

**Entwicklung eines personenfolgenden Fahrzeuges
für die Kommissionierung**

**Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur**

genehmigte Dissertation

von

**Dipl.-Ing. oec. Daniel Knopp
geboren am 27.12.1979 in Hannover**

2012

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. L. Schulze

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Redeker

Tag der Promotion: 13.07.2012

Materialfluss- und Logistiksysteme

Band 13

Daniel Knopp

**Entwicklung eines personenfolgenden Fahrzeuges
für die Kommissionierung**

Shaker Verlag
Aachen 2012

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., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1265-1

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

Die Kommissionierung in Industrie, Handel und Dienstleistung kann in den meisten Applikationen noch immer nicht auf den „menschlichen Griff“ zum Picken verzichten. Gründe hierfür sind die Vielfalt der Sortimente, die Unterschiedlichkeit der Artikelabmessungen und -gewichte sowie die Individualität der Kundenaufträge.

Für Mittel- und Langsamdreher findet in der Praxis als Ablauforganisation häufig das Prinzip „Person zur Ware“ Anwendung. Der Kommissionierer läuft oder fährt technikunterstützt jede Auftragsposition an und entnimmt dort auftragsgemäß die Entnahmemenge pro Artikel. Im Mittelpunkt der Optimierung steht daher das Ziel, die Resource „Personal“ effizient einzusetzen.

Die Fahrzeugautomatisierung prägt den Ansatz des Verfassers. Er greift die Idee des personenfolgenden Fahrzeuges auf, das dem Kommissionierer automatisch im definierten Abstand folgen soll. Das System muss eine hohe Robustheit aufweisen, so dass wegkreuzende Fahrzeuge oder Personen die Personenfolge nicht beeinträchtigen.

Ausgehend vom Handlungsbedarf wird ein Anforderungsprofil abgeleitet und die Entwicklungsaufgabe definiert. Der realisierte Prototyp zeigt neue technische Lösungsansätze auf. Mit modellhaften Untersuchungen wurde nachgewiesen, welche Rahmenbedingungen für einen erfolgreichen Einsatz des entwickelten Konzeptes gegeben sein müssen. Die Vorteilhaftigkeit des Ansatzes schlägt sich in reduzierten Basis-, Tot- und Wegezeiten nieder.

Der Verfasser setzt sich mit einem Thema auseinander, das in Wissenschaft und Praxis im Fokus steht. Mit der vorliegenden Entwicklung und den Ergebnissen zur Applikationseignung hat er neue Perspektiven für die Kommissionierung aufgezeigt. Als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen (PSLT) der Leibniz Universität Hannover hat der Verfasser sehr erfolgreich Forschungs- und Entwicklungsprojekte bearbeitet. Die vorliegende Dissertation unterstreicht gleichermaßen sein wissenschaftliches Methodenwissen und seinen zielorientierten praxisbezogenen Ansatz.

Hannover, im Juli 2012

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. Sie baut auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes „Entwicklung und Umsetzung von Verfahren zur automatischen Personenverfolgung mit Automated Guided Vehicles“ auf, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Lothar Schulze sowohl für die Betreuung der Arbeit als auch für die fachliche Förderung während meiner Zeit an seinem Fachgebiet. Herrn Professor Dr.-Ing. Georg Redeker danke ich für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission und die stets motivierenden Worte während der Erstellung der Arbeit danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Manfred Gietzelt.

Für fünf wertvolle Jahre der freundschaftlichen Zusammenarbeit am Fachgebiet danke ich den Kollegen Sebastian Behling, Stefan Buhrs, Moritz Bonse, Marcus Gerasch, Li Li, Sebastian Mansky, Carsten Schulte und Dag Tegtmeier. Ebenso danke ich den Studenten, die bei der erfolgreichen Umsetzung der Ideen zur Arbeit mitgewirkt haben.

Meiner Familie danke ich für die fortwährende Förderung meines wissenschaftlichen Werdeganges und meinen Freunden für ihren motivierenden Einfluss.

Mein tiefster Dank gilt schließlich meiner Verlobten Franziska Partecke, die mir auf meinem Weg zu jeder Zeit den notwendigen Rückhalt gegeben und mich vorbehaltlos unterstützt hat.

Springe, im Juli 2012

Daniel Knopp

Kurzfassung

An der Schnittstelle eines Unternehmens zu seinen Kunden befindet sich häufig die Kommissionierung. Sie stellt die von Kunden angeforderten Artikel aus dem Sortiment des Unternehmens zu Sendungen zusammen. Die für diese Aufgabe aufgewendeten Personalressourcen bedeuten für Unternehmen ein nicht unerhebliches Rationalisierungspotential durch Automatisierung. Dieses Potential wird jedoch zur Erhaltung der Flexibilität häufig nicht ausgeschöpft.

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung eines personenfolgenden Fahrzeuges vorgestellt, das dem Kommissionierer automatisch folgt und den Transport der Artikel übernimmt. Auf diese Weise werden die Vorteile des automatisierten Transportes und der menschlichen Flexibilität vereint.

Die Umsetzung des Fahrzeuges erfolgt in Form eines zur Kleinteilekommissionierung geeigneten Fahrerlosen Flurförderzeugs, das um die Funktion der Personenfolgung ergänzt wird. Hierzu werden unterschiedliche Verfahren der Personenfolgung diskutiert und eine Auswahl wird vorgenommen. Unter Einsatz einer Kamera, eines Bildverarbeitungsprogramms und eines Laserscanners wird in Verbindung mit der Fahrzeugsteuerung die Personenfolgung realisiert.

Versuche in einer eingerichteten Testumgebung weisen die Funktionalität der Personenfolgung nach und zeigen sowohl ihr Potential als auch ihre Grenzen auf. Ebenso werden auf Grundlage eines erarbeiteten Kommissionierkonzeptes die effizienten Einsatzbereiche personenfolgender Fahrzeuge identifiziert. Abhängig vom spezifischen Kommissioniersystem bieten personenfolgende Fahrzeuge signifikante Vorteile gegenüber herkömmlichen manuell bedienten Fördermitteln, die sich nicht nur in einer höheren Qualität des Transportes, sondern auch in einer höheren Leistung der Kommissionierung äußern.

Schlagnworte:

- o Fahrerloses Flurförderzeug
- o Personenfolgung
- o Kommissionierung

Abstract

At the interface of a company to its customers, there is often order picking. It arranges the customer-requested articles from the assortment of the company into shipments. The human resources spent on this task imply for companies significant potential for rationalization through automation. However, this potential is often not utilized in order to keep flexibility.

In this thesis the development of a person following vehicle is presented. It automatically follows the assigned picker and takes over the transport of the articles as well. Hence, the benefits of automated transportation and human flexibility are combined.

The vehicle is implemented as an Automated Guided Vehicle for order picking of small articles, that is endowed with the function of person following. For this function, different methods for person following are discussed and a selection is made. The person following is realized by using a camera, an image processing program, and a laser scanner in conjunction with the vehicle control.

Experiments in a test environment demonstrate the functionality of person following and point out both its potential and its limitations. On the basis of a worked out concept for order picking, the efficient application areas using person following vehicles are identified. Depending on the specific order picking system, person following vehicles offer significant advantages compared to conventional manual material handling technologies. These advantages are manifested not only in a higher quality of transport but also in a higher efficiency of order picking.

Keywords:

- o Automated Guided Vehicle
- o Person following
- o Order picking

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abkürzungsverzeichnis.....	III
Symbolverzeichnis.....	IV
Bildverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Aufgabenstellung.....	4
2.1 Abgrenzung des Betrachtungsbereiches	5
2.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	6
3 Kommissioniersysteme	8
3.1 Aufbau.....	8
3.1.1 Informationssystem.....	9
3.1.2 Materialflusssystem	12
3.1.3 Organisationssystem	15
3.2 Leistung	16
4 Kommissionierkonzept mit personenfolgenden Fahrzeugen	26
4.1 Beschreibung.....	26
4.1.1 Basisdaten	27
4.1.2 Aufbau und Ablauf	27
4.2 Potentiale.....	30
5 Fahrzeugentwicklung und -umsetzung	36
5.1 Funktionale Anforderungen.....	36
5.2 Basisfahrzeug	39
5.2.1 Karosserie, Lastaufnahmemittel und Fahrwerk.....	39
5.2.2 Antrieb	41
5.2.3 Navigationssystem.....	44
5.2.4 Sicherheitseinrichtungen.....	48

5.2.5	Bedienerschnittstellen	50
5.2.6	Energieversorgung	52
5.2.7	Steuerung	54
5.3	Personenfolgeung	57
5.3.1	Verfahren	58
5.3.2	Sensorik	62
5.3.3	Erkennungs- und Identifizierungsmerkmal	66
5.3.4	Steuerungsprogramm	68
5.3.5	Bildverarbeitungsprogramm	74
5.4	Kommissionierprogramm	84
6	Bewertung von Fahrzeug und Kommissionierkonzept	87
6.1	Fahrzeugerprobung	87
6.1.1	Testumgebung	89
6.1.2	Zuverlässigkeit der Personenfolgeung	90
6.1.3	Reaktionsfähigkeit	98
6.2	Analytische Betrachtung des Kommissionierkonzeptes	100
7	Zusammenfassung	109
	Schrifttum	111

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided Design
CAMSHIFT	Continuously Adaptive Mean-Shift
CCD	Charge-coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DLL	Dynamic Link Library
ENW	Elektroniederhubwagen ohne Fahrerstand
FTS	Fahrerloses Transportsystem
HSV	Hue, Saturation, Value
HZK	Horizontalkommissionierer
ID	Identifikator
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KW	Kommissionierwagen
LCD	Liquid Crystal Display
LVS	Lagerverwaltungssystem
PC	Personal Computer
pF	personenfolgendes Fahrzeug
PSLT	Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen
RGB	Rot, Gelb, Blau
TOF	Time-Of-Flight
USB	Universal Serial Bus
WLAN	Wireless Local Area Network

Symbolverzeichnis

b	Bildweite
b^-	Verzögerung
b^+	Beschleunigung
η_{Antrieb}	Wirkungsgrad des Antriebs
n_{Motor}	Motordrehzahl bei Maximalgeschwindigkeit
η_{ver}	Verfügbarkeit des Kommissionierers
F_{WB}	Beschleunigungswiderstand
F_{WR}	Radwiderstand
f	Brennweite
f_{R}	Rollwiderstandsbeiwert
$ G $	Betrag des Gradienten an einem Bildpunkt
G_x	Ergebnismatrix nach der Faltung mit S_x
G_y	Ergebnismatrix nach der Faltung mit S_y
g	Erdbeschleunigung
i_{Gesamt}	Gesamtübersetzung des Abtriebs
M_{max}	maximal aufzubringendes Moment
m_{Fzg}	Fahrzeugmasse
n_{L}	Drehzahl linkes Antriebsrad
n_{Pos}	Anzahl Auftragspositionen je Kommissionierauftrag
n_{R}	Drehzahl rechtes Antriebsrad
n_{Zugriffe}	Anzahl Zugriffe je Kommissionierauftrag
o	Objektweite
P	Antriebsleistung
P_{K}	Kommissionierleistung
P_{P}	Zugriffsleistung
r_{Rad}	Antriebsradradius
S_x	Sobel-Operator zur Detektion vertikaler Kanten
S_y	Sobel-Operator zur Detektion horizontaler Kanten
T	Zeit zur Fortbewegung zwischen zwei Orten
t	Zeit
t_{Auftrag}	Zeit je Kommissionierauftrag
t_{Basis}	Basiszeit je Kommissionierauftrag

t_{Greif}	Greifzeit je Kommissionierauftrag
t_{Tot}	Totzeit je Kommissionierauftrag
t_{Weg}	Wegzeit je Kommissionierauftrag
Θ	Orientierung des Gradienten an einem Bildpunkt
v_{max}	Maximalgeschwindigkeit
v^*	erreichbare Geschwindigkeit

Bildverzeichnis

Bild 2.1: Lagerstrukturen in einem Industrieunternehmen	5
Bild 3.1: Informationsbereitstellung mittels Pick-by-Voice	11
Bild 3.2: Kommissionierung nach dem Prinzip Person-zur-Ware	14
Bild 3.3: Kommissionierung nach dem Prinzip Ware-zur-Person	14
Bild 3.4: Geschwindigkeitsverlauf mit Erreichen der Maximalgeschwindigkeit	21
Bild 3.5: Geschwindigkeitsverlauf ohne Erreichen der Maximalgeschwindigkeit	21
Bild 3.6: Horizontalkommissionierer mit überlangen Gabeln	24
Bild 4.1: Segmentierung des deutschen Logistikmarktes in 2009.....	31
Bild 4.2: Einsatzgebiete von FTS-Neuanlagen, Inbetriebnahmen 2011	33
Bild 4.3: Fahrerlose Flurförderzeuge in der Kommissionierung	34
Bild 5.1: CAD-Entwurf des personenfolgenden Fahrzeuges	39
Bild 5.2: Differentialantrieb und Standsicherheit	41
Bild 5.3: Entwurfsansicht der Antriebsstränge	42
Bild 5.4: Einteilung der Navigationsverfahren	45
Bild 5.5: Fahrzeugnavigation mittels Lasertriangulation	46
Bild 5.6: Lasernavigationssystem des personenfolgenden Fahrzeuges	47
Bild 5.7: Sicherheitslaserscanner des personenfolgenden Fahrzeuges	49
Bild 5.8: Sensor-Aktor-Verknüpfung über Industrie-PC	54
Bild 5.9: Benutzeroberfläche der Fahrzeugsteuerung	57
Bild 5.10: Elektromagnetisches Spektrum	59
Bild 5.11: Funktionsprinzip einer TOF-Kamera	60
Bild 5.12: Erkennung und Identifizierung durch Remissionswertmessung	62
Bild 5.13: Kamera zur Personenfolgung	63
Bild 5.14: Prinzip der Lichtfilterung in einem Bayer-Mosaik-Sensor	64
Bild 5.15: Sichtfeld der Kamera	65
Bild 5.16: Roter Overall zur Personenerkennung	67
Bild 5.17: Geeignete Farbkombinationen der ID zur Personenidentifizierung	68
Bild 5.18: Datenaustausch zur Personenfolgung	69
Bild 5.19: Flussdiagramm der Personenfolgung	72
Bild 5.20: Fallunterscheidung zur Kommissionierung	73
Bild 5.21: Visualisierung der Personenfolgung im Steuerungsprogramm	74
Bild 5.22: Grafische Benutzeroberfläche des Bildverarbeitungsprogramms	75

Bild 5.23: HSV-Farbraum als Kegel	76
Bild 5.24: Stufen der Farbfilterung	77
Bild 5.25: Objektverfolgung mit dem CAMSHIFT-Algorithmus.....	78
Bild 5.26: Abfolge zur Kennzeichnung des Erkennungsmerkmals.....	79
Bild 5.27: Veranschaulichung einer Faltung zur Detektion vertikaler Kanten	80
Bild 5.28: Sektoren des Canny-Filters	81
Bild 5.29: Ergebnis der Kantendetektion	82
Bild 5.30: Histogramm einer blau-gelben ID	82
Bild 5.31: Anzeigen im Bildverarbeitungsprogramm	83
Bild 5.32: Benutzeroberfläche des Kommissionierprogramms	85
Bild 5.33: Optisches Signal am Auftragsbehälter zur Artikelablage	86
Bild 6.1: Prototypische Umsetzung des personenfolgenden Fahrzeuges.....	88
Bild 6.2: Bereich der Testumgebung mit Reflektormarken	89
Bild 6.3: Auswirkungen unterschiedlicher Verdeckungen	91
Bild 6.4: Auswirkungen der Verschmelzung gleichartiger Farbtöne.....	92
Bild 6.5: Identifizierungswahrscheinlichkeit der ID.....	94
Bild 6.6: Auswirkungen unterschiedlicher Beleuchtung	95
Bild 6.7: Auswirkungen unterschiedlicher Fokussierung.....	97
Bild 6.8: Eingabemaske des Rechenprogramms.....	101
Bild 6.9: Vergleich der Fördermittel in der Kommissionierung auf Paletten	105
Bild 6.10: Vergleich der Fördermittel in der Kleinteilekommissionierung	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Informationsbereitstellung in der Kommissionierung.....	10
Tabelle 3.2: Zeitanteile der Kommissionierung.....	18
Tabelle 5.1: Interaktionen zwischen Kommissionierer und Fahrzeug.....	38
Tabelle 5.2: Wesentliche Komponenten der Karosserie.....	40
Tabelle 5.3: Wesentliche Komponenten des Antriebsstrangs.....	42
Tabelle 5.4: Wesentliche Bedienerchnittstellen.....	52
Tabelle 5.5: Bemessungskapazitäten der Akkumulatoren bei 20 °C.....	53
Tabelle 5.6: Wesentliche Komponenten der Energieversorgung.....	54
Tabelle 5.7: Mögliche Bewegungen des Differentialantriebs.....	56
Tabelle 5.8: Komponenten der Sensorik zur Personenfolgung.....	66
Tabelle 5.9: Steuerungsinformationen zur Personenfolgung.....	70
Tabelle 6.1: Messreihe zur Abstandsberechnung über Farbtonfläche und ID.....	93
Tabelle 6.2: Fördermittelspezifische Parameter und Auftragszeitanteile.....	102
Tabelle 6.3: Systeme zur Kommissionierung auf Paletten.....	104
Tabelle 6.4: Systeme zur Kleinteilekommissionierung.....	104
Tabelle 6.5: Vorteile personenfolgender Fahrzeuge in berechneten Systemen.....	108