch Strukturkennzahlen zur Erfassung der gestellten Anforderungen an die Distributionszentren. Zur Berücksichtigung der Besonderheiten der Top-Ebene und der Prozesse wird die Struktur des Kennzahlensystems übernommen und mit Kennzahlen gefüllt, die speziell auf die Top-Ebene oder den jeweiligen Prozess zugeschnitten sind. Zur aggregierten Bewertung der Leistungsfähigkeit dient der Warehouse-Excellence-Index (WEI), der einen schnellen Überblick über die eigene Leistung im Vergleich mit der Leistung Anderer gibt. Zukünftig muss das Kennzahlensystem mit dem WEI weiter auf seine Eignung zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Distributionszentren auf der beschriebenen Top-, Prozess- und Aufgabenebene hin untersucht werden.

Literatur

- [1] Camp, R. C.: Benchmarking. Carl-Hanser-Verlag, München, Wien, 1994
- [2] Luczak, H; Weber, J; Wiendahl, H.(Hrsg.): Logistik-Benchmarking, 2. Überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2003
- [3] VDI-Richtlinie 4490, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2007
- [4] Furmans, K.; Lippolt, C. R.; Wisser, J.: Was leisten (neue) Technologien in der Intralogistik wirklich? Fördern und Heben (f+h), Vereinigte Fachverlage, Report 2006/2007, S. 7-9
- [5] Furmans, K.; Lippolt, C.R.; Wisser, J.: Benchmarking-Initiative für Distributionszentren, Logistik für Unternehmen, VDI-Springer Verlag, Heft 11/12 (2006), S. 40-42

[6] Furmans, K.; Huber, C.; Wisser, J.: Leistungsfähigkeit von Distributionszentren systematisch vergleichen, Fördern und Heben (f+h), Vereinigte Fachverlage, Heft 1-2 (2008), S. 15-17

[7] VDI-Richtlinie 4400 Blatt 3, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, 2002

Strategien für eine flexible, auftragsweise Kommissionierung

Dipl.-Logist. J. Zellerhoff,

Dipl.-Logist. M. Pelka,

Prof. Dr. M. ten Hompel

Technische Universität Dortmund

Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen

Kurzfassung

Die Kommissionierung stellt eine komplexe und personalintensive Aufgabenstellung in der Intralogistik dar. Somit resultiert gerade in dieser Domäne ein hoher Nutzeneffekt bei effizientem Betrieb. Theoretisch ist dazu eine ständige Angleichung des Kommissioniersystems erforderlich, um bei saisonalen Einflüssen oder schwankenden Tages- / Wochenganglinien einen optimalen Betrieb zu gewährleisten. Heute bleiben derartige Systeme aber abgesehen von Restrukturierungsmaßnahmen, welche nur in großen zeitlichen Intervallen durchgeführt werden, unmodifiziert im Betrieb, weil eine Anpassung auf technischer Ebene nur bei starken und vor allem bleibenden Veränderungen wirtschaftlich ist. Aber mit einer rein organisatorischen Strategieanpassung kann auch kurzfristig auf wechselnde Auftragslasten reagiert werden.

Dieser Beitrag zeigt die Abhängigkeit verschiedener Betriebsstrategien zur Auftragslast und behandelt die Frage: Unter welchen Bedingungen bietet ein Wechsel von Wegstrategien, Prüfstrategien, Variation der Batchgröße oder das Einführen virtueller Kommissionierzonen eine Möglichkeit, flexibel auf Schwankungen der Auftragslast zu reagieren?

Abstract

Order picking represents one of the most complex and personnel-intensive challenges in logistics. Therefore it is essential to operate order picking systems efficiently. Because order structures fluctuate in seasonal, weekly or even daily periods, it demands an adaptation of order picking systems to assure efficiency. Despite of these fluctuations order picking systems still remain unchanged for a long duration. Today's adaptations occur usually with the emphasis on technical reorganization, which only makes good economic sense in terms of several years. In conclusion it is necessary to continuously adapt picking systems to fluctuating order structures in the short term. This can be achieved by changing the strategies of an order picking system already in use.

This paper deals with the interdependency between different order structures and organizational strategies and their ongoing adjustment.

1 Einleitung

Die Kommissionierung ist die aufwendigste Grundfunktion der innerbetrieblichen Logistik. Sie verfolgt nach VDI 3590 das Ziel, auf der Basis von Anforderungen (Aufträge) aus einer Gesamtmenge von Gütern (Sortiment) Teilmengen zu bilden [VDI3590]. In der betrieblichen Anwendung steht die Kommissionierung zudem im Spannungsfeld verschiedener Einflussgrößen. So stellt die wachsende Relevanz kundenorientierter Servicezusagen, wie tagfertige Auslieferung oder eine definierte Fehlerrate einen Gegensatz zum Ziel der minimalen Kommissionierkosten dar.



Abbildung 1: Vorrat an Betriebsstrategien

Zusammen mit der Vielzahl von Gestaltungsmöglichkeiten für Technik, Organisation und Steuerung resultiert für die Funktion der Kommissionierung in der industriellen Anwendung insgesamt eine komplexe Problemstellung [tHS05]. Es muss bei geringem Ressourceneinsatz eine möglichst große Leistung erzielt werden. Der Leistungsbegriff ist dabei nicht ausschließlich auf die Zeitkomponente zu begrenzen, sondern schließt auch den Aspekt der Kommissionierqualität ein, wie zahlreiche Fachbeiträge belegen (vgl. u. a. [Cor06]).

Dieser Beitrag fokussiert die manuelle Kommissionierung nach dem Prinzip „Person zur Ware“, die trotz fortschreitender Mechanisierung der Abläufe immer noch eine große Verbreitung besitzt [Wes01]. Vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) ist der Einsatz manueller Kommissionierung aufgrund geringer Investitionskosten bei ausreichender Leistung wirtschaftlich interessant. Darüber hinaus bieten diese Kommissioniersysteme durch den geringen Grad der Automatisierung ein großes Potenzial, um sich bei verändernden Einflussgrößen an neue Situationen anzupassen.

Derartige Anpassungen sind heutzutage nur im Rahmen von Restrukturierungen üblich, welche in größeren zeitlichen Intervallen durchgeführt werden. Das Potenzial zur kurzfristigen „Umplanung“ in manuellen Kommissioniersystemen bleibt ungenutzt und soll im Folgenden untersucht werden.

Nach VDI 3590 gliedert sich ein Kommissioniersystem in Materialflusssystem, Organisationssystem und Informationssystem [VDI3590]. Das Materialflusssystem und auch das Informationssystem müssen als unflexibel gegenüber kurzfristigen Änderungen angesehen werden, da hierzu technische Modifikationen notwendig wären. Das Organisationssystem hingegen umfasst verschiedene Betriebsstrategien (Abbildung 1) zwischen denen in vielen manuellen Kommissioniersystemen ohne technische Anpassung variiert werden kann.

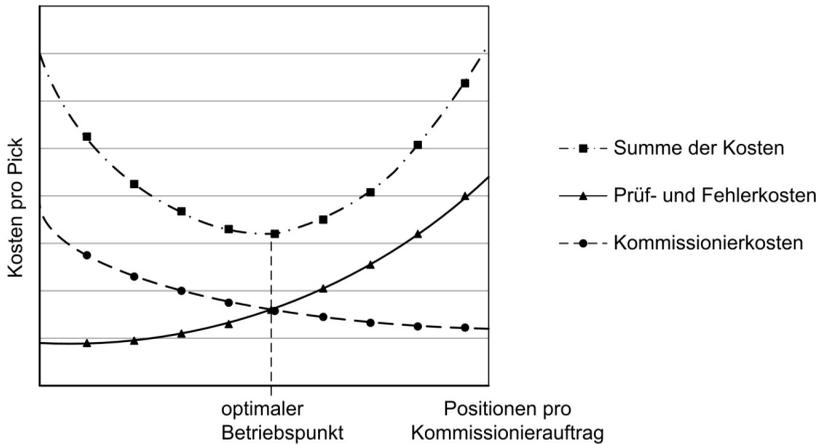


Abbildung 2: Kostenfunktion eines manuellen Kommissioniersystems

Ein Wechsel der Kommissionierstrategie, der Wegstrategie oder der Prüfstrategie ist damit abhängig vom vorhandenen Materialflusssystem denkbar. So kann kurzfristig auf veränderte Einflussgrößen reagiert und abhängig von ihrer aktuellen Ausprägung und dem vorhandenen Materialfluss- und Informationssystem durch Anpassung der Betriebsstrategien immer auf dem bestmöglichen Betriebspunkt gearbeitet werden.

Diese Thematik des situations- bzw. anforderungsgerechten Einsatzes unterschiedlicher Strategien ist Kern des von der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) geförderten Forschungsprojekts „Strategien für die flexible, auftragsweise Kommissionierung mit integrierter Prüfung“ (Kurztitel: FlexKom). Beteiligt sind die beiden Lehrstühle FLW (Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen) und LQW (Lehrstuhl für Qualitätswesen) der Technischen Universität Dortmund.

2 Schwankungen der Auftragslast

Als allgemeines Ziel bei der Planung eines Kommissioniersystems gilt die Minimierung der Kosten pro Pick unter Beachtung vielfältiger Einflussgrößen und Nebenbedingungen, wie bspw. Auftragsstruktur, Artikelstruktur, Durchsatz, Durchlaufzeit und Qualität. Ein Pick bezeichnet hierbei den Entnahmeprozess, bei dem eine oder mehrere Entnahmeeinheiten gleichzeitig vom Kommissionierer gegriffen werden. Abbildung 2 zeigt den anzustrebenden Betriebspunkt eines manuellen Kommissioniersystems, in dem neben den Kommissionierkosten weitere Kosten für Prüfprozesse und Fehler entstehen. Die Kosten stehen in Abhängigkeit zur Größe des Kommissionierauftrages, der die Anlaufpositionen einer Tour beinhaltet.

tet, welche aus einem oder mehreren Kundenaufträgen bestehen kann. Bei steigender Anzahl an Positionen pro Kommissionierauftrag wird die durchschnittliche Wegzeit pro Position geringer, was eine Reduzierung der Kommissionierkosten bedeutet. Im Gegensatz steigen allerdings die Prüf- und Fehlerkosten, beispielsweise durch die wachsende Gefahr der Verwechslung des Auftragsbehälters mit steigender Anzahl an Aufträgen pro Tour.

Wie bereits erwähnt, unterliegen die Einflussgrößen und Nebenbedingungen kurz- und langfristigen Veränderungen. Diese bewirken einen Wandel der Kostenfunktion und damit eine Verlagerung des bestmöglichen Betriebspunktes. Nach oder bereits während der Planung eines Kommissioniersystems können folgende Änderungen auftreten:

- Wandlung der Distributionsstruktur
Beispiel: Wechsel von einem B2B- zu einem B2C-Geschäft durch den Wegfall von Zwischenhändlern hin zu einem direkten Verkauf an die Endkunden
- Wandlung der Marktanforderungen
Beispiel: Neue Produkte bzw. eine Änderung des Artikelspektrums
- ...

Hierbei handelt es sich aber um einmalige oder nicht regelmäßige Änderungen in eine Richtung, für die kurzfristig keine Trendwenden zu erwarten sind. Die Grundlage der früheren Planung ist nicht mehr gegeben und das Kommissioniersystem muss restrukturiert bzw. reorganisiert werden. Der Einsatz flexibler Strategien ist somit nicht zielführend. Dieser kann nur erfolgen, wenn die ursprüngliche Planungsgrundlage bestehen bleibt und eine regelmäßige, wechselseitige Änderung auftritt (Schwanken der Einflussgrößen):

- Saisonale Schwankungen
- Schwankungen im Tagesverlauf, Schwankungen im Wochenverlauf:
Entstehen bspw. durch gleichzeitiges B2B- und B2C-Geschäft, bei dem sich beide Nachfragekurven mit ihren entsprechenden Eigenschaften überlagern
- ...

Es entstehen Schwankungen der Auftragslast die sich durch Änderung der

- Anzahl Aufträge pro Zeiteinheit,
- Anzahl Positionen pro Auftrag und
- Anzahl Picks pro Position

charakterisieren lassen. Bei diesen Veränderungen ist eine Reorganisation des Kommissioniersystems auf technischer Seite nicht zielführend, da ein ständiger Wechsel als unverhältnismäßig kostenintensiv angesehen werden muss. Viel-

mehr sollte ein Angleich des Systems auf die veränderten Anforderungen nur auf organisatorischer Seite erfolgen. Ob und inwieweit derartige Maßnahmen wirken, ist ein zentrales Thema des Forschungsprojektes „FlexKom“, zu dessen Beginn zwei gegensätzliche Thesen aufgestellt wurden, von denen die Richtige zu beweisen ist:

These I:

Bei unterschiedlichen Auftragslasten sind auch unterschiedliche Betriebsstrategien optimal, da sie ihre Potenziale jeweils nur unter bestimmten Voraussetzungen voll entfalten können. Es gibt einen optimalen Betriebspunkt, der innerhalb des möglichen Arbeitsbereiches liegt. Der mögliche Arbeitsbereich ist durch Restriktionen wie Auftragsgewicht, Tourgewicht, Durchlaufzeit etc. gegeben.

These II:

Es gibt bezogen auf das Materialfluss- und Informationssystem nur eine optimale Kombination der Betriebsstrategien. Diese optimale Strategiekombination ist unabhängig von der Auftragslast oder liegt außerhalb des möglichen Arbeitsbereiches. Eine Veränderung der Strategien bei wechselnder Auftragslast hätte somit nur einen positiven Effekt, wenn zuvor nicht der bestmögliche Betriebspunkt gewählt worden wäre.

3 Betriebsstrategien in Kommissioniersystemen

Zur Untersuchung der Abhängigkeit von Betriebsstrategien und Auftragslast wurden im Forschungsprojekt „FlexKom“ in Zusammenarbeit mit Industriepartnern Referenzsysteme definiert, welche das Spektrum manueller Kommissioniersysteme nach dem Prinzip „Person zur Ware“ widerspiegeln. Diese Referenzsysteme sind in ein Simulationsmodell integriert, um Experimente mit den verschiedenen Strategien und veränderten Auftragslasten durchführen zu können. Im Folgenden sollen die Untersuchungsfelder beschrieben und erste vorliegende Ergebnisse erläutert werden.

3.1 Wegstrategien

Wegstrategien kommen in den für die manuelle Kommissionierung typischen Kommissionierlagersystemen mit mehreren Gassen zum Einsatz. Ziel ist die Minimierung der Wegzeit für den Kommissionierer. Dazu wird eine optimale Bearbeitungsreihenfolge der einzelnen Positionen eines Kommissionierauftrags angestrebt. Hierdurch ergibt sich ein Traveling-Salesman-Problem, dessen exakte Lösung durch vollständige Enumeration für die praktische Anwendung zu lange Rechenzeiten erfordert. Deshalb existieren unterschiedliche geometrische und numerische Heuristiken. In der Literatur werden insgesamt sechs Wegstrategien beschrieben (vgl. [Sad07], [tHS07]):

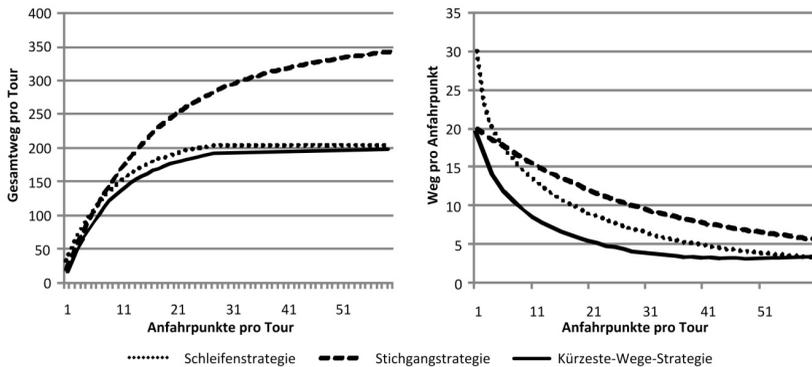


Abbildung 3: Vergleich der Effizienz verschiedener Wegstrategien

- Schleifenstrategie mit/ ohne Überspringen
- Stichgangstrategie mit/ ohne Gangwiederholung
- Mittelpunkt-Heuristik
- Largest-Gap-Heuristik

Diese Strategien sind den geometrischen Heuristiken zuzuordnen. Als numerische Heuristiken zur Bestimmung einer zulässigen Lösung für praktische Probleme werden die Vorgehensweisen „Bester Nachfolger“, „Sukzessive Einbeziehung“ sowie „Savings“ empfohlen [Dom97]. Diese werden im Folgenden zusammenfassend als „Kürzeste-Wege-Strategien“ bezeichnet und ergeben Lösungen ohne geometrische Regelmäßigkeit.

Nach Angaben der Industriepartner des Forschungsprojektes „FlexKom“ kommen im Bereich der KMU zumeist einfache geometrische Heuristiken wie die Schleifenstrategie oder die Stichgangstrategie zum Einsatz. Bei komplexeren geometrischen Heuristiken wie Largest-Gap muss der entstehende Berechnungsaufwand ins Verhältnis zum Nutzen gesetzt werden. In diesem Fall ist der alternative Einsatz einer „Kürzeste-Wege-Strategie“ zu prüfen.

Bietet die Steuerung eines Kommissioniersystems eine derartige „Kürzeste-Wege-Strategie“, so ist diese hinsichtlich der Wegzeit den anderen Wegstrategien vorzuziehen (Abbildung 3). Im Folgenden sollen aber Kommissioniersysteme betrachtet werden, in denen alternativ das Verfolgen der „Stichgangstrategie ohne Wiederholung“ und der „Schleifenstrategie mit Überspringen“ möglich ist. Dieses ist in vielen KMU-Systemen der Fall, ausgenommen der Einsatz von Flurförderzeugen beim Kommissionieren verhindert das Drehen in der Gasse und somit die Stichgangstrategie.

Abbildung 3 zeigt, dass die Wahl der optimalen Strategie von der Anzahl der Anfahrpunkte auf einer Kommissioniertour abhängt. Bei einer geringen Dichte der Anfahrpunkte ist die Stichgangstrategie sehr effizient. Bei nur einem Anfahrpunkt

ist sie identisch mit der „Kürzesten-Wege-Strategie“. Erhöht sich die Dichte der Anfahrpunkte und erhöht sich damit die Wahrscheinlichkeit, dass eine Gasse zu mehr als der Hälfte durchlaufen werden muss, so wird die Schleifenstrategie effizienter als die Stichgangstrategie. Bei einer sehr hohen Dichte der Anfahrpunkte ist dann die Schleifenstrategie identisch mit der „Kürzesten-Wege-Strategie“.

3.2 Single- und Multi-Order-Picking

Bearbeitet der Kommissionier mehrere Aufträge gleichzeitig, so wird dieses Vorgehen als Multi-Order-Picking [Mar09] oder Serienkommissionierung [Gud05] bezeichnet. Hierzu erfolgt das Zusammenfassen von mehreren externen Kundenaufträgen zu einem internen Kommissionierauftrag (Batch), der innerhalb einer Kommissioniertour abgearbeitet wird. Hierfür nutzt der Kommissionierer meist einen Kommissionierwagen, um bei seiner Tour mehrere Auftragsbehälter gleichzeitig befördern zu können. Dieses parallele Bearbeiten von mehreren Aufträgen innerhalb einer Zone ist von der zonenparallelen Kommissionierung (s. Abbildung 1) zu unterscheiden, bei der Auftragsteile parallel in verschiedenen Zonen bearbeitet werden.

Beim Multi-Order-Picking ergibt sich durch Zusammenfassen von Aufträgen zu einem Kommissionierauftrag eine Erhöhung der Entnahmepunktdichte, was die durchschnittliche Wegzeit pro Position reduziert. Ziel ist es, die Auftragszusammenfassung so zu gestalten, dass unter verschiedenen Nebenbedingungen (max. mögliche Anzahl Auftragsbehälter pro Kommissioniertour, max. Gewicht pro Tour etc.) die Gesamtzeit aller Kommissioniertouren minimiert wird. Hierbei ergibt sich ein „Vehicle-Routing-Problem“, bei dem der externe Auftrag in Subvariablen zu unterteilen ist, welche die einzelnen Positionen des Auftrags repräsentieren. Wie beim „Traveling-Salesman-Problem“ (s. Abschnitt 3.1) kann eine exakte Lösung des „Vehicle-Routing-Problems“ durch vollständige Enumeration in der Praxis nicht erfolgen. Es existieren verschiedene Heuristiken zur Batchbildung, die hinsichtlich ihrer Effizienz bewertet werden (vgl. u.a. [KPW99], [GiS92]). Im Rahmen des Forschungsprojektes „FlexKom“ ist zu untersuchen, ob bei unterschiedlichen Auftragslasten unterschiedliche Batchbildungs-Algorithmen optimal sind. Zunächst wurde die Batchgröße in Abhängigkeit der durchschnittlichen Wegzeit pro Position im Simulationsmodell untersucht. Zur Batchbildung wurde in diesem Fall der „Seed-Algorithmus“ eingesetzt [KPW99]. Das in Abbildung 4 dargestellte Ergebnis kann auf jeden Batchalgorithmus übertragen werden und besagt, dass die durchschnittliche Zeit pro Position mit steigender Batchgröße fällt. Ziel muss es also in jedem Kommissioniersystem sein, abhängig von Nebenbedingungen (Durchlaufzeit, maximale Anzahl an Behältern auf einem Kommissionierwagen etc.) und unabhängig von der aktuellen Auftragslast immer die maximal mögliche Batchgröße zu realisieren.

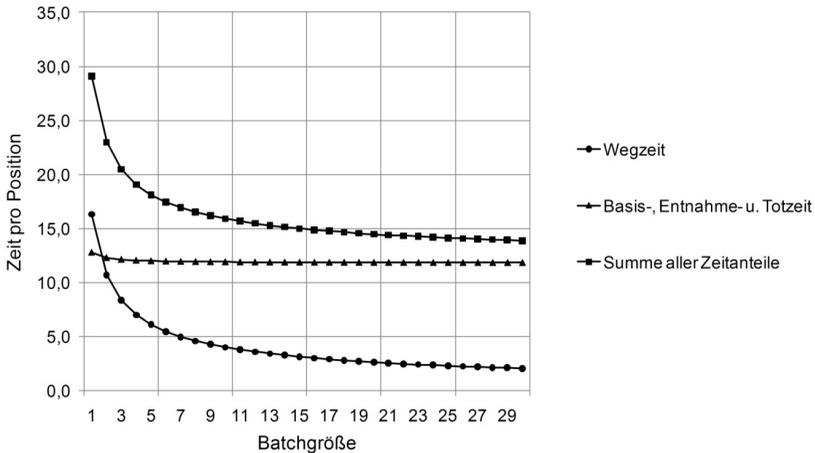


Abbildung 4: Zeit pro Position in Abhängigkeit der Batchgröße

Allein die steigende Wahrscheinlichkeit für Kommissionierfehler durch Verwechsellern der Behälter bei der Abgabe oder der entsprechend steigende Prüfaufwand, um dieses zu verhindern, könnte für das Single-Order-Picking, also das Bilden von einem Kommissionierauftrag aus einem externen Kundenauftrag oder zumindest für kleine Batchgrößen sprechen. Dies wird im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts „FlexKom“ untersucht.

3.3 Zonungsstrategien

Die Organisation der Bereichsaufteilung in der Kommissionierung kann grundsätzlich einzonig oder mehrzonig gestaltet werden [GIF08]. Gerade bei großen und inhomogenen Sortimenten bietet es sich an, ein Kommissioniersystem organisatorisch und räumlich in mehrere Kommissionierzonen aufzuteilen [AIK08]. Die Kommissionierung in mehrzonigen Systemen kann dabei seriell oder parallel erfolgen.

Bei serieller Bearbeitung startet der Kommissionierauftrag in der Zone, in der die erste Entnahme vorzunehmen ist. Anschließend wird die Sammeleinheit, in der Regel ein Behälter oder Kommissionierwagen, zur Weiterbearbeitung in der nächsten Zone bereitgestellt. Alle erforderlichen Zonen werden nacheinander durchlaufen und der Auftrag schrittweise vervollständigt [BS04]. Bei der parallelen Bearbeitung wird ein Kommissionierauftrag in zonenreine Teilaufträge zerlegt. Diese Teilaufträge werden dann gleichzeitig in den Kommissionierzonen abgewickelt und anschließend wieder zum Gesamtauftrag zusammengeführt.

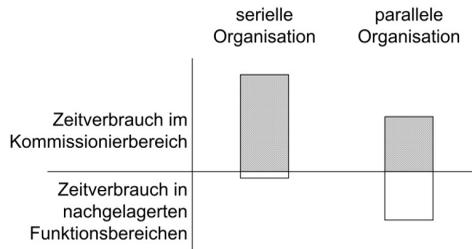


Abbildung 5: Zeitverbrauch bei serieller und paralleler Organisation

Die zonen serielle Kommissionierung eignet sich besonders bei großen Sortimenten, die sich hinsichtlich der Artikelzugriffshäufigkeit stark unterscheiden, hinsichtlich der Artikeleigenschaften wie beispielsweise Volumen und Gewicht jedoch ähnlich sind. Hier bietet sich die Einführung von Zonen für Schnell-, Mittel- und Langsamdreher an, so dass den artikelgruppenspezifischen Durchsätzen durch unterschiedliche Automatisierungsgrade in den Zonen Rechnung getragen wird. Die zonenparallele Kommissionierung ist überwiegend bei Sortimenten vorzufinden, die sich stark hinsichtlich ihrer Artikeleigenschaften unterscheiden und aufgrund dessen gar nicht erst nacheinander kommissioniert werden können. Als Beispiele können Artikelspektren mit leichten und schweren Produkten oder Spektren mit Klein- und Sperrteilen genannt werden.

Bezüglich der Kommissionierzeit pro Auftrag ist die parallele Kommissionierung der seriellen überlegen, da im seriellen Fall Wartezeiten zwischen den einzelnen Bereichen entstehen [BS04]. Dafür muss bei der parallelen Kommissionierung zusätzlicher Aufwand in nachgelagerten Funktionsbereichen für die Auftragskonsolidierung bzw. –sortierung berücksichtigt werden [tHSN07]. Dies kann den erstgenannten Zeitvorteil aufzuehen.

Wie im obigen Teil beschrieben wird in der einschlägigen Logistikliteratur als Hintergrund für eine mehrzonige Organisation die Sortimentsgröße sowie die Heterogenität des Artikelspektrums genannt (u.a. [Gud05], [tHSN07]). Im Rahmen des Forschungsprojekts „FlexKom“ soll jedoch untersucht werden, in wie fern diese Organisationsformen flexibel eingesetzt werden können und wie sie sich auf Kommissionierleistung, Durchlaufzeit und Qualität auswirken.

Grundsätzlich kann jedes Kommissioniersystem in Zonen organisiert werden. So kann beispielsweise ein Elementarsystem bestehend aus einer sechsgassigen Fachbodenregalanlage in drei Zonen aus je zwei Gassen untergliedert werden (s. Abbildung 6). Da diese Zonen physisch nicht existieren, werden sie als virtuelle Zonen bezeichnet. Erfolgt eine Zerlegung der Kundenaufträge in zonenreine Teilaufträge (Auftragssplitting) und eine Zusammenfassung der Teilaufträge einer Zone zu Sammelaufträgen (Batchbildung), kann die Entnahmepunktdichte innerhalb einer Zone deutlich erhöht werden. Folglich sinkt die Wegzeit pro Position,

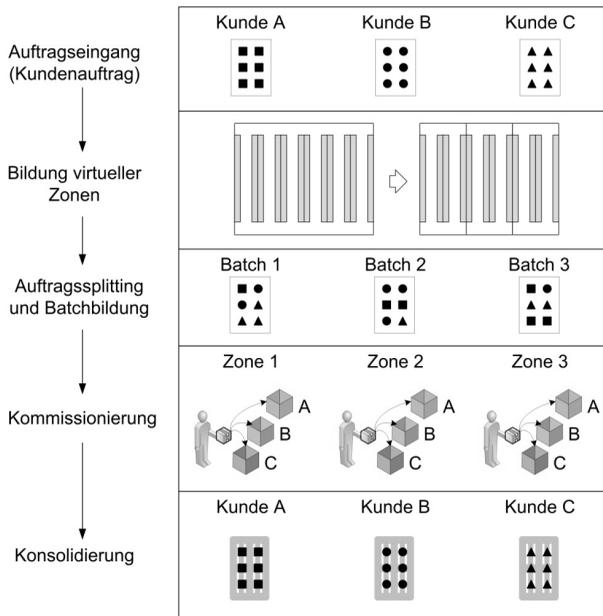


Abbildung 6: Mehrzonige Kommissionierung

wodurch die Leistung steigt. Aufgrund der anfallenden Konsolidierungsvorgänge ist jedoch zu erwarten, dass sowohl die durchschnittliche Auftragsdurchlaufzeit und der durchschnittliche Arbeitsaufwand als auch die Fehlerhäufigkeit ansteigen.

3.4 Prüfstrategien

Von besonderer Bedeutung, insbesondere im Zusammenhang mit der manuellen Kommissionierung, ist die Vermeidung fehlerhaft kommissionierter Aufträge, da diese das Vertrauen der Kunden in die logistische Leistungsfähigkeit des Lieferanten reduzieren und in Folge direkte und indirekte Kosten verursachen. Zwischen den Kosten für Prüfverfahren und den Folgekosten für Kommissionierfehler, die insbesondere bei wechselnden und außergewöhnlichen Lastsituationen auftreten können, herrscht ein Zielkonflikt. Ein Null-Risiko ist dabei nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand zu erzielen. Es muss eine Balance zwischen dem Risiko der Kommissionierfehler, den Kosten zu deren Verringerung und der Kundenzufriedenheit (Qualität der Kommissionierung) gefunden werden. Dabei ist die Eignung verschiedener Prüfstrategien zur Identifikation von Fehlern zu prüfen. Prüfstrategien können abgeleitet werden aus der Prüfmethode, der Prüfmethode, der Prüfmethode, dem Prüfumfang sowie dem Prüfzeitpunkt und -ort. Es ist zu erwarten, dass die Prüfstrategie und der damit verbundene Aufwand von der jeweiligen

Wahl der Kommissionierstrategie abhängen. Da die Fehlerwahrscheinlichkeit mit der Komplexität der Kommissionierstrategie steigt, müssen entsprechend umfangreichere Prüfstrategien zum Einsatz kommen.

Dazu werden Entnahme- und Greifprozesse bei unterschiedlichen Prinzipien der Kommissionierführung betrachtet (MDT, Pick-by-Light, Pick-by-Voice, Put-to-Light). Den Prozessketten werden mögliche Prüfprozesse und daraus resultierende Fehlerwahrscheinlichkeiten hinterlegt. Die Vielzahl potenzieller Prozessketten ist hinsichtlich ihrer Effizienz bei unterschiedlichen Auftragslasten und Strategien zu untersuchen.

4 Fazit und Ausblick

Unabhängig von der eingesetzten Materialfluss- und Informationstechnik kann in manuellen Kommissioniersystemen auf organisatorischer Ebene zwischen vielfältigen Kombinationen aus Kommissionier-, Weg- und Prüfstrategien variiert werden.

Die ersten Untersuchungen zeigen, dass es zumindest unter dem Leistungsaspekt stets eine optimale Batchgröße (möglichst viele Aufträge pro Tour) und Wegstrategie (Kürzeste-Wege-Strategie) gibt. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts „FlexKom“ müssen nun die Prüfstrategien betrachtet werden, da leistungsstarke Strategien mit hoher Fehlerwahrscheinlichkeit bzw. mit einem hohen Prüfaufwand verbunden sind. Es ist zu erwarten, dass die optimale Strategiekombination von der aktuellen Auftragslast abhängt und sich somit These 1 (s. Abschnitt 2) bewahrheitet.

Literatur

- [AIK08] Arnold, D. (Hrsg.); Isermann, H. (Hrsg.); Kuhn, A. (Hrsg.) et al.: Handbuch der Logistik. 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2008.
- [BS04] Bichler, K.; Schröter, N.: Praxisorientierte Logistik. 3. Aufl., Stuttgart: Kohlhammer, 2004.
- [Cor06] Corban, M.: Trendumfrage „Kommissioniertechnik“ bei internationalen Anbietern. In: FM – Das Logistikmagazin. Konradin, (2006) 3, S.12-15.
- [Dom97] Domschke, W.: Logistik – Rundreisen und Touren. 4 Aufl., München: Oldenbourg Verlag, 1997
- [GiS92] Gibson, D. R.; Sharp, G.P.: Order batching procedures. In: European Journal of Operational Research, 58, S. 57-67, 1992.

- [GIF08] Gleißner, H.; Femerling, C.: Logistik. Wiesbaden: Gabler, 2008.
- [Gud05] Gudehus, T.: Logistik – Grundlagen, Strategien, Anwendungen. 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2005.
- [KPW99] Koster, M. B. M.; Poort, E. S.; Wolters, M.: Efficient orderbatching methods in warehouses. In: International Journal of Production Research, 37, S. 1479-1504, 1999.
- [Mar09] Martin, H.: Transport- und Lagerlogistik. 7. Aufl, Wiesbaden: GWV Fachverlage, 2009.
- [Sad07] Sadowsky, V.: Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen. Dissertation, Universität Dortmund (2007)
- [tHS05] ten Hompel, M.; Schmidt, T.: Warehouse Management - Automatisierung und Organisation von Lager- und Kommissioniersystemen. Berlin: Springer, 2005.
- [tHS07] ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme. 3. Aufl., Berlin/Heidelberg/New York: Springer, 2007.
- [VDI3590] VDI 3590-Teil 1: Kommissioniersysteme – Grundlagen, 1994.
- [Wes01] Wesselmann, J.: Benchmarking für manuelle Kommissioniersysteme – Ergebnisse einer Studie. Vortrag auf dem Kommissionierforum 2001.

Über den Einfluss verfügbarer Steuerungsinformationen auf die Leistung eines intralogistischen Systems

Jan Robert Nopper

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund

Michael ten Hompel

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund

Dieser Beitrag beruht teilweise auf einem Beitrag zur jährlichen Konferenz der Production and Operations Management Society (POMS) 2009

Theoretisch wird die Leistung eines Materialflusssystemes in der Intralogistik besser, je mehr Informationen der Materialflussteuerung über das System und die zukünftigen Lasten zur Verfügung stehen. In der Praxis ist dieser Ansatz jedoch nicht nur aufgrund der mit der Informationsbeschaffung verbundenen Kosten schwierig, sondern vor allem auch, da eine beliebig genaue Bestimmung eines stochastischen Prozesses für die Zukunft unmöglich ist ('Unschärferelation der Logistik'). Intralogistische Systeme werden daher in der Regel mit Hilfe von Heuristiken gesteuert, die durch ihre Einfachheit zudem Vorteile hinsichtlich Flexibilität und Robustheit aufweisen.

Der vorliegende Beitrag analysiert den grundsätzlichen Einfluss der Verfügbarkeit von Informationen auf die Leistung des Systems, die anhand der Durchlaufzeit und der Auslastung bei gegebenem Durchsatz gemessen wird. Dabei werden zwei Grenzfälle betrachtet, die alle realen Situationen umschließen. Diese werden anhand eines intralogistischen Stetigfördersystems mit eindeutig skalierbarem Layout quantitativ untersucht.

Es wird gezeigt, dass für den betrachteten Fall die Verfügbarkeit von Informationen über das System nur einen begrenzten Einfluss auf die Leistung des Systems hat.

Schlüsselwörter: Intralogistik; Internet der Dinge; Materialflussteuerung; Einfluss der Verfügbarkeit von Informationen auf die Systemleistung.

On the influence of control information on performance in facility logistics

Jan Robert Nopper

Fraunhofer-Institute for Material Flows and Logistics, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund

Michael ten Hompel

Fraunhofer-Institute for Material Flows and Logistics, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund

Parts of this contribution are based on a presentation at the Production and Operations Management Society's 20th Annual Conference on May 1 to May 4, 2009.

Theoretically, the performance of a material handling system improves with the amount of information available to the material flow control. In praxis, however, gathering of information is quite costly; furthermore, an exact forecast of stochastic processes is impossible ('uncertainty principle in logistics'). Therefore, systems in facility logistics are often controlled based on rather simple heuristics. Heuristics also show favorable properties like flexibility and robustness due to their simplicity.

This contribution analyses the influence of availability of information on the performance of a system. Performance is measured in terms of throughput time and utilization at given throughput. For the analysis, two limiting cases are considered which envelop all real situations. Calculations are based on a continuous conveyor system with scalable layouts.

It is shown that that for this situation the amount of available information has only limited influence on the performance of the system.

Keywords: Facility logistics, Internet of Things; Material flow control; Influence of available information on performance.

1 Einführung

Wachsende Forderungen an die Effizienz der eingesetzten Lösungen prägen auch die Intralogistik. Gleichzeitig steigt die Komplexität der Anwendungen durch die Globalisierung, kürzere Produktlebenszyklen und den Trend zu individuelleren Produkten [1, 2]. Es wäre nun denkbar, diese Anforderungen durch einen leistungsstarken Optimierungsrechner zu erfüllen. Dieser müsste unzählige Daten aus Messungen und Prognosen verarbeiten und könnte anschließend – zumindest theoretisch – das System optimal steuern. In der Praxis verbietet sich diese Lösung jedoch nicht nur aus Kostengründen: Insbesondere die mit einer solchen Lösung verbundenen Verarbeitungszeiten unterlaufen jegliche Bemühung zur Erreichung von Echtzeitfähigkeit. [3] spricht in diesem Zusammenhang auch von der "Unschärferelation der Logistik" – je genauer man versucht, einen zukünftigen Systemzustand vorherzusagen, desto unwahrscheinlicher ist sein Eintreffen. Genau dies wäre aber die Voraussetzung für die erwähnte Optimierung der Systemleistung.

Daher werden in der Praxis oft einfache Heuristiken bevorzugt, die das System mit Hilfe unvollständiger Informationen steuern. Auch durch sehr einfache Heuristiken können dabei beachtliche Leistungen erzielt werden: So zeigen [4, 5], dass das Internet der Dinge in der Intralogistik die Steuerung einer Gepäckförderanlage mit weniger als 400 Codezeilen gestattet. Die Durchlaufzeit entspricht fast exakt der Durchlaufzeit, die mit Hilfe realer Steuerungen für das gleiche System erreicht werden. Andere Autoren untersuchen Ansätze, die auf insektenbasierten Ansätzen beruhen. Dabei werden komplexe Probleme ebenfalls mit Hilfe einfacher Heuristiken gelöst. Das führt oft zu sehr guten Ergebnissen, falls die Heuristiken von vielen Insekten (bzw. Agenten in technischen Systemen) gleichzeitig angewandt werden [6, 7].

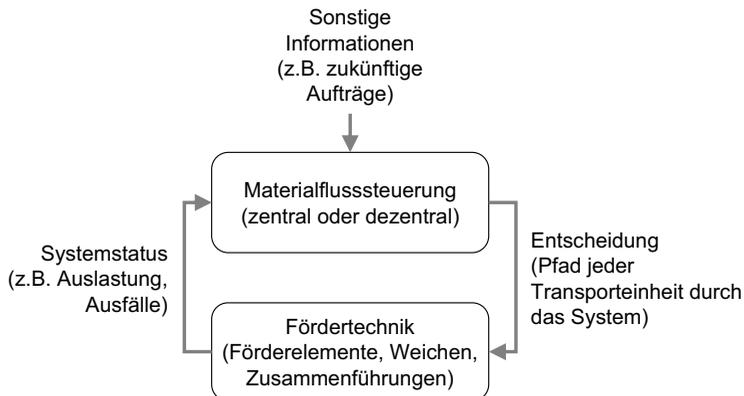
Basierend auf der Untersuchung von [8] soll dieser Beitrag den Einfluss der verfügbaren Informationen auf die Systemleistung erläutern und in einem praktischen Zusammenhang stellen. Dafür werden in Abschnitt 2 zunächst die Untersuchungsmethodik und die Ergebnisse erläutert. Abschnitt 3 diskutiert die Ergebnisse und geht kurz auf Schlussfolgerungen für die Praxis ein.[^]

2 Analyse des Zusammenhangs zwischen verfügbarer Information und Leistung mit Hilfe eines Testsystems

2.1 Ziele und Gegenstand der Untersuchung

[8] untersuchen den Zusammenhang zwischen den Informationen, die der Materialflusssteuerung zur Verfügung stehen und der Systemleistung. Im Folgenden werden wesentliche Inhalte und Ergebnisse kurz wiedergegeben.

Abbildung 1 zeigt ein einfaches Modell eines Materialflusssystemes in der Intralogistik. Dabei erhält die Materialflusssteuerung neben Informationen aus der Feldebene gegebenenfalls zusätzliche Informationen über zukünftige Aufträge, die zum Beispiel aus einem ERP-System stammen können. Unter der Annahme, dass die Materialflusssteuerung vorliegende Informationen stets im bestmöglichen Sinn nutzt, ist somit bei gegebener Fördertechnik und gleichem Layout die Menge der zur



Verfügung stehenden Information der einzige Einfluss auf die Leistung des Materialflusssystemes.

Abbildung 1: Vereinfachtes Modell eines Materialflusssystemes [8]

Dabei sollen im Folgenden zwei Grenzfälle unterschieden werden, innerhalb derer alle real möglichen Fälle liegen: Der bestmögliche Fall geht davon aus, dass die Materialflusssteuerung alle Informationen über das System sowie vergangene, aktuelle und zukünftige Aufträge hat. Das umfasst unter anderem alle Informationen über das Layout, den gegenseitigen Einfluss von Ladungsträgern auf deren jeweilige Durchlaufzeiten sowie den Zeitpunkt aller Ausfälle von Elementen. Dieser Fall führt zu der unter den gegebenen Umständen bestmöglichen Systemleistung hinsichtlich aller Kriterien.

Dagegen untersucht der schlechtest-sinnvolle Fall die Systemleistung bei sehr wenigen zur Verfügung stehenden Informationen. Konkret wird davon ausgegangen, dass der Materialflusssteuerung nur die Anzahl der Routen durch das System, die Durchlaufzeit für jede Route *ohne* Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung von Ladungsträgern sowie die Ausfälle zum aktuellen Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Dies entspricht der minimalen Menge an Informationen, die notwendig ist, um vollständig zufällige Entscheidungen der Steuerung zu vermeiden.

2.2 Methodik

Für eine quantitative Analyse wurde ein geeignetes Testsystem definiert. Dabei wird grundsätzlich ein Stetigfördersystem untersucht. In einem ersten Schritt wird davon ausgegangen, dass dieses keine steuerbaren Pufferelemente besitzt und somit nur aus Weichen, Zusammenführungen und Förderelementen besteht. Daher können als Leistungsparameter nur die Durchlaufzeit und die Auslastung untersucht werden. Es wird davon ausgegangen, dass alle Materialflüsse stetig sind, was für ausreichend lange Beobachtungszeiträume eine zulässige Annahme ist.

Layout

Als Testlayout wurde ein leicht verändertes Manhattan-Layout verwendet (Abbildung 2). Dieses ist durch eine hohe Verknüpfung der möglichen Routen durch das System miteinander gut geeignet, um Unterschiede zwischen Steuerungsalgorithmen zu identifizieren. Darüber hinaus weist es hinsichtlich der Größe und Komplexität eine definierte Skalierbarkeit auf, die eine einfache Untersuchung ermöglicht.

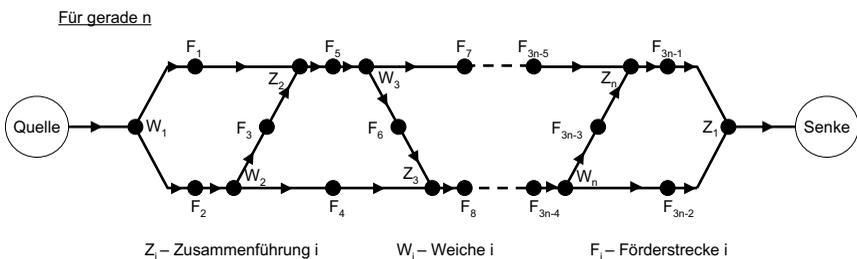


Abbildung 2: Modifiziertes Manhattan-Layout für gerade Anzahl n von Weichen/Zusammenführungen [8]

Dieses Layout ist über die Anzahl n an Weichen bzw. Zusammenführungen skalierbar und zeigt viele Regelmäßigkeiten bezüglich n . So lassen sich unter anderem die Anzahl aller Elementtypen einfach als Funktion von n ausdrücken und die Gesamtzahl der Routen durch das System und durch jedes Element lassen sich über Fibonacci-Folgen darstellen. Es ist darüber hinaus möglich, die Anzahl an Quellen und Senken beliebig zu erhöhen. Im Falle stetiger Flüsse führt das jedoch zu gleichen Ergebnissen, da alle Flüsse bei Weiche 1 bzw. Zusammenführung 1 kombiniert werden. Dieser Fall wird daher im Folgenden nicht betrachtet.

Elementcharakteristika

Weichen und Förderelemente werden für das Testsystem als einfache Verzögerungselemente mit einer maximalen Kapazität und einer spezifischen Verfügbarkeit modelliert. Es wird dabei angenommen, dass die Durchlaufzeit dieser Elemente unabhängig vom Durchsatz und konstant über die Zeit ist.

Der von der Auslastung abhängige Teil der Durchlaufzeit ('variable DLZ') an Verzweigungselementen wird in uneteter Abfertigungsart modelliert. Angelehnt an [9, 10] wird dabei eine variable Abfertigungszeit mit Warteschlangenüberwachung angenommen. Dabei ergibt sich für die Durchlaufzeit

$$\overline{DLZ} = t_s \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \alpha \cdot \dot{N} \cdot (1 - \alpha)}{\dot{N}_{\max} - \dot{N}} \right) \quad (1)$$

wobei \dot{N} dem realen Fluss durch die Zusammenführung, \dot{N}_{\max} dem maximal möglichen Durchsatz der Zusammenführung bei einseitiger Zuführung, t_s der Schaltzeit und $\alpha = \dot{N}_2 / \dot{N}$ dem Anteil der Zuführung 2 am gesamten Zufluss entsprechen. (1) gilt dabei nur für $0 < \alpha < 1$. Im Falle von $\alpha = 0$ oder $\alpha = 1$ wird die Weiche nicht geschaltet, da jeweils ein Puffer nicht gefüllt ist. Die variable Durchlaufzeit verschwindet in diesem Fall.

Falls die maximale Verweildauer je Schaltposition auf $t^*/2$ begrenzt ist, ergibt sich der maximale Durchfluss der Zusammenführung zu

$$\dot{N} \leq \frac{t^* \cdot \dot{N}_{\max}}{t^* + 4t_s(1 - \alpha)} \quad (2)$$

Steuerung in Abhängigkeit von den zur Verfügung stehenden Informationen

Für das gegebene Testsystem ist es nun möglich, den bestmöglichen und schlechtest-sinnvollen Fall zu definieren. Um Unterschiede zwischen den Steuerungen deutlich zu machen wird angenommen, dass alle Routen durch das System die gleiche Durchlaufzeit haben, falls sich die Ladungsträger nicht gegenseitig beeinflussen.

Wie erwähnt, stehen im schlechtest-sinnvollen Fall lediglich Informationen über die Anzahl der Routen und deren Durchlaufzeiten ohne gegenseitige Beeinflussung der Ladungsträger zur Verfügung. Da diese hier für alle Routen gleich ist, wird die Last daher gleichmäßig auf alle Routen verteilt.

Im bestmöglichen Fall wird dagegen ein Ansatz gewählt, der die gegenseitige Beeinflussung der Ladungsträger an Zusammenführungen minimiert und gleichzeitig eine gleichmäßige Auslastung der einzelnen Elemente ermöglicht (vgl. [8]). In Summe ist es möglich, die in Tabelle 1 gezeigten Auslastungen zu verwirklichen, die auch im Falle von Ausfällen aufrechterhalten werden können.

2.3 Berechnung und Ergebnisse

Das Testsystem wurde anschließend mit Hilfe von Simulationsstudien analysiert. Dabei wurden die Durchlaufzeit und die Elementauslastung für beide betrachteten Fälle jeweils mit und ohne Elementausfälle betrachtet. In Anlehnung an die Definition

der entsprechenden VDI-Norm wurde im Fall von Ausfällen eine Verfügbarkeit von 99% angenommen [11].

Tabelle 1: Auslastung der Elemente im bestmöglichen Fall

| \varnothing Auslastung | Anzahl der Elemente |
|--------------------------|---------------------|
| $\frac{1}{3} \dot{N}$ | $2n-1$ |
| $\frac{2}{3} \dot{N}$ | $3n-2$ |
| \dot{N} | 2 |

Die Berechnungen wurden jeweils für $n=1-20$ Zusammenführungen mit einem Gesamtfluss \dot{N} von 1,0 Einheiten pro Sekunde durch das System, $t_s = 3s$ und $\dot{N}_{max} = 1,8$ Einheiten pro Sekunde durchgeführt. Um Überläufe der Puffer zu verhindern, wurde t^* zu 15 Sekunden gewählt, so dass die Anforderungen aus (2) für jedes \dot{N} erfüllt werden. Diese Parameter sind dabei bezüglich des Unterschieds zwischen dem bestmöglichen und schlechtest-sinnvollen Falls eher weit gewählt (vergleiche Gleichung (1)). Für reale Systeme wird daher tendenziell ein engerer Korridor zwischen den beiden Grenzfällen erwartet, als die folgenden Berechnungen ergeben. Für die Länge der Förderstrecken wurden realistische Werte gewählt, die für $n=20$ etwa den Parametern von Gepäckförderanlagen in Flughäfen entsprechen.

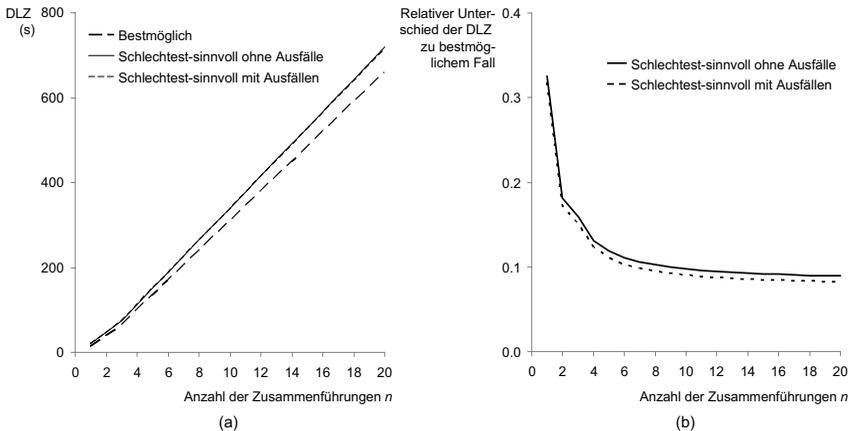


Abbildung 3: Verlauf der Durchlaufzeit über der Systemkomplexität – (a) absolute Werte, (b) relative Werte bezogen auf den bestmöglichen Fall [8]

Abbildung 3 (a) zeigt die sich aus diesen Parametern ergebenden Ergebnisse für die Durchlaufzeit in Abhängigkeit von der Komplexität und Größe des Systems, wogegen Abbildung 3 (b) die relativen Unterschiede zwischen dem bestmöglichen und schlechtest-sinnvollen Fall zeigt. Der Korridor zwischen beiden Fällen ist vergleichsweise eng und wird bei der Betrachtung von Elementausfällen tendenziell noch enger. Der relative Unterschied zwischen beiden Fällen wird für $n > 8$ kleiner als 10 Prozent.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für die durchschnittliche Auslastung der Elemente für die Grenzfälle für keine Ausfälle von Elementen (a) und unter Berücksichtigung von Ausfällen von Elementen (b). Die Werte zeigen jeweils eine deutliche Konvergenz, wobei der Unterschied zwischen dem bestmöglichen und schlechtest-sinnvollen Fall für komplexere Layouts jeweils kleiner als 10 Prozent ist.

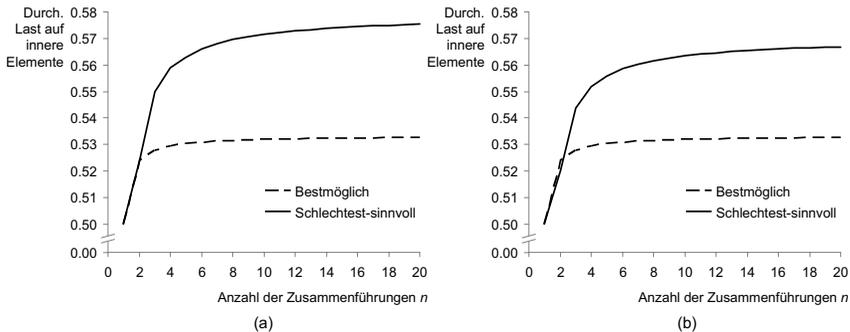


Abbildung 4: Durchschnittliche Belastung der inneren Elemente. (a) – ohne Ausfälle, (b) mit Elementausfällen (adjustiert um Ausfälle des Gesamtsystems) [8]

3 Zusammenfassung und Diskussion

Dieser Beitrag analysiert ein Stetigfördersystem mit eindeutig skalierbarem Layout und vereinfachten Elementcharakteristika im Falle einer stetigen Einlastung von Ladungsträgern. Dabei wurde der maximale Leistungsunterschied im Bezug auf Durchlaufzeit und Auslastung der Fördertechnik in Abhängigkeit von der Menge der Informationen, die der Materialflusssteuerung zur Verfügung stehen, berechnet. Dieser war relativ gering und unterschreitet für komplexere Systeme 10 Prozent. Die mit einer sehr einfachen Heuristik erzielten Ergebnisse sind hier also sehr nah am globalen Optimum. Dies mag zunächst überraschen, findet aber durchaus seine Entsprechung in der Praxis. Statt 'Schachcomputern', die mit hohem Aufwand nach optimalen Lösungen suchen, werden dort für Materialflusssteuerungen mit guten Ergebnissen oft einfache Heuristiken bevorzugt. Der schlechtest-sinnvolle Fall entspricht dabei im analysierten Beispiel einer ausgesprochen einfachen Heuristik ohne dynamische Informationen über das betrachtete System. Durch eine

Berücksichtigung einfach zu erhaltender dynamischer Informationen (z.B. über Zähler) kann der Leistungsunterschied zum bestmöglichen Fall weiter verringert werden.

Referenzen

1. De Meyer, A (1998) Manufacturing Operations in Europe: Where Do We Go Next? *Eur Manag J*, 16 (3):262-271
2. Nyhuis, P (2006) Logistic Production Operating Curves – Basic Model of the Theory of Logistic Operating Curves. *Annals of the CIRP*, 55 (1)
3. ten Hompel M (2008) Intralogistik - Auf dem Weg vom Prozess zum Service. In: Baumgarten H (ed) *Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen*. Springer, Berlin Heidelberg, pp 103–110
4. Follert G, Roidl M (2008) Evaluation of Routing Strategies for Decentralized Self-Organization in Large Scale Conveyor Systems. *Progress in Material Handling Research*, Material Handling Institute, 160-184
5. ten Hompel M, Follert G, Roidl M (2008) Künstliche Intelligenz im Internet der Dinge: Die Zukunft der Materialflusssteuerung mit autonomen Agenten. *Jahrbuch Logistik 2008*, 24-29
6. Scholz-Reiter B, Jagalski T, Bendul J (2007) Bienenalgorithmen zur Selbststeuerung logistischer Prozesse. *Industrie Management*, 23 (5):7-10
7. Armbruster D, de Beer C, Freitag M, Jagalski T, Ringhofer C (2006) Autonomous control of production networks using a pheromone approach. *Physica A*, 363:104-114
8. Nopper J, ten Hompel M (2009) Analysis of the relationship between available information and performance in facility logistics. Zur Veröffentlichung eingereichtes Manuskript, *Logis. Res.*
9. Großeschallau W (1984) *Materialflußrechnung*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokyo
10. Arnold D, Furmans K (2007) *Materialfluss in Logistiksystemen*. 5., erweiterte Auflage. Springer, Berlin Heidelberg New York
11. Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2002) Technical availability of machines and production lines. Terms, definitions, determination of time periods and calculation. VDI-Richtlinien 3423 (4)

Integration einer HF-Kommunikationsstruktur in metallische Komponenten

*Dipl.-Ing. Stefan Franke und Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik*

Abstract: Die folgende Arbeit stellt eine neue Methode vor metallische Bauteile zur Kommunikation mit ihrer Umgebung zu befähigen. Die Signale werden durch einen zylindrischen Hohlleiter, in den ein 5,8 GHz Transponder integriert ist, in das Innere des Bauteils geführt. Der Transponder basiert auf einem Mikrocontroller und kann durch den Hohlleiter Daten senden und empfangen. Zusätzlich ist ein Datenaustausch, etwa mit einem bauteilintegrierten Sensor, durch einen I/O-Port möglich. Die Kommunikationsstruktur besteht aus dem Transponder und der dielektrischen Füllung des Hohlleiters, welche in eine Kavität des metallischen Werkstücks eingeklebt wird.

1 Einleitung

Die Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen bedarf detaillierter Bauteilinformationen [Denkena07]. Der Einsatz von Enterprise Resource Planning (ERP) Systemen dient der Planung, Überwachung und Optimierung von Geschäftsprozessen in Unternehmen. Hierfür werden insbesondere für die Bereiche Materialwirtschaft und Produktion individuelle Informationen über einzelne Bauteile benötigt. Dabei kann mit Hilfe von RFID-Etiketten gerade im Bereich der Lagerhaltung eine ausreichende Verknüpfung von Bauteil und Identifikationsinformation gewährleistet werden.

Oft beschränkt sich der Einsatz von Identifikationssystemen jedoch auf die Ladungsträger, weil das sichere Anbringen von RFID Etiketten an Bauteilen und Halbzeugen nicht möglich ist. Wird der Informationsträger vom Bauteil unbeabsichtigt oder absichtlich getrennt, wird die Information wegen der fehlenden Zuordnung wertlos. Metallische Bauteile, welche durch ihre elektrische Leitfähigkeit die Ausbreitung der Funksignale stören, stellen eine weitere Einschränkung beim Einsatz von RFID-Etiketten dar. Daraus ergibt sich der Bedarf für bauteilintegrierte Identifikationssysteme, welche durch ihre Bauteilinhärenz stets zur Verfügung stehen und auch bei einer Weiterverarbeitung der Bauteile erhalten bleiben. Systeme die solche bauteilinhärente Informationen ermöglichen, werden im Rahmen des SFB 653 „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus – Nutzung vererbbarer, bauteilinhärenter Informationen in der Produktionstechnik“ an der Leibniz Universität Hannover entwickelt.

Diese gentelligen Bauteile weisen neben einer sicheren Identifikationslösung weitere Eigenschaften auf, wie die Möglichkeit Daten zu empfangen, zu verarbeiten, ab-

zuspeichern und weiterzugeben und den Bauteilzustand über bauteilinhärente Sensorik zu überwachen. Diese Eigenschaften können dann beispielsweise zu einer bauteilgetriebenen Montagesteuerung führen [Nyhuis09]. Anwendungen finden sich auch in der Produktion [Denkena07].

Im Folgenden wird zunächst die Vision einer gentelligenten Supply Chain beschrieben. Anschließend wird ein System vorgestellt, welches eine Grundlage für gentelligente Bauteile legt. Die elektrotechnischen Grundlagen dieser Kommunikationsstruktur werden im Abschnitt 3 erläutert. Die Integration des Systems in das Bauteil wird in Abschnitt 4 dargelegt. Der letzte Abschnitt gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsvorhaben.

2 Automatisierung in der Logistik

Logistische Prozesse bieten ein hohes Automatisierungspotential. Die Auslagerung von Fertigungsprozessen führt zu komplexen Lieferketten, die sich nur durch Automatisierung beherrschen lassen. Dafür ist es unerlässlich den aktuellen Status jedes Bauteils in der Supply Chain zu kennen, um Fehler frühzeitig zu erkennen und durch geeignete Maßnahmen, wie Priorisierung oder Umleitung von Komponenten eine hohe Termintreue zu gewährleisten. Desweiteren ist zur Sicherung der Qualität eine Rückverfolgbarkeit und das Vorhalten von Daten zu den einzelnen Produktionsschritten notwendig.

Stand der Technik ist es die Bauteile oder auch nur deren Ladungsträger mit AutoID-Systemen, wie Barcode oder RFID, zu markieren, um eine Identifikation des Bauteils oder der Charge zu ermöglichen. Das Auslesen der Identifikationsdaten erfolgt dann meist beim Passieren bestimmter mit Lesegeräten bestückten Stationen oder manuell. Systeme, welche Ladungsträger während der Transportvorgänge automatisch identifizieren sind in der Entwicklung [Jungk07]. Die Daten werden dann auf einem zentralen Rechnersystem gesammelt und hinterlegt. Informationen über den Zustand des Bauteils (Schäden durch den Transport, Fertigungstoleranzen, ...) liegen in der Regel nicht vor. Auch sind die über das Bauteil bekannten Daten nicht ohne die Verknüpfung der zentralen Datenbank und der Bauteilidentifikationsnummer nutzbar. Ein Ausfall der Datenbank bzw. eine Störung der Kommunikation kann somit zu inkonsistenten Daten oder aber auch einem kompletten Produktions- und Transportstopp führen.

Die steigende Diversifizierung, die Verteilung von gleichartigen Fertigungsaufträgen an mehrere Lieferanten, und Komplexität von Supply Chains, sowie die Fertigung immer kundenspezifischerer Produktvarianten in der Serienfertigung erfordert nun immer mehr Informationen. Hierfür reicht es nicht nur den Standort einer Ladung zu kennen, sondern es sind Informationen über die Eigenschaften eines jeden Produktes notwendig. Schon bei Beginn der Produktion steht fest für welches individuelle End-

produkt das Bauteil benötigt wird. Ist diese Information von Anfang an mit dem zu fertigendem Bauteil verknüpft, so kann dieses seinen Weg durch die Prozess- und Lieferkette selbst steuern. Dazu müssen die einzelnen Stationen in der Lage sein, dem Bauteil Informationen über die Liefer- und Prozesskette zu geben, so dass dieses eine Entscheidung über seinen weiteren Weg treffen kann oder die Station muss anhand der Informationen aus dem Bauteil diese Entscheidung treffen und dem Bauteil mitteilen. In beiden Fällen ist eine Kommunikation mit einer zentralen Instanz nicht notwendig. Sie wird erst benötigt, wenn in die Steuerung eingegriffen werden soll, da alle notwendigen Informationen auf dem Bauteil vorhanden sind. Diese dezentrale Steuerung ermöglicht eine fast grenzenlose Erweiterung der Komplexität einer Lieferkette, da der erhöhte Informationsbedarf durch die Kapazität der Datenverarbeitung und -speicherung der Bauteile, deren Menge ebenfalls zu nimmt, gedeckt wird.

Derzeit gibt es keine intelligenten Bauteile, welche die gesamte Prozesskette, also nicht nur den Transport, sondern auch die gesamte Produktion, sicher mit Informationen versehen durchlaufen können. AutoID-Systeme werden meist an der Oberfläche angebracht und können dort während der Weiterverarbeitung, sei es eine Bearbeitung des Bauteils oder auch dessen Montage, leicht beschädigt oder verdeckt werden. Gentelligente Bauteile hingegen besitzen ins Bauteil integrierte Speicher und Datenverarbeitungstechnik, welche bei der Bearbeitung unbeschädigt bleiben. Bei der Montage ist es denkbar, diese Systeme miteinander zu verknüpfen, um so eine komplexere Datenstruktur für eine komplexere Komponente zu ermöglichen. Unter Einbeziehung der sensorischen Fähigkeiten, welche für gentelligen Komponenten entwickelt werden, wächst so das „Bewusstsein“ der Bauteile über den eigenen Zustand, und die „Intelligenz“ der Bauteile eigene Entscheidungen zu treffen mit deren Komplexität.

In den folgenden Abschnitten wird eine Möglichkeit gezeigt, metallische Bauteile mit Intelligenz zu versehen, indem Elektronik in das Bauteil integriert wird. Die Weiterentwicklung und Miniaturisierung dieses Systems wird den Einsatz in einer immer größeren Bauteilpalette ermöglichen und somit eine Grundlage für ein dezentrales Supply Chain Management legen.

3 Systementwurf

Die Kommunikationsstruktur benutzt elektromagnetische Wellen, um eine Datenverbindung zwischen dem Werkstück und der Maschine, welche das Werkstück gerade bearbeitet, herzustellen. Ein Rundhohlleiter führt die elektromagnetische Welle in das metallische Werkstück hinein. Bei einem Abstand von $\lambda/4$ vom Abschluss des Hohlleiters erreicht das elektromagnetische Feld in der Mitte des Hohlleiterquerschnitts ein Maximum (Abbildung 1a). Das magnetische Feld hat in derselben Ebene ein Maximum am Rand des Hohlleiters. (Abbildung 1b). Aus diesem Grund wird in der $\lambda/4$ -Ebene das Signal an den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Transponder ausgekoppelt.

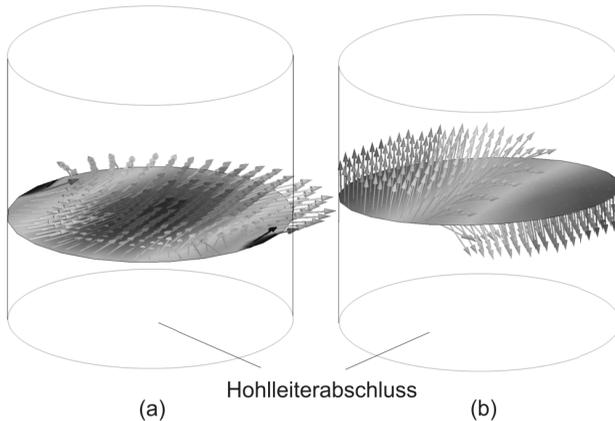


Abbildung 1: Schnitt durch das elektrische (a) und magnetische Feld (b) im Abstand von $\lambda/4$ vom Abschluss des Rundhohlleiters

3.1 Hohlleitergeometrie

Für den Einsatz der Kommunikationsstruktur ist es vorteilhaft diese möglichst klein zu gestalten. Ein kleines Einbauvolumen, insbesondere eine kleine Eingangsöffnung des Hohlleiters, ermöglichen erst die Integration in Bauteile.

In einem Rundhohlleiter können sich elektromagnetische Wellen nur ausbreiten, wenn dessen Radius r größer ist als der Radius r_{\min} .

$$r_{\min} = \frac{c \cdot t_{11}}{2\pi f \sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1)$$

Dabei ist $t_{11} \approx 1,841^1$. Die Konstante c ist die Lichtgeschwindigkeit. Die Permeabilität μ_r kann man für dielektrische Materialien als 1 annehmen. Das bedeutet, dass der Radius der Dielektrizitätszahl ϵ_r des Dielektrikums im Hohlleiters und von der Frequenz des Feldes f abhängt.

RFID Transponder arbeiten gewöhnlich bei einer Betriebsfrequenz im UHF-Bereich (868 / 915 MHz oder 2,45 GHz) oder mit niedrigeren Frequenzen. Um einen kleinen Hohlleiterdurchmesser zu erreichen wurde für die hier beschriebene Kommunikationsstruktur das 5,8 GHz-ISM-Band ausgewählt. Diese würde nach Gleichung (1) für einen luftgefüllten Hohlleiter immer noch einen Mindestdurchmesser von 30 Millimetern bedingen. Zur weiteren Verkleinerung ist es notwendig ϵ_r zu erhöhen, indem der Hohlleiter mit einem geeigneten dielektrischen Material ausgefüllt wird.

¹ t_{11} ist eine Konstante und ergibt sich aus der ersten Nullstelle der ersten Ableitung der Besselfunktion erster Ordnung

3.2 Dielektrische Füllstoffe

Als dielektrische Füllstoffe kommen hier Kunststoffe zum Einsatz, da diese leicht zu verarbeiten sind.

Glas oder Keramik sind hierfür zu spröde. Da die Dielektrizitätszahl ϵ_r von der Frequenz f abhängt, wurde mit Hilfe der Resonatormethode deren Wert bei 5,6 GHz bestimmt (Tabelle 1).

| Kunststoff | Dielektrizitätszahl bei 5,6 GHz |
|-------------|---------------------------------|
| PMP | 2,11 |
| PMMA | 2,66 |
| ABS | 2,71 |
| PC | 2,84 |

Tabelle 1: Dielektrizitätszahl ausgewählter Materialien bei 5,6 GHz

Polymethylpenten (PMP), auch TPX genannt, ist ein transparentes Thermoplast. Seine niedrige Dielektrizitätszahl führt zu geringen Reflexionsverlusten an der Grenzfläche zur Luft. Allerdings führt diese auch zu einem Hohlleiterradius von mehr als 10 Millimetern.

Polymethylmethacrylat (PMMA), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polycarbonat (PC) ermöglichen kleinere Radien. Für die ersten Prototypen wurde PMMA eingesetzt, da es von den drei Stoffen die höchste Transparenz für sichtbares Licht hat. Der Grund für diese Randbedingung wird in Abschnitt 4 erläutert.

3.3 Transponderschaltung

Elektronische Bauteile sind normalerweise für die Montage auf Leiterplatten ausgelegt. Daher musste eine Übergangsstruktur entwickelt werden, welche eine planare Schaltung an das Feld des Wellenleiters ankoppelt. Diese wurde am Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme der Leibniz Universität Hannover entwickelt [Kaldjob08].

In Abbildung 2 ist die Schaltung dargestellt. Der Transponder soll als Backscatter arbeiten, d.h. er soll Daten Übertragen indem er das Feld des Lesegeräts unterschiedlich belastet. Dies geschieht hier, indem durch das Anlegen und Abschalten des Ausgangs eines Mikrocontrollers (MCU) einwechselnde Verlustleistung über einem Lastwiderstand (R_1) erzeugt wird. Die für den Betrieb des Mikrocontrollers, eines PIC12F510 notwendige Leistung wird auch aus dem Feld bezogen. Um die Betriebsspannung von mindestens 1,6 Volt zu erreichen, wird die Wechselfspannung aus dem

Feld mit zwei Dioden (D1, D2) gleichgerichtet und mithilfe der beiden Kondensatoren (C1,C2) ein Spannungsverdoppler aufgebaut.

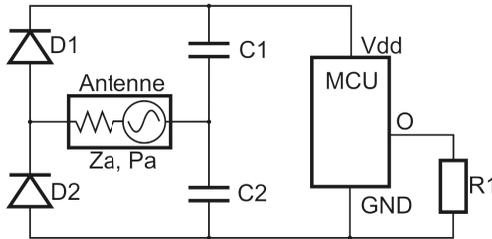


Abbildung 2: Transponderschaltung

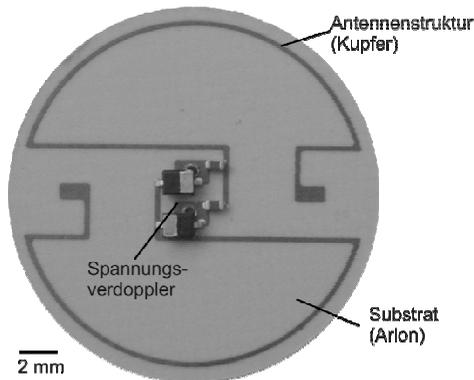


Abbildung 3: Bestückter Hohlleiter-zu-planar Übergang

Abbildung 3 zeigt die bestückte Platine mit der Antennenstruktur des Übergangs. Auf der sichtbaren Seite befinden sich die Bauelemente D1, D2, C1 und C2 während der Mikrocontroller und R1 auf der Rückseite platziert sind.

Da das System die gesamte Energie, die zum Betrieb notwendig ist, aus dem Feld bezieht, wird die Reichweite durch die maximale übertragbare Leistung beschränkt. Es wurden Reichweiten zwischen 50 cm (luftgefüllter Hohlleiter bei 2,4 GHz) und 20 cm (mit Dielektrikum gefüllter Hohlleiter bei 5,8 GHz) erreicht.

3.4 Sensorik

Für die Erfassung von Zustandsdaten im Bauteil werden im Rahmen des Sonderforschungsbereiches verschiedene Mikrosensoren und Mikrosensorarrays zur Temperatur- und Dehnungsmessung entwickelt [Griesbach08]. Durch den kleinen Bauraum lassen sich die Sensoren so am Bauteil integrieren, dass die Störungen der zu mes-

senden Größen sehr gering sind. Weitere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Herstellung substratloser Sensoren und -arrays. Durch den Einsatz lichtleitender Strukturen [Fahlbusch07] können die Daten von auf dem Bauteil verteilten Sensoren zum Mikrocontroller der Kommunikationsstruktur geführt werden, um von dort nach außen gesendet zu werden.

So können beispielsweise während der Bearbeitung wirkende Kräfte des Bauteils erfasst werden und so ein Rückschluss auf die Qualität der Bearbeitung und den Verschleiß von Maschinen und Werkzeugen gezogen werden.

Anwendungen in der Logistik finden sich bei zustandsüberwachenden Ladungsträgern. Beispielsweise kann Gießpfanne für Metallschmelzen mit einer integrierten Kommunikationsstruktur ausgestattet werden. Durch die elektrische Verknüpfung der Kommunikationsstruktur mit den in der Gießpfanne vorhandenen Temperaturfühlern könnte ein Gabelstapler, der die Gießpfanne in der Gießerei transportiert die Temperatur der Schmelze während des Transportes drahtlos erfassen und überwachen. Damit lässt sich das zu starke Abkühlen während des Transportes, aber auch einen Überhitzung vor dem Transportvorgang, welche zu Oxidbildung führen kann, vermeiden.

4 Integration

Die Kommunikationsstruktur besteht aus dem Rundhohlleiter in Form eines Sackloches im Werkstück, dem Rundhohlleiter-zu-planar-Übergang und zwei Zylinder aus dem Dielektrikum (Abbildung 4).

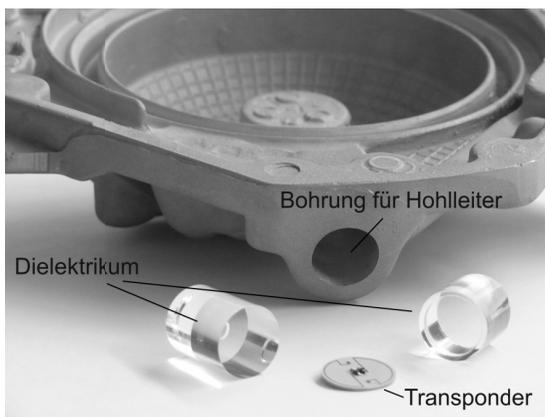


Abbildung 4: Komponenten der Kommunikationsstruktur

Als Prototyp dient ein Getriebedeckel, dessen Konstruktion zur Aufnahme der Kommunikationsstruktur angepasst wurde. Die Einzelteile der Struktur müssen zusammengefügt werden. Da die Oberfläche des Sackloches die Begrenzung des Rundhohlleiters bildet, kommt für die Montage keine formschlüssige Verbindung wie ein Gewinde in Frage. Das Dielektrikum wird daher mit dem Metall verklebt. Zunächst wird der Transponder zwischen den beiden Teilen des Dielektrikums mit Klebstoff zu einem Kommunikationsmodul vergossen. Dann wird Klebstoff auf dem Boden des Sackloches verteilt, wie in Abbildung 5 dargestellt. Anschließend wird der dielektrische Stab in das Sackloch gesteckt. Der Klebstoff wird verdrängt und an der Mantelfläche noch oben gepresst. Anschließend muss der Klebstoff aushärten.

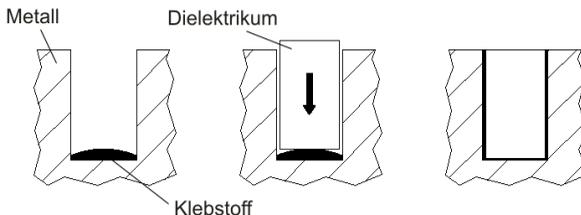


Abbildung 5: Montage des Kommunikationsmoduls

Es gibt verschiedene Möglichkeiten Klebstoffe auszuhärten. Das Aushärten des Klebstoffes durch die Verdunstung eines Lösungsmittels ist bei dieser Anwendung nicht möglich, da das Gas nicht entweichen kann. Klebstoffe, welche eine thermische Behandlung erfordern, wie z.B. Heißkleber oder wärmehärtende Klebstoffe, sind schwierig einzusetzen, da dafür das gesamte Bauteil erwärmt werden müsste, was vor allem bei größeren Bauteilen Schwierigkeiten bereitet. Die beiden Aushärtemethoden, die zum Einsatz kommen sind daher die Verwendung von zweikomponentigen Klebstoffen und die von lichthärtenden Klebstoffen.

4.1 Zweikomponentige Klebstoffe

Zweikomponentige Klebstoffe härten durch die chemische Reaktion der beiden Komponenten aus. Diese Komponenten müssen im richtigen Verhältnis gut durchmischt werden, um den Klebstoff optimal aushärten zu lassen. Während der Topfzeit, welche meist einige Minuten beträgt, nimmt die Viskosität beständig zu, bis keine Verarbeitung mehr möglich ist. Experimente haben gezeigt, dass es schwierig ist das Dielektrikum mit dem Metall im Sackloch zu verkleben. Bedingt durch die relativ hohe Viskosität ist eine große Kraft notwendig, um den Klebstoff in dem Spalt zwischen Metall und Dielektrikum zu pressen. Die hohe Viskosität führt zu Luft einschließen, auch das Mischen der beiden Komponenten führt zur Bläschenbildung. Desweiteren lassen sich Verunreinigungen der Oberfläche durch überschüssigen Klebstoff bei

zweikomponentigen Klebstoffen nicht spurlos entfernen, da die Polymerisation schon während der Verarbeitung beginnt. Vorteilhaft ist der geringe Schrumpf beim Aushärten, den zweikomponentige Klebstoffe in der Regel aufweisen.

4.2 Lichthärtende Klebstoffe

Lichthärtende Klebstoffe können genutzt werden, wenn das Dielektrikum für die zum Aushärten notwendigen Wellenlängen des Lichtes durchlässig ist. PMP ist sowohl für UV- als auch für sichtbares Licht transparent. PMMA und PC sind nur für sichtbares Licht durchlässig und fast undurchlässig für UV-Licht. ABS ist lichtundurchlässig. Da PMP zu einem größeren Hohlleiterdurchmesser führt, wurde PMMA als Dielektrikum für den Wellenleiter ausgewählt. Es ist transparenter als PC und die bearbeiteten Flächen können leicht mit entsprechenden Polierpasten poliert werden.

Mit Hilfe lichthärtender Klebstoffe wurden zunächst die elektronischen Bauteile des Hohlleiterübergangs im PMMA vergossen, um diese zu schützen, aber auch um Reflexion und Brechung der elektromagnetischen Welle durch Lufteinschlüsse zu vermeiden. Anschließend wird das PMMA mit dem Metall verklebt. Hierfür eignen sich von allen niedrig viskose Klebstoffe, da diese leichter die an der Mantelfläche des Zylinders nach oben gepresst und Luftblasen vermieden werden können. Nach dem Aushärten bilden sich jedoch sichtbare fraktal-ähnliche Strukturen heraus (Abbildung 6). Diese entstehen durch den Schrumpf der Acrylat-Klebstoffe, der zwischen 10 und 4 Prozent beträgt. Der Mangel an Material führt dann zum lokalen Versagen der Klebeverbindung. Hier müssen weitere Untersuchungen zeigen, welcher Klebertyp am besten geeignet ist.

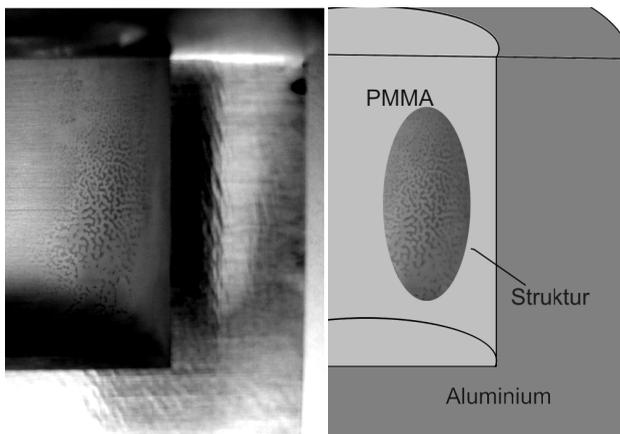


Abbildung 6: Querschnitt einer Klebprobe (als Fotografie und schematisch), bei der die durch Schrumpf entstehenden Strukturen erkennbar sind

5 Weiteres Vorgehen

Die weitere Entwicklung am Kommunikationsmodul zielt auf die Verkleinerung des Bauraums und die Erhöhung der Reichweite hin. Die Verkleinerung des Bauraums soll mit einer Erhöhung der Betriebsfrequenz erreicht werden. Dadurch und zur Erhöhung der Reichweite ergibt sich ein größerer Energiebedarf. Hierfür ist ein neues Energieversorgungskonzept notwendig, da eine Erhöhung der Sendeleistung des Lesegeräts nicht zulässig ist. Eine gerichtete Energieübertragung mit einer höheren Energiedichte ist mit Licht erreichbar. Durch den Einsatz der transparenten dielektrischen Füllstoffe kann Licht in den Hohlleiter eindringen. Hier müssen an geeigneten Positionen Fotoelemente platziert werden, um das Licht zu empfangen. In Abbildung 7 ist der Weg der Leistung ins Bauteil schematisch dargestellt.

Bei der Übertragung der Energie treten folgende Verluste auf:

Bei der Umwandlung von elektrischer Energie in Licht wird ein Teil der elektrischen Leistung in Wärme umgewandelt. Beim Einsatz von weißen LEDs werden beispielsweise nur 25 % der elektrischen Eingangsleistung in Licht, welches aus der Diode austritt, umgewandelt [Narukawa06]. Hier ist eine geeignete Lichtquelle zu wählen, abhängig vom benötigten Spektrum des Lichtes und der notwendigen Eingangsleistung.

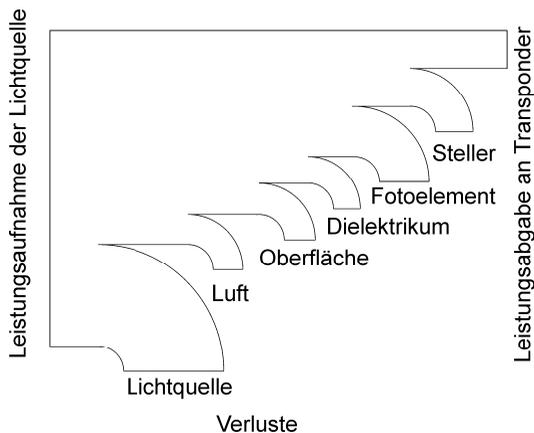


Abbildung 7: Verluste bei der Übertragung der Leistung von der Lichtquelle zum Transponder

Auf der Strecke durch die Luft wird das Licht gestreut. Die dadurch entstehenden Verluste auf der relativ kurzen Strecke vom Lesegerät zum Bauteil sind gering und beim Entwurf des Systems nur durch die Wahl der Wellenlänge des Lichtes beeinflussbar. Wesentlich größere Verluste entstehen dadurch, dass nur ein Teil des Lichtes in den Hohlleiter eindringt. Um keine exakte Positionierung des Bauteils zu benötigen, muss man in Kauf nehmen, dass ein Teil des Lichtes auf die Bauteiloberfläche neben dem

Hohlleiter trifft und somit die Fotoelemente nicht erreichen kann. Hier muss ein Zielkonflikt zwischen Positioniergenauigkeit des Bauteils vor dem Lesegerät und Übertragungsverlusten gelöst werden.

Beim Eintritt in den Hohlleiter findet eine teilweise Reflexion des Lichtes an der Grenzfläche statt. Hier ist denkbar, diese durch eine Antireflexbeschichtung zu reduzieren.

Im Hohlleiter streut und absorbiert das Dielektrikum Licht. Außerdem wird Licht an den Grenzflächen des Metalls diffus reflektiert. Im Dielektrikum eingebettet ist außerdem der Hohlleiterübergang (Abbildung 3). Diese muss nun auf einem transparenten Substrat hergestellt werden, um das Licht passieren zu lassen. Die Leiterbahnen und die elektrischen Bauelemente blockieren aber weiterhin Teile des Lichts. Deren Einfluss soll durch eine in den Hohlleiter integrierte Optik minimiert werden.

Nur ein kleiner Teil des Lichtes erreicht die aktive Fläche der Fotodioden, welche einen Teil der einfallenden Strahlung in elektrische Energie umwandeln. Am effektivsten ist die Umwandlung von Licht mit Wellenlängen etwas oberhalb der Bandlücke. Für Silizium-Fotodioden liegt diese etwa bei 1 μm und somit im nahen Infrarotbereich.

Abhängig von der Ausgangsspannung der Fotoelemente müssen diese entweder in Reihe geschaltet werden, um die Betriebsspannung der Schaltung von zwei Volt zu erreichen, oder es muss eine Aufwärtswandlung mithilfe eines Gleichstromstellers erfolgen. Hierfür ist im ersten Fall eine gleichmäßige Beleuchtung der Fotoelemente notwendig, da das am schlechtesten beleuchtete Element den Fotostrom bestimmt bzw. den Reihenwiderstand erhöht. Im Fall des Stellers muss dessen Wirkungsgrad beachtet werden. Dieser liegt bei Stellern für niedrige Eingangsspannung, wie dem Texas Instruments TPS61201 bei ca. 50 % [T108].

Der Schwerpunkt der zukünftigen Forschung am Institut für Transport- und Automatisierungstechnik der Leibniz Universität Hannover wird daher die Quantifizierung und Minimierung der Übertragungsverluste auf der Energieübertragungsstrecke unter Berücksichtigung der zu integrierenden elektronischen Komponenten sein. Die höhere Übertragungsfrequenz des Transponder, welche durch die zusätzliche Energie erreicht werden kann, wird zu einem kleineren Raumbedarf der Kommunikationsstruktur führen. Es wird die Integration in kleinere Bauteile und somit die Anwendung auf eine größere Bauteilpalette ermöglicht.

Literatur

[Denkena07]

Denkena, B.; Battino, A.; Lorenzen L.-E.; Schmidt C.: Simulation based process planning for gentelligent production. 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems (IPROMS), 2007.

[Nyhuis09]

Nyhuis, P.; Schulze, C.P.; Hartmann, W.; Schmidt, M.; Herde, F.: Bauteilgetriebene Montagesteuerung und Fabrikstrukturierung durch Nutzung gentelli-

- gener Technologies. GITO Verlag, Industrie Management, Ausgabe 4, Berlin 2009
- [Jungk07] A. Jungk, L. Overmeyer: Der Stapler als RFID-gestütztes, mobiles Gate in der Intralogistik. 14. Heidelberger Flurförderzeug-Tagung; VDI-Berichte 1977, S. 1-11. Düsseldorf: VDI Verlag, 2007.
- [Kaldjob08] Kaldjob, E.B.; Geck, B.: A low-cost 2.45/5.8 GHz ISM-band rectifier for embedded low-power systems in metallic objects. German Microwave Conference 2008 (GeMiC), 2008.
- [Griesbach08] Griesbach, T.; Gatzen H.-H.: Herstellung und Untersuchung aufgedampfter Funktionsschichten zum Einsatz in modularen Mikrosensoren. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, vol. 39, no. 12, pp. 944-946, 2008.
- [Fahlbusch07] Fahlbusch, T: Dispensieren polymerer Lichtwellenleiter. PZH, Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen, 2007.
- [Narukawa06] Narukawa, Y.; et al: Ultra-high efficiency white light emitting diodes. Japanese journal of applied physics, vol. 45, no. 41, pp. L1084,2006.
- [TI08] Texas Instruments Incorporated, Low input voltage synchronous boost converter with 1.3-A-switches. February 2008, Datasheet.

Simulation von kognitiven Transportmodulen in Materialflusssystemen

*Dipl.-Ing. Gerd Heiserich, Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer
Institut für Transport- und Automatisierungstechnik
Leibniz Universität Hannover*

Abstract: Dieser Beitrag beschreibt einen Ansatz zur Steuerung von Materialflusssystemen, die aus räumlich verteilten und miteinander vernetzten Einzelmodulen zusammengesetzt sind. Diese Teilsysteme sind in der Lage, eigene lokale Entscheidungen zu treffen, wobei sich aus den jeweiligen Einzelstrategien das erwünschte globale Systemverhalten ergeben soll. Anhand eines Simulationsmodells werden die Auswirkungen verschiedener lokaler Verhaltensstrategien auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems untersucht und gezeigt, dass effiziente Strategien durch den Einsatz von Lernverfahren systematisch gefunden werden können.

1 Einleitung

Die immer stärkere Individualisierung von Produkten und die stetig steigende Anzahl von Produktvarianten haben zu dem Bestreben geführt, wandelbare Fertigungs- und Transportsysteme in Produktion und Logistik aufzubauen [1]. In einem Versorgungsnetzwerk können zahlreiche unvorhergesehene Ereignisse eintreten, die das gesamte Netzwerk beeinflussen. Beispiele sind Änderungen der nachgefragten Mengen, Störungen durch den Ausfall von Produktionsanlagen oder mit Unsicherheiten behaftete Transportzeiten zwischen Produktionsstätten durch schwankendes Verkehrsaufkommen. Materialflusssysteme müssen daher zukünftig schnell und flexibel auf sich ändernde Bedingungen reagieren können [2]. Grenzen globaler Planungsstrategien ergeben sich aus der hohen Komplexität realer Anwendungsszenarien. Eine kontinuierliche Neuplanung von Abläufen auf operativer Ebene ist mit sehr hohem Aufwand verbunden und führt in der Regel nur näherungsweise zu einem globalen Optimum.

Bei vielen Lebewesen kann man beobachten, dass diese auch in komplexen Umgebungen ein günstiges Verhalten zeigen, ohne dass der Grad der Komplexität oder die genauen Wirkzusammenhänge der Umgebung dem Lebewesen explizit bekannt wären. Menschen sind sehr gut in der Lage, auch ohne detaillierte Analyse näherungsweise optimale Lösungen für ihnen zuvor unbekannte Probleme zu finden. Dies geschieht offenbar auf der Basis von Mechanismen wie der Bildung von Analogien zu bekannten ähnlichen Situationen und dem Ableiten neuer Schlussfolgerungen aus bereits vorhandenem Wissen. Solche Eigenschaften und Fähigkeiten werden in der Psychologie als kognitiv bezeichnet. Mit der Umsetzung derartiger Mechanismen in

technischen Systemen beschäftigt sich der Wissenschaftszweig der künstlichen Intelligenz. In diesem Beitrag werden insbesondere Methoden des bestärkenden Lernens (Reinforcement Learning) [3] eingesetzt, um günstige Strategien für Teilsysteme der Materialflusstechnik in komplexen Umgebungen systematisch zu ermitteln.

In den folgenden Abschnitten wird beleuchtet, wie sich Materialflusssysteme als verteilte Entscheidungsprozesse darstellen und simulieren lassen. Weiterhin wird am Anwendungsbeispiel eines Umschlagknotens dargestellt, in welcher Weise die Verhaltensweisen einzelner Teilsysteme mit der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems in Beziehung stehen.

2 Grundlagen von Entscheidungsprozessen

Aus informationstechnischer Sicht kann ein technisches System als Zustandsautomat aufgefasst werden. Das bedeutet, dass der interne Zustand des Systems durch einen einzelnen Wert oder ein Tupel aus mehreren Werten vollständig beschrieben werden kann. Für einen Gelenkarmroboters ist der Systemzustand etwa die Position jedes seiner einzelnen Gelenke, für ein Transportband seine aktuelle Geschwindigkeit (vorzeichenbehaftet). Durch externe oder interne Steuersignale („Aktionen“) verändert sich der Zustand des Systems. Formal lässt sich dieser Zusammenhang als Zustandsübergangsfunktion f darstellen:

$$f : S \times A \rightarrow S$$

bzw.

$$f(s_k, a_k) = s_{k+1}$$

Dabei ist S die Menge aller möglichen Systemzustände, A die Menge aller möglichen Aktionen. Jedem Paar (s_k, a_k) mit $s_k \in S$ und $a_k \in A$ wird also ein Folgezustand $s_{k+1} \in S$ zugeordnet. Außerdem ist jede Aktion mit Kosten (oder Gewinnen = negativen Kosten) verbunden, die mit r_k bezeichnet werden. Dieses erlaubt eine Bewertung der Qualität eines bestimmten Verhaltens bzw. den Vergleich verschiedener Verhaltensweisen.

Ein Entscheidungsprozess ist demnach eine Kette von Zustandsübergängen aufgrund zeitlich nacheinander erzeugter und vom System verarbeiteter Aktionen. In Abbildung 1 ist eine solche Kette als Graph dargestellt, wobei Systemzustände durch Knoten und Zustandsübergänge durch Kanten repräsentiert sind.

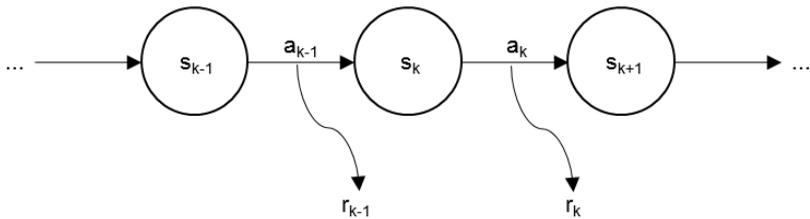


Abbildung 1: Entscheidungsprozess als Zustandsübergangsgraph

Handelt es sich beim Systemzustand um ein n -Tupel, so kann die Menge aller Zustände auch als n -dimensionaler „Zustandsraum“ aufgefasst werden. Die Aktionen führen zu Bewegungen in diesem Zustandsraum. Die Größe des Zustandsraums $|S|$ ist einerseits von der Anzahl seiner Dimensionen, andererseits von der Anzahl der möglichen Belegungen in jeder Komponente abhängig.

Ist die Wahrscheinlichkeit einen Zustand s_{k+1} von Zustand s_k aus zu erreichen nur von s_k selbst abhängig und nicht von dessen Vorgängern (d.h. von der „Vorgeschichte“), so besitzt der Entscheidungsprozess die Markow-Eigenschaft und wird daher auch als Markow-Entscheidungsprozess (engl. Markov Decision Prozess, MDP), bezeichnet. Das Ziel der Entscheidungstheorie besteht nun darin, eine Zuordnung zu finden, die jedem Zustand eine hinsichtlich der anfallenden Gesamtkosten $R = \sum r_k$ optimale Aktion zuordnet:

$$\pi : S \rightarrow A$$

Diese Zuordnung wird als „Strategie“ bezeichnet. Ist eine solche Strategie vollständig bekannt, so kann das System in jedem Zustand stets die optimale Aktion ermitteln und ausführen.

Reale Systeme wie zum Beispiel Materialflusssysteme im Bereich der Produktion und Logistik sind aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten zusammengesetzt. Dies hat nach der oben beschriebenen Betrachtungsweise extrem große Zustandsräume zur Folge: Für ein Gesamtsystem, das beispielsweise aus sechs gleichartigen Einzelkomponenten zusammengesetzt ist, von denen jedes lediglich zehn interne Zustände annehmen kann, beträgt die Größe des Zustandsraums bereits $|S| = 10^6 = 1.000.000$. Diese Zahl steigt exponentiell mit der Anzahl der Teilkomponenten an. Dieser Effekt wird auch als „kombinatorische Explosion“ bezeichnet. Selbst für scheinbar überschaubare reale Anordnungen gelangt man leicht in Größenordnungen von 10^{20} und mehr möglichen Systemzuständen [4], was auch mit heute verfügbaren Computersystemen nicht mehr beherrschbar ist.

In [5] wird beispielsweise das Problem der Steuerung eines Distributionszentrums einschließlich der vor- und nachgelagerten Prozesse wie Tourenplanung und Torbelegung detailliert untersucht. Die Evaluierung zeigt, dass ein zentral-hierarchisches Verfahren aufgrund der hohen Komplexität des Problems und der daraus resultierenden langen Rechenzeiten der Optimierungsverfahren nur begrenzt zur Planung operativer Prozesse eingesetzt werden kann. Im Gegensatz dazu erweist sich in diesem Anwendungsfall die Verwendung eines dezentral-heterarchischen Verfahrens auf der Basis kombinatorischer Auktionen als sehr erfolgreich.

Allgemein gilt, dass herkömmliche exakt arbeitende Planungs- und Optimierungsverfahren bei komplexen Gesamtsystemen versagen, da das Auffinden optimaler Zielzustände in einem derartig großen Zustandsraum in der Regel nicht garantiert werden kann. Stattdessen werden heute Heuristiken verwendet, die mit vertretbarem Rechenaufwand eine näherungsweise optimale Lösung finden.

3 Materialflusssysteme als hierarchische Entscheidungsprozesse

Steuerungssysteme sind in aller Regel hierarchisch aufgebaut, wobei mindestens zwischen Planungsebene, Leitebene, (Maschinen-)Steuerungsebene und Prozessebene unterschieden wird [6]. Entscheidungsprozesse können prinzipiell auf jeder dieser Hierarchieebenen ablaufen, wobei jede Ebene eigene Zustandsräume und Aktionsmengen besitzt [7]. Die Zustandsübergänge einer Ebene hängen jedoch von den Abläufen auf der in der Hierarchie darunter liegenden Ebene ab.

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2 grafisch veranschaulicht: Ein Beispiel für einen in der obersten Hierarchieebene angesiedelten Entscheidungsprozess ist ein kompletter Warenumschlagknoten mit einer Zustandsübergangsfunktion f_1 und dem zugehörigen Zustandsraum S_1 und der Aktionsmenge A_1 . Die Zustandsübergänge hängen vom Verhalten der in dem Umschlagknoten agierenden Transporttechnik (Stetig- und Unstetigförderer) ab. Diese sind ihrerseits jeder für sich durch eine andere Zustandsübergangsfunktion f_2 und andere Zustandsräume S_2 und Aktionsmengen A_2 gekennzeichnet. Die Übergangsfunktion f_2 hängt wiederum vom Verhalten der Systemkomponenten (z.B. einzelner Fördermodule) ab, die in der Abbildung die mit f_3 bezeichnete Übergangsfunktion besitzen.

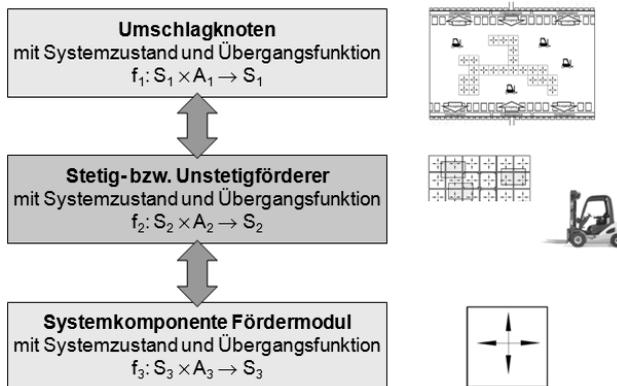


Abbildung 2: Hierarchische Entscheidungsprozesse am Beispiel eines Umschlagknotens [7]

Es ergibt sich die Frage, wie die Übergangsfunktionen der untersten Ebene zu wählen sind, damit ein bestimmtes gewünschtes globales Verhalten des Gesamtsystems erreicht wird bzw. in welcher Weise sich Strategien der Systemkomponenten auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems auswirken. Im den folgenden Abschnitten wird vorgestellt, wie durch Simulation der Einzel-Strategien Aussagen über das Verhalten des Gesamtsystems getroffen werden können.

4 Anwendungsszenario und Simulationsumgebung

Als Anwendungsbeispiel für die im Folgenden dargestellten Untersuchungen dient ein spezielles Warenumschlag-Szenario, nämlich das einstufige Crossdocking. Darunter wird der Umschlag von logistischen Einheiten wie z.B. Standard-Ladungsträgern in einem bestandslosen Distributionszentrum verstanden, wobei die Einheiten bereits vom Lieferanten vorkommissioniert geliefert werden und somit Prozesse der Ein- und Auslagerung und der Kommissionierung entfallen.

Innerhalb des Umschlagknotens werden die Transportaufgaben durch flurgebundene Unstetigförderer wie zum Beispiel Gabelstapler ausgeführt. Transporteinheiten werden an den Wareneingangspunkten (Quellen) angeliefert und müssen entsprechenden Wareneingangspunkten (Senken) zugeordnet und dorthin transportiert werden, wie in Abbildung 3 veranschaulicht ist.

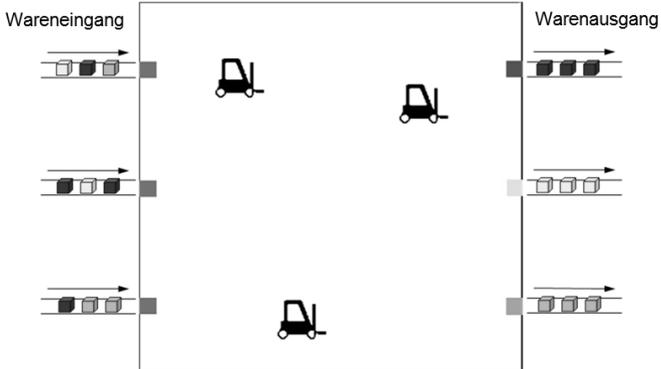


Abbildung 3: Simulationsmodell Crossdocking mit Unstetigförderern

Die Ankunftszeiten des Zulieferverkehrs (z.B. LKW) an Ein- und Ausgangspunkten sind im Voraus nur grob in Form von Zeitfenstern bekannt. Insbesondere kann der Fall eintreten, dass einzelne LKW den Ablaufplan nicht einhalten können und es zu Änderungen der geplanten Reihenfolge und der geplanten Torbelegung kommt. Die Aufgabe des Umschlagknotens als Gesamtsystem besteht dann darin, flexibel auf solche Planänderungen zu reagieren und trotz der im Voraus nur ungenau bekannten Randbedingungen zu versuchen, einen hinsichtlich eines vorgegebenen Optimierungskriteriums günstigen Ablauf umzusetzen.

Das erstellte Simulationsmodell bietet die in der folgenden Tabelle aufgezählten Eingangs- und Ausgangsparameter:

| | |
|---|---|
| <p>Eingangsparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anzahl Fahrzeuge • Anzahl Quellen • Anzahl Senken • Auftragsaufkommen | <p>Ausgangsparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anzahl wartender Transportaufträge an den Quellen • Mittlere Wartezeit der Aufträge bis zur Abholung • Durchsatz |
|---|---|

Die Simulation beruht auf einer zeitdiskreten Betrachtungsweise, wobei in jedem Zeitschritt Ereignisse eintreten und Aktionen ausgeführt werden können. Externe Ereignisse, die sich auf den Systemzustand auswirken, sind das Erscheinen von Transportaufträgen an den Quellpunkten. Da das Verhalten unter wechselnden bzw.

unbekannten Randbedingungen untersucht werden soll, wurde explizit kein Vorwissen über die Ankunftszeitpunkte von Transportaufträgen vorausgesetzt. Vielmehr werden die Aufträge an den Quellen in jedem Zeitschritt zufällig mit einer als Parameter wählbaren Wahrscheinlichkeit λ (mittleres „Auftragsaufkommen“ pro Zeiteinheit) generiert. Dies entspricht gerade dem aus der Bedienungstheorie bekannten Poisson-Prozess. Entscheidungen über die nächste Aktion müssen jeweils durch die Fahrzeuge selbst getroffen werden. Dies ist immer dann erforderlich, wenn ein Auftrag mit der Auslieferung einer Transporteinheit an einer Senke abgeschlossen wurde. Dann muss entschieden werden, welche Quelle als nächstes bedient werden soll, wobei die Anzahl wartender Aufträge, der Zustand der anderen Fahrzeuge und die zurückzulegende Wegstrecke berücksichtigt werden können.

Als Ausgangsparameter stehen die Anzahl wartender Transportaufträge an den Quellen, die mittlere Wartezeit der Aufträge bis zur Abholung sowie der Durchsatz zur Verfügung, die eine Bewertung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems Umschlagknoten zulassen. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen gilt die Annahme, dass ein Fahrzeug nur in Lage ist, jeweils eine Transporteinheit gleichzeitig zu transportieren, so dass keine Auslieferung von Aufträgen an mehreren Zielpunkten und damit keine Tourenplanung erforderlich wird.

Für die Implementierung wurde das Softwarewerkzeug NetLogo ausgewählt, das zur Verhaltenssimulation von Multiagentensystemen entwickelt wurde [8]. Es bietet die Möglichkeit einer einfachen Visualisierung der Abläufe sowie umfangreiche Analysefunktionen, darunter die Möglichkeit, die Eingangsparameter in definierbaren Grenzen und mit definierbarer Schrittweite automatisch variieren zu lassen (Behavior Space), zu jeder Kombinationsmöglichkeit Testläufe ablaufen zu lassen und die Ergebnisse in einer Tabelle zu sammeln. Auf diese Weise erzeugte Tabellen bilden die Grundlage der in Abschnitt 6 dargestellten Auswertungen.

5 Transportstrategien

5.1 Implementierung einfacher Heuristiken

Zum Vergleich mit dem in Abschnitt 5.2 entwickelten Lernverfahren wurden zunächst zwei einfache Heuristiken für die Entscheidungsfindung implementiert:

Strategie 1: Nach Abarbeitung eines Transportauftrags erfolgt eine Leerfahrt zur nächstgelegenen nicht leeren Quelle. Durch das als gleichmäßig über alle Zielpositionen verteilt angenommene Aufkommen und die symmetrische Anordnung der Übergabepunkte werden somit im statistischen Mittel auch alle Quellen gleich oft bedient. Diese Vorgehensweise sollte die Gesamtlänge der Leerfahrten der Fahrzeuge minimieren.

Strategie 2: Nach Abarbeitung eines Transportauftrages erfolgt eine Leerfahrt zu derjenigen Quelle, an der die Anzahl der wartenden Aufträge am höchsten ist, auch wenn diese Quelle räumlich weiter entfernt liegt als andere Quellen. Durch diese Vorgehensweise sollte sich eine gleichmäßige Anzahl der an den Quellpunkten wartenden Aufträge ergeben und im Rahmen des Zufallsprozesses auftretende Spitzen aufgefangen werden.

5.2 Implementierung eines Lernverfahrens

Neben den beiden beschriebenen manuell umgesetzten Strategien wurde außerdem ein Lernverfahren implementiert, das in der Lage ist, ohne jegliche Vorgaben selbstständig Verhaltensregeln zu lernen. Dieses Verfahren basiert auf dem Q-Learning-Algorithmus, der in [9] erstmals vorgestellt wurde und in [3] erläutert und in den Kontext anderer Reinforcement-Learning-Methoden eingeordnet ist. Der Algorithmus beruht auf einer Bewertungsfunktion $Q: S \times A \rightarrow \mathbb{R}$, die jedem Systemzustand $s \in S$ und jeder Aktion $a \in A$ eine reelle Zahl zuordnet, die eine Bewertung der Qualität der Aktion a im Zustand s angibt. Diese Bewertungsfunktion wird nun gelernt, indem der Zustandsraum kontinuierlich durchlaufen und anhand der akkumulierten Kosten r die Bewertungen $Q(s, a)$ iterativ angepasst werden. Werden alle Zustände $s \in S$ hinreichend oft besucht, so konvergiert das Verfahren gegen den wahren Wert $Q^*(s, a)$. In der Praxis kann abgebrochen werden, sobald sich das Systemverhalten von einem Iterationsschritt zum nächsten nicht mehr sehr stark ändert. Wurde die Bewertungsfunktion auf diese Weise approximiert, so folgt daraus direkt eine Strategie, indem in jedem Zustand die am höchsten bewertete Aktion ausgeführt wird:

$$\pi(s) = \arg \max_a Q(s, a)$$

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde zunächst eine sehr einfache Konfiguration gewählt:

- Anzahl der Quellen = 2,
- Anzahl der Senken = 2,
- Anzahl der Fahrzeuge = 3.

Durch starke Diskretisierung der zugehörigen Zustandsmengen konnte die Größe des Zustandsraums $|S|$ des Gesamtsystems dahingehend reduziert werden, dass die vollständige Bewertungsfunktion $Q(s, a)$ in Form einer Entscheidungs-Tabelle der folgenden Gestalt im Speicher gehalten werden kann:

| Zustand Fahr- zeug 1 | Zustand Fahr- zeug 2 | Zustand Fahr- zeug 3 | Anzahl wartender Aufträge Quelle 1 | Anzahl wartender Aufträge Quelle 2 | Aktion | Bewertung $Q(s, a)$ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---|---|--------|------------------------|
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

6 Simulationsergebnisse

Die Q-Tabelle wird zu Beginn mit dem Wert Null für alle Einträge initialisiert, d.h. dem System ist zunächst keine Bewertung der Zustands-Aktions-Paare bekannt. Der Verlauf der mittleren Wartezeit der Transportaufträge während des Lernprozesses ist in Abbildung 4 dargestellt. Bereits nach etwa 500.000 Lernschritten ist zu beobachten, dass die mittlere Wartezeit gegen einen Wert strebt, der deutlich geringer ist als die in der Anfangsphase erreichten Wartezeiten. Das Verhalten verbessert sich also durch die Aktualisierung der Bewertungsfunktion kontinuierlich.

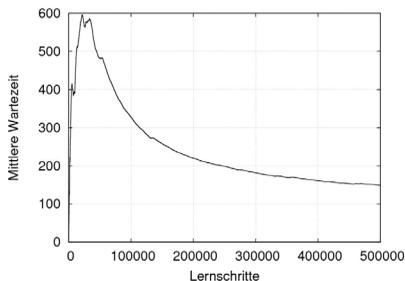


Abbildung 4: Lernverlauf des Q-Learning-Verfahrens

In Abbildung 5 ist das Systemverhalten in Abhängigkeit vom Eingangsparameter λ (Auftragsaufkommen) für die beiden manuell implementierten Strategien 1 und 2 sowie für das Lernverfahren dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Strategie 2 im unteren Auslastungsbereich ein besseres Verhalten zeigt als die Strategie 1, während es sich um oberen Auslastungsbereich umgekehrt verhält. Das Lernverfahren zeigt im Bereich mittlerer und hoher Auftragsaufkommen die beste Leistungsfähigkeit aller untersuchten Strategien. Lediglich bei sehr geringem Auftragsaufkommen ist die Strategie 2 geringfügig besser geeignet. Diese Simulationsergebnisse wurden nach einer Lernphase von 5 Mio. simulierten Lernschritten ermittelt und repräsentieren die Mittelwerte nach 100.000 Schritten über jeweils 50 Durchläufe.

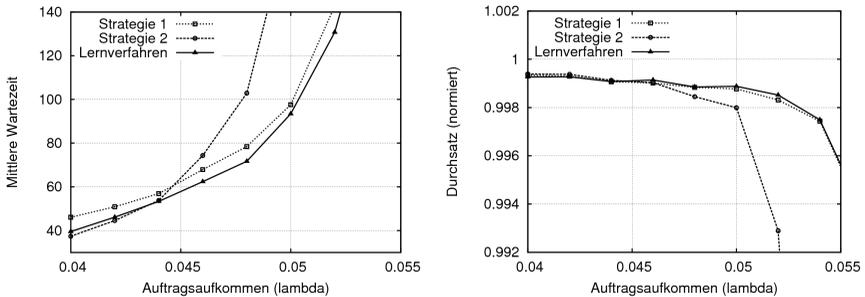


Abbildung 5: Mittlere Wartezeit und Durchsatz für verschiedene Transportstrategien

7 Zusammenfassung

In den hier beschriebenen Untersuchungen wurde ein Materialflusssystem als verteilter Entscheidungsprozess modelliert und simuliert. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand die Frage, wie sich lokale Verhaltensstrategien der Teilsysteme auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems auswirken und wie günstige Verhaltensstrategien auch für komplexe Umgebungen systematisch ermittelt werden können.

Als Resultat kann festgehalten werden, dass das implementierte Lernverfahren bereits nach einer recht kurzen Lernphase ein Verhalten zeigt, bei dem sich für die meisten Situationen eine kürzere mittlere Wartezeit und ein höherer Durchsatz ergibt als bei den beiden manuell implementierten Heuristiken. Dabei ist hervorzuheben, dass beim Lernen keinerlei Vorkenntnisse über die Problemstruktur vorausgesetzt wurden und dem Lernprozess kein Modell der Umgebung zur Verfügung stand, sondern lediglich Rückmeldungen der Form „Erfolg“ (bei Aufnahme einer Transporteinheit) bzw. „Misserfolg“ (im Fall von Wartezeiten ohne Aktivität) gegeben wurden.

Das Ziel weiterer Arbeiten auf diesem Gebiet besteht darin, ähnliche Methoden auch auf komplexere – ggf. aus verschiedenartigen Transportelementen kombinierte – Szenarien anzuwenden, bei denen der Mensch nicht mehr ohne Weiteres überblicken kann, wie günstige Strategien aussehen. Problematisch ist dabei die Behandlung der dabei auftretenden extrem großen Zustandsräume. Eine explizite Repräsentation der Bewertungsfunktion in Form einer Tabelle ist dann nicht mehr möglich. Es müssen daher geeignete Methoden zur Approximation der Bewertungsfunktion gefunden und evaluiert werden.

Literatur

- [1] Günthner, W. A.; Durchholz, J.; Kraul, R.; Schneider, O.: Technologie für die Logistik des 21. Jahrhunderts. In: Wimmer, T.; Wöhner, H. (Hrsg.): 25. Deutscher Logistik-Kongress (Tagungsband). Deutscher Verkehrs-Verlag Hamburg, 2008, S. 360-393.
- [2] Wilke, M.: Dezentral steuern, zentral kommunizieren – Ein Steuerungskonzept für wandelbare Materialflusssysteme. In: Logistics Journal 2008.
- [3] Sutton, R.; Barto, A.: Reinforcement Learning – An Introduction. MIT Press, Cambridge (MA), 1998.
- [4] Crities, R. H.; Barto, A.: Improving Elevator Performance Using Reinforcement Learning. In: Touretzky, Mozer, Hasselmo (Hrsg.): Advances in Neural Information Processing Systems 8. MIT Press, Cambridge (MA), 1996.
- [5] Stickel, M.: Planung und Steuerung von Crossdocking-Zentren. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, 2006.
- [6] Pritschow, G.: Einführung in die Steuerungstechnik. Hanser Fachbuch, 1. Aufl. 2005.
- [7] Overmeyer, L.; Heiserich, G.; Falkenberg, S.; Jungk, A.: Automatische Konfiguration und Optimierung von Materialflusssystemen durch kognitive Logistikmodule. In: VDI-Berichte Band 2066, 18. Deutscher Materialfluss-Kongress, München, 2009, S. 197-208.
- [8] Wilensky, U.: NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston (IL), 1999.
- [9] Watkins, C.J.C.H.: Learning from delayed rewards. PhD Thesis, University of Cambridge (England), 1989.

Beitrag zur Funktion und Dimensionierung von Puffern

Dipl.-Ing. Ayman Al Khateeb

Technische Universität Ilmenau

Institut für rechnerunterstützte Produktion

Fachgebiet Fabrikbetrieb

Abstract: Zur Vermeidung bzw. Verminderung der negativen Wirkungen der stochastischen Taktzeiten auf den Durchsatz in Fließproduktionssystemen werden die Bearbeitungsstationen durch Puffer entkoppelt. Um die Installierung der Puffer wirtschaftlich zu machen, sind die optimalen Pufferkapazitäten zu berechnen.

Dafür werden zwei Methoden zur Beschreibung von Materialflusssystemen und zur Ermittlung der optimalen Pufferkapazitäten in diesem Beitrag dargestellt. Diese Methoden sind die Simulation und die bedientheoretische Methode.

Die Ursachen der stochastischen Prozesse, die Pufferarten und Pufferfunktionen sind auch in diesem Beitrag behandelt.

1 Einleitung

Unter der Benutzung des Fließprinzips werden die Bearbeitungsstationen nacheinander gemäß der Arbeitsfolge so verbunden, dass jedes Werkstück an jeder Station planmäßig nur einmal bearbeitet wird.

Je nach der Verkettungsart kann der Materialfluss zwischen den Stationen synchronisiert (starre Verkettung) oder asynchronisiert (elastische und lose Verkettung) sein. Im Fall einer starren Verkettung werden die Werkstücke an allen Stationen simultan transportiert. Wenn eine Störung an einer Station auftritt, müssen alle anderen Stationen auf die Behebung dieser Störung warten, um die Werkstücke weiterzugeben. Bei der elastischen und losen Verkettung wird dieses Problem erheblich vermindert, so dass Pufferanlagen bzw. Zwischenspeicher zur Entkopplung von Stationen ausgerüstet werden.

Die Hauptaufgabe dieser Puffer besteht darin, möglichst die Verlustzeiten aufzufangen, die infolge der stochastischen Schwankungen von Bearbeitungszeiten entstehen. Bei manuellen Arbeiten sind z.B. unzählbare zufällige Schwankungen der Taktzeiten zu erwarten. Weiterhin kann auch die Entstehung von Störungen an automatisierten Stationen zu Stillständen einer Fließproduktionslinie (FPL) führen.

Die Fähigkeit eines Puffers, die entstehenden Verlustzeiten zu vermindern bzw. zu vermeiden, basiert i.d.R. auf der Pufferkapazität, so dass sich die Durchlaufzeit mit wachsender Puffergröße reduziert und dadurch der Durchsatz erhöht. Weiterhin führt die Erhöhung der Pufferkapazitäten zur Vergrößerung des Bestandes und daher zur Steigerung der Kapitalbindung im Pufferbestand.

Das Hauptziel dieses Beitrages ist die Abschätzung bzw. Berechnung der optimierten Puffergröße zur Erhöhung des Durchsatzes bei reduzierten Pufferkosten in den FPL. Dafür werden die Simulation und die analytische Methode zur Untersuchung von FPL verwendet.

2 Stochastische Prozesse

An Handarbeitsplätzen können zahlreiche Einflussgrößen zu Schwankungen der Bearbeitungszeiten führen. Einerseits können diese Größen von der Qualifikation der Arbeiter abhängig sein. Die praktischen Erfahrungen, Arbeitszufriedenheit bzw. Motivation, Müdigkeit aufgrund einer Krankheit oder des Schlafbedürfnisses spielen eine große Rolle bei der Erfüllung der Arbeit. Andererseits haben die Randbedingungen, wie Arbeitsatmosphäre oder der Unterschied in der Arbeitspräzision große Einflüsse auf die Arbeitsproduktivität. In diesem Fall kann die Verteilung der Bearbeitungszeiten wie in der Abbildung 1 dargestellt werden (siehe [1]).

Bei der voll automatisierten FPL treten häufig auch kurzfristige Störungen an den Bearbeitungsstationen auf. Ursachen dieser Störungen in der Fertigung können zufällige Brüche von Werkzeugen oder die Herstellung fehlerhafter Teile (Ausschuss) sein (siehe [2]). In der Montage treten aber am häufigsten Störungen bei den Zuführungssystemen auf (siehe [3]).

Wenn einer der erwähnten stochastischen Prozesse entsteht, treten Blockierung bzw. Wartezeiten an den Vorgänger- bzw. Nachfolgestationen auf.

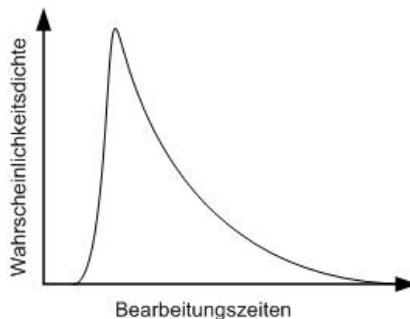


Abbildung 1: Verteilung der Taktzeiten an Handarbeitsplätzen

3 Pufferfunktionen

Abhängig von den Ursachen der stochastischen Prozesse kann man die Puffer bezüglich ihres Verwendungszwecks in Ausgleichspuffer und Störungspuffer einteilen. Diese Einteilung wird noch zur Vereinfachung der Ableitung der optimierten

Puffergrößen in diesem Beitrag benutzt. Die Ausgleichspuffer befinden sich zwischen den Bearbeitungsstationen (meist manuell) zur Überbrückung der Wirkungen von schwankenden Taktzeiten auf den Durchsatz.

Bei der Automatisierung sind aber die Stationsverfügbarkeiten meist unterschiedlich, deshalb sind hier Störungspuffer notwendig, um die Folgen der Störungen aufzufangen. Außerdem können auch die benutzten Puffer gleichzeitig zu den Ausgleich- und Störungspuffern gehören.

Zusätzlich zur Pufferung von Werkstücken können die Puffer, wie z.B. Rollenbahnen, Transportaufgaben erfüllen.

In [4] werden die Puffer in vier Arten unterschieden (vgl. die Abb. 2):

- Durchlaufpuffer bzw. Umlaufpuffer entkoppeln die Bearbeitungsstationen in linearen bzw. nicht linearen FPL (Abb. 2.a bzw. b).
- Rücklaufpuffer werden meist benutzt, wenn die Größe der Zwischenspeicher (z.B. Rollenbahnlänge) zwischen den Stationen nicht ausreichend ist, um die erforderlichen Pufferplätze vorzuhalten.

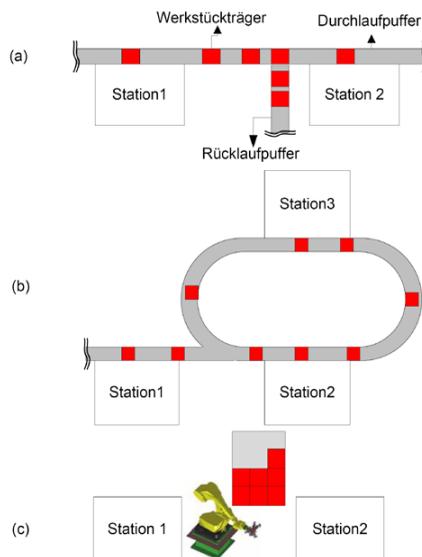


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Pufferarten

Die Ausfallfolgen dieser Puffer an den Stationen können außerdem vermieden werden (Abb. 2.a).

- Direktzugriffpuffer werden meist zur Bevorratung von verschiedenen Erzeugnissen verwendet (Abb. 2.c).

4 Berechnung von Pufferkapazitäten in einer FPL

In diesem Beitrag werden Simulation (Plant Simulation) und Warteschlangen-Theorie (bedientheoretische Methode) als analytische Methoden zur Beschreibung von FPL verwendet.

Die bedientheoretische Methode beruht auf der mathematischen Analyse von Modellen, in denen Werkstücke bzw. Erzeugnisse von Bearbeitungsstationen bearbeitet werden. Zur Berechnung bzw. Abschätzung von mittleren Pufferkapazitäten in Anlehnung an diese Methode werden in der Literatur viele Gleichungen bzw. Approximationen abgeleitet. Hier werden die Modellannahmen nur eingeschränkt behandelt. Weiterhin werden meist die Modelle untersucht, die sich aus einer bzw. mehreren parallelen Bearbeitungsstationen (Bedienstation) und einem Puffer (Warteraum) zusammensetzen.

Mit Unterstützung der Simulation kann das dynamische Verhalten von komplexen realen Systemen in befristeter gewünschter Zeit visualisiert werden. Dafür muss das reale System hinreichend präzise genug abgebildet werden, um aus den Simulationsexperimenten Schlussfolgerungen ziehen zu dürfen (siehe [5]). Wird die Simulation zur Untersuchung einer FPL benutzt, so ergeben sich immer neue Werte der untersuchten Größen je nach Ergebnis des Zufallexperiments. In diesem Fall ist es erforderlich, mehrere Simulationsläufe durchzuführen, damit man zulässige Ergebnisse erhält (vgl.[6]). Der Rechenaufwand wird dadurch erhöht.

4.1 Analytische Verfahren

Die Berechnung von mittleren Puffergrößen mit Unterstützung der bedientheoretischen Methode basiert hauptsächlich auf der Ermittlung folgender Größen:

- Ankunftsrate $\lambda = \frac{1}{E(t_a)}$; $E(t_a)$: Mittelwert der Zwischenankunftszeit
- Bedienrate $\mu = \frac{1}{E(t_b)}$; $E(t_b)$: Mittelwert der Bedienzeit (Bearbeitungszeit)
- Auslastungsgrad $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$
- Variationskoeffizient der Ankunftsprozesse:

$$v_a = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_a)}}{E(t_a)} = \left(\frac{\text{Standardabweichung der } E(t_a)}{E(t_a)} \right)$$

$\text{Var}(t_a)$: Varianz des Mittelwerts

- Variationskoeffizient der Bedienprozesse: $v_b = \frac{\sqrt{\text{Var}(t_b)}}{E(t_b)}$

$\text{Var}(t_b)$: Varianz des Mittelwerts

Wenn mindestens einer der beiden Prozesse (Ankunfts- und Bedienprozess) stochastisch ist, können für den Auslastungsgrad $\rho < 1$ Werkstücke auf die Bearbeitung im Puffer warten. Ist der Warteprozess nach langer Zeitdauer stationär, so existiert eine bestimmte Anzahl von Werkstücken im Puffer. Diese Anzahl wird als die mittlere Pufferkapazität erkannt. Als Beispiel zur Berechnung der Kapazität eines Ausgleichspuffers im M/M/1-Modell¹ wird die folgende Gleichung benutzt:

$$P = \frac{\rho^2}{1-\rho}; \quad P: \text{mittlere Pufferkapazität}$$

In diesem Fall sind die Modellkomponenten eine Bearbeitungsstation und ein Puffer. Es wird hier angenommen, dass die Zwischenankunftszeiten und Bearbeitungszeiten exponential verteilt² sind. Die Zahl 1 zeigt, dass nur eine Station mit dem Puffer unmittelbar verbunden ist. Weitere Detaillierungen und andere Gleichungen zur Berechnung von Puffergrößen in verschiedenen Modellen findet man in [7,8].

Ist das System mit mehreren Nachfolgestationen (wie bei FPL) komplexer aufgebaut, wird das Gesamtsystem häufig in mehrere kleine fiktive Subsysteme zerlegt. Jedes Subsystem muss aus zwei Stationen und einem Puffer dazwischen bestehen (vgl. Abb. 3). Hierbei nimmt man an, dass die erste Station des Subsystems niemals unter Materialmangel leidet und die zweite Station niemals blockiert ist. Der Materialfluss durch die Puffer muss vor und nach der Dekomposition gleich bleiben.

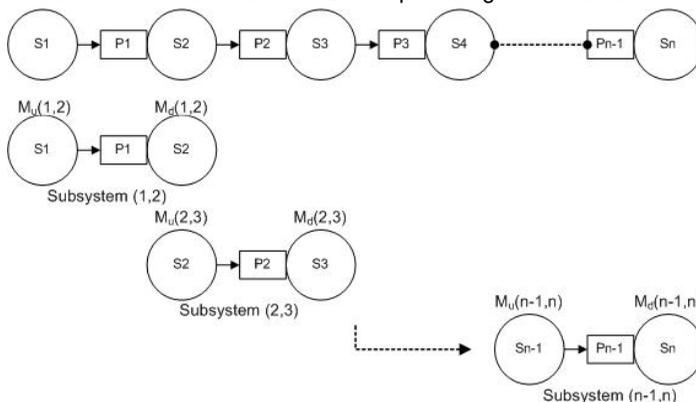


Abbildung 3: Dekomposition einer FPL

¹ Das Modell wird als Basismodell in der Warteschlangentheorie erkannt.

² Der Buchstabe M wird zur Bezeichnung der Exponentialverteilung benutzt

Zur Vereinfachung geht man davon aus, dass sich eine FPL aus (n) Bearbeitungsstationen und (n-1) Puffern zusammensetzt (wie in der Abb. 3). Nur im Idealfall, wenn die Bearbeitungszeiten der Stationen konstant sind und die Stationen nicht „hungern“³ und/oder blockiert sind, gleicht die Bearbeitungszeit einer Station der Zwischenankunftszeit der Werkstücke an der Nachfolgestation⁴. Schwanken die Bearbeitungszeiten einer oder mehrerer Stationen, so treten Blockierung und/oder Wartezeiten an den Stationen auf. Das führt zur Änderung der Auslastung der Stationen. In diesem Fall lassen sich die in der Literatur entwickelten Gleichungen⁵ zur Berechnung von Puffergrößen nicht benutzen. Zur Kompensierung dieses Problems ist das Gesamtsystem in kleine Subsysteme zu zerlegen. In der Literatur findet man Details zu diesen Verfahren in [9,10].

Um die Beziehung zwischen den Pufferkapazitäten, dem Durchsatz und der Anzahl der Bearbeitungsstationen in der FPL (in der Abb. 3) zu beschreiben, wurde die folgende Gleichung in [11] entwickelt:

$$\lambda = \frac{1}{T \left[1 + \frac{1.67(N-1)V}{1+N+0.31V+1.67NP/(2V)} \right]}$$

λ : Durchsatz der FPL oder die Produktivität der letzten Station in FPL

T: Mittlere Bearbeitungszeit der Stationen

V: Variationskoeffizient

P: Pufferkapazität

N: Anzahl der Stationen in der FPL

Es wurde hier davon ausgegangen, dass die Stationen identisch sind und auch durch identische Puffer (gleiche Kapazität) entkoppelt werden. Des Weiteren dürfen keine Wartezeiten bzw. Blockierung an der ersten bzw. letzten Station auftreten.

Zur Berechnung der Größen von Ausgleich- und Störungspuffer sind hauptsächlich die Streuungen von Bearbeitungszeiten und Stördauer zu ermitteln. Beispiel: Es wird angenommen, dass die Streuungen der Bearbeitungszeiten⁶ und Stördauer wie in der Abb. 4 dargestellt sind.

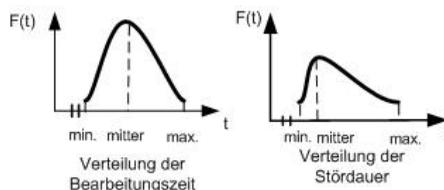


Abbildung 4: Beispiel der Verteilung von Bearbeitungszeiten und Stördauer

³ Das bedeutet, keine Wartezeiten treten an den Stationen auf.

⁴ Es wird hier angenommen, daß die zu verbringenden Zeiten in den Puffern vernachlässigbar sind.

⁵ Diese Gleichungen werden zur Berechnung von Puffergrößen in den einzelnen Wartesystemen benutzt (siehe Abb. 3)

⁶ Die FPL wird in der Abb. 4 dargestellt.

Man unterscheidet zwischen den durch analytische Verfahren berechneten mittleren Pufferkapazitäten (P) und den erforderlichen Pufferplätzen zum Auffangen von Störungswirkungen. Weiterhin kann man drei hauptsächliche mögliche Größen der Störungspuffer berechnen (minimal, mittel und maximal). Aufgrund des erheblichen Einflusses der Pufferkapazität auf den Durchsatz werden hier nur maximale und mittlere Kapazitäten berechnet. Beispiel: Zur Berechnung der Kapazität der Puffer P_2 unterstellt man zunächst, dass die Station 2 gestört ist. Damit die Station 3 in Bearbeitung bleibt, muss sie immer mit Werkstücken aus dem Puffer P_2 versorgt werden, solange die Station 2 gestoppt ist. Das bedeutet, eine bestimmte Anzahl Werkstücke im P_2 muss vorhanden sein. Diese Werkstückanzahl wurde nach [4] als die Summe der beiden Kapazitäten der Ausgleich- und Störungspuffer berechnet.

maximale Pufferkapazität:

$$N_{2(\max)} = \text{mittlere Kapazität des Puffers (P2)} P_2 + \frac{\text{maximale Stördauer}}{\text{minimale Bearbeitungszeit der Station 3}}$$

mittlere Pufferkapazität:

$$N_{2(m)} = P_2 + \frac{\text{mittlere Stördauer}}{\text{mittlere Bearbeitungszeit der Station 3}}$$

Zweitens nimmt man an, dass eine Störung an Station 3 auftritt. In diesem Fall kann die Station 2 blockiert sein, wenn die Plätze im Puffer P_2 zur Aufnahme der Werkstücke nicht ausreichend sind. Man berechnet die maximale und mittlere Kapazität des Puffers P_2 erneut:

$$N_{2(\max)} = P_2 + \frac{\text{maximale Stördauer}}{\text{minimale Bearbeitungszeit der Station 2}}$$

$$N_{2(m)} = P_2 + \frac{\text{mittlere Stördauer}}{\text{mittlere Bearbeitungszeit der Station 2}}$$

In diesem Beispiel sind die berechneten maximalen bzw. mittleren Puffergrößen unabhängig von der gestörten Station gleich, da diese Stationen als identisch angenommen wurden.

Sind die mittleren Taktzeiten der Stationen unterschiedlich (aber gleiche Stationsverfügbarkeit und Stördauer), so ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$N_{2(\max)} = P_2 + \frac{\text{maximale Stördauer}}{\text{minimale Bearbeitungszeit des nicht Engpasses}}$$

$$N_{2(m)} = P_2 + \frac{\text{mittlere Stördauer}}{\text{mittlere Bearbeitungszeit des nicht Engpasses}}$$

Die tatsächlich vorhandenen Werkstücke im Puffer gleichen meist nicht den berechneten Pufferplätzen (Puffer ist nicht immer voll belegt). Entsprechend dem Verwendungszweck der Ausgleichpuffer variiert die Anzahl der Werkstücke im Puffer im Laufe der Zeit dramatisch. Um die erforderliche Anzahl der Pufferplätze bzw. Werkstücke in einem Puffer zu gewährleisten, werden vernünftigerweise die maximalen und mittleren Größen berechnet. Die optimalen Puffergrößen werden unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen dann wirtschaftlich ermittelt.

4.2 Verwendung der Simulation

Die Hauptherausforderung für die Anwender der Simulation ist die Fähigkeit, die Simulationssoftware professionell anzuwenden. Die eingeführten Daten und der dynamische Verlauf des Modells müssen so genau wie möglich die Realität nachbilden. Das erfordert gehobene Programmierkenntnisse.

Für die Modellierung einer FPL unter Benutzung von Plant Simulation müssen ihre Hauptkomponenten (Bausteine) in ein Netzwerk verschoben werden. Diese Komponenten sind eine Quelle, Einzelstationen, Puffer (oder/und Förderstrecken) und eine Senke. Zur Modellierung von Rollenbahnen oder Kettenförderern können Förderstrecken benutzt werden. Hierbei werden die Verbringungszeiten der Werkstücke auf den Strecken in Abhängigkeit von den Streckenlängen und ihren Geschwindigkeiten (wenn es keinen Stau gibt) bestimmt. Damit die Ausgangsreihenfolge der Werkstücke bestimmt werden kann, wird der (Baustein) Puffer benutzt. Weiterhin bietet die Simulation eine Vielfalt von Verteilungen⁷ zur Modellierung der Bearbeitungsstationen an. Die Stationsverfügbarkeiten kann man als Prozentsatz oder durch die Angabe der Stördauern und ihre Verteilungen nachbilden.

Beispiel: Man geht davon aus, dass der Mittelwert der Bearbeitungszeiten der identischen Stationen A, B, C, D und L (siehe Abb. 6) 15 s erlangverteilt, die Standardabweichung 10 s, die untere Schranke 10 s und die obere Schranke 20 s ist.

⁷ Das kann auch eine Formel sein.

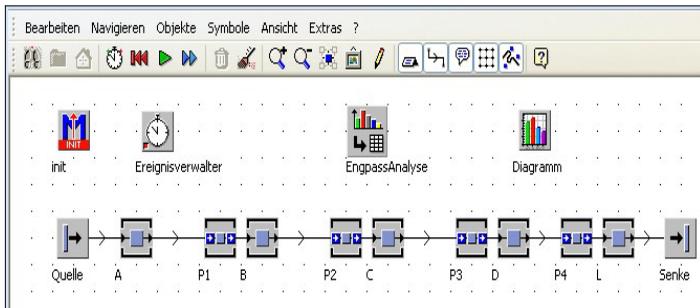


Abbildung 5: Das untersuchte Modell

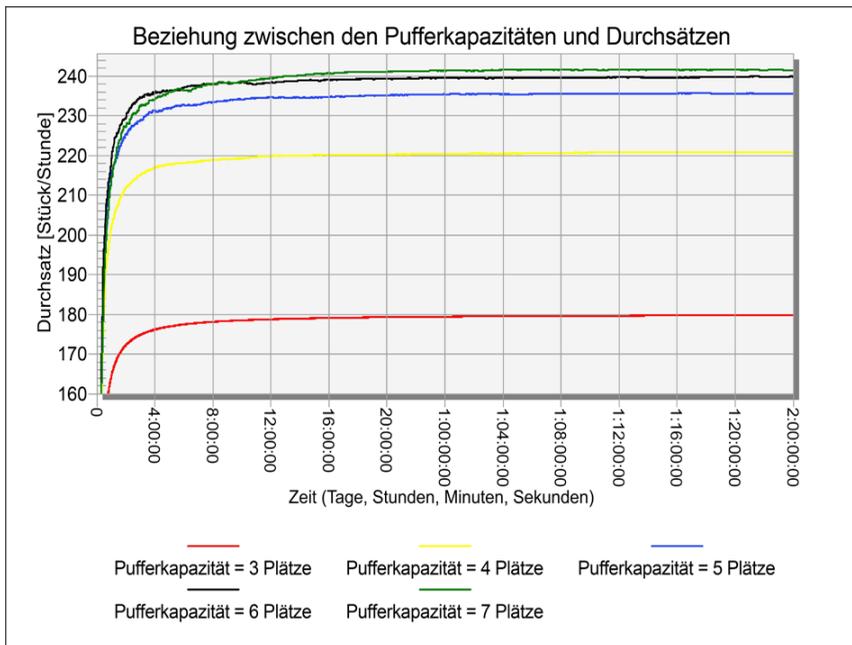


Diagramm 1: Die Beziehung zwischen Pufferkapazitäten und erreichbaren Durchsätzen in der FPL.

Zur Ermittlung der Pufferkapazitäten betrachtet man die Beziehung zwischen diesen Kapazitäten und dem erbrachten Gesamtdurchsatz, so dass sich der Durchsatz mit wachsender Pufferkapazität erhöht.

Die erforderlichen Puffergrößen müssen in der Lage sein, einen erhöhten Durchsatz mit geringeren Pufferkosten zu realisieren. Betrachtet man das Diagramm 1, so erkennt man, dass die optimale Größe jeweils 6 Pufferplätze beträgt.

Eine Untersuchung der Pufferinhalte der ersten und letzten Puffer in der FPL weisen die Ursachen dieser Folge auf (vgl. Diagramm⁸ 2). Es wird hier die Kennzeichnung $P(x, y)$ angenommen; unter der versteht man, dass x die Reihenfolge der Pufferposition in der FPL und y die Puffergröße ist.

Ein Vergleich der Häufigkeiten der Pufferinhalte⁹ bei dem untersuchten schlechten Durchsatz und bei den optimalen Puffergrößen (wie abgeleitet 6 Plätze) zeigt, dass immer Blockierzeiten bei der geringeren Puffergröße (3 Plätze) auftreten, da die Puffer meist (ungefähr 100%) voll belegt sind, während sich diese Häufigkeiten bei dem Puffer $P(4, 6)$ auf fast 20% reduziert.

Sind die Stationsverfügbarkeiten 96%, so wird davon ausgegangen, dass kurzfristige Störungen an den Stationen auftreten. Als Stördauer werden 3 Minuten als exponentialverteilt angenommen. Nach der Untersuchung des Durchsatzes unter verschiedenen Werten der Pufferkapazitäten ergibt sich das Diagramm 3. In diesem Fall zeigt das Diagramm klar, dass die optimale Puffergröße $P=18$ Plätze ist.

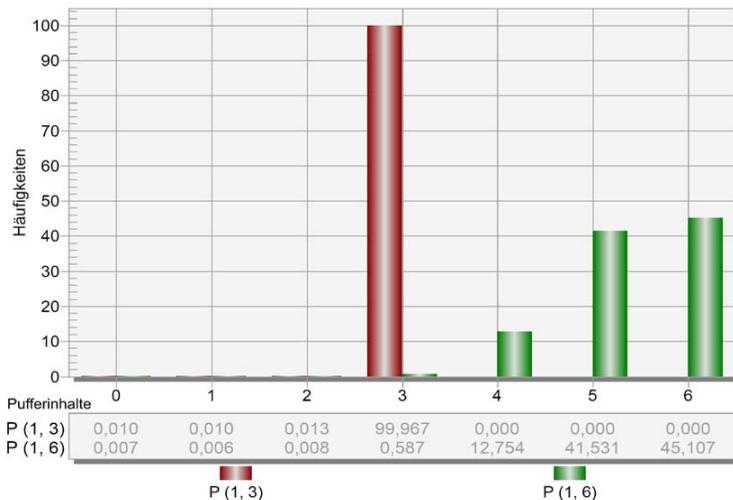


Diagramm 2: Eine Wahrscheinlichkeit der Häufigkeiten von Inhalten der Puffer P1

⁸ Das Diagramm zeigt das Ergebnis eines Zufallexperiments.

⁹ Die Pufferinhalte werden gemessen, wenn ein Werkstück im Puffer ankommt oder ihn verlässt.

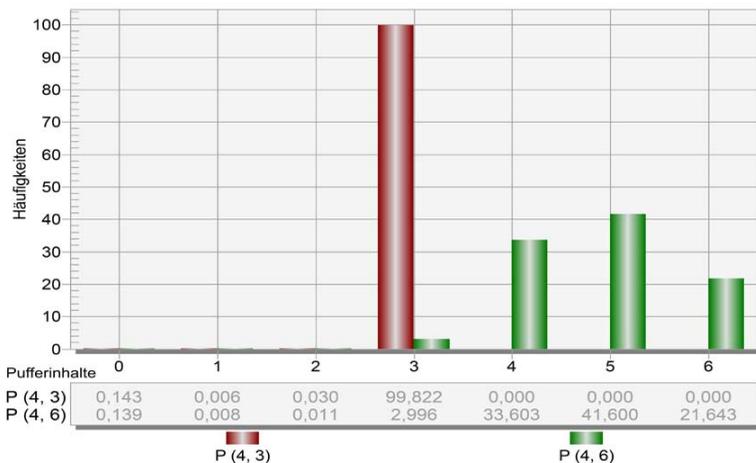


Diagramm 2: Eine Wahrscheinlichkeit der Häufigkeiten von Inhalten der Puffer P4

Die Einflüsse der Pufferkapazitäten auf den Durchsatz werden durch den Vergleich der Durchsatzdiagramme 3 und 4 verdeutlicht. Der Durchsatz der FPL mit Stationsverfügbarkeit $V = 96\%$ und Pufferkapazitäten $P = 14$ Plätze ist erheblich größer als der Gesamtdurchsatz mit $V = 100\%$ und $P = 3$ Plätze. Der größte erreichte Durchsatz (fast 240 Stück/Stunde) im letzten Experiment kann aber mit $V = 96\%$ nicht realisiert werden, obwohl die Pufferkapazitäten größer sind.

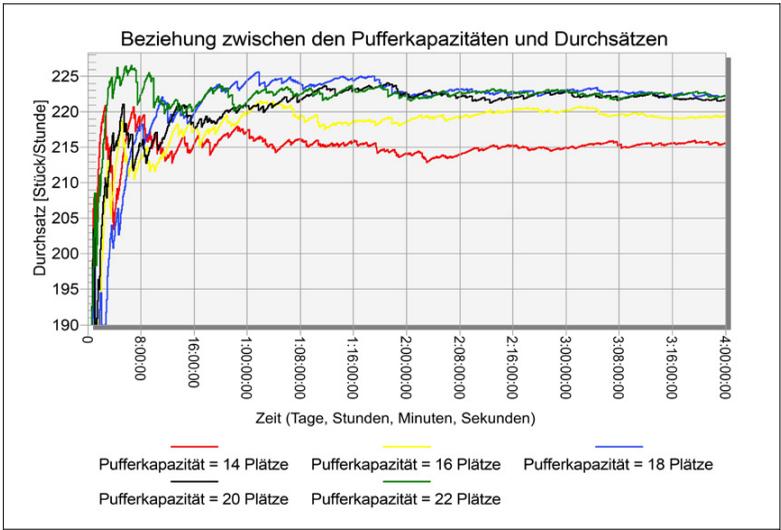


Diagramm 3: Störungswirkungen auf den Durchsatz bei verschiedenen Pufferkapazitäten

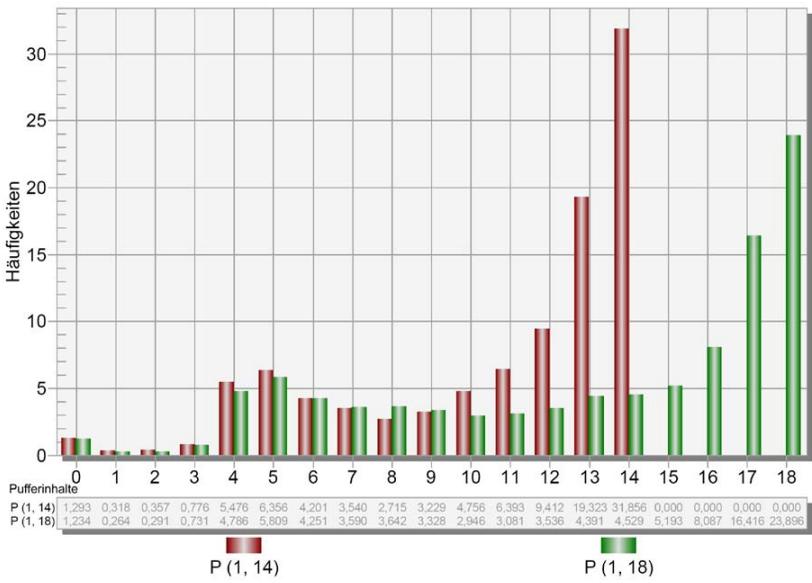


Diagramm 4: Eine Wahrscheinlichkeit der Häufigkeiten von Inhalten der Puffer P1

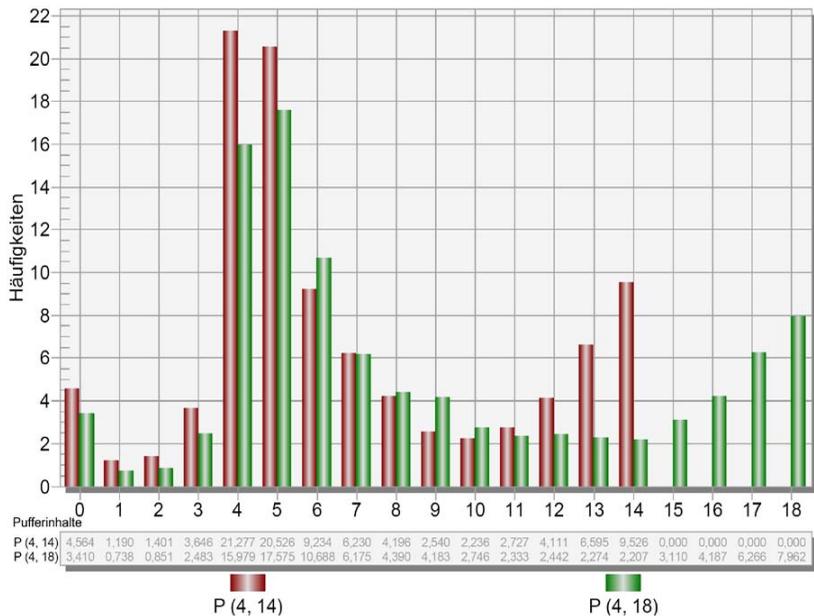


Diagramm 5: Eine Wahrscheinlichkeit der Häufigkeiten von Inhalten der Puffer P4.

Unter Betrachtung der Diagramme 4 und 5, erkennt man:

- Wahrscheinlichkeiten, den ersten Puffer P1 voll belegt vorzufinden, sind größer als in dem letzten Puffer P4. Deshalb treten häufig Blockierzeiten an der ersten Station A auf.
- Wahrscheinlichkeiten, den letzten Puffer leer vorzufinden, sind größer als in dem ersten Puffer. Deshalb treten häufig Wartezeiten an der letzten Station L auf.

Das bedeutet, dass die vorhandenen Pufferanlagen ($P= 22$ Plätze) die Störfolgen nicht ganz auffangen können. Eine weitere Vergrößerung der Kapazität kann aber auch nicht wirtschaftlich sein.

5 Pufferkosten

Die Bedeutung von Puffern in einer FPL ist umso größer, je stärker der Einfluss der Zufallsgrößen in der Produktion ist. Je nach Flächenbedarf der Erzeugnisse kann aber die Erhöhung der Pufferkapazitäten zur Vergrößerung der Pufferflächen und

dadurch zur Steigerung der Pufferkosten führen. Zusätzlich erhöht sich die Kapitalbindung im Pufferbestand

Anschließend muss ein Vergleich zwischen den Pufferkosten und der Erhöhung des Durchsatzes mit wachsenden Pufferkapazitäten durchgeführt werden, so dass der Gesamtumsatz steigt. Das bedeutet, dass die Berechnung von optimalen Pufferkapazitäten erforderlich ist.

6 Literatur

- [1] Buzacott, John A. ; Shanthikumar, J. George: Stochastic Models of Manufacturing systems. Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall, 1993
- [2] Jodl, Herbert: Einrichtung von Pufferlagern bei vertikaler Kopplung maschineller Aggregate : unter besonderer Berücksichtigung des Werkzeugwechsels. Meisenheim am Glan : Hain, 1977
- [3] Ziersch, Wolf-Dietmar: Strategien zur Leistungssteigerung von automatischen Montageanlagen durch zuverlässige Zuführsysteme. Düsseldorf : VDI-Verl., 1985
- [4] Janisch, Hans-Werner: Optimierung der Puffer bei elastisch verketteten Fertigungssystemen. Hannover, Univ., Diss., 1979
- [5] Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Düsseldorf: VDI-Verl., 1993
- [6] Arnold, Dieter ; Furmans, Kai ; Isermann, Heinz ; Kuhn, Axel ; Tempelmeier, Horst : Handbuch Logistik. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2008
- [7] Bolch, Gunter; Greiner, Stefan; de Meer, Hermann; S.Trivedi, Kishor: Queueing networks and Markov Chains: Modeling and performance evaluation with computer science applications. Hoboken, NJ : Wiley-Interscience, 2006. ISBN-13 978-0-471-56525-3, ISBN-10 0-471-56525-3.
- [8] Arnold, Dieter; Furmans, Kai: Materialfluss in Logistiksystemen (4. Auflage). Springer Berlin Heidelberg New York: 2005. ISBN: 3-540-22800-4
- [9] Gershwin, S.B.: Manufacturing systems engineering. Englewood Cliffs, N.J.(USA): Prentice Hall 1994
- [10] Kuhn, Heinrich; Tempelmeier, Horst: Analyse von Fließproduktionssystemen. Zeitschrift für Betriebswirtschaft. Bd. 67.1997, 5-6, S. 561-586, insges. 26 S.
- [11] Blumenfeld, Dennis E.: A simple formula for estimating throughput of serial production lines with variable processing times and limited buffer capacity. Int. J. Prod. Res. 28 (1990) 1163-1182

Aspekte der Wirtschaftlichkeit bei der kooperativen Instandhaltung in einem Unternehmensnetzwerk

Dipl.-Ing. Andreas Weißenbach

Technische Universität Ilmenau

Institut für rechnerunterstützte Produktion

Fachgebiet Fabrikbetrieb

Abstract: Bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) kann durch Kooperationen auf dem Gebiet der Instandhaltung von Produktions- und Logistikanlagen ein höheres Verfügbarkeitsniveau zu geringeren Instandhaltungskosten, wie in Abbildung 1 dargestellt, erreicht werden. Die kooperative Instandhaltung ermöglicht ein wirtschaftlicheres Betreiben der technischen Einheiten und führt ohne viel organisatorischen Aufwand zu einem professionellen und verantwortungsbewussten Instandhaltungsmanagement bei KMU.

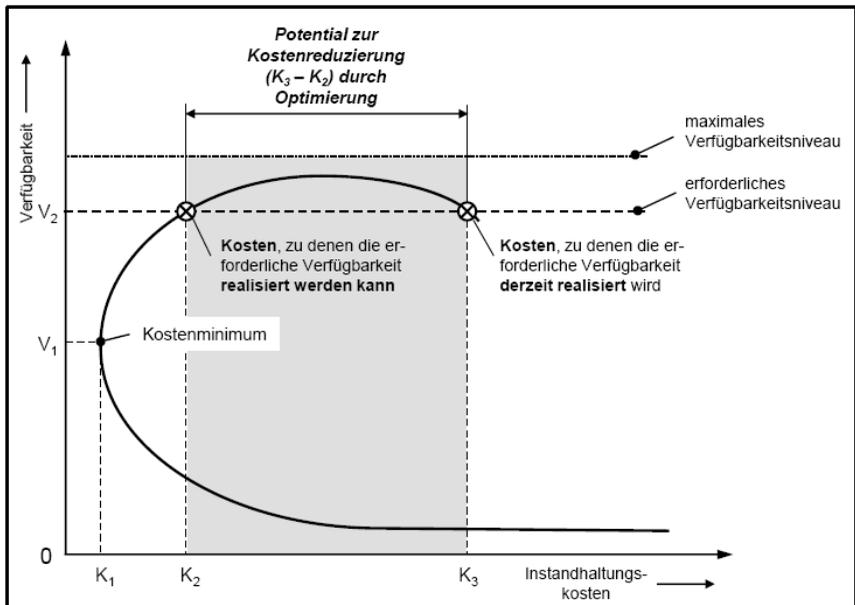


Abbildung 1: Erreichbares Verfügbarkeitsniveau bei entsprechenden Instandhaltungskosten [Bo76, S.67]

1 Einleitung

Das Agieren von Unternehmen auf dem Markt wird beeinflusst durch einen steigenden Kosten- und Wettbewerbsdruck. Neue Herausforderungen werden hervorgerufen durch zunehmende Globalisierung, steigende Innovationsgeschwindigkeit sowie eine hohe Variantenvielfalt und Produktkomplexität. Gerade in aktuellen Krisenzeiten ist ein Großteil der in Deutschland ansässigen KMU von dieser Entwicklung besonders betroffen. Um konkurrenzfähig zu bleiben, müssen KMU immer wandlungsfähig sein und ihre Produkte bzw. Dienstleistungen ständig neu auf die Wünsche ihrer Kunden ausrichten. Dabei gilt es sowohl für produzierende Unternehmen als auch für Logistikunternehmen die Effizienz und Zuverlässigkeit ihrer technischen Einheiten zu erhalten [WB01, S.7].

Die betriebliche Instandhaltung ist für die Funktions- und Leistungssicherung von Produktions- und Logistikanlagen verantwortlich. Sie trägt zur Erhaltung der Liefertreue, geringem Ressourcenverbrauch, zur Arbeitssicherheit und zum aktiven Umweltschutz bei. Im Falle der Logistik spielt die Instandhaltung eine ganz besondere Rolle, da die eingesetzten Logistikanlagen oftmals einen wichtigen Anteil am Wertschöpfungsprozess haben und der eigentliche Hauptgeschäftsprozess eines Unternehmens möglicherweise davon abhängig ist.

Vielen KMU sind jedoch diese Zusammenhänge nicht immer bewusst. Nur wenige verstehen die Instandhaltung als einen Wettbewerbsfaktor mit großem Optimierungspotential. Die Folge ist, dass die Instandhaltung in KMU häufig vernachlässigt und nur selten gut organisiert ist. Insbesondere das häufig praktizierte Outsourcing von Instandhaltungstätigkeiten führt nur selten zum gewünschten Erfolg und ist mit einem großen Verlust an Knowhow verbunden.

Die Auswertung mehrerer aktueller Studien hat gezeigt: Obwohl die hohe Bedeutung der Instandhaltung und die damit verknüpften Potentiale von den meisten Führungskräften der Unternehmen anerkannt werden, gibt es jedoch „oft eine erhebliche Diskrepanz zwischen der öffentlichen Darstellung und der betrieblichen Realität“ [KSS06, S.38]. Gerade bei KMU findet die Instandhaltung noch keine ausreichende Unterstützung bei der Unternehmensleitung. Das Streben nach einer kurzfristigen Ergebnismaximierung führt immer wieder dazu, dass die Instandhaltungsaufgaben vernachlässigt werden [SKFW05, S.9], [KSS06, S.38].

In KMU ist eine exakte Planung, Steuerung und Überwachung der Instandhaltungstätigkeiten auf Grund von Ressourcenknappheit (fehlendes Personal mit ausreichender Qualifikation, fehlende Planungsprogramme für Instandhaltung) häufig gar nicht möglich. Diese Kapazitätsengpässe und der enorme Wettbewerbsdruck führen dazu, dass eine durchdachte Instandhaltungsorganisation nur selten vorhanden ist. Instandhaltungsstrategien bzw. -konzepte werden nur selten gezielt eingesetzt. Zum Teil sind keine eigenen Instandhaltungsabteilungen mit ausreichend spezialisierten Kenntnis-

sen vorhanden bzw. sind die Instandhaltungsmitarbeiter überlastet oder noch zusätzlich mit Produktionstätigkeiten betraut. Die Folge dieser Bedingungen für die Instandhaltung in KMU sind zum Teil chaotische Zustände. Störungen oder Defekte von technischen Einheiten werden in Kauf genommen, obwohl Schäden, Terminverzug oder Regressforderungen drohen [Wei07, S.11].

2 Unternehmensübergreifende Zusammenarbeit – ein Ansatz zur Verbesserung der Situation

Aus organisatorischer Sicht stellt die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit bei der Funktions- und Leistungssicherung von technischen Einheiten in Produktion und Logistik für KMU ein großes Verbesserungspotential dar. In vielen anderen Bereichen werden die Vorteile einer unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit bereits erfolgreich genutzt. So werden beispielsweise Unternehmensnetzwerke gebildet, in denen mehrere Firmen einen Auftrag gemeinsam abwickeln. Mit Hilfe dieser Zusammenarbeit in solchen Produktions- und Logistiknetzwerken können insbesondere KMU auch größere Projekte bewältigen [BST06, Vorwort].

Momentan liegt der Schwerpunkt unternehmensübergreifender Instandhaltung bei KMU in der Zusammenarbeit mit Herstellern und Dienstleistern. Denkbar wäre es aber auch, eine partnerschaftliche Zusammenarbeit in der Instandhaltung zwischen benachbarten Unternehmen zu realisieren. Oftmals verfügen nämlich gerade KMU in der unmittelbaren Nähe über ähnliche Produktions- bzw. Logistikanlagen. Sie kennen sich daher mit den Problemen der Instandhaltung aus und wissen oft bessere, kostengünstigere Lösungen. Durch einen gezielten Mitarbeiteraustausch könnte diese Form der „Dienstleistung unter Partnern“ [Wei07, S.11] dabei helfen, eine bessere Auslastung der Instandhaltungsmitarbeiter zu erreichen. „Unternehmen helfen einander, lernen voneinander, konzentrieren wichtiges Know-how, tauschen branchenübergreifend Instandhaltungskapazitäten aus und sichern dadurch die Wettbewerbsfähigkeit aller teilnehmenden Partner - ein durchaus überlegenswerter innovativer Ansatz“ [Wei07, S.11].

In Anlehnung an diese Idee sind daher unterschiedliche Möglichkeiten einer unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit in der Instandhaltung für KMU untersucht und im Bezug auf die Verfügbarkeit technischer Einheiten und Instandhaltungskosten quantitativ miteinander verglichen worden.

3 Grundformen kooperativer Zusammenarbeit

Zur Unterscheidung von Grundformen der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit in der Instandhaltung sind sowohl Kriterien, welche die allgemeine Gestaltung kooperativer Beziehungen beschreiben, als auch Kriterien, die auf spezifische Merk-

male der Instandhaltung zugeschnitten sind, zu berücksichtigen. Die Abbildung 2 fasst die gewählten Größen und deren Ausprägungsmöglichkeiten kurz zusammen:

| Gestaltungskriterien kooperativer Zusammenarbeit in der Instandhaltung | | | | | |
|--|---|--|------------------------------------|---|------------------------|
| Kriterien | | Kriterienausprägung | | | |
| Allgemeine Kriterien zur Gestaltung von Kooperationen | Kooperationsrichtung | horizontal | komplementär | vertikal | |
| | Zielidentität | redistributiv | | reziprok | |
| | Kooperationsart | synergetisch | | additiv | |
| | Intensität der Kooperation | unverbindliche Zusammenarbeit/ Empfehlungen | Austausch von Informationen/ Daten | koordiniertes gemeinschaftliches Vorgehen | |
| | Art der kooperativen Bindung | mit vertraglichen Abmachungen | ohne vertragliche Abmachungen | kapitalmäßige Verflechtung | |
| | räumliche Ausdehnung | lokal | regional | national | international |
| | zeitliche Begrenzung | dynamisch (kurzfristig) | | statisch (langfristig) | |
| | Zutrittsmöglichkeit | offene Kooperation - freie Zutrittsmöglichkeit | | geschlossene Kooperation - Zutritt nach vorheriger Aufnahme | |
| | Anzahl der Kooperationspartner | überschaubare Anzahl (2-5 Partner) | | unüberschaubare Anzahl (mehr als 5) | |
| | Macht | hierarchisch | heterarchisch | hierarchielos | |
| | Organisation | monolithisch | | polyzentrisch | |
| Instandhaltungs-spezifische Kriterien | Personelle Aufgabenverteilung | Eigen-instandhaltung | Fremd-instandhaltung | Kombination | Gruppen-instandhaltung |
| | Integration von Instandhaltungstätigkeiten | einfache Wartungsarbeiten | Routinearbeiten | komplexe Arbeiten | |
| | Lagerhaltung | zentral | denzentral | kombiniert | |
| | Nutzung eines Instandhaltungsmanagement-systems (IM-System) | zentral | dezentral | kombiniert | ohne IM-System |

Abbildung 2: Grundformen kooperativer Zusammenarbeit nach [Ndo96, S.49], [WB01, S.94], [BDH+05, S.18], [Wei09]

Ausgehend von diesen Gestaltungskriterien für eine Kooperation ergeben sich durch Kombination der Ausprägungen verschiedenste Formen der Zusammenarbeit für die Instandhaltung. Drei wesentliche Formen sollen daher kurz erläutert werden:

3.1 Komplementäre Instandhaltungskooperation – Zusammenarbeit mit Herstellern und Dienstleistern

Die komplementäre Zusammenarbeit beschreibt die Zusammenarbeit mit Anlagenherstellern bzw. Instandhaltungsdienstleistern und ist heute durchaus gängige Praxis. Jedoch bleibt festzuhalten, dass die Zusammenarbeit mit Herstellern oder Dienstleistern immer mit einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Outsourcing verbunden ist und damit die Vorteile, aber auch die Nachteile der Auslagerung von Instandhaltungsleistungen, einhergehen.

3.2 Kooperative Instandhaltungsnetzwerke

Neben der komplementären Instandhaltungs Kooperation besteht die Möglichkeit regelmäßige Treffen von Instandhaltungsverantwortlichen unterschiedlicher Unternehmen der regionalen Umgebung zu organisieren und somit ein kooperatives Instandhaltungsnetzwerk aufzubauen. Dabei stehen vor allem das Kennenlernen möglicher Partner für eine engere Zusammenarbeit und der Austausch von Informationen im Vordergrund. Die Zusammenarbeit könnte zum Beispiel durch regelmäßige Treffen in unterschiedlichen Unternehmen des Netzwerkes organisiert werden. Durch diese Zusammenkünfte erhalten die einzelnen Unternehmen die Möglichkeit verschiedene Aspekte der eigenen Instandhaltung vorzustellen und kritisch zu hinterfragen. In zwanglosen Gesprächen und durch organisierte Vorträge können sich somit Anregungen zur Verbesserung der eigenen Instandhaltung ergeben. Als sinnvoll erscheint es, wenn die Treffen durch einen Moderator geleitet und vorbereitet werden. Dieser legt in Absprache mit den Unternehmen die Termine für die Zusammenkünfte fest und lädt dazu öffentlich ein.

Seit einiger Zeit werden solche Instandhaltertreffen durch das Fachgebiet Fabrikbetrieb der TU Ilmenau organisiert und durchgeführt. Bei diesen Treffen finden sich in regelmäßigen Abständen jeweils etwa 10 bis 25 Instandhaltungsverantwortliche unterschiedlicher KMU zusammen, um Neuigkeiten und Erfahrungen auszutauschen. Dabei konnten auch schon einige Erfolge erzielt werden. Erfreulich ist beispielsweise, dass durch Anregung eines Unternehmens ein anderes branchenungleiches Unternehmen eine Instandhaltungssoftware in gleicher Weise eingeführt hat, die sich bisher bewährt hat [Wei09].

3.3 Horizontale Instandhaltungs Kooperationen – partnerschaftliche Zusammenarbeit zwischen KMU

Aufbauend auf den zwanglosen Austausch von Informationen in einem kooperativen Instandhaltungsnetzwerk ist eine engere Zusammenarbeit in der Instandhaltung zwischen mehreren Unternehmen der nahen Umgebung mit ähnlichen technischen Einheiten ein weiterer wichtiger Gedanke. So könnten beispielsweise zwei oder mehrere gleichrangige Unternehmen ihre Instandhaltung auf horizontaler¹ Ebene gemeinsam organisieren. Für die horizontale Instandhaltungs Kooperation erscheint es als selbstverständlich, dass die Ziele der Zusammenarbeit redistributiv² aufeinander abge-

¹ Horizontale Kooperationen im Bereich der Instandhaltung sind solche, bei denen sich Unternehmen gleicher oder ähnlicher Branche und Wertschöpfungsstufe zusammenfinden. Oftmals verfügen gerade diese Unternehmen, egal ob sie direkte Konkurrenten sind oder nicht, über ähnliche Maschinen und Anlagen, so dass eine Zusammenarbeit ein durchaus überlegenswerter Ansatz ist [WB01, S.95], [BDH+05, S.18].

² Redistributive Kooperationen sind solche, bei denen die Kooperationspartner dieselben Instandhaltungsziele, wie z.B. Verfügbarkeit steigern und Instandhaltungskosten senken, verfolgen. Durch das Zusammenlegen von Ressourcen wird versucht die Schwachstellen der eigenen Instandhaltung zu beheben [BDH+05, S.20].

stimmt werden, so dass sich Synergien für die Unternehmen ergeben. Dabei sollte das koordinierte gemeinschaftliche Vorgehen der Zusammenarbeit durch einen Kooperationsvertrag abgesichert werden. In diesem Vertrag muss insbesondere der Austausch von Mitarbeitern, Ersatzteilen und Werkzeugen geregelt werden. Eine hohe Akzeptanz der Mitarbeiter untereinander ist nur dann zu erwarten, wenn die Kooperation auf Dauer angelegt und zum Zutritt eine vorherige Aufnahme erforderlich ist. Die Anzahl der Teilnehmer sollte überschaubar bleiben. Ein ständiger Wechsel der Kooperationsmitglieder bedeutet Unruhe und ist nicht förderlich für den Aufbau von Vertrauen zwischen den Bedienern der Anlagen und den Instandhaltungsmitarbeitern. Außerdem sollte die Kooperation räumlich begrenzt bleiben, da so die Reaktionszeiten im Vergleich zur komplementären Zusammenarbeit verkürzt werden können. Alle Unternehmen in einer horizontalen Instandhaltungskooperation sollten gleichberechtigt sein. Eine heterarchische³ Machtverteilung und eine polyzentrische Organisation⁴ ist daher eine Grundvoraussetzung. Im Rahmen dieser polyzentrischen Organisation erscheint es sinnvoll, dass die Mitarbeiter der Instandhaltung jeweils fest bei einem der beteiligten Unternehmen angestellt sind und für die anderen Unternehmen ausgeliehen werden. Später kann überlegt werden, die Mitarbeiter der Instandhaltung über ein gemeinsames Unternehmen zu beschäftigen und dafür einen Instandhaltungsverantwortlichen einzusetzen, der die Instandhaltungstätigkeiten in allen beteiligten Unternehmen koordiniert und plant. Um das Knowhow der Anlagenbediener sowie das Fachwissen der Instandhaltungsmitarbeiter optimal ausnutzen zu können, müssen diese eng zusammenarbeiten und ihre Arbeit gemeinsam abstimmen. Die Gruppeninstandhaltung⁵ ist eine gute Möglichkeit die normalerweise angewendete Kombination aus Eigen- und Fremdinstandhaltung zu ergänzen. Außerdem können durch sinnvolle Integration einfacher Wartungs- und Routinearbeiten die Vorteile einer dezentralen Instandhaltung ausgenutzt werden. Durch den angesprochenen Personalaustausch und die Gruppeninstandhaltung ergeben sich mit der Zusammenarbeit verschiedene Vorteile für alle beteiligten Unternehmen. So können sowohl die Lohnkosten als auch die Kosten für Qualifizierungsmaßnahmen der Instandhaltungsmitarbeiter aufgeteilt und damit für jeden einzelnen reduziert werden. Da die Mitarbeiter der Instandhaltung in mehreren Unternehmen arbeiten, können sie außerdem besser ausgelastet werden.

Damit entfällt beispielsweise der häufige Kompromiss in KMU, einen gelernten Instandhalter als Aushilfe in der Produktion einsetzen zu müssen. Zu beachten ist

³ Heterarchische Kooperationen sind solche mit verteilten Machtzentren und wechselnder Weisungsbefugnis zwischen den Unternehmen [WB01, S.96].

⁴ Eine polyzentrische Organisationsstruktur liegt vor, wenn mehrere Unternehmen regional verteilt sind und kein Zentrum für die Zusammenarbeit auszumachen ist [WB01, S.96].

⁵ Im Rahmen der Gruppeninstandhaltung, werden Instandhaltungsteams mit Mitarbeitern verschiedener lokaler Unternehmen gebildet. Sie bilden somit eine Kompetenzzelle, in der sich die Stärken der einzelnen Akteure partnerschaftlich ergänzen.

jedoch, dass eine gemeinsame Personalplanung auch Schwierigkeiten bereiten kann. Es ist schon zu Beginn einer Kooperation zu klären, welche Aufgaben eine Priorität haben, damit es später nicht zu Streitigkeiten kommt, wenn Mitarbeiter in verschiedenen Unternehmen gleichzeitig benötigt werden. Zudem muss geklärt werden, wie die Stunden in den jeweiligen Betrieben abgerechnet werden. Der dabei entstehende erhöhte Verwaltungsaufwand ist genauso zu berücksichtigen, wie die Realisierung eines definierten Informationsflusses zwischen den Partnern der Kooperation. Neben dem Austausch von Personal und der dadurch erreichten Einsparung von Personalkosten können die Kosten für die Lagerhaltung sowie für teure Mess- und Betriebsmittel aufgeteilt werden. Ein teures Messmittel zur Justierung bestimmter Maschinen muss beispielsweise nur einmal gekauft werden und kann in allen Unternehmen, die an der Zusammenarbeit beteiligt sind, verwendet werden. In gleicher Weise müssen Ersatzteile, welche in mehreren Unternehmen benötigt werden, nur einmal auf Lager gelegt werden und alle Kooperationspartner haben darauf eine Zugriffsmöglichkeit. Dabei sollten zu Beginn die dezentralen Einzellager der einzelnen Unternehmen beibehalten und die Doppellagerung besonders teurer Ersatzteile vermieden werden. Die Kapitalbindung durch die Ersatzteile wird damit reduziert und somit die Kosten gesenkt. Später kann überlegt werden, ob man die einzelnen dezentralen Lager zu einem gemeinsamen Zentrallager zusammenfasst. Dies ist jedoch von den räumlichen Gegebenheiten abhängig.

Da insbesondere für KMU nicht vorausgesetzt werden kann, dass diese über ein Instandhaltungsmanagementsystem (IM-System) verfügen, sollte die Zusammenarbeit in enger Absprache erfolgen. Dabei wird jedoch der Einsatz eines IM-Systems nicht ausgeschlossen oder verboten, sondern es kann, falls vorhanden, zur Unterstützung eingesetzt werden. Welche verschiedenen Möglichkeiten es gibt ein IM-System dezentral bzw. auch zentral in einer Instandhaltungs Kooperation anzuwenden, wird bei *Ndouma* [Ndo96, S.53-59] ausführlich beschrieben. Bei allen möglichen Vorteilen darf nicht vergessen werden, dass die partnerschaftliche Zusammenarbeit in jedem Fall mit strukturellen Veränderungen in den Einzelunternehmen verbunden sind. Diese Strukturveränderungen sind nicht immer einfach zu realisieren und hängen sehr vom Engagement der Führungskräfte im jeweiligen Unternehmen ab. Dort wo die Instandhaltung nicht akzeptiert wird, ist auch die Kooperation mit anderen Unternehmen nur schwer vermittelbar. Wenn aber der wichtige Stellenwert der Instandhaltung erkannt wurde, kann die Bildung von horizontalen Instandhaltungs Kooperationen helfen, die Verfügbarkeit der Produktionsanlagen zu verbessern und gleichzeitig Kosten einzusparen.

3.4 Vergleich der Grundformen in Bezug auf Verfügbarkeit und Instandhaltungskosten

Bei der Berechnung wird davon ausgegangen, dass jeweils der Hersteller, die Dienstleister, die lokalen Partner und das Eigeninstandhaltungspersonal zu bestimmten Anteilen an der Instandhaltung beteiligt sind. Außerdem werden diesen Akteuren unterschiedliche Entfernungen, Knowhow-Faktoren, Verfügbarkeiten und Stundensätze zugeordnet, welche auf die Beispielberechnung einen wesentlichen Einfluss haben. Zudem wird unterschieden, ob im Rahmen der Ersatzteilbeschaffung das Lager eines lokalen Partners genutzt wird oder nicht.

Für eine fiktive Maschine im Zwei-Schicht-Betrieb ergaben sich unter der Annahme weiterer Faktoren die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse:

| Maschine im Zwei-Schicht-Betrieb | | | | | | | |
|----------------------------------|---------------|-----------------|------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Aufgabenverteilung | | | | ohne Lagernutzung | | mit Lagernutzung | |
| Hersteller | Dienstleister | lokaler Partner | Eigeninst. | V_theor. [%] | Kosten_Inst. [€] | V_theor. [%] | Kosten_Inst. [€] |
| 0,9 | 0 | 0 | 0,1 | 69,54% | 24.625 € | ----- | ----- |
| 0,7 | 0,2 | 0 | 0,1 | 71,93% | 21.505 € | ----- | ----- |
| 0,6 | 0,2 | 0 | 0,2 | 73,41% | 19.564 € | ----- | ----- |
| 0,4 | 0,4 | 0 | 0,2 | 75,73% | 16.835 € | ----- | ----- |
| 0,3 | 0,4 | 0 | 0,3 | 77,04% | 15.243 € | ----- | ----- |
| 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 78,43% | 13.472 € | 80,23% | 12.478 € |
| 0,2 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 78,39% | 13.505 € | 80,20% | 12.512 € |
| 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | 78,54% | 13.216 € | 80,36% | 12.223 € |
| 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 78,56% | 13.048 € | 80,38% | 12.055 € |
| 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,4 | 79,51% | 12.224 € | 81,37% | 11.230 € |
| 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 79,65% | 11.958 € | 81,52% | 10.964 € |
| 0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,3 | 79,74% | 11.748 € | 81,61% | 10.754 € |
| 0,1 | 0 | 0,4 | 0,5 | 79,66% | 11.661 € | 81,52% | 10.667 € |
| 0,1 | 0 | 0,8 | 0,1 | 79,95% | 11.438 € | 81,83% | 10.445 € |

Tabelle 1: Ergebnisse der Vergleichsrechnung

Ein Vergleich der beiden hervorgehobenen Zeilen zeigt, dass durch eine verstärkte Zusammenarbeit mit einem lokalen Partner die Verfügbarkeit technischer Einheiten gesteigert und gleichzeitig die Instandhaltungskosten gesenkt werden können. So steigt die Verfügbarkeit der Maschine im Zwei-Schicht-Betrieb im Beispiel um etwa 2,6% an, wenn man den Anteil des Herstellers und des Dienstleisters um jeweils 20% senkt und diese Instandhaltungstätigkeiten auf den lokalen Partner überträgt. Der Hauptgrund für diese Verbesserung ist dabei die räumliche Nähe. Dies führt dazu, dass die Fahrzeit und somit auch die Reaktionszeit im Falle eines Ausfalls verkürzt werden können. Somit steigt die theoretische Verfügbarkeit an, obwohl das Know-how der lokalen Partner niedriger eingeschätzt wird, als das der Instandhaltungs-

dienstleister bzw. Hersteller und sich dadurch die eigentliche Instandhaltungszeit erhöht.

Die Einführung eines gemeinsamen Ersatzteillagers mit einem lokalen Partner verspricht sogar eine noch deutlichere Verbesserung der Verfügbarkeit (im Beispiel um ca. 4,5%). Grund dafür ist, dass zusätzliche Zeit für die Ersatzteilbeschaffung eingespart werden kann, wenn man die Lagerhaltung in enger Absprache organisiert. So muss beispielsweise nicht jedes Teil, welches nicht im eigenen Lager ist, bestellt werden. Wichtige Ersatzteile können in Absprache ausgetauscht werden, ohne dass dabei der eigene Lagerbestand erhöht werden muss.

Zudem konnten im hervorgehobenen Beispiel die Instandhaltungskosten um 3.285 € während der betrachteten Periode (sechs Monate) gesenkt werden. Ursache dafür sind die geringeren Reisekosten und die niedrigeren Stundensätze für das Personal des lokalen Partners. Auch hier verspricht die gemeinsam organisierte Lagerung zusammen mit dem lokalen Partner ein noch größeres Einsparpotential.

Anzumerken bleibt, dass eine noch extremere Verschiebung der Anteile an der Instandhaltung zu Gunsten der Eigeninstandhaltung eine noch deutlichere finanzielle Verbesserung verspricht. Dies ist jedoch nicht unbedingt anzustreben, da bei der überschläglichen Beispielrechnung keine Fixkosten berücksichtigt wurden und somit das Auslastungsproblem vernachlässigt wurde. Eine zu starke Verschiebung der Anteile zugunsten des lokalen Partners ist auch nicht die beste Lösung. Dies käme einem Outsourcing gleich und ist daher mit einem großen Knowhow-Verlust verbunden.

4 Fazit

Durch die partnerschaftliche Zusammenarbeit im Bereich der Instandhaltung zwischen KMU der nahen Umgebung lässt sich am Beispiel der Vergleichsrechnung zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit von Produktions- und Logistikanlagen erhöht und eine Verbesserung der Verfügbarkeit bei gleichzeitiger Senkung der Instandhaltungskosten möglich ist. Somit bietet die kooperative Instandhaltung eine echte Alternative zum bisherigen Trend des Outsourcing von Instandhaltungsleistungen und erweitert dabei die bisherigen Möglichkeiten zur Funktions- und Leistungssicherung von Produktions- und Logistikanlagen bei KMU.

Literaturverzeichnis:

[BDH+05] Becker, Thomas ; Dammer, Ingo ; Howaldt, Jürgen ; Killich, Stephan ; Loose, Achim: *Netzwerkmanagement - Mit Kooperation zum Unternehmenserfolg*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2005

[Bo76, S.67] BOHL, Bernhard-Friedolin; NEUHAUS, Walter ; SCHEID, Wolf-Michael: Systemstudie als Grundlagenmodell optimierter Instandhaltungsplanung von automa-

tischen Transport-, Lager- und Verteilsystemen in Krankenhausanlagen. In: JÜNE-MANN, Reinhardt (Hrsg.): *Forschungsberichte zur Industriellen Logistik* Bd. 3. Dortmund: Institut für Logistik, 1976

[BST06] Blöse, Jochen ; Schmitz, Marcus ; Thönneßen, Johannes: *Recht und Management in vernetzten Unternehmen*. 2. Auflage. Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. Berlin, 2006

[KSS06] Kuhn, Axel ; Schuh, Günther ; Stahl, Beate: *Nachhaltige Instandhaltung - Trends, Potentiale und Handlungsfelder Nachhaltiger Instandhaltung*. VDMA Verlag GmbH Frankfurt am Main, 2006

[Ndo96] Ndouma, Jean Rene F.: Grundtypen für die Instandhaltung in Produktionsbetriebsnetzen (Dissertation). In: *Wissenschaftliche Schriftenreihe des Institutes für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, Heft 12*. Institut für Betriebswissenschaften und Fabriksysteme, November 1996

[SKFW05] Schuh, Günther ; Kampker, Achim ; Franzkoch, Bastian ; Wemhöner, Nils: *Studie: Intelligent Maintenance - Potentiale zustandsorientierter Instandhaltung*. Durchgeführt von: Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre (WZL) der RWTH Aachen und Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie (IPT) in Aachen im Auftrag von ifm electronic GmbH in Essen: <http://www.ifm-electronic.com/studie>, Abruf: 10.03.09, Zeitraum der Studie: Dezember bis März 2004/05

[WB01] Wirth, Siegfried ; Baumann, Andre: *Wertschöpfung durch vernetzte Kompetenzen*. HUSS-VERLAG GmbH München, 2001

[Wei07] Weißenbach, Andreas: Ein Instandhaltungsnetzwerk für Logistiksysteme – Innovativer Ansatz: Dienstleistung unter Partnern. In: *Sonderheft: Modernisierungsfibel 2007 „Retrofit&Co.“ eine Publikation von Hebezeuge Fördermittel – Fachzeitschrift für Technische Logistik*. Berlin : Huss-Medien GmbH Verlag Technik, Berlin München, 2007

[Wei09] Weissenbach, Andreas: *Vortrag: Die Zukunft der Instandhaltung bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) - Wie könnte das aussehen?* 2009 Anmerkung: Der Vortrag wurde gehalten am 26. März in Ilmenau anlässlich der 17. CIM Jahrestagung im Rahmen des Workshop 2: Instandhaltungsmanagement bei KMU