Entwicklung eines automatischen, flächenbeweglichen Mikro-Unterfahrschleppers

Von der Fakultät für Maschinenbau

der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Sebastian Behling

geboren am 31.12.1979 in Stadthagen

2010

1. Referent:	**Prof. Dr.-Ing. L. Schulze**
2. Referent:	**Prof. Dr.-Ing. G. Voß**
Tag der Promotion:	**09.11.2010**

Materialfluss- und Logistiksysteme

Band 7

Sebastian Behling

Entwicklung eines automatischen, flächenbeweglichen Mikro-Unterfahrschleppers

Shaker Verlag
Aachen 2011

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

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9733-6
ISSN 1438-4922

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Rationalisierung und Qualitätssicherung des innerbetrieblichen Materialflusses stehen in vielen Unternehmen im Fokus. Ein häufig angedachter Lösungsansatz stellt die Automatisierung der Transportprozesse dar, und dabei stehen Anlagen mit Fahrerlosen Flurförderzeugen im Blickpunkt. Sie sichern eine hohe Prozesstransparenz und bieten die Möglichkeit der Rückverfolgbarkeit.

Dies ist die Motivation für die Entwicklung eines automatischen und flächenbeweglichen Fahrzeugs in einer kompakten Bauweise als Element der Leichtfördertechnik. Das Fahrzeug soll gleichermaßen Sammeltransporte durch das Ziehen von Anhängern oder Einzeltransporte durch das Tragen von Kleinbehältern realisieren. Diese Anforderungen sind die Grundlage für ein innovatives Low-Cost-Systemkonzept zur Umsetzung aktueller Strategien in der Intralogistik.

Kernpunkte der Entwicklung des Fahrerlosen Flurförderzeugs sind das Fahrwerk, das Energiemanagement, die Navigation und die Fahrzeugsteuerung. Das flächenbewegliche Antriebskonzept nimmt dabei eine Schlüsselposition ein. Im Labor hat der Fahrzeug-Prototyp umfangreiche Tests erfolgreich absolviert und die gewünschte Flexibilität nachgewiesen.

Der Verfasser hat mit der vorliegenden Arbeit neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen und neue Optionen für die Automatisierung in der Intralogistik aufgezeigt. Er hat als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen (PSLT) der Leibniz Universität Hannover erfolgreich Forschungs- und Entwicklungsarbeit zur Materialflussautomatisierung geleistet. In Kooperation mit Fördertechnikherstellern hat er neben den wissenschaftlichen Fähigkeiten umfassend seine pragmatische und zielorientierte Vorgehensweise bewiesen. Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis seiner wissenschaftlichen und praxisbezogenen Arbeit.

Hannover, im Dezember 2010

Lothar Schulze

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen der Fakultät für Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover entstanden. Die Arbeit ist in ein Forschungsprojekt eingegliedert, welches durch das „Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand“ aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde. Das Forschungsprojekt trägt die offizielle Bezeichnung „Entwicklung und Realisierung eines autonomen Mikro-Unterfahrschleppers (MobiPull)“ und wurde in Kooperation mit der E&K AUTOMATION GmbH durchgeführt. Daher gilt mein ausdrücklicher Dank dem BMWi für die Finanzierung und dem Geschäftsführer unseres Projektpartners Herrn Dieter Eilers für die vielseitige Unterstützung.

In erster Linie danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Lothar Schulze für die Initiierung des Forschungsprojektes, das Vertrauen in meine Person und die wohlwollende Förderung dieser Arbeit während meiner Zeit am Fachgebiet. Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Voß bedanke ich mich vielmals für die Übernahme des Zweitreferats. Ebenso gilt mein aufrichtiger Dank dem Vorsitzenden der Prüfungskommission Herrn Professor Dr.-Ing. Dieter Mewes.

Für die freundschaftliche Zusammenarbeit danke ich meinen Kollegen sowie insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Stefan Buhrs für die fachliche Unterstützung. Ebenso sei an dieser Stelle den studentischen Mitarbeitern und Diplomanden besonders gedankt.

Einen herzlichen Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen, die durch ihre beispielhafte Hingabe meinen Werdegang bestmöglich gefördert haben. Des Weiteren danke ich meiner Schwester und meinen Freunden für ihre positive Beeinflussung.

Mein größtmöglicher Dank gilt meiner Frau Solveig, die mich stets verständnisvoll unterstützt hat. Bei meinem Sohn Neo bedanke ich mich für die erbrachte Motivation. Der Beitrag meiner Familie hat diese Arbeit ermöglicht.

Hannover, im Dezember 2010

Sebastian Behling

Abstract

Der innerbetriebliche Transport von Waren wird zunehmend automatisiert. Alle Gründe, die für eine Automatisierung sprechen, resultieren in einer verbesserten Wirtschaftlichkeit. Im Bereich der automatischen, unstetigen Fördertechnik haben sich Fahrerlose Flurförderzeuge seit vielen Jahren bewährt. Sie zeichnen sich durch niedrige Betriebskosten und eine hohe Qualität der Transporte aus.

Einen steigenden Anteil der Waren nehmen leichte, geringvolumige Kleinteile ein. Aus logistischer Sicht besteht das Interesse, die Kleinteile möglichst termingerecht und effizient zum Bestimmungsort zu transportieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines innovativen Fahrerlosen Flurförderzeugs, das für den flächenbeweglichen Transport von Kleinteilen optimiert ist. Die Umsetzung erfolgt in Form eines automatischen, omnidirektionalen Elektro-Unterfahrschleppers in Kompaktbauweise. Zur Verringerung der Transportfahrten ist eine flexible Anpassung der Kapazität pro Fahrzeug an die erforderliche Warenmenge des Zielortes möglich. Hauptaufgabe des Fahrzeugs ist das automatisierte Ziehen von Anhängern. Optional werden einzelne Kleinladungsträger mit einem Hubtisch befördert. Somit ist es erstmals möglich, ein lastziehendes und -tragendes Fahrzeug mit einer variablen Kapazität einzusetzen. Für das Fahrwerk werden Mecanum-Räder genutzt, die eine uneingeschränkte Flächenbeweglichkeit ermöglichen.

Mit dem realisierten Prototypfahrzeug wird die Funktionalität der Entwicklung nachgewiesen. Die eingesetzten Verfahren der Navigation und des Lasttransports demonstrieren eine gute Leistungsfähigkeit. Die Ergebnisse zeigen eine effiziente Gestaltung des automatischen Transports von Anhängern und Kleinladungsträgern.

Schlagworte:

- Fahrerloses Flurförderzeug
- Unterfahrschlepper
- Omnidirektionaler Antrieb

Abstract

The in-plant transport of goods is increasingly becoming automated. All reasons that argue for automation result in a better cost effectiveness. In the area of discontinuous conveyors Automated Guided Vehicles have proven their value for many years. They excel in low operation expenses and a high transport quality.

An extended percentage of the load units are lightweight and small goods that often occur either as single parts or as several articles in multiple small load carriers. Modern logistics concepts demand an efficient transport and the delivery within the intended time. To reduce the covered distance a flexible adjustment of the load capacity to single or consolidated transport is beneficial so that the vehicle can carry the required amount of goods without being oversized.

To fulfill these specifications the thesis at hand presents the development and realization of a new type of Automated Guided Vehicle that is optimized for the transportation of small goods. The construction is carried out as an omnidirectional drive-under tractor in compact dimensions. The main purpose of the vehicle is the automated pulling of trailers. Additionally the transport of single small load carriers can be accomplished by using a lifting table. Therefore it is possible for the first time to use a towing and carrying vehicle with a variable load capacity. For the drive system Mecanum wheels are used to enable omnidirectional maneuverability.

With the realized prototype the functionality of the development can be verified. The methods used for navigation and load handling demonstrate a good performance. The results show an efficient approach for an automated transportation of trailers and small load carriers.

Keywords:

- Automated Guided Vehicle
- Drive-Under Tractor
- Omnidirectional Drive

Inhaltsverzeichnis

Seite

Abkürzungsverzeichnis IV

1 Einleitung 1

2 Aufgabenstellung 3

2.1 Zielsetzung 4

2.2 Anforderungen an das Transportsystem 4

2.3 Sinnhaftigkeit des Systemkonzepts 7

3 Anlagen mit Fahrerlosen Flurförderzeugen 12

3.1 Einsatzgebiete 13

3.2 Technologie Fahrerloser Flurförderzeuge 15

3.2.1 Lasttransport 15

3.2.2 Fahrwerk 17

3.2.3 Energieversorgung 20

3.2.4 Fahrzeugsteuerung 21

3.2.5 Navigation 22

3.2.6 Warn- und Sicherheitseinrichtungen 26

3.3 Stationäre Anlagenkomponenten 28

3.3.1 Fahrkurs 28

3.3.2 Leitsteuerung 31

3.3.3 Energieversorgung 35

4 Realisierung des Fahrzeugkonzeptes 36

4.1 Entwicklung innovativer Baugruppen und Verfahren 36

4.1.1 Konstruktion des Fahrwerks 37

4.1.1.1 Mecanum-Räder 38

4.1.1.2 Antriebsstrang 46

4.1.1.3 Federung 50

4.1.2 Navigation 52

4.1.3 Lastaufnahme ... 56
4.1.3.1 Kupplung ... 57
4.1.3.2 Hubtisch ... 59
4.1.3.3 Lastpositionserkennung ... 61
4.1.3.4 Autonomes Ankuppeln ... 63
4.1.4 Warn- und Sicherheitseinrichtungen ... 65
4.2 Integration anforderungsgerechter Komponenten ... 69
4.2.1 Energieversorgung ... 69
4.2.2 Fahrzeugsteuerung ... 71
4.3 Systemumsetzung ... 73
4.3.1 Fahrzeug ... 73
4.3.2 Fahrkurs ... 75
4.3.3 Leitsteuerung ... 76
4.4 Applikation als Transportfahrzeug ... 79
4.4.1 Ziehen von Anhängern ... 79
4.4.2 Transport einzelner Kleinladungsträger ... 86
5 Experimentelle Untersuchung des entwickelten Systems ... 88
5.1 Grundlagen ... 88
5.1.1 Bedienung und Beobachtung mit der Leitsteuerung ... 88
5.1.2 Verhalten des Fahrwerks ... 90
5.1.3 Eigenschaften der Energieversorgung ... 91
5.2 Simulation des Systemkonzepts ... 92
5.2.1 Modellformulierung eines Fallbeispiels der Kanban-Logistik ... 93
5.2.2 Durchführung der Simulationsläufe ... 99
5.2.3 Ergebnisdarstellung ... 100
5.3 Navigation ... 104
5.3.1 Untersuchungen mit dem Navigationssensor ... 104
5.3.2 Versuche zur Odometrie ... 110
5.3.3 Automatisches Fahren auf dem Fahrkurs ... 113
5.4 Erprobung des Infrarotmoduls ... 115
5.5 Transportaufgaben ... 120

5.5.1 Zuverlässigkeit des autonomen Ankuppelns 120
5.5.2 Verhalten beim Ziehen von Anhängern 123
5.5.3 Analyse des Transports einzelner Kleinladungsträger 125

6 Anwendungsszenarien 127

6.1 Bodenblocklager 127

6.2 Kommissionierung 129

6.3 Montage 131

6.4 Produktion 132

7 Zusammenfassung 134

Schrifttum 136

Lebenslauf 144

Abkürzungsverzeichnis

α	:	Winkel zwischen Radachse und Rollenachse
a	:	Beschleunigung
A_B	:	Abstand halbe Spurbreite
AI	:	Analoger Eingang
A_L	:	Abstand Radachsen
AO	:	Analoger Ausgang
β	:	Verdrehwinkel des Anhängers
CAD	:	Computer-Aided Design
CE	:	Conformité Européenne
C-Norm	:	Maschinensicherheitsnorm
δ	:	Fehler Geschwindigkeit
δ_m	:	Anzahl der Zwangsbedingungen
δ_s	:	Anzahl unabhängig voneinander gelenkter Räder
d	:	Positionsfehler des Fahrzeugs
DI	:	Digitaler Eingang
DO	:	Digitaler Ausgang
ε	:	Fehler Beschleunigung
E	:	Entfernung zwischen Sensor und Hindernis
EN	:	Europäische Norm
f	:	Freiheitsgrade in der Ebene
FTS	:	Flurgebundenes Fahrerloses Transportsystem
Fzg	:	Fahrzeug
GPS	:	Global Positioning System
GPSG	:	Geräte- und Produktsicherheitsgesetz
GPSGV	:	Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz

i	:	Index
IP	:	Internet Protocol
ISO	:	International Organization for Standardization
KLT	:	Kleinladungsträger
LAM	:	Lastaufnahmemittel
LED	:	Light Emitting Diode
Li	:	Lithium
LIFO	:	Last In - First Out
M	:	Versatz des Magneten
N	:	Versatz des Fahrzeugs
NiCd	:	Nickel Cadmium
NiMH	:	Nickel Metallhydrid
ω_{Rad}	:	Winkelgeschwindigkeit des Rades
ψ	:	Neigungswinkel der Fahrbahn quer zur Fahrtrichtung
P	:	Punkt
PSD	:	Positive Sensitive Detector
PSLT	:	Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen
R	:	Radius Rad
r_{Weg}	:	Radius Fahrweg
s	:	Strecke
t	:	Zeit
TCP	:	Transmission Control Protocol
v	:	Geschwindigkeit
V	:	Versatz des Anhängers
VDI	:	Verein Deutscher Ingenieure
v_{Fzg}	:	Geschwindigkeit des Fahrzeugs
v_{φ}	:	Rotatorische Geschwindigkeit

v_P	:	Geschwindigkeit Punkt P
v_{Rad}	:	Geschwindigkeit Rad
v_{Rol}	:	Geschwindigkeit Rolle
WLAN	:	Wireless Local Area Network
ξ	:	Winkelfehler des Fahrzeugs
ZIM	:	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand