



# Forschung und Praxis

---

Band 147

Berichte aus dem  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik  
und Automatisierung (IPA), Stuttgart,  
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft  
und Organisation (IAO), Stuttgart, und  
Institut für Industrielle Fertigung und  
Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

Herausgeber: H. J. Warnecke und H.-J. Bullinger



**Gerhard Drunk**

**Sensor- und Steuerungssystem für die leitlinienlose Führung automatischer Flurförderzeuge**

Mit 52 Abbildungen

**Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg GmbH 1990**

Dipl.-Ing. Gerhard Drunk

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. h. H. J. Warnecke

o. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Bullinger

o. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 978-3-540-53033-6 ISBN 978-3-662-09859-2 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-09859-2

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1990

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Gesamtherstellung: Copydruck GmbH, Heimsheim  
2362/3020–543210

## Geleitwort der Herausgeber

Futuristische Bilder werden heute entworfen:

- o Roboter bauen Roboter,
- o Breitbandinformationssysteme transferieren riesige Datenmengen in Sekunden um die ganze Welt.

Von der "menschenleeren Fabrik" wird da gesprochen und vom "papierlosen Büro". Wörtlich genommen muß man beides als Utopie bezeichnen, aber der Entwicklungstrend geht sicher zur "automatischen Fertigung" und zum "rechnerunterstützten Büro". Forschung bedarf der Perspektive, Forschung benötigt aber auch die Rückkopplung zur Praxis - insbesondere im Bereich der Produktionstechnik und der Arbeitswissenschaft.

Für eine Industriegesellschaft hat die Produktionstechnik eine Schlüsselstellung. Mechanisierung und Automatisierung haben es uns in den letzten Jahren erlaubt, die Produktivität unserer Wirtschaft ständig zu verbessern. In der Vergangenheit stand dabei die Leistungssteigerung einzelner Maschinen und Verfahren im Vordergrund. Heute wissen wir, daß wir das Zusammenspiel der verschiedenen Unternehmensbereiche stärker beachten müssen. In der Fertigung selbst konzipieren wir flexible Fertigungssysteme, die viele verkettete Einzelmaschinen beinhalten. Dort, wo es Produkt und Produktionsprogramm zulassen, denken wir intensiv über die Verknüpfung von Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätskontrolle nach. Rechnerunterstützte Informationssysteme helfen dabei und sollen zum CIM (Computer Integrated Manufacturing) führen und CAD (Computer Aided Design) und CAM (Computer Aided Manufacturing) vereinen. Auch die Büroarbeit wird neu durchdacht und mit Hilfe vernetzter Computersysteme teilweise automatisiert und mit den anderen Unternehmensfunktionen verbunden. Information ist zu einem Produktionsfaktor geworden, und die Art und Weise, wie man damit umgeht, wird mit über den Unternehmenserfolg entscheiden.

Der Erfolg in unseren Unternehmen hängt auch in der Zukunft entscheidend von den dort arbeitenden Menschen ab. Rationalisierung und Automatisierung müssen deshalb im Zusammenhang mit Fragen der Arbeitsgestaltung betrieben werden, unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Mitarbeiter und unter Beachtung der erforderlichen Qualifikationen. Investitionen in Maschinen und Anlagen müssen deshalb in der Produktion wie im Büro durch Investitionen in die Qualifikation der Mitarbeiter begleitet werden. Bereits im Planungsstadium müssen Technik, Organisation und Soziales integrativ betrachtet und mit gleichrangigen Gestaltungszielen belegt werden.

Von wissenschaftlicher Seite muß dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Beispielhaft sei hier an den großen Bereich der Informationsverarbeitung im Betrieb erinnert, der von der Angebotserstellung über Konstruktion und Arbeitsvorbereitung, bis hin zur Fertigungssteuerung und Qualitätskontrolle reicht. Beim Materialfluß geht es um die richtige Aus-

wahl und den Einsatz von Fördermitteln sowie Anordnung und Ausstattung von Lagern. Große Aufmerksamkeit wird in nächster Zukunft auch der weiteren Automatisierung der Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen sowie der Montage von Produkten geschenkt werden.

Von der Forschung muß in diesem Zusammenhang ein Beitrag zum Einsatz fortschrittlicher intelligenter Computersysteme erfolgen. Planungsprozesse müssen durch Softwaresysteme unterstützt und Arbeitsbedingungen wissenschaftlich analysiert und neu gestaltet werden.

Die von den Herausgebern geleiteten Institute, das

- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart (IFF),
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe "IPA-IAO - Forschung und Praxis" herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluß dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Springer-Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

H. J. Warnecke • H.-J. Bullinger

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Warnecke danke ich für die großzügige Unterstützung und Förderung, welche die Durchführung dieser Arbeit ermöglichte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Pritschow danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für die eingehende Durchsicht des Manuskripts.

Aus dem großen Kreis der Kollegen des Instituts, die mich bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt haben, möchte ich besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. R.D. Schraft, der durch seine engagierte Fürsprache die Durchführung der praktischen Realisierung ermöglichte, die Herren Dr.-Ing. H. Gzik und Dr.-Ing. M. Schweizer, die mir mit vielen hilfreichen Hinweisen zur Seite gestanden haben, sowie Frau D. Dilmen, die mich bei der Manuskripterstellung, dem Layout und durch ihren praktischen Rat in vielfacher Weise unterstützt hat, erwähnen. Ihnen allen gilt mein herzlicher Dank.

Einen besonderen Dank richte ich an die Mitglieder des Teams, die gemeinsam mit mir den Versuchsträger IPAMAR aufgebaut haben. Die Herren N. Bissinger, P. Campoy, S. Forster, J. Hobsack, C. Hug, A. Langen, J. Luz, G. Meiler, J. Müllerschön, K. Neunteufel, J. Rentschler, A. Scherrmann und N. Vasiliadis haben mit ihrem beispiellosen Einsatz die theoretischen Ergebnisse der Forschungsarbeit für die Öffentlichkeit sichtbar gemacht.

Stuttgart, im Mai 1990

Gerhard Drunk

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>12</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>14</b>
1.1	Problemstellung.....	14
1.2	Zielsetzung.....	15
1.3	Vorgehensweise .....	16
<b>2</b>	<b>Ausgangssituation und Anforderungen .....</b>	<b>17</b>
2.1	Begriffe und Definitionen .....	17
2.1.1	Automatische Flurförderzeuge.....	17
2.1.2	Prinzipien der Positionsbestimmung von Fahrzeugen .....	19
2.1.3	Mobile autonome Roboter.....	21
2.1.3.1	Erweiterter Roboterbegriff.....	21
2.1.3.2	Begriff der Mobilität .....	22
2.1.3.3	Begriff der Autonomie bei Fortbewegungseinrichtungen .....	22
2.1.3.4	Vorschlag einer Definition .....	24
2.1.4	Teilsysteme mobiler autonomer Roboter .....	24
2.2	Stand der Technik.....	25
2.2.1	Leitliniengebundene Führungssysteme für Flurförderzeuge.....	25
2.2.2	Fortgeschrittene Führungssysteme für Flurförderzeuge.....	27
2.2.3	Forschungsprojekte zu mobilen autonomen Robotern.....	30
2.3	Lastenheft .....	33
2.3.1	Abgrenzung des Einsatzbereichs .....	33
2.3.2	Zentrale Anforderungen.....	35
2.3.3	Anforderungen zur Fahrkursflexibilität.....	35
2.3.4	Anforderungen an die Komponenten .....	37
<b>3</b>	<b>Analyse der Funktionen und Lösungsansätze des Sensorsystems .....</b>	<b>39</b>
3.1	Entwicklungsmethodik der Analyse und Synthese .....	39
3.2	Gegenseitige Abhängigkeit von Sensorik und Steuerung.....	40

3.3	Analyse der Funktionen des Sensorsystems.....	41
3.4	Lösungsvarianten für die interne Positionsbestimmung .....	43
3.5	Lösungsvarianten für die Umgebungserkennung .....	45
3.5.1	Optische Bildverarbeitungs-Sensoren.....	46
3.5.2	Optische abstandsmessende Sensoren.....	47
3.5.3	Akustische Sensoren.....	49
3.6	Lösungsvarianten für den Kollisionsschutz .....	50
3.7	Sensordatenverarbeitung .....	52
<b>4</b>	<b>Analyse der Funktionen und Lösungsansätze des Steuerungssystems.....</b>	<b>53</b>
4.1	Unterteilung des Steuerungssystems in Funktionen.....	53
4.2	Unterfunktionen und Lösungsansätze zu den Funktionen.....	55
4.2.1	Planung .....	55
4.2.2	Ablaufsteuerung .....	57
4.2.3	Bewegungssteuerung.....	59
4.2.4	Umgebungserfassung .....	61
4.2.5	Lernkomponente .....	64
4.3	Steuerungsarchitekturen .....	65
<b>5</b>	<b>Konzept-Entwicklung.....</b>	<b>67</b>
5.1	Auswahl und Bewertung der Funktionseinheiten .....	67
5.2	Lösungsentwicklung für kritische Konzeptpunkte.....	69
5.2.1	Auswahl des Navigationsprinzips .....	69
5.2.2	Umgebungsmodellwissen und Korrespondenz-Findung .....	71
5.2.3	Sensorik zur Umgebungserkennung .....	74
5.3	Konzeption ergänzender zentraler Funktionen.....	79
5.3.1	Auswahl der Sensorik zur Positionsbestimmung.....	79
5.3.2	Kollisionsschutz und Gefahrenzonen-Überwachung .....	79
5.3.3	Konzeptentwicklung für die Planungskomponente .....	81
5.4	Einbindungskonzepte für optionale Erweiterungen .....	83
5.4.1	Ausführungsüberwachung .....	83
5.4.2	Fehlerbehandlung .....	83
5.4.3	Sensorgeführte Bahnfahr-Routinen.....	86
5.5	Strukturauswahl und Systemübersicht.....	86



<b>6</b>	<b>Algorithmen - Entwicklung .....</b>	<b>89</b>
6.1	Berechnungsgrundlagen.....	89
6.1.1	Koordinatensysteme.....	89
6.1.2	Koordinatentransformation für die Bewegungssteuerung .....	90
6.1.3	Sensor-Koordinatentransformation .....	92
6.2	Algorithmen für die Positionsbestimmung .....	93
6.2.1	Lageerfassung aus der Koppelnavigation.....	93
6.2.2	Lagedifferenz-Korrektur durch Sensoraktionen.....	94
6.3	Algorithmen für die Trajektorienberechnung .....	96
6.3.1	Interpolation .....	98
6.3.2	Interpolations-Vorbereitung .....	99
<b>7</b>	<b>Versuchsdurchführung und Ergebnisse .....</b>	<b>102</b>
7.1	Aufbau des Versuchsträgers IPAMAR.....	102
7.1.1	Systemübersicht und Komponentenstruktur .....	103
7.1.2	Mechanische Konstruktion des Versuchsträgerfahrzeugs .....	104
7.1.3	Technische Ausstattung.....	105
7.1.4	Sensorik .....	107
7.1.5	Steuerungshardware .....	108
7.1.6	Implementierung der Steuerungs-Software .....	108
7.1.7	Transportsystem-Zellenrechner .....	110
7.2	Versuchsergebnisse .....	112
7.2.1	Funktionsnachweis für das Sensor- und Steuerungssystem.....	113
7.2.2	Leistungsgrenzen der zur Navigation eingesetzten Sensoren.....	115
7.2.2.1	Wiederholgenauigkeit der Positionsbestimmung.....	116
7.2.2.2	Genauigkeit des Ultraschallsensors zur Kurskorrektur .....	117
7.2.3	Betrachtung der wirtschaftlichen Realisierbarkeit .....	119
7.3	Diskussion der Ergebnisse .....	120
7.3.1	Lastenheftanforderungen und Zielerreichung .....	120
7.3.2	Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen .....	121
7.3.3	Ansatzpunkte für weiterführende Forschungsarbeiten.....	122
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>125</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>128</b>

## 0 Abkürzungen und Formelzeichen

a	mm	Kurvenweite: Abstand der Kurvenendpunkte vom Schnittpunkt beider Bahnasymptoten
b	mm	Versatzbreite: seitlicher Abstand paralleler Bahnabschnitte
C	-	Orientierungsachse des Raumkoordinaten-Systems
C'	-	Orientierungsachse des Fahrzeugkoordinaten-Systems
C <sup>Sn</sup>	-	Orientierungsachse des Sensorkoordinaten-Systems des Sensors n
CAD	-	Computer aided design
CMOS	-	Complementary metal-oxid-semiconductor
c	mm	Orientierungswert in Raumkoordinaten
c <sub>i</sub>	mm	Istwert der Fahrzeugorientierung in Raumkoordinaten
c'	mm	Orientierungswert in Fahrzeugkoordinaten
c' <sub>Sn</sub>	mm	Orientierungswert der Montageposition des Sensors n in Fahrzeugkoordinaten
c <sup>Sn</sup>	mm	Orientierungswert in Sensorkoordinaten des Sensors n
d	mm	Verfahrdistanz: zurückgelegter Weg in Fahrtrichtung
EGA	-	Enhanced graphics adapter
FBP	-	Fahrzeug-Bezugspunkt: Ursprung des Fahrzeugkoordinaten-Systems
FTS	-	Fahrerloses Transportsystem
IPAMAR	-	IPA mobiler autonomer Roboter
k	-	Index für Umgebungssegmentnummer
k <sub>Lm</sub>	DM	Kosten der Bodeninstallationen je lfd. m Fahrweg
l	mm	Achsabstand
l <sub>A</sub>	m	Fahrkurslänge einer Transportanlage
MAR	-	Mobiler autonomer Roboter
m	-	Index für Mittelwerte
max	-	Index für Maximalwerte
n	-	Index für Sensornummer
n <sub>F</sub>	-	Anzahl der Transportfahrzeuge einer Anlage
PSD	-	Position sensitive detector
RAM	-	Random access memory
RBP	-	Raum-Bezugspunkt: Ursprung des Raumkoordinaten-Systems
S	-	Fahrtriebsachse des Radkoordinaten-Systems
s	mm	Inkrementeller Abrollweg des Antriebsrades
$\dot{s}$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit des Antriebsrades
T	s	Zeitkonstante für den Lenkwinkелеinschlag auf den Maximalwert
t	s	Zeit
t <sub>a</sub>	s	Beschleunigungszeit von Anfangsgeschwindigkeit auf Bahngeschwindigkeit
t <sub>b</sub>	s	Zeitdauer eines Bewegungssatzes bis zum Einleiten der Verzögerung auf Endgeschwindigkeit

$t_e$	s	Gesamtdauer eines Bewegungssatzes bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeit
$t_k$	s	Zeitdauer einer Kurvenfahrt mit konstantem Lenkwinkелеinschlag
$t_n$	s	Zeitparameter der n-ten Rekursion für die Interpolationsberechnung
$t_0$	s	Startzeit der Fahrzeugbewegung
$u$	m	Meßabstände der Sensoren zur Umgebung
VBP	-	Vorderrad-Bezugspunkt: Ursprung des Radkoordinaten-Systems
VME	-	Versados module europe
$v_b$	m/s	Bahngeschwindigkeit bezogen auf das Antriebsrad
$v_e$	m/s	Endgeschwindigkeit eines Bewegungssatzes bezogen auf das Antriebsrad
$v_R$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit des Antriebsrades
$w$	-	Häufigkeit
$X$	-	Erste kartesische Achse des Raumkoordinaten-Systems
$X'$	-	Erste kartesische Achse des Fahrzeugkoordinaten-Systems
$X^{Sn}$	-	Erste kartesische Achse des Sensorkoordinaten-Systems des Sensors n
$x$	mm	Positionswert auf der X-Achse in Raumkoordinaten
$x_i$	mm	Istwert der Fahrzeugposition auf der X-Achse in Raumkoordinaten
$x'$	mm	Positionswert auf der X'-Achse in Fahrzeugkoordinaten
$x'^{Sn}$	mm	Montageposition des Sensors n auf der X'-Achse in Fahrzeugkoordinaten
$x^{Sn}$	mm	Positionswert auf der $X^{Sn}$ -Achse in Sensorkoordinaten des Sensors n
$Y$	-	Zweite kartesische Achse des Raumkoordinaten-Systems
$Y'$	-	Zweite kartesische Achse des Fahrzeugkoordinaten-Systems
$Y^{Sn}$	-	Zweite kartesische Achse des Sensorkoordinaten-Systems des Sensors n
$y$	mm	Positionswert auf der Y-Achse in Raumkoordinaten
$y_i$	mm	Istwert der Fahrzeugposition auf der Y-Achse in Raumkoordinaten
$y'$	mm	Positionswert auf der Y'-Achse in Fahrzeugkoordinaten
$y'^{Sn}$	mm	Montageposition des Sensors n auf der Y'-Achse in Fahrzeugkoordinaten
$y^{Sn}$	mm	Positionswert auf der $Y^{Sn}$ -Achse in Sensorkoordinaten des Sensors n
$\alpha$	-	Lenkachse des Radkoordinaten-Systems
$\alpha$	°	Lenkwinkelwert in Radkoordinaten
$\alpha_{max}$	°	Maximaler Lenkwinkелеinschlag bei Kurvenfahrt
$\gamma$	°	Fahrtrichtungsänderung durch eine Kurve
$\Delta c$	°	Orientierungsabweichung vom Mittelwert mehrerer Meßfahrten in Raumkoordinat
$\Delta c'$	°	Von der Sensorik zur Umgebungserkennung gemessene Abweichung des $c'$ -Wertes von der Sollorientierung in Fahrzeugkoordinaten
$\Delta t$	ms	Zykluszeit der Interpolation
$\Delta x$	mm	Positionsabweichung der x-Koordinate vom Mittelwert mehrerer Meßfahrten in Raumkoordinaten
$\Delta x'$	mm	Von der Sensorik zur Umgebungserkennung gemessene Abweichung des $x'$ -Wertes von der Sollposition in Fahrzeugkoordinaten
$\Delta y$	mm	Positionsabweichung der y-Koordinate vom Mittelwert mehrerer Meßfahrten in Raumkoordinaten
$\Delta y'$	mm	Von der Sensorik zur Umgebungserkennung gemessene Abweichung des $y'$ -Wertes von der Sollposition in Fahrzeugkoordinaten