

# Autonome, adaptive Bewegungskoordination von Gehmaschinen in komplexer Umgebung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der  
Gerhard-Mercator-Universität–Gesamthochschule Duisburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Martin Guddat

aus

Oberhausen/Rheinland

Referent: Prof. Dr.-Ing. Martin Frik

Korreferent: Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Hartmut Witte

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Februar 2002



## Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau, Lehrstuhl für Mechanik an der Gerhard-Mercator-Universität in Duisburg.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Frik, der diese Arbeit als Referent betreut hat. Seine Förderung, sowohl durch seine guten Ratschläge und Hinweise, besonders aber durch das Vertrauen, das er in mich gesetzt hat, hat mir immer geholfen und mich vorangebracht.

Herrn Prof. Dr. med. Dipl.-Ing. Hartmut Witte als externem Gutachter danke ich für die Übernahme des Korreferates sowie für die vielen erhellenden Diskussionen auf Konferenzen und Veranstaltungen insbesondere des DFG-Schwerpunktprogrammes „Autonomes Laufen“

Den Mitarbeitern des Fachgebietes Mechanik gebührt besonderer Dank für das außergewöhnlich gute Arbeitsklima und die ständige Hilfsbereitschaft der Kollegen. Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Axel Buschmann, dessen beherztes Eingreifen mich nach meiner Studienzeit an das Fachgebiet gebunden hat.

Herausgestellt werden soll hier Herr Dipl.-Ing. Eko Bono Suprijadi. Ohne seinen unermüdlichen Einsatz, seine Arbeit an den Robotern und seine Hilfsbereitschaft wäre meine Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Zusätzlich haben viele Studenten durch ihre Mitarbeit und ihre Studien- und Diplomarbeiten geholfen, TARRY und seine Nachfolger weiter zu verbessern. Ich hoffe, dass alle dabei so viel Spass hatten wie ich selbst.

Für den notwendigen Rückhalt verdient meine Lebensgefährtin Kerstin Daniel besonderen Dank. Ihre permanente Unterstützung hat mich auch in schwierigen Zeiten getragen.

Widmen möchte ich diese Arbeit meinen Eltern, Rainer und Karola Guddat.

Mülheim an der Ruhr im Dezember 2002

Martin Guddat



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung existierender Koordinationsmechanismen . . . . .	2
1.1.1	Katharina . . . . .	4
1.1.2	TUM . . . . .	5
1.1.3	Lauron . . . . .	6
1.1.4	Zusammenfassung der Koordinationsmechanismen . . . . .	7
1.1.5	Weitere existierende Gehmaschinen . . . . .	7
1.2	Inhalt und Ziel der Arbeit . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Aufbau, Aktorik und Sensorik</b>	<b>11</b>
2.1	Mechanischer Aufbau . . . . .	11
2.1.1	Prinzipieller Aufbau . . . . .	12
2.1.2	Koordinatensysteme . . . . .	14
2.2	Die ausgeführten Gehmaschinen . . . . .	15
2.2.1	Tarry I . . . . .	15
2.2.2	Tarry II . . . . .	17
2.2.3	Tarry IIa . . . . .	19
2.3	Elemente der Aktorik und Sensorik . . . . .	21
2.3.1	Servomotoren . . . . .	21
2.3.2	Aufstandssensor . . . . .	27
2.3.3	Dehnungsmeßstreifen . . . . .	28
2.3.4	Inklinometer . . . . .	29
2.3.5	Ultraschallsensor . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Kommunikation der Komponenten</b>	<b>34</b>
3.1	Beteiligte Hardwarekomponenten . . . . .	36
3.1.1	Digital-I/O . . . . .	37
3.1.2	PWM-Generator . . . . .	37
3.1.3	A/D-Wandler . . . . .	38
3.2	Kommunikation der Rechner mit den Hardwarekomponenten . . . . .	38
3.3	Kommunikation mit den Diensten . . . . .	40

<b>4</b>	<b>Grundlagen der Gangerzeugung</b>	<b>43</b>
4.1	Gangerzeugung mit der WalkingLib . . . . .	43
4.2	Erzeugte Gangmuster . . . . .	45
4.3	Ganggenerierung mit neuronalen Netzen . . . . .	48
4.4	Neuronale Netze zur Erzeugung der Stellwinkel . . . . .	52
4.5	Schrittmacher . . . . .	53
4.6	Lern- und Generalisierungsmuster . . . . .	54
4.7	Training und Genauigkeit der Netzwerke . . . . .	56
4.8	Geschwindigkeitsvergleich . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Adaptive Bewegungskoordination</b>	<b>62</b>
5.1	Das Koordinationskonzept der Gehmaschine . . . . .	62
5.2	Künstliche Reflexe . . . . .	65
5.2.1	Aufstandsreflex . . . . .	65
5.2.2	Lagekorrektur . . . . .	68
5.2.3	Levator-Reflex . . . . .	73
5.2.4	Rückführungsreflex . . . . .	74
5.3	Planende Module . . . . .	75
5.3.1	Umgehung großer Hindernisse . . . . .	75
5.3.2	Umgebungskarte . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Experimentelle Überprüfung</b>	<b>84</b>
6.1	Fortbewegung in der Ebene . . . . .	84
6.2	Fortbewegung in leicht unstrukturiertem Gelände . . . . .	84
6.3	Fortbewegung im Gelände mit Hindernissen . . . . .	85
6.4	Hindernisbewältigung mit interner Karte . . . . .	86
6.5	Überschreiten einer Wippe . . . . .	87
6.6	Verhalten an einer Kante . . . . .	87
6.7	Ausweichbewegung vor einer Wand . . . . .	88
6.8	Ausweichbewegung in einem Korridor . . . . .	88
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>97</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>99</b>