

Ein benutzer- und umgebungsangepasstes Steuerungssystem für die Zielführung roboterbasierter Gehhilfen

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Inf. Birgit Graf
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
E. Westkämper

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. T. Christaller

Tag der mündlichen Prüfung: 28. März 2008

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart
2008

IPA-IAO Forschung und Praxis

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

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Birgit Graf

Ein benutzer- und
umgebungsangepasstes
Steuerungssystem
für die Zielführung
roboterbasierter Gehhilfen

Nr. 473

Dr.-Ing. Dipl.-Inf. Birgit Graf

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-31-6, ISBN (13) 978-3-939890-31-7
Jost Jetter Verlag, Heimsheim

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 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2008.

Printed in Germany.

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 die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

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.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

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

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 Jost Jetter 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.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart. Sie wurde teilweise im Rahmen des Leitprojekts MORPHA mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Kennzeichen 01 IL 902 G/9 gefördert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper für die Übernahme des Hauptberichts und seine Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit. Herrn Prof. Dr. rer. nat. T. Christaller danke ich für die Durchsicht der Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Rolf Dieter Schraft und Herrn Dipl.-Ing. Martin Hägele M.S. danke ich für ihre Unterstützung und die stets angenehme Zusammenarbeit.

Für die Durchsicht der Manuskripte und die daraus entstandenen Diskussionen und Anregungen möchte ich insbesondere Herrn Dr.-Ing. Matthias Hans, Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Andreas Traub, Herrn Dr.-Ing. Walther Schaaf, Herrn Dr.-Ing. Evert Helms, Herrn Dr.-Ing. Arno Ritter, Frau Dr. phil. Sabine Dettling, Herrn Dr.-Ing. Manfred Schweizer, Herrn Dipl.-Ing. Bertram Rohrmoser, Herrn Dipl.-Inform. Winfried Baum sowie Frau Luzia Schuhmacher M.A danken.

Herrn Ing. José Manuel Hostalet Wandosell danke ich darüber hinaus für die intensive und konstruktive fachliche Zusammenarbeit. Zudem gilt mein besonderer Dank allen Studenten, Diplomanden und Praktikanten, die an dieser Arbeit mitgewirkt haben.

Der Firma Meyra danke ich für die Bereitstellung eines Rollators zu Testzwecken. Außerdem gilt mein Dank alle Teilnehmern der Benutzertests sowie den beteiligten Pflegekräften und Helfern im Pflegezentrum Stuttgart-Münster und im Parkheim Berg.

Meinen Eltern danke ich für ihre Förderung, Motivation und Unterstützung, welche die Durchführung dieser Arbeit erst möglich gemacht hat.

Stuttgart, im Mai 2008

Birgit Graf

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	12
1 Einleitung	16
1.1 Problemstellung	16
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	17
2 Ausgangssituation	19
2.1 Definitionen und Begriffe	19
2.2 Beispielszenarien für den Einsatz von Mobilitätshilfen bei älteren Menschen	20
2.3 Ursachen für die Nutzung von Mobilitätshilfen	23
3 Analyse der Aufgabenstellung und Ableitung von Anforderungen	27
3.1 Analyse der Aufgabe konventioneller Gehhilfen	27
3.1.1 Analyse der Grundfunktionen konventioneller Gehhilfen	27
3.1.2 Analyse der Einsatzbereiche konventioneller Gehhilfen	29
3.1.3 Analyse der Beispielszenarien	29
3.2 Analyse des Benutzerspektrums konventioneller Gehhilfen	32
3.3 Analyse der Steuerung konventioneller Gehhilfen durch den Benutzer	35
3.3.1 Analyse der eingebrachten Kräfte und Momente	35
3.3.2 Analyse physikalischer Grundlagen	38
3.4 Strukturierung der Anforderungen	39
3.4.1 Definition von Teilfunktionen und Zuordnung zu Teilsystemen	39
3.4.2 Zuordnung der Anforderungen zu den Teilsystemen	40
4 Stand der Technik	43
4.1 Roboterbasierte Gehhilfen	43
4.2 Navigation mobiler Roboter	50
4.2.1 Kartierung und Lokalisierung	50
4.2.2 Globale Bahnplanung	51

4.2.3	Lokale Bahnplanung	54
4.2.4	Bewegungssteuerung	56
4.3	Teilautonome Bewegungsführung	57
4.3.1	Modellbasierte Steuerungen zur teilautonomen Bewegungsführung	58
4.3.2	Verhaltensbasierte Steuerungen zur teilautonomen Bewegungsführung	59
4.4	Folgerungen aus dem Stand der Technik	62
5	Lösungsansatz für das Steuerungssystem	65
5.1	Entwicklung des Gesamtkonzepts	65
5.1.1	Konzeption der benötigten Betriebsmodi des Steuerungssystems	65
5.1.2	Lösungsvarianten für die Ermittlung des optimalen Fahrverhaltens durch die Berücksichtigung von Richtungsvorgaben des Benutzers im Zielführungsmodus	66
5.2	Konzeption des Interaktionssystems	72
5.2.1	Lösungsvarianten für die Eingabe von Benutzervorgaben und die Ausgabe wichtiger Systeminformationen an den Benutzer	72
5.2.2	Lösungsvarianten für die Messung der eingebrachten Benutzerkräfte	75
5.2.3	Lösungsvarianten für die Sensordatenverarbeitung	78
5.3	Konzeption des Bewegungsplanungssystems	81
5.3.1	Bewegungseinschränkungen der roboterbasierten Gehhilfe aufgrund der limitierten Bewegungsfähigkeiten des Gehhilfenutzers	82
5.3.2	Lösungsvarianten für das Fahrverhalten der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus	84
5.3.3	Konzeption der stockwerksübergreifenden Planung	87
5.3.4	Konzeption der erweiterten Methode elastischer Bänder für die umgebungs- und benutzerangepasste Bahnmodifikation	90
5.4	Erfüllung der Anforderungen	95
6	Realisierung des Steuerungssystems auf dem mobilen Roboterassistenten Care-O-bot® II	98
6.1	Care-O-bot® II Hardware	98
6.2	Steuerungsarchitektur des Care-O-bot® II	100

6.3	Realisierung des Care-O-bot® II Navigationssystems	101
6.3.1	Realisierung des globalen Planungsmoduls	102
6.3.2	Realisierung des lokalen Planungsmoduls	106
6.3.3	Realisierung des benutzerangepassten Bewegungssteuerungsmoduls	109
6.3.4	Interface-Funktionen der Care-O-bot® II Plattformschnittstelle	111
6.4	Realisierung des Anwendungsmoduls »Gehhilfesteuerung«	113
6.4.1	Realisierung der Sensordatenverarbeitung	114
6.4.2	Realisierung der Ablaufsteuerung im benutzergesteuerten Modus	121
6.4.3	Realisierung der Ablaufsteuerung im Zielführungsmodus	122
6.4.4	Beispielabläufe für die Aktivierung von Bahnmodifikationen	131
6.4.5	Realisierung der graphischen Benutzeroberfläche für den Betrieb des Care-O-bot® II als intelligente Gehhilfe	136
7	Erprobung des Steuerungssystems im Seniorenheim	137
7.1	Testumgebung	137
7.2	Testpersonen	138
7.3	Beschreibung und Ergebnisse der durchgeführten Tests	139
7.3.1	Vergleich der konventionellen und der roboterbasierten Gehhilfe	139
7.3.2	Zielführung über mehrere Stockwerke	150
7.3.3	Aktivierung von Bahnmodifikationen	155
7.3.4	Feedback der Benutzer	157
8	Zusammenfassung und Ausblick	159
9	Summary	164
10	Literatur	168

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
2-D/3-D	2-/3-dimensional
Dist	Distanz
GPS	Global Positioning System
(M)VFH	(Minimales) Vektorfeld-Histogramm
PC	Personal Computer
RRT	Rapidly Exploring Random Trees
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	[m/s ²]	Beschleunigung
A	[m ²]	Fläche
$B(q,r)$	[m, m, rad]	Bubble eines elastischen Bands
C	-	Konfigurationsraum
$CC\text{-Region}$	-	Bereich, der von einem nicht-holonomen Roboter durch das Fahren eines einzelnen Kreisbogens nicht erreicht werden kann
c_d	-	Luftwiderstandsbeiwert
C_i	[m, m]	Nächstgelegene Hindernispunkte
clp	[m, m]	Nächstgelegener Punkt eines Hindernisses oder einer Wand
c_r	-	Rollwiderstandsbeiwert
cut	[N]	Schwellwert für das Nullsetzen der eingebrachten Kräfte
d, D	[m]	Abstand

$d_{x,user}$	[m]	Abstand des Gehhilfenutzers zum Drehzentrum der Gehhilfe
F	[N]	Kraft
F_b	-	Verhaltensbasierte Kräfte, die auf ein elastisches Band wirken
F_d	-	Direkte Benutzerkräfte, die auf ein elastisches Band einwirken
F_{drag}	[N]	Luftwiderstandskraft
F_e	-	Externe Kräfte, die auf ein elastisches Band wirken
F_i	-	Interne Kräfte, die auf ein elastisches Band wirken
F_{const}	[N]	Kraft, die für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit benötigt wird
F_{left}	[N]	Kraft, die auf den linken Gehhilfegriff eingebracht wird
F_{res}	-	Resultierende auf ein Bubble eines elastischen Bands wirkende Kraft
F_{right}	[N]	Kraft, die auf den rechten Gehhilfegriff eingebracht wird
F_{roll}	[N]	Rollwiderstandskraft
F_{user}	[N]	Durch den Benutzer eingebrachte Kräfte
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung, etwa 9,81 m/s ²
o	[m]	Einflussdistanz eines Hindernisses
k_i, k_e, k_b, k_v	-	Gewichtungsfaktoren für die Errechnung der resultierenden auf ein Bubble einwirkenden Kraft
k_m	-	Gewichtungsfaktor für das Massemodell
k_r	-	Gewichtungsfaktor für die Errechnung der Winkeländerung eines nicht-holonomen Bubbles
K_r, K_c	-	Gewichtungsfaktoren für die Errechnung der auf ein nicht-holonomes Bubble einwirkenden, internen Kräfte
m	[kg]	Masse
O	[m, m]	Drehzentrum
p, q	[m, m, rad]	Roboterkonfigurationen
$P1, P2$	[m, m]	Bahnpunkte für die Neuplanung des Pfads
r	[m]	Drehradius
$RL-/LR-/C-Kräfte$	-	Kräfte zwischen den Bubbles eines nicht-holonomen elastischen Bands

T_O	[Nm]	Drehmoment um Drehzentrum O
t	[s]	Zeit
$thresh$	[N]	Schwellwert für die Stolpererkennung
T_i	[m, m]	Eckpunkte eines Pfads
v	[m/s]	Geschwindigkeit
v_0	[m/s]	Anfangsgeschwindigkeit
v_x	[m/s]	Geschwindigkeit in x-Richtung: Vorwärtsgeschwindigkeit
v_y	[m/s]	Geschwindigkeit in y-Richtung: Lateralgeschwindigkeit
w	-	Wand
$W(\theta)$	[m]	Breite der überstrichene Fläche beim Fahren mit Drehwinkel θ
x,y	[m, m]	Position eines Roboters
Z	[m, m]	Zwischenziel
α	[rad]	Orientierung eines Roboters
$\Delta\alpha$	[rad]	Winkeländerung eines Bubbles eines elastischen Bands
δ	-	Gewichtungsfaktoren für die Positionsänderung eines Bubbles
$\phi(x,y)$	-	Durch ein Hindernis erzeugtes Potentialfeld
θ	[rad]	Drehwinkel
ρ_{air}	[kg/m ³]	Dichte der Luft, etwa 1,2 kg/m ³
$\rho_{max}(\theta)$	[m]	Äußerer Drehradius des Mensch-Roboter-Verbunds in Kurven
$\rho_{min}(\theta)$	[m]	Innerer Drehradius des Mensch-Roboter-Verbunds in Kurven
ω	[rad/s]	Rotationsgeschwindigkeit

Häufig verwendete Indices

Zeichen	Bedeutung
<i>e</i>	extern
<i>i</i>	intern
<i>left</i>	links
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>right</i>	rechts
<i>user</i>	Benutzer der Gehhilfe
<i>veh</i>	Fahrzeug

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der **Anteil älterer Menschen** an der Gesamtbevölkerung hat aufgrund des demographischen Wandels in vielen Industrieländern in den letzten Jahren stark zugenommen. Prognosen zufolge ist dies erst der Anfang einer Entwicklung, die sich in den kommenden Jahren noch verschärfen wird. So betrug 2005 der Anteil über 65-jähriger in Deutschland ca. 19 Prozent, für 2050 wird ein Anstieg auf 33 bis 36 Prozent prognostiziert [Destatis2006]. Der Erhalt der Selbstständigkeit und der damit eng verknüpften Lebensqualität im Alter ist sowohl für die betroffenen Menschen als auch für die Gesellschaft von großer Bedeutung.

Viele ältere Personen leiden unter **Mobilitätseinschränkungen** und sind auf Hilfsmittel wie Rollstühle, Rollatoren, Gehstöcke oder Krücken angewiesen. In einer im Jahr 2000 in den USA durchgeführten Umfrage benutzten 14 Prozent der befragten Personen älter als 65 Jahre eine Mobilitätshilfe, 64 Prozent aller Mobilitätshilfen wurden von diesem Personenkreis benutzt (Bild 1-1). Dabei stellten Rollatoren mit einem Anteil von 27 Prozent die nach Gehstöcken am zweithäufigsten genutzte Mobilitätshilfe dar [Kaye2000].

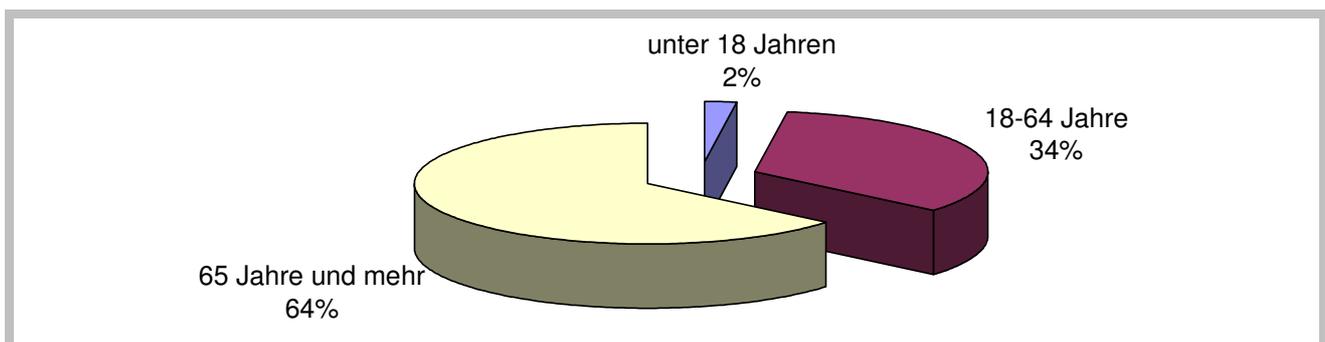


Bild 1-1: Altersverteilung der Nutzer von Mobilitätshilfen [Kaye2000].

Existierende, **konventionelle Mobilitätshilfen** sind trotz vorliegender Sicherheitsrichtlinien und Prüfverfahren [DIN11199] oftmals nicht ausreichend, um die Sicherheit und Selbstständigkeit einer älteren Person ausreichend zu gewährleisten. In einer von 1987

bis 1992 in den USA durchgeführten Erhebung hatte im Durchschnitt jährlich mehr als ein Prozent der beobachteten Personen einen Unfall mit seinem Rollator [Charron1995].

Ein erheblicher Anteil von in Senioren- und Pflegeheimen lebenden **Gehilfenutzern** muss bei Spaziergängen von einer Pflegekraft begleitet werden. Zusätzlich gibt es Personen, die eigentlich noch selbstständig gehen können, aber trotzdem meistens einen Rollstuhl zur Fortbewegung nutzen. Die Ursache liegt dabei entweder in einer durch krankheitsbedingte Gangunsicherheiten oder Muskelschwächen verursachten hohen Sturzgefahr, in einer durch kognitive Defizite verursachten Kollisionsgefahr oder in mentalen Einschränkungen wie vaskulärer Demenz, die es dem Rollatorfahrer unmöglich macht, selbstständig den Weg zu finden.

Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Sensorik und Aktorik führen zu einer zunehmenden **Intelligenz in Maschinen** [Westkämper2001] und ermöglichen den Transfer automatisierungstechnischer Lösungen auf neue Anwendungsbereiche. Die Robotik stellt eines der Kernthemen aktueller Forschungsarbeiten in der Automatisierungstechnik dar [Schrafft1996, Verl2006]. Dabei findet der Einsatz von Robotern zunehmend auch außerhalb klassischer Produktionsumgebungen statt [IFR2006].

Eine mit **Robotertechnologie** ausgestattete Gehilfe, die in der Lage ist, ihre Umgebung wahrzunehmen und den Benutzer automatisch zum gewünschten Ziel zu führen, dabei auch auf die speziellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Benutzers eingeht und diese während der Fahrt berücksichtigt, kann die Mobilität und damit verbundene Selbstständigkeit älterer und behinderter Menschen weiter fördern und erhalten. Bisher existieren jedoch keine ausreichenden Erkenntnisse für die Entwicklung solch eines umgebungs- und benutzerangepassten Steuerungssystems für roboterbasierte Gehhilfen.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, grundlegende Erkenntnisse zur Entwicklung eines Steuerungssystems für roboterbasierte Gehhilfen zu gewinnen, das

- seine Umgebung wahrnimmt und den Weg zum Ziel entsprechend plant und anpasst,
- an die Fähigkeiten und Bedürfnisse eines Benutzers angepasst werden kann und
- das Fahrverhalten der Gehhilfe in Echtzeit an die Bewegung des Benutzers anpasst, so dass der Benutzer immer sicher gestützt wird.

Dafür werden zunächst anhand repräsentativer Beispielszenarien der Einsatzbereich sowie auftretende Schwierigkeiten und Grenzen bei der Verwendung **konventioneller Mobilitätshilfen** beschrieben. Des Weiteren wird das Benutzerspektrum konventioneller Mobilitätshilfen dargestellt. Aus der Analyse der Aufgabe, des Benutzerspektrums sowie der Steuerung konventioneller Gehhilfen durch den Benutzer werden **Anforderungen** an das zu entwickelnde Steuerungssystem sowie an dessen Teilsysteme Interaktions-, Sensor- und Navigationssystem abgeleitet.

Anschließend werden die Fähigkeiten existierender roboterbasierter Gehhilfen nach dem **Stand der Technik** evaluiert und Defizite identifiziert. Des Weiteren werden existierende Navigationssysteme mobiler Roboter sowie Methoden zur teilautonomen Bewegungsführung dargestellt und auf ihre Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit zur Lösung der gegebenen Aufgabenstellung untersucht.

Für die Komponenten des Steuerungssystems, die nicht direkt aus dem Stand der Technik abgeleitet werden können, werden mögliche **Lösungsvarianten** erarbeitet, evaluiert und als Gesamtsystem zusammengeführt. Für das Interaktionssystem werden dabei geeignete Benutzerschnittstellen zur Zieleingabe, zur Geschwindigkeitssteuerung sowie zur Rückmeldung aktueller Systemzustände an den Benutzer konzipiert. Während für das Sensorsystem auf den Stand der Technik zurückgegriffen werden kann, werden für das Navigationssystem neue Methoden zur umgebungs- und benutzerangepassten Bewegungsplanung für roboterbasierte Gehhilfen entwickelt.

Die **Realisierung** des neuen Steuerungssystems findet auf dem mobilen Roboterassistenten Care-O-bot[®] II statt. Die Evaluierung des Steuerungssystems wird anhand von Benutzertests in einem Stuttgarter Seniorenheim durchgeführt.

2 Ausgangssituation

2.1 Definitionen und Begriffe

Gehilfe: »Bezeichnung für ein Hilfsmittel für dauernd oder vorübergehend gehbehinderte Personen zur eigenständigen Fortbewegung durch Gehen.« [Wikimedia2007] Im Rahmen dieser Arbeit wird zwischen konventionellen, d. h. rein mechanischen, sowie roboterbasierten Gehhilfen unterschieden. Roboterbasierte Gehhilfen sind mit Sensoren und/oder Motoren ausgestattet und stellen neben der rein mechanischen Unterstützung des Benutzers zusätzliche Assistenzfunktionen bereit.

Rollator: »Gehilfe mit integrierten Handgriffen zur Abstützung während des Gehens und drei oder mehr Beinen von denen zwei oder mehr Räder haben.« [DIN11199]. Rollatoren sind in [DIN9999] neben Gehwagen und Gehrahmen der Gruppe 12 06: »Mit beiden Armen gehandhabte Gehhilfen« (Bild 2-1) sowie gemeinsam mit Rollstühlen der Obergruppe 12: »Hilfsmittel für die persönliche Mobilität« zugeordnet.



Bild 2-1: Beispiele für einen Rollator, einen Gehwagen und einen Gehrahmen [Meyra2007].

Mobilitätseinschränkung: Dieser Begriff beschreibt alle Beschwerden, welche die Bewegungsfähigkeit einer Person einschränken; von chronischen Schmerzen bis hin zur Lähmung einzelner Körperteile. Mobilitätseinschränkungen können durch Unfälle, traumatische Ereignisse oder chronische Leiden verursacht werden [California2005].

Serviceroboter: »Ein Serviceroboter ist eine frei programmierbare Bewegungseinrichtung, die teil- oder vollautomatisch Dienstleistungen verrichtet. Dienstleistungen sind dabei Tätigkeiten, die nicht der direkten industriellen Erzeugung von Sachgütern, sondern der Verrichtung von Leistungen für Menschen und Einrichtungen dienen.« [Schraft1996]

Roboterassistent: Roboterassistenten stellen eine neue Evolutionsstufe von Industrie- und Servicerobotern dar [Hägele2001]. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit dem Menschen direkt interagieren und aktuatorische, sensorische und informatorische Assistenz bieten [Helms2002].

Navigation mobiler Roboter: »Navigation bezeichnet das sich Zurechtfinden in einem geografischen Raum, um einen gewünschten Ort zu erreichen.« [Wikimedia2007]. In der mobilen Robotik beinhaltet die Navigationsaufgabe üblicherweise die folgenden Komponenten [Graf2005b]:

- Kartierung und Lokalisierung
- Planung
- Bewegungssteuerung

Nicht-holonome Roboter: Ein nicht-holonomer Roboter zeichnet sich durch eine unterschiedliche Anzahl von Freiheitsgraden für Geschwindigkeit und Position aus [Laumond1998]. Die Konfiguration eines mobilen Roboters im Raum ist durch seine Position und Orientierung definiert (x, y, α) . Bei der unter mobilen Robotern weit verbreiteten Differentialkinematik kann der Roboter nicht seitwärts fahren, so dass seine Geschwindigkeit nur durch die Vorwärts- und Rotationsgeschwindigkeit (v, ω) definiert wird.

2.2 Beispielszenarien für den Einsatz von Mobilitätshilfen bei älteren Menschen

Um den Einsatz von Mobilitätshilfen bei älteren Menschen besser zu verstehen und Schwierigkeiten bei der Verwendung konventioneller Gehhilfen zu identifizieren, wurden ältere Menschen auf ihrem Weg durch ein Seniorenheim begleitet und beobachtet. Senio-

renheime stellen üblicherweise eine sehr viel komplexere Umgebung dar als private Wohnumgebungen. Zusätzlich ähneln die Zimmer der Heimbewohner der häuslichen Umgebung. Somit schließt die Betrachtung der Gehhilfenutzung in Seniorenheimen auch den häuslichen Bereich ein. Hinzu kommt, dass Mobilitätshilfen oftmals nur für längere Strecken genutzt werden. Nachfolgend sind verschiedene, aus den Ergebnissen der teilnehmenden Beobachtung abgeleitete, fiktive Beispielszenarien für den Einsatz von Mobilitätshilfen bei älteren Menschen beschrieben.

Beispielszenario 1: Allgemeine Mobilitätseinschränkung

Erna B. ist aufgrund einer Gehbehinderung auf die Nutzung eines Rollators angewiesen. Sie bedient diesen sowohl in als auch außerhalb ihres Zimmers im Seniorenheim Rosenhof. Im Zimmer fallen hauptsächlich kurze Wege an, zum Beispiel vom Sofa zur Toilette oder an den Bücherschrank. Indem sie sich an den Griffen hochzieht, hilft der Rollator Erna B. beim Aufstehen. Außerhalb des Zimmers hilft der Rollator Erna B. beim Gang zum Speisesaal oder in den Gemeinschaftsraum. Um das Zimmer zu verlassen, geht Erna B. mit dem Rollator nahe an die Zimmertüre heran, öffnet diese und schließt sie wieder, nachdem sie hindurchgegangen ist. Der Weg zum Speisesaal führt einen langen Flur entlang. Da insbesondere zur Essenszeit auch andere Bewohner in den Gängen unterwegs sind, versucht Erna B., rechts an der Wand entlang zu gehen, um dadurch entgegenkommenden Personen auszuweichen. Dabei muss sie jedoch gut aufpassen, um nicht mit dem Hinterrad ihres Rollators zu nahe an die Wand zu kommen und hängen zu bleiben. Nach einigen Metern erreicht Erna B. einen kleinen Aufenthaltsbereich auf der rechten Seite des Flurs. Erna B. fährt auf den vordersten Tisch zu, um mit einer Freundin, die gerade dort sitzt, ein kurzes Gespräch zu führen. Danach geht sie weiter zum Treppenhaus, in dem sich die Aufzüge befinden. Erna B. fährt mit dem Aufzug ins Erdgeschoss. Im Aufzug dreht sie sich schon einmal um, um diesen bei Erreichen des Erdgeschosses schnell verlassen zu können. Im Erdgeschoss angekommen, durchquert Erna B. zunächst die Eingangshalle des Seniorenheims Rosenhof. Im vorderen Teil der Eingangshalle wurde der Boden frisch gewischt und ist dadurch noch feucht. Da sie Angst hat, auf dem nassen Boden auszurutschen, weicht Erna B. in den hinteren Hallenbereich aus, wo der Boden schon getrocknet

ist. Am Speisesaal angekommen, bleibt Erna B. kurz stehen um sich zu orientieren. Schon bald hat sie ihre Freundinnen entdeckt, die an einem der seitlichen Tische Platz genommen haben. Sie geht auf einen der freien Stühle zu und zieht diesen vom Tisch weg. Schließlich dreht sie sich um, um unter Halten der Rollatorgriffe Platz zu nehmen. Dann schiebt sie den Rollator von ihrem Stuhl aus ein Stück zur Seite, um ausreichend Platz am Tisch zu haben. Der Fisch schmeckt heute wieder einmal ausgezeichnet. Nach dem Mittagessen wollen Erna B. und ihre Freundinnen noch einen kleinen Spaziergang im Garten des Seniorenheims machen. Dafür gehen sie gemeinsam zurück zum Haupteingang und durch die Automatiktür hinaus. Vor dem Eingang führen mehrere Treppenstufen hinab in den Garten. Natürlich ist auch eine Rampe für Rollstuhl- und Rollatorfahrer vorhanden, trotzdem ärgert sich Erna B., dass sie den längeren Weg gehen muss, obwohl sie doch eigentlich noch in der Lage wäre, die Treppen herunterzugehen, wenn sie sich am Geländer festhält. Außerdem fühlt sich Erna B. auf der Rampe nicht sicher, da der Rollator aufgrund des Gefälles oft zu schnell wird. Deshalb geht sie die Rampe ganz vorsichtig hinunter. Im Garten blühen schon die ersten Blumen. Allerdings gibt es auch Bereiche, in denen neben dem Weg nur Gras angepflanzt ist. Manchmal kann Erna B. nicht gut erkennen, wo der Weg aufhört und wo die Grasfläche anfängt und bleibt dann verunsichert stehen.

Die Schwierigkeiten einer Rollatorfahrerin, die neben einer Mobilitätseinschränkung auch an mentalen Beeinträchtigungen leidet, sind in Beispielszenario 2 beschrieben:

Beispielszenario 2: Mobilitätseinschränkungen und mentale Beeinträchtigungen

Seit einiger Zeit leidet Else F. neben ihrer Gehbehinderung auch an Konzentrationschwächen. So erinnert sie sich heute wieder einmal nicht daran, dass sie um neun Uhr an der gemeinsamen Morgengymnastik im Übungsraum teilnehmen wollte. An anderen Tagen hatte sie sich den Termin zwar gemerkt, hatte aber den Weg zum Übungsraum vergessen und sich deshalb auf der Suche im Seniorenheim verlaufen. Inzwischen hat sich das Pflegepersonal diesen Termin vorgemerkt. Um 8:45 kommt ein Pfleger vorbei, um Else F. in den Übungsraum zu führen.

Es treten auch Fälle auf, in denen eine Person, die eigentlich noch gehen kann, aus Sicherheitsgründen einen Rollstuhl nutzt (Beispielszenario 3):

Beispielszenario 3: Rollstuhlnutzung aus Sicherheitsgründen

Margret G. kann nur noch sehr langsam und kurze Strecken gehen. Da es ihr schwerfällt, abzuschätzen, wie weit ihre Kraft noch reicht, ist sie in letzter Zeit mehrmals gestürzt. Um weitere Stürze zu vermeiden, muss sie inzwischen beim Gehen mit dem Rollator von einer Pflegekraft begleitet werden. Wenn gerade keine Pflegekraft für die Unterstützung zur Verfügung steht, nutzt Margret G. einen Rollstuhl.

2.3 Ursachen für die Nutzung von Mobilitätshilfen

Die genannten Szenarien geben einen ersten Eindruck über die Nutzung von Mobilitätshilfen im täglichen Leben älterer und gebrechlicher Personen. Die Ursachen der Nutzung von Mobilitätshilfen wie Rollatoren sind durch unterschiedliche Erkrankungen bedingt. Im Jahr 2000 wurde eine sehr detaillierte Studie zur Nutzung von Mobilitätshilfen in den USA durchgeführt [Kaye2000]. Dabei wurden über 30 000 mobilitätseingeschränkte Personen zu ihren Beschwerden befragt sowie demographische Daten erhoben (Bild 2-2). In dieser Studie wurden nur Personen, die nicht in Einrichtungen wie Senioren- oder Behindertenheimen leben, betrachtet. Die Notwendigkeit der Nutzung von Mobilitätshilfen wird durch unterschiedliche **Erkrankungen** und den damit verbundenen Beschwerden verursacht. Im Rahmen der Studie wurde nach der primären Ursache für die Nutzung der Mobilitätshilfe gefragt. Eine Übersicht der am häufigsten für eine Mobilitätseinschränkung verantwortlichen Erkrankungen der Nutzer von Mobilitätshilfen allgemein und der Nutzer von Gehhilfen ist in Bild 2-3 gegeben. Die Liste der Erkrankungen wurde entsprechend [ICD2003] gegliedert.

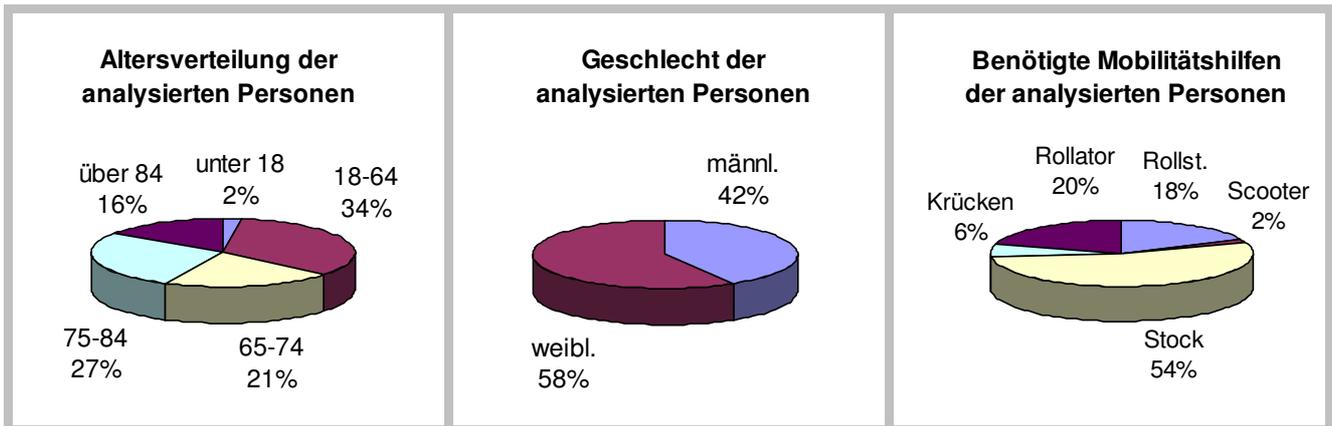


Bild 2-2: Verteilung von Alter, Geschlecht und Hilfsmittel der analysierten Personen (US-Bürger, die nicht in Seniorenheimen oder ähnlichen Einrichtungen leben). [Kaye2000]

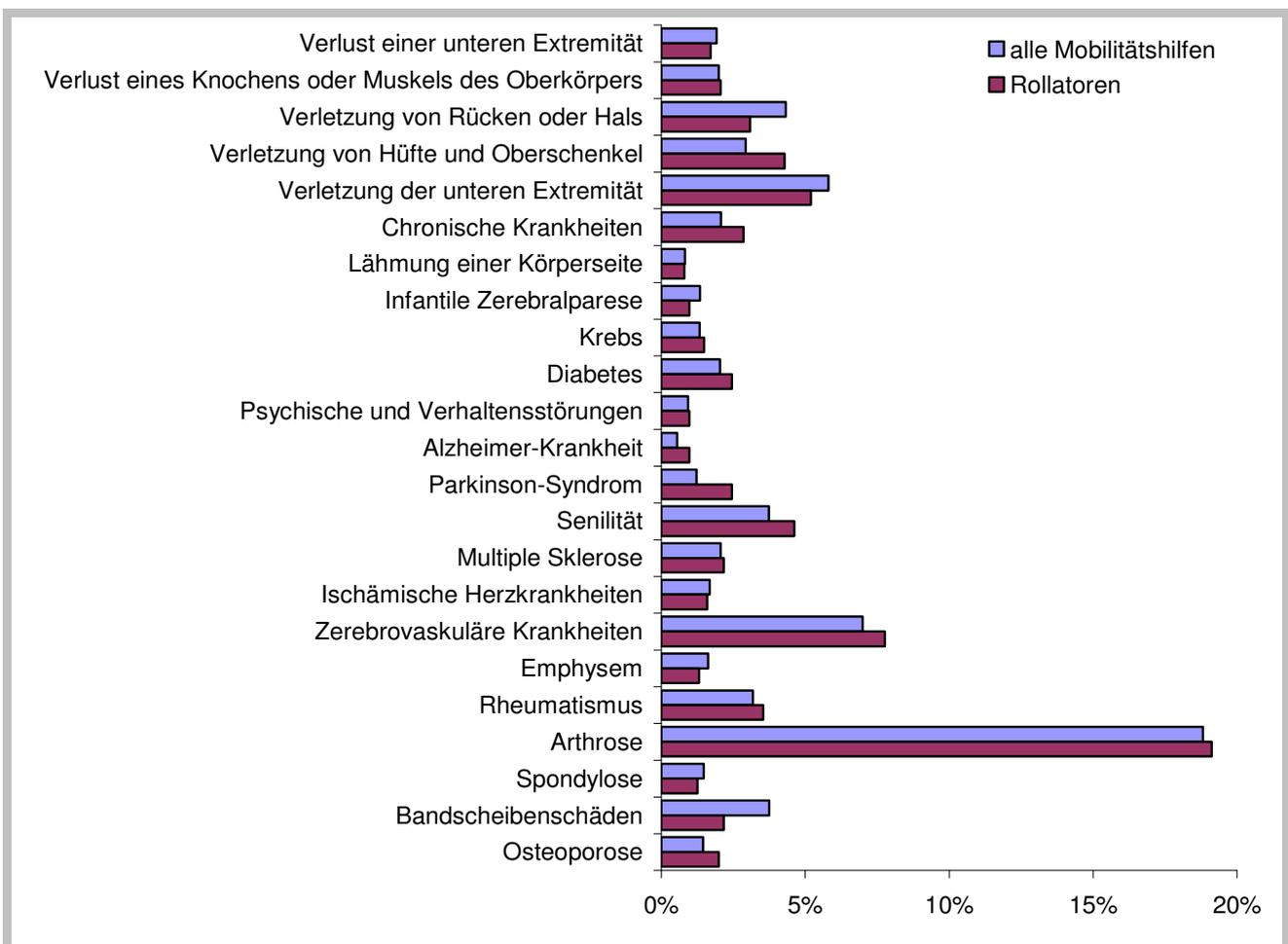


Bild 2-3: Erkrankungen, die eine Nutzung von Mobilitätshilfen notwendig machen (US-Bürger, die nicht in Seniorenheimen oder ähnlichen Einrichtungen leben). [Kaye2000]

Als **häufigste Ursache** für die Nutzung eines Rollators wurde im Rahmen dieser Studie die Arthrose identifiziert (19,1 Prozent), gefolgt von zerebrovaskulären Krankheiten (7,8 Prozent) und Verletzungen der unteren Extremitäten (5,2 Prozent). Arthrose ist eine degenerative Gelenkerkrankung, die durch eine direkte oder indirekte Überbeanspruchung der Gelenke, z. B. aufgrund altersbedingter Abnutzung oder infolge traumatischer Einwirkungen auf ein Gelenk, entsteht. Typische Symptome sind steife Gelenke, Belastungs- oder auch Dauerschmerzen. Zerebrovaskuläre Krankheiten werden meist durch eine nicht ausreichende Sauerstoffversorgung des Gehirns verursacht. Als Folge leiden die betroffenen Personen unter Bewusstseinsstörungen, Lähmungen und Krampfanfällen [Pschyrembel1986].

Eine ähnliche Befragung wurde im Rahmen dieser Arbeit unter den Pflegekräften zweier Stuttgarter Pflegeheime durchgeführt. Die Auswahl der zu analysierenden Personen wurde dabei selbstständig von den befragten Pflegekräften unter dem Gesichtspunkt der Eignung für eine roboterbasierte Gehhilfe durchgeführt. Es wurden die Beschwerden von 18 in Heimen lebenden, mobilitätseingeschränkten Personen sowie eines zuhause lebenden, behinderten Jungen erfasst (Bild 2-4). Die Ergebnisse der Erhebung sind in Bild 2-5 dargestellt.

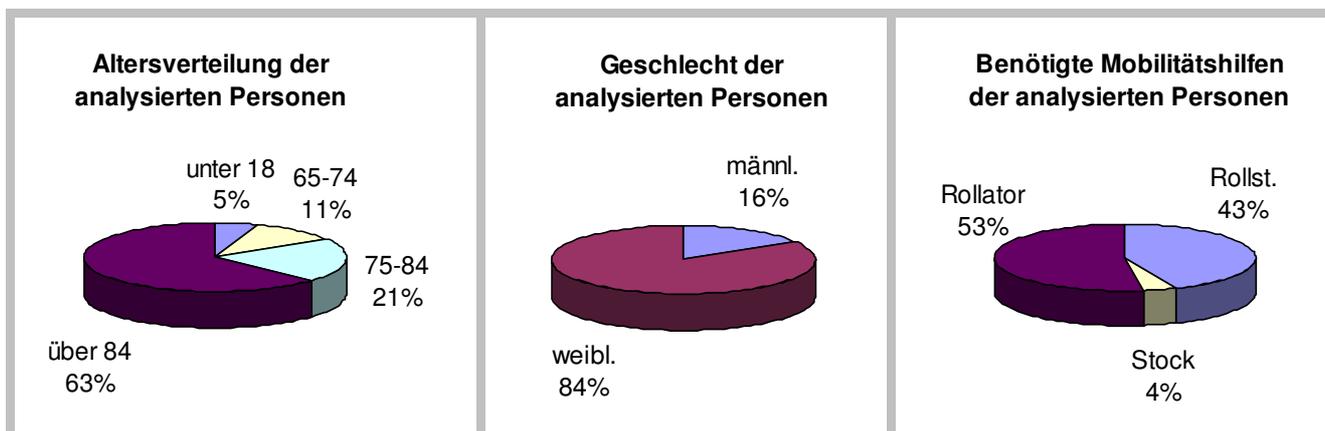


Bild 2-4: Verteilung von Alter, Geschlecht und Hilfsmittel der analysierten Personen; N=19 (eigene Erhebung).

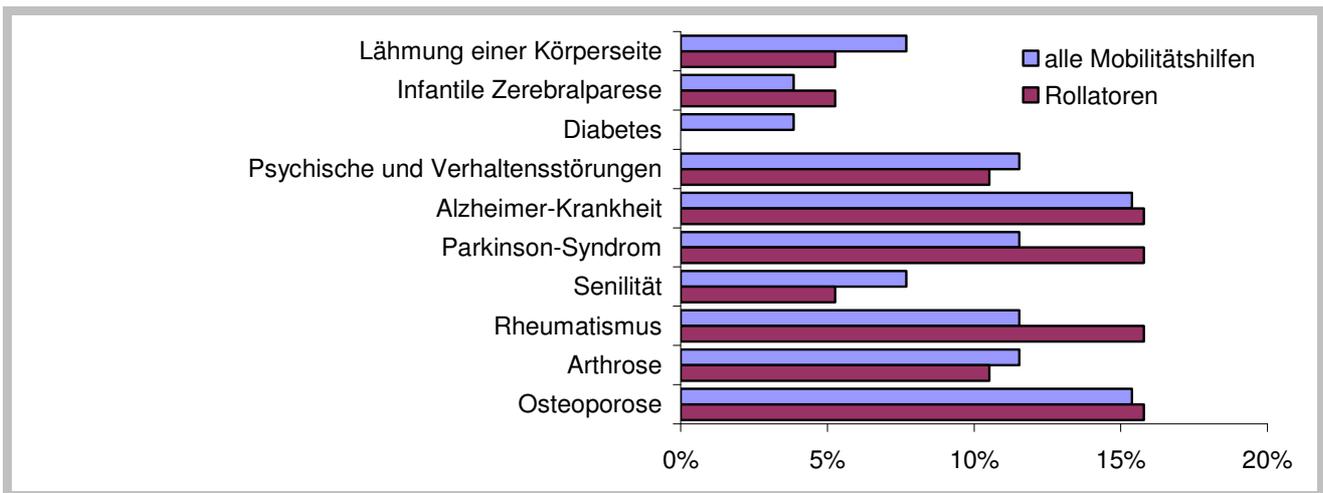


Bild 2-5: Erkrankungen, die eine Nutzung von Mobilitätshilfen notwendig machen; N=19 (eigene Erhebung).

Die **häufigsten Erkrankungen** der analysierten Personen sind Rheumatismus, Parkinson-Syndrom, Alzheimer-Krankheit und Osteoporose (jew. 15,8 Prozent). Rheumatische Beschwerden treten meist in Form der rheumatoiden Arthritis auf, einer Gelenkentzündung, die ähnlich der Arthrose i. d. R. mit starken Gelenkschmerzen sowie mit eingeschränkter Beweglichkeit verbunden ist und zu dauerhaften Deformationen der Gelenke führen kann. Personen, die am Parkinson-Symptom leiden, zeigen langsame, zitternde Bewegungen und einen kleinschrittigen, z. T. schlurfenden Gang mit unkontrolliertem Trippeln. Die Osteoporose beschreibt eine Verminderung des Knochengewebes, die in pochenden Schmerzen bis hin zu Frakturen der geschwächten Knochen, oftmals Schenkelhalsfrakturen oder Wirbelsäulenschäden, resultiert. Die Alzheimer-Krankheit kann zu Gangstörungen führen. Zusätzlich treten ähnlich wie bei allgemeinen psychischen Störungen, z. B. der vaskulären Demenz, Orientierungsstörungen auf, die für viele Personen die Hauptursache für einen Umzug ins Senioren- oder Pflegeheim darstellen [Pschyrembel1986].

3 Analyse der Aufgabenstellung und Ableitung von Anforderungen

Nachfolgend werden die Aufgabe, das Benutzerspektrum sowie die Steuerung konventioneller Gehhilfen analysiert und Anforderungen an das zu entwickelnde Steuerungssystem für roboterbasierte Gehhilfesystem abgeleitet.

3.1 Analyse der Aufgabe konventioneller Gehhilfen

3.1.1 Analyse der Grundfunktionen konventioneller Gehhilfen

Konventionelle Gehhilfen ermöglichen dem mobilitätseingeschränkten Benutzer durch Ziehen und Schieben an den Gehhilfegriffen die Position der Gehhilfe kontinuierlich an die eigene anzupassen. Dadurch kann sich der Gehhilfenutzer während des Gehens an den Gehhilfegriffen abstützen und seine Gehbewegung stabilisieren. Die roboterbasierte Gehhilfe sollte ebenso einfach positioniert werden können wie eine konventionelle Gehhilfe. Daraus leiten sich folgende Anforderungen ab:

A 1: Die gewünschte Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung der roboterbasierten Gehhilfe müssen aus den Eingaben des Benutzers errechnet werden.

A 2: Die aktuelle Fahrgeschwindigkeit der roboterbasierten Gehhilfe muss dynamisch geändert werden können.

Die Gehhilfe erfüllt nur dann ihre Funktion als Stütze, wenn zudem gilt:

A 3: Die roboterbasierte Gehhilfe muss zuverlässig auf Benutzereingaben reagieren.

A 4: Ruckartige Bewegungen, z. B. plötzliche Richtungsänderungen der roboterbasierten Gehhilfe, müssen vermieden werden.

A 5: Die Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe während des Gehens muss ohne das Entfernen der Hände von den Gehhilfegriffen möglich sein.

Während des Gehens mit einer Gehhilfe wird ein Teil des Körpergewichts des Benutzers auf diese übertragen. Die dadurch auf die Griffe wirkenden Kräfte sind entgegen der zum Schieben der Gehhilfe aufgebrauchten Kräfte rein funktional bedingt. Deshalb gilt:

A 6: Kräfte, die durch das Abstützen des Benutzers auf den Gehhilfegriffen entstehen, dürfen nicht als Steuersignale für die Fortbewegung interpretiert werden.

Mobilitätseinschränkungen sind oftmals mit allgemeinen koordinativen Problemen und Störungen verbunden. Daraus ergibt sich:

A 7: Die Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe darf keine zu hohen Anforderungen an die Koordinationsfähigkeit des Benutzers stellen.

Die Bedienung konventioneller Gehhilfen ist relativ einfach und kann auch von schwer behinderten oder dementen Personen erlernt werden. Neben den Bremsen existieren keine zusätzlichen Bedienelemente. Für die roboterbasierte Gehhilfe bedeutet dies:

A 8: Die Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe muss mit möglichst wenigen Bedienelementen realisiert sein.

Sollte sich das Fahrverhalten der roboterbasierten Gehhilfe vom Fahrverhalten konventioneller Gehhilfen unterscheiden, zum Beispiel bei der Aktivierung zusätzlicher Assistenzfunktionen, muss dieses Verhalten dem Benutzer kommuniziert werden:

A 9: Die vorgesehene Fahrtrichtung sowie der aktuelle Betriebszustand der roboterbasierten Gehhilfe müssen dem Benutzer kommuniziert werden.

3.1.2 Analyse der Einsatzbereiche konventioneller Gehhilfen

Konventionelle Gehhilfen werden in Seniorenheimen im Rahmen der Alltagsmobilität oder zu Zwecken der Freizeitmobilität inner- und außerhalb von Gebäuden eingesetzt:

A 10: Das Steuerungssystem der roboterbasierten Gehhilfe soll sowohl in Gebäuden als auch im Freien eingesetzt werden können.

Seniorenheime oder Einkaufszentren sind oftmals mehrstöckige Gebäude. Für den Übergang in ein anderes Stockwerk werden üblicherweise Aufzüge oder Rampen genutzt:

A 11: Das Steuerungssystem muss die Navigation in unterschiedlichen Stockwerken und den Wechsel zwischen diesen unterstützen.

Im Einsatzbereich roboterbasierter Gehhilfen befinden sich neben dem Gehhilfebenutzer weitere Personen. Die Gewährleistung der Sicherheit dieser Personen ist ebenso bedeutsam, wie die des Gehhilfebenutzers selbst. Kollisionen mit anderen Personen müssen durch die Sicherheitssensorik der roboterbasierten Gehhilfe ausgeschlossen werden:

A 12: Die Sicherheitssensorik der roboterbasierten Gehhilfe muss den Vorschriften für die sichere Navigation mobiler Roboter unter Menschen entsprechen.

3.1.3 Analyse der Beispielszenarien

Die Rollatorfahrerin in Beispielszenario 1 (Erna B.) begibt sich auf den Weg zum Speisesaal. Dieses Ziel wird durch die Benutzerin festgelegt und sie bestimmt den Zeitpunkt, wann sie ihren Gang zum Ziel beginnt:

A 13: Die roboterbasierte Gehhilfe muss durch den Benutzer gestartet werden können.

A 14: Das Ziel der Gehhilfefahrt muss durch den Benutzer gesetzt werden können.

Auf dem Weg zum Speisesaal steuert die Rollatorfahrerin ein Zwischenziel, den Aufenthaltsbereich, an:

A 15: Das Steuerungssystem muss das Ansteuern von Zwischenzielen auf dem Weg zum Ziel ermöglichen.

Im Flur geht die Rollatorfahrerin an der Wand entlang, um entgegenkommenden Personen auszuweichen. Auf dem Weg zum Garten wird sie von ihren Freundinnen begleitet. Auch hier versucht sie sich am Rand des Flurs zu halten, um ihren Freundinnen ausreichend Platz neben sich zu gestatten:

A 16: Das Steuerungssystem muss wandnahes Fahren auf dem Weg zum Ziel unterstützen.

Dabei müssen Kollisionen mit der Wand, die durch Koordinationsschwierigkeiten beim Gehen mit dem Rollator entstehen können, vermieden werden:

A 17: Das Steuerungssystem muss Kollisionen automatisch verhindern.

Im Eingangsbereich weicht die Rollatorfahrerin vom kürzesten Weg ab, um die frisch gewischten Bodenflächen zu umgehen. Auch andere Hindernisse, die von der Sensorik einer roboterbasierten Gehhilfe nicht erkannt werden, wie Teppiche oder Kabel auf dem Boden, erfordern entsprechende Anpassungen des Bewegungspfads durch den Benutzer:

A 18: Das Steuerungssystem muss Abweichungen vom kürzesten Weg zum Ziel erlauben.

Werden neben der Gehhilfe noch andere Objekte manipuliert, wie beim Öffnen und Schließen der Wohnungstüre oder beim Bereitrücken des Stuhls im Speisesaal, oder beim Zurücklegen bestimmter Strecken in der Wohnung, bewegt sich die Rollatorfahrerin nicht auf einem klar definierten Pfad zu einem Ziel, sondern führt kurze Vorwärts- und Rückwärtsbewegungen durch. In engen Örtlichkeiten könnte außerdem das Drehen der roboterbasierten Gehhilfe auf der Stelle nicht möglich sein. Somit gilt:

A 19: Das Steuerungssystem muss Rückwärtsfahren und Rangieren ermöglichen.

Vor dem Heim muss die Rollatorfahrerin über eine Rampe gehen, obwohl sie eigentlich lieber die Treppe benutzen würde. Für die Förderung des eigenständigen Gehens wäre es sinnvoll, ihr das Treppengehen zu ermöglichen. Dies kann dadurch gelöst werden, dass die roboterbasierte Gehhilfe selbstständig an den Fuß der Treppe fährt, während die Benutzerin die Treppen hinab geht. Die autonome Fortbewegung der roboterbasierten Gehhilfe kann auch im Speisesaal zusätzliche Unterstützung bieten, wie zum Parken der Gehhilfe an einer Stelle, an der sie niemandem im Weg steht:

A 20: Die roboterbasierte Gehhilfe soll in der Lage sein, sich auch ohne Begleitung des Benutzers fortzubewegen.

Manchmal ist die Benutzung von Rampen unerlässlich. Um das »Weglaufen« der Gehhilfe und damit den Verlust der Stütze in dieser und ähnlichen Situationen zu vermeiden, gilt neben der korrekten Interpretation der durch den Benutzer eingebrachten Kräfte (A 6):

A 21: Die maximalen Fahrgeschwindigkeiten der roboterbasierten Gehhilfe müssen an die Fähigkeiten des Benutzers angepasst werden können.

Probleme bei der Unterscheidung zwischen Weg und Wiese stellen für Erna B. ebenfalls ein Problem dar. Einer roboterbasierten Gehhilfe können befahrbare oder verbotene Bereiche eingegeben und der Bewegungspfad entsprechend angepasst werden:

A 22: Die roboterbasierte Gehhilfe muss Sperrbereiche berücksichtigen und um sie herumfahren können.

Beispielszenario 2 beschreibt eine Rollatorfahrerin (Else F.), die neben ihrer Gehbehinderung an Konzentrationsschwächen leidet. Das Pflegepersonal muss sie zum Gymnastikraum führen, da sie den Weg vergessen hat. Auch andere Bewohner zeigen Schwierigkeiten beim Auffinden eines bestimmten Raums in einem größeren Seniorenheim – beispielsweise dann, wenn sich dieser in einem Bereich befindet, den sie nicht regelmäßig

betreten oder wenn sie erst seit kurzer Zeit in dem Heim leben. Somit ist das autonome Anfahren von Zielpositionen eine wichtige Assistenzfunktion der roboterbasierten Gehhilfe:

A 23: Das Steuerungssystem muss das automatische Planen und Abfahren des Wegs zu einem vorgegebenen Ziel ermöglichen.

Voraussetzung dafür ist:

A 24: Die roboterbasierte Gehhilfe muss sich in ihrer Umgebung lokalisieren können.

Für die Aktivierung des Ansteuerns von Zwischenzielen (A 15), des wandnahen Fahrens (A 16) oder für Abweichungen vom kürzesten Weg zum Ziel (A 18) gilt dabei:

A 25: Der geplante Weg zum Ziel muss dynamisch geändert werden können.

Die automatische Zielführung durch den Roboter allein stellt noch nicht sicher, dass Elise F. das nächste Mal pünktlich zur Gymnastik erscheint, da sie den darauf folgenden Termin erneut vergessen könnte. Auch hier kann die roboterbasierte Gehhilfe helfen, zum Beispiel durch den Einsatz eines übergeordneten Steuerprogramms. Mit einem externen Zeitmanagementsystem verbunden, übernimmt dieses die Kontrolle der roboterbasierten Gehhilfe, die die Dame dann pünktlich zum Gang in den Gymnastikraum auffordert.

A 26: Die Steuerung der roboterbasierten Gehhilfe durch übergeordnete Steuerprogramme soll möglich sein.

3.2 Analyse des Benutzerspektrums konventioneller Gehhilfen

Die Erkrankungen und damit verbundenen **Beschwerden** der Nutzer von Mobilitätshilfen haben direkte Auswirkungen auf das Bewegungsverhalten dieser Personen. Aus den Beschwerden der Nutzer von Mobilitätshilfen lassen sich somit Anforderungen an das Bewegungsverhalten der roboterbasierten Gehhilfe ableiten. Dafür wurden bei der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Befragung von Pflegekräften neben den Erkrankungen auch

die Beschwerden der ausgewählten Personen abgefragt. Die Ergebnisse der Befragung sind in Bild 3-1 dargestellt.

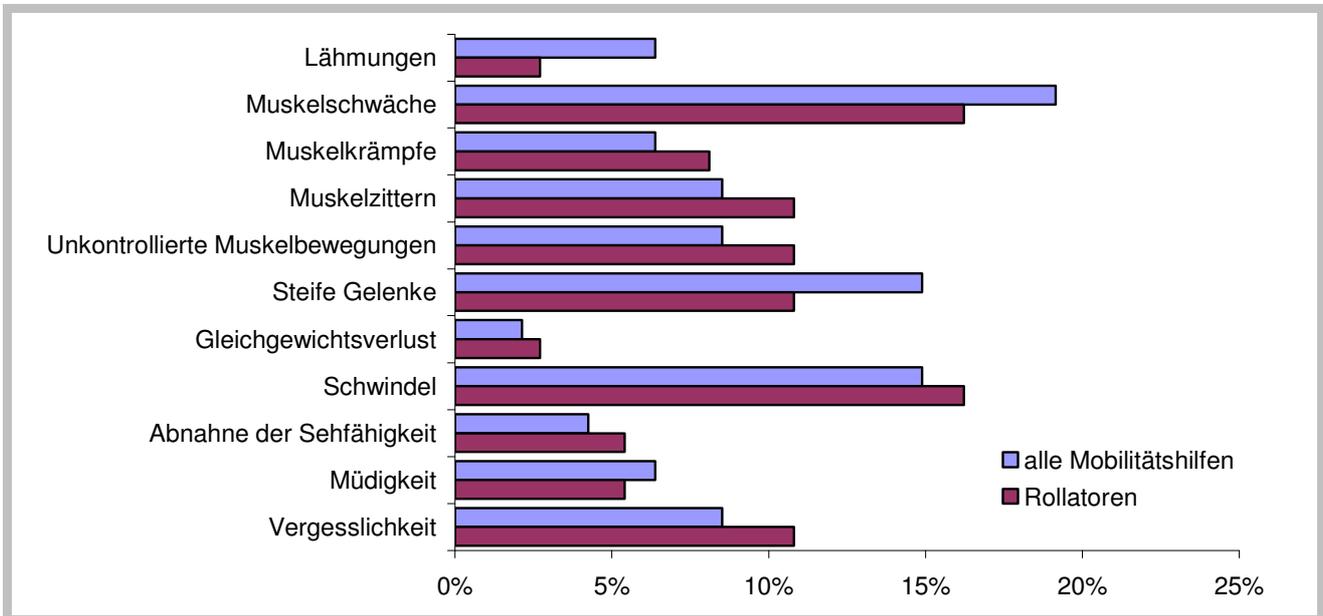


Bild 3-1: Häufige Beschwerden der Nutzer von Mobilitätshilfen; N=19 (eigene Erhebung).

Nachfolgend werden spezielle Anforderungen, die durch die am häufigsten auftretenden Beschwerden der Nutzer von Mobilitätshilfen bedingt sind, aufgestellt. Folgen *steifer Gelenke* sind eine reduzierte Gehgeschwindigkeit, die von Tag zu Tag variieren kann, sowie ein ungleichmäßiger Gang des Gehhilfenutzers. *Lähmungen*, zum Beispiel nach einem Schlaganfall, treten oft einseitig auf und resultieren ebenso in unregelmäßigen Bewegungen des Gehhilfenutzers (z. B. Nachziehen eines Beins). Bei Patienten mit *Muskelzittern* dürfen die durch das Zittern verursachten Bewegungen nicht als Steuersignale für die Bewegungssteuerung interpretiert werden. Damit muss das Steuerungssystem folgende zusätzliche Anforderungen erfüllen:

A 27: Das Steuerungssystem muss den Benutzer auch bei ungleichmäßigem Schieben an den Griffen sicher zum Ziel führen.

Sowohl für Personen, die aufgrund der oben genannten Unregelmäßigkeiten Schwierigkeiten bei der Koordination ihrer Bewegungen haben, als auch für Patienten mit *schlechten*

Sehfähigkeiten, welche Schwierigkeiten bei der Erkennung von Hindernissen haben, gilt neben der Bereitstellung von Funktionen zur automatischen Kollisionsvermeidung (A 17) und Zielführung (A 23):

A 28: Die roboterbasierte Gehhilfe muss in der Lage sein, selbstständig um Hindernisse herumzufahren.

Dies setzt voraus:

A 29: Die roboterbasierte Gehhilfe muss selbstständig Hindernisse erkennen können.

Sollte der Benutzer die Umfahrrichtung eines erkannten Hindernisses selbst bestimmen wollen, kann eine zusätzliche Anpassung des Bewegungspfad notwendig werden:

A 30: Das Steuerungssystem muss die Änderung des Wegs zum Ziel für die Umfahrung von Hindernissen auf der anderen Seite erlauben.

Muskelzittern, unkontrollierte Muskelbewegungen oder Schwindelanfälle sind bei der Verwendung konventioneller Gehhilfen eine häufige Ursache von Stürzen. Durch das automatische Abfangen dieser Bewegungen kann eine roboterbasierte Gehhilfe zusätzliche Unterstützung bieten. Somit ergibt sich folgende weitere Anforderung an das Steuerungssystem:

A 31: Das Steuerungssystem muss unregelmäßige Bewegungen des Benutzers automatisch erkennen und bei deren Auftreten selbstständig anhalten.

Für Patienten mit *Muskelschwäche* sowie für viele andere ältere Personen, die nicht mehr so kräftig und ausdauernd sind, ergeben sich folgende zusätzliche Anforderungen:

A 32: Die Bedienung der roboterbasierten Gehhilfe muss mit geringem Kraftaufwand möglich sein.

A 33: Das Steuerungssystem soll den Benutzer auf dem kürzesten Weg zum Ziel führen.

Vergessliche Gehhilfenutzer können, wie schon anhand der Beispielszenarien in Kapitel 3.1.3 gezeigt, insbesondere durch die automatische Führung zum Ziel (A 23) erheblich unterstützt werden.

3.3 Analyse der Steuerung konventioneller Gehhilfen durch den Benutzer

3.3.1 Analyse der eingebrachten Kräfte und Momente

Für die Analyse grundlegender Eigenschaften der Steuerung konventioneller Gehhilfen durch den Benutzer wurden im Rahmen eines initialen Benutzertests die auf konventionelle Gehhilfen wirkenden Kräfte und Momente ermittelt. Hierfür wurde ein Kraft-Momentensensor zwischen der Basis und den Griffen einer konventionellen Gehhilfe montiert (Bild 3-2, links). Sechs Bewohner eines Seniorenheims bewegten sich mit der Gehhilfe entlang einer ca. sieben Meter langen, S-förmigen Teststrecke (Bild 3-2, rechts), wobei die eingebrachten Kräfte und Momente und die Zeit für das Begehen der Strecke gemessen wurden.



Bild 3-2: Versuchsaufbau und S-förmige Teststrecke.

Die während des Testlaufs eingebrachten Kräfte in Vorwärtsrichtung und die für den Testlauf benötigte Zeit unterschiedlicher Benutzer sind in Bild 3-3 dargestellt.

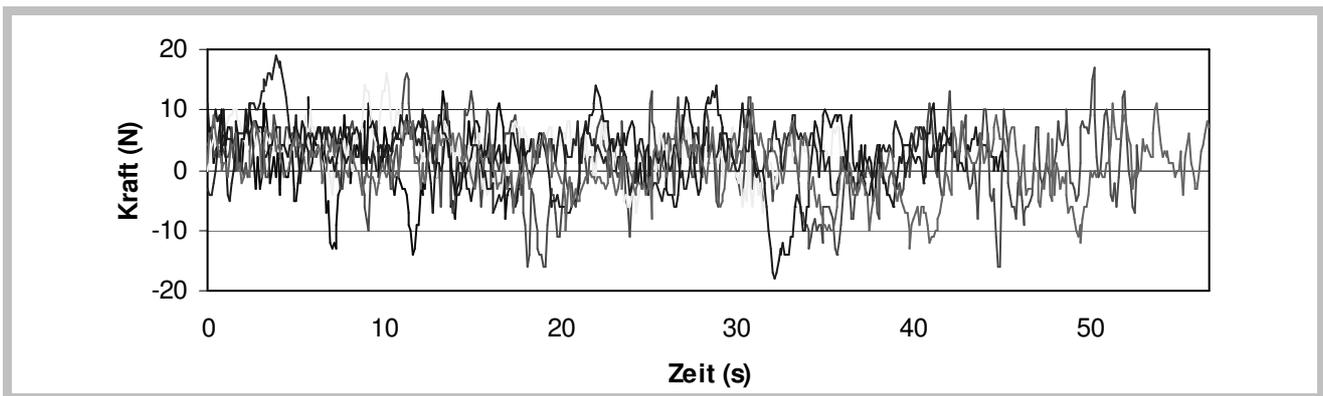


Bild 3-3: In Vorwärtsrichtung eingebrachte Kräfte unterschiedlicher Benutzer.

Die Analyse der Messergebnisse liefert folgende Daten: Die aus der Länge der Teststrecke und der Fahrdauer errechnete durchschnittliche Gehgeschwindigkeit betrug je nach Benutzer zwischen 0,13 und 0,41 m/s. Der Betrag der während des Fahrens maximal eingebrachten Kräfte in Fahrtrichtung lag für die einzelnen Testpersonen zwischen 7 und 19 N. Dies konkretisiert die vorher aufgestellten Anforderungen an die benötigten Kräfte (A 32) und Maximalgeschwindigkeiten (A 21). Die Bedienung der roboterbasierten Gehhilfe mit einem Kraftaufwand unter 20 N und maximale Fahrgeschwindigkeiten bis 0,5 m/s sollten möglich sein. Für alle Benutzer waren starke Fluktuationen in den eingebrachten Kräften erkennbar. Diese spiegeln die manuelle Regelung der Gehhilfeposition wider: Der Benutzer passt den Abstand der Gehhilfe kontinuierlich so an, dass sie ausreichend Stütze und Sicherheit beim Gehen bietet.

Während der Tests konnten von Benutzer zu Benutzer unterschiedliche Körperhaltungen beobachtet werden. Damit kann die vom Benutzer gewünschte Bewegungsrichtung bzw. die entsprechende Rotationsgeschwindigkeit für die Bewegungssteuerung der roboterbasierten Gehhilfe nicht von der Körperhaltung des Gehhilfenutzers abgeleitet werden. Der Abstand des Benutzers zu seiner Gehhilfe und somit dessen gewünschte Vorwärtsgeschwindigkeit wird vielmehr in Form der auf die Griffe eingebrachten Schiebekräfte an die Gehhilfe weitergegeben:

A 34: Für die Erkennung einer vom Benutzer geplanten Vorwärtsbewegung müssen die in Vorwärtsrichtung eingebrachten Kräfte gemessen werden.

Die Verläufe der eingebrachten seitlichen Kräfte F_y und der Momente T_z um die z-Achse, die senkrecht zum Boden steht, wiesen in den Benutzertests starke Ähnlichkeit auf (Bild 3-4). Für das Drehen der Gehhilfe in Kurven wurden somit gleichzeitig seitliche Kräfte und entsprechende Drehmomente eingebracht, wobei der Betrag der maximal eingebrachten Kräfte für die unterschiedlichen Testpersonen zwischen 10 und 38 N, der der maximalen Drehmomente zwischen 6 und 12 Nm lag.

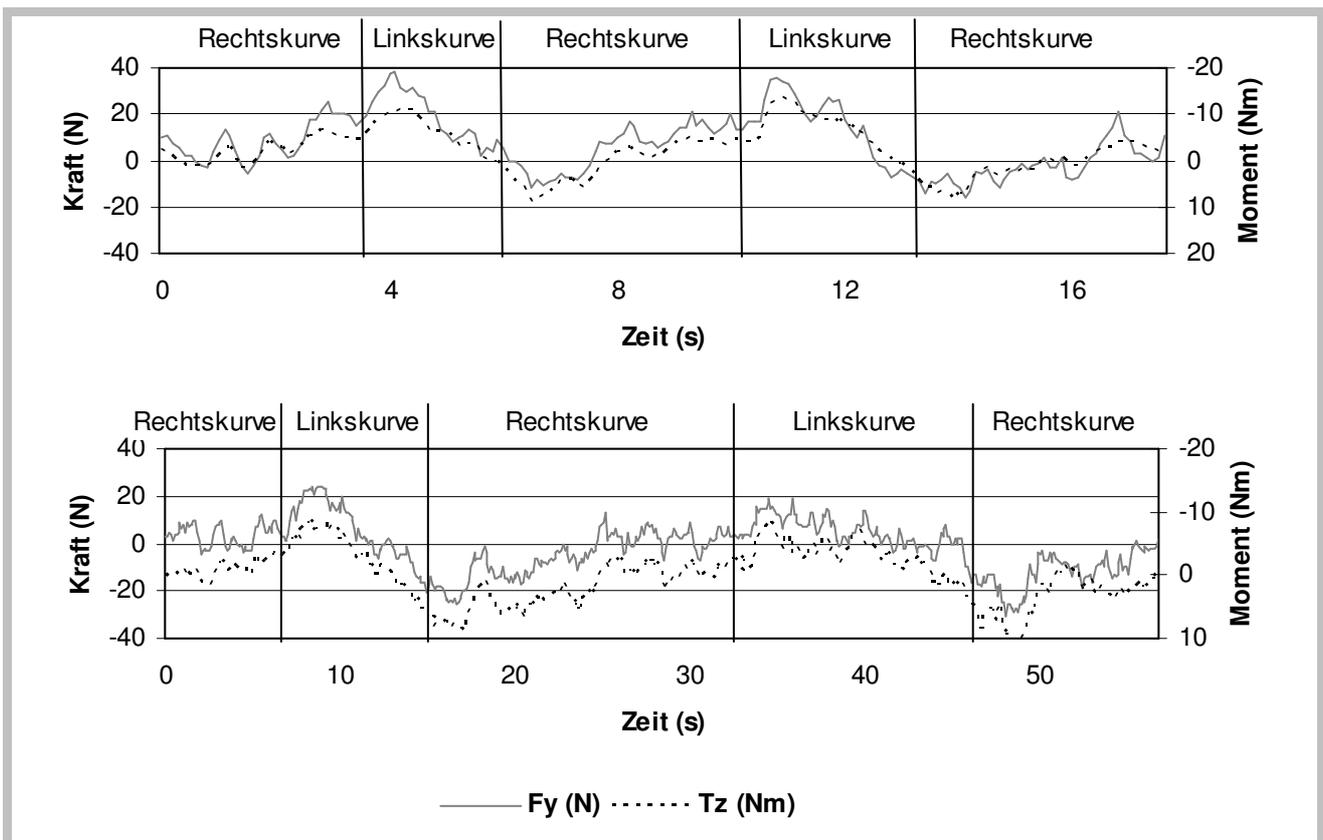


Bild 3-4: Laterale Kräfte und Drehmomente beim Begehen der Teststrecke für zwei unterschiedliche Testpersonen.

Vom Benutzer gewünschte Drehbewegungen können somit sowohl durch Messung der lateralen Kräfte als auch durch Messung des Drehmoments um die z-Achse erkannt werden:

A 35: Für die Erkennung einer vom Benutzer geplanten Drehbewegung müssen die eingebrachten lateralen Kräfte oder das Drehmoment um die z-Achse gemessen werden.

3.3.2 Analyse physikalischer Grundlagen

Die Fortbewegung konventioneller Gehhilfen basiert auf physikalischen Gesetzen, die auch bei der Konzeption des roboterbasierten Gehhilfesystems berücksichtigt werden sollten. Die Geschwindigkeit einer konventionellen Gehhilfe resultiert entsprechend

$$v = v_0 + \frac{1}{m} \int F(t) dt \quad (3-1)$$

direkt aus den auf das System wirkenden Kräften. Neben den Benutzerkräften wirken auf die konventionelle Gehhilfe verschiedene Kräfte, die sich der Bewegung entgegenstellen, insbesondere der Rollwiderstand F_{roll} und der Luftwiderstand F_{drag} :

$$F = F_{user} - F_{roll} - F_{drag}, \text{ wobei } F_{roll} = m \cdot g \cdot c_r \text{ und } F_{drag} = \frac{\rho_{air}}{2} \cdot c_d \cdot A \cdot v^2 \quad (3-2)$$

Der Luftwiderstand kann aufgrund der niedrigen Maximalgeschwindigkeiten der Gehhilfenutzer (unter 0,5 m/s) für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden. Der Rollwiderstand der Gehhilfe hängt insbesondere vom **Rollwiderstandskoeffizient** c_r ab. Unter Anwendung der in [Pfeiffer2006] vorgestellten Methode wurde in einem Vorversuch der Rollwiderstandskoeffizient für konventionelle Gehhilfen ermittelt. Dafür wurde eine Gehhilfe auf unterschiedliche Anfangsgeschwindigkeiten v_0 beschleunigt, dann losgelassen und die Zeit bis zum Stillstand gemessen. Abhängig vom Untergrund konnten dabei c_r -Werte zwischen 0,02 und 0,04 gemessen werden.

Für das **Beibehalten der Fahrgeschwindigkeit** müssen Kräfte eingebracht werden, die der Größe des Rollwiderstands entsprechen. Das Gewicht handelsüblicher konventioneller Gehhilfen liegt zwischen 5 und 10 kg. Der resultierende Rollwiderstand und die für die Beibehaltung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit entsprechend benötigte Kraft des Benutzers liegt somit im Bereich zwischen 1 und 4 N. Dies stellt neben den maximal erforderlichen Benutzerkräften von 20 N eine weitere Konkretisierung der für die Steuerung der ro-

boterbasierten Gehhilfe benötigten Kräfte (A 32) dar. Die für die Beibehaltung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit benötigten Kräfte sollten nicht höher als 4 N sein.

3.4 Strukturierung der Anforderungen

3.4.1 Definition von Teilfunktionen und Zuordnung zu Teilsystemen

Ein benutzer- und umgebungsangepasstes Steuerungssystem für die Zielführung roboterbasierter Gehhilfen beinhaltet gemäß Bild 3-5 Teilsysteme zur Interaktion mit dem Benutzer, zur sensorischen Erfassung der Umgebung sowie zur Navigation.

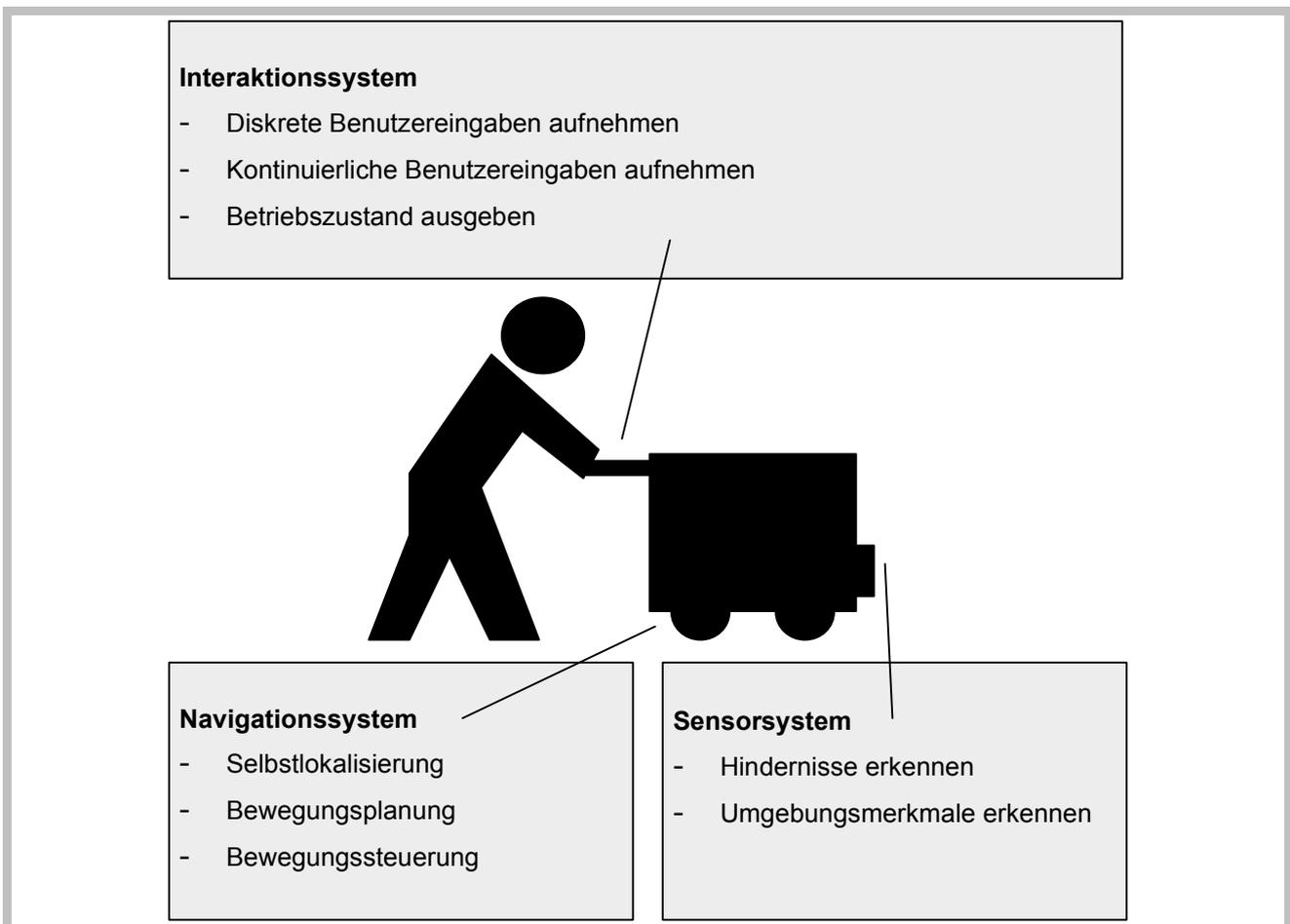


Bild 3-5: Teilsysteme und Teilfunktionen des gesamten Steuerungssystems.

Das Interaktionssystem nimmt Eingaben des Benutzers wie Richtungs- und Geschwindigkeitsvorgaben oder Zieleingaben auf und kommuniziert den aktuellen Systemzustand. Das Sensorsystem erfasst und analysiert Umgebungsinformationen und erkennt dabei spezielle Umgebungsstrukturen wie Hindernisse, Wände oder Durchgänge, die an das Navigationssystem weitergegeben werden. Dieses ist zuständig für die Selbstlokalisierung der Gehhilfe sowie für die Planung und Durchführung von Fahrbewegungen. Das gesamte Steuerungssystem koordiniert den Datenfluss zwischen den Teilsystemen in einer globalen Ablaufsteuerung.

3.4.2 Zuordnung der Anforderungen zu den Teilsystemen

Nachfolgend werden die gesammelten Anforderungen zusammengefasst und den genannten Teilsystemen des Steuerungssystems zugeordnet.

A 15: Das Steuerungssystem muss das Ansteuern von Zwischenzielen auf dem Weg zum Ziel ermöglichen.

A 16: Das Steuerungssystem muss wandnahes Fahren auf dem Weg zum Ziel unterstützen.

A 18: Das Steuerungssystem muss Abweichungen vom kürzesten Weg zum Ziel erlauben.

A 19: Das Steuerungssystem muss Rückwärtsfahren und Rangieren ermöglichen.

A 20: Die roboterbasierte Gehhilfe soll in der Lage sein, sich auch ohne Begleitung des Benutzers fortzubewegen.

A 23: Das Steuerungssystem muss das automatische Planen und Abfahren des Wegs zu einem vorgegebenen Ziel ermöglichen.

A 26: Die Steuerung der roboterbasierten Gehhilfe durch übergeordnete Steuerprogramme soll möglich sein.

A 30: Das Steuerungssystem muss die Änderung des Wegs zum Ziel für die Umfahrung von Hindernissen auf der anderen Seite erlauben.

A 33: Das Steuerungssystem soll den Benutzer auf dem kürzesten Weg zum Ziel führen.

Bild 3-6: Anforderungen an das gesamte Steuerungssystem.

A 1: Die gewünschte Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung der roboterbasierten Gehhilfe müssen aus den Eingaben des Benutzers errechnet werden.

A 3: Die roboterbasierte Gehhilfe muss zuverlässig auf Benutzereingaben reagieren.

A 5: Die Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe während des Gehens muss ohne das Entfernen der Hände von den Gehhilfegriffen möglich sein.

A 6: Kräfte, die durch das Abstützen des Benutzers auf den Gehhilfegriffen entstehen, dürfen nicht als Steuersignale für die Fortbewegung interpretiert werden.

A 7: Die Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe darf keine zu hohen Anforderungen an die Koordinationsfähigkeit des Benutzers stellen.

A 8: Die Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe muss mit möglichst wenigen Bedienelementen realisiert sein.

A 9: Die vorgesehene Fahrtrichtung sowie der aktuelle Betriebszustand der roboterbasierten Gehhilfe müssen dem Benutzer kommuniziert werden.

A 13: Die roboterbasierte Gehhilfe muss durch den Benutzer gestartet werden können.

A 14: Das Ziel der Gehhilfefahrt muss durch den Benutzer gesetzt werden können.

A 27: Das Steuerungssystem muss den Benutzer auch bei ungleichmäßigem Schieben an den Griffen sicher zum Ziel führen.

A 31: Das Steuerungssystem muss unregelmäßige Bewegungen des Benutzers automatisch erkennen und bei deren Auftreten selbstständig anhalten.

A 32: Die Bedienung der roboterbasierten Gehhilfe muss mit geringem Kraftaufwand möglich sein.

A 34: Für die Erkennung einer vom Benutzer geplanten Vorwärtsbewegung müssen die in Vorwärtsrichtung eingebrachten Kräfte gemessen werden.

A 35: Für die Erkennung einer vom Benutzer geplanten Drehbewegung müssen die eingebrachten lateralen Kräfte oder das Drehmoment um die z-Achse gemessen werden.

Bild 3-7: Anforderungen an das Interaktionssystem.

A 10: Das Steuerungssystem der roboterbasierten Gehhilfe soll sowohl in Gebäuden als auch im Freien eingesetzt werden können.

A 12: Die Sicherheitssensorik der roboterbasierten Gehhilfe muss den Vorschriften für die sichere Navigation mobiler Roboter unter Menschen entsprechen.

A 24: Die roboterbasierte Gehhilfe muss sich in ihrer Umgebung lokalisieren können.

A 29: Die roboterbasierte Gehhilfe muss selbstständig Hindernisse erkennen können.

Bild 3-8: Anforderungen an das Sensorsystem.

A 2: Die aktuelle Fahrgeschwindigkeit der roboterbasierten Gehhilfe muss dynamisch geändert werden können.

A 4: Ruckartige Bewegungen, z. B. plötzliche Richtungsänderungen der roboterbasierten Gehhilfe, müssen vermieden werden.

A 11: Das Steuerungssystem muss die Navigation in unterschiedlichen Stockwerken und den Wechsel zwischen diesen unterstützen.

A 17: Das Steuerungssystem muss Kollisionen automatisch verhindern.

A 21: Die maximalen Fahrgeschwindigkeiten der roboterbasierten Gehhilfe müssen an die Fähigkeiten des Benutzers angepasst werden können.

A 22: Die roboterbasierte Gehhilfe muss Sperrbereiche berücksichtigen und um sie herumfahren können.

A 25: Der geplante Weg zum Ziel muss dynamisch geändert werden können.

A 28: Die roboterbasierte Gehhilfe muss in der Lage sein, selbstständig um Hindernisse herumzufahren.

Bild 3-9: Anforderungen das Navigationssystem.

4 Stand der Technik

Nachfolgend werden die Fähigkeiten roboterbasierter Gehhilfen nach dem Stand der Technik evaluiert sowie Navigationssysteme für mobile Roboter und Methoden zur Anpassung des Fahrverhaltens an den Benutzer dargestellt und auf ihre Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit zur Lösung der Aufgabenstellung untersucht.

4.1 Roboterbasierte Gehhilfen

Existierende roboterbasierte Gehhilfen können in zwei grundlegende Typen unterteilt werden. **Passive roboterbasierte Gehhilfen** haben keine angetriebenen Räder und werden direkt durch den Benutzer voranbewegt (»direkte Benutzersteuerung«). Durch eine aktive Lenkung der Räder oder zusätzlich angebrachte Bremsen kann das Gerät in Gefahrensituationen automatisch abgebremst oder umgelenkt werden.

Aktive roboterbasierte Gehhilfen sind mit motorisierten Rädern ausgestattet. Für die Ansteuerung dieser Gehhilfen werden die Eingaben des Benutzers gemessen und unter Berücksichtigung der Umgebungsstruktur in angemessene Fahrgeschwindigkeiten umgesetzt (»indirekte Benutzersteuerung«). Bei Bedarf kann die Kontrolle teilweise oder komplett durch die Robotersteuerung übernommen werden. Zusätzlich sind aktive roboterbasierte Gehhilfen in der Lage, sich auch ohne Begleitung eines Benutzers fortzubewegen und können damit zusätzliche Assistenzaufgaben durchführen.

Bild 4-1 zeigt einige ausgewählte Beispiele roboterbasierte Gehhilfen. Die passive roboterbasierte Gehhilfe *Guido* ist dabei das einzige kommerzielle System, alle anderen roboterbasierten Gehhilfen werden bisher nur in Forschungsumgebungen eingesetzt. *Silbo* ist als einziges System auch für den Einsatz im Außenbereich vorgesehen.



CMU robotic walker
[Morris2003]



CMU robotically augmented walker
[Glover2003, Glover2004]



COOL Aide
[Huang2005]



Guido
[Rodríguez2005]



Hitachi walker
[Nemoto1999, Egawa2004]



MOBIL test bed
[Sabatini2002]



PAMM smart walker
[Dubowsky2000, Yu2003]



Silbo
[Shim2005]



ORTW-II
[Nejatbakhsh2006]

Bild 4-1: Ausgewählte Beispiele roboterbasierter Gehhilfen.

Nachfolgend werden die Eigenschaften existierender roboterbasierter Gehhilfen weiter analysiert. Für bestehende roboterbasierte Gehhilfen können verschiedene **Kinematiken** beobachtet werden (Bild 4-2).

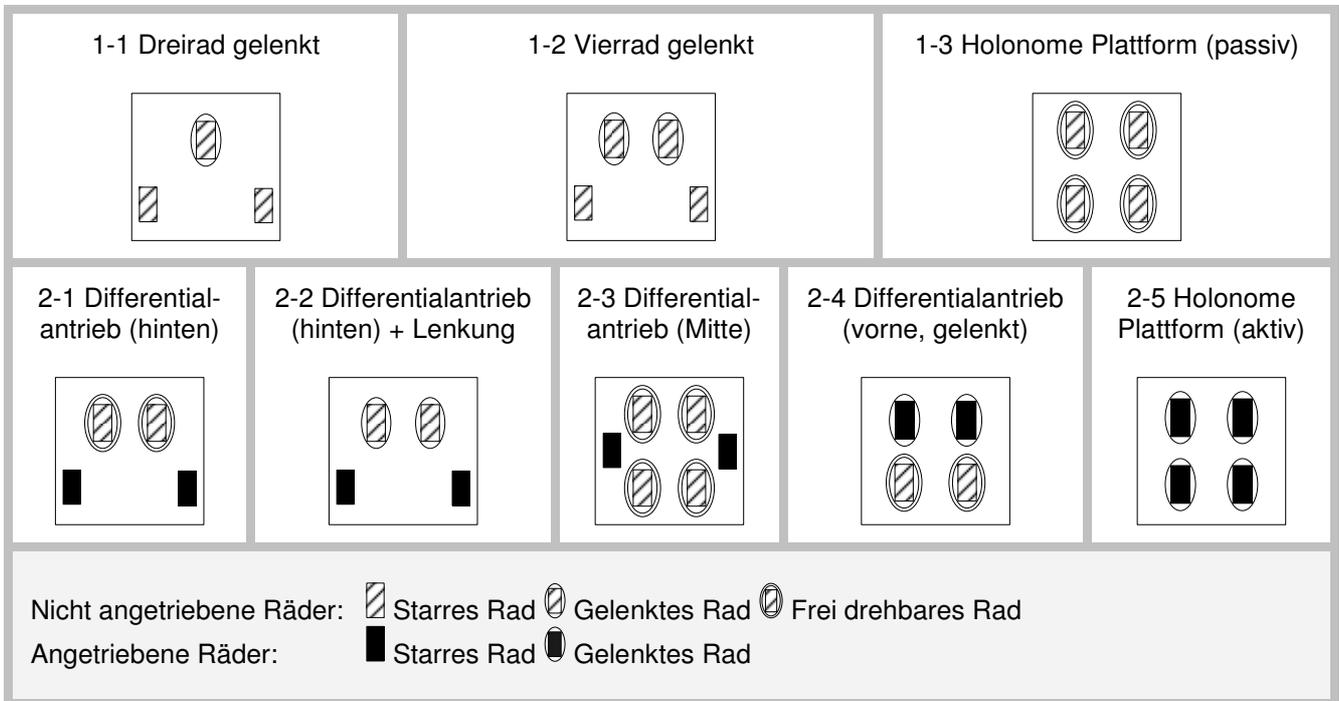


Bild 4-2: Kinematiken roboterbasierter Gehhilfen (Fahrtrichtung nach oben).

Neben der Kinematik einer roboterbasierten Gehhilfe spielen für die Navigation die Position der am Roboter angebrachten Gehhilfegriffen und die daraus resultierende **Position des Gehhilfenutzers** eine wichtige Rolle. Bild 4-3 zeigt hierfür mögliche Varianten.

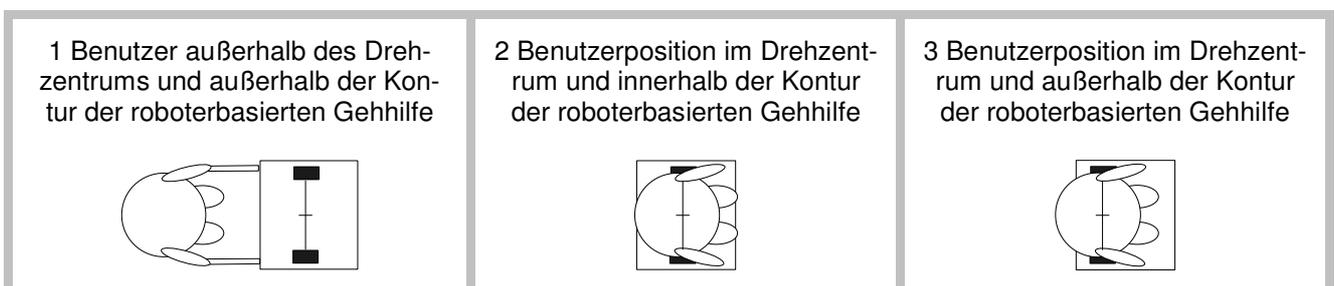


Bild 4-3: Varianten für die Benutzerposition bei roboterbasierten Gehhilfen.

Existierende roboterbasierte Gehhilfen unterscheiden sich neben ihrer Kinematik und Geometrie in den zur Hinderniserkennung und Lokalisierung eingesetzten Umgebungssenso-

ren sowie den verwendeten Interaktionselementen wie kraftmessenden Sensoren, Schaltern und Knöpfen oder graphischen Benutzerschnittstellen. Bild 4-4 fasst die Hardware existierender roboterbasierter Gehhilfen zusammen, Bild 4-5 deren Navigationsfähigkeiten.

In der Gruppe der **passiven Systeme** sind *Guido*, *ORTW-II* und der *CMU robotically augmented walker* in der Lage, sich in ihrer Umgebung zu lokalisieren und selbstständig den Weg zu einem vorgegebenen Ziel zu planen. Der *CMU robotically augmented walker* gibt die geplante Fahrtrichtung am Bildschirm aus, die tatsächliche Fahrtrichtung des Geräts wird jedoch alleine durch den Benutzer bestimmt. *Guido* führt den Benutzer durch entsprechendes Einstellen der Lenkräder entlang des geplanten Pfads. Dabei werden weder abweichende Eingaben des Benutzers berücksichtigt noch entsprechende Abweichungen vom Pfad ermöglicht. *ORTW-II* lässt zwar Abweichungen zu, jedoch sind ab einem bestimmten Abstand vom Pfad höhere Kräfte für das Schieben der Gehhilfe entgegen der geplanten Fahrtrichtung notwendig.

Bei den **aktiven Systemen** planen der *PAMM smart walker* und der *CMU robotic walker* selbstständig einen Pfad zum Ziel. *PAMM* realisiert eine teilautonome Steuerung unter Berücksichtigung der Benutzervorgaben. Für die Errechnung der Fahrtrichtung werden dabei eine virtuelle Kraft, die den geplanten Pfad entlang führt, sowie die tatsächlich vom Benutzer eingebrachte Kraft kombiniert. Die Gewichtung der beiden Eingaben wird entsprechend der Fähigkeiten des Benutzers eingestellt. Dabei wird jedoch nicht geklärt, wie widersprüchliche Eingaben behandelt werden und wie das Erreichen des Ziels sichergestellt wird. Eine Benutzerschnittstelle zur Zieleingabe und zur Ausgabe der geplanten Fahrtrichtung als Unterstützung für den Benutzer wird nicht beschrieben. Der *CMU robotic walker* wird alleine durch den Benutzer gesteuert. Bei zu großen Abweichungen zum Pfad wird jedoch die Geschwindigkeit reduziert und der Benutzer somit gezwungen, auf den Pfad zurückzukehren. Die vorgesehene Fahrtrichtung wird am Bildschirm angezeigt. Bei dieser Steuerungsvariante, ebenso wie bei der Steuerung des *ORTW-II*, können somit Hindernisse auf dem geplanten Pfad, die für die Sensorik des Roboters nicht erkennbar sind, den Weg blockieren und dadurch das Erreichen des Ziels unmöglich machen.

Bezeichnung	Umgebungssensoren		Interaktionselemente			Kinematikkonzept ⁷	Benutzerposition ⁸	Quelle
	Hinderniserkennung	Lokalisierung	Kraftmessende Sensoren	Schalter, Knöpfe	Ausgaben			
CMU robotic walker	U(48)I(48) L(1)T(3)	L(1)	K(4) ¹		B	2-5	3 ⁶	[Morris2003]
CMU robotically augmented walker	L(1)	L(1)		SMZ	B	2-1	2	[Glover2003]
COOL Aide	I(2)L(1)		KM(2) ¹			1-1	2	[Huang2005]
Guido	U(4)L(1)	L(1)	K(2) ¹	SM ⁴	S	1-2	2	[Rodríguez2005]
Hitachi walker	I(7)T(1)		A(4) ³	S		2-1	2	[Egawa2004]
MOBIL test bed	U(10)		K(4) ¹			2-3	1	[Sabatini2002]
ORTW-II	L(1)	L(1)				1-3	2	[Nejabatbakhsh2006]
PAM-AID	U(6)L(1)	L(1)	K(1) ¹	SM ⁴	S	1-2	2	[MacNamara2000]
PAMM smart walker	U(6)	K(1)	KM(1) ²			2-4	1	[Yu2003]
RT-Walker	L(1) ⁵					1-2	1	[Hirata2006]
Silbo	L(1)K(1)	G(1)	K(4) ¹		B	2-2	2	[Shim2005]
Walking helper	L(1)		K(1)			1-3	1	[Hirata2003]
Walking helper II	L(2)		KM(1) ²			2-5	2	[Chuy2006]

Umgebungssensoren:
I: Infrarot
L: Laser
U: Ultraschall
T: Taktile
K: Kamerasystem
G: GPS

Kraftmessende Sensoren:
K: Kraftsensoren
M: Momentensensoren
KM: Kraft-Momentensensoren
A: Abstandssensoren
(n) Anzahl der Sensoren

Funktion der Schalter und Knöpfe:
M: Schalter zur Modusumschaltung
S: Start/Stopknopf
Z: Knöpfe zur Zielauswahl

Art der Statusausgaben:
S: Sprache, B: Bildschirm

¹ Sensor(en) in den Gehhilfegriffen ² Sensor in der Basis des Roboters ³ Sensoren unter den Armstützen
⁴ Knopf zur Aktivierung einer speziellen Radstellung für das Drehen auf der Stelle ⁵ Scanner geneigt
⁶ Holonome Plattform mit variablem Drehzentrum ⁷ Entsprechend Bild 4-2 ⁸ Entsprechend Bild 4-3

Bild 4-4: Hardware ausgewählter roboterbasierter Gehhilfen.

Bezeichnung	Geschwindigkeitsanpassung		Richtungsanpassung		
	Benutzer- vorgaben	Kollisions- schutz	Benutzer- vorgaben	Bahn- planung	Hindernis- umfahrung
CMU robotic walker	I	● Abbremsen	I (Active mode) ¹ O (Forced mode)	● ²	● Bahnanpassung
CMU robotically-augmented walker	D	○	D	◐ nur Planung ²	○
COOL Aide	D	● Abbremsen	D	○	● Richtungsanpassung
PAM-AID / Guido	D	● Abbremsen	D (Automatic mode) O (Program mode)	○ (Automatic mode) ● (Program mode)	● Richtungsanpassung
Hitachi walker	I	● Abbremsen	I	○	○
MOBIL test bed	I	○	I	○	○
PAMM smart walker	I (Mode 1,3,4) O (Mode 2)	● Abbremsen	I (Mode 1,4) O (Mode 2,3)	○ (Mode 1) ● (Mode 2,3,4)	● Bahnanpassung
RT-Walker / ORTW-II	D	● Abbremsen	D	● ³	● Richtungsanpassung
Silbo	I	● Abbremsen	I	○	● Richtungsanpassung
Walking helper (I und II)	I	◐ Anhalten bei Kollision	I	○	○

Benutzeranpassung: D: direkte Benutzersteuerung, I: indirekte Benutzersteuerung, O: ohne Berücksichtigung der Benutzereingaben

Umgebungsanpassung : ● vorhanden, ◐ eingeschränkt vorhanden, ○ nicht vorhanden

¹ Geschwindigkeitsreduktion bei Verlassen des Pfads ² Ausgabe der Fahrtrichtung am Bildschirm
³ Bei Verlassen des vorgegebenen Fahrkorridors wird eine höhere Kraft benötigt

Bild 4-5: Fähigkeiten der Navigationssysteme ausgewählter roboterbasierter Gehhilfen.

Neben der Unterstützung des Benutzers durch teilautonome oder autonome Navigationsfunktionen stellen einige roboterbasierte Gehhilfen **weitere Assistenzfunktionen** bereit:

- *Silbo* und der *Hitachi walker* sind mit motorisierten, höhenverstellbaren Gehhilfegriffen ausgestattet und können dadurch auch als Aufstehhilfe verwendet werden. Der *Walking helper II* unterstützt den Benutzer beim Aufstehen, indem er langsam nach vorne fährt. Das *MOBIL walking & lifting aid* [Bühler2001] oder das im Rahmen des Projekts MONI-MAD entwickelte Gehhilfesystem [Médéric2005] wurden speziell als Aufstehhilfen konzipiert.
- *Silbo*, der *Hitachi walker* [Nemoto1999] und der *RT-Walker* sind mit Neigungssensoren ausgestattet. Dadurch können Gefälle erkannt und die benötigten Benutzerkräfte angepasst sowie bei Stillstand automatisch die Bremsen aktiviert werden.
- Für Benutzer, die sich auch ohne Benutzung einer Gehhilfe voranbewegen können, ist das *MOBIL test bed* in der Lage, Personen zu erkennen und zu verfolgen. Diese Funktion soll zum Beispiel für die Durchführung von Transportaufgaben eingesetzt werden. Die Personenerkennung erfolgt mittels eines an der Person angebrachten Transponders, dessen Position relativ zum Roboter gemessen wird.
- Das explizite Erkennen und Abfangen von Stürzen spielt des Weiteren eine wichtige Rolle. Der *RT-Walker* erkennt Gefahrensituationen anhand einer Analyse der Benutzerposition und passt sein Fahrverhalten entsprechend an. Das roboterbasierte Rehabilitationssystem *REHABOT* [Lee2003] ist stationären Laufbandsystemen [Ikeuchi2005] nachempfunden. Es entlastet den Benutzer mit Hilfe eines flexiblen Aufhängemechanismus und vermeidet Stürze somit komplett. Mit Hilfe einer motorisierten, mobilen Basis ist *REHABOT* in der Lage, sich zusammen mit dem Benutzer fortzubewegen.
- Der *CMU robotically enhanced walker* fährt selbstständig aus dem Weg, falls er von seinem Benutzer nicht mehr benötigt wird. Mit Hilfe einer Fernbedienung kann der Benutzer den Rollator wieder zu sich rufen.

- Der *PAMM smart walker* stellt zusätzliche Mechanismen zur Überwachung des Gesundheitszustands eines Benutzers bereit [Spenko2006]. Dabei werden die eingebrachten Benutzerkräfte und -geschwindigkeiten kontinuierlich ausgewertet. Aus den Benutzergeschwindigkeiten wird dann zum Beispiel die Schrittlänge errechnet und auf Unregelmäßigkeiten überprüft.
- Andere Mobilitätshilfen speziell für die Führung Sehbehinderter sind der *GuideCane* [Borenstein1997] oder *Harunobu / Hitomi* [Kotani1996]. Beide Mobilitätshilfen sind mit Sensoren zur Hinderniserkennung sowie einem haptischen Interaktionssystem für den Benutzer ausgestattet und fahren automatisch um Hindernisse herum.

4.2 Navigation mobiler Roboter

Nachfolgend werden repräsentative Lösungen für die Navigationskomponenten »Kartierung und Lokalisierung«, »globale und lokale Bahnplanung« und »Bewegungssteuerung« entsprechend dem Stand der Technik beschrieben.

4.2.1 Kartierung und Lokalisierung

Ein weitverbreitetes Verfahren zur **Lokalisierung** eines mobilen Roboters in seiner Umgebung ist die Kombination von Lagekopplung und Lagestützung. Bei der Lagekopplung wird die Position des Roboters ausgehend von einer bekannten Position durch die Messung und mathematische Integration von Positionsänderungen geschätzt. Für die Messung der zurückgelegten Strecke und der Orientierungsänderung werden Drehratensensoren und Odometer (Wegmesser) genutzt. Die Lagestützung basiert auf der Erkennung und Auswertung mit Hilfe von Umgebungssensoren wie Ultraschallsensoren, Laserscannern oder Bildverarbeitungssystemen detektierter Umgebungsmerkmale. Erkannte Merkmale werden mit ihrer Sollposition abgeglichen, die in einer internen Umgebungskarte gespeichert ist, und die Fahrzeugposition relativ zu den erkannten Umgebungsmerkmalen berechnet [Rohrmoser2004].

Die zur Lokalisierung benötigte Umgebungskarte kann mit Hilfe **simultaner Lokalisierung und Kartierung** (SLAM) erzeugt werden. Dabei erkundet der Roboter seine Umgebung selbstständig oder er wird während der Inbetriebnahme ferngesteuert durch seine Einsatzumgebung gefahren. Während der Kartierung verzeichnet der Roboter alle erkannten Umgebungsmerkmale in einer Umgebungskarte, die er gleichzeitig zur Lokalisierung nutzt [Thrun2002].

In **Außenbereichen** kann für die globale Lokalisierung eines mobilen Roboters neben der Lagekopplung das Satellitennavigationssystem GPS eingesetzt werden. Eine präzise Positionsbestimmung ist mit dem differentiell arbeitenden DGPS-Verfahren unter Verwendung eines Referenzempfängers möglich [Prassler2000].

4.2.2 Globale Bahnplanung

Mit Hilfe der Bahnplanung wird eine kollisionsfreie **Trajektorie** von einer Start- zu einer Zielkonfiguration errechnet. Für die globale Planung wird eine Umgebungskarte verwendet, in der alle statischen Hindernisse verzeichnet sind. Üblicherweise handelt es sich dabei zumindest teilweise um die gleiche Karte, die auch zur Lokalisierung verwendet wird.

Grundlage der meisten Bahnplanungsmethoden ist eine einheitliche Umgebungsrepräsentation, die es ermöglicht den Roboter als Punkt im Raum zu modellieren, so dass die Planung unabhängig von der tatsächlichen Robotergeometrie durchgeführt werden kann [Latombe1996, LaValle2006]. Der **Konfigurationsraum** C mobiler Roboter wird durch eine Erweiterung von R^2 um eine dritte Dimension, welche die Orientierung des Roboters repräsentiert, erzeugt, so dass $C = R^2 \times [0, 2\pi]$. Für die Repräsentation von Hindernissen im Konfigurationsraum werden diese für die verschiedenen Orientierungen des Roboters im Raum um die Strecke zum Drehzentrum des Roboters erweitert, so dass der kollisionsfreie Raum des Roboters für alle Konfigurationen (x, y, α) in C eindeutig definiert ist. Bild 4-6 zeigt für eine roboterbasierte Gehhilfe, der eine Person folgt, das Erweitern von Hindernissen im Konfigurationsraum bei zwei verschiedenen Roboterorientierungen. Der Gehhilfenutzer wird dabei als Teil der Robotergeometrie gesehen, so dass nicht nur Kollisionen

des Roboters, sondern auch des Benutzers mit der Umgebung schon während der Planung vermieden werden. Bild 4-7 zeigt die entsprechende 3-D-Darstellung des Konfigurationsraums.

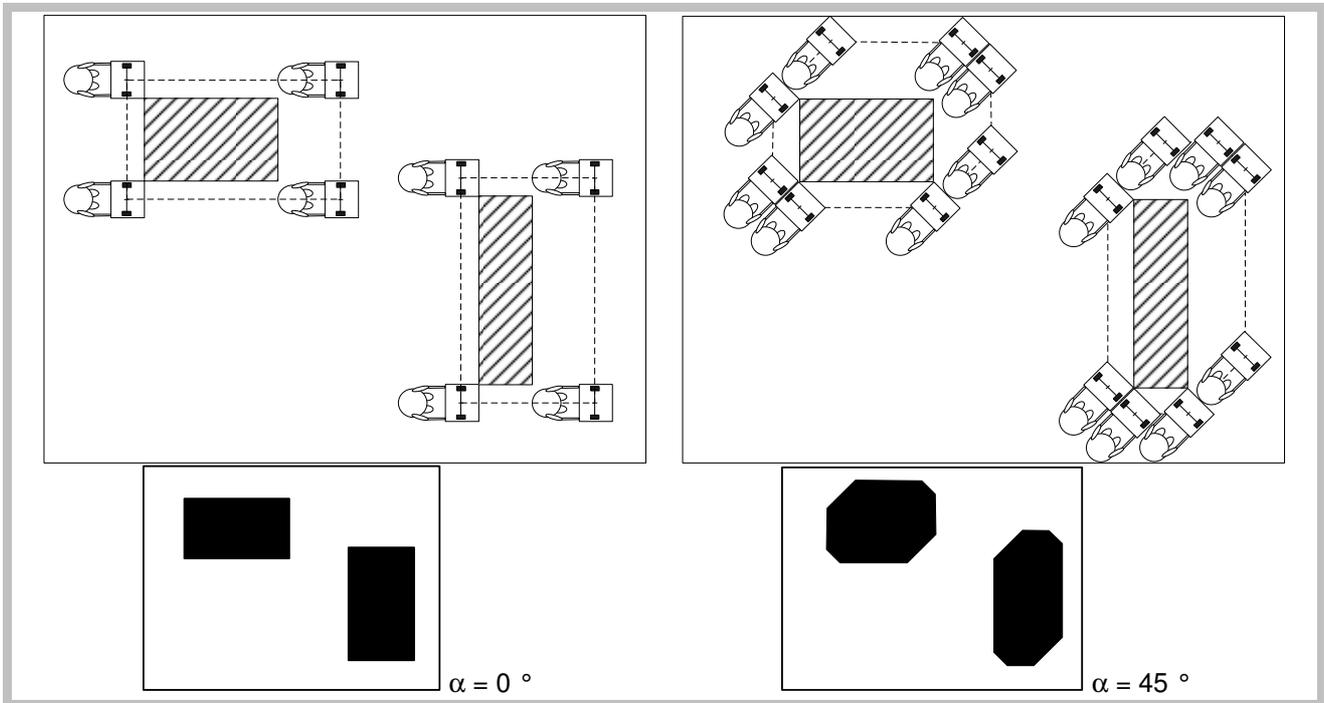


Bild 4-6: Erweiterung von Hindernissen im Konfigurationsraum abhängig von der Orientierung des Roboters (schraffierter Bereich: ursprüngliche Größe des Hindernisses).

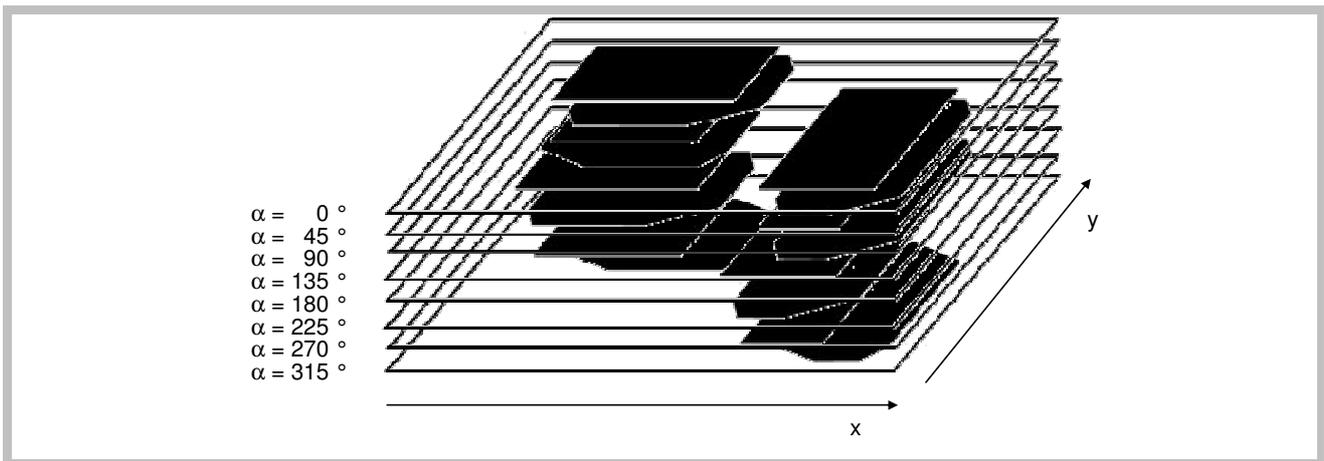


Bild 4-7: 3-D-Darstellung des Konfigurationsraums für eine roboterbasierte Gehhilfe.

Falls die Grundfläche des Roboters als Kreis mit Drehzentrum in dessen Mitte dargestellt werden kann, entfällt die dritte Dimension des Konfigurationsraums und die Hindernisse können direkt um den Radius des Roboters erweitert werden.

Globale Planungsverfahren im Konfigurationsraum können entsprechend [Latombe1996] in folgende **Kategorien** aufgeteilt werden (Bild 4-8):

- Straßenkarten-Verfahren errechnen zunächst Pfadsegmente im freien Konfigurationsraum zwischen den Hindernissen. Der *Sichtbarkeitsgraph* verbindet die Eckpunkte aller Hindernisse. Im *Voronoi-Diagramm* werden Kanten in die Mitte zwischen den Hindernissen gelegt. Die errechneten Pfadsegmente werden mit der Start- und Zielposition des Roboters verbunden. Danach kann der kürzeste Pfad im Graphen gesucht werden.
- Zellzerlegungsverfahren teilen den freien Konfigurationsraum in Bereiche, so genannte Zellen, auf. Ein Graph wird aufgestellt, der benachbarte Zellen verbindet. Anhand dieses Graphen kann dann der optimale Pfad von einer Start- zur Zielposition errechnet werden, zum Beispiel indem die jeweiligen Mittelpunkte der Zellen als Stützpunkte für den Pfad verwendet werden.
- Bei der Verwendung von Potentialfeldmethoden wird der Roboter unter den Einfluss künstlicher Kräfte gesetzt. Der Zielpunkt besitzt ein anziehendes Potential, Hindernisse wirken abstoßend. Der Pfad führt entlang des abfallenden Gradienten.

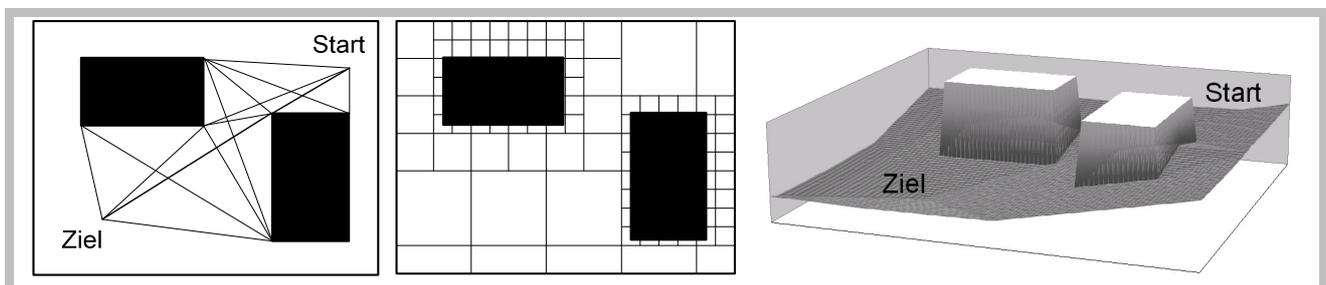


Bild 4-8: Bahnplanungsverfahren: Sichtbarkeitsgraph, Zellzerlegung, Potentialfeld.

Neben den oben gelisteten kombinatorischen Planungsverfahren wird der Einsatz von Zufallsplanern, z. B. mit »Rapidly Exploring Random Trees« (RRT) vorgeschlagen [LaValle2006]. Diese sind zwar oftmals schneller und damit auch für höhere Dimensionen geeignet, führen jedoch nicht immer zuverlässig zu einer Lösung. Zudem sind die errechneten Lösungen selten optimal, so dass eine zusätzliche Optimierung notwendig wird [Rohrmoser2002].

Der Einsatz des Sichtbarkeitsgraphen für **3-dimensionale Konfigurationsräume** ist aufgrund der steigenden Komplexität nicht sinnvoll. Allerdings gibt es Methoden, die ein 2-dimensionales Voronoi-Diagramm als Basis für weiterführende Evaluierungen anhand der Robotergeometrie verwenden. Ähnliche Algorithmen existieren für die Erweiterung 2-dimensionaler Potentialfelder. Zellzerlegungsverfahren können in höhere Dimensionen transferiert werden. Allerdings steigt dadurch die Anzahl der Zellen und damit die Komplexität des Algorithmus exponentiell mit der Anzahl der Dimensionen im Konfigurationsraum.

Neben der Geometrie eines mobilen Roboters müssen **kinematische Einschränkungen** desselben, wie ein limitierter Drehwinkel, berücksichtigt werden. Für die Planung im 3-dimensionalen Konfigurationsraum bedeutet dies eine Einschränkung möglicher Winkeländerungen von einer Pfadkonfiguration zur nächsten und damit der über den Graphen verbundenen Zellen. In [Jiang1999] wird ein Verfahren vorgestellt, in dem mögliche Pfade im Sichtbarkeitsgraphen zunächst ohne Berücksichtigung der Robotergeometrie und -kinematik errechnet werden. In einem zweiten Schritt wird der kürzeste Pfad darauf hin untersucht, ob er an die spezielle Geometrie und Kinematik eines nicht-holonomen Roboters angepasst werden kann. Im positiven Fall findet eine entsprechende Anpassung statt, im negativen wird der nächstbeste Pfad evaluiert.

4.2.3 Lokale Bahnplanung

Die lokale Planung wird eingesetzt, falls keine oder unvollständige Umgebungsinformationen vorliegen, z. B. in sich häufig ändernden, dynamischen Umgebungen. Für die rein reaktive lokale Planung werden folgende **Methoden** unterschieden [Shiller2000]:

- Bei der Verwendung von **Vektorfeldern** wird die sichtbare Umgebung des Roboters evaluiert und anhand der gegebenen Zielvorgabe eine optimale Bewegungsrichtung errechnet. Die lokale Bewegungsplanung anhand eines Potentialfelds wurde erstmals in [Khatib1986] vorgestellt. Dabei wird die vorgegebene Zielposition mit einem anziehenden, ein erkanntes Hindernis mit einem abstoßenden Potential belegt. Die »Vektorfeld-Histogramm« (VFH) Methode bildet die aktuelle Umgebungsstruktur des Roboters in einem Histogramm ab [Borenstein1991]. Dafür wird der Bereich um den Roboter in einzelne Zellen aufgeteilt, die kontinuierlich auf Hindernisse untersucht werden. Entsprechend der errechneten Hinderniswahrscheinlichkeiten für jede Zelle und abhängig von deren Entfernung zum Roboter wird für die verschiedenen Winkelbereiche um den Roboter der Histogrammwert errechnet. Die vorgegebene Fahrtrichtung zum Ziel wird durch eine kollisionsfreie Fahrtrichtung ersetzt. Diese errechnet sich als die Fahrtrichtung, die der vorgegebenen Fahrtrichtung am nächsten ist und deren Histogrammwert unter einem gegebenen Schwellwert liegt.
- **Sensorbasierte** lokale Planer benutzen nur die aktuellen Sensorinformationen, um einen kollisionsfreien Pfad entlang der erkannten Hindernisse zu finden. Bei Verwendung der »TangentBug«-Methode [Kamon1998] fährt der Roboter gerade auf ein vorgegebenes Ziel zu. Trifft er auf ein Hindernis, folgt er so lange dessen Kontur bis das Hindernis umfahren wurde.

Neben diesen rein reaktiven Methoden der lokalen Bahnplanung gibt es Methoden, die auf einem vorab mit Hilfe eines globalen Planers errechneten Pfad aufbauen. Dessen grundlegende Struktur wird während der lokalen Bahnmodifikation beibehalten. Die **Methode elastischer Bänder** [Quinlan1993] verwendet ein Kräftemodell für das Errechnen einer optimalen Bewegungsrichtung. Folgende Kräfte wirken auf den als elastisches Band modellierten Bewegungspfad:

- Interne Kräfte ziehen das Band so weit wie möglich zusammen (Glättung des Pfads).
- Externe Kräfte dehnen das Band (Hindernisausweichen).

Bild 4-9 zeigt einen von einem globalen Potentialfeldplaner erzeugten Pfad, der mit Hilfe der Methode elastischer Bänder lokal optimiert wird. Im mittleren Bild wird der Pfad geglättet und von den statischen Hindernissen abgestoßen. Im rechten Bild wird der Pfad aufgrund eines dynamischen Hindernisses weiter angepasst und gedehnt.

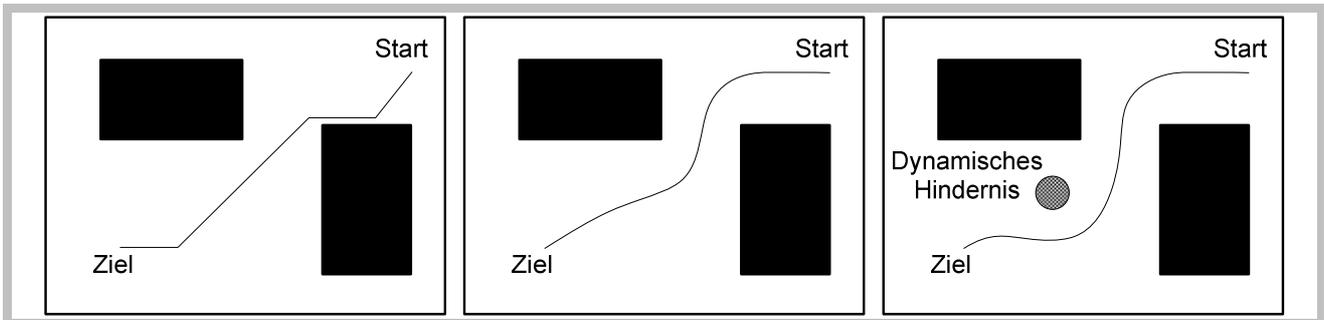


Bild 4-9: Lokale Bahnmodifikation mittels der Methode elastischer Bänder.

Für die Navigation in dynamischen Umgebungen ist die Modellierung der aktuellen Umgebungsstruktur nicht ausreichend. Die »Velocity obstacles«-Methode [Fiorini1998] analysiert die Bewegung detektierter **dynamischer Hindernisse** und modifiziert einen vorgegebenen Bewegungspfad entsprechend der zu verschiedenen Zeitabschnitten prognostizierten Hindernispositionen.

4.2.4 Bewegungssteuerung

Die Aufgabe der Bewegungssteuerung besteht darin, passende Sollgeschwindigkeiten für die Motoren zu errechnen, so dass der vorgegebene Pfad möglichst präzise durch den mobilen Roboter verfolgt wird.

Für die Bewegungssteuerung eines mobilen Roboters sind prinzipiell drei **Reglerarten** zu unterscheiden (Bild 4-10) [DeLuca1998]:

- Der Positionsregler wird für rein reaktive Steuerungen eingesetzt und steuert die Plattform zu einer festen Zielposition. Dafür werden Linear- und Rotationsgeschwindigkeit abhängig von der Differenz zwischen der aktuellen und der Sollposition gesetzt.

- Der Bahnregler regelt die Bahnabweichungen des Roboters beim Abfahren einer vorgegebenen Bewegungsbahn aus. Dabei wird die Rotationsgeschwindigkeit des Roboters abhängig vom Abstand zum Pfad so eingestellt, dass der Roboter allmählich auf den Pfad geführt wird.
- Der Trajektorienregler wird für das Verfolgen einer Bahn mit vorgegebener Geschwindigkeit eingesetzt. Somit ist hier die Sollgröße der Zustandsvektor (Position und Geschwindigkeiten) eines virtuellen Roboters. Der Regler bestimmt Linear- und Rotationsgeschwindigkeit des realen Roboters derart, dass mit zunehmender Zeit der Zustand des realen gegen den Zustand des virtuellen Roboters konvergiert.

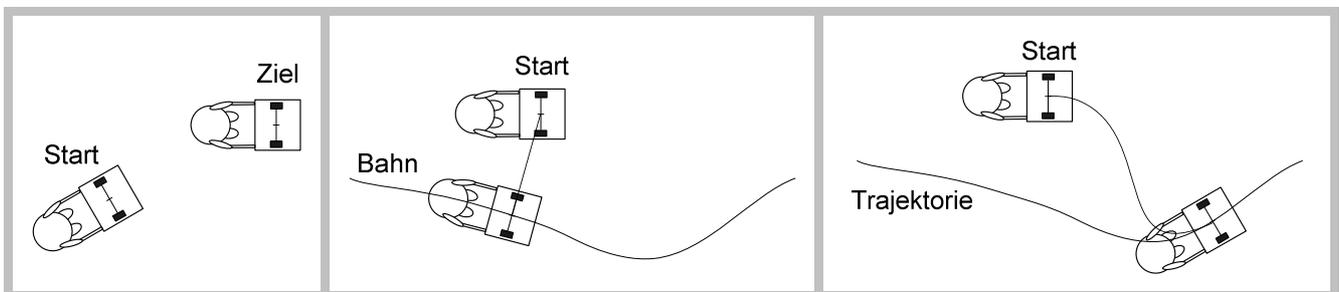


Bild 4-10: Positions-, Bahn- und Trajektorienregelung.

Bei der Verwendung eines **Bahn- oder Trajektorienreglers** ist darauf zu achten, dass der vom Planer vorgegebene Pfad auch vom Roboter gefahren werden kann, das heißt es müssen schon während der Planung mögliche kinematische Restriktionen der Roboterhardware berücksichtigt werden. Für die Verwendung des Trajektorienreglers muss der Planer zusätzlich Geschwindigkeitsvorgaben für die einzelnen Bahnsegmente bereitstellen.

4.3 Teilautonome Bewegungsführung

Die gleichzeitige Berücksichtigung von Benutzereingaben und Umgebungsdaten für die Bewegungsführung wurde insbesondere bei der Entwicklung roboterbasierter Rollstühle betrachtet. Existierende Rollstuhlsteuerungen können in modellbasierte und verhaltensbasierte Ansätze gegliedert werden [Cooper1995].

4.3.1 Modellbasierte Steuerungen zur teilautonomen Bewegungsführung

Modellbasierte Steuerungen (Bild 4-11) analysieren die Eingaben des Benutzers und die gemessenen Umgebungsdaten, um die Intention des Benutzers, z. B. das Ziel der aktuellen Fahrt, abzuleiten und die Bewegungsrichtung des Rollstuhls entsprechend anzupassen. Für die Bestimmung der Benutzerintention wird ein Abgleich des aktuellen Benutzerverhaltens, wie die Stellung des Joysticks, mit vorher aufgestellten Verhaltensmodellen durchgeführt. Mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung werden die verschiedenen Lösungsvarianten evaluiert und die beste ausgewählt.

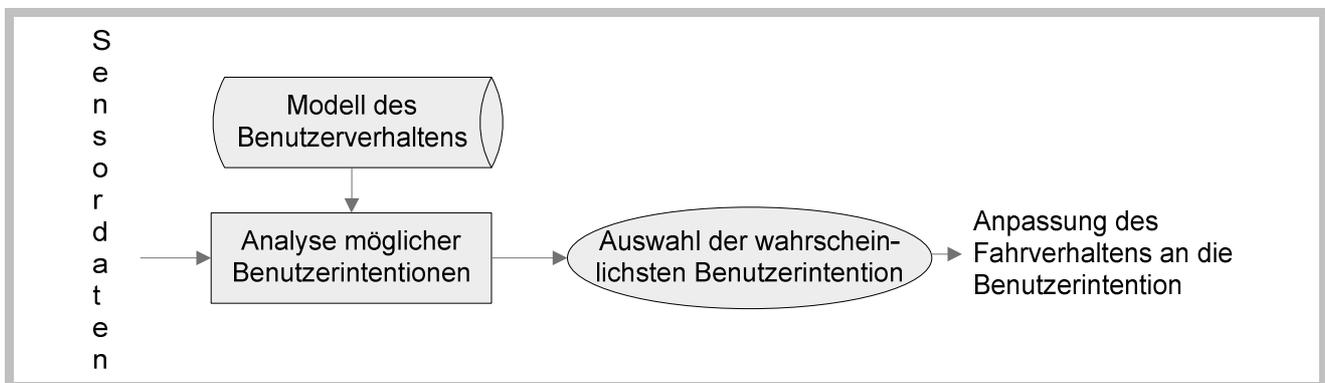


Bild 4-11: Schematische Darstellung der modellbasierten Bewegungsführung.

Ein Vertreter der modellbasierten Steuerungen ist die auf dem roboterbasierten Rollstuhl *NavChair* [Levine1999] eingesetzte »Minimum VFH« (MVFH) Methode, eine Weiterentwicklung der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen VFH-Methode zur dynamischen Hindernisumfahrung. Dabei wird die Histogrammfunktion zur Umgebungsrepräsentation mit einer Parabelfunktion kombiniert, deren Minimum die gewünschte Fahrtrichtung des Benutzers darstellt. Die resultierende Fahrtrichtung wird durch das Minimum der kombinierten Histogrammfunktion bestimmt. Durch dieses Verfahren wird das sichere Passieren enger Durchgänge wie Türen ermöglicht. Zusätzlich wird sichergestellt, dass die Eingaben des Benutzers stets beachtet werden und der Benutzer somit ein gutes Gefühl der Kontrolle über seinen Rollstuhl hat.

Der *SmartChair* [Parikh2004] ermöglicht die Vorgabe eines **globalen Fahrziels**, aufgrund dessen ein Potentialfeld erzeugt wird, das die grundsätzliche Bewegungsrichtung des Rollstuhls festlegt. Bei der Modifikation der Fahrtrichtung aufgrund detektierter Hindernisse oder abweichender Benutzereingaben wird diese grundsätzliche Bewegungsrichtung weiterhin beibehalten. Für die Hindernisumfahrung von *VAHM* [Bourhis2001] wird eine vereinfachte Version der VFH-Methode verwendet, welche die aktuelle Fahrtrichtung aus den Hindernisabständen benachbarter Zellen errechnet. Der *Collaborative Wheelchair Assist* [Long2006] ist ebenfalls in der Lage selbstständig zu einem Ziel zu fahren. Dabei wird jedoch ein vorprogrammierter Pfad verfolgt. Der Benutzer kann über den Joystick Bahnmodifikationen veranlassen, um dynamische Hindernisse zu umfahren. *MAid* [Prassler2001] stellt einen auf der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen »Velocity obstacles«-Methode basierenden Algorithmus zur sicheren kollisionsfreien Navigation in stark bevölkerten Umgebungen bereit. Dabei fährt der Rollstuhl jedoch, nachdem der Benutzer das Ziel der Fahrt vorgegeben hat, komplett autonom zu diesem Ziel und reagiert nicht mehr auf Eingaben des Benutzers.

Auch die in Kapitel 4.1 beschriebenen **roboterbasierten Gehhilfen** benutzen modellbasierte Ansätze, um aus den eingebrachten Benutzerkräften eine passende Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung für die Gehhilfe zu errechnen. Die Steuerungen von *Guido* und *Silbo* sind Weiterentwicklungen der VFH-Methode. Für den *CMU robotic walker*, *COOL Aide*, *RT-Walker* und *PAMM* wurde ein zweistufiges Steuerungssystem entwickelt. Dabei wird zunächst die vom Benutzer gewünschte Fahrtrichtung aus dessen Eingaben errechnet und dann evaluiert, ob eine Modifikation der Fahrtrichtung zur Hindernisumfahrung bzw. für das Verfolgen des geplanten Pfads notwendig ist.

4.3.2 Verhaltensbasierte Steuerungen zur teilautonomen Bewegungsführung

Verhaltensbasierte Steuerungen (Bild 4-12) gehen davon aus, dass das Fahrverhalten eines mobilen Roboters in verschiedene, grundlegende Fahrfunktionen gegliedert werden kann. Abhängig von den Eingaben des Benutzers und den gemessenen Umgebungsdaten

wird ein geeignetes Manöver aus der Liste möglicher Fahrfunktionen ausgewählt und durchgeführt.

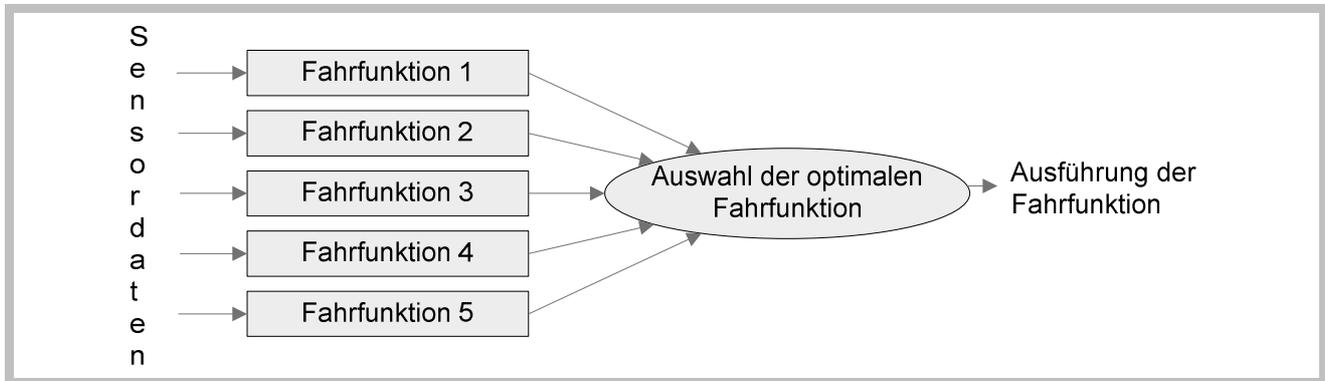


Bild 4-12: Schematische Darstellung der verhaltensbasierten Bewegungsführung.

[Cooper1995] unterscheidet für roboterbasierte Rollstühle folgende grundlegenden **Fahrfunktionen** verhaltensbasierter Steuerungen:

- Fahren im freien Raum (wenig Hindernisse, großer Hindernisabstand).
- Fahren in engen Räumen (viele Hindernisse, z. B. Möbel oder Türdurchfahrten).
- Andocken (z. B. an einen Tisch oder andere Möbelstücke).

Einige der Fahrfunktionen verfolgen dabei **konträre Ziele** (Bild 4-13). So steht der Durchfahrt enger Passagen die Hindernisvermeidung entgegen, die versucht, einen maximalen Hindernisabstand zu gewährleisten. Ebenso tritt ein Konflikt mit der Hindernisvermeidung auf, wenn an ein Objekt andockt, das heißt maximal nahe herangefahren werden soll. Hat ein Rollstuhlfahrer aufgrund seiner Beeinträchtigungen Schwierigkeiten bei der präzisen Ansteuerung des Rollstuhls oder bei der Erkennung von Hindernissen, sollten die Eingaben des Benutzers ignoriert und die automatische Hindernisumfahrung aktiviert werden, da das Ansteuern des Hindernisses höchstwahrscheinlich nicht beabsichtigt ist. Die Schwierigkeit liegt in der automatischen Erkennung der Benutzerfähigkeiten und der entsprechenden Ableitung passender Fahrfunktionen.

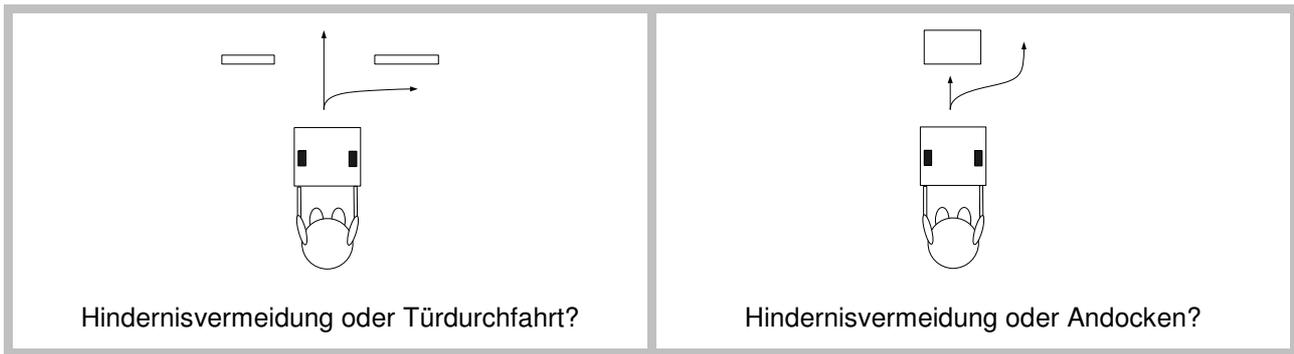


Bild 4-13: Typische Problemsituationen bei der teilautonomen Bewegungsführung.

Ein typischer Vertreter verhaltensbasierter Steuerungen ist die Subsumption-Architektur [Brooks1985]. *Wheesley* [Yanco2000] ist ein roboterbasierter Rollstuhl, dessen Steuerung auf diesem Konzept aufbaut. Im freien Raum bewegt sich der Rollstuhl mit maximaler Geschwindigkeit in der vom Benutzer vorgegebenen Richtung. Werden Hindernisse in der vorgegebenen Fahrtrichtung erkannt, übernimmt die Hindernisumfahrung die Steuerung und führt den Rollstuhl seitlich am Hindernis vorbei. Ähnliche Verfahren wurden auch für die roboterbasierten Rollstühle *Rolland* [Röfer1999], *RobChair* [Pires1998] und *Sharioto* [Vanhooydonck2003] realisiert. Die Steuerung von *Rolland* berücksichtigt während der Hindernisumfahrung die Eingaben des Benutzers für die Auswahl der Umfahrungsrichtung.

Für das **Andocken an Hindernisse** analysiert [Vanhooydonck2003] die Eingaben des Benutzers, um dadurch dessen Sicherheit bei der Steuerung des Rollstuhls einzuschätzen. Steuert der Benutzer den Rollstuhl konstant und ohne Fluktuationen der vorgegebenen Fahrtrichtung auf ein Hindernis zu, wird die vorgegebene Fahrtrichtung beibehalten und lediglich die Geschwindigkeit des Rollstuhls in der Nähe des Hindernisses reduziert. Eine ähnliche Evaluierung der Benutzerfähigkeiten wird in [Levine1999] vorgeschlagen. Dabei wird beim Ansteuern enger Passagen zunächst die automatische Hindernisumfahrung aktiviert und der Rollstuhl am Hindernis entlang gesteuert. Korrigiert der Benutzer die vorgeschlagene Fahrtrichtung und steuert weiterhin auf die Passage zu, wird die Passagendurchfahrt aktiviert.

Neben Hindernisumfahrung und Andocken ist die **automatische Wand- oder Konturverfolgung** eine weitere Fahrfunktion, die auf mehreren roboterbasierten Rollstühlen realisiert wurde. Dabei wird die Steuerung üblicherweise komplett an den Rollstuhl abgegeben, der dadurch z. B. selbstständig lange Korridore entlang fahren kann.

4.4 Folgerungen aus dem Stand der Technik

Ansätze aus der teilautonomen Steuerung roboterbasierter Gehhilfen und Rollstühle können für das **gesamte Steuerungssystem** nur teilweise übernommen werden. Existierende roboterbasierte Gehhilfen stellen eine Vielzahl hilfreicher Assistenzfunktionen bereit. Die meisten betrachteten Steuerungssysteme sind jedoch auf spezielle Teilaufgaben wie Kollisionsschutz, Bewegungsregelung, Aufstehhilfe oder autonome Navigation fokussiert und stellen kein schlüssiges Gesamtkonzept für die umgebungs- und benutzereingepasste Steuerung roboterbasierter Gehhilfen bereit. Zudem ist nur eine geringe Zahl roboterbasierter Gehhilfen und Rollstühle in der Lage, sich in ihrer Umgebung zu lokalisieren und selbstständig einen Pfad zu einem vorgegebenen Ziel zu planen.

Nachdem die zu entwickelnde roboterbasierte Gehhilfe in der Lage sein soll, sich auch ohne die Begleitung eines Benutzers autonom fortzubewegen (A 20), wird im Rahmen dieser Arbeit ein aktives Steuerungssystem konzipiert und realisiert. Keine der existierenden aktiven roboterbasierten Gehhilfen mit Fähigkeiten zur autonomen Zielführung ist in der Lage, ihr Bewegungsverhalten während der Zielführung ausreichend an die Vorgaben des Benutzers anzupassen. Auch ist keines der existierenden Steuerungssysteme für nicht-holonome Roboterkinematiken geeignet. Deshalb wird im Folgenden ein neues Gesamtkonzept für ein Steuerungssystem zur Zielführung roboterbasierter Gehhilfen erarbeitet, das sowohl Benutzereingaben als auch Umgebungsdaten für die Bewegungsführung berücksichtigt und für roboterbasierte Gehhilfen unterschiedlicher Kinematiken eingesetzt werden kann.

Für das **Interaktionssystem** stehen verschiedene Ein- und Ausgabemedien wie kraftmessende, graphische oder auditive Systeme zur Verfügung, die für existierende, roboter-

basierte Gehhilfen eingesetzt werden. Entsprechend den Anforderungen werden im Folgenden geeignete Interaktionsmedien für die Interaktion mit dem Benutzer ausgewählt und Methoden zur Auswertung der zugehörigen Systemdaten entwickelt.

Für das **Sensorsystem** existieren verfügbare Systeme oder Komponenten, die den gestellten Anforderungen entsprechen. Für die Hinderniserkennung (A 29) können die für fahrerlose Transportsysteme geltenden Sicherheitsrichtlinien und Sensoren übernommen werden [DIN1525] (A 12). Das bevorzugt eingesetzte Sensorsystem sind Laserscanner, die zusätzlich für die präzise Lokalisierung geeignet sind (A 24). Für den Außenbereich, der oft nicht ausreichend Umgebungsmerkmale zur Laserlokalisierung bereit stellt, können zusätzlich GPS-basierte Systeme eingesetzt werden (A 10). Das Sensorsystem wird somit in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet und die für die Navigation benötigten Umgebungsinformationen werden als vorhanden vorausgesetzt.

Existierende **Navigationssysteme** für mobile Roboter lassen sich nur eingeschränkt für die Navigation roboterbasierter Gehhilfen einsetzen. Die **Lokalisierung** einer roboterbasierter Gehhilfe unterscheidet sich nicht von der anderer mobiler Roboter, so dass hierfür existierende Methoden aus dem Stand der Technik direkt verwendet werden können. Das Thema Lokalisierung wird deshalb in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt.

Für die automatische Führung des Gehhilfenutzers zu einem vorgegebenen Ziel (A 23) stellt der Stand der Technik geeignete Methoden für die globale **Bahnplanung** bereit. Die lokale Bahnplanung des Steuerungssystems muss neben der Bahnmodifikation aufgrund dynamischer Hindernisse im Betrieb mit dem Gehhilfenutzer auch dessen – möglicherweise vom geplanten Pfad abweichende – Richtungsvorgaben berücksichtigen. Die Methode elastischer Bänder wurde speziell für die Anpassung eines Bewegungspfades in dynamischen Umgebungen, insbesondere das Ausweichen dynamischer Hindernisse, entwickelt (A 25, A 28). Da der anfänglich vorgegebene, optimale Pfad zum Ziel nicht grundlegend geändert wird, wird dabei weiterhin der kürzeste Weg zum Ziel verfolgt (A 33) und plötzliche Richtungsänderungen werden vermieden (A 4). Diese Methode wird im Folgenden für die benutzer- und umgebungsangepasste Zielführung roboterbasierter Gehhilfen so erwei-

tert und angepasst, dass Bahnmodifikationen auch zur Berücksichtigung und Reaktion auf Benutzereingaben durchgeführt werden können.

Das Verfolgen des vorgegebenen Pfads wird mit Hilfe eines **Positionsreglers** realisiert, der die dynamische Anpassung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit (A 2) sowie eine gleichmäßige Bewegungsführung optimal unterstützt (A 4). Die Kollisionsvermeidung kann durch die Geschwindigkeitsreduktion in der Nähe von Hindernissen gelöst werden (A 17). Zusätzlich werden Methoden zur Anpassung der dynamischen Steuerparameter an die Fähigkeiten des Benutzers entwickelt und realisiert.

5 Lösungsansatz für das Steuerungssystem

5.1 Entwicklung des Gesamtkonzepts

5.1.1 Konzeption der benötigten Betriebsmodi des Steuerungssystems

Das Steuerungssystem soll sowohl in der Lage sein, den Weg zu einem vorgegebenen Ziel zu planen und den Benutzer entlang dieses Wegs zu führen (A 23), als auch auf kurzen Strecken zu rangieren (A 19). Diese beiden unterschiedlichen Fahrfunktionen werden in zwei separaten **Betriebsmodi** realisiert:

- Im benutzergesteuerten Modus gibt der Benutzer dem Roboter kein explizites Ziel vor. Über das Interaktionssystem eingegebene Geschwindigkeits- und Richtungsvorgaben des Benutzers werden direkt in Fahrgeschwindigkeiten des Roboters umgesetzt.
- Im Zielführungsmodus wird über das Interaktionssystem ein Ziel vorgegeben, zu dem der Roboter dann selbstständig den Weg plant. Die Fahrgeschwindigkeit des Roboters entspricht wie im benutzergesteuerten Modus den über das Interaktionssystem eingegebenen Geschwindigkeitsvorgaben des Benutzers, wobei jedoch nur Vorwärtsfahrten möglich sind. Für die Errechnung der Fahrtrichtung werden der geplante Pfad, aktuelle Umgebungsdaten sowie die vom Benutzer vorgegebene Fahrtrichtung berücksichtigt.

Die Aktivierung oder Deaktivierung der Betriebsmodi sowie die Umschaltung zwischen den Betriebsmodi erfolgt entsprechend Bild 5-1 sowohl durch den Benutzer über die graphische Benutzeroberfläche als auch automatisch durch die Ablaufsteuerung. Die automatische Umschaltung vom Zielführungs- in den benutzergesteuerten Modus findet dann statt, wenn der Benutzer offensichtlich nicht dem geplanten Pfad folgt, das heißt wenn sich die vorgegebene Fahrtrichtung des Benutzers stark von der geplanten Fahrtrichtung unterscheidet. Diese Modusumschaltung kann entsprechend der Fähigkeiten des Benutzers aktiviert oder deaktiviert werden. Der Roboter wird automatisch gestoppt, wenn der Benut-

zer für längere Zeit stehen bleibt (keine Eingaben an den Sensorgriffen) oder wenn im Zielführungsmodus das vorgegebene Ziel erreicht wurde.

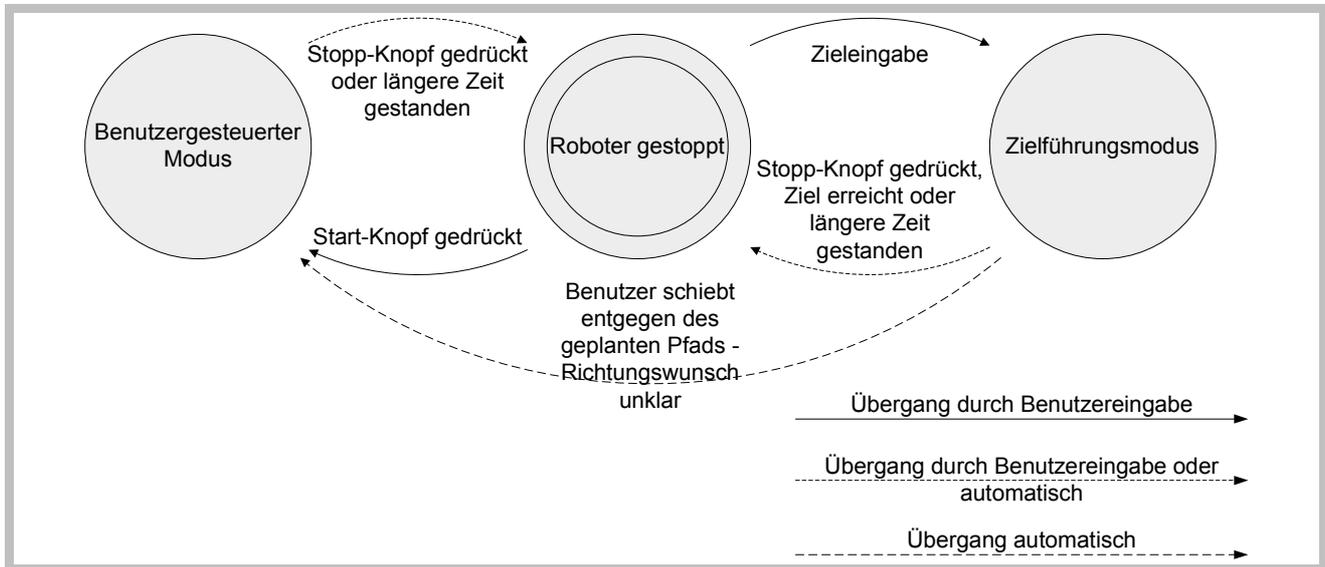


Bild 5-1: Zustandsdiagramm für die Umschaltung zwischen benutzergesteuertem und Zielführungsmodus.

Bei der Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe durch ein übergeordnetes Steuerprogramm (A 26) erfolgt die Umschaltung des Betriebsmodus durch dieses Steuerprogramm.

5.1.2 Lösungsvarianten für die Ermittlung des optimalen Fahrverhaltens durch die Berücksichtigung von Richtungsvorgaben des Benutzers im Zielführungsmodus

Während für die Bewegungssteuerung der roboterbasierten Gehhilfe im benutzergesteuerten Modus die gewünschte Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung direkt vom Interaktionsan das Navigationssystem gegeben wird, ist für den Zielführungsmodus zunächst eine Analyse und Verarbeitung dieser Benutzereingaben notwendig. Für die Ermittlung des optimalen Fahrverhaltens im Zielführungsmodus ist insbesondere der Fall zu betrachten, in dem die **Richtungsvorgaben** durch den Benutzer nicht mit der geplanten Fahrtrichtung übereinstimmen. Der morphologische Kasten Bild 5-2 [VDI2221, VDI2222] zeigt mögliche

Teillösungen für die relevanten Teilfunktionen der Ermittlung des optimalen Fahrverhaltens.

Teilfunktion	Teillösung 1	Teillösung 2	Teillösung 3	Teillösung 4
Reaktion auf abweichende Richtungsvorgaben des Benutzers	Pfad beibehalten, Benutzervorgaben ignorieren	Lokale Bahnmodifikation entsprechend der Benutzervorgaben	Globale Bahnmodifikation (Neuplanung) entsprechend den Benutzervorgaben	Pfad ignorieren und den Benutzervorgaben folgen
Dauer der Bahnmodifikation	Einmalige Modifikation des Pfads	Längerfristige Modifikation des Pfads	Keine Modifikation des Pfads	
Rückführung auf den optimalen Weg zum Ziel	Weg wird nie verlassen	Reduktion der Geschwindigkeit bei zunehmendem Abstand zum Pfad	Roboter »zieht« zurück zum optimalen Pfad	Keine Rückführung

Bild 5-2: Morphologischer Kasten mit Teillösungen für die Behandlung abweichender Richtungsvorgaben des Benutzers im Zielführungsmodus.

Aus A 33 (Das Steuerungssystem soll den Benutzer auf dem kürzesten Weg zum Ziel führen.) lassen sich folgende Anforderungen für die Behandlung abweichender Richtungsvorgaben ableiten:

- Das Ziel sollte erreicht werden.
- Die Strecke zum Ziel sollte möglichst kurz sein.
- Die Fahrzeit zum Ziel sollte möglichst kurz sein.

Die durch das Steuerungssystem zu realisierenden Fahrfunktionen werden durch die Anforderungen A 15, A 16, A 18 und A 30 vorgegeben. Repräsentative Kombinationen der genannten Teillösungen für die Behandlung abweichender Richtungsvorgaben des Benutzers im Zielführungsmodus werden in Bild 5-3 dargestellt und anhand der Anforderungen validiert.

Varianten	Var. 1	Var. 2	Var.3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7
Lösungskombination Bild 5-2	1-3-1	2-1-3	2-2-3	3-1-4	4-3-2	4-3-3	4-3-4
Bezeichnung	Reine Robotersteuerung	Einmalige Bahnmodifikation	Bewegungsverhalten	Neuplanung	Benutzersteuerung mit Abbremsen	Benutzersteuerung mit Rückführung	Reine Benutzersteuerung
Ziel wird erreicht (A 33)	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Evtl. nicht.
Weglänge (A 33)	Minimal.	Mittel.	Mittel.	Evtl. groß.	Mittel.	Mittel.	Evtl. groß.
Fahrdauer (A 33)	Gering.	Mittel.	Mittel.	Evtl. lang.	Evtl. lang.	Mittel.	Evtl. lang.
Ansteuern von Zwischenzielen (A 15)	Nein.	Ja, aber dauernde Aktivierung nötig.	Ja. Aktiviere »Zwischenziel anfahren«.	Ja. Planung durch das Zwischenziel.	Ja, falls Ziel nahe am Pfad.	Ja, falls Ziel nahe am Pfad. Dauernde Aktivierung nötig.	Ja.
Wandnahes Fahren (A 16)	Nein.	Ja, aber dauernde Aktivierung nötig.	Ja. Aktiviere »Wandnahes Fahren«.	Nein.	Ja, falls Wand nahe am Pfad.	Ja, falls Wand nahe am Pfad. Dauernde Aktivierung nötig.	Ja.
Abweichungen vom kürzesten Pfad (A 18)	Nein.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja, aber nicht weit.	Ja, aber nicht weit.	Ja.
Neuplanung des Pfads (A 30)	Nein.	Nein.	Nein.	Ja.	Nein.	Nein.	Nein.

Bild 5-3: Vergleich alternativer Lösungsvarianten für die Behandlung abweichender Richtungsvorgaben des Benutzers im Zielführungsmodus.

Variante 1 stellt eine reine **Robotersteuerung** dar, die genau den geplanten Pfad abfährt. Damit werden zwar eine minimale Weglänge und eine entsprechend geringe Fahrdauer

sichergestellt, Richtungsvorgaben des Benutzers bleiben jedoch unberücksichtigt. Diese Variante ist hilfreich für Benutzer, die aufgrund schwerer psychischer oder körperlicher Einschränkungen nicht in der Lage sind, eine situationsadäquate Bewegungsrichtung vorzugeben. Die Eingaben von Benutzern, die nicht an derartigen Beschwerden leiden, sollten jedoch bei der Bewegungsführung berücksichtigt werden.

Varianten 2 und 3 ermöglichen **lokale Modifikationen** des global geplanten Bewegungspfads, das heißt, ein Dehnen und Strecken des Pfads, ohne dass dieser »aufgebrochen« und z. B. auf der anderen Seite eines Hindernisses herum oder durch eine andere Tür geführt wird. Indem nur die aktuellen Richtungsvorgaben des Benutzers für die Bahnmodifikation berücksichtigt werden, ermöglicht Variante 2 kurzzeitige Modifikationen des Pfads. Für spezielle Anpassungen der Bewegungsbahn wie für das wandnahe Fahren oder das Anfahren von Zwischenzielen sollte entsprechend Variante 3 die Modifikation des Pfads aufrechterhalten werden, bis das Ende der Wand oder das vorgegebene Zwischenziel erreicht wurde. Variante 2 würde für diese Art von Bahnanpassungen den Nachteil mit sich bringen, dass der Benutzer die Bahnänderung immer wieder neu aktivieren, d. h. konstant Kräfte in Richtung der Wand oder des Zwischenziels aufbringen muss, da der Roboter die geänderte Fahrtrichtung nicht beibehält, sondern den Benutzer nach kurzer Zeit wieder in Richtung des ursprünglichen Pfads führt.

Variante 4 beschreibt eine komplette **Neuplanung** des Pfads in Richtung der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung. Diese Variante sollte mit Vorsicht eingesetzt werden, da bei der Auswahl eines komplett neuen Bewegungspfads sowohl der Fahrweg als auch die Fahrzeit bis zum Erreichen des Ziels sehr lang werden können.

In den Varianten 5 und 6 wird der global geplante, optimale Bewegungspfad durch die Benutzervorgaben nicht verändert. Der Roboter folgt jedoch den Richtungsvorgaben des Benutzers, so dass **Abweichungen** vom geplanten Pfad ermöglicht werden. In Variante 5 wird der Benutzer auf den Pfad zurückgeführt, indem die Geschwindigkeit des Roboters bei zunehmender Distanz zum Pfad reduziert wird. In Variante 6 »zieht« der Roboter den Benutzer zurück auf den Pfad. Dadurch werden zunehmend höhere Kräfte benötigt, um

den Roboter der geplanten Bewegungsrichtung entgegen zu steuern. Während die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit bei Variante 5 zu einer erhöhten Fahrdauer führen kann, wird bei Variante 6 durch die Rückführung des Benutzers auf den Pfad sichergestellt, dass die Weglänge und Fahrdauer durch die Anpassung des Pfads an die Benutzervorgaben nicht übermäßig gesteigert werden. Beide Varianten bieten gegenüber der einmaligen oder längerfristigen Bahnmodifikation den Nachteil, dass Abweichungen vom Pfad limitiert sind und somit Zwischenziele möglicherweise nicht erreicht werden. Außerdem erfordert Variante 6, ähnlich wie Variante 2, eine kontinuierliche Aktivierung der Bahnmodifikation, so dass diese Variante für das wandnahe Fahren oder das Anfahren von Zwischenzielen nicht geeignet ist.

Variante 7 beschreibt die Umschaltung auf die **reine Benutzersteuerung**, wobei der geplante Pfad zwar beibehalten, aber nicht weiter für die Bewegungsführung berücksichtigt wird. Diese Variante sollte ebenso wie Variante 4 mit Vorsicht eingesetzt werden, da sowohl der Fahrweg als auch die Fahrzeit bis zum Erreichen des Ziels sehr lang werden können sowie das Erreichen des Ziels nicht mehr sichergestellt werden kann. Trotzdem treten Situationen auf, in denen dieses Verhalten vom Benutzer gewünscht werden kann, z. B. wenn er sich auf dem Weg zum Ziel rückwärts auf einen Stuhl setzen will, um sich auszuruhen oder wenn er zum Betreten eines Aufzugs rangieren muss. Danach sollte jedoch möglichst schnell in den Zielführungsmodus zurückgeschaltet werden.

Offensichtlich bietet keine der Varianten alleine eine optimale Lösung, vielmehr erfüllt nur die **Kombination verschiedener Varianten** alle Anforderungen. Die Entscheidung, welche Art der Bahnanpassung und somit welche Lösungsvariante ausgewählt wird, wird abhängig von der aktuellen Umgebungsstruktur getroffen. Sind keine Wände oder mögliche Zwischenziele in der vom Benutzer vorgegebenen Bewegungsrichtung erkennbar, sollte die direkte Bahnmodifikation gewählt werden (Variante 2), ansonsten die längerfristige Aktivierung der Bewegungsverhalten »Wandnahes Fahren« oder »Anfahren eines Zwischenziels« (Variante 3). Zeigt die vorgegebene Bewegungsrichtung auf die andere Seite eines Hindernisses als der geplante Pfad, soll eine Neuplanung des Pfads in dieser Richtung durchgeführt werden (Variante 4). Nur bei starken Abweichungen der Benutzereinga-

ben von der geplanten Fahrtrichtung, z. B. wenn der Benutzer rückwärts fahren will, darf eine Umschaltung in die reine Benutzersteuerung erfolgen (Variante 7). Bild 5-4 visualisiert die im Rahmen der Varianten 2, 3 und 4 möglichen Änderungen des Bewegungspfad durch abweichende Richtungsvorgaben des Benutzers während der Zielführung.

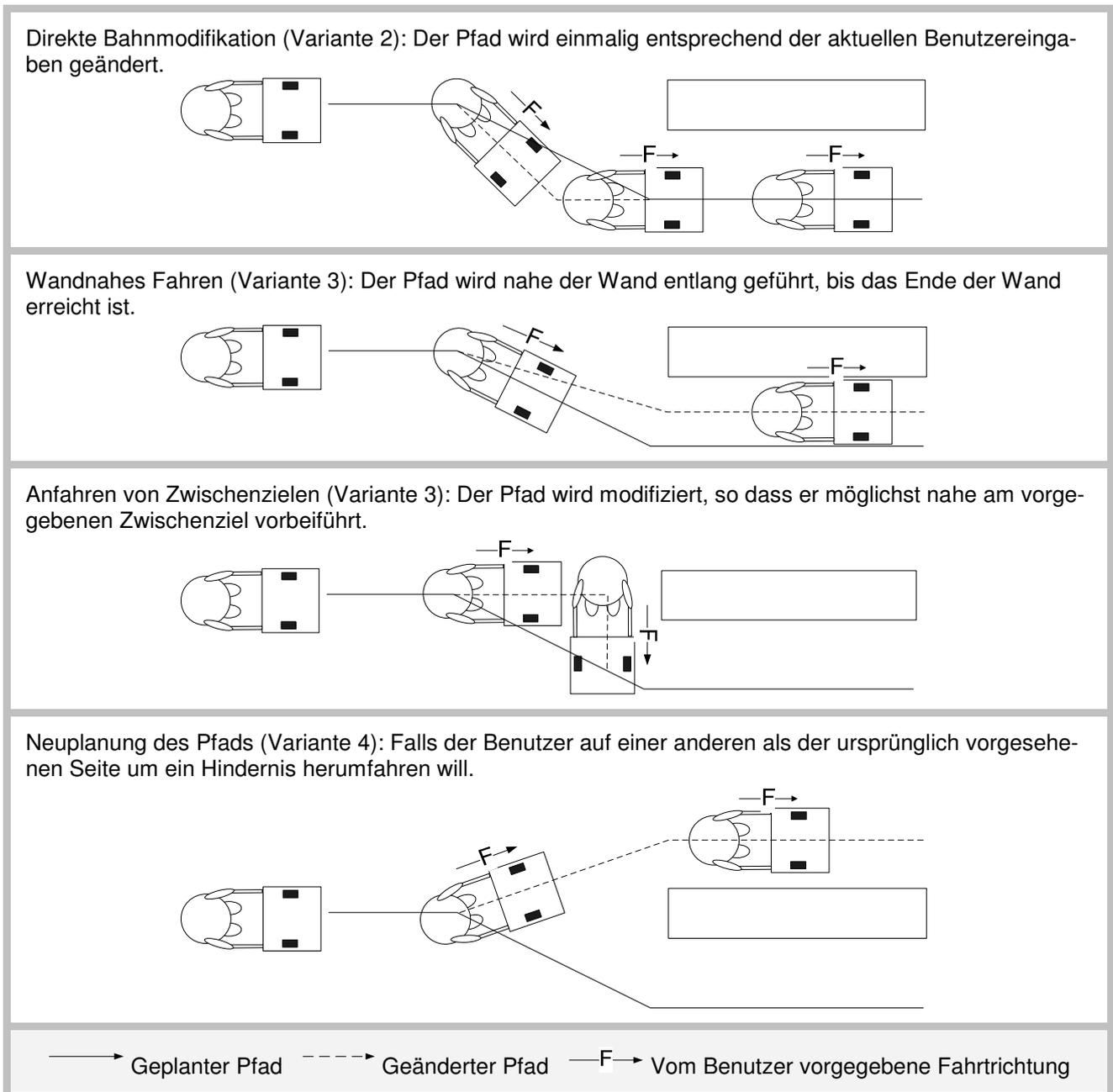


Bild 5-4: Reaktionen auf abweichende Richtungsvorgaben des Benutzers während der Zielführung.

5.2 Konzeption des Interaktionssystems

Das Interaktionssystem dient der Eingabe diskreter (Start/Stop und Modusumschaltung sowie Zielposition im Zielführungsmodus, A 13, A 14) und kontinuierlicher Benutzervorgaben (gewünschte Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung, A 1) sowie der Ausgabe wichtiger Systeminformationen an den Benutzer (A 9).

5.2.1 Lösungsvarianten für die Eingabe von Benutzervorgaben und die Ausgabe wichtiger Systeminformationen an den Benutzer

Der morphologische Kasten Bild 5-5 zeigt mögliche Teillösungen für die **Eingabe von Benutzervorgaben** zum Starten und Stoppen der roboterbasierten Gehhilfe, für die Modusumschaltung, die Zieleingabe und das Setzen der Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung.

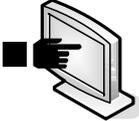
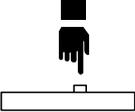
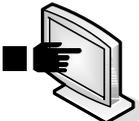
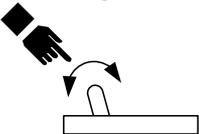
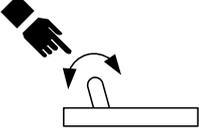
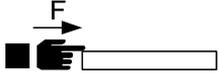
Teilfunktion	Teillösung 1	Teillösung 2	Teillösung 3
Starten, Stoppen, Modusumschaltung	Knopf auf dem Touchscreen 	Knopf am Gehhilfegriff 	
Zieleingabe	Knöpfe auf dem Touchscreen 	Knöpfe oder Hebel am Gehhilfegriff 	
Setzen der Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung	Geschwindigkeitsregler auf dem Touchscreen 	Manueller Regler (Joystick) am Gehhilfegriff 	Messung der eingebrachten Benutzerkräfte 

Bild 5-5: Morphologischer Kasten mit Teillösungen für die Eingabe von Benutzervorgaben.

Obwohl dem Thema **Sprachsteuerung** in der aktuellen Forschung eine immer größere Bedeutung zukommt, ist eine Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe über Sprachkommandos nicht praktikabel. Die zuverlässige Erkennung der Sprachkommandos ohne Verwendung eines Headsets kann durch handelsübliche Sprachsteuerungssysteme nicht garantiert werden. Zusätzlich ist für die meisten Spracherkennungssysteme ein nicht unerheblicher Aufwand für das Einlernen auf den Benutzer notwendig. Somit erfüllen Spracherkennungssysteme weder die Anforderungen an die Zuverlässigkeit (A 3) noch an die einfache Bedienbarkeit (A 7) oder die geringe Zahl von Bedienelementen (A 8).

Die Aktivierung der **Änderungen des Bewegungspfads** kann implizit durch das Steuerungssystem oder explizit durch den Benutzer über das Interaktionssystem stattfinden. Zum Beispiel könnten über den Touchscreen Wände und Durchgänge oder geeignete Bahnmodifikationen visualisiert werden, so dass der Benutzer einen geeigneten Weg auswählen kann. Dadurch würde jedoch ein Entfernen der Hände von den Gehhilfestützen während der Gehhilfefahrt erforderlich (A 5). Zudem widerspricht dieses Konzept der Forderung nach einer möglichst einfachen Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe (A 7). Darüber hinaus ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein Benutzer, der nicht mehr selbstständig zu einem Ziel findet, in der Lage ist, solch eine Auswahl zu treffen und die Bewegung des Roboters passend zu konfigurieren. Deshalb wurde für die Aktivierung einer ausgewählten Änderung des Bewegungspfads keine Eingabemöglichkeit im Interaktionssystem vorgesehen.

Repräsentative Lösungsvarianten für die Eingabe von Benutzervorgaben werden in Bild 5-6 gegenübergestellt und anhand der Anforderungen A 3, A 5, A 7 und A 8 an das Interaktionssystem validiert.

Varianten	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
Lösungskombination Bild 5-5	1-1-1	1-1-2	1-1-3	2-1-1	2-2-2
Bezeichnung	Touch- screen- Steuerung	Joystick- steuerung	Kraftsteue- rung	»Totmann- schalter«	Komplexer Steuergriff
Zuverlässige Reaktion auf Benutzereingaben (A 3)	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.
Geschwindigkeitssteue- rung erfordert Entfer- nen der Hände von den Griffen (A 5)	Ja.	Nein.	Nein.	Ja.	Nein.
Geforderte Koordinati- onsfähigkeit des Be- nutzers (A 7)	Hoch. Be- dienung Geschwin- digkeits-/ Richtungs- regler.	Mittel. Be- dienung des Joysticks.	Gering. Analog zu konventio- neller Geh- hilfe.	Hoch. Be- dienung Geschwin- digkeits-/ Richtungs- regler und Startknopf.	Mittel. Be- dienung Startknopf und Schal- ter.
Benötigte Bedienele- mente (A 8)	Touch- screen.	Touch- screen, Joystick.	Touch- screen.	Touch- screen, Startknopf.	Startknopf, Schalter für Zielauswahl, Joystick.

Bild 5-6: Vergleich alternativer Lösungsvarianten für die Eingabe von Benutzervorgaben.

Variante 1 stellt eine reine Touchscreen-Steuerung dar, die jedoch ebenso wie Variante 4 den Nachteil bietet, dass der Benutzer für Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen die Hände von den Gehhilfegriffen entfernen muss. Varianten 2, 3 und 5 ermöglichen das Anpassen der Fahrgeschwindigkeiten direkt über die Gehhilfegriffe. Dabei sind jedoch bei den Varianten 2 und 5 zusätzliche Schwierigkeiten durch die Bedienung der entsprechenden Steuerknöpfe gegeben. Indem kontinuierliche Eingaben zur Geschwindigkeitssteuerung direkt über die Gehhilfegriffe gemacht werden, stellt Variante 3 die Stütze des Benutzers während des Gehens sicher. Die Geschwindigkeits- und Richtungssteuerung der roboterbasierten Gehhilfe analog zu konventionellen Gehhilfen ist dem Benutzer vertraut und somit weitaus einfacher als die Bedienung möglicherweise sehr kleiner, am Griff angebrachter Schalter oder Knöpfe. Die Eingabe diskreter Steuersignale wie das Starten und

Stoppen sowie die Zielauswahl findet in dieser Variante über den Touchscreen statt. Für stark sehbehinderte Benutzer, die die am Touchscreen dargestellten Knöpfe nicht mehr erkennen können und somit auf ein Steuerungssystem, das sie ertasten können, angewiesen sind, wäre eine andere Form der Zieleingabe, z. B. Variante 5, zu bevorzugen. Nachdem der Anteil sehbehinderter Personen jedoch nur einen geringen Prozentsatz unter den Gehhilfenutzern ausmacht, wird nachfolgend Variante 3 weiterverfolgt. Nachdem die vom Benutzer gewünschte Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung in Varianten 1, 2, 4 und 5 über den Joystick oder den Geschwindigkeits- oder Richtungsregler auf dem Touchscreen direkt vorgegeben werden ist das Ersetzen des Eingabesystems durch eine dieser Varianten trotzdem jederzeit möglich.

Durch den Touchscreen wird ein Medium zur **Ausgabe aktueller Statusinformationen** bereitgestellt. Diskrete Informationen wie das aktuelle Fahrziel sollten neben der Visualisierung auf dem Touchscreen per Sprache ausgegeben werden, da Sprache eine intuitive und menschliche Verständigungsform darstellt und somit die Akzeptanz der roboterbasierten Gehhilfe unterstützt (A 9).

5.2.2 Lösungsvarianten für die Messung der eingebrachten Benutzerkräfte

Zur Messung der eingebrachten Benutzerkräfte entsprechend der in Kapitel 5.2.1 ausgewählten Lösungsvariante müssen passende Sensoren ausgewählt und ein geeigneter Ort für deren Einbau gefunden werden. Mögliche Lösungsvarianten für die Messung der eingebrachten Benutzerkräfte sind in Bild 5-7 dargestellt.

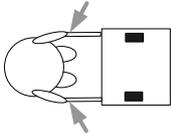
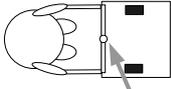
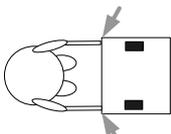
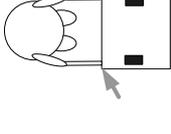
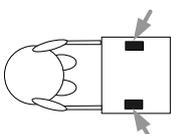
Variante	Ort der Messung	Sensor	Anzahl Sensoren
Variante 1	Griffe	Kraft-Momentensensor in einem Griff	1
Variante 2		Kraftsensor in jedem Griff	2
Variante 3	Verbindungspunkt der Gehhilfestützen zum Roboter (Achse durchgehend) 	Kraft-Momentensensor	1
Variante 4	Verbindungspunkt der Gehhilfestützen zum Roboter (Achse nicht durchgehend)	Kraftsensoren an den seitlichen Verbindungspunkten	2
Variante 5		Momentensensoren an den seitlichen Verbindungspunkten	2
Variante 6		Kraft-Momentensensoren an den seitlichen Verbindungspunkten	2
Variante 7	Antriebsräder 	Messung der Motorströme	0

Bild 5-7: Lösungsvarianten zur Messung der eingebrachten Benutzerkräfte.

Die Evaluierung der Lösungsvarianten anhand der Anforderungen A 6, A 34 und A 35 an die Messung der eingebrachten Benutzerkräfte ist in Bild 5-8 dargestellt.

Varianten Bild 5-7	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5	Var. 6	Var. 7
Stützkräfte beeinflussen Messung der Steuerkräfte (A 6)	Nein (Griffposition angepasst).	Nein (Griffposition angepasst).	Nein.	Nein.	Ja.	Ja.	Ja.
Messung der Kräfte in Fahrtrichtung (A 34)	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.
Messung der lateralen Kräfte (A 35)	Ja.	Nein.	Ja.	Nein.	Nein.	Ja.	Nein.
Bestimmung des Drehmoments im Zentrum möglich (A 35)	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.	Ja.

Bild 5-8: Vergleich alternativer Lösungsvarianten zur Messung der eingebrachten Benutzerkräfte.

Varianten 1 bis 4 erfüllen die Anforderungen A 6, A 34 sowie eine der Teilanforderungen von A 35 und können damit für die Messung der Benutzerkräfte eingesetzt werden. Die Auswahl einer geeigneten Variante ist abhängig von der Mechanik der roboterbasierten Gehhilfe, der Art der Anbringung der Gehhilfestützen und dem verfügbaren Bauraum für die Sensoren zur Messung der Benutzerkräfte. Eine Anbringung der Sensoren nahe den Gehhilfegriffen ist zu bevorzugen, da bei entfernter Anbringung zusätzliche, durch die Dynamik des Gehhilfesystems verursachte, Kräfte die Messungen beeinflussen können.

5.2.3 Lösungsvarianten für die Sensordatenverarbeitung

Die in Kapitel 5.2.1 ausgewählte Variante zur Geschwindigkeitssteuerung der roboterbasierten Gehhilfe über das Messen der eingebrachten Benutzerkräfte erfordert die Konzeption einer weiteren Komponente, der Sensordatenverarbeitung. Deren Aufgabe ist die Errechnung der vom Benutzer gewünschten Geschwindigkeiten abhängig von den eingebrachten Kräften und den benutzerspezifischen linearen und rotatorischen Maximalgeschwindigkeiten.

Aus A 3 (Die roboterbasierte Gehhilfe muss zuverlässig auf Benutzereingaben reagieren.) lassen sich folgende Anforderungen an die Sensordatenverarbeitung ableiten:

- Das Fahrverhalten der roboterbasierten Gehhilfe muss vorhersehbar sein.
- Die vom Benutzer vorgegebene Bewegung muss möglichst präzise durchgeführt werden.
- Die roboterbasierte Gehhilfe muss schnellstmöglich gestoppt werden können.

Zur Erfüllung der Anforderung A 27 (Das Steuerungssystem muss den Benutzer auch bei ungleichmäßigem Schieben an den Griffen sicher zum Ziel führen.) muss eine benutzer- bzw. krankheitsspezifische Parametrierung des Fahrverhaltens möglich sein.

Zusätzlich ist die Erfüllung der Anforderungen A 31 und A 32 an die Sensordatenverarbeitung sicherzustellen. Die Evaluierung möglicher Lösungsvarianten für die Sensordatenverarbeitung anhand der genannten Anforderungen ist in Bild 5-9 dargestellt.

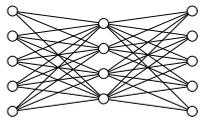
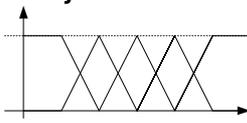
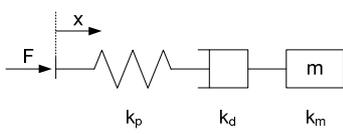
Varianten	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Bezeichnung	Neuronales Netz 	Fuzzy Controller 	Mechanisches Ersatzmodell 
Fahrverhalten vorhersehbar (A 3)	Nein, da selbst lernendes System	Ja.	Ja.
Präzise Bewegungsführung (A 3)	Ja, falls korrekt eingelernt	Nein, Unschärfe ist Kerneigenschaft der Fuzzy Logik.	Ja.
Schnelles Stoppen (A 3)	Ja, falls korrekt eingelernt	Ja, kann als zusätzliche Regel hinterlegt werden.	Ja.
Manuelle Parameteranpassung möglich (A 27)	Nein, da selbst lernendes System	Ja.	Ja.
Anhalten bei unregelmäßigen Eingaben (A 31)	Ja, falls korrekt eingelernt	Ja, kann als zusätzliche Regel hinterlegt werden.	Nein.
Geringer Kraftaufwand (A 32)	Ja, falls korrekt eingelernt	Ja.	Ja.

Bild 5-9: Vergleich alternativer Lösungsvarianten für die Sensordatenverarbeitung.

Bei Variante 1 wird ein Neuronales Netz angelernt. Nachteilig ist dabei jedoch, dass das erlernte Verhalten nicht vorhersehbar ist und somit dessen Zuverlässigkeit nicht verifiziert und dass das System nicht von Hand parametrierbar ist. Variante 2 erfüllt diese Anforderungen, zeigt aber Mängel in der Präzision, so dass die korrekte Positionierung der Gehhilfe und damit verbundene Stütze des Benutzers nicht sichergestellt werden kann. Das Erkennen unregelmäßiger Eingaben und entsprechendes Anhalten der roboterbasierten Gehhilfe ist durch ein mechanisches Ersatzmodell entsprechend Variante 3 nur schwer zu realisieren. Diese Aufgabe kann jedoch durch einen separaten Verarbeitungsschritt vor der eigentlichen Errechnung der Geschwindigkeiten gelöst werden. Ein mechanisches Ersatzmodell mit einer zusätzlichen Prüfung der Eingaben auf Unregelmäßigkeiten erfüllt alle genannten Anforderungen und wird deshalb im Folgenden weiter ausgeführt.

Die **Prüfung der Eingaben** dient insbesondere dazu zu erkennen, wenn der Benutzer der roboterbasierten Gehhilfe stolpert. Stolperbewegungen zeichnen sich durch größere Sprünge in den in Laufrichtung eingebrachten Benutzerkräften aus. Anstatt stark zu beschleunigen, wie es bei konventionellen Gehhilfen der Fall wäre, soll die roboterbasierte Gehhilfe anhalten. Wurde ein Sprung erkannt, der einen Schwellwert zur Stolpererkennung überschreitet, wird deshalb ein Abbremsen der roboterbasierten Gehhilfe erwirkt. Anhand von Benutzertests wurde als sinnvoller Schwellwert ein Anstieg von 50 N in 0,2 s errechnet. Der Stolperschutz wird deaktiviert, nachdem der Roboter angehalten hat und der Benutzer keine Kräfte mehr in Fahrtrichtung auf die Griffe einbringt (Bild 5-10).

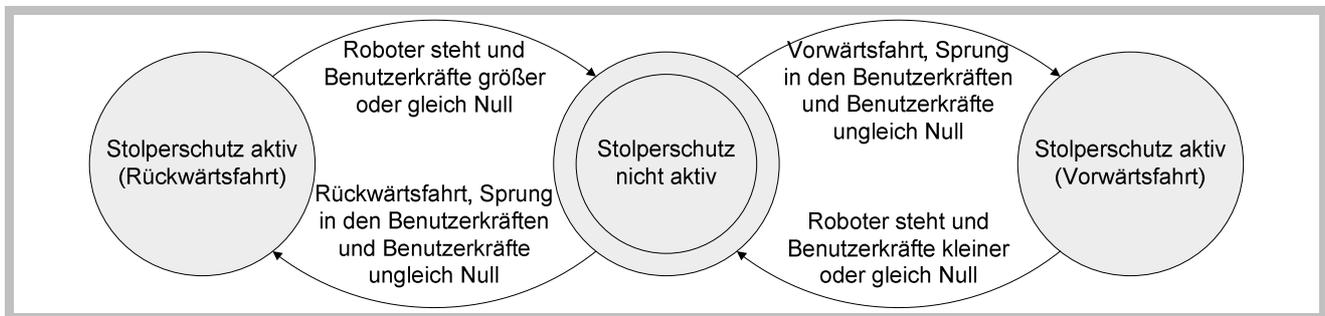


Bild 5-10: Zustände des automatischen Stolperschutzes.

Im zweiten Schritt werden mit Hilfe des mechanischen Ersatzmodells die gefilterten Benutzerkräfte in angemessene **Sollgeschwindigkeiten** umgesetzt. Das Fahrverhalten konventioneller Gehhilfen unterliegt den in Kapitel 3.3.2 dargestellten physikalischen Gesetzen. Auch wenn die grundlegenden Gesetze dem einzelnen Rollatorfahrer nicht bekannt sein mögen, ist er mit der Dynamik konventioneller Gehhilfen vertraut. Ein dem Fahrverhalten konventioneller Gehhilfen entsprechendes Massemodell soll deshalb als Ausgangsbasis für die Errechnung der Zielgeschwindigkeiten der roboterbasierten Gehhilfen verwendet werden. Die durch die eingebrachten Benutzerkräfte erzeugte Fahrgeschwindigkeit v_{user} errechnet sich somit wie folgt aus der aktuellen Fahrgeschwindigkeit v_0 , der eingebrachten Benutzerbeschleunigung a_{user} sowie dem Massekoeffizienten k_m :

$$v_{user}(t) = v_0 + \frac{1}{k_m} \int a_{user}(t) dt \quad (5-1)$$

Dieser Geschwindigkeit steht der Rollwiderstand bzw. der dadurch verursachte Bremsstoß a_{roll} entgegen. Dieser wirkt stets der Fahrtrichtung entgegen oder verzögert das Anfahren der Gehhilfe bei Stillstand. Bild 5-11 zeigt die Wirkung des Rollwiderstands abhängig von v_0 und a_{user} .

	$v_0 > 0$	$v_0 = 0$	$v_0 < 0$
$a_{user} > 0$	Beschleunigen (vorwärts)	Beschleunigen (vorwärts) falls $a_{user} > a_{roll}$	Abbremsen
$a_{user} = 0$	Abbremsen durch Rollwiderstand	Stopp	Abbremsen durch Rollwiderstand
$a_{user} < 0$	Abbremsen	Beschleunigen (rückwärts) falls $a_{user} > a_{roll}$	Beschleunigen (rückwärts)

Bild 5-11: Fahrverhalten unter Berücksichtigung des Rollwiderstands.

Aufgrund der unterschiedlichen Fahreigenschaften der roboterbasierten im Vergleich zur konventionellen Gehhilfe sowie der zusätzlichen Sicherheitsanforderungen ist eine Modifikation und Anpassung der Parameter, insbesondere von k_m (geringer Kraftaufwand, A 32) und des simulierten Rollwiderstandsbeiwerts c_r (schnelles Abbremsen, A 3) notwendig. Dafür werden – ausgehend von den Werten konventioneller Gehhilfen – das Fahrverhalten der roboterbasierten Gehhilfe mit unterschiedlichen Einstellungen getestet und optimale Parameter identifiziert.

5.3 Konzeption des Bewegungsplanungssystems

Das Bewegungsplanungssystem errechnet unter Berücksichtigung der statischen und dynamischen Umgebungsstruktur einen optimalen Pfad zum vorgegebenen Ziel. Dabei ist die Bewegung der roboterbasierten Gehhilfe aufgrund limitierter Bewegungsfähigkeiten des Gehhilfenutzers eingeschränkt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Fahrverhalten der Gehhilfe dynamisch an Benutzereingaben anzupassen, indem direkte Bahnänderungen entsprechend der durch den Benutzer vorgegebenen Bewegungsrichtung durchge-

führt werden, Bewegungsverhalten wie »Wandnahes Fahren« oder »Anfahren eines Zwischenziels« aktiviert werden oder eine globale Neuplanung der Bahn in der durch den Benutzer vorgegebenen Bewegungsrichtung durchgeführt wird. Nachfolgend wird die benutzerangepasste Bewegungsplanung der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus weiter ausgeführt.

5.3.1 Bewegungseinschränkungen der roboterbasierten Gehhilfe aufgrund der limitierten Bewegungsfähigkeiten des Gehhilfenutzers

Das Fahrverhalten der roboterbasierten Gehhilfe wird durch das Ausmaß der Bewegungsfähigkeit des Gehhilfenutzers eingeschränkt (A 21). Nachfolgend werden die Zusammenhänge zwischen den Fähigkeiten eines Gehhilfenutzers, insbesondere dessen

- Maximalgeschwindigkeit vorwärts,
- Maximalgeschwindigkeit rückwärts,
- Maximalgeschwindigkeit seitwärts,
- maximale Drehgeschwindigkeit und
- maximaler Drehwinkel (Verdrehung zur Fahrtrichtung der Gehhilfe)

und den daraus resultierenden Bewegungseinschränkungen der roboterbasierten Gehhilfe dargestellt.

Für roboterbasierte Gehhilfen, deren **Drehzentrum** mit der Position des Benutzers übereinstimmt, sind die Geschwindigkeiten und der Drehradius des Benutzers und des Roboters identisch. Für roboterbasierte Gehhilfen, deren Drehzentrum sich von der Position des Benutzers unterscheidet und die nicht in der Lage sind, seitwärts zu fahren, ist nur die Drehgeschwindigkeit ω des Benutzers mit der des Roboters übereinstimmend. Die aus den Linear- und Rotationsgeschwindigkeiten $v_{x,veh}$, ω_{veh} des Roboters resultierenden Vorwärts- und Lateralgeschwindigkeiten $v_{x,user}$, $v_{y,user}$ des Benutzers müssen abhängig von dessen Distanz $d_{x,user}$ zum Drehzentrum des Roboters errechnet und bei der Geschwindigkeitsplanung des Roboters berücksichtigt werden. Entsprechend Bild 5-12 können bei

Kurvenfahrten oder Drehungen unterschiedliche Verhaltensweisen des Benutzers beobachtet werden:

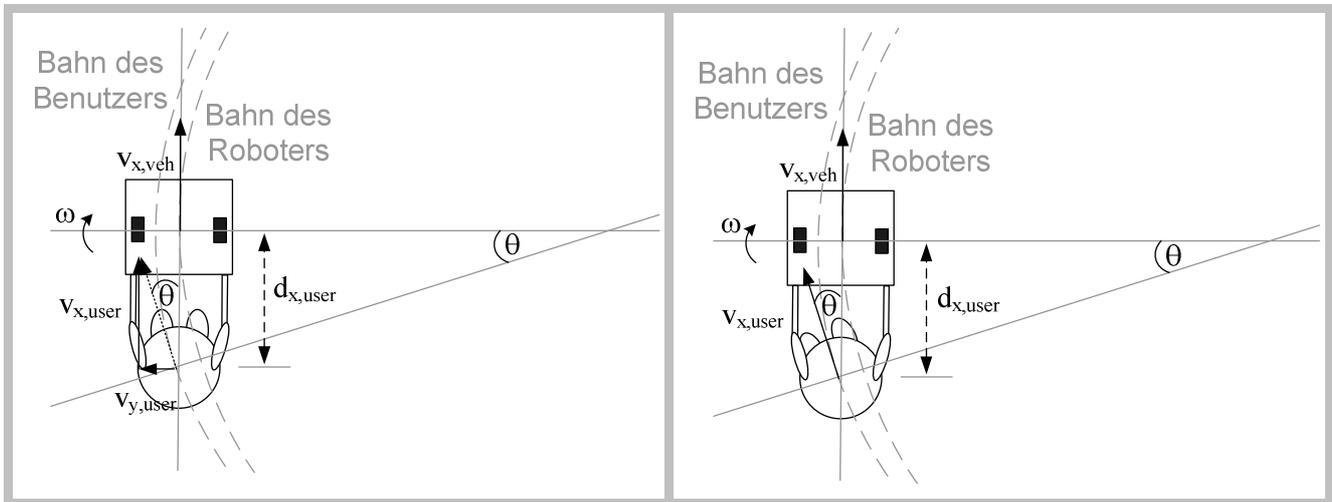


Bild 5-12: Mögliche Verhaltensweisen in Kurven: Benutzer läuft seitlich (links) oder Benutzer dreht sich (rechts).

1. Der Benutzer ist zum Roboter gedreht (Bild 5-12, links). Damit ist die Vorwärtsgeschwindigkeit des Benutzers identisch mit der des Roboters, jedoch muss der Benutzer abhängig von der Drehgeschwindigkeit ω und dem Abstand $d_{x,user}$ des Benutzers zum Drehzentrum des Roboters eine Lateralbewegung mit Geschwindigkeit $v_{y,user}$ durchführen:

$$v_{y,user} = d_{x,user} \cdot \omega \quad (5-2)$$

2. Der Benutzer dreht sich in Laufrichtung (Bild 5-12, rechts). Damit werden Lateralbewegungen vermieden, die erforderliche Vorwärtsgeschwindigkeit $v_{x,user}$ des Benutzers erhöht sich jedoch gegenüber der Vorwärtsgeschwindigkeit $v_{x,veh}$ des Roboters abhängig von der Drehgeschwindigkeit ω und dem Abstand $d_{x,user}$ des Benutzers zum Drehzentrum des Roboters:

$$v_{x,user} = v_{x,veh} + d_{x,user} \cdot \omega \quad (5-3)$$

Zusätzlich treten auch Mischformen dieser beiden Verhaltensweisen auf, in welchen sich der Benutzer nur teilweise in Laufrichtung dreht.

Die **Fahrgeschwindigkeit** des Roboters sollte deshalb so eingeschränkt werden, dass die benutzerspezifischen Maximalgeschwindigkeiten unabhängig von der tatsächlichen Bewegungsausführung nicht überschritten werden. Die maximalen Vorwärts- und Drehgeschwindigkeiten $v_{x,veh,max}$ und $\omega_{veh,max}$ des Roboters errechnen sich aus den maximalen Vorwärts-, Lateral- und Rotationsgeschwindigkeiten $v_{x,user,max}$, $v_{y,user,max}$ und $\omega_{user,max}$ des Benutzers wie folgt:

$$\omega_{veh,max} = \min \left(\omega_{user,max}, \frac{v_{y,user,max}}{d_{x,user}} \right) \quad (5-4)$$

$$v_{x,veh,max} = v_{x,user,max} - d_{x,user} \cdot \omega \quad (5-5)$$

5.3.2 Lösungsvarianten für das Fahrverhalten der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus

Die Fähigkeiten des Benutzers beeinflussen neben den Robotergeschwindigkeiten auch das grundlegende Fahrverhalten des Roboters. Vorzugsweise sollte eine Zielfahrt in die Teilbewegungen **Drehen – Fahren – Drehen** aufgeteilt werden, was die Länge der Fahrstrecke und die damit verbundene Fahrzeit auf ein Minimum reduziert. Für roboterbasierte Gehhilfen, deren Drehzentrum nicht mit der Position des Benutzers übereinstimmt und die nicht seitwärts fahren können, erfordert das Drehen auf der Stelle jedoch ein Verdrehen des Benutzers zur Fahrtrichtung der Gehhilfe um 90 Grad zum Roboter oder eine entsprechende Lateralbewegung. Drehungen auf der Stelle sollten für roboterbasierte Gehhilfen dieser Art vermieden werden, falls der Benutzer Schwierigkeiten beim Seitwärtsgehen hat und sein maximaler Drehwinkel $\theta_{user,max}$ unter 90 Grad liegt. Durch die Geometrie konventioneller Gehhilfen, bei welcher der Benutzer üblicherweise direkt zwischen ungelenkten Hinterrädern steht, werden Lateralbewegungen unmöglich gemacht. Somit stellt das Seit-

wärtsgehen für die Nutzer konventioneller Gehhilfen eine ungewohnte Bewegungsform dar, die oftmals Schwierigkeiten bereitet. Für betroffene Benutzer sollte am Anfang und am Ende der Bahn anstelle der Drehung eine Kurve gefahren werden, die mit der entsprechenden Orientierung des Roboters startet und endet.

Um ein Einhalten des maximalen Drehwinkels des Benutzers sicherzustellen, muss der Drehradius des Roboters folgende Bedingung erfüllen:

$$r_{veh} < \frac{d_{x,user}}{\sin(\theta_{user,max})} \quad (5-6)$$

Um sicherzustellen, dass bei Kurvenfahrten die Drehgeschwindigkeit ω das vorgeschriebene Maximum nicht überschreitet, gibt es folgende zwei Lösungsmöglichkeiten:

Variante 1: Berücksichtigung des minimalen Drehradius $r_{veh,min}$ bei der Bahnplanung:

$$r_{veh,min} = \frac{v_{x,veh,max}}{\omega_{veh,max}} \quad (5-7)$$

Dadurch kann die Fahrt stets mit maximaler Vorwärtsgeschwindigkeit erfolgen, während die Drehgeschwindigkeit entsprechend dem durch den Pfad vorgegebenen Kurvenradius variiert, dabei jedoch nie das Maximum überschreitet. Für Benutzer, die sich nur eingeschränkt zum Roboter »verdrehen« können, wird für die Errechnung des minimalen Drehradius zusätzlich der maximale Drehwinkel des Benutzers $\theta_{user,max}$ berücksichtigt:

$$r_{veh,min} = \min \left(\frac{v_{x,veh,max}}{\omega_{veh,max}}, \frac{d_{x,user}}{\sin(\theta_{user,max})} \right) \quad (5-8)$$

Durch die Limitierung des Drehradius kann es vorkommen, dass der Roboter in bestimmten Konfigurationen keinen Weg zum Ziel findet. Dies kann dadurch verursacht werden, dass im benutzergesteuerten Modus zu nahe an ein Hindernis herangefahren wurde. In

diesem Fall kann der Roboter so lange nur im benutzergesteuerten Modus betrieben werden, bis er in Rückwärtsfahrt ausreichend weit vom Hindernis entfernt wurde.

Variante 2: Reduktion der Fahrgeschwindigkeit, falls der Kurvenradius r_{veh} des Roboters unter das oben errechnete Minimum $r_{veh,min}$ fällt:

$$v_{x,veh} = \omega_{veh,max} \cdot r_{veh} \quad \text{für } r_{veh} < r_{veh,min} \quad (5-9)$$

$$v_{x,veh} = v_{x,veh,max} \quad \text{für } r_{veh} \geq r_{veh,min} \quad (5-10)$$

In dieser Lösungsvariante ist der Drehradius bei der Planung nicht limitiert. Der Sonderfall von $r = 0$ (Drehen auf der Stelle) muss separat behandelt werden. Diese Lösungsvariante bietet neben der genannten Einschränkung in der Nähe von Hindernissen gegenüber Variante 1 den Vorteil, dass die Geschwindigkeitsanpassung unabhängig von der Planung einer Bewegungsbahn ist und damit sowohl im Zielführungs- als auch im benutzergesteuerten Modus eingesetzt werden kann.

Der morphologische Kasten Bild 5-13 fasst die genannten Teillösungen für die Gesamtstruktur der Fahrbewegung sowie für die Anpassung von Kurvenfahrten an die Fähigkeiten des Benutzers zusammen.

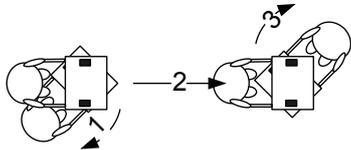
Teilfunktion	Teillösung 1	Teillösung 2
Gesamtstruktur der Bewegung	Drehen-Fahren-Drehen 	Vermeiden von Drehungen (Kurve am Anfang und Ende) 
Anpassung von Kurvenfahrten	Berücksichtigung des minimalen Drehradius $r_{veh,min}$ bei der Bahnplanung	Reduktion der Fahrgeschwindigkeit, falls $r_{veh} < r_{veh,min}$

Bild 5-13: Morphologischer Kasten mit Teillösungen für das Fahrverhalten.

Die Auswahl der geeigneten Lösungsvariante als Kombination der Teillösungen abhängig von den Fähigkeiten des Benutzers ist in Bild 5-14 aufgelistet.

		Lateralbewegungen des Benutzers	
		möglich	nicht möglich
Maximaler Drehwinkel $\theta_{user,max}$ des Benutzers	= 90 Grad	1-2	
	< 90 Grad	1-2	2-1

Bild 5-14: Auswahl einer geeigneter Lösungsvariante zur Anpassung des Fahrverhaltens an den Benutzer.

5.3.3 Konzeption der stockwerksübergreifenden Planung

Der Lösungsansatz für das Planungssystem soll für die Navigation in **unterschiedlichen Stockwerken** geeignet sein (A 11). Für die interne Repräsentation der für die Lokalisierung und Bahnplanung in den verschiedenen Stockwerken benötigten Umgebungsinformationen gibt es folgende Möglichkeiten:

Variante 1: Alle Informationen werden in einer dreidimensionalen Karte abgespeichert. Nach Eingabe des Ziels wird der Weg einmal in dieser Karte geplant.

Variante 2: Die Karten für die einzelnen Stockwerke werden separat abgespeichert. Zusätzlich werden Positionen benannt, die einen Übergang von einem Stockwerk in ein anderes ermöglichen. Die Planung findet in zwei Schritten statt: Zuerst wird durch einen übergeordneten Planer errechnet, in welcher Reihenfolge die einzelnen Teilkarten durchfahren und welche Übergänge zwischen den Karten genutzt werden. Dann wird sequentiell der optimale Weg für das aktuelle Teilstück errechnet und abgefahren. Beim Übergang in ein neues Stockwerk wird die zugehörige Karte geladen.

Der Übergang von einem Stockwerk in das nächste erfolgt entweder über Rampen oder mit Hilfe eines Aufzugs. Bei Benutzung des Aufzugs ist eine spezielle Behandlung der

Stockwerksübergänge notwendig. Entweder kommuniziert der Roboter dafür direkt mit der Aufzugsteuerung, so dass der Benutzer automatisch in das neue Stockwerk geführt wird oder der Benutzer wird über das Interaktionssystem zum Rufen des Aufzugs aufgefordert.

Lösungsvariante 2 bietet hier den Vorteil, dass Übergänge in ein neues Stockwerk vom Steuerungssystem explizit erkannt und behandelt werden und somit zusätzliche Aktionen wie das Rufen des Aufzugs oder spezielle Ausgaben an den Benutzer einfach in die Steuerung integriert werden können. Zusätzlich erhöht sich die Geschwindigkeit der Bahnplanung aufgrund der reduzierten Kartengröße. Im Folgenden werden deshalb separate Umgebungskarten für die einzelnen Stockwerke verwendet.

Für die **Planung innerhalb einer Stockwerkskarte** können existierende Planungsmethoden nach dem Stand der Technik eingesetzt werden. Die für die Planung verwendeten Umgebungskarten beinhalten alle statischen Hindernisse, insbesondere Wände, die für die Planung in den einzelnen Stockwerken relevant sind. Diese können, ebenso wie die meisten dynamischen Hindernisse, durch die Umgebungssensorik des Roboters erkannt werden. Neben den sichtbaren Hindernissen gibt es jedoch für die Sensorik des Roboters nicht-sichtbare Hindernisse wie Teppiche, die nicht betreten werden dürfen, oder Grasflächen im Außenbereich. Diese Bereiche werden in die Umgebungskarte als Sperrflächen oder virtuelle Hindernisse eingetragen, um sicherzustellen, dass sie sowohl während der globalen Planung als auch während der lokalen Bahnmodifikation berücksichtigt werden (A 22).

Für die Bahnplanung ist neben der Auswahl der geeigneten Umgebungsrepräsentation und der notwendigen Bewegungseinschränkungen zur Anpassung des Fahrverhaltens an die Fähigkeiten des Benutzers ein passendes Vorgehen zur **Modellierung der Roboter-geometrie** zu erarbeiten. Bild 5-15 zeigt das Vorgehen für die Ermittlung des passenden Konfigurationsraums für die Bahnplanung sowie die beispielhafte Anwendung des Algorithmus auf unterschiedliche roboterbasierte Gehhilfen.

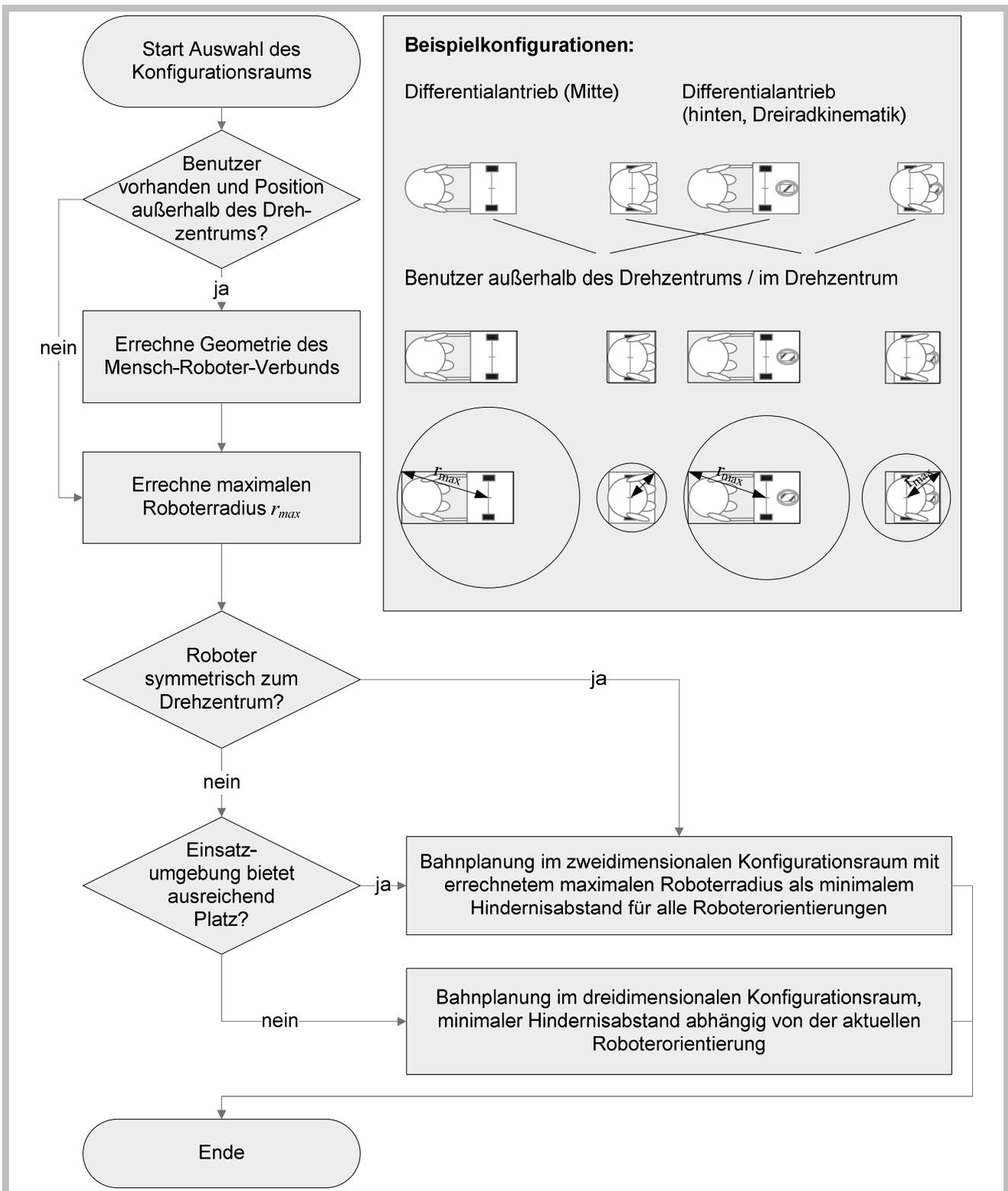


Bild 5-15: Auswahl eines passenden Konfigurationsraums für die Bahnplanung.

5.3.4 Konzeption der erweiterten Methode elastischer Bänder für die umgebungs- und benutzerangepasste Bahnmodifikation

Die Methode elastischer Bänder basiert auf dem Überdecken eines vorgegebenen Pfads mit so genannten »Bubbles«. Ein Bubble q beschreibt dabei die von dieser Position erreichbaren Konfigurationen p des Roboters entlang des Pfads. Die Größe eines Bubbles (Radius r) entspricht somit dessen Abstand zum nächsten Hindernis. Während für die Planung ohne kinematische Restriktionen kreisförmige Bubbles verwendet werden können, wird für die Planung mit kinematischen Restriktionen das Modell eines »Dubin's Car« (Roboter mit limitiertem Drehwinkel, der nur vorwärts fahren darf) eingesetzt. Für die Errechnung der Bubbles des Dubin's Car ist somit der vorgegebene minimale Drehradius $r_{veh,min}$ zu berücksichtigen (Bild 5-16).

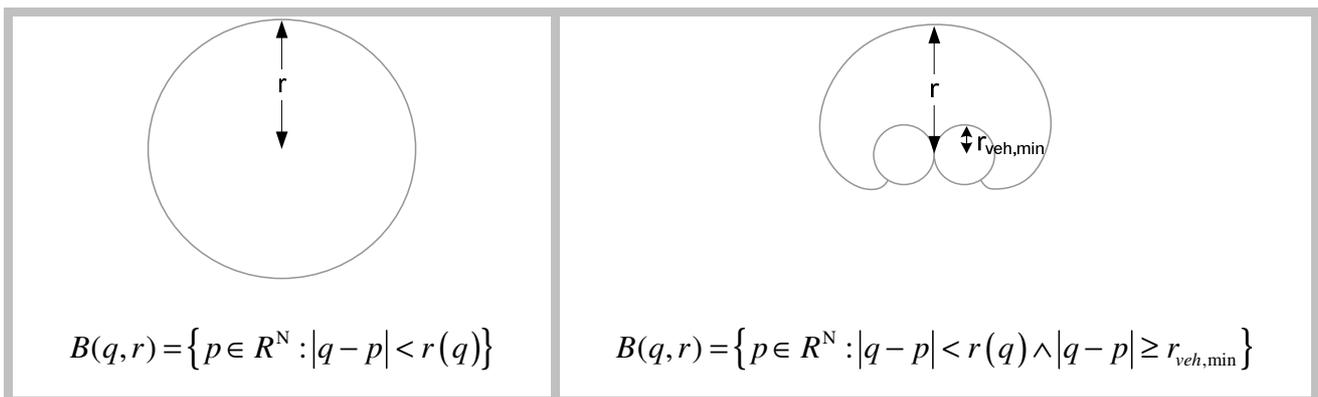


Bild 5-16: Bubbles für einen Roboter ohne kinematische Restriktionen (links) und für ein Dubin's Car mit minimalem Drehradius $r_{veh,min}$ (rechts).

Für das anfängliche Erstellen des elastischen Bands werden die Bubbles so über den vorgegebenen Pfad gelegt, dass sie sich überschneiden. Dadurch ist eine komplette Überlagerung des Pfads mit Bubbles möglich. Der neue, mit Hilfe des elastischen Bandes optimierte Pfad führt durch die Mittelpunkte der einzelnen Bubbles. Bild 5-17 zeigt ein Beispiel für das Bedecken eines Pfads mit Bubbles im zweidimensionalen Raum für eine roboterbasierte Gehhilfe mit Benutzer, deren Drehwinkel keinen Restriktionen unterliegt.

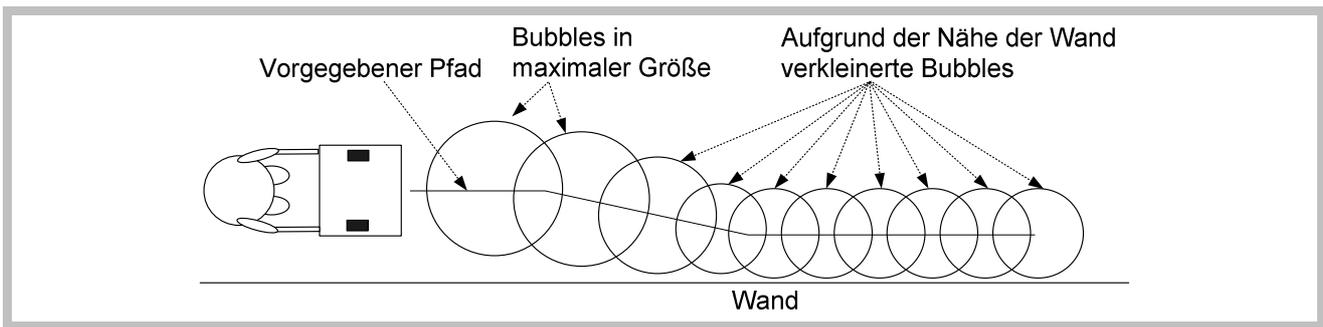


Bild 5-17: Bedecken eines globalen Bewegungspfads mit Bubbles.

Die **Elastizität** des mit Bubbles überlagerten Bands wird in Form verschiedener Kräfte modelliert, die auf jedes einzelne Bubble des Bands wirken. Interne Kräfte F_i glätten das Band und ziehen es zusammen, externe Kräfte F_e stoßen das Band von Hindernissen ab. Bei Aktivierung der direkten Bahnmodifikation wirken zusätzlich die direkten Benutzerkräfte F_d auf das Band. Die Aktivierung der Bewegungsverhalten »Wandnahes Fahren« oder »Anfahren eines Zwischenziels« erzeugt die verhaltensbasierten Kräfte F_b . Die Modifikation des Bandes anhand der einwirkenden Kräfte wird zyklisch durchgeführt. Dafür werden alle Bubbles innerhalb einer bestimmten Entfernung zum Roboter modifiziert.

Die auf jedes Bubble wirkenden **internen Kräfte** F_i errechnen sich wie nachfolgend dargestellt aus den Richtungsvektoren vom aktuellen Bubble q_i zum letzten Bubble q_{i-1} und vom aktuellen Bubble q_i zum nächsten Bubble q_{i+1} (Bild 5-18). Um ein Verschieben der Bubbles nur aufgrund ihrer Größe zu vermeiden, werden diese Kräfte entsprechend der Radien r der betroffenen Bubbles skaliert:

$$F_i = \frac{q_{i-1} - q_i}{r_{i-1} + r_i} + \frac{q_{i+1} - q_i}{r_{i+1} + r_i} \quad (5-11)$$

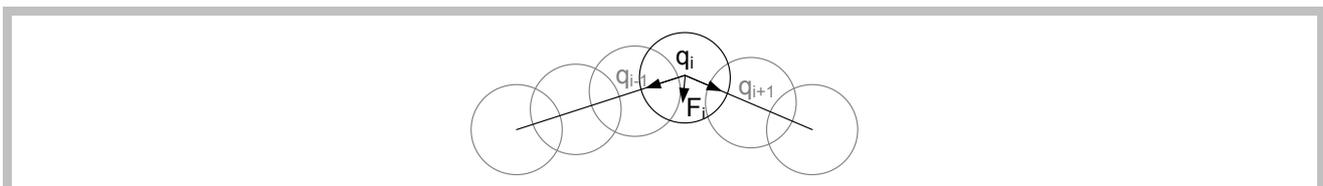


Bild 5-18: Auf ein Bubble q_i wirkende, interne Kraft F_i

Externe Kräfte F_e werden von Hindernissen erzeugt, die sich in der Nähe eines Bubbles befinden. Dafür wird für ein Bubble q für jedes Hindernis der nächste Punkt clp und der entsprechende Hindernisabstand d berechnet. Ist der Abstand des Bubbles zum Hindernis geringer als dessen Einflussdistanz o , wirkt auf dieses Bubble eine Kraft in entgegengesetzter Richtung des nächsten Hindernispunkts und in Höhe des abstoßendes Potentials $\phi(q)$ (Bild 5-19):

$$F_e = \sum_{clp:|q-clp|<o} \phi(q) \cdot (q-clp) \quad (5-12)$$

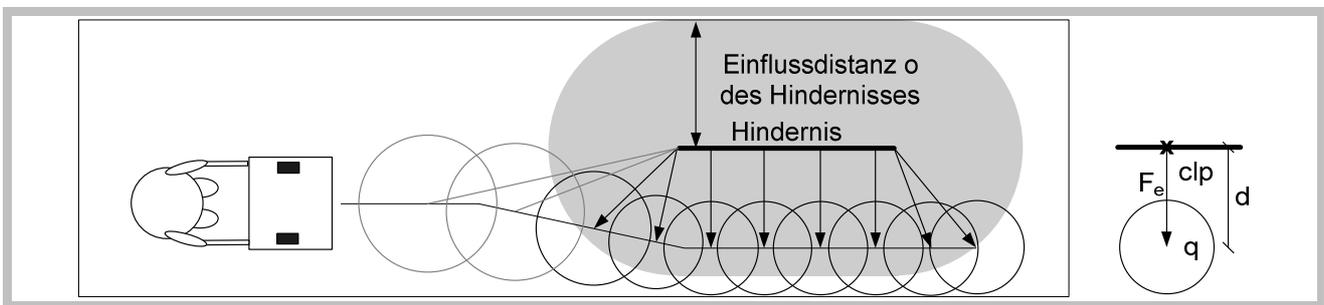


Bild 5-19: Auf mehrere Bubbles wirkende, abstoßende Kräfte F_e eines Hindernisses.

Um Kollisionen des Roboters mit Hindernissen in der Umgebung zu vermeiden, muss das abstoßende Potential sehr nahe bei einem Hindernis gegen Unendlich und in Höhe des maximalen Wirkungsbereichs des Hindernisses gegen Null gehen. Das Potential wird wie folgt errechnet:

$$\phi(q) = \tan\left(\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{d}{o}\right)\right) \quad \text{für } d < o \quad (5-13)$$

$$\phi(q) = 0 \quad \text{für } d \geq o \quad (5-14)$$

Für die **Berücksichtigung der Benutzereingaben** werden im Rahmen dieser Arbeit neue Kräfte eingeführt, die auf den Bewegungspfad einwirken. Um Konflikte zu vermeiden, kann neben der Hindernisumfahrung nur eine der nachfolgend genannten, zusätzlichen Bahnmodifikationen aktiv sein.

Bei Aktivierung der **direkten Bahnmodifikation durch den Benutzer** wirkt auf jedes Bubble q eine Kraft in Richtung der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung dir (Bild 5-20):

$$F_d = dir \quad (5-15)$$

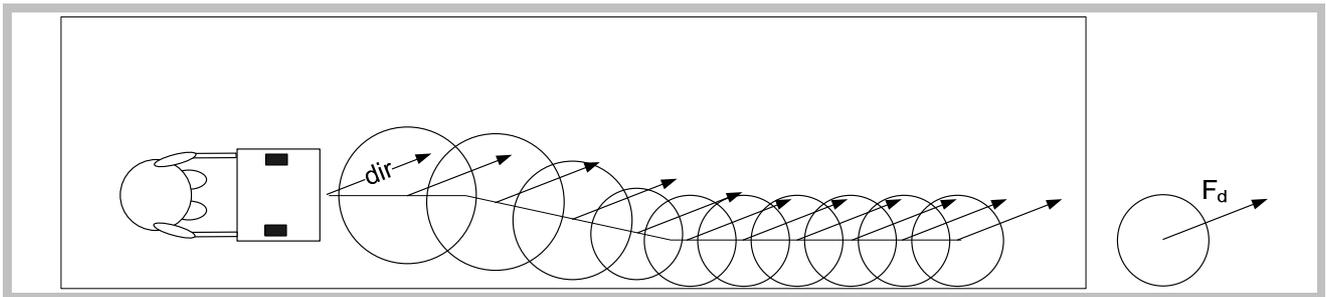


Bild 5-20: Auf alle Bubbles wirkende direkte Benutzerkräfte F_d .

Bei Aktivierung des Bewegungsverhaltens »Anfahren eines Zwischenziels« wird eine Zielposition Z übergeben, an welcher der Pfad möglichst nahe vorbeiführen soll. Dafür wird für jedes Bubble q die Winkeldifferenz zwischen dessen Orientierung α_q , die in Richtung des nächsten Bubbles zeigt, und der Richtung zum vorgegebenen Zwischenziel α_z berechnet. Auf alle Bubbles, die neben dem Zwischenziel liegen, wirkt eine Kraft in Richtung des Zwischenziels (Bild 5-21):

$$F_b = Z - q \quad \text{für} \quad \left| \alpha_z - \alpha_q \right| - \frac{\pi}{2} > \frac{\pi}{8} \quad (5-16)$$

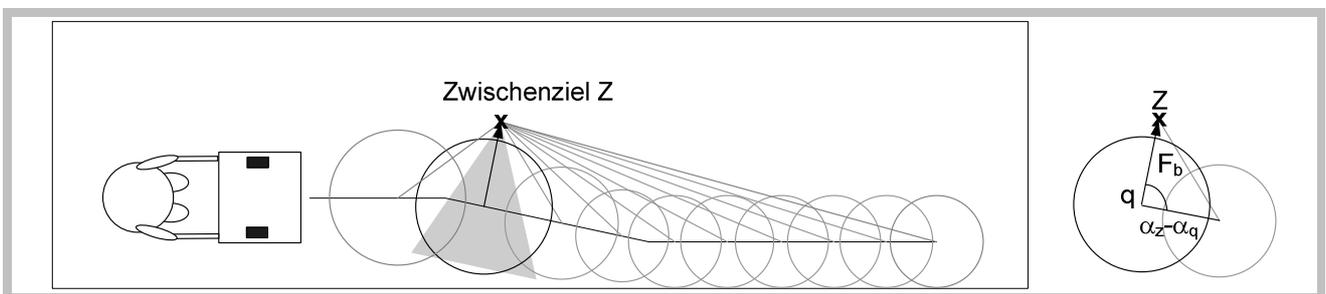


Bild 5-21: Auf ein oder mehrere Bubbles wirkende Kräfte F_b bei aktiviertem Bewegungsverhalten »Anfahren eines Zwischenziels«.

Bei Aktivierung des Bewegungsverhaltens »Wandnahes Fahren« wird ein Wandsegment w übergeben, woran der Pfad möglichst nahe vorbeiführen soll. Dafür wird für ein Bubble q der nächste Punkt clp auf dem Wandsegment sowie die Winkeldifferenz zwischen der Ausrichtung des entsprechenden Verbindungssegment α_{clp} mit der Ausrichtung des übergebenen Wandsegments α_w berechnet. Auf alle Bubbles, die auf einem Pfad entlang des gegebenen Wandsegments liegen, wirkt eine Kraft in Richtung des errechneten nächsten Punkts des Wandsegments (Bild 5-22):

$$F_b = clp - q \quad \text{für } |\alpha_{clp} - \alpha_w| = \frac{\pi}{2} \quad (5-17)$$

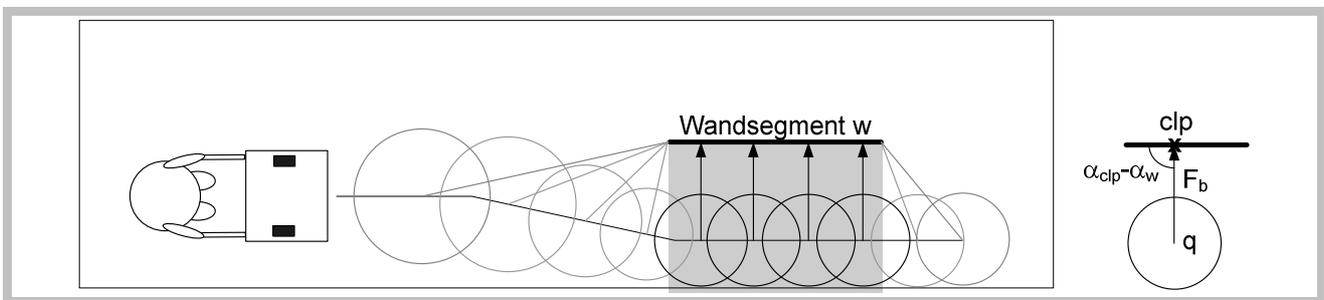


Bild 5-22: Auf mehrere Bubbles wirkende Kräfte F_b bei aktiviertem Bewegungsverhalten »Wandnahes Fahren«.

Für ein stabiles Fahrverhalten ist eine geeignete **Gewichtung** der unterschiedlichen Kräfte nötig (Gewichtungsfaktoren k). Die Errechnung der resultierenden, auf ein Bubble wirkenden, Kraft sowie der neuen Position eines jeden Bubbles geschieht somit wie folgt:

$$F_{res} = k_i \cdot F_i + k_e \cdot F_e + k_d \cdot F_d + k_b \cdot F_b \quad (5-18)$$

$$Pos_{new} = Pos_{old} + \delta \cdot F_{res} \quad (5-19)$$

5.4 Erfüllung der Anforderungen

In Bild 5-23, Bild 5-24 und Bild 5-25 wird für das erarbeitete Konzept des Steuerungssystems überprüft, ob es die in Kapitel 3.4 aufgestellten Anforderungen erfüllt.

Anforderung	Teilsystem	Erfüllung	Begründung
A 1	I	✓	Errechnung der gewünschten Fahrgeschwindigkeiten anhand der eingebrachten Benutzerkräfte.
A 2	N	✓	Dynamisches Setzen der aktuellen Maximalgeschwindigkeiten.
A 3	I	✓	Direkte Auswertung der über die Sensorgriffe eingelesenen Benutzerkräfte.
A 4	N	✓	Gleichmäßige Bewegungsführung durch den Positionsregler.
A 5	I	✓	Messung der an den Griffen eingebrachten Benutzerkräfte.
A 6	I	✓	Anbringung der Kraftsensoren nahe den Gehhilfegriffen.
A 7	I	✓	Bedienung ähnlich zu konventionellen Gehhilfen.
A 8	I	✓	Ansteuerung über Kraftsensoren und Touchscreen.
A 9	I	✓	Ausgabe auf dem Bildschirm.
A 10	S	✓	Lokalisierung mittels GPS (Außenbereich) oder anhand von Umgebungsmerkmalen (Innenbereich).
A 11	N	✓	Verwendung unterschiedlicher Umgebungskarten für die einzelnen Stockwerke, Anfahren von Übergangspositionen.
A 12	S	✓	Erfüllung der Vorschriften für fahrerlose Transportfahrzeuge.
A 13	I	✓	Startknopf auf dem Bildschirm.

Teilsysteme: G: Gesamtsystem, I: Interaktionssystem, S: Sensorsystem, N: Navigationssystem

Bild 5-23: Überprüfung der Anforderungen an das Steuerungssystem (Teil 1).

Anforderung	Teilsystem	Erfüllung	Begründung
A 14	I	✓	Knöpfe zur Zielauswahl auf dem Bildschirm.
A 15	G	✓	Aktivierung des Bewegungsverhaltens »Anfahren eines Zwischenziels«.
A 16	G	✓	Aktivierung des Bewegungsverhaltens »Wandnahes Fahren«.
A 17	N	✓	Geschwindigkeitsreduktion in der Nähe von Hindernissen.
A 18	G	✓	Aktivierung der direkten Bahnmodifikation durch den Benutzer.
A 19	G	✓	Betrieb der Gehhilfesteuerung im »benutzergesteuerten Modus«.
A 20	G	✓	Verwendung eines aktiven Gehhilfesystems.
A 21	N	✓	Reduktion der Fahrgeschwindigkeiten entsprechend der Benutzerfähigkeiten.
A 22	N	✓	Berücksichtigung der Sperrbereiche für die globale und lokale Bahnplanung.
A 23	G	✓	Betrieb der Gehhilfesteuerung im »Zielführungsmodus«.
A 24	S	✓	Verwendung entsprechender Umgebungssensoren, z. B. eines Laserscanners, zur Hindernisdetektion.
A 25	N	✓	Bahnmodifikation mittels der Methode elastischer Bänder.
A 26	G	✓	Umschaltung des Betriebsmodus durch übergeordnetes Steuerprogramm.
A 27	I	✓	Benutzerspezifische Parametrierung der Sensordatenverarbeitung.
A 28	N	✓	Automatische Anpassung des elastischen Bands an die Umgebung.
A 29	S	✓	Verwendung entsprechender Umgebungssensoren, z. B. eines Laserscanners, zur Erfassung von Umgebungsmerkmalen.
Teilsysteme: G: Gesamtsystem, I: Interaktionssystem, S: Sensorsystem, N: Navigationssystem			

Bild 5-24: Überprüfung der Anforderungen an das Steuerungssystem (Teil 2).

Anforderung	Teilsystem	Erfüllung	Begründung
A 30	G	✓	Aktivierung der Neuplanung in der vorgegebenen Fahrtrichtung.
A 31	I	✓	Sensordatenverarbeitung beinhaltet automatischen Stolperschutz.
A 32	I	✓	Verwendung eines mechanischen Ersatzmodells, das das Verhalten konventioneller Gehhilfen simuliert.
A 33	G	✓	Bahnmodifikation mittels der Methode elastischer Bänder stellt sicher, dass der global geplante, optimale Pfad nur geringfügig modifiziert wird.
A 34	I	✓	Waagerechte Anbringung der Sensoren zur Messung der eingebrachten Benutzerkräfte.
A 35	I	✓	Errechnung des Drehmoments anhand der an den Griffen eingebrachten Kräfte.
Teilsysteme: G: Gesamtsystem, I: Interaktionssystem, S: Sensorsystem, N: Navigationssystem			

Bild 5-25: Überprüfung der Anforderungen an das Steuerungssystem (Teil 3).

6 Realisierung des Steuerungssystems auf dem mobilen Roboterassistenten Care-O-bot® II

6.1 Care-O-bot® II Hardware

Care-O-bot® II (Bild 6-1) ist der Prototyp eines mobilen Roboterassistenten, der ältere oder behinderte Menschen im täglichen Leben unterstützen soll [Graf2004a].

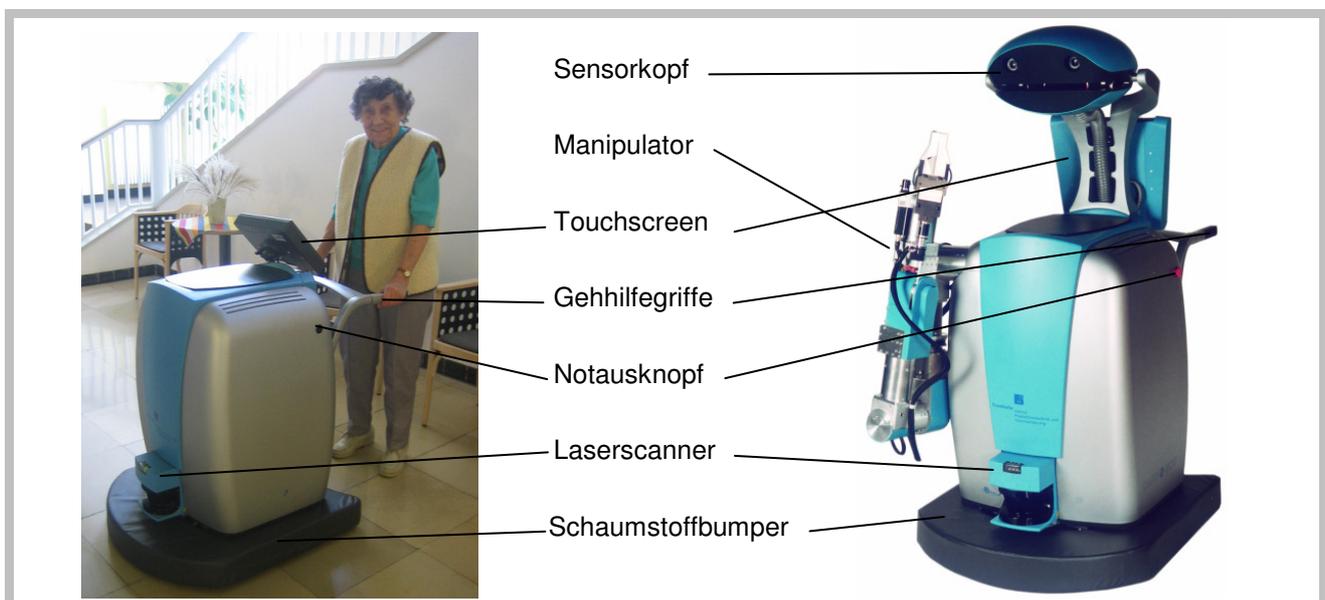


Bild 6-1: Care-O-bot® II (links: mobile Plattform ohne Sensorkopf und Manipulator, rechts: komplett zusammengebauter Care-O-bot® II).

Die Care-O-bot® II Hardware-Plattform besteht aus zwei separaten **Teilsystemen**, die mechanisch und elektrisch voneinander getrennt und somit unabhängig voneinander betrieben werden können. Beide Systeme arbeiten vollständig autonom mit eigenem PC, Stromversorgung und Notauskreis. Die mobile Plattform, die mit einem Differentialantrieb, Umgebungssensoren und Gehhilfestützen versehen ist, enthält alle Komponenten, die für die autonome Navigation und die Funktion als roboterbasierte Gehhilfe benötigt werden (Bild 6-1, links). Mit Hilfe des integrierten PCs können im Rahmen von Trainings- oder Rehabilitationsprogrammen Bewegungsdaten gespeichert und für die nachfolgende Analyse

bereitgestellt werden [FhG2003b]. Die obere Ebene, ausgestattet mit einem Manipulator und Sensorkopf, wird für das automatische Erkennen und Greifen von Objekten eingesetzt. Für die Kommandierung und Überwachung des Roboters wird ein Tablett-PC eingesetzt, der über Funk mit den Kontrollrechnern der zwei Teilsysteme verbunden ist. Er kann an der Rückseite des Roboters befestigt werden. Care-O-bot[®] II als Komplettsystem (Bild 6-1, rechts) ist in der Lage, selbstständig Hol- und Bringdienste durchzuführen.

Die **obere Ebene** ist für die Funktion des Care-O-bot[®] II als roboterbasierte Gehhilfe nicht relevant und wird deshalb nicht im Detail beschrieben. Weitere Details über Care-O-bot[®] II als Gesamtsystem und die automatische Durchführung von Hol- und Bringdiensten können in [Hans2006] nachgelesen werden.

Die **mobile Plattform** von Care-O-bot[®] II ist in der Lage, Vorwärtsfahrten, Kurvenfahrten und Drehungen auf der Stelle durchzuführen. Die verwendeten Antriebe ermöglichen Geschwindigkeiten bis zu 0,56 m/s.

Als primärer **Umgebungssensor** dient Care-O-bot[®] II ein an der Vorderseite des Fahrzeugs in 20 Zentimetern Höhe angebrachter Laserscanner. Dieser misst in einem Umkreis von 180 Grad und in einer Auflösung von 0,5 Grad die Abstände zum nächsten Hindernis. Die Scannerdaten werden für die Lokalisierung des Roboters in seiner Umgebung sowie zur Bewegungsplanung, insbesondere der Hinderniserkennung und -umfahrung, eingesetzt. Als zusätzliche Sicherheitssysteme werden ein Schaumstoffbumper und Notausknöpfe verwendet. Dieses Sicherheitskonzept entspricht den Vorgaben an die Sicherheitssensorik freifahrender Flurförderzeuge [DIN1525]. Die mobile Plattform von Care-O-bot[®] II kann somit sicher und zuverlässig unter Menschen navigieren [Graf2004b, Graf2005a].

An der Rückseite des Care-O-bot[®] II sind zwei **Gehhilfestützen** angebracht, die bei Einsatz des Roboters als roboterbasierte Gehhilfe automatisch ausgefahren und entsprechend den Bedürfnissen des Benutzers in der Höhe angepasst werden können. Für das Messen der eingebrachten Benutzerkräfte können die Griffe der Gehstützen leicht vor-

wärts und rückwärts bewegt werden. Wegaufnehmer mit Federn an beiden Seiten werden eingesetzt, um die eingebrachten Kräfte zu messen (Bild 6-2). Die Federkonstante der eingesetzten Federn wurde mit $c = 48\,000\text{ N/m}$ ausreichend hoch gewählt, so dass nur minimale Bewegungen der Griffe verursacht werden [Detroids2002].

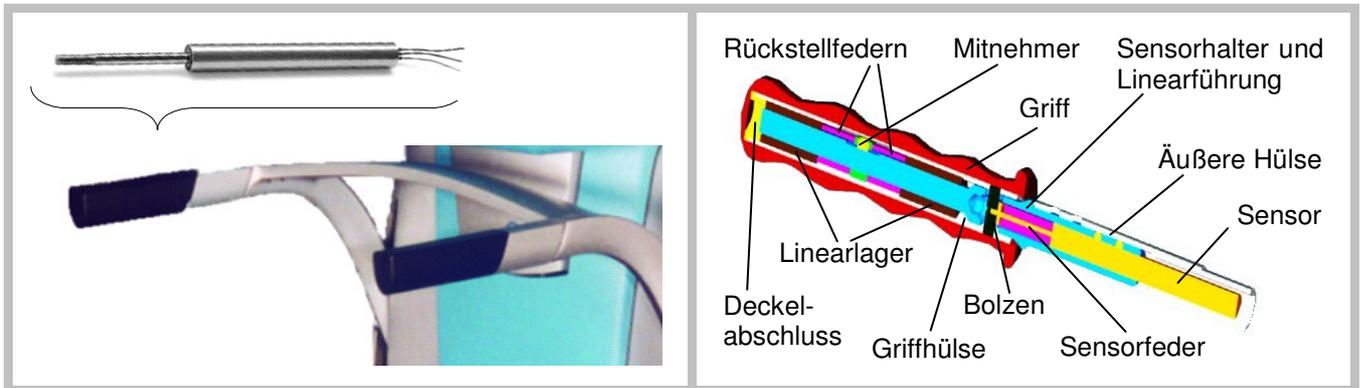


Bild 6-2: Sensorgriffe am Care-O-bot® II.

Neben der kontinuierlichen Interaktion des Benutzers mit Care-O-bot® II über die Sensorgriffe stehen weitere Ein- und Ausgabemedien für die Kommunikation zwischen Mensch und Roboter zur Verfügung. Eine **graphische Benutzerschnittstelle** kann auf dem an der Rückseite des Roboters angebrachten Tablett-PC oder beim Einsatz der mobilen Plattform ohne Aufbau auf einem direkt an den Steuerrechner angeschlossenen Touchscreen realisiert werden. Über Lautsprecher an der Vorder- und Rückseite des Roboters können Informationen zusätzlich per Sprache an den Benutzer ausgegeben werden.

6.2 Steuerungsarchitektur des Care-O-bot® II

Die mobile Plattform von Care-O-bot® II ist mit einer komponentenbasierten Steuerungssoftware ausgestattet, die eine Weiterentwicklung der in [Traub2002] beschriebenen, praxiserprobten Softwarearchitektur darstellt. Bild 6-3 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Kernkomponenten der Steuerung: Die Plattformsteuerung stellt Funktionen zur autonomen Navigation des Roboters bereit. Über die Plattformschnittstelle können andere Systemmodule auf das Navigationssystem zugreifen. Die graphische Oberfläche zur Plattformschnittstelle dient der Visualisierung und Ansteuerung des Navigationssystems. Anwen-

dungsspezifische Funktionen wie die Gehhilfesteuerung werden in separaten Modulen realisiert, die über die Plattformschnittstelle mit dem Navigationssystem kommunizieren. Sie haben üblicherweise eine eigene, anwendungsspezifische Benutzerschnittstelle.

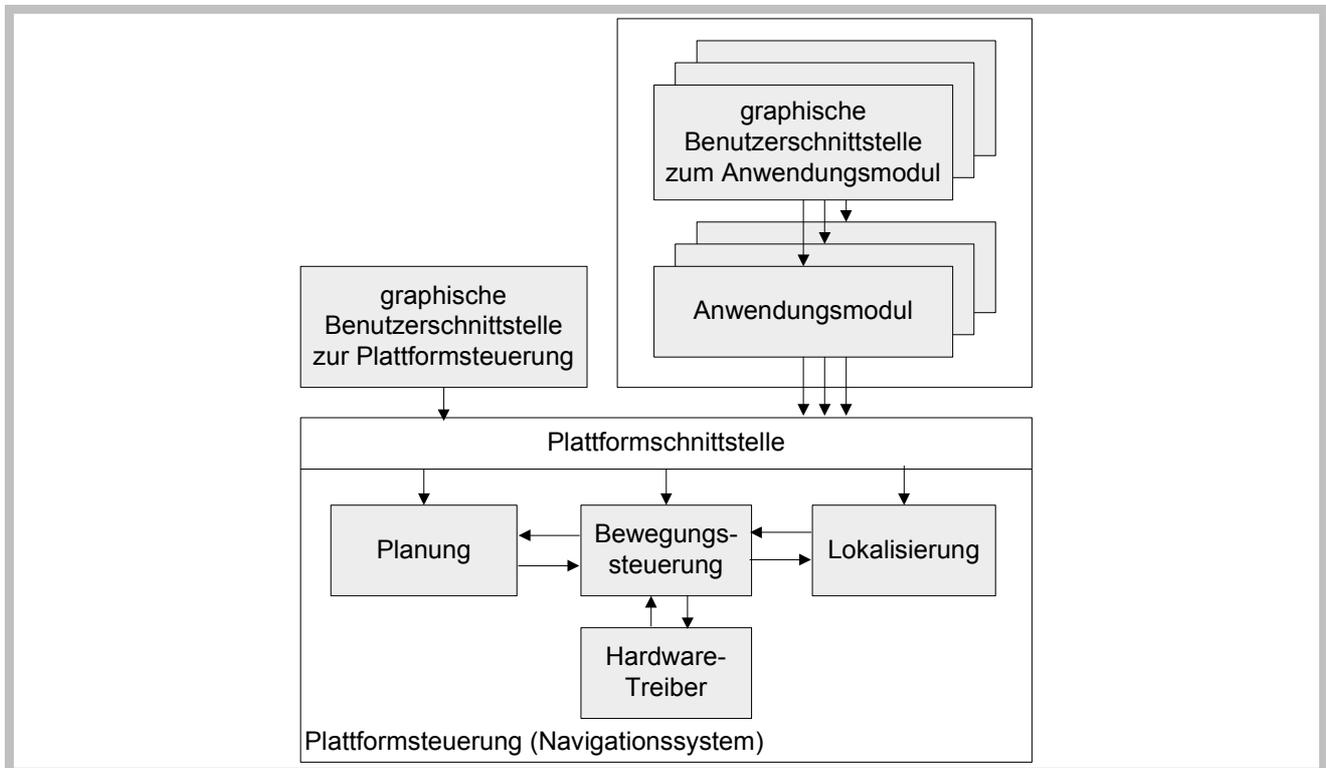


Bild 6-3: Datenflüsse zwischen den Kernkomponenten der Steuerungssoftware für die mobile Plattform von Care-O-bot[®] II.

6.3 Realisierung des Care-O-bot[®] II Navigationssystems

Das Navigationssystem von Care-O-bot[®] II besteht aus den Modulen Lokalisierung, Planung und Bewegungssteuerung, die als nebenläufige Threads realisiert sind. Die Lokalisierung basiert neben der Auswertung der Odometriedaten auf dem Abgleich in einer Umgebungskarte eingetragener Umgebungsmerkmale wie Reflektormarken oder Wandsegmente mit den über den Laserscanner erkannten Merkmalen. Die Errechnung der aktuellen Roboterposition findet mit Hilfe eines Kalmanfilters statt. Die Planungsbibliothek beinhaltet Methoden zur globalen Bahnplanung mit Sichtbarkeitsgraphen, Potentialfeldern,

Quadtrees und Rapidly Exploring Random Trees. Entsprechend der Arbeitsumgebung und der Aufgabe des Roboters kann eine passende Methode ausgewählt und aktiviert werden. Die lokale Bahnplanung mit Hilfe der Methode elastischer Bänder ist ebenfalls Teil der Planungsbibliothek. Die Bewegungssteuerung liest die aktuellen Geschwindigkeiten der Motoren und setzt deren Sollgeschwindigkeiten entsprechend der vorgegebenen Linear- und Rotationsgeschwindigkeiten.

6.3.1 Realisierung des globalen Planungsmoduls

Innerhalb eines Stockwerks errechnet die globale Planung anhand der Umgebungskarte einen kollisionsfreien Pfad von der aktuellen Position des Roboters zum gegebenen Ziel. Dynamische Hindernisse, die nicht in der Karte verzeichnet sind, werden in diesem ersten Planungsschritt nicht berücksichtigt, es sei denn sie befinden sich schon während der Planungsphase im Messbereich des Laserscanners.

Der für die **globale Planung ohne kinematische Einschränkungen** auf Care-O-bot[®] II realisierte Algorithmus basiert auf der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Potentialfeldmethode. Dafür wird zunächst der Arbeitsbereich des Roboters in einzelne Zellen unterteilt. Die Zellen, in denen sich Hindernisse befinden, sowie Zellen, deren Abstand zu einem Hindernis kleiner ist als der Kollisionsradius des Roboters, werden mit einem maximal hohen Potential belegt. Für die Planung wird berücksichtigt, ob der Roboter aktuell im Gehhilfemodus betrieben wird oder ohne einen Benutzer unterwegs ist. Für den Einsatz des Care-O-bot[®] II in Einsatzumgebungen mit ausreichend Platz wird für die Berechnung befahrbarer Passagen entsprechend Bild 5-15 der Durchmesser des Roboters an seiner breitesten Stelle als Kollisionsradius berücksichtigt, so dass die Planung im zweidimensionalen Raum stattfindet.

Nach Eingabe eines Ziels wird, ausgehend von der Zielposition, für jede Zelle ein Kostenfaktor errechnet, welcher der benötigten Fahrstrecke von diesem Punkt zum Ziel entspricht. Nach Erreichen der Startkonfiguration wird der Pfad mit den geringsten Kosten ausgewählt. Bild 6-4 zeigt ein Beispiel für die Bahnplanung mit Hilfe der Potentialfeldme-

thode in der graphischen Benutzeroberfläche der Plattformsteuerung. Dabei sind die Zellen, deren Abstand zu den Wänden geringer ist als der Kollisionsradius des Roboters, grau unterlegt dargestellt. Bild 6-5 zeigt die 3-D-Darstellung des Potentialfelds. Hier ist das maximal hohe Potential der wandnahen Zellen weiß dargestellt. Zusätzlich ist das von der Start- zur Zielposition abfallende Potential visualisiert.

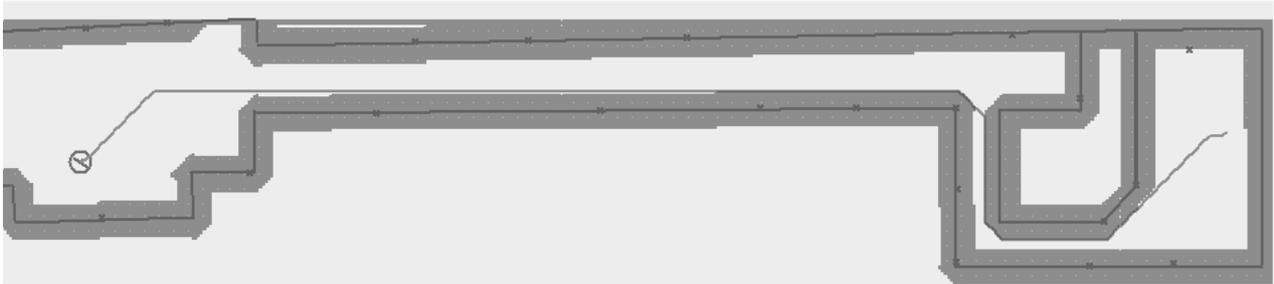


Bild 6-4: Mit Hilfe eines Potentialfeldplaners errechneter Pfad.

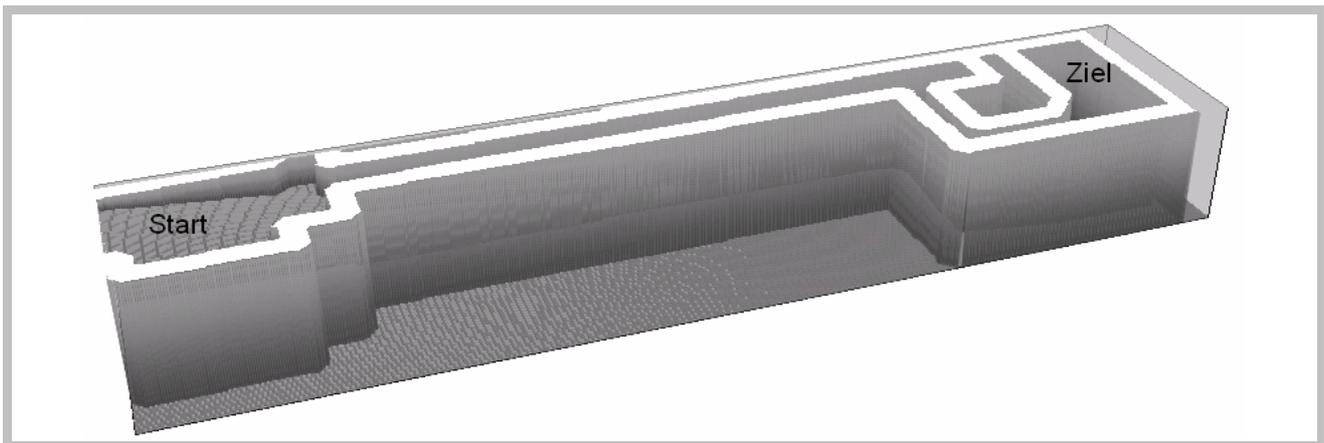


Bild 6-5: Potentialfeld zur Errechnung des in Bild 6-4 dargestellten Pfads.

Für die **globale Planung mit limitiertem Drehwinkel** wird ein mehrstufiges Konzept, basierend auf der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Errechnung des Sichtbarkeitsgraphen mit einer nachfolgenden Evaluierung und Anpassung der Roboterpfads an die geometrischen und kinematischen Eigenschaften des Roboters eingesetzt. Für die Evaluierung möglicher Bewegungspfade muss insbesondere beachtet werden, dass der Freiraum zwischen den Hindernissen ausreichend Platz bietet und dass für Drehungen der vorgegebene minimale Drehradius berücksichtigt wird. Zur Prüfung des ausreichenden Freiraums zwischen den Hindernissen entsprechend der ersten Bedingung muss die **maximale Breite** $W(\theta)$ der von

dem Mensch-Roboter-Verbund überstrichenen Fläche errechnet werden. Bei gegebenem Drehwinkel θ wird diese abhängig von der Breite des Roboters w_{veh} und des Benutzers w_{user} folgendermaßen errechnet (Bild 6-6):

$$W(\theta) = \rho_{\max} - \rho_{\min} \quad (6-1)$$

wobei

$$\rho_{\max}(\theta) = \max\left(\frac{d_{x,user}}{\tan \theta} + \frac{w_{veh}}{2}, \frac{d_{x,user}}{\sin \theta} + \frac{w_{user}}{2}\right) \quad (6-2)$$

$$\rho_{\min}(\theta) = \min\left(\frac{d_{x,user}}{\tan \theta} - \frac{w_{veh}}{2}, \frac{d_{x,user}}{\sin \theta} - \frac{w_{user}}{2}\right) \quad (6-3)$$

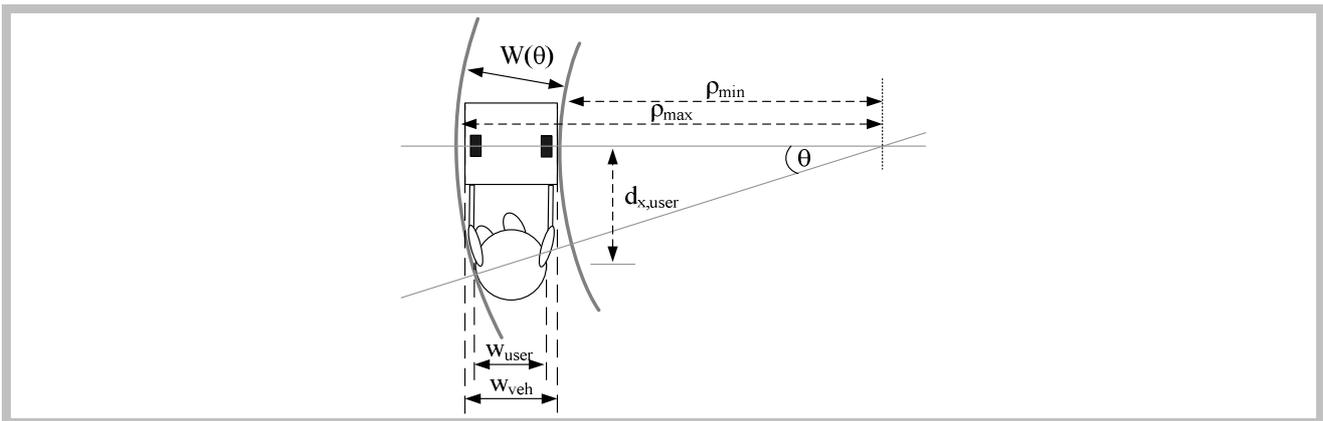


Bild 6-6: Errechnung der Breite des überstrichenen Bereichs bei Kurvenfahrten.

Die Breite des überstrichenen Bereichs nimmt für größere Drehwinkel zu. Die größte Breite, die auch für die Planung berücksichtigt werden muss, errechnet sich aus dem maximalen Drehwinkel $\theta_{user,max}$ des Benutzers. Der minimale Abstand zwischen zwei Hindernissen D_{min} sollte deshalb folgender Bedingung genügen:

$$D_{\min} > W(\theta_{user,max}) \quad (6-4)$$

Für die Prüfung und Anpassung des Pfads an den eingeschränkten **Drehradius** des Mensch-Roboter-Verbunds werden alle Eckpunkte T_i des ausgewählten Referenzpfads im Sichtbarkeitsgraphen betrachtet. Dabei werden abhängig vom am nächsten gelegenen Hindernispunkt C_i Kreise an den Eckpunkten der Hindernisse platziert, deren Radius dem minimalen Drehradius $r_{veh,min}$ entspricht. Der optimierte Bewegungspfad führt den Roboter entlang dieser Kreise an den Hindernissen vorbei.

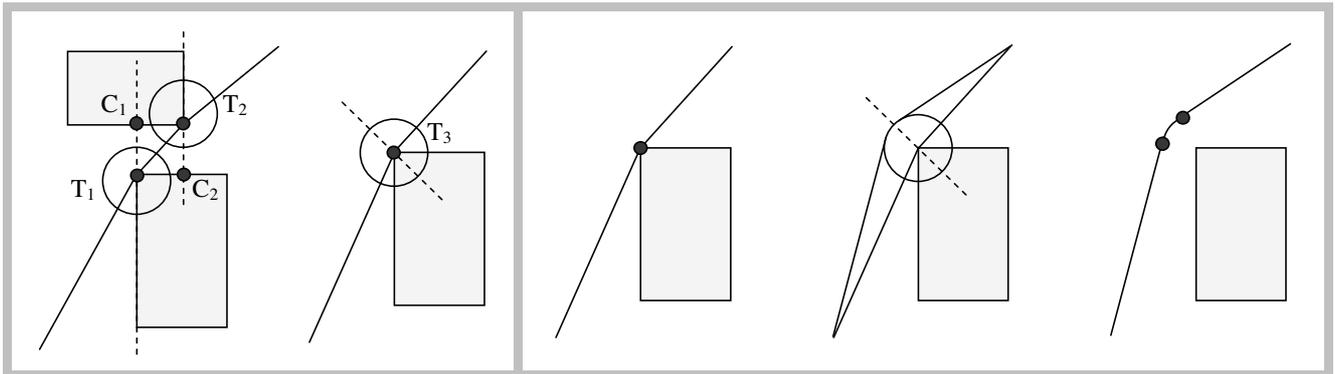


Bild 6-7: Anpassung der Eckpunkte eines Pfads an den limitierten Drehradius des Mensch-Roboter-Verbunds.

Bild 6-8 zeigt ein Beispiel für die Bahnplanung mit dieser Methode in der graphischen Benutzeroberfläche der Plattformsteuerung. Dabei ist der anhand des gegebenen Kollisionsradius sowie der Einschränkung des Drehradius modifizierte Pfad dargestellt. Der minimale Drehradius wird mittels der in den Eckpunkten des Pfads eingefügten Kreise visualisiert.



Bild 6-8: Für einen Roboter mit maximalem Drehwinkel von 50 Grad errechneter Pfad.

Eine Zielposition ist durch die Koordinaten des anzufahrenden Zielpunkts sowie der Nummer des Stockwerks, in dem sich diese Position befindet, definiert. Die Liste der Stock-

werksübergänge beinhaltet alle Punkte, in denen ein Übergang von einem in ein anderes Stockwerk möglich ist, sowie die Art des Übergangs. Liegt das Ziel in einem anderen **Stockwerk** als die aktuelle Position, wird entsprechend des in Kapitel 5.3.3 konzipierten Verfahrens zunächst eine Übergangsposition angefahren. Als geeignete Übergangspositionen für den Stockwerksübergang mittels eines Aufzugs werden dabei Positionen neben der Aufzugstüre definiert, die das Erreichen des Aufzugsrufknopfs ermöglichen, gleichzeitig jedoch ausreichend Platz lassen, so dass andere Personen den Aufzug noch verlassen können. Für das Betreten und Verlassen des Aufzugs wird Care-O-bot[®] II in den benutzergesteuerten Modus geschaltet, der ein entsprechendes Rangieren auch auf engem Raum ermöglicht.

6.3.2 Realisierung des lokalen Planungsmoduls

Die lokale Planung setzt auf dem globalen Pfad auf und realisiert die benutzer- und umgebungsabhängige Modifikation des Pfads mit Hilfe der erweiterten Methode elastischer Bänder. Die Realisierung des elastischen Bands für einen Roboter ohne kinematische Einschränkungen erfolgt direkt anhand des in Kapitel 5.3.4 konzipierten Verfahrens. Bild 6-9 zeigt ein Beispiel für die Erzeugung eines glatten, kollisionsfreien Pfads für einen holonomen Roboter durch ein elastisches Band basierend auf dem in Bild 6-4 dargestellten globalen Pfad.

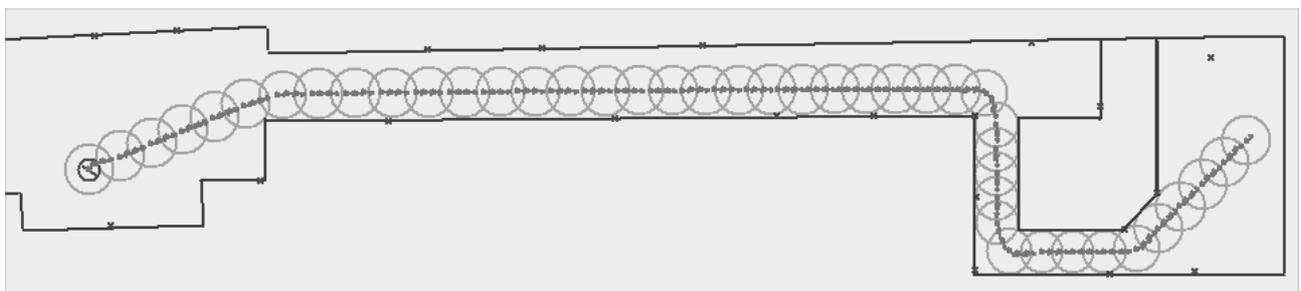


Bild 6-9: Mittels eines elastischen Bands optimierter Pfad für einen holonomen Roboter.

Das elastische Band für ein **Dubin's Car mit limitiertem Drehwinkel** wird nachfolgend realisiert. Die Bubbles eines Dubin's Car bestehen aus zwei so genannten CC-Regionen,

die den Bereich markieren, der aufgrund des limitierten Drehradius des Roboters von diesem nicht direkt angefahren werden kann (Bild 6-10, links). Während des anfänglichen Erstellens des elastischen Bands für ein Dubin's Car wird der Abstand zwischen den Bubbles so optimiert, dass das Zentrum eines Bubbles innerhalb des letzten Bubbles, d. h. innerhalb dessen Radius liegt, sich die gegenüberliegenden CC-Regionen zweier Bubbles aber nicht überschneiden (Bild 6-10, Mitte). Dadurch wird sichergestellt, dass der Roboter trotz seines limitierten Drehradius direkt von einem Bubble zum nächsten fahren kann.

Die **internen Kräfte**, die das elastische Band für ein Dubin's Car zusammenziehen, unterscheiden sich von denen des holonomen elastischen Bands. Während anziehende Kräfte (C-Kräfte) die Zentren der benachbarten Bubbles zueinander ziehen, wirken zwischen deren gegenüberliegenden CC-Regionen abstoßende Kräfte (LR-, RL-Kräfte) (Bild 6-10, rechts).

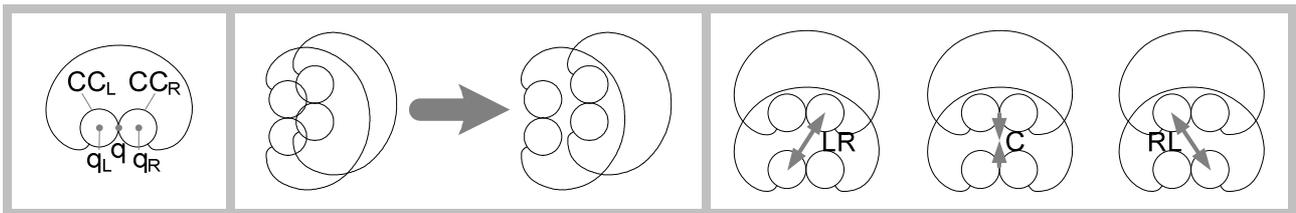


Bild 6-10: CC-Regionen eines elastischen Bands für ein Dubin's Car (links); Abstandsoptimierung zwischen Bubbles (Mitte); Kräfte zwischen benachbarten Bubbles (rechts).

Die zwischen benachbarten Bubbles eines elastischen Bands für ein Dubin's Car wirkenden Kräfte sind nachfolgend definiert. Dabei beschreiben q_L , q_R und q die Mittelpunkte der linken und rechten CC-Region eines Bubbles i sowie des Bubbles selbst.

$$LR_i = \frac{q_{Li} - q_{Ri-1}}{|q_{Li} - q_{Ri-1}|} \cdot \frac{1}{r_{i-1}} \cdot P(q_{Li}, q_{Ri-1}) + \frac{q_{Li} - q_{Ri+1}}{|q_{Li} - q_{Ri+1}|} \cdot \frac{1}{r_i} \cdot P(q_{Li}, q_{Ri+1}) \quad (6-5)$$

$$RL_i = \frac{q_{Ri} - q_{Li-1}}{|q_{Ri} - q_{Li-1}|} \cdot \frac{1}{r_{i-1}} \cdot P(q_{Ri}, q_{Li-1}) + \frac{q_{Ri} - q_{Li+1}}{|q_{Ri} - q_{Li+1}|} \cdot \frac{1}{r_i} \cdot P(q_{Ri}, q_{Li+1}) \quad (6-6)$$

$$C_i = \frac{q_{i-1} - q_i}{r_{i-1}} + \frac{q_{i+1} - q_i}{r_i} \quad (6-7)$$

Neben der **Skalierung** der Kräfte entsprechend der Radien r der betroffenen Bubbles findet eine zusätzliche Skalierung der LR- und RL-Kräfte anhand des Abstands zwischen zwei Bubbles statt. Die Potentialfunktion P liefert einen hohen Wert, falls die gegenüberliegende CC-Regionen zweier benachbarter Bubbles sehr nahe beieinander stehen. Dadurch wird das oben genannte Überlappen der CC-Regionen vermieden. Die resultierende interne Kraft, die auf ein Bubble wirkt, ist die gewichtete Summe der C-, LR- und RL-Kräfte:

$$F_i = K_r \cdot (LR_i + RL_i) + K_c \cdot C_i \quad (6-8)$$

Für die Errechnung der **Orientierung** eines Bubbles wird aus den zwischen den CC-Regionen wirkenden LR- und RL-Kräften ein Moment T_i erzeugt. Die Winkeländerung eines Bubbles $\Delta\alpha$ errechnet sich aus diesem Moment:

$$T_i = LR_i \times (q_{Li} - q_i) + RL_i \times (q_{Ri} - q_i) \quad (6-9)$$

$$\Delta\alpha_i = k_r T_i \quad (6-10)$$

Bild 6-11 zeigt ein Beispiel für die Erzeugung eines glatten, kollisionsfreien Pfads durch ein elastisches Band für ein Dubin's Car basierend auf dem in Bild 6-8 dargestellten globalen Pfad.

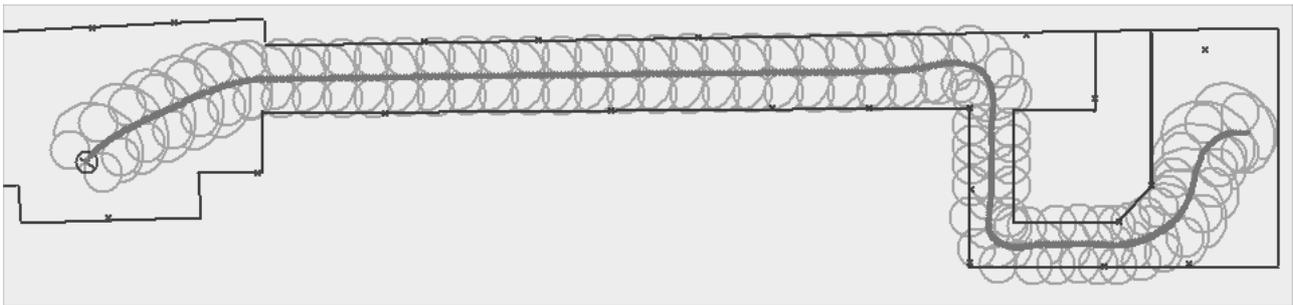


Bild 6-11: Mittels eines elastischen Bands optimierter Pfad für ein Dubin's Car.

6.3.3 Realisierung des benutzerangepassten Bewegungssteuerungsmoduls

Für die **Geschwindigkeitsplanung** werden die Fähigkeiten des Benutzers, insbesondere dessen maximale Drehgeschwindigkeit $\omega_{user,max}$ und maximale Vorwärts- und Lateralgeschwindigkeiten $v_{x,user,max}$ und $v_{y,user,max}$ berücksichtigt. Beim Drehen auf der Stelle oder beim Geradeausfahren ist es neben der Geschwindigkeitsreduktion in der Nähe von Hindernissen ausreichend, die Maximalgeschwindigkeit des Roboters entsprechend dieser benutzerspezifischen Restriktionen einzuschränken. Beim Fahren von Kurven wird die Maximalgeschwindigkeit abhängig von dem geplanten Kurvenradius dynamisch angepasst.

Für die **Kollisionsvermeidung** wird der Abstand d des vorgegebenen Kollisionsradius um den Roboter zum nächsten in der Umgebung befindlichen Hindernis gemessen und die Geschwindigkeit so reduziert, dass der Roboter bei gegebenem maximalem Bremsstoß a_{max} rechtzeitig vor dem Hindernis zum Halten kommt:

$$v_{x,veh,safe} = \sqrt{2 \cdot a_{max} \cdot d} \quad (6-11)$$

Die **Maximalgeschwindigkeit** $v_{x,max}$ des Roboters bei der Vorwärtsfahrt ergibt sich entsprechend (5-5) aus der maximalen Vorwärtsgeschwindigkeit des Benutzers und dessen Abstand zum Roboter, entsprechend (5-9) aus der maximalen Winkelgeschwindigkeit des Benutzers und dem Kurvenradius des geplanten Pfads sowie entsprechend (6-11) aus der entsprechend des Abstands zum nächsten Hindernis errechneten sicheren Robotergeschwindigkeit:

$$v_{x,veh,max} = \min(v_{x,user,max} - d_{x,user} \cdot \omega, \omega_{max} \cdot r_{veh}, v_{x,veh,safe}) \quad (6-12)$$

Wurde eine Reduktion der Vorwärtsgeschwindigkeit durchgeführt, so ist es notwendig, die geforderte Rotationsgeschwindigkeit so anzupassen, dass der Roboter weiterhin dem geplanten Pfad folgt. Bild 6-12 zeigt den verwendeten Algorithmus zur Anpassung der Sollgeschwindigkeiten an die Fähigkeiten des Benutzers.

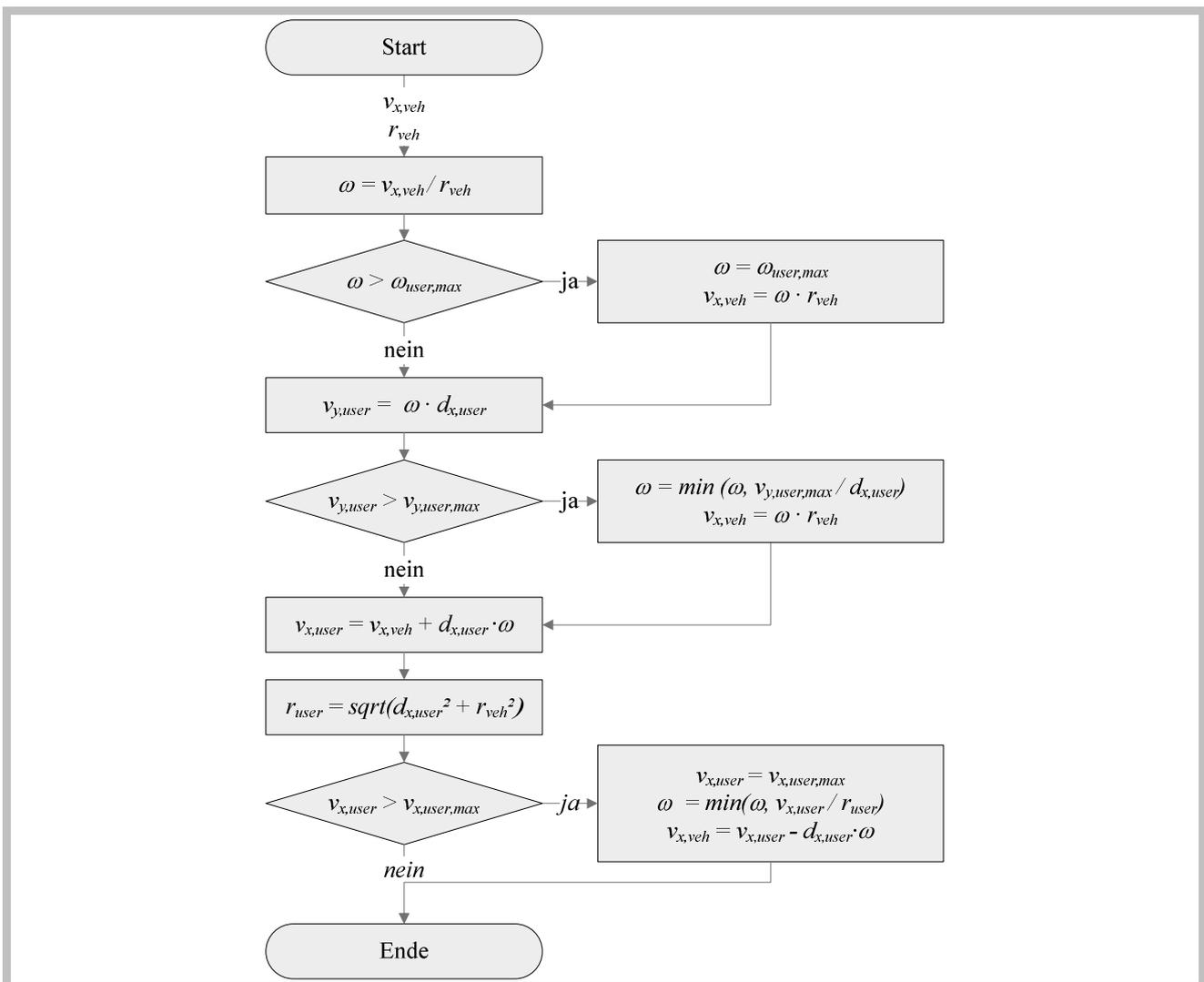


Bild 6-12: Anpassung der Sollgeschwindigkeiten an die Fähigkeiten des Benutzers.

Die Sollgeschwindigkeit des Roboters wird durch Beschleunigen und Abbremsen erreicht. Ist die Differenz zur aktuellen Geschwindigkeit nicht zu groß, ist das Ergebnis der Ge-

schwindigkeitsplanung die entsprechend oben stehender Gleichung errechnete Maximalgeschwindigkeit. Ansonsten wird die Sollgeschwindigkeit abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit und der vorgegebenen maximalen Beschleunigung schrittweise gesteigert oder reduziert.

6.3.4 Interface-Funktionen der Care-O-bot[®] II Plattformschnittstelle

Über die Plattformschnittstelle kommunizieren übergeordnete Steuermodule wie die graphische Benutzeroberfläche zur Plattformsteuerung oder spezielle Anwendungsmodule mit dem Navigationssystem von Care-O-bot[®] II (Bild 6-4).

Bild 6-13 zeigt die grundlegenden Interface-Funktionen der Care-O-bot[®] II Plattformschnittstelle. Es kann der Betriebsmodus der Plattform eingestellt sowie der Betrieb des Roboters gestartet oder gestoppt werden. Dabei sind insbesondere die folgenden Betriebsmodi der Plattformsteuerung zu unterscheiden:

- **Geschwindigkeitssteuerung:** Die Fahrgeschwindigkeit des Roboters wird direkt gesetzt, z. B. mit einem Joystick oder durch ein Anwendungsmodul.
- **Zielfahrt:** Der Roboter fährt selbstständig zu einer vorgegebenen Zielposition. Diese wird über die graphische Benutzeroberfläche oder durch ein Anwendungsmodul gesetzt.

Plattform		
Setze_Betriebsmodus()	Stopp()	Start()
Planung	Bewegungssteuerung	Lokalisierung
Setze_Zielposition()	Setze_Zielgeschwindigkeit()	
Lese_geplanten_Pfad() Lese_ist_Ziel_erreicht()	Lese_aktuelle_Geschwindigkeit()	Lese_aktuelle_Position()

Bild 6-13: Grundlegende Interface-Funktionen der Care-O-bot® II Plattformschnittstelle.

Über die Schnittstelle zur Planung können Ziele für die Zielfahrt eingegeben sowie das Erreichen eines Ziels abgefragt werden. Der nach Eingabe eines Ziels automatisch errechnete Pfad zum Ziel kann ebenfalls übertragen werden. Die Schnittstelle zur Bewegungssteuerung ermöglicht das direkte Setzen der Fahrgeschwindigkeit für die Geschwindigkeitssteuerung sowie die Abfrage der aktuellen Fahrgeschwindigkeiten. Das Lokalisierungsmodul stellt für alle Betriebsmodi die aktuelle Position des Roboters bereit.

Für die Ansteuerung der für den Betrieb des Care-O-bot® II als roboterbasierte Gehhilfe spezifischen Navigationskomponenten wurden zusätzlich die in Bild 6-14 dargestellten gehhilfespezifischen Interface-Funktionen zur Plattformsteuerung entwickelt.

Plattform	
Planung Aktiviere_direkte_Bahnmodifikation() Aktiviere_Zwischenziel_anfahren() Aktiviere_wandnahes_Fahren() Aktiviere_Neuplanung() Lese_Ist_Zwischenziel_anfahren_aktiv() Lese_Zwischenziel_Position() Lese_Ist_wandnahes_Fahren_aktiv() Lese_Wand_Position()	Bewegungssteuerung Setze_Maximalgeschwindigkeit_vorwärts() Setze_maximale_Drehgeschwindigkeit() Setze_Drehrichtung() Lese_Ist_Vorwärtsfahrt_gestartet() Lese_Ist_Rotation_gestartet()

Bild 6-14: Gehhilfespezifische Interface-Funktionen der Care-O-bot® II Plattformschnittstelle.

Im Planungsmodul können die direkte Bahnmodifikation durch den Benutzer, die Bewegungsverhalten »Wandnahes Fahren« und »Anfahren eines Zwischenziels« sowie die Neuplanung des Pfads aktiviert werden. Außerdem können der Aktivierungsstatus dieser Bahnmodifikationen und die zugehörigen Parameter (Position des Zwischenziels bzw. Wandsegments) abgefragt werden. In der Bewegungssteuerung können die aktuell erlaubten Maximalgeschwindigkeiten sowie die Drehrichtung gesetzt und der aktuelle Bewegungsmodus (Drehung auf der Stelle oder Vorwärtsfahrt) abgefragt werden.

6.4 Realisierung des Anwendungsmoduls »Gehhilfesteuerung«

Die Funktion des Care-O-bot® II als roboterbasierte Gehhilfe ist als externes Anwendungsmodul »Gehhilfesteuerung« realisiert, das über die Plattformschnittstelle mit dem Navigationssystem von Care-O-bot® II kommuniziert (Bild 6-15). Die Gehhilfesteuerung liest und analysiert die über die Sensorgriffe eingebrachten Benutzerkräfte sowie die Eingaben des Benutzers über die anwendungsspezifische graphische Benutzeroberfläche. Abhängig von den Benutzereingaben sowie den über die Plattformschnittstelle gelesenen, aktuellen Systemdaten wird eine Ablaufsteuerung realisiert, die dem erarbeiteten Lö-

sungskonzept entspricht. Die graphische Benutzeroberfläche visualisiert dabei kontinuierlich den aktuellen Systemzustand der Gehhilfesteuerung.

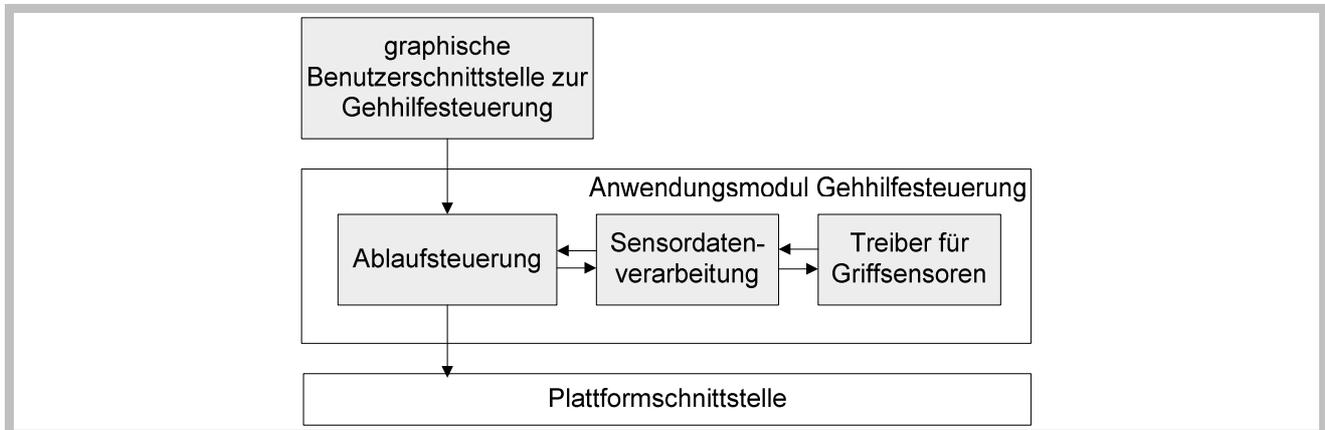


Bild 6-15: Datenflüsse zwischen den Komponenten der Gehhilfesteuerung für die mobile Plattform von Care-O-bot[®] II.

6.4.1 Realisierung der Sensordatenverarbeitung

Die Sensordatenverarbeitung stellt sowohl für den benutzergesteuerten als auch für den Zielführungsmodus grundlegende Funktionen für den Betrieb des Care-O-bot[®] II als roboterbasierte Gehhilfe bereit. Sie wertet die auf die Gehhilfegriffe eingebrachten Kräfte F_{left} und F_{right} aus.

Im ersten Verarbeitungsschritt wird der in Kapitel 5.2.3 konzipierte **Stolperschutz** realisiert. Bei Aktivierung des Stolperschutzes werden die Kraftwerte für beide Sensorgriffe automatisch auf Null gesetzt:

$$F_{left}(t) = F_{right}(t) = 0 \quad \text{für} \quad |F_{left}(t-1) - F_{left}(t)| > thresh \vee |F_{right}(t-1) - F_{right}(t)| > thresh \quad (6-13)$$

Bild 6-16 und Bild 6-17 zeigen ein Beispiel für die Aktivierung des Stolperschutzes und das entsprechende Abbremsen des Roboters.

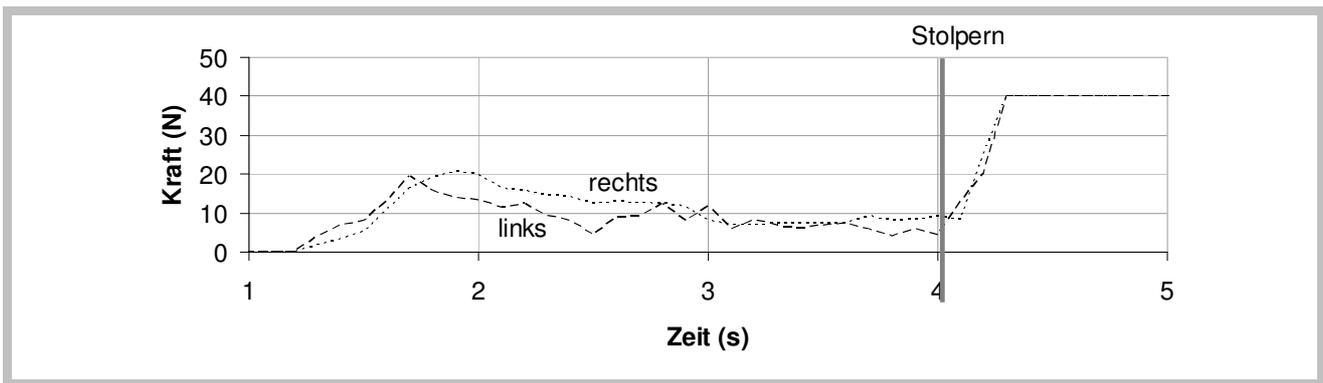


Bild 6-16: Kraftanstieg bei einer Stolperbewegung.

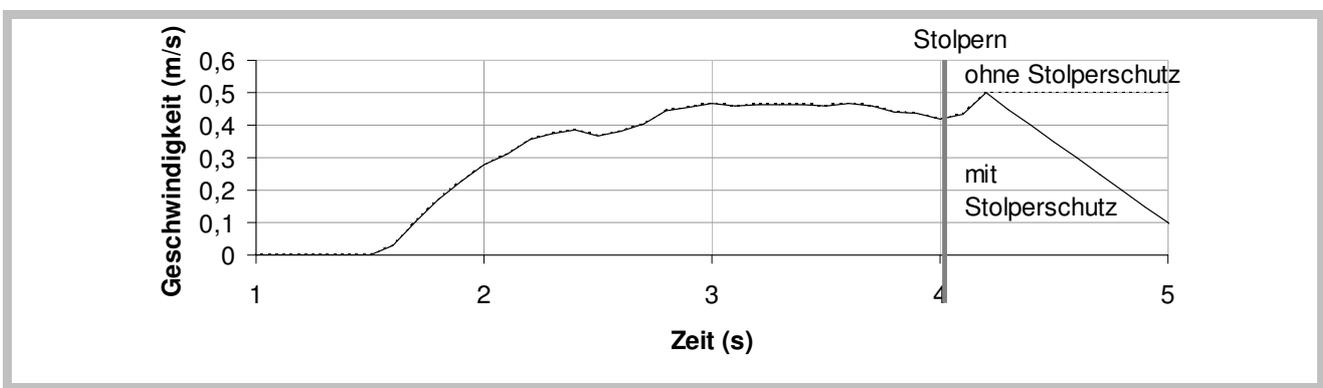


Bild 6-17: Geschwindigkeitsverlauf mit und ohne automatischem Stolperschutz.

Nachfolgend werden die am rechten und linken Griffsensor gemessenen Kräfte **gefiltert**. Ein bestimmter Bereich *cut* um die Nullstellung der Sensoren wird auf Null gesetzt, da die Sensoren nach der Betätigung nicht in die exakt gleiche Ruhelage zurückkehren. Zusätzlich wird die gemessene Kraft, sollte sie größer als die vorgegebene Maximalkraft sein, auf diesen Wert reduziert, um nachfolgend ein Überschreiten der maximalen Beschleunigung zu vermeiden.

$$F = 0 \quad \text{für } |F| < cut \quad (6-14)$$

$$F = F_{\max} \quad \text{für } F > F_{\max} \quad (6-15)$$

$$F = -F_{\max} \quad \text{für } F < -F_{\max} \quad (6-16)$$

Die auf das Drehzentrum des Roboters wirkende **Kraft** F und **Drehmoment** T_O werden abhängig vom seitlichen Abstand der Sensorgriffe d zum Drehzentrum O des Roboters aus den am rechten und linken Sensorgriff gemessenen Sensorwerten errechnet (Bild 6-18).

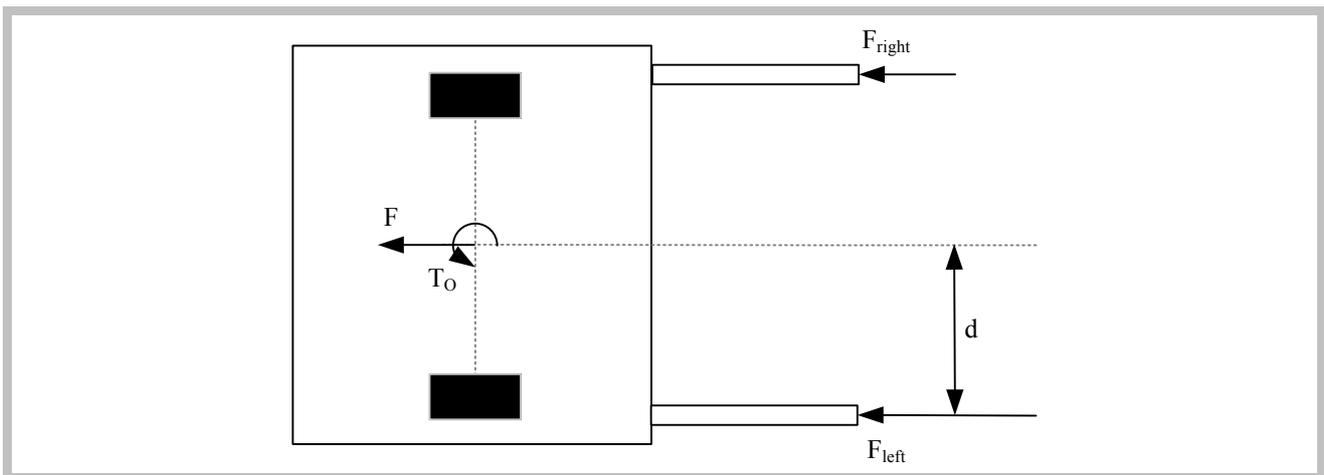


Bild 6-18: Vom Benutzer eingebrachte Kräfte, resultierende Kraft und Drehmoment.

Da die Griffe parallel zum Boden und zueinander angebracht sind, gilt:

$$F = F_{\text{left}} + F_{\text{right}} \quad (6-17)$$

$$T_O = (F_{\text{right}} - F_{\text{left}}) \cdot d \quad (6-18)$$

Für die Errechnung der vom Benutzer gewünschten **Beschleunigungen** wird das konzipierte Massemodell umgesetzt. Dabei müssen die maximalen Beschleunigungen der roboterbasierten Gehhilfe berücksichtigt werden, die aufgrund der Motorbeschränkungen und des höheren Gewichts unter den Werten konventioneller Gehhilfen liegen. Zudem wird ein Maximalwert für die eingebrachten Kräfte festgelegt, der immer zu einer maximalen Beschleunigung führt. Die nur anhand der Benutzerkräfte geänderte Fahrgeschwindigkeit wird wie folgt errechnet:

$$v_{user}(t) = v_0 + \int \frac{F_{user} \cdot a_{max}(t)}{F_{max}} dt \quad (6-19)$$

Die durch den simulierten Rollwiderstand verursachte Geschwindigkeitsänderung beträgt:

$$v_{roll}(t) = \int a_{roll}(t) dt \quad (6-20)$$

Da der Betrag von $v_{roll}(t)$ unabhängig von der aktuellen Geschwindigkeit ist, errechnet sich die **Sollgeschwindigkeit** der roboterbasierten Gehhilfe $v_{veh}(t)$ wie in Bild 5-11 konzipiert direkt anhand der folgenden Fallunterscheidung:

$$v_{veh}(t) = 0 \quad \text{für } |v_{user}(t)| \leq v_{roll}(t) \quad (6-21)$$

$$v_{veh}(t) = v_{user}(t) - v_{roll}(t) \quad \text{für } |v_{user}(t)| > v_{roll}(t) \text{ und } v_{user}(t) > 0 \quad (6-22)$$

$$v_{veh}(t) = v_{user}(t) + v_{roll}(t) \quad \text{für } |v_{user}(t)| > v_{roll}(t) \text{ und } v_{user}(t) < 0 \quad (6-23)$$

Die Maximalkraft F_{max} wurde entsprechend der vorab durchgeführten Benutzertests mit konventionellen Gehhilfen (Kapitel 3.3.1) auf 40 N begrenzt. Für die Ermittlung passender Kontrollparameter a_{max} und $c_r \cdot g$ wurden folgende Experimente durchgeführt (Bild 6-19):

- Die roboterbasierte Gehhilfe wurde auf eine Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt und dann losgelassen. Im Anschluss wurde der Weg bis zum Stillstand gemessen. Zusätzlich wurde die für das Anfahren benötigte Kraft gemessen.
- Die roboterbasierte Gehhilfe wurde auf eine Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt, dann manuell angehalten.
- Die roboterbasierte Gehhilfe wurde mit konstanter Geschwindigkeit gefahren.

Nr.	Test	$c_r \cdot g$	a_{max}	Beobachtungen
1	Anfahren auf v_{max} (0,35 m/s) und ausrollen.	0,02	3,0	Kraft zum Starten: max. 10 N Bremsweg 6,0 m
2	Anfahren auf v_{max} (0,35 m/s) und manuell stoppen.	0,02	3,0	Schwer zu bremsen, schwingt sich auf
3	Anfahren auf v_{max} (0,5 m/s) und ausrollen.	0,5	3,0	Kraft zum Starten: max. 16 N Bremsweg 0,5 m
4	Anfahren auf v_{max} (0,5 m/s) und manuell stoppen.	0,5	3,0	Einfach zu bremsen
5	Anfahren auf v_{max} (0,5 m/s) und ausrollen/stoppen.	2,0	3,0	Kraft zum Starten: > 40 N (vorgeg. Limit), Bremsweg 0,25 m
6	Konstantes Fahren mit ca. 0,25 m/s.	0,5	1,0	Geschwindigkeit 0,23 bis 0,28 m/s
7	Konstantes Fahren mit ca. 0,25 m/s.	0,5	3,0	Geschwindigkeit 0,25 bis 0,35 m/s
8	Konstantes Fahren mit ca. 0,25 m/s.	0,5	5,0	Geschwindigkeit 0,2 bis 0,4 m/s

Bild 6-19: Durchgeführte Tests zur optimalen Parametrierung des Fahrverhaltens.

Ein zu hoher Wert für $c_r \cdot g$ wirkt sich in einer zu hohen Kraft für das Anfahren und für das konstante Fahren aus (Bild 6-20). Ein zu niedriger Wert von $c_r \cdot g$ führt zu einem zu langen Bremsweg (Bild 6-21). Bei einer zu hohen Maximalbeschleunigung ist das Fahren mit einer konstanten Geschwindigkeit nahezu unmöglich, da schon die kleinsten Kraftänderungen in einer Geschwindigkeitsänderung resultieren (Bild 6-22).

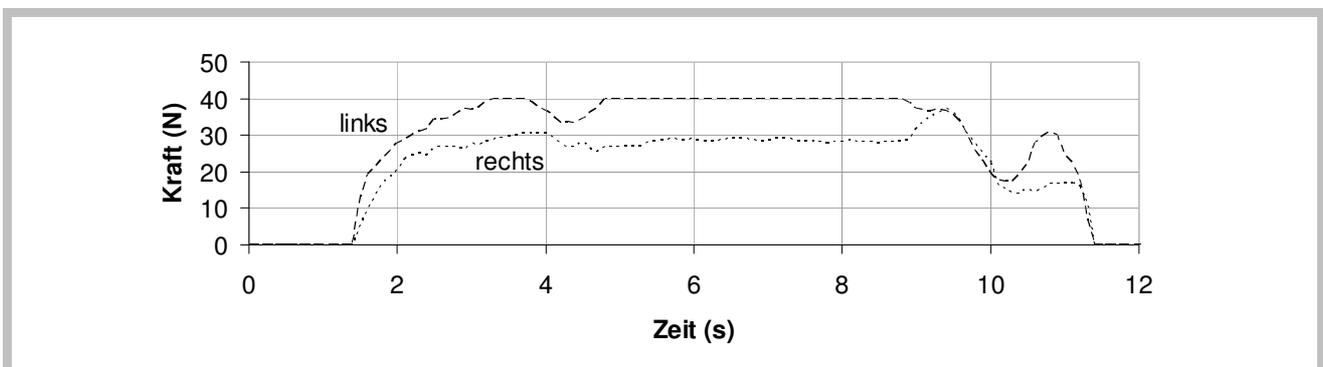


Bild 6-20: Kräfteverlauf beim Fahren in Test 5 ($c_r \cdot g = 2$, $a_{max} = 3 \text{ m/s}^2$).

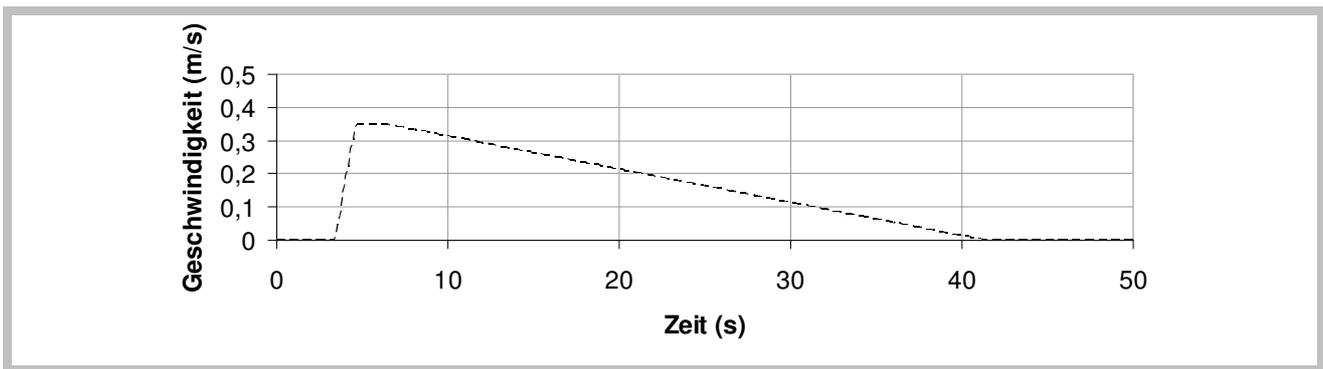


Bild 6-21: Geschwindigkeitsverlauf bei Ausrollen in Test 1 ($c_r \cdot g = 0,02$, $a_{max} = 3 \text{ m/s}^2$).

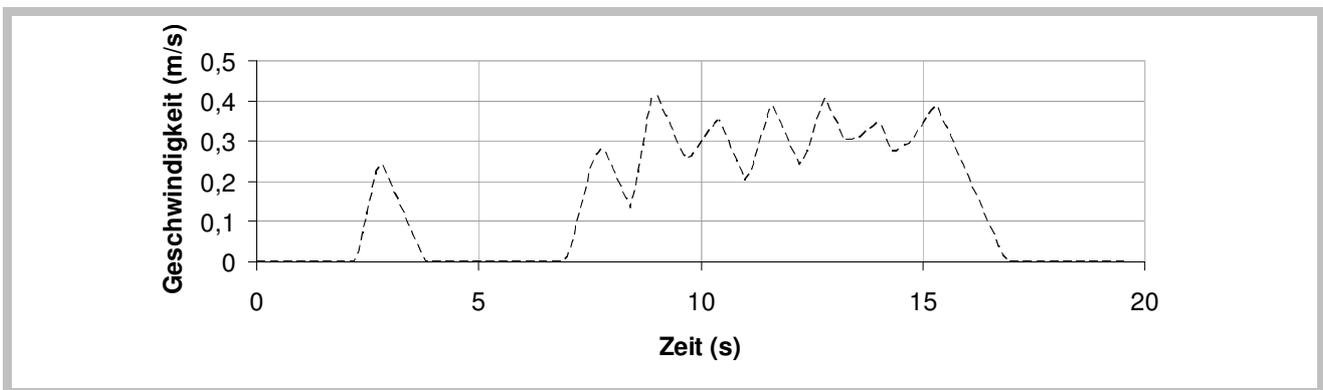


Bild 6-22: Geschwindigkeitsverlauf beim Fahren in Test 8 ($c_r \cdot g = 0,5$, $a_{max} = 5 \text{ m/s}^2$).

Die Einstellung der Parameter auf $c_r \cdot g = 0,5 \text{ m/s}^2$ und $a_{max} = 3 \text{ m/s}^2$ führt zu einem **optimalen Fahrverhalten**, das eine gute Kontrolle der roboterbasierten Gehhilfe ermöglicht, diese schnell genug abstoppt sowie eine akzeptable minimale Kraft für das Anfahren und für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit erfordert. Bild 6-23 und Bild 6-24 zeigen den Kräfte- und Geschwindigkeitsverlauf beim Fahren und Ausrollen mit dieser Parametereinstellung.

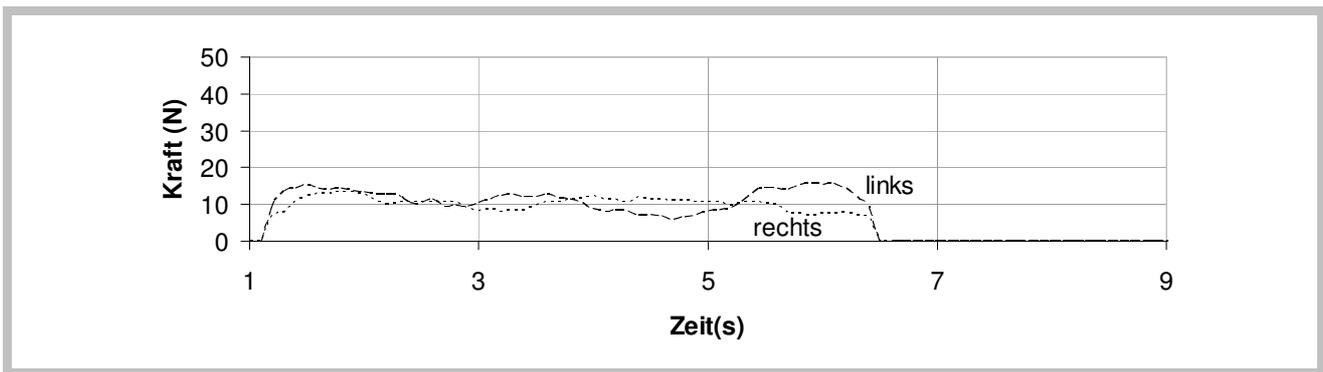


Bild 6-23: Kräfteverlauf beim Fahren und Ausrollen in Test 3 ($c_r \cdot g = 0,5 \text{ m/s}^2$, $a_{max} = 3 \text{ m/s}^2$).

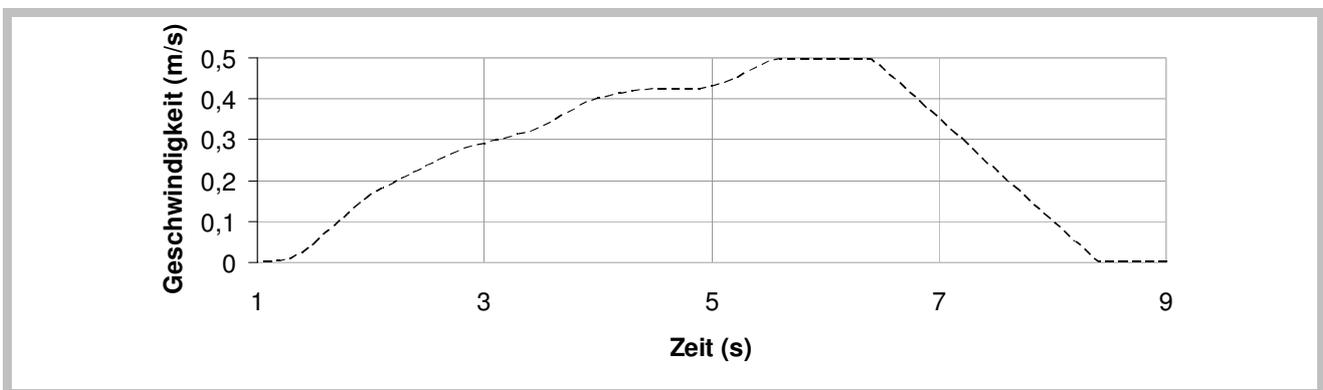


Bild 6-24: Geschwindigkeitsverlauf beim Fahren und Ausrollen in Test 3

($c_r \cdot g = 0,5 \text{ m/s}^2$, $a_{max} = 3 \text{ m/s}^2$).

Die Kraft F_{const} für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit kann anhand der ausgewählten Parameter errechnet werden:

$$F_{const} = c_r \cdot g \cdot \frac{F_{max}}{a_{max}} = 6,7 \text{ N} \quad (6-24)$$

Damit wird der geforderte Wert von 4 N zwar nicht genau erreicht, aufgrund der genannten Schwierigkeiten bei erhöhten Maximalgeschwindigkeiten ist dieser Wert jedoch optimal und wird deshalb beibehalten.

Die **Fahrgeschwindigkeit** wird benutzerspezifisch auf einen Maximalwert beschränkt. Dabei werden drei Geschwindigkeitsstufen »langsam« (0,2 m/s), »mittel« (0,35 m/s) und »schnell« (0,5 m/s) bereitgestellt.

Die **gewünschte Fahrtrichtung** wird ebenfalls aus den eingebrachten Benutzerkräften bzw. aus dem entsprechend daraus (6-18) resultierenden Drehmoment T_O errechnet. Dabei wird der Prozentsatz eines vorher festgelegten, maximalen Drehmoments $T_{O,max}$ auf einen Winkel zwischen 0 und 90 Grad übertragen:

$$dir = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{T_O}{T_{O,max}} \quad (6-25)$$

6.4.2 Realisierung der Ablaufsteuerung im benutzergesteuerten Modus

Im benutzergesteuerten Modus (Bild 6-25) wird die Geschwindigkeitssteuerung der Plattformsteuerung aktiviert. Die in der Sensordatenverarbeitung abhängig von den aktuellen Fahrgeschwindigkeiten und den eingegebenen Benutzerkräften errechneten linearen und rotatorischen Sollgeschwindigkeiten werden in diesem Betriebsmodus direkt an die Plattformsteuerung weitergegeben. Der benutzergesteuerte Modus wird über die Benutzeroberfläche oder bei Nicht-Betätigung der Gehhilfe innerhalb eines bestimmten Zeitraums gestoppt.

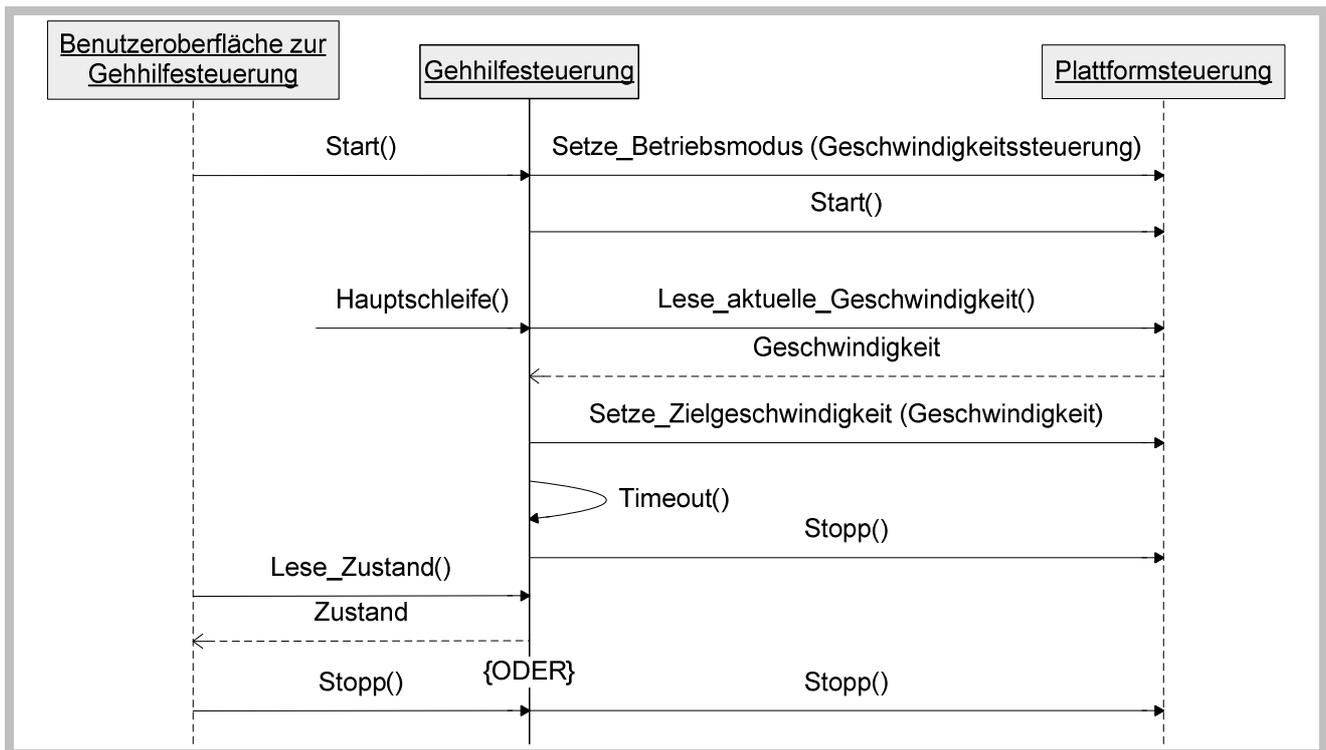


Bild 6-25: Kommunikation zwischen Gehhilfe- und Plattformsteuerung im benutzergesteuerten Modus.

6.4.3 Realisierung der Ablaufsteuerung im Zielführungsmodus

Im Zielführungsmodus (Bild 6-26) wird in der Plattformsteuerung die automatische Zielfahrt aktiviert. Das Ziel wird durch den Benutzer über die graphische Oberfläche gesetzt. Die Berechnung des Pfads zum Ziel und die damit verbundene Bewegungsplanung erfolgt automatisch durch den Roboter. Die Sollgeschwindigkeiten (aktuelle Maximalgeschwindigkeiten) für die Plattformsteuerung werden im Zielführungsmodus abhängig vom aktuellen Bewegungsmodus (Rotation oder Vorwärtsfahrt) gesetzt.

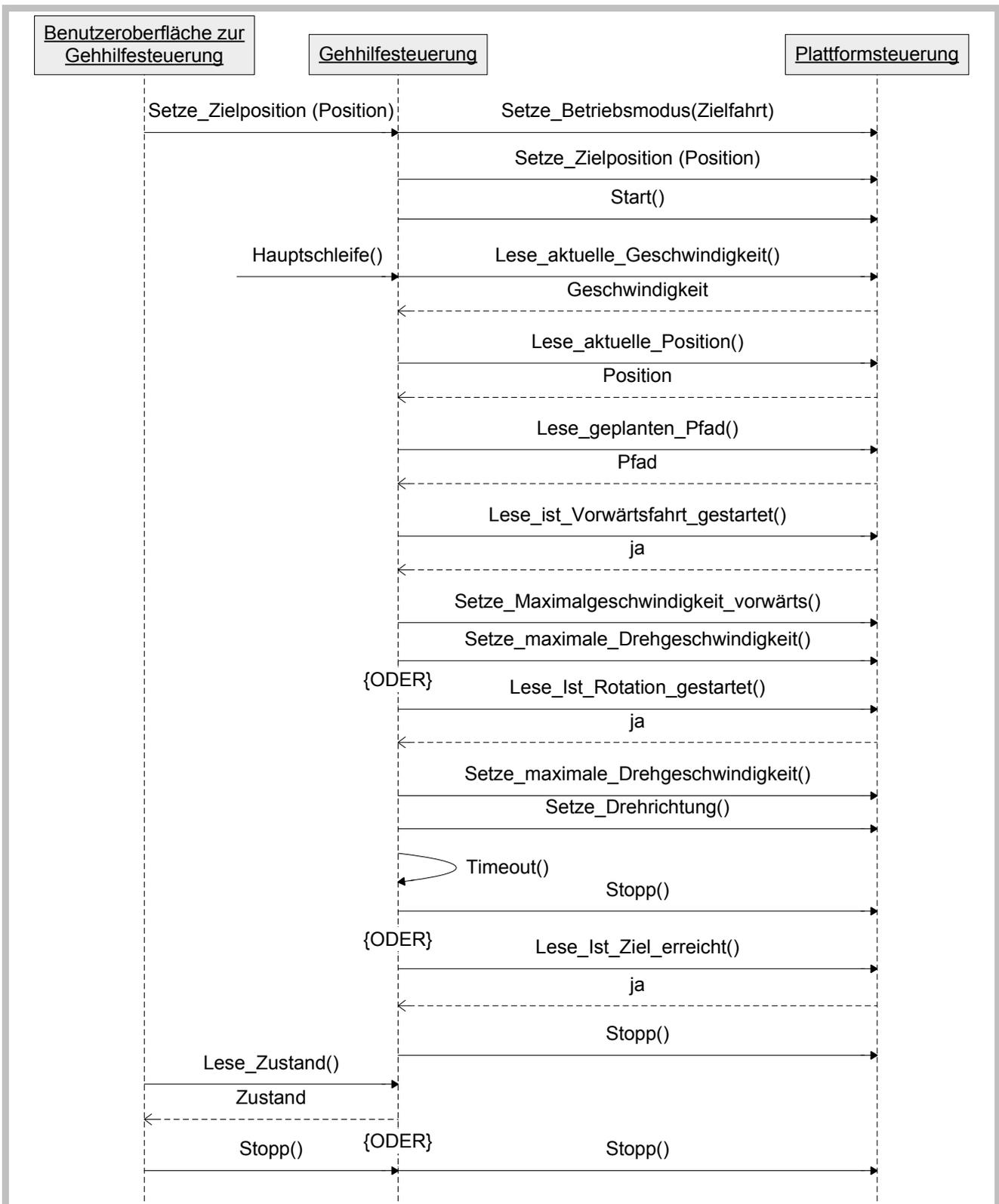


Bild 6-26: Kommunikation zwischen Gehhilfe- und Plattformsteuerung im Zielführungsmodus.

Für **Rotationen** werden in der Plattformsteuerung die aus den Benutzereingaben errechnete aktuelle maximale Rotationsgeschwindigkeit und vorgegebene Drehrichtung für die Rotation gesetzt. Entspricht die vom Benutzer vorgegebene Drehrichtung der geplanten Richtung und ist die vom Benutzer gewünschte Rotationsgeschwindigkeit ungleich Null, beginnt der Roboter, sich mit dieser Geschwindigkeit zu drehen. Für **Vorwärtsfahrten** wird in der Plattformsteuerung die aus den Benutzereingaben errechnete aktuelle maximale Vorwärtsgeschwindigkeit gesetzt. Ist die vom Benutzer vorgegebene Vorwärtsgeschwindigkeit größer als Null, bewegt sich der Roboter mit dieser Geschwindigkeit entlang des geplanten Pfads. Gestoppt wird der Zielführungsmodus über die Benutzeroberfläche bei Nicht-Betätigung der Gehhilfe innerhalb eines bestimmten Zeitraums oder nach Erreichen des Ziels.

Im Zielführungsmodus können die maximalen Fahrgeschwindigkeiten eingestellt sowie die verfügbaren Bahnmodifikationen oder die automatische Umschaltung in den benutzergesteuerten Modus entsprechend den Fähigkeiten eines Benutzers aktiviert oder deaktiviert werden. Sind alle Funktionen zur benutzerangepassten Bahnmodifikation deaktiviert, finden Bahnmodifikationen ausschließlich zur Glättung und Hindernisumfahrung statt und die Eingaben des Benutzers werden für die Richtungssteuerung ignoriert.

Bild 6-27 zeigt die **Hauptschleife** der Gehhilfesteuerung im Zielführungsmodus, die zyklisch aufgerufen wird. Die Richtungs- und Geschwindigkeitsvorgaben des Benutzers werden dabei im Hinblick auf die Aktivierung der oben genannten Bahnmodifikationen evaluiert.

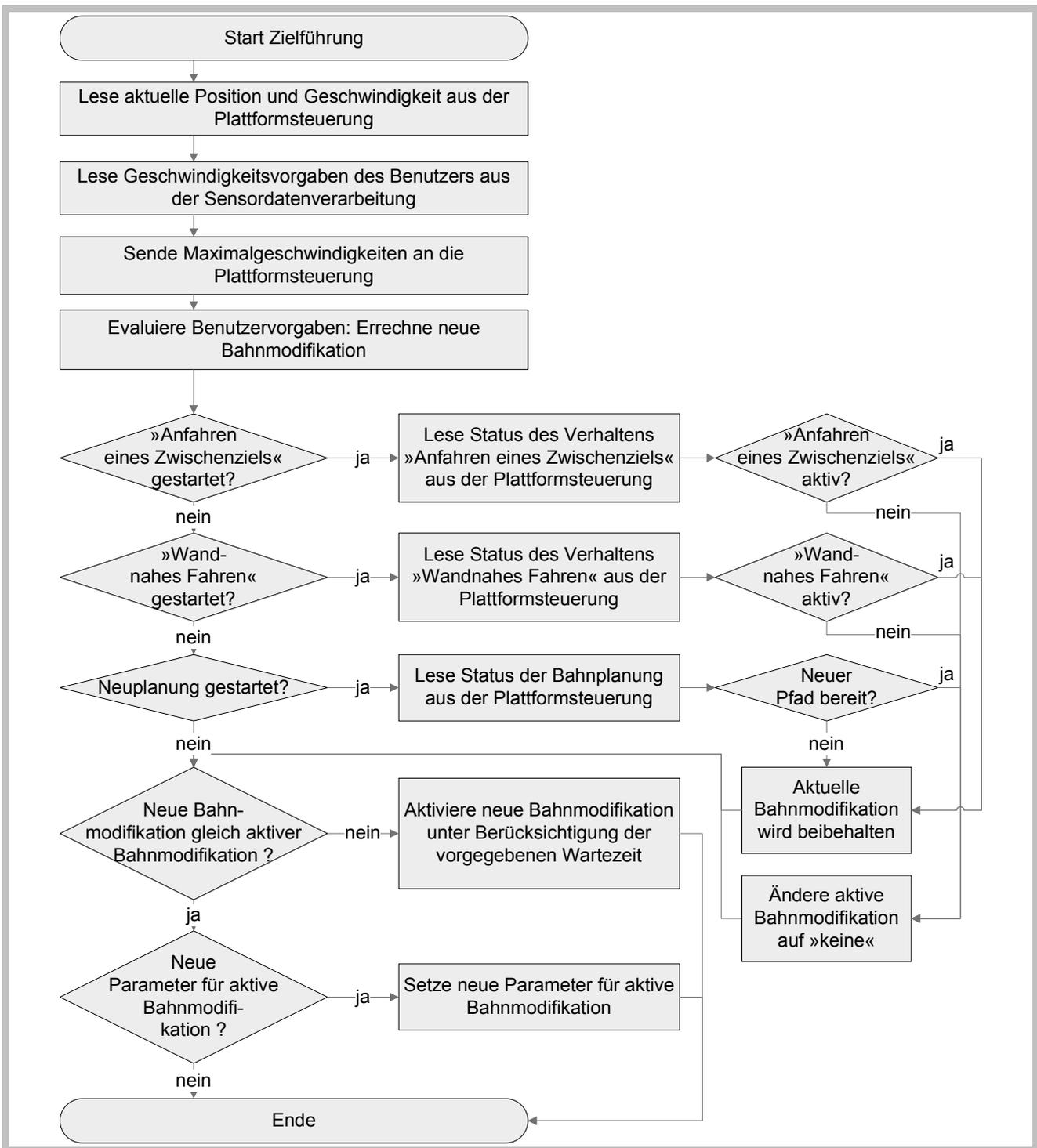


Bild 6-27: Hauptschleife der Gehhilfestuerung im Zielführungsmodus.

Für die **Evaluierung der Benutzereingaben** und Errechnung einer passenden Bahnmodifikation wird entsprechend Bild 6-28 zunächst abhängig vom aktuellen Bewegungsmodus

(Rotation oder Vorwärtsfahrt) untersucht, ob die errechneten Sollgeschwindigkeiten der vorgesehenen Bewegung entsprechen. Neben der vom Benutzer vorgegebenen Geschwindigkeit wird die in der Sensordatenverarbeitung errechnete gewünschte Bewegungsrichtung des Benutzers mit der geplanten Bewegung verglichen. Sind die Abweichungen minimal, wird der geplante Pfad ohne Abweichungen verfolgt. Bei sehr großen Abweichungen findet eine Umschaltung in den benutzergesteuerten Modus statt. Bei sonstigen Abweichungen ist eine weitere Evaluierung notwendig.

Für die Aktivierung von Bahnmodifikationen aufgrund von Divergenzen zwischen der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung und der geplanten Richtung wird entsprechend Bild 6-29 zunächst die Umgebung des Roboters nach **Hindernissen** abgesucht. Dabei werden sowohl mit Hilfe des Laserscanners erkannte als auch in der Umgebungskarte verzeichnete Hindernisse berücksichtigt. Für die Evaluierung werden innerhalb einer bestimmten Distanz das am nächsten liegende Hindernis, das in Richtung der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung liegt (Wand oder Zwischenziel), sowie das nächste Hindernis, das zwischen der vorgegebenen Fahrtrichtung und dem geplanten Pfad liegt (Hindernis zur Umfahrung), gesucht. Wurde kein Hindernis innerhalb der gegebenen Distanz zum Roboter erkannt, wird die Bahn direkt anhand der Benutzereingaben modifiziert. Wurde nur ein Hindernis in der vorgegebenen Bewegungsrichtung gefunden, wird abhängig vom Winkel zwischen der von Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung und dem Hindernis das Bewegungsverhalten »Wandnahes Fahren« oder das »Anfahren eines Zwischenziels« aktiviert. Wurde nur ein Hindernis zwischen der vorgegebenen Bewegungsrichtung und dem geplanten Pfad gefunden, findet eine entsprechende Neuplanung des Pfads in der vorgegebenen Umfahrrichtung statt.

Wurden Hindernisse sowohl in der vorgegebenen Bewegungsrichtung als auch zwischen der vorgegebenen Bewegungsrichtung und dem geplanten Pfad gefunden, ist eine genauere Betrachtung der Lage dieser Hindernisse zueinander notwendig, um zu entscheiden, ob ein Bewegungsverhalten aktiviert oder der Pfad neu geplant werden muss.

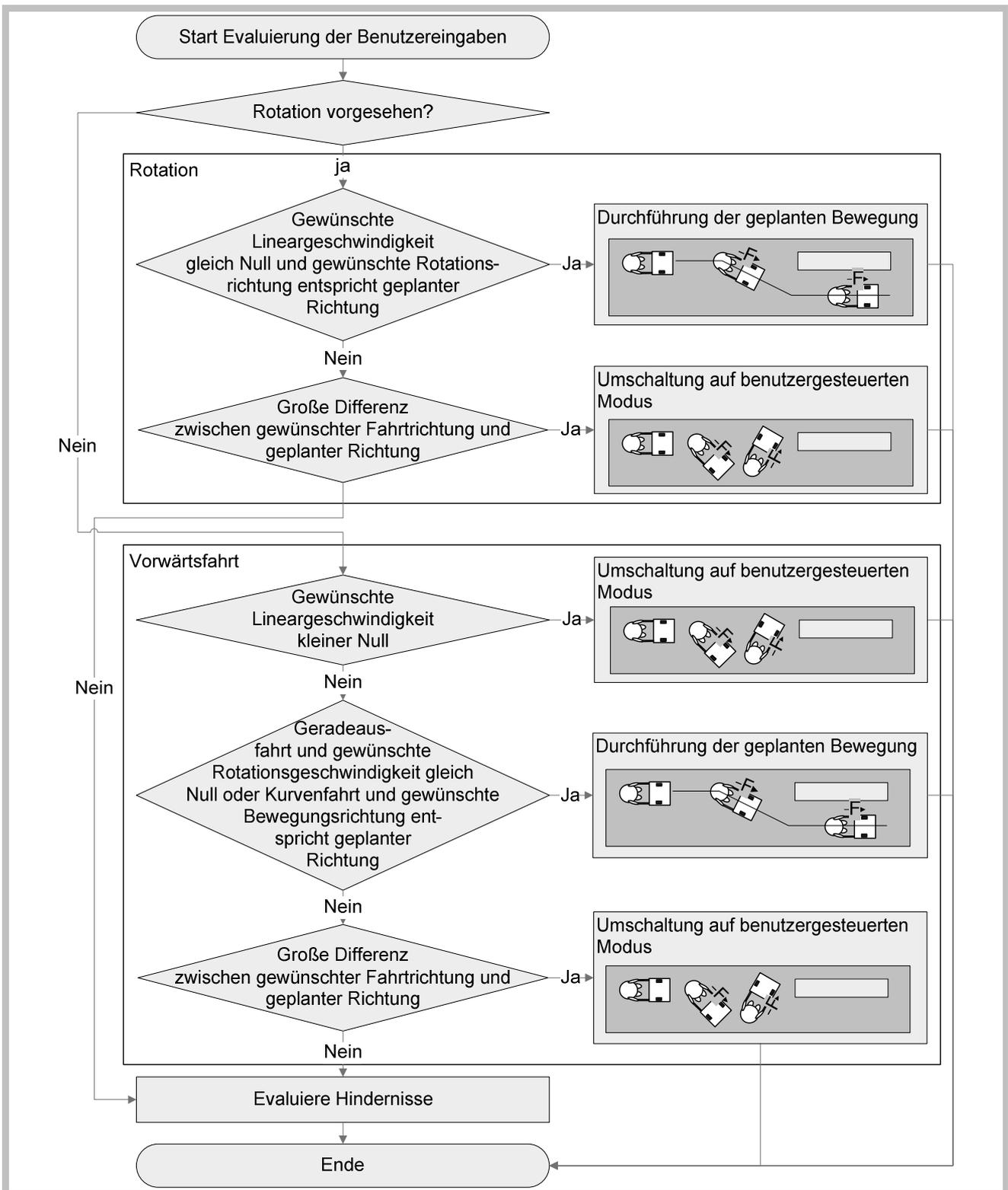


Bild 6-28: Evaluierung der Benutzereingaben.

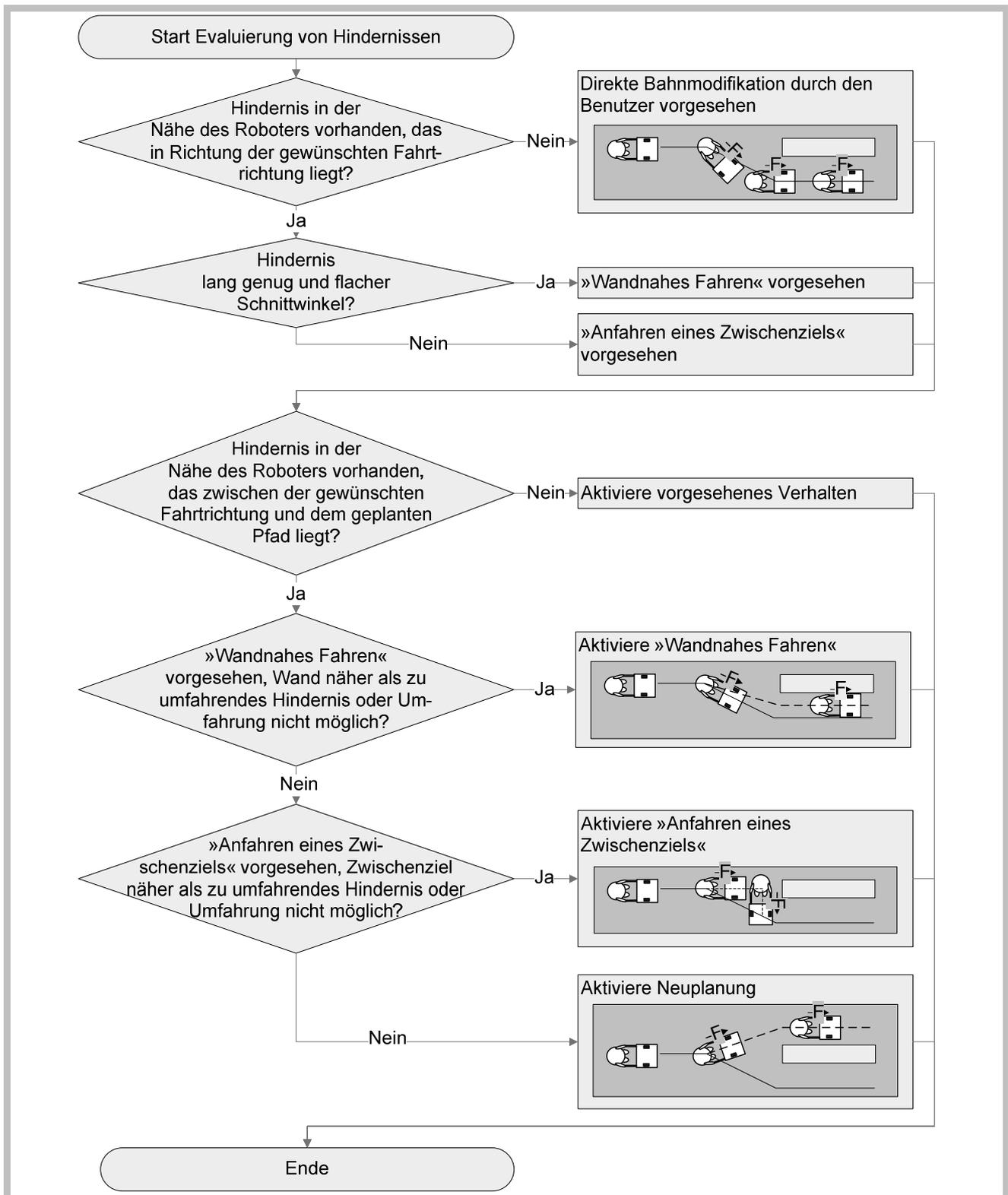


Bild 6-29: Evaluierung in der Umgebung des Roboters befindlicher Hindernisse

Die **Parameter** der verschiedenen Bahnmodifikationen werden nachfolgend dargestellt. Entsprechend Bild 6-30, links, wird das anzufahrende Zwischenziel Z in Richtung der vorgegebenen Fahrtrichtung in einem passenden Abstand $dist$ vor das zugehörige Hindernis gelegt. Für das wandnahe Fahren wird entsprechend Bild 6-30, rechts, ein Teilsegment w der ausgewählten Wand verwendet. Dieses führt von der Schnittstelle zwischen der Wand mit der Geraden, die die Verlängerung der vorgegebenen Fahrtrichtung darstellt, bis zum entfernten Ende des Wandsegments. Der für die Entscheidung zwischen der Aktivierung des »Wandnahes Fahrens« oder des »Anfahrens eines Zwischenziels« herangezogene Schnittwinkel α ist in den Graphiken ebenfalls dargestellt.

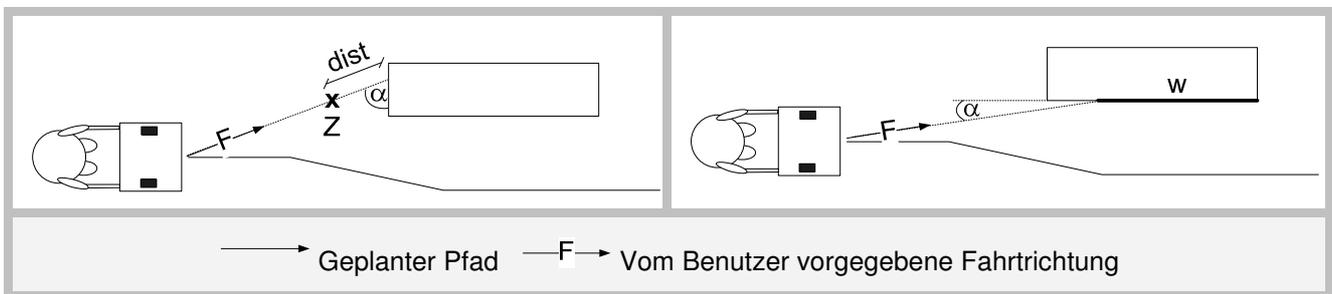


Bild 6-30: Beispiele für die Parameterermittlung der Bewegungsverhalten »Anfahren eines Zwischenziels« und »Wandnahes Fahren«.

Für die Neuplanung des Pfads werden zwei zusätzliche Bahnpunkte in Verlängerung der Gerade zwischen der aktuellen Position des Roboters und dem Eckpunkt des zu umfahrenden Hindernisses errechnet. Abhängig von der Position des globalen Fahrziels werden einer oder beide dieser Punkte als Parameter an die Neuplanung weitergegeben. Ausgehend von der aktuellen Position des Roboters wird mit Hilfe des globalen Planers ein Pfad zum ersten Bahnpunkt errechnet, dann vom ersten zum zweiten Bahnpunkt und von diesem zum Ziel. Schließlich werden die Teilpfade zu einem neuen Bewegungspfad zusammengesetzt, der durch die zusätzlichen Bahnpunkte führt. Bild 6-31, links zeigt die Variante, in der nur einer der Punkte verwendet wird, da die Gerade vom Zwischenpunkt $P1$ zum Ziel das zu umfahrende Hindernis nicht schneidet. Bild 6-31, rechts zeigt den Fall, in dem für die Neuplanung beide Bahnpunkte $P1$ und $P2$ berücksichtigt werden.

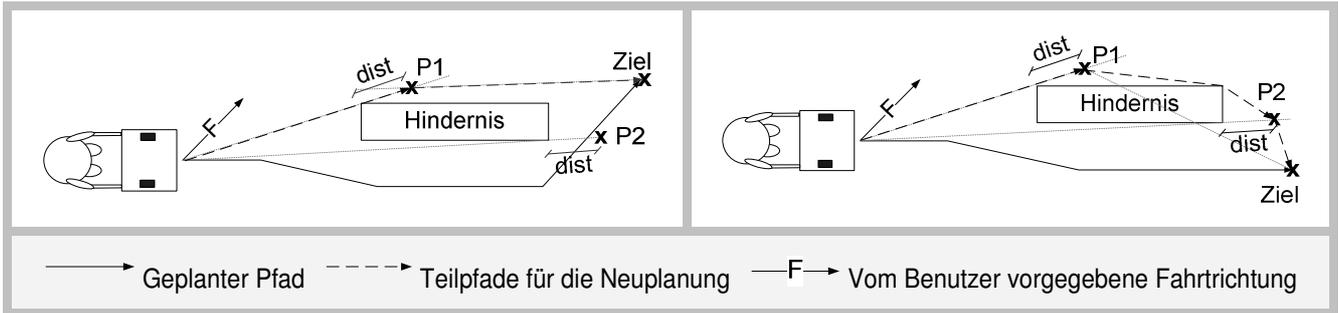


Bild 6-31: Beispiele für die Parameterermittlung bei der Neuplanung des Pfads.

Wie in Bild 6-29 dargestellt, ist für die Entscheidung, ob ein Bewegungsverhalten aktiviert oder der Pfad neu geplant wird, eine Evaluierung der **Lage der Hindernisse zueinander** notwendig. Bild 6-32 zeigt verschiedene Beispielszenarien, welche die korrekte Auswahl einer geeigneten Bahnmodifikation bei mehreren in der Umgebung befindlichen Hindernissen visualisieren (hier: Entscheidung zwischen »Wandnahem Fahren« und Neuplanung).

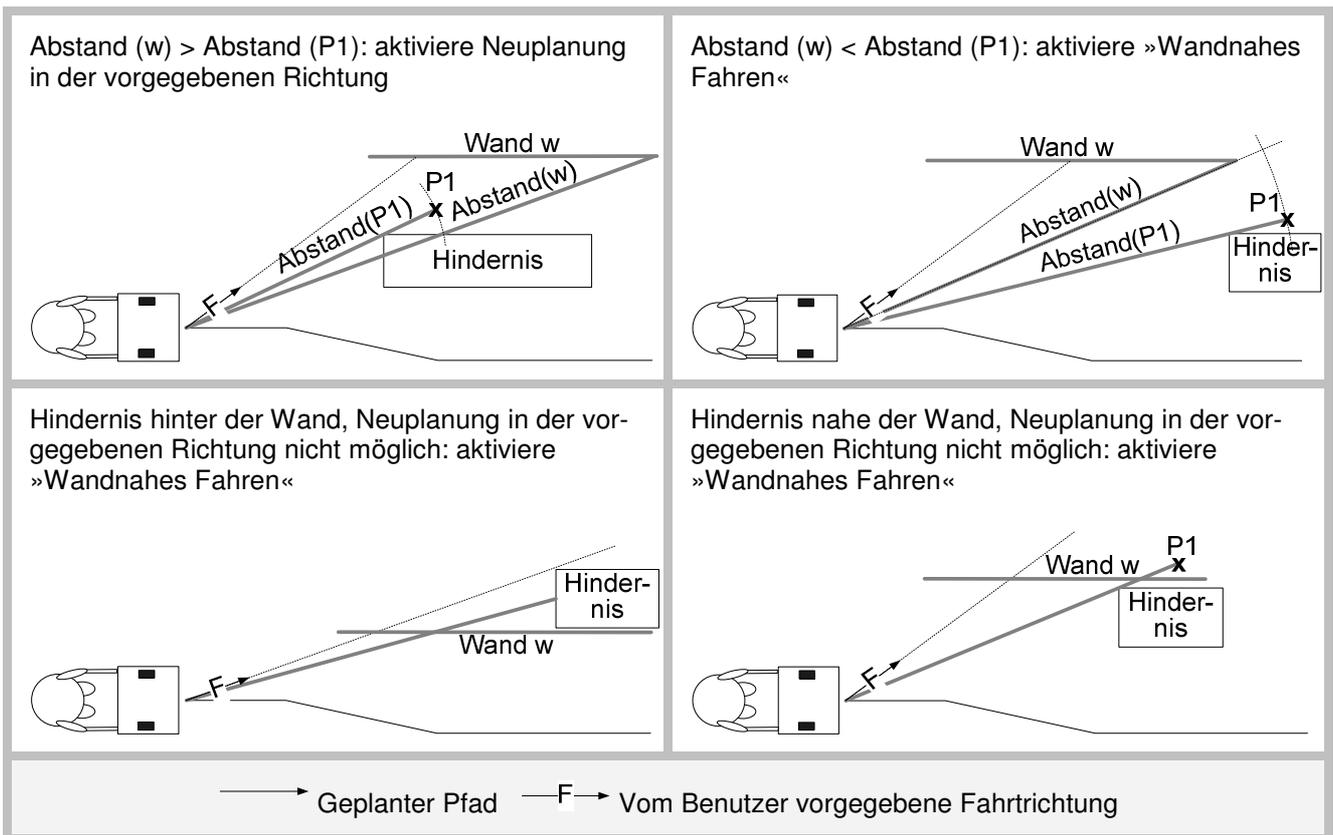


Bild 6-32: Beispielszenarien für die Entscheidung zwischen der Aktivierung des Bewegungsverhaltens »Wandnahes Fahren« oder der Neuplanung des Pfads.

6.4.4 Beispielabläufe für die Aktivierung von Bahnmodifikationen

Die korrekte Funktion der anhand der Benutzereingaben aktivierten Bahnmodifikationen lässt sich im Simulationsmodus der Gehhilfesteuerung verifizieren. Bild 6-34 bis Bild 6-37 zeigen Beispielabläufe für die Aktivierung der direkten Bahnmodifikation, des wandnahen Fahrens, des Anfahrens eines Zwischenziels und der Neuplanung bei Abweichungen der durch den Benutzer vorgegebenen von der geplanten Fahrtrichtung in der graphischen Benutzeroberfläche der Plattformsteuerung. Die vom Benutzer vorgegebene Fahrtrichtung wird dabei mit Hilfe einer Linie visualisiert, die vom Roboter in die vorgegebene Fahrtrichtung zeigt. Die Länge der Linie ist durch den maximalen Hindernisabstand, der für die Hindernisevaluierung vorgesehen ist, definiert. Zusätzliche Linien markieren ausgehend von der Roboterposition die für die Auswahl der geeigneten Bahnmodifikation berücksichtigten Hindernisse in der vorgegebenen Fahrtrichtung sowie zwischen der vorgegebenen und der geplanten Fahrtrichtung (Bild 6-33).

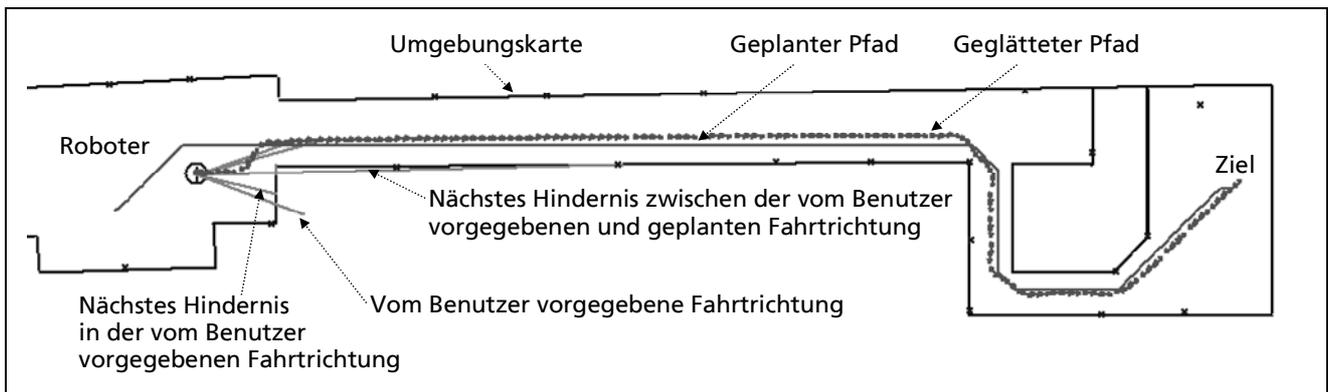
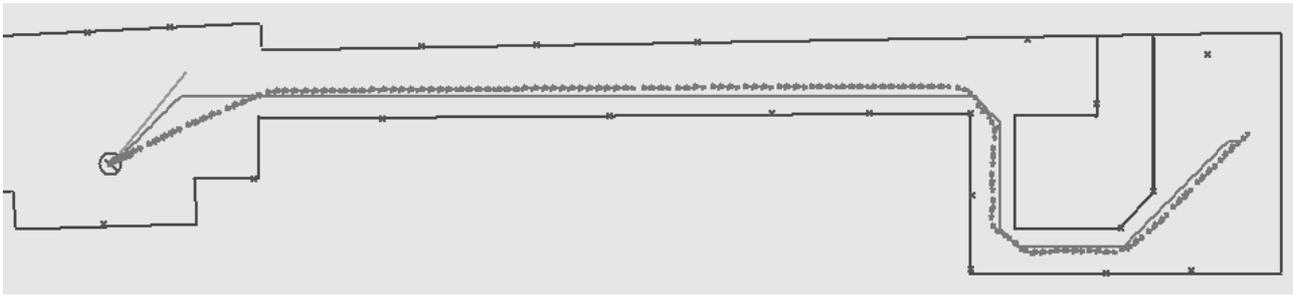
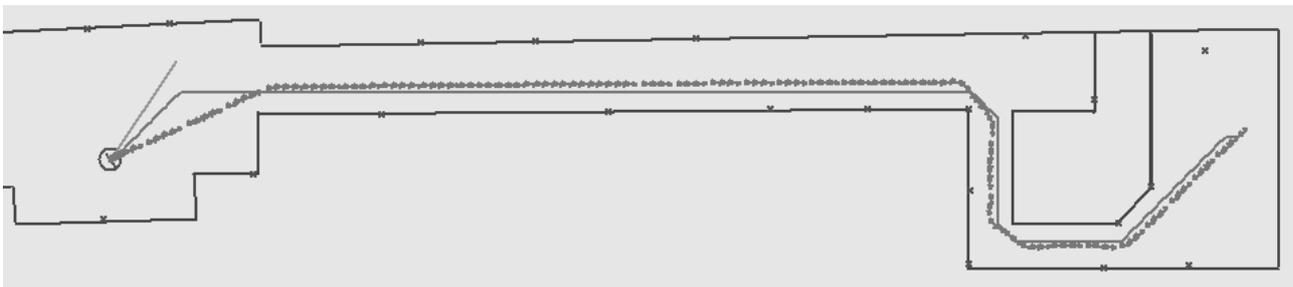


Bild 6-33: Beschreibung der in der Gehhilfesteuerung visualisierten Elemente

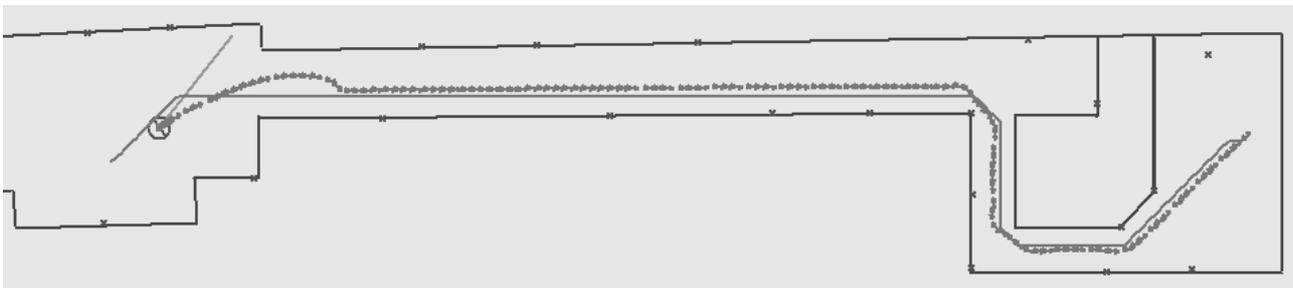
Ursprünglicher Pfad, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung.



Ursprünglicher Pfad, Benutzer schiebt nach links.



Geänderter Pfad, Benutzer schiebt nach links.



Pfad zieht sich wieder zusammen, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung.

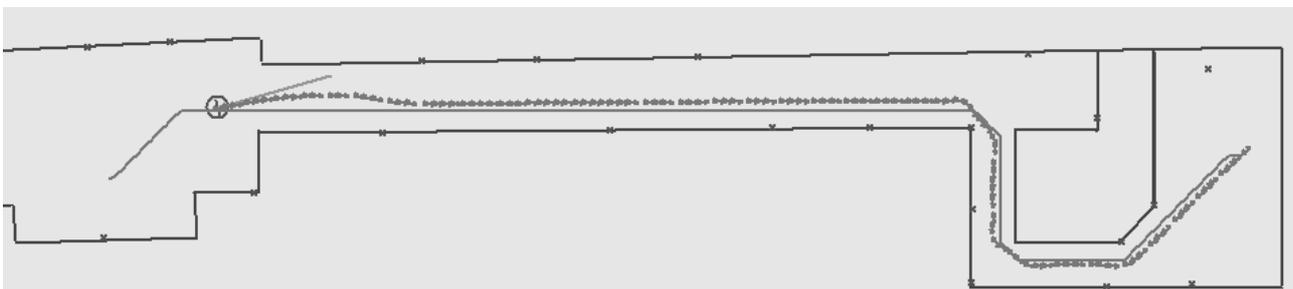
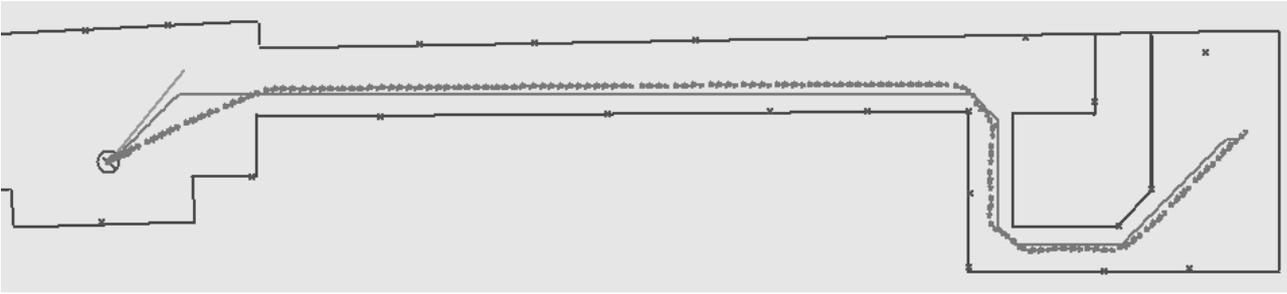
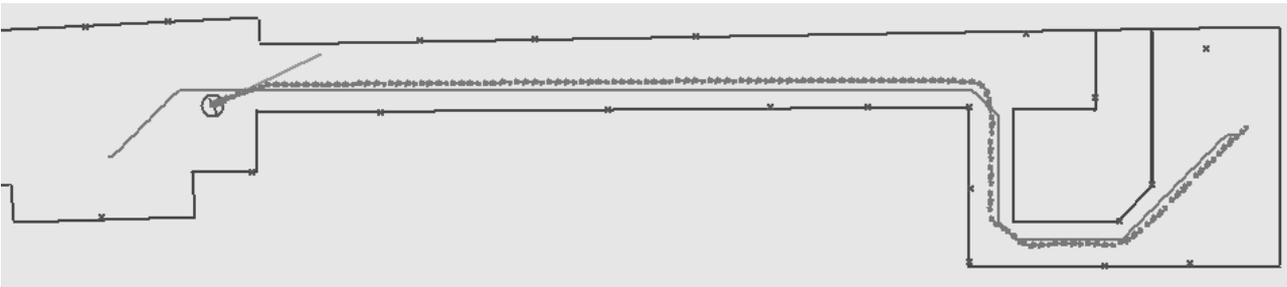


Bild 6-34: Beispielablauf für die direkte Bahnmodifikation durch den Benutzer.

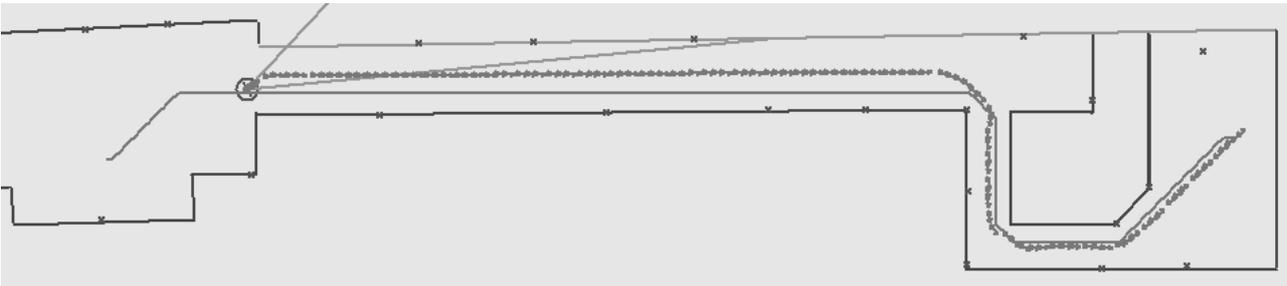
Ursprünglicher Pfad, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung (Geradeausfahrt).



Ursprünglicher Pfad, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung (Kurvenfahrt).



Aktivierung des wandnahen Fahrens, Benutzer schiebt entgegen der geplanten Fahrtrichtung zur Wand.



Wandnahes Fahren bleibt aktiv bis an der Wand vorbeigefahren, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung.

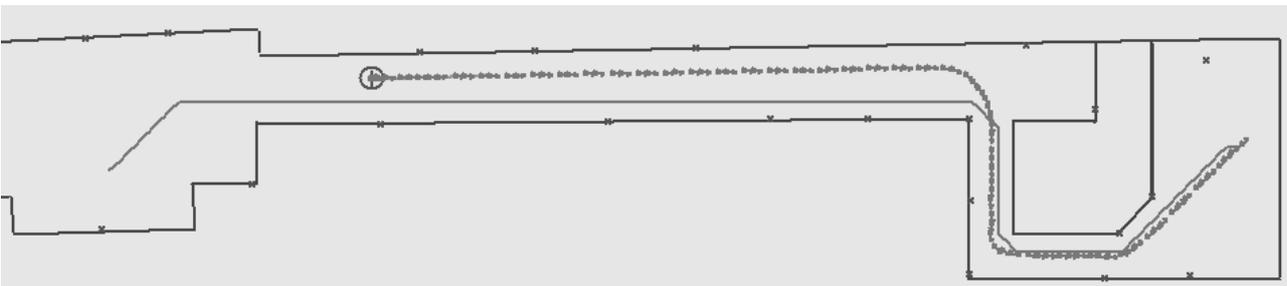
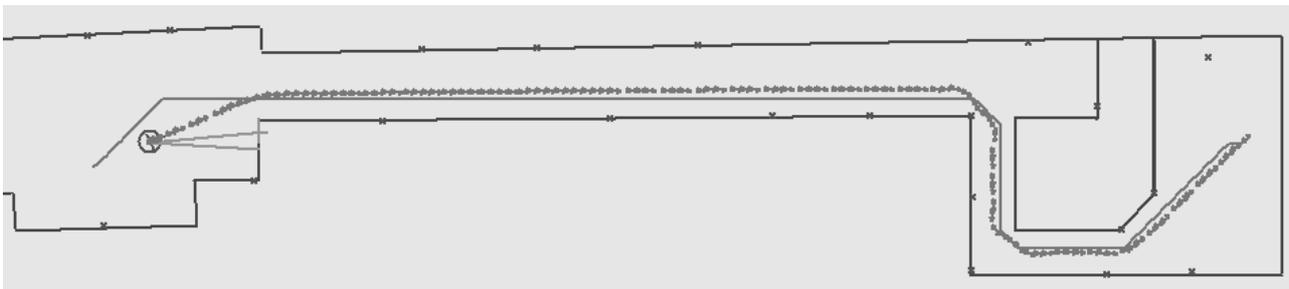
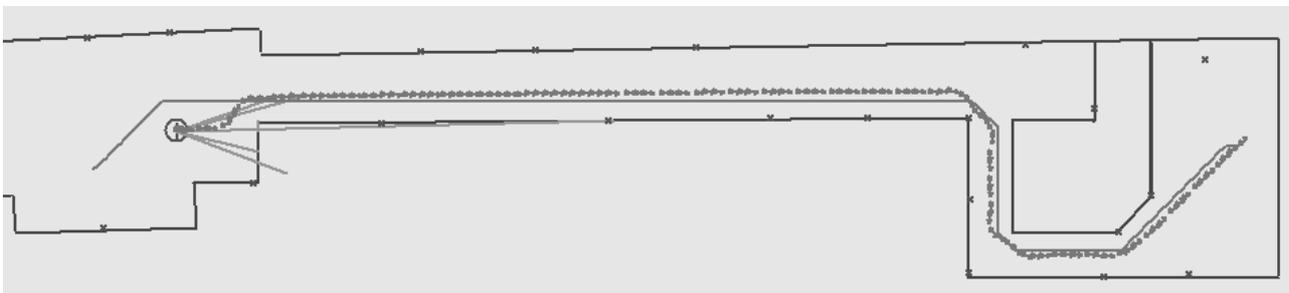


Bild 6-35: Beispielablauf für die Aktivierung des »Wandnahen Fahrens«.

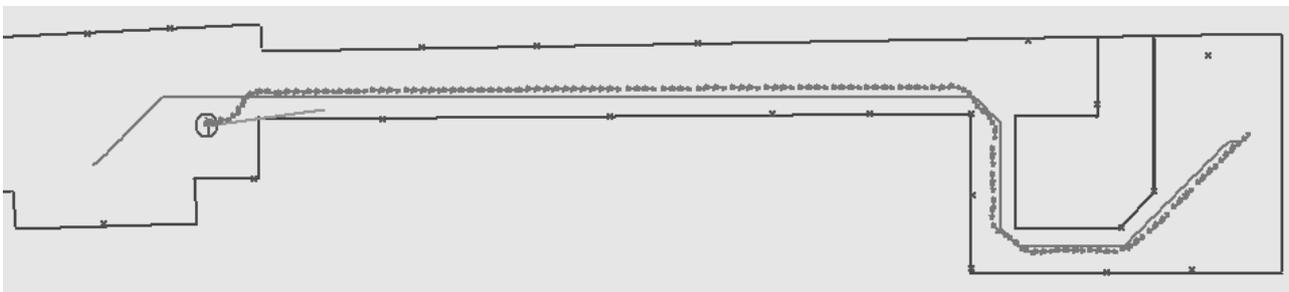
Aktivierung des Anfahrens eines Zwischenziels, Benutzer schiebt entgegen der geplanten Fahrtrichtung senkrecht auf Objekt zu.



Anfahren eines Zwischenziels und entsprechende Bahnänderung aktiv, Benutzer schiebt weiter senkrecht auf Objekt zu.



Anfahren eines Zwischenziels und entsprechende Bahnänderung aktiv, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung.



Anfahren eines Zwischenziels beendet, nachdem am Objekt vorbeigefahren.

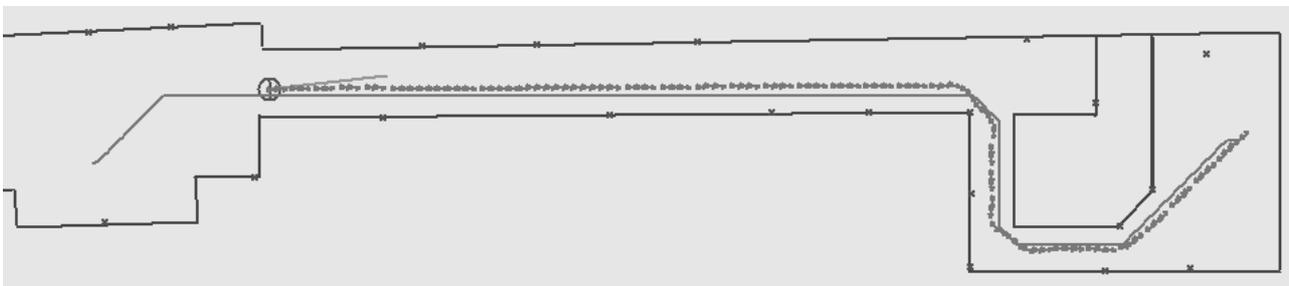
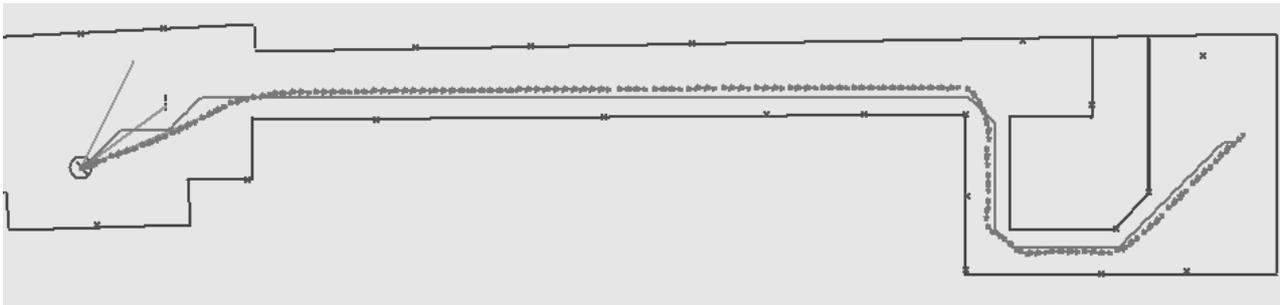
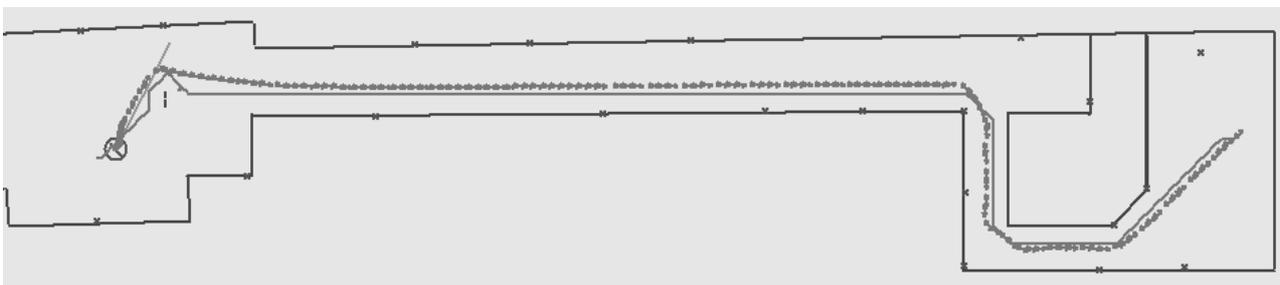


Bild 6-36: Beispielablauf für die Aktivierung des »Anfahrens eines Zwischenziels«.

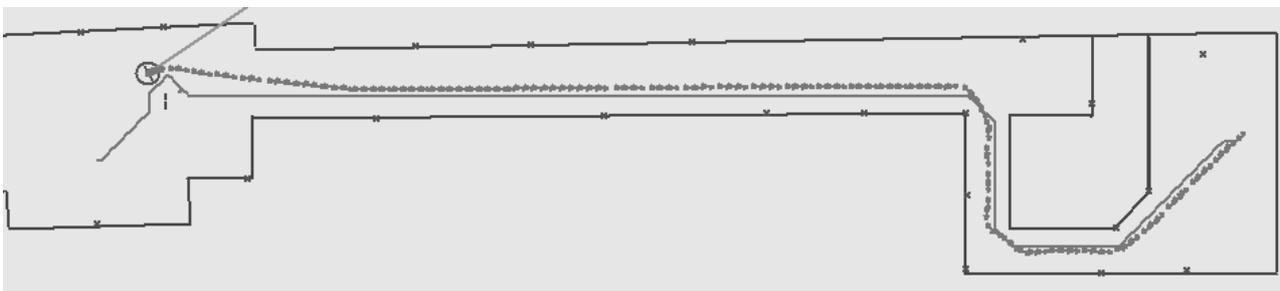
Pfad auf der rechten Seite des Hindernisses vorbeigeplant, Benutzer schiebt nach links.



Optimierter Pfad nach Neplanung, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung.



Hindernis wird auf der anderen Seite umfahren, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung.



Hindernisumfahrung beendet, Benutzer schiebt in Fahrtrichtung.

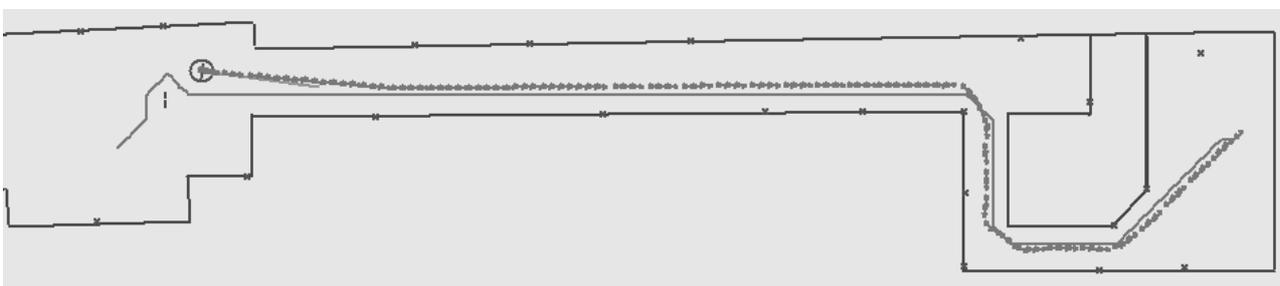


Bild 6-37: Beispielablauf für die Neplanung.

6.4.5 Realisierung der graphischen Benutzeroberfläche für den Betrieb des Care-O-bot® II als intelligente Gehhilfe

Die graphische Benutzeroberfläche für den Betrieb des Care-O-bot® II als roboterbasierte Gehhilfe dient als primäres Eingabemedium für den Benutzer. Sie ist so einfach wie möglich gehalten, um eine intuitive Bedienung auch durch im Umgang mit technischen Hilfsmitteln ungeübten Personen zu ermöglichen (Bild 6-38).

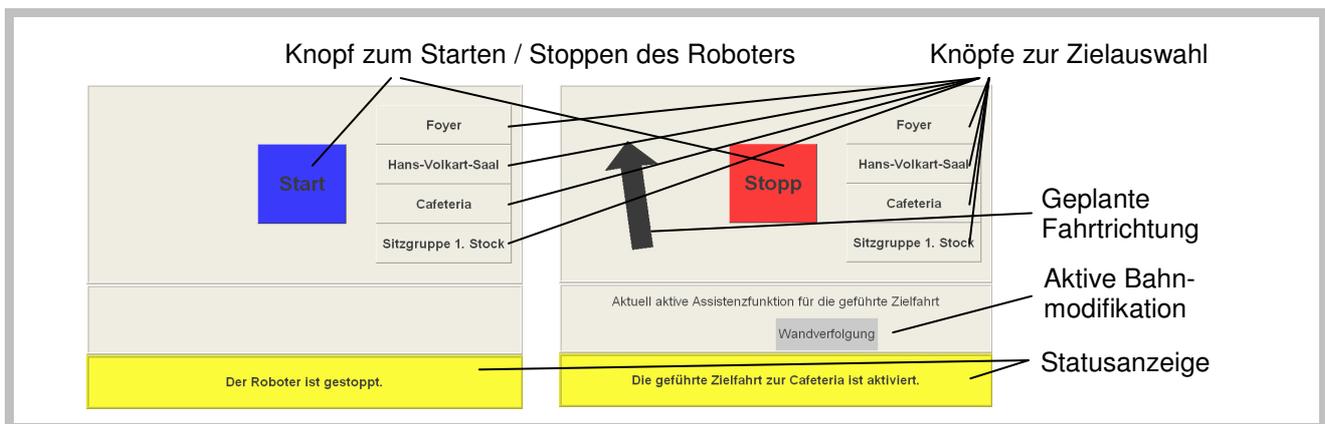


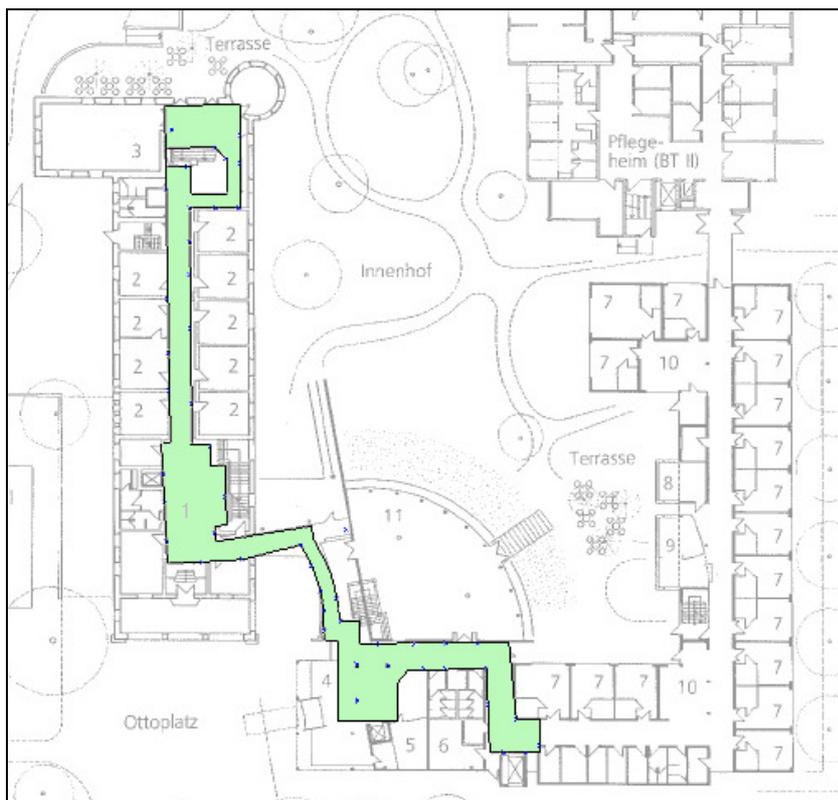
Bild 6-38: Graphische Benutzerschnittstelle für den Betrieb des Care-O-bot® II als intelligente Gehhilfe.

Für die Eingaben des Benutzers stehen ein Knopf zum Starten und Anhalten des Roboters sowie mehrere Knöpfe zur Zielauswahl bereit. Wird der Start-Knopf direkt gedrückt, schaltet der Roboter in den benutzergesteuerten Modus. Wird ein Ziel gewählt, wird der Zielführungsmodus aktiviert. Die Raumkoordinaten der auf den Knöpfen textuell dargestellten Ziele sind im Programm hinterlegt und werden bei Betätigung des Knopfes an die Plattformsteuerung weitergegeben. Die Bahnplanung errechnet dann den kürzesten Pfad zum Ziel. Die vorgesehene Fahrtrichtung wird in Form eines Richtungspfeils am Touchscreen angezeigt. Werden aufgrund der Benutzereingaben an den Gehhilfegriffen spezielle Bahnmodifikationen aktiviert, wird dies ebenfalls am Touchscreen ausgegeben. Außerdem wird der aktuelle Betriebszustand angezeigt und bei Änderungen per Sprache ausgegeben. Über den Stopp-Knopf werden sowohl der benutzergesteuerte Modus als auch die Zielführung angehalten.

7 Erprobung des Steuerungssystems im Seniorenheim

7.1 Testumgebung

Das Steuerungssystem wurde im Rahmen eines Benutzertests im Parkheim Berg in Stuttgart erprobt. Dieses besteht aus drei Gebäuden, die über Gänge im Erdgeschoss und teilweise auch in den oberen Stockwerken verbunden sind. Für die Praxistests wurden repräsentative Zielpositionen in zwei dieser Gebäude ausgewählt. Für die Evaluierung der Zielführung über mehrere Stockwerke wurden mehrere Zielpositionen im Erdgeschoss und eines im ersten Stock ausgewählt. Bild 7-1 und Bild 7-2 zeigen die Grundrisse der zwei Stockwerke sowie die zugehörigen Umgebungskarten des Roboters. Der Fahrbereich im Erdgeschoss umfasst einen Bereich von ca. 40 x 70 m, im ersten Stock von ca. 10 x 20 m.



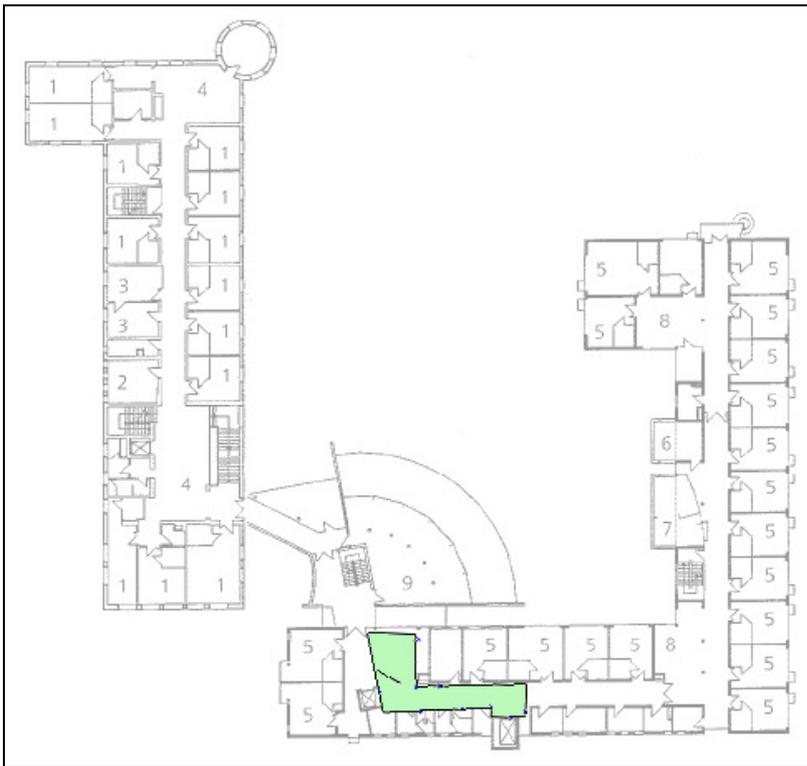
Legende Altbau:

- 1 Foyer
- 2 Büro
- 3 Versammlungssaal

Legende Neubau:

- 4 Eingangshalle
- 5 Kiosk
- 6 Friseur
- 7 Bewohner
- 8 Bad
- 9 Schwester
- 10 Wohnbereich
- 11 Cafeteria

Bild 7-1: Grundriss Erdgeschoss und entsprechende Umgebungskarte des Roboters.



Legende Altbau:

- 1 Bewohner
- 2 Bad
- 3 Schwester
- 4 Wohnbereich

Legende Neubau:

- 5 Bewohner
- 6 Bad
- 7 Schwester
- 8 Wohnbereich
- 9 Ergotherapie

Bild 7-2: Grundriss 1. Stock und entsprechende Umgebungskarte des Roboters.

7.2 Testpersonen

An den Tests beteiligten sich sechs Bewohner des Parkheims Berg. Die Verteilung von Alter, Geschlecht und benötigten Hilfsmitteln der Testpersonen ist in Bild 7-3 dargestellt.

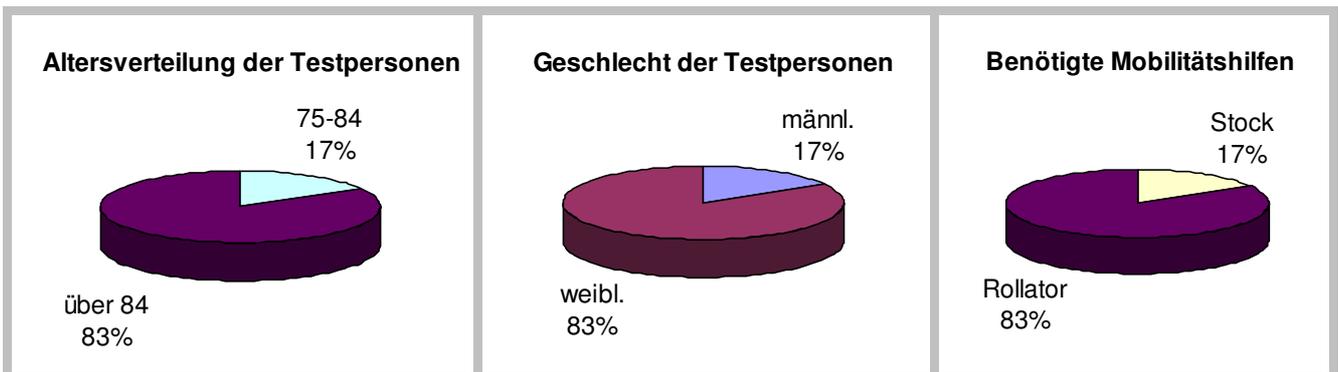


Bild 7-3: Verteilung von Alter, Geschlecht und Hilfsmittel der Testpersonen; N=6.

7.3 Beschreibung und Ergebnisse der durchgeführten Tests

7.3.1 Vergleich der konventionellen und der roboterbasierten Gehhilfe

Für den Vergleich beim Gehen mit einer konventionellen und der roboterbasierten Gehhilfe wurde eine Teststrecke ausgewählt, die von den Probanden sowohl mit einem Rollator als auch mit der roboterbasierten Gehhilfe begangen wurde. Die Strecke führte vom Foyer des Heims zum Versammlungssaal, der sowohl für regelmäßige Kurse als auch für spezielle Veranstaltungen wie Diavorträge genutzt wird. Dadurch dass diese Veranstaltungen nicht täglich stattfinden, ist der Weg den Bewohnern weniger vertraut – im Gegensatz z. B. zum Weg, der zur Cafeteria führt – und somit für die Evaluierung des Steuerungssystems besonders interessant.

Um einen direkten Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen, wurden alle Testläufe von derselben Position gestartet und auch an dieser beendet. Dabei wurde der Proband zunächst gebeten, auf einem Stuhl Platz zu nehmen. Dann wurde die Gehhilfe vor den Probanden platziert, so dass dieser – nachdem er sich unter Zuhilfenahme der Gehhilfegriffe aufgestellt hatte – von immer derselben Position den Weg zum Versammlungssaal starten konnte. Zunächst musste der Proband das Foyer durchqueren, das mit einer Breite von ca. 6,0 m ausreichend Platz zum Ausweichen entgegenkommender Personen bot. Nachfolgend führte der Weg einen 3 m breiten Flur im Verwaltungstrakt entlang, der an einigen Stellen durch Tische und Stühle auf eine Breite von 2 m verengt war. Am Ende des Flurs musste der Proband eine 90-Grad-Drehung beschreiben, um auf die Rampe zu gelangen, die ihn mit einer weiteren 90-Grad-Kurve nach unten führte. Mit einer Breite von 1,3 m bot die Rampe nur Platz für eine Person. Eine besondere Schwierigkeit beim Befahren der Rampe war dadurch gegeben, dass sie nach einer allmählichen Neigung am Ende eine besonders steile Stelle aufwies. Am Fuße der Rampe wurde vor dem Versammlungssaal ein weiterer Stuhl als Zielposition für die Testfahrt aufgestellt. Bild 7-4 zeigt die genannten Streckenabschnitte für die erste Testreihe im Detail.



Bild 7-4: Weg vom Foyer zum Versammlungssaal: Foyer, Flur im Verwaltungstrakt, Rampe von oben und von unten gesehen.

Die beschriebene Strecke wurde von jedem Probanden zunächst mit einem Rollator, dann mit der roboterbasierten Gehhilfe im benutzergesteuerten und nachfolgend im Zielführungsmodus begangen. Letzterer führte den Benutzer direkt vor den als Zielposition aufgestellten Stuhl, wobei am Ende der Strecke eine Drehung des Roboters auf der Stelle stattfand, um den Benutzer direkt vor den Stuhl zu platzieren. Der während des ersten Tests verwendete Rollator war ebenso wie der Roboter mit Sensoren zur Zeit- und Streckenmessung ausgestattet, so dass für alle Versuche die Fahrzeit, Streckenlänge sowie Durchschnitts- und Maximalgeschwindigkeit gemessen werden konnten. Am Roboter wurde zusätzlich der Verlauf dieser Größen protokolliert.

Der erste Testlauf zum Versammlungssaal wurde von allen sechs Testpersonen mit dem **konventionellen Rollator** durchgeführt. Dabei wurde folgendes beobachtet:

- Drei der Testpersonen zeigten Schwierigkeiten beim Heruntergehen der Rampe. Insbesondere im letzten, steilen Teil beschleunigte der Rollator unkontrolliert, so dass die Benutzer ihm nur mit Mühe folgen konnten. Keiner der Probanden verwendete die Handbremse des Rollators, um diesen abzubremesen.
- Eine der Testpersonen hatte zusätzliche Schwierigkeiten beim Hinaufgehen der Rampe, da die erforderliche Kraft für das Schieben des Rollators auf der Rampe höher war als auf ebenem Untergrund.
- Drei der Testpersonen blieben beim Hinauffahren der Rampe mit den Griffen am Geländer hängen. Eine der Testpersonen, die zusätzlich eine Sehbehinderung hat, hatte auch beim Gehen im Flur Schwierigkeiten, nicht mit den dort stehenden Stühlen oder der Wand zu kollidieren. Ihre Fahrtrichtung musste deshalb immer wieder von der begleitenden Pflegekraft korrigiert werden.
- Zwei der Testpersonen verpassten zunächst die Abfahrt zur Rampe und liefen auf die Treppe zu. Erst durch mehrmaliges Ansprechen konnten sie angehalten und auf den richtigen Weg gebracht werden.

Die gemessene Länge der Fahrstrecke bei Verwendung der konventionellen Gehhilfe war durch die genannten Unsicherheiten bei der Wegfindung sehr unterschiedlich. Die durchschnittliche Streckenlänge für den Weg zwischen dem Foyer und der Zielposition vor dem Versammlungssaal lag bei korrektem Verfolgen des Wegs bei 45,2 m bei einer Standardabweichung von 1,6 m. Auf dem Hinweg konnten bei den betroffenen Personen, die den korrekten Weg zunächst nicht finden konnten, Fahrstrecken von bis zu 54,7 m und somit Abweichungen von bis zu 9,5 m gemessen werden.

Die Fahrzeiten lagen für eine Strecke je nach Gehgeschwindigkeit zwischen 61 und 102 s. Bei zwei Benutzern, unter anderem demjenigen, der Schwierigkeiten beim Schieben des

Rollators die Rampe hinauf äußerte, war die Fahrzeit für den Rückweg um bis zu 10 s länger als für den Hinweg. Bei einem Probanden, der zunächst nicht den korrekten Weg fand, dauerte der Hinweg 20 s länger als der Rückweg.

Die jeweiligen Durchschnitts- und Maximalgeschwindigkeiten wiesen für den Hin- und Rückweg keine großen Unterschiede auf. Die durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeiten bei Verwendung der konventionellen Gehhilfe lagen für die jeweiligen Benutzer zwischen 0,44 und 0,73 m/s, die Maximalgeschwindigkeiten zwischen 0,57 und 1,06 m/s.

Für den zweiten Testlauf wurde **Care-O-bot® II im benutzergesteuerten Modus** verwendet. Damit war der Benutzer für die Geschwindigkeits- und Richtungssteuerung des Roboters zuständig, während dieser zusätzliche Unterstützung durch die Beschränkung der Fahrgeschwindigkeit sowie durch den automatischen Kollisions- und Stolperschutz bot. Die Geschwindigkeit des Roboters wurde für alle Benutzer auf »schnell«, d. h. eine Maximalgeschwindigkeit von 0,5 m/s, eingestellt. Für einige Benutzer hätte diese Geschwindigkeit auch noch erhöht werden können, was jedoch aufgrund der limitierten Maximalgeschwindigkeiten der Antriebe nicht möglich war. Bild 7-5 zeigt Bilder der Testpersonen beim Begehen des Weges zwischen Foyer und Versammlungssaal mit der roboterbasierten Gehhilfe.



Bild 7-5: Testpersonen auf dem Weg zwischen Foyer und Versammlungssaal.

Dieser Test wurde von allen sechs Testpersonen durchgeführt, wobei der Weg für einen Benutzer aufgrund von Ermüdungserscheinungen verkürzt wurde. Der Test ergab folgendes:

- Mehrere Benutzer zeigten Schwierigkeiten beim Drehen des Roboters auf der Stelle sowie beim Kurven fahren. Dies ist zum einen durch die Geometrie des Roboters bedingt, da der Benutzer nicht selbst auf der Stelle drehen kann, sondern um den Roboter herumgehen und den Roboter somit vor dem Drehen an der passenden Stelle positionieren muss. Des Weiteren unterscheidet sich die Ansteuerung beim Drehen durch das gleichzeitige Ziehen und Schieben an jeweils einem Gehhilfegriff von der Steuerung konventioneller Gehhilfen und erfordert deshalb eine gewisse Eingewöhnungszeit.
- Einige Benutzer empfanden die für die Bewegung des Roboters benötigte Kraft als zu hoch – insbesondere in Kurven. Bei der Auswertung der Sensordaten zeigte sich, dass insbesondere beim Anfahren sowie beim Fahren von Kurven oftmals höhere Kräfte eingegeben wurden, als für die Ansteuerung des Roboters tatsächlich notwendig gewesen wäre. Vermutlich wird dieses Verhalten durch die Trägheit und längere Reaktionszeit des Roboters im Vergleich zu konventionellen Gehhilfen sowie durch das ungewohnte Kurvenverhalten verursacht und kann durch eine größere Auslegung der Antriebe behoben werden.
- Eine erhöhte Geschwindigkeit am Ende der Rampe, wie in mehreren Fällen mit der konventionellen Gehhilfe beobachtet, trat mit dem Roboter aufgrund der Limitierung der Fahrgeschwindigkeit nicht auf. Alle Benutzer fühlten sich laut eigener Aussage auch auf der Rampe sicher gestützt.
- Kollisionen mit dem Geländer oder der Wand traten mit dem Roboter aufgrund des automatischen Kollisionsschutzes ebenfalls nicht auf. Ein Benutzer schob den Roboter während des Gehens im Flur mehrmals bis auf Kollisionsabstand an die Wand heran. Um den Roboter weiter fortbewegen zu können, führte der Benutzer dann eine Drehung

auf der Stelle durch, bis die Wand neben dem Roboter lag und somit eine kollisionsfreie Weiterfahrt möglich war.

- Vor dem als Ziel vorgegebenen Stuhl fuhren die meisten Benutzer eine Kurve mit dem Roboter oder rangierten mehrmals vor und zurück, um sich vor dem Stuhl zu platzieren. In einigen Fällen wurde der Roboter verlassen, als er quer zum Stuhl stand. Auch auf dem Rückweg wurde zunächst ein Bogen gefahren, um den Roboter in die korrekte Fahrtrichtung zu bringen (Bild 7-6, links).
- Einer der Probanden hatte erneut Schwierigkeiten, den richtigen Weg zu finden, obwohl er diesen schon vorher mit dem Rollator begangen war. Dies betraf sowohl die Laufrichtung beim Starten vom Foyer als auch das Auffinden der Rampe zum Versammlungssaal (Bild 7-6, rechts).

Die gemessene Länge der Fahrstrecke bei Verwendung der roboterbasierten Gehhilfe im benutzergesteuerten Modus war der Fahrstrecke mit dem Rollator ähnlich. Auf dem Hinweg konnte für den Weg zwischen dem Foyer und der Zielposition vor dem Versammlungssaal bei korrektem Verfolgen des Wegs eine durchschnittliche Streckenlänge von 45,3 m bei einer Standardabweichung von 1,8 m beobachtet werden. Bei der Person, die den korrekten Weg zunächst nicht finden konnte, betrug die Fahrstrecke 49,3 m, was eine Abweichung von 4,0 m zum Durchschnitt bedeutet. Auf dem Rückweg war die durchschnittliche Fahrstrecke mit 46,5 m und einer Standardabweichung von 1,9 m minimal länger als auf dem Hinweg, was durch das Rangieren und die Kurve beim Verlassen der Zielposition vor dem Versammlungssaal bedingt war.

Die Fahrzeiten bei Verwendung der roboterbasierten Gehhilfe im benutzergesteuerten Modus lagen bedingt durch die limitierte Maximalgeschwindigkeit des Roboters über denen mit der konventionellen Gehhilfe. Für eine Strecke wurden je nach Gehgeschwindigkeit zwischen 113 und 145 Sekunden gemessen.

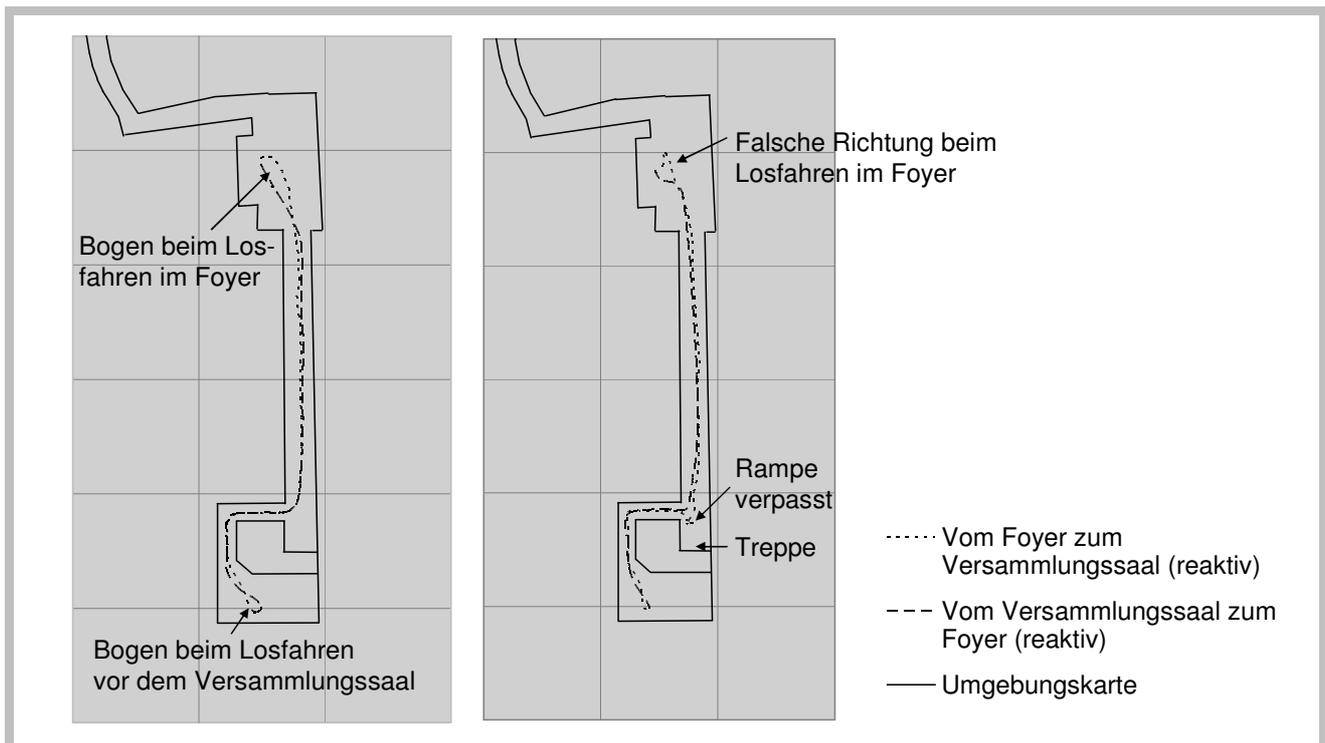


Bild 7-6: Weg zweier Probanden vom Foyer zum Versammlungssaal und zurück bei Verwendung der roboterbasierten Gehhilfe im benutzergesteuerten Modus.

Die durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeiten lagen benutzerabhängig zwischen 0,27 und 0,4 m/s, die Maximalgeschwindigkeiten zwischen 0,36 und dem durch die Roboterhardware vorgegebenen Limit von 0,56 m/s. Damit lagen diese Werte deutlich niedriger als bei der Verwendung der konventionellen Gehhilfe.

Die auf dem Hinweg durchschnittlich eingebrachten Kräfte lagen bei 17,8 N bei einer Standardabweichung von 4,7 N. Die auf dem Hinweg benötigten Kräfte waren dabei wesentlich niedriger als auf dem Rückweg, auf dem durchschnittlich 22,7 N bei einer Standardabweichung von 5,0 N aufgebracht wurden. Die Vermutung, dass die Benutzer an der Rampe stärker schoben als auf der ebenen Strecke, konnte jedoch nur für einen Benutzer bestätigt werden. Alle anderen Benutzer brachten auf dem Rückweg im Flur höhere Kräfte auf. Dies lässt sich möglicherweise damit erklären, dass die Benutzer es eilig hatten, wieder zurück zu kommen, und durch das stärkere Schieben eine höhere Fahrgeschwindigkeit erreichen wollten.

Bild 7-7 fasst die beobachteten Vor- und Nachteile der roboterbasierten im Vergleich zur konventionellen Gehhilfe zusammen.

- + Sicheres Stützen des Benutzers auf herabführenden Rampen
- + Vereinfachte Bedienung, da benötigte Kraft an Steigungen nicht höher als auf ebenen Wegen
- + Vermeidung von Kollisionen durch den automatischen Kollisionsschutz
- Längere Fahrzeit
- Notwendige Kraft zur Ansteuerung höher als bei konventionellen Gehhilfen
- Schwierigkeiten beim Drehen, da der Benutzer um den Roboter herumlaufen muss

Bild 7-7: Vor- und Nachteile der roboterbasierten im Vergleich zur konventionellen Gehhilfe.

Die gelisteten Vorteile der roboterbasierten Gehhilfe können durch konventionelle Gehhilfen nicht erfüllt werden und stellen somit echte Verbesserungen der roboterbasierten gegenüber der konventionellen Gehhilfe dar. Die längere Fahrzeit und der höhere Kraftbedarf beim Gehen mit der roboterbasierten Gehhilfe sowie die Schwierigkeiten einiger Benutzer beim Drehen des Roboters können durch die weitere Optimierung der Roboterhardware gelöst werden und reduzieren sich mit zunehmender Übung des Gehhilfenutzers am Gerät.

Für den dritten Testlauf wurden dem Roboter über den Touchscreen die Ziele »Versammlungssaal« und nach Erreichen desselben »Foyer« eingegeben. Durch diese Auswahl wurde die Gehhilfesteuerung automatisch in den **Zielführungsmodus** geschaltet und die automatische Zielfahrt gestartet. In diesem Test war der Benutzer somit für die Geschwindigkeitssteuerung des Roboters zuständig, während der Roboter den optimalen Weg zum Ziel und damit die Fahrtrichtung selbstständig errechnete und über einen Pfeil am Bildschirm vorgab. Dabei wurden Hindernisse auf dem Weg erkannt und der Weg automatisch um diese herum geführt. Für diesen ersten Test des Roboters im Zielführungsmodus wurden vom geplanten Pfad abweichende Richtungsvorgaben des Benutzers nicht berücksichtigt.

Die automatische Zielfahrt zum Versammlungssaal wurde von fünf Personen durchgeführt. Es konnten folgende Beobachtungen gemacht werden:

- Einige Benutzer empfanden die zur Bedienung des Roboters in diesem Modus benötigten Kräfte höher als im benutzergesteuerten Modus. Für beide Modi wird zwar der gleiche Geschwindigkeitsregler zur Errechnung von Sollgeschwindigkeiten aus den eingebrachten Kräften verwendet. Im Zielführungsmodus wird die Fahrgeschwindigkeit jedoch zusätzlich beim Anfahren und Abbremsen sowie in Kurven entsprechend der vorgegebenen maximalen Krümmung der Bahn eingeschränkt. Damit ist naheliegend, dass die erhöhten Kräfte ähnlich wie im benutzergesteuerten Modus eigentlich nicht notwendig sind, sondern vielmehr dem Wunsch des Benutzers entsprechen, sich schneller als vom Roboter vorgesehen fortzubewegen.
- Insbesondere in Kurven schienen einige Benutzer nicht den Vorgaben des Roboters folgen zu wollen und schoben weiter geradeaus, selbst wenn am Bildschirm eine Drehung vorgegeben wurde. Auch dies kann eine Ursache für die erhöhten Kräfte im Zielführungsmodus darstellen.
- Um alle auftretenden Hindernisse konnte der Roboter den Benutzer sicher herumführen. Bild 7-8 zeigt die Bahn eines der Probanden. Im Flur ist zu erkennen, wie der Roboter um die am linken Rand des Flurs stehenden Tische und Stühle herumgefahren ist. Da diese Hindernisse nicht in der Karte verzeichnet waren, wurden sie mit Hilfe der lokalen Sensorik erkannt und der Pfad wurde entsprechend modifiziert.

Mit einem Durchschnitt von 44,5 Metern und einer Standardabweichung von 0,5 m konnte die Länge der Fahrstrecke bei Verwendung der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus gegenüber dem benutzergesteuerten Modus um fast einen Meter reduziert werden. Durch die automatische Bahnvorgabe wurden größere Abweichungen vermieden und alle Benutzer entlang des kürzesten Wegs zum Ziel geführt. Bild 7-9 vergleicht die Fahrstrecken der einzelnen Probanden in den verschiedenen Modi.

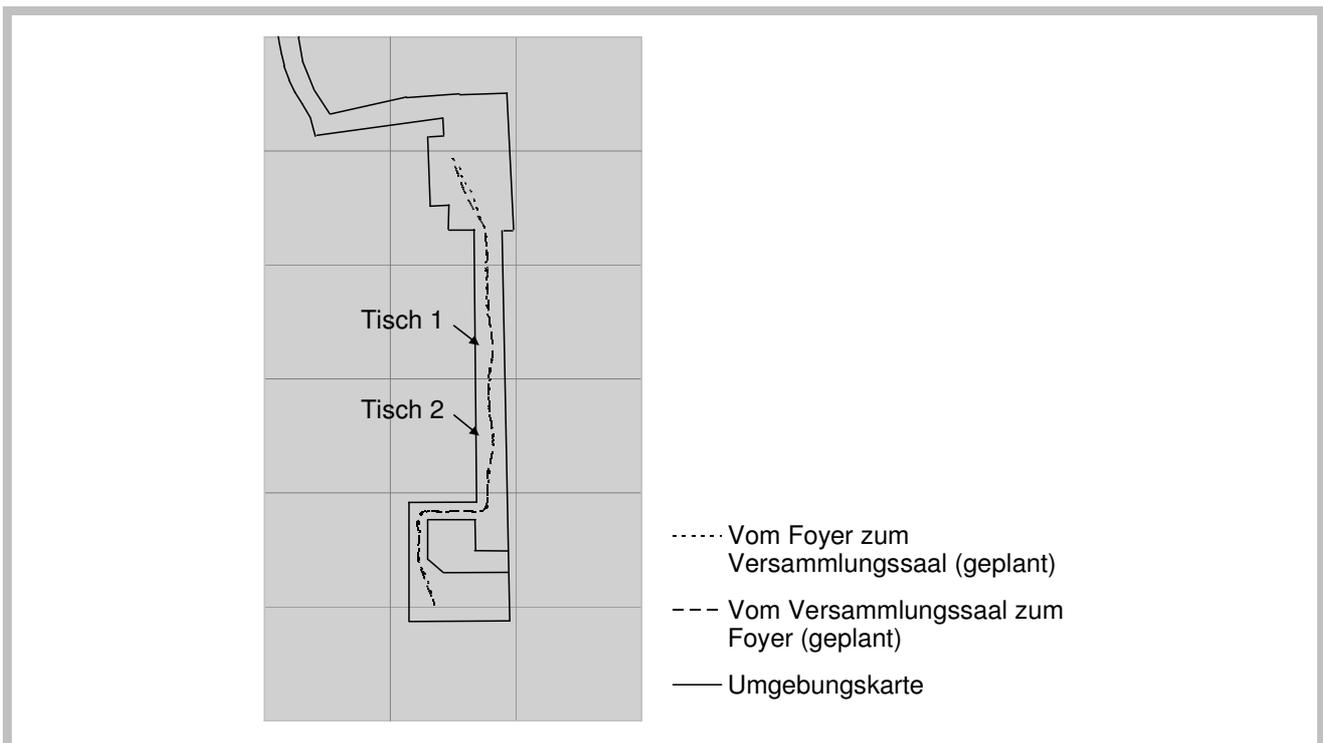


Bild 7-8: Weg eines Probanden vom Foyer zum Versammlungssaal und zurück bei Verwendung der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus.

Die Fahrzeiten bei Verwendung der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus waren trotz der kürzeren Fahrstrecke durchschnittlich zehn Sekunden höher als im benutzergesteuerten Modus. Für eine Strecke wurden je nach Gehgeschwindigkeit Fahrzeiten zwischen 127 und 170 s gemessen. Bild 7-10 zeigt die Fahrzeiten der einzelnen Probanden in den verschiedenen Modi.

Die entsprechenden Durchschnittsgeschwindigkeiten lagen mit 0,18 bis 0,35 m/s trotz identischer Maximalgeschwindigkeiten bis zu 0,1 m/s unter den im benutzergesteuerten Modus gemessenen Werten. Bild 7-11 zeigt die Durchschnittsgeschwindigkeiten der einzelnen Probanden in den verschiedenen Modi.

Bild 7-12 vergleicht die eingebrachten Benutzerkräfte beim Gehen mit der roboterbasierten Gehhilfe im benutzergesteuerten und im Zielführungsmodus.

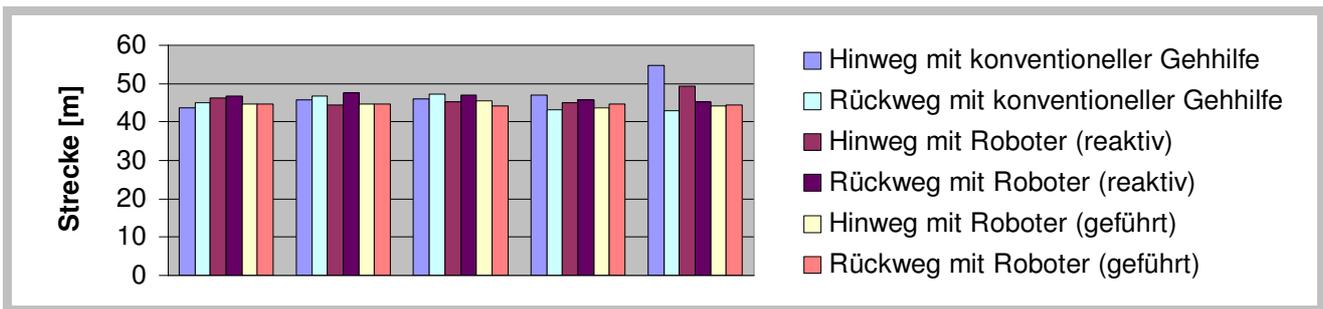


Bild 7-9: Streckenlängen vom Foyer zum Versammlungssaal.

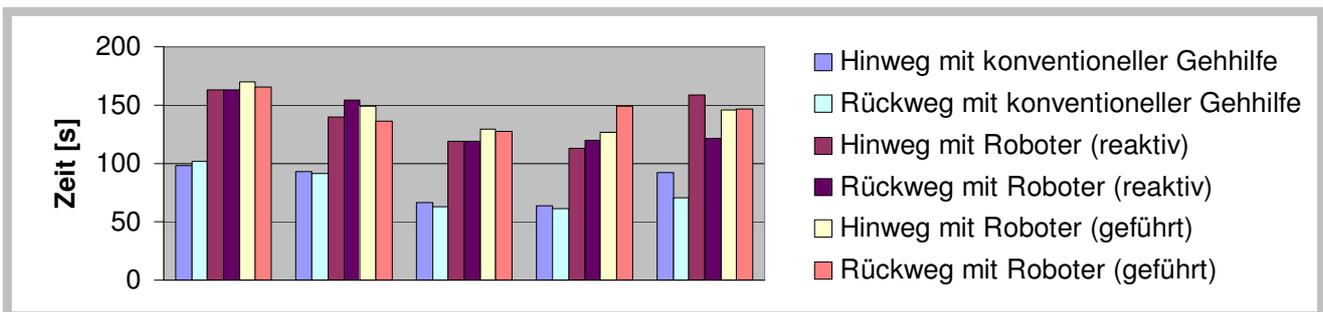


Bild 7-10: Fahrzeiten vom Foyer zum Versammlungssaal.

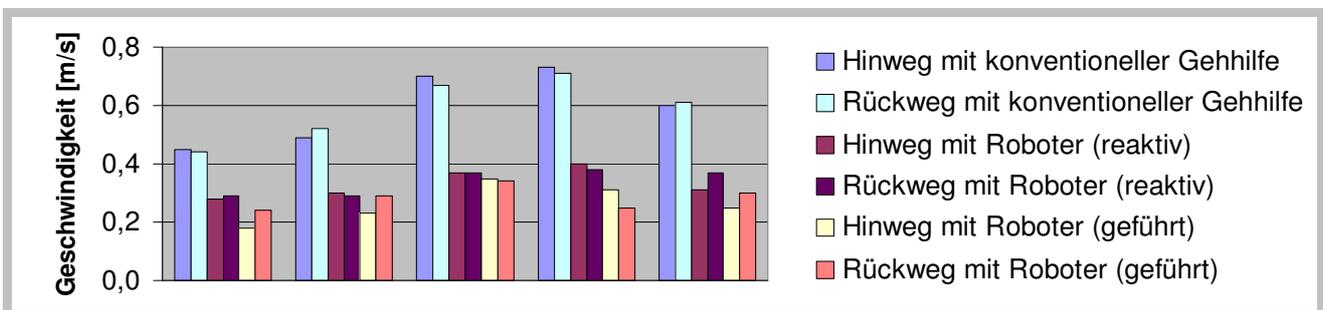


Bild 7-11: Durchschnittsgeschwindigkeiten vom Foyer zum Versammlungssaal.

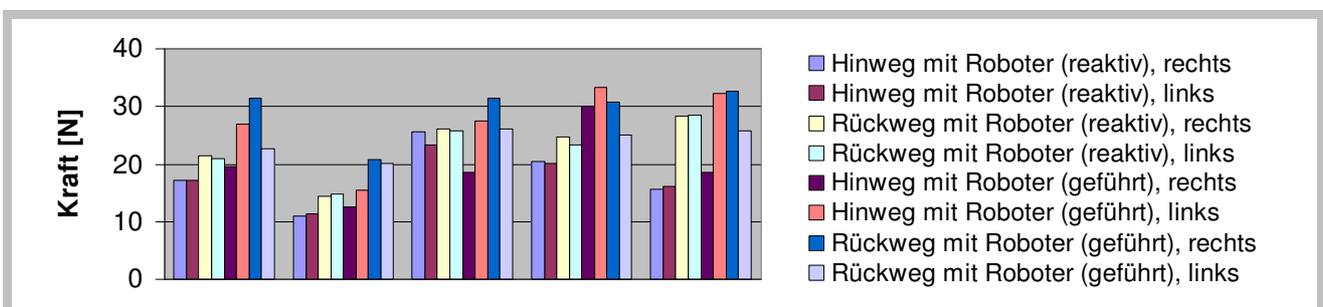


Bild 7-12: Durchschnittliche Benutzerkräfte vom Foyer zum Versammlungssaal.

Bild 7-13 fasst die beobachteten Vor- und Nachteile der automatischen Zielführung der Zielfahrt mit der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus im Vergleich zum benutzergesteuerten Modus zusammen.

- + Zielführung entlang des kürzesten Wegs ohne Umwege, damit verkürzte Fahrstrecke
- + Vermeidung von Kollisionen und Blockaden durch frühzeitige Hinderniserkennung und entsprechende Modifikation des Bewegungspfades
- Erhöhte Fahrdauer durch Widerstand beim Folgen des vorgegebenen Pfads
- Schlechtere Kraftausnutzung durch Widerstand beim Folgen des vorgegebenen Pfads

Bild 7-13: Vor- und Nachteile der Zielfahrt mit der roboterbasierten Gehhilfe im Zielführungsmodus im Vergleich zum benutzergesteuerten Modus.

Durch den Zielführungsmodus können somit weitere wichtige Zusatzfunktionen für den Benutzer der roboterbasierten Gehhilfe bereitgestellt werden. Auch hier können die aufgetretenen Schwierigkeiten durch zunehmende Gewöhnung der Benutzer an die roboterbasierte Gehhilfe sowie die Optimierung der Roboterhardware minimiert werden.

7.3.2 Zielführung über mehrere Stockwerke

Für den Test der Zielführung über mehrere Stockwerke wurde eine Strecke ausgewählt, die den Benutzer von der Startposition im Foyer des Altbaus zunächst zum Eingang der Cafeteria und dann mit Hilfe eines Aufzugs zu einer Sitzgruppe im ersten Stock führte.

Bild 7-14 zeigt die einzelnen Streckenabschnitte auf dem Weg zur Cafeteria. Der Weg vom Foyer führte zunächst über eine gekrümmte Rampe, die als Verbindung des Alt- und Neubaus dient. Die Rampe zum Neubau war mit 1,4 Metern zwar breiter als die zum Versammlungssaal, stellte aber durch die Krümmung zusätzliche Anforderungen an das Navigationssystem und den Gehhilfenutzer. Der nachfolgend zu durchquerende Eingangsbereich des Neubaus war eine größere Halle, in der mehrere Säulen verbaut waren. Von dort führt der Weg einen Flur entlang bis zum Eingang der Cafeteria, in dem normalerweise

sehr viele Personen – auch mit Rollatoren oder Rollstühlen – unterwegs waren, denen der Proband entsprechend ausweichen musste.



Bild 7-14: Weg vom Foyer zur Cafeteria: Flur und Rampe zum Neubau, Eingangshalle und Flur vor der Cafeteria.

Bild 7-15 zeigt die einzelnen Streckenabschnitte auf dem Weg von der Cafeteria in den **ersten Stock**. Dieser Streckenabschnitt führte zum nahe gelegenen Aufzug, der für die Fahrt in den ersten Stock verwendet wurde. Um den Übergang in den ersten Stock zu ermöglichen, platzierte sich der Roboter zunächst neben der Aufzugstüre, um dem Benutzer das Rufen des Aufzugs zu ermöglichen. Der Roboter fuhr dabei zunächst auf eine Zielposition neben der Aufzugstüre und drehte sich dann auf der Stelle, um den Benutzer zum Aufzugsknopf zu führen. Nach Erreichen dieser Position wurde die Zielfahrt gestoppt. Im

benutzergesteuerten Modus konnte der Benutzer selbstständig den Aufzug betreten und in den ersten Stock fahren. Der benutzergesteuerte Modus wurde ebenfalls für das Verlassen des Aufzugs – üblicherweise in Rückwärtsfahrt – verwendet. Da eine geplante Rückwärtsfahrt aufgrund der fehlenden Umgebungssensoren an der Rückseite des Roboters nicht möglich ist, wurde die automatische Zielführung erst nach Verlassen des Aufzugs wieder aktiviert. Die Umgebungskarte für den ersten Stock wurde nach erfolgreichem Stockwerksübergang automatisch geladen. Der letzte Streckenabschnitt führte den Benutzer einen weiteren Flur entlang zum Ziel. Hier positionierte sich der Roboter wiederum vor einem Stuhl, so dass sich der Benutzer setzen konnte.



Bild 7-15: Weg von der Cafeteria zur Sitzgruppe im ersten Stock: Weg zur Aufzugstür im Erdgeschoss, Aufzugstür und Flur im Obergeschoss.

Die Zielführung über mehrere Stockwerke wurde gestartet, indem auf dem Touchscreen die Ziele »Cafeteria« und nach Erreichen derselben »Sitzgruppe 1. Stock« ausgewählt wurden. Auf dem Hinweg wurden vom geplanten Pfad abweichende Richtungsvorgaben des Benutzers – wie auch während der Zielführung bei der vorigen Testreihe – nicht berücksichtigt. Bild 7-16 zeigt Bilder der Testpersonen entlang des Wegs zum erstem Stock.



Bild 7-16: Testpersonen auf dem Weg vom Foyer zum Aufzug sowie beim Betreten des Aufzugs.

Die Zielführung in den ersten Stock wurde von vier der Probanden durchgeführt und brachte folgende Ergebnisse:

- Es konnten mehrmals erfolgreiche Ausweichmanöver der roboterbasierten Gehhilfe beobachtet werden. So war bei einer Testperson der direkte Weg in der Eingangshalle im Erdgeschoss versperrt, so dass der Weg automatisch auf der anderen Seite der Säule herumgeführt wurde (Bild 7-17). Einmal standen Wagen des Putzpersonals am Rand des Flurs im ersten Stock, um die der Roboter den Weg ebenfalls automatisch herumführte (Bild 7-18, links).
- Weitere Ausweichmanöver fanden im benutzergesteuerten Modus statt. Zum Beispiel musste die Zufahrt vor dem Aufzug frei gemacht werden, so dass ein im Aufzug befindlicher Rollstuhlfahrer diesen verlassen konnte. Im ersten Stock musste zweimal einem Sanitäterteam Platz gemacht werden, die einmal aus dem Aufzug kamen und ein anderes Mal diesen nach dem Probanden betreten wollten (Bild 7-18, rechts).
- Bei der Fahrt zum Aufzug wurde ähnlich wie bei der Zielführung zum Versammlungssaal beobachtet, dass die Probanden Schwierigkeiten hatten, sich auf das im Vergleich zu konventionellen Gehhilfen andersartige Kurvenverhalten einzustellen. Drei Benutzer warteten die Drehung des Roboters zum Aufzug nicht ab, sondern bewegten sich selbstständig zum Aufzugsknopf, ohne die Drehung mit dem Roboter durchzuführen.

- Das Betreten des Aufzugs war problematisch, da sich dessen Türen recht schnell wieder schlossen – meist bevor der Proband den Aufzug betreten hatte. Diese Schwierigkeit kann in zukünftigen Realisierungen durch eine direkte Kommunikation der Roboter mit der Aufzugssteuerung gelöst werden.
- Das Verlassen des Aufzugs in Rückwärtsfahrt erwies sich für alle Probanden als schwieriger als das Hineinfahren. Einer der Benutzer drehte den Roboter deshalb trotz des geringen Platzes zum Rangieren im Aufzug um, um diesen wieder vorwärts verlassen zu können (Bild 7-19).

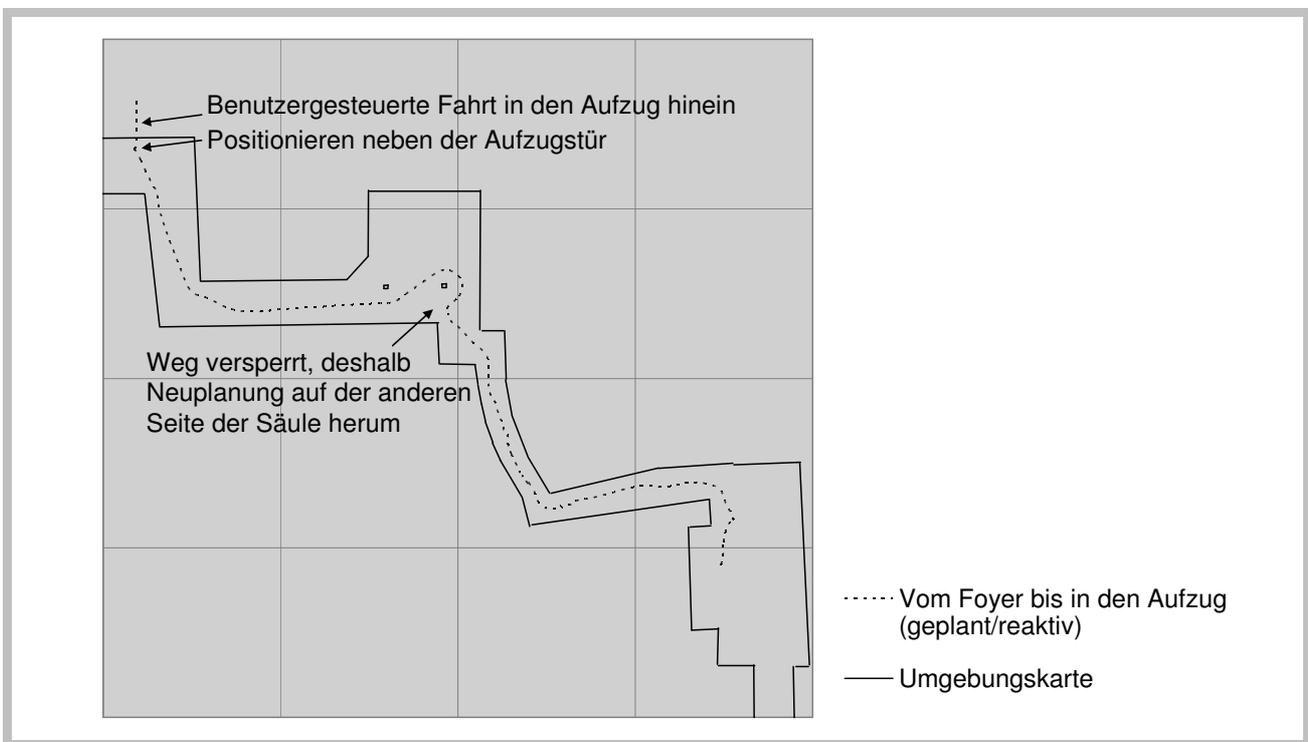


Bild 7-17: Weg eines Probanden vom Foyer zum Aufzug im Erdgeschoss.

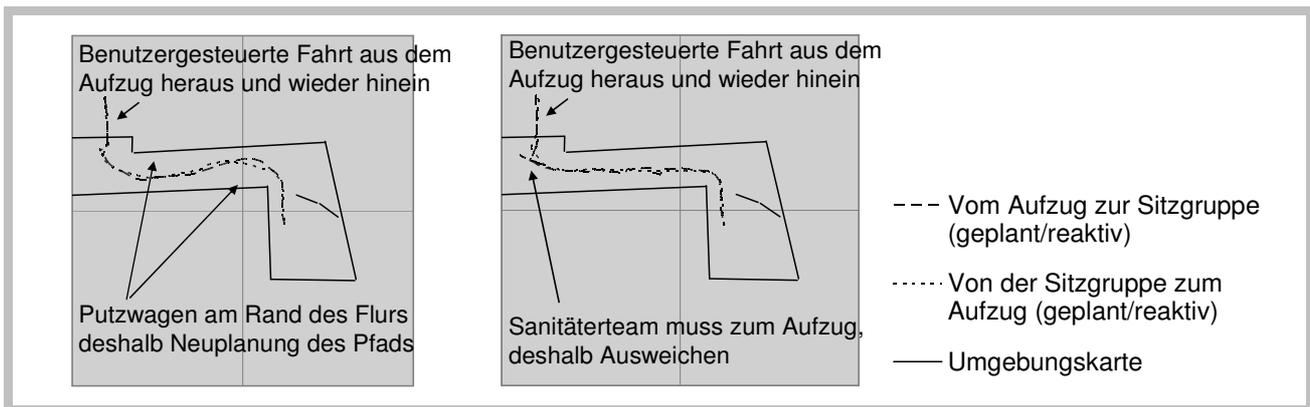


Bild 7-18: Weg zweier Probanden vom Aufzug zur Sitzgruppe im ersten Stock und zurück.

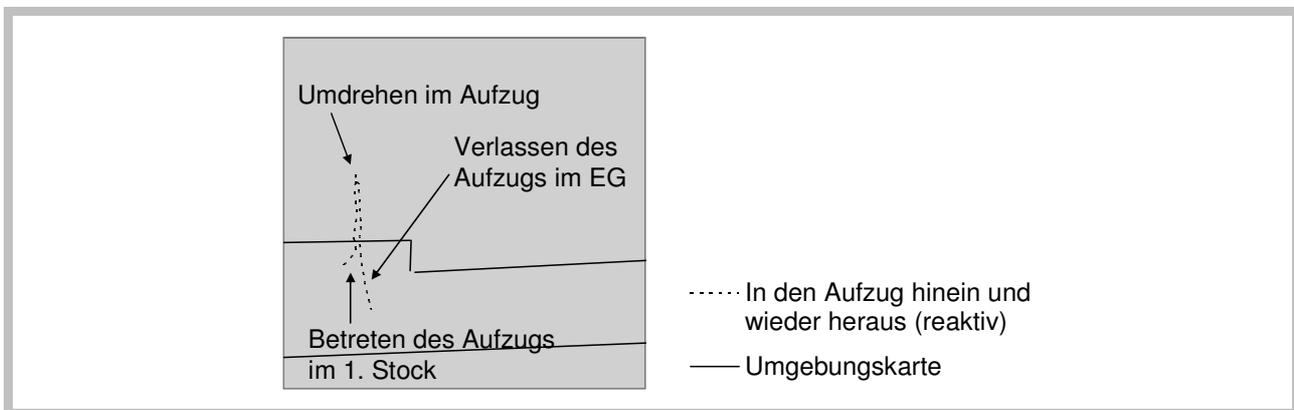


Bild 7-19: Selbstständiges Umdrehen des Roboters im Aufzug.

7.3.3 Aktivierung von Bahnmodifikationen

Der Rückweg vom ersten Stock ins Foyer erfolgte auf demselben Weg wie die Hinfahrt, wobei jedoch kein Zwischenstopp vor der Cafeteria gemacht wurde. Auf der Rückfahrt wurden die direkte Bahnmodifikation und das »Wandnahe Fahren« eingeschaltet. Die Aktivierung und Parametrierung der Bahnmodifikationen (z. B. Auswahl der zu folgenden Wand) erfolgte dabei anhand der vom Benutzer über die Gehhilfegriffe eingegebenen Kräfte und der daraus errechneten gewünschten Fahrtrichtung. Bild 7-20 zeigt die Verteilung der Aktivierung von Bahnmodifikationen: Durchschnittlich 27 Prozent der Zeit wurde der Pfad direkt anhand der Benutzereingaben modifiziert, während 41 Prozent der Zeit die

Funktion »Wandnahes Fahren« aktiviert wurde. 31 Prozent der Zeit war keine Bahnmodifikation aktiv.

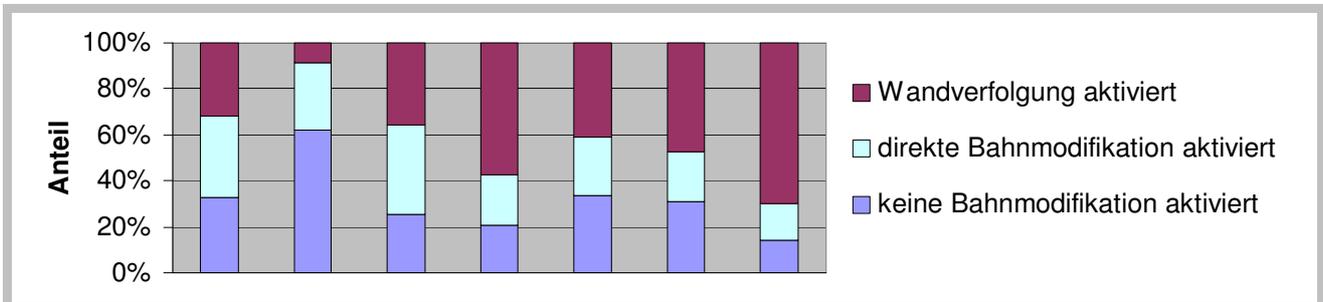


Bild 7-20: Aktivierung von Bahnmodifikationen.

Bild 7-21 zeigt ein Beispiel für die entsprechend der Benutzereingaben durchgeführten Bahnmodifikationen auf dem Weg vom Aufzug zum Foyer. Der Weg vom Foyer zum Aufzug, der ohne Bahnmodifikationen verfolgt wurde, ist als Referenzpfad eingezeichnet.

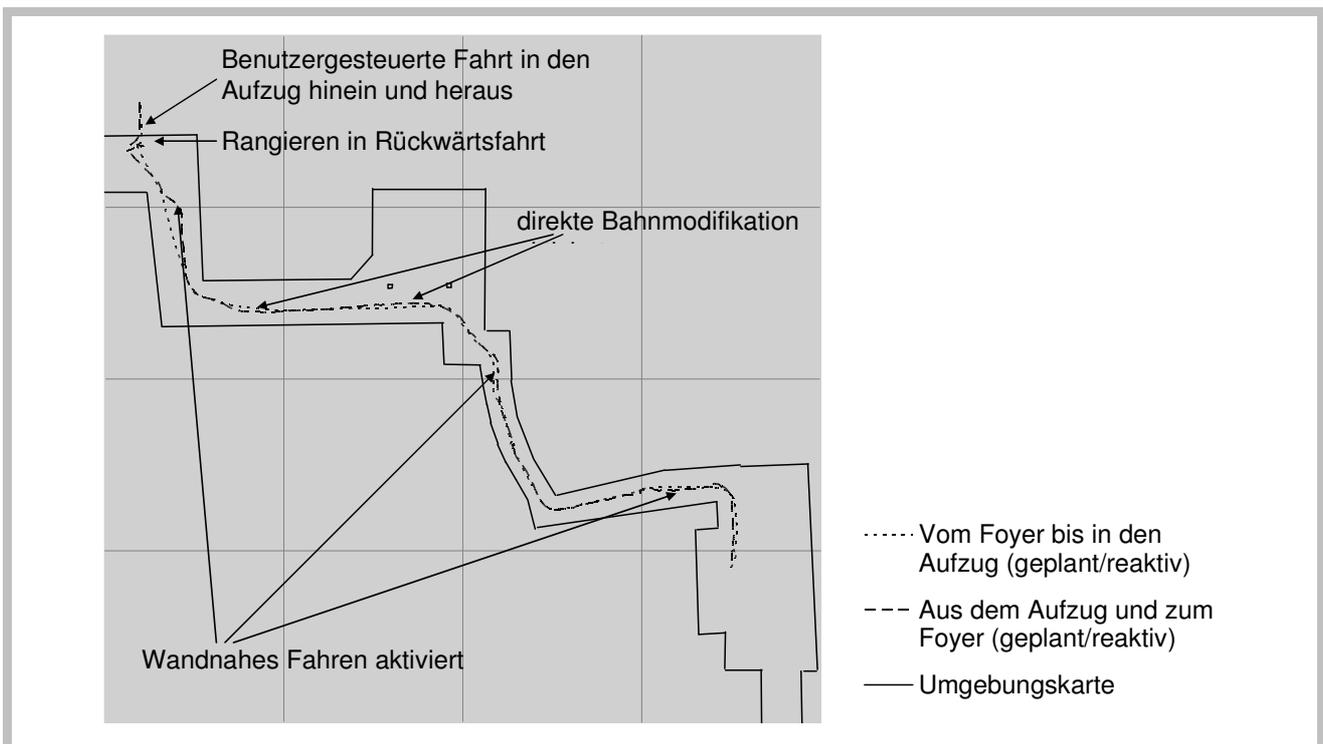


Bild 7-21: Vergleich der Fahrstrecke vom Aufzug zum Foyer bei inaktiven (Hinweg) und aktivierten Bahnmodifikationen (Rückweg).

7.3.4 Feedback der Benutzer

Auf die Benutzertests folgte eine mündliche Befragung der Probanden mit dem Ziel, Rückmeldung zu den Fähigkeiten der roboterbasierten Gehhilfe sowie deren Steuerungssystem zu bekommen. Dabei wurden jedem der sechs Probanden die folgenden Fragen gestellt:

1. Haben Sie sich durch die roboterbasierte Gehhilfe sicher gestützt gefühlt?
2. Wie gut ließ sich die roboterbasierte Gehhilfe steuern?
3. Ließ sich die roboterbasierte Gehhilfe problemlos anhalten?
4. War die Bewegung/Geschwindigkeit der roboterbasierten Gehhilfe angebracht?
5. War die Kraft, die Sie zum Bewegen der roboterbasierten Gehhilfe aufwenden mussten angebracht?
6. Hatten Sie das Gefühl, jederzeit die Kontrolle über den Roboter zu haben?
7. Welche Note würden Sie der roboterbasierten Gehhilfe geben?

Für die Fragen 4-6 waren als Antwort die Beurteilungen »gut« und »nicht gut«, für die Fragen 1-3 und Frage 7 die Beurteilungen »sehr gut«, »gut« und »ausreichend« möglich. Die Antworten der Probanden sind in Bild 7-22 zusammengefasst.

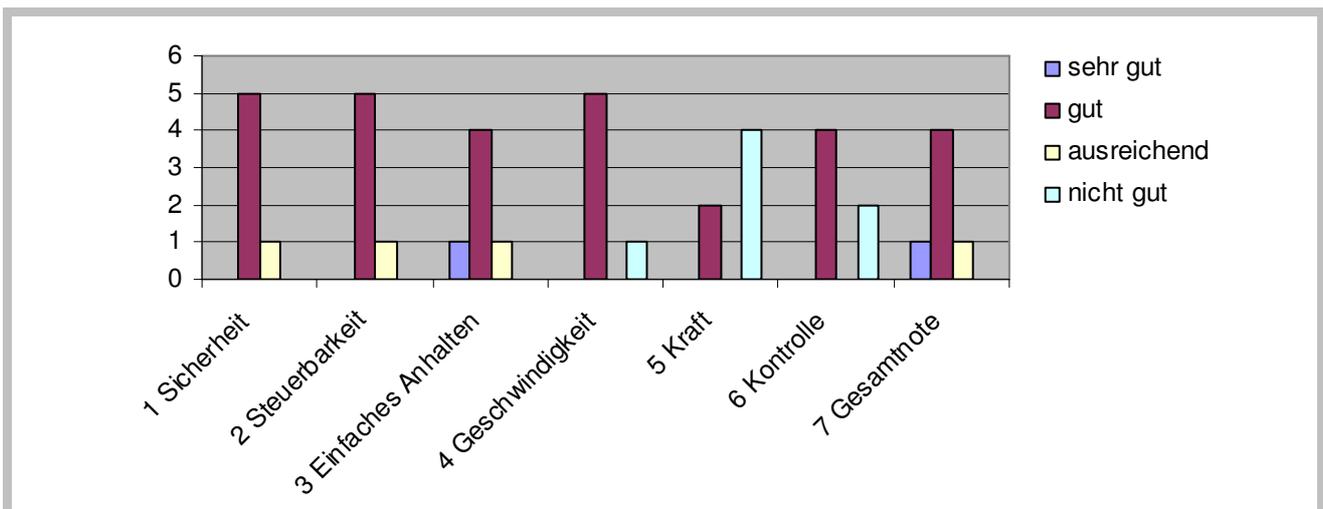


Bild 7-22: Bewertung der roboterbasierten Gehhilfe durch die Probanden.

Die mit dem benutzer- und umgebungsangepassten Steuerungssystem versehene roboterbasierte Gehhilfe wurde durch die Probanden durchschnittlich mit der Gesamtnote »gut« bewertet. Bis auf eine sehr stark behinderte Testperson fühlten sich alle Probanden mit der roboterbasierten Gehhilfe sicher und beurteilten sie einfach zu steuern. Hauptkritikpunkt waren die schon erwähnten schwachen Antriebe des Care-O-bot[®] II und der dadurch verursachte hohe Kraftbedarf für die Ansteuerung.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Zahl mobilitätseingeschränkter Menschen wird in den kommenden Jahren entsprechend der prognostizierten Erhöhung des Anteils älterer Menschen in unserer Gesellschaft stark zunehmen. Gehhilfesysteme wie Rollatoren stellen eines der wichtigsten **Hilfsmittel für den Erhalt der Mobilität** und der damit verbundenen Selbstständigkeit der betroffenen Personen dar. Konventionelle Gehhilfen sind dafür jedoch oftmals nicht ausreichend. Neben einer hohen Zahl von Unfällen, die in Verbindung mit Gehhilfen jährlich auftreten, müssen viele mobilitätseingeschränkte Personen aufgrund ihrer Beschwerden beim Gehen mit dem Rollator aus Sicherheitsgründen zusätzlich von einer Pflegekraft begleitet werden oder sogar ganz auf das selbstständige Gehen verzichten. Die Ursache liegt dabei entweder in einer durch krankheitsbedingte Gangunsicherheiten oder Muskelschwächen verursachten hohen Sturzgefahr, in einer durch kognitive Defizite verursachten Kollisionsgefahr oder in mentalen Einschränkungen wie vaskulärer Demenz, die es dem Rollatorfahrer unmöglich macht, selbstständig den Weg zu finden.

Eine mit **Robotertechnologie** ausgestattete Gehhilfe, die in der Lage ist, ihre Umgebung wahrzunehmen und den Benutzer sicher zum gewünschten Ziel zu führen, die dabei auf die speziellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Benutzers eingeht und diese während der Fahrt berücksichtigt, kann die Selbstständigkeit älterer und behinderter Menschen weiter fördern und erhalten. Bisher lagen keine ausreichenden Erkenntnisse für die Entwicklung solch eines umgebungs- und benutzerangepassten Steuerungssystems für die Zielführung roboterbasierter Gehhilfen vor.

Ziel dieser Arbeit war es daher, grundlegende Erkenntnisse zur Entwicklung eines Steuerungssystems für die Zielführung roboterbasierter Gehhilfen zu gewinnen, das

- seine Umgebung wahrnimmt und den Weg zum Ziel entsprechend plant und anpasst,
- an die Fähigkeiten und Bedürfnisse eines Benutzers angepasst werden kann und
- das Fahrverhalten der Gehhilfe in Echtzeit an die Bewegung des Benutzers anpasst, so dass der Benutzer immer sicher gestützt wird.

Ausgehend von der **Analyse** der Aufgabe, des Benutzerspektrums sowie der Steuerung konventioneller Gehhilfen durch den Benutzer wurden Anforderungen an das zu entwickelnde Steuerungssystem sowie an dessen Teilsysteme abgeleitet. Konventionelle Gehhilfen ermöglichen dem mobilitätseingeschränkten Benutzer, die Position der Gehhilfe kontinuierlich an die eigene anzupassen. Dadurch kann sich der Gehhilfenutzer während des Gehens an den Gehhilfegriffen abstützen und seine Gehbewegung stabilisieren. Diese Grundfunktion sollte für das roboterbasierte Gehhilfesystem beibehalten sowie um zusätzliche Sicherheits- und Assistenzfunktionen erweitert werden.

Roboterbasierte Gehhilfesysteme nach dem **Stand der Technik** stellen kein schlüssiges Gesamtkonzept für ein umgebungs- und benutzerangepasstes Steuerungssystem bereit. Existierende Navigationssysteme für mobile Roboter lassen sich nur eingeschränkt für die Navigation roboterbasierter Gehhilfen einsetzen. Die Anpassung einer vorgegebenen Bewegungsbahn an die Eingaben eines Gehhilfenutzers wurde durch den Stand der Technik bisher nicht ermöglicht.

Basierend auf den erarbeiteten Anforderungen wurden nachfolgend **Lösungskonzepte** für das Steuerungssystem sowie dessen Teilkomponenten entwickelt und anhand der Anforderungen systematisch bewertet und ausgewählt. Das Steuerungssystem soll sowohl das selbstständige Planen und Führen des Benutzers zu einem vorgegebenen Ziel als auch das Rangieren auf kurzen Strecken ermöglichen. Diese beiden unterschiedlichen Fahrfunktionen wurden in zwei verschiedene **Betriebsmodi** der Gehhilfesteuerung, dem »benutzergesteuerten Modus« und dem »Zielführungsmodus« realisiert. Im benutzergesteuerten Modus werden über das Interaktionssystem eingegebene Geschwindigkeits- und Richtungsvorgaben des Benutzers direkt in Fahrgeschwindigkeiten des Roboters umgesetzt. Im Zielführungsmodus wird über das Interaktionssystem ein Ziel vorgegeben, zu dem der Roboter dann selbstständig den Weg plant. Die Fahrgeschwindigkeit des Roboters beim Abfahren des errechneten Wegs entspricht auch hier den über das Interaktionssystem eingegebenen Geschwindigkeitsvorgaben des Benutzers wohingegen die Fahrtrichtung durch den geplanten Pfad vorgegeben wird. Dieser kann zusätzlich aufgrund erkannter Hindernisse oder abweichender Richtungsvorgaben des Benutzers modifiziert werden.

Das **Interaktionssystem** nimmt Eingaben des Benutzers wie Richtungs- und Geschwindigkeitsvorgaben oder Zieleingaben auf und kommuniziert den aktuellen Systemzustand. Es besteht aus einem Touchscreen zum Starten und Stoppen der roboterbasierten Gehhilfe, zur Modusumschaltung und zur Zieleingabe. Wichtige Systeminformationen werden sowohl über den Bildschirm als auch per Sprache an den Benutzer ausgegeben. Das Setzen der Fahrgeschwindigkeit und der Fahrtrichtung durch den Benutzer erfolgt anhand einer Messung der auf die Gehhilfegriffe eingebrachten Benutzerkräfte. Die Verarbeitung dieser Kräfte beinhaltet das automatische Erkennen von Stolperbewegungen, das ein entsprechendes Abbremsen der Gehhilfe bewirkt.

Das **Navigationssystem** ist unter anderem zuständig für die Planung und Durchführung von Fahrbewegungen. Die Gesamtstruktur der Fahrbewegung der roboterbasierten Gehhilfe ist abhängig von der Bewegungsfähigkeit des Benutzers, insbesondere von dessen maximalem Drehwinkel und seinen Fähigkeiten, sich seitwärts zu bewegen, von der Umgebungsstruktur und der Roboterkinematik. Sind Drehungen des Roboters auf der Stelle erlaubt und ist dessen Drehradius nicht eingeschränkt, findet eine globale Bahnplanung mittels eines Potentialfeldplaners statt. Ein nicht-holonomer Planer realisiert die Planung bei eingeschränktem Drehradius.

Die **Anpassung der Bewegungsrichtung** an die Benutzereingaben und die Umgebung wird in beiden Fällen mittels der erweiterten Methode elastischer Bänder, die für diese Aufgabe speziell weiterentwickelt wurde, realisiert. Neben der automatischen Anpassung des Bewegungspfads zur Hindernisumfahrung können bei Divergenzen zwischen der geplanten und der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung verschiedene Arten von Bahnmodifikationen aktiviert werden:

- Bei Aktivierung der direkten Bahnmodifikation durch den Benutzer wird der Pfad einmalig entsprechend der aktuell durch den Benutzer vorgegebenen Richtung geändert.
- Bei Aktivierung des Bewegungsverhaltens »Wandnahes Fahren« wird der Pfad nahe einer erkannten Wand entlang geführt, bis das Ende der Wand erreicht ist.

- Bei Aktivierung des Bewegungsverhaltens »Anfahren eines Zwischenziels« wird der Pfad so modifiziert, dass er möglichst nahe am vorgegebenen Zwischenziel vorbeiführt.
- Die Neuplanung des Pfads wird aktiviert, falls der Benutzer auf der anderen Seite um ein Hindernis herumfahren will als ursprünglich geplant.

Die **Auswahl einer geeigneten Bahnmodifikation** erfolgt anhand der vom Benutzer vorgegebenen Bewegungsrichtung und der in der Nähe des Roboters erkannten Hindernisse. Dafür werden das am nächsten liegende Hindernis in der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung (potentielle Wand oder potentiell anzufahrendes Zwischenziel) sowie das am nächsten liegende Hindernis zwischen der vorgegebenen und der geplanten Fahrtrichtung (potentiell zu umfahrendes Hindernis) detektiert und entsprechend deren Lage zueinander ein angemessenes Verhalten der roboterbasierten Gehhilfe bestimmt. Ist das zu umfahrende Hindernis näher als die potentielle Wand oder das Zwischenziel und ist ausreichend Raum hinter dem Hindernis vorhanden, um auf der anderen Seite um dieses herumzufahren, wird die Neuplanung des Pfads aktiviert. Ansonsten wird das Bewegungsverhalten »Wandnahes Fahren« aktiviert, falls der Schnittwinkel zwischen der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung und dem Hindernis klein und das Hindernis lang genug ist. Das »Anfahren von Zwischenzielen« wird für Schnittwinkel im Bereich um 90 Grad zwischen der vom Benutzer vorgegebenen Fahrtrichtung und dem Hindernis aktiviert.

Das benutzer- und umgebungsangepasste Steuerungssystem wurde auf dem mobilen Roboterassistenten **Care-O-bot® II** implementiert und getestet. An der Rückseite des Care-O-bot® II sind zwei Gehhilfestützen angebracht, die bei Einsatz des Roboters als roboterbasierte Gehhilfe automatisch ausgefahren und entsprechend den Bedürfnissen des Benutzers in der Höhe angepasst werden können. Für das Messen der eingebrachten Benutzerkräfte wurden mit Federn versehene Wegaufnehmer in die Griffe der Gehstützen integriert. Die auf das Drehzentrum des Roboters wirkende Kraft und Drehmoment werden aus den an den Griffen gemessenen Sensorwerten errechnet.

Zum Nachweis der Anwendbarkeit des Steuerungssystems wurde Care-O-bot® II in einem **Seniorenheim** in Betrieb genommen und durch mehrere Bewohner des Heims, die auch

im täglichen Leben eine Gehhilfe benutzen, getestet. Das Steuerungssystem erfüllt die an es gestellten Anforderungen. Bei Beibehaltung der einfachen Bedienbarkeit bietet die roboterbasierte Gehhilfe im Vergleich zu konventionellen Gehhilfen zusätzliche Sicherheit, insbesondere durch die Geschwindigkeitsanpassung auf Rampen und durch die automatische Hinderniserkennung und -umfahrung. Die automatische Zielführung hilft beim Auffinden unbekannter Ziele, während durch die interaktive Bahnanpassung die Stütze des Gehhilfenutzers durch den Roboter jederzeit sichergestellt wird. Die nach den Tests durchgeführte Befragung der Benutzer zeigte, dass 80 Prozent der Probanden sich mit der roboterbasierten Gehhilfe sicher fühlten und sie einfach zu steuern fanden, die roboterbasierte Gehhilfe wurde durchschnittlich mit der Note »gut« beurteilt.

Hauptkritikpunkt bei den Benutzertests waren die schwachen Antriebe des Care-O-bot® II und der dadurch verursachte hohe Kraftbedarf für die Ansteuerung. Aufgabe **zukünftiger Forschungsarbeiten** wird deshalb die Entwicklung einer neuen roboterbasierten Gehhilfe sein, die höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ermöglicht. Die Kinematik des neuen Roboters sollte ähnlich wie bei konventionellen Gehhilfen eine Benutzerposition nahe dem oder im Drehzentrum des Roboters vorsehen, um die Ansteuerung der roboterbasierten Gehhilfe in Kurven zu vereinfachen.

Teile des entwickelten Steuerungssystems können auf **andere Anwendungsbereiche** der mobilen Robotik transferiert werden. Dies betrifft insbesondere Anwendungen, in denen eine optimale Fahrgeschwindigkeit des Roboters von Faktoren abhängt, die nicht mit Hilfe existierender Sensoren gemessen werden können. Für Reinigungsroboter könnte der Roboter selbstständig eine flächendeckende Planung der Bewegungsbahn im vorgegebenen Arbeitsraum durchführen, während der Benutzer die Geschwindigkeit des Fahrzeugs entsprechend des Verschmutzungsgrads setzt. Eine Bahnmodifikation durch den Benutzer könnte notwendig werden, falls z. B. neuer Schmutz aufkommt oder kein zufrieden stellender Reinigungserfolg beim ersten Durchgang erzielt werden konnte. Die Geschwindigkeitssteuerung der roboterbasierten Gehhilfe, basierend auf der Auswertung der mit Sensoren versehenen Griffe eingebrachten Kräfte, könnte als neuartige Schiebehilfe für Transportfahrzeuge eingesetzt werden.

9 Summary

A User and Environment Adaptive Control System for Robotic Walking Aids

Due to the current demographic development, the number of elderly people and as a result the number of people with mobility constraints will increase significantly within the next years. **Mobility aids** such as walkers are some of the most important devices for elderly and frail people to maintain mobility and thus live an independent, self-supported life. Even though conventional walkers are fairly easy to use devices a significant number of accidents involving walker use are reported every year. Additionally, even when using a walker, many elderly people need to be accompanied by nurses when moving around. Other people use wheelchairs although they are still able to walk. Reasons are the high risk of falling caused by unstable walking or by muscle weaknesses, the risk of collisions caused by cognitive disabilities, or mental disorders preventing elderly persons to find their way around their environment.

Robotic walkers able to perceive and localize themselves in their environment and to guide their user to a target can enhance the independence of elderly or disabled persons with mobility constraints. In order to ensure good support for the user, the robotic walker should adapt to the motion of its user while at the same time not losing the target out of sight. No sufficient expertise for the development of such a user and environment adaptive control system for robotic walking aids has been established so far.

The **goal of this thesis** was therefore to gain knowledge on the development of a control system for robotic walking aids that

- perceives its environment and adapts the path to the given target accordingly,
- can be adapted to the capabilities and needs of its user, and
- adapts its motion in real-time to the motion of the user and therefore ensures his safe support at all times.

Based on an **analysis** of the task, user spectrum, and control of conventional walkers, requirements for the new control system and its subsystems have been derived. Conventional walkers allow their user to adapt the position of the walker continuously to their own. This enables the walking aid user to lean onto the walking supporters and thus to stabilize himself during walking. This basic functionality must be maintained for the robotic walker while at the same time enhancing its safety and assistance capabilities.

The review of the **state of the art** in robotic walkers revealed that some of the existing devices are able to guide their user to a target. However, during guidance, the input of the user is not considered sufficiently. Existing navigation systems for mobile robots can only partially be applied for the navigation of robotic walking aids. Adapting a given motion path to the input of a walking aid user is a functionality that is not provided by state of the art navigation methods.

Based on the acquired requirements, alternative **concepts** for the control system and its subsystems have been developed and evaluated systematically. The control system must be able to guide its user to a previously specified target, but also to maneuver in narrow environments. These different motion modes have been implemented in two operation modes of the walker control system, »Direct Control Mode« and »Target Mode«. The »Direct Control Mode« enables the user to push or pull the robotic walker into a certain direction, whereas the velocity of the robot is reduced in front of obstacles or when a stumble motion of the user has been detected. In »Target Mode« the user follows the robotic walker along a pre-planned, optimal path to a previously specified target. In this mode, the velocity of the walker is calculated from the user input as in the direct control mode; the direction of motion, however, is given by the planned path. Additionally, the path can be modified by detected obstacles or user input.

The **user interface** reads input given by the user such as the desired velocity and motion direction or the desired target of the user and communicates the current state of the walking aid control system. The user interface consists of a touch screen to start or stop the robotic walker, to change its operation mode, and to select a target. Information on the

current system state is communicated to the user on the screen and by speech output. The desired velocity and motion direction of the robotic walker is calculated from the forces applied to the walking aid handles. The forces applied to the walker are compared to previous sensor readings and checked for large differences. This indicates that the user may have stumbled and will stop the robot immediately.

The **navigation system** is responsible to plan and execute the motion of the robotic walker. This motion is limited by the motion capabilities of the walking aid user, specifically his maximum turning angle and his ability to move laterally, by the structure of the environment, and by the kinematics of the robotic walker. If the robot is allowed to turn on the spot and its turning radius is not constrained, a grid-based potential field planner is used for global planning; otherwise a non-holonomic planner will be applied.

In order to **adjust the motion direction** of the robotic walker to the environment and to the input of the user, the method of elastic bands has been adapted and extended. The elastic band algorithm automatically smoothens a given path and leads it around obstacles detected in the environment. In order to consider the input of the user, when the desired motion direction of the user diverges significantly from the planned motion, additional modifications of the elastic band can be activated:

- Direct path modifications lead the path towards the desired motion direction of the user.
- The »wall following« behavior modifies the path to lead along the given wall.
- The »docking« behavior modifies the path to pass the given intermediate target.
- Replanning of the path is activated in case the walking aid user wants to pass an obstacle on the other side as previously planned.

The selection of an **adequate path modification strategy** depends on the desired motion direction of the walking aid user and the obstacles detected within the vicinity of the robot. The position of the closest obstacle in the direction indicated by the user (potential wall/docking point) and of the closest obstacle between the desired and the planned direction (potential replanning obstacle) are calculated. If the potential replanning obstacle is

closer than the potential wall or docking obstacle and sufficient space is available behind the obstacle, replanning of the path on the other side of the obstacle will be activated. Otherwise, wall following will be activated for small intersection angles between desired direction and orientation of the obstacle and if the obstacle (potential wall) is long enough, docking will be activated for intersection angles around 90 degrees.

The user and environment adaptive control system has been implemented and tested on the mobile robot assistant **Care-O-bot[®] II**. The walking aid handles attached to the rear of Care-O-bot[®] II can be adjusted in height and are equipped with displacement transducers and springs to measure the forces applied to each handle. The force and torque acting in the centre of the robot are calculated from the forces applied to the handles.

In order to prove the correct function and usefulness of the guidance system, a **field test** was done in an elderly people's residence. The selected test persons also use walkers in their daily life. The control system meets the requirements specified previously. The robotic walker maintains the simple operation of conventional walkers while providing enhanced safety, specifically by adapting its velocity on slopes and by the automatic obstacle avoidance and surrounding capabilities. The automatic path planning assists the user to find his way to unknown targets while the path adaptation according to the desired motion direction of the user ensures the safe support of the user. A questionnaire posed to the test persons after the tests showed that 80 % of the users felt safe and in control of the robotic walker at all times. The average rating of the robotic walker was »good«.

Difficulties occurred due to the limited velocity and the non-holonomic structure of the robot assistant Care-O-bot[®] II. Therefore, **future work** will concentrate on the development of a new walking aid hardware which enables higher velocities, higher accelerations and thus lower forces to control the robot. The kinematics of the new walker should be similar to conventional walkers, thus the user should be positioned in the turning centre of the robot to enable turning on the spot.

10Literatur

- [Bachschmidt2001] Bachschmidt, Rebecca A.; Harris, Gerald F.; Simoneau, Guy G.: *Walker-Assisted Gait in Rehabilitation: A Study of Biomechanics and Instrumentation*. In: IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 9 (2001), Nr. 1, S. 96-105.
- [Borenstein1991] Borenstein, Johann; Koren, Yoram: *The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots*. In: IEEE Journal of Robotics and Automation 7 (1991), Nr. 3, S. 278-288.
- [Borenstein1997] Borenstein, Johann; Ulrich, Iwan: *The GuideCane – A Computerized Travel Aid for the Active Guidance of Blind Pedestrians*. In: IEEE/RAS International Conference on Robotics and Automation (ICRA), April 1997, Albuquerque, New Mexico, S. 1283-1288.
- [Bourhis2001] Bourhis, G.; Horn, O.; Habert, O.; Pruski, A.: *An Autonomous Vehicle for People with Motor Disabilities*. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 8 (2001), Nr. 1, S. 20-28.
- [Brooks1985] Brooks, Rodney A.: *A robust layered control system for a mobile robot*. A.I. Memo 864, Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, September 1985.
- [Bühler2001] Bühler, Christian; Heck, Helmut; Nedza, Janus; Wallbruch, Rainer: *Evaluation of the MOBIL Walking & Lifting Aid*. In: Marincek, C.; Bühler, Ch.; Knops, H.; Andrich, R. (Hrsg.): *Assistive Technology Added Value to the Quality of Life*. Amsterdam, Berlin, Oxford, Tokyo, Washington/DC: IOS Press, 2001, S. 210-215.

- [California2005] California Department of Parks & Recreation: *Mobility Impairments* (2005) <http://www.parks.ca.gov> (28.2.2005).
- [Charron1995] Charron, Patrick M.; Kirby, R. Lee; MacLeod, Donald A.: *Epidemiology of walker-related injuries and deaths in the United States*. In: American journal of physical medicine & rehabilitation 74 (1995), Nr. 3, S. 235-239.
- [Chuy2006] Chuy Jr., Oscar; Hirata, Yasuhisa; Whand, Zhidong; Kosuge, Kazuhiro: *Approach in Assisting a Sit-to-Stand Movement Using Robotic Walking Support System*. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oktober 2006, Beijing, China, S. 4343-4348.
- [Cooper1995] Cooper, Rory A.: *Intelligent Control of Power Wheelchairs*. In: IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine: 14 (1995), Nr. 4, S. 423-431.
- [DeLuca1998] De Luca, A.; Oriolo, G.; Samson, C.: *Feedback Control of a Non-holonomic Car-Like Robot*. In: Jean-Paul Laumond (Hrsg.): Robot Motion Planning and Control. Lectures Notes in Control and Information Sciences 229. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998, S. 171-253.
- [Destatis2006] Statistisches Bundesamt Deutschland: *11. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung* (2006), <https://www.destatis.de> (1.2.2007).
- [Detrois2002] Detrois, Yves: *Konzeption einer Stütz- und Gehhilfe für den mobilen Heimassistenten Care-O-bot II*. Studienarbeit an der Universität Stuttgart, 2002.

- [DIN11199] Norm DIN EN ISO 11199: *Gehhilfen für beidarmige Handhabung – Anforderungen und Prüfverfahren – Teil 2: Rollatoren.*
- [DIN1525] Norm DIN EN 1525: 1997: *Sicherheit von Flurförderfahrzeugen - Fahrerlose Flurförderfahrzeuge und ihre Systeme.*
- [DIN9999] Norm DIN EN ISO 9999: *Technische Hilfen für behinderte Menschen – Klassifikation und Terminologie (ISO 9999:2002).*
- [Dubowsky2000] Dubowsky, Steven; Genot, Frank; Godding, Sara; Kozono, Hisamitsu; Skwersky, Adam; Yu, Haoyong; Yu, Long Shen: *PAMM – A Robotic Aid to the Elderly for Mobility Assistance and Monitoring.* In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2000, San Francisco, USA, S. 570-576.
- [Egawa2004] Egawa, Saku; Takeuchi, Ikuo; Koseki, Atsushi; Ishii, Takeshi: *Electrically Assisted Walker with Supporter-Embedded Force-Sensing Device.* In: Bien, Z. Z.; Stefanov, D. (Hrsg): *Advances in Rehabilitation Robotics: Human-friendly Technologies on Movement Assistance and Restoration for People with Disabilities.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2004, S. 313-322.
- [FhG2003b] Deutsches Patent Nr. DE 103 18 929 B3 (2004.08.05): *Mobile Gehhilfe-Vorrichtung.* Fraunhofer Gesellschaft.
- [Fiorini1998] Fiorini, Paolo; Shiller, Zvi: *Motion Planning in Dynamic Environments Using Velocity Obstacles.* In: *International Journal of Robotic Research*, 17 (1998), Nr. 7, S. 760-772.

- [Glover2003] Glover, Jared; Holstius, David; Manojlovich, Michael; Montgomery, Keirsten; Powers, Aaron; Wu, Jack; Kiesler, Sara; Matthews, Judith; Thrun, Sebastian: *A Robotically-Augmented Walker for Older Adults*. Technical Report CMU-CS-03-170, Carnegie Mellon University, Computer Science Department, Pittsburgh, USA, 2003.
- [Glover2004] Glover, Jared; Thrun, Sebastian; Matthews, Judith T.: *Learning User Models of Mobility-Related Activities Through Instrumented Walking Aids*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, USA, April 2004, S. 3306-3312.
- [Graf2001] Graf, Birgit: *Reactive Navigation of an Intelligent Robotic Walking Aid*. In: IEEE Industrial Electronics Society u.a.: ROMAN 2001: Proceedings, 10th IEEE International Workshop in Robot and Human Interactive Communication, September 18-21, 2001, Bordeaux - Paris, Frankreich, S. 353-358.
- [Graf2004a] Graf, Birgit; Hans, Matthias; Schraft, Rolf Dieter: *Care-O-bot II – Development of a Next Generation Robotic Home Assistant*. In: Autonomous Robots 16 (2004), Nr. 2, S. 193-205.
- [Graf2004b] Graf, Birgit; Hans, Matthias; Schraft, Rolf Dieter: *Mobile Robot Assistants – Issues for Dependable Operation in Direct Cooperation With Humans*. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 11 (2004), Nr. 2, S. 67-77.
- [Graf2005a] Graf, Birgit: *Dependability of Mobile Robots in Direct Interaction with Humans*. In: Prassler, Erwin (Ed.) u.a.: Advances in Human-Robot Interaction. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005, S. 223-239 (Springer Tracts in Advanced Robotics - STAR 14).

- [Graf2005b] Graf, Birgit: *Zuverlässige Zielführung mobiler Serviceroboter durch dynamische Hindernisumfahrung in Echtzeit*. In: Schraft, Rolf Dieter (Hrsg.) u.a.; Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und mobile Roboter: Chancen, Technologie, Wirtschaftlichkeit. Neueste Erkenntnisse und Trends in Materialfluss und mobiler Automation. Fraunhofer IPA Technologieforum, 29. April 2005, Stuttgart. Stuttgart: FpF - Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2005, S. 88-109 (Fraunhofer IPA Technologieforum F 115).
- [Hägele2001] Hägele, Martin; Neugebauer, Jens-Günter; Schraft, Rolf Dieter: *From Robots to Robot Assistants*. In: Korea Institute of Science and Technology (KIST) u.a.: ISR 2001 - Vol. 1: Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics in conjunction with IMS 2001, 1st Intelligent Microsystem Symposium, April 19-21, 2001, Seoul, Korea, 2001, S. 404-409.
- [Hans2006] Hans, Matthias: *Eine modulare Kontrollarchitektur für den Hol- und Bringdienst von Roboterassistenten*. Heimsheim: Jost Jetter Verlag, 2006. Stuttgart, Univ., Diss., 2006.
- [Helms2002] Helms, Evert; Schraft, Rolf Dieter; Hägele, Martin: *rob@work: Robot Assistant in Industrial Environments*. In: IEEE Industrial Electronics Society u.a.: IEEE ROMAN 2002: Proceedings, 11th IEEE International Workshop in Robot and Human Interactive Communication, September 2002, Berlin, S. 399-404.

- [Hirata2003] Hirata, Yasuhisa; Baba, Takahiro; Muraki, Asami; Kosuge, Kazuhiro: *Motion Control of Omni-directional type Walking Support System Walking Helper*. In: IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, Oktober/November 2003, Millbrae, Kalifornien, USA, S. 85-90.
- [Hirata2006] Hirata, Yasuhisa; Hara, Asami; Muraki, Asami; Kosuge, Kazuhiro: *Passive-type Intelligent Walker RT Walker*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Mai 2006, Orlando, Florida, USA, S. 4303-4305.
- [Hostalet2002] Hostalet Wandosell, José Manuel; Graf, Birgit: *Non-Holonomic Navigation System of a Walking-Aid Robot*. In: IEEE Industrial Electronics Society u.a.: IEEE ROMAN 2002: Proceedings, 11th IEEE International Workshop in Robot and Human Interactive Communication, September 25-27, 2002, Berlin, S. 518-523.
- [Huang2005] Huang, Cunjun; Wasson, Glenn; Alwan, Majd; Sheth, Pradip; Ledoux, Alexandre: *Shared Navigational Control and User Intent Detection in an Intelligent Walker*. In: AAAI Fall 2005 Symposium (EMBC), 2005.
- [ICD2003] Deutsches Institut für Medizinische Dokumentation und Information (DIMDI): *Internationale Statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme (2003)*
<http://www.dimdi.de/germ/klassi/icd10/fr-icd10.htm> (7.11.2004).
- [IFR2006] IFR Statistical Department: *World Robotics 2006*
<http://www.worldrobotics.org> (1.2.2007).

- [Ikeuchi2005] Ikeuchi, H.; Ohnishi, K.; Miyagawa, H.; Harran, T.; Suzuki, T.; Saito, Y.: *A Gait Training System for Human Adaptive Walking Posture*. In: IEEE International Workshop on Robots and Human Interactive Communication, 2005, S. 605-610.
- [Jaouni1998] Jaouni, H.; Khatib, M.; Laumond, J. P.: *Elastic Bands For Non-holonomic Car-Like Robots: Algorithms and Combinatorial Issues*. LAAS Report 97477, Centre de la recherche scientifique, Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes, Toulouse, Frankreich, 1997.
- [Jiang1999] Jiang, Kaichun; Seneviratne, Lakmal, D.; Earles, S. W. E.: *A shortest Path Based Path Planning Algorithm for Nonholonomic Mobile Robots*. In: Journal of Intelligent and Robotic Systems, 24 (1999), S. 347-366.
- [Kamon1998] Kamon, Ishay; Rimon, Elon; Rivlin, Ehud: *Tangent Bug: A Range-Sensor-Based Navigation Algorithm*. In: International Journal of Robotic Research, 17 (1998), Nr. 9, S. 934-953.
- [Kaye2000] Kaye, H. Stephen; Kang, Taewoon; LaPlante, Mitchell P.: *Mobility Device Use in the United States*. Disability Statistics Report, (14), Washington, D.C.: U.S. Department of Education, National Institute on Disability and Rehabilitation Research, 2000.
- [Khatib1986] Khatib, Oussama: *Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*. In International Journal of Robotics Research 1 (1986), Nr. 5, S. 65-78.

- [Khatib1997] Khatib, M.; Jaouni, H.; Chatila, R.; Laumond, J.P.: *Dynamic Path Modification for Car-like Nonholonomic Mobile Robots*. In: 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 1997, Albuquerque, New Mexico, USA, S. 2920-2925.
- [Kotani1996] Kotani, Shinji; Mori, Hideo; Kiyohiro, Noriaki: *Development of the robotic travel aid HITOMI*. In: *Robotics and Autonomous Systems* 17 (1996), S. 119-128.
- [Lacey1995] Lacey, Gerard; Dawson-Howe, Kenneth M.; Vernon, David: *Personal Adaptive Mobility Aid for Infirm and Elderly Blind*. Technical report TR-CS-95-18, Computer Science Department, School of Engineering, Trinity College Dublin, Irland, 1995.
- [Latombe1996] Latombe, J.-C.: *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers, UK, 1996.
- [Laumond1998] Laumond, J. P.; Sekhavat, S.; Lamiroux, F.: *Guidelines in Non-holonomic Motion Planning for Mobile Robots*. In: Jean-Paul Laumond (Hrsg.): *Robot Motion Planning and Control, Lectures Notes in Control and Information Sciences* 229. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998, S. 1-53.
- [LaValle2006] LaValle, Steven M.: *Planning Algorithms*. Cambridge University Press, <http://planning.cs.uiuc.edu>, 2006.
- [Lee2003] Lee, Choon-Young; Seo, Kap-Ho; Oh, Changmok; Lee, Ju-Jang: *Newly Designed Rehabilitation Robot System for Walking-Aid with Pneumatic Actuator*. In: *International Journal of HWRS*, 4 (2003) Nr. 1, S. 42-46.

- [Levine1999] Levine, Simon P.; Bell, David A.; Jaros, Lincoln A.; Simpson, Richard C.; Koren, Yoram; Borenstein, Johann: *The NavChair Assistive Wheelchair Navigation System*. In: IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering 7 (1999), Nr. 4, S.443-451.
- [Long2006] Long, B.; Rebsamen, B.; Burdet, E.; Teo, C. L.: *Development of An Elastic Path Controller*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, Mai 2006, Orlando, Florida, USA, S. 493-498.
- [MacNamara2000] MacNamara, Shane; Lacey, Gerard: *A Smart Walker for the Frail Visually Impaired*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2000, San Francisco, USA, S. 1354-1359.
- [Médéric2005] Médéric, P.; Pasqui, V.; Plumet, F.; Bidaud, Ph.: *Elderly People Sit to Stand Transfer Experimental Analysis*. In: Tokhi, M. Osman (Ed.) u.a.: *Climbing and Walking Robots: Proceedings of the 8th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2005)*, September 2005, London, UK. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, S. 953-960.
- [Meyra2007] Homepage der MEYRA-ORTOPEDIA Vertriebsgesellschaft mbH <http://www.meyra.de> (12.4.2007).
- [Morris2003] Morris, Aaron; Donamukkala, Raghavendra: *A Robotic Walker that Provides Guidance*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, September 2003, Taipei, Taiwan, S. 25-30.

- [Nejatbakhsh2006] Nejatbakhsh, Naemeh; Kosuge, Kazuhiro: *Optimal Guidance by Omnidirectional Passive Mobility Aid System*. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oktober 2006, Beijing, China, S. 5786-5791.
- [Nemoto1999] Nemoto, Yasuhiro; Egawa, Saku; Koseki, Atsushi; Hattori, Shizuko; Fujie, Masakatsu: *Power Assist Control for Walking Support System*. In: International Conference on Advanced Robotics, Oktober 1999, Tokyo, Japan, S. 15-18.
- [Parikh2004] Parikh, Sarangi P.; Grassi Jr., Valdir; Kumar, Vijay; Okamoto Jr., Jun: *Incorporating User Inputs in Motion Planning for a Smart Wheelchair*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 2004, New Orleans, LA, USA, S. 2043-2048.
- [Pfeiffer2006] Pfeiffer, Ralf: *Wie hoch ist der Roll- und Luftwiderstand eines Autos? (2006)*
<http://www.arstechnica.de/auto/rolltest/rolltest.html> (1.2.2007).
- [Pires1998] Pires, G.; Araujo, R.; Nunes, U.; de Almeida, A. T.: *ROBCHAIR - A Powered Wheelchair Using a Behaviour-Based Navigation*. In: 5th International Workshop on Advanced Motion Control, 1998, Coimbra, S. 536-541.
- [Prassler2000] Prassler, Erwin; Schwammkrug, Dirk; Rohrmoser, Bertram; Schmidl, Gerhard: *Autonomous Road Sweeping of Large Public Areas*. In: VDI/VDE-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik (GMA): Robotik 2000: Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends. Düsseldorf: VDI Verlag, 2000, S. 89-95 (VDI-Berichte 1552).

- [Prassler2001] Prassler, Erwin; Scholz, Jens; Fiorini, Paolo: *A Robotic Wheelchair for Crowded Public Environments*. In: IEEE Robotics and Automation Magazine 8 (2001), Nr. 1, S. 38-45.
- [Pschyrembel1986] Pschyrembel, Willibald: *Klinisches Wörterbuch*. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 1986.
- [Quinlan1993] Quinlan, Sean; Khatib, Oussama: *Elastic Bands: Connecting Path Planning and Control*. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993, S. 802-807.
- [Rodríguez2005] Rodríguez-Losada, Diego; Matía, Fernando; Jiménez, Agustín; Galán, Ramón; Lacey, Gerard: *Guido, the Robotic Smart Walker for the frail visually impaired*. In: First International Congress on Domotics, Robotics and Remote Assistance for All (DRT4all), Madrid, Spanien, 2005, S. 155-169.
- [Röfer1999] Röfer, Thomas; Lanckenau, Axel: *Ein Fahrassistent für ältere und behinderte Menschen*. In: Autonome Mobile Systeme 1999, 15. Fachgespräch, 1999, S. 334-343 (Informatik Aktuell).
- [Rohrmoser2002] Rohrmoser, Bertram; Parlitz, Christopher: *Implementierung einer Bewegungsplanung für einen Roboterarm*. In: Dillmann, Rüdiger (Tagungsleitung) u.a.; VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) u.a.: Robotik 2002: Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends. Tagung Ludwigsburg, 19. und 20. Juni 2002. Düsseldorf: VDI Verlag, 2002, S. 59-64 (VDI-Berichte 1679).

- [Rohrmoser2004] Rohrmoser, Bertram: *Navigation*. In: Schraft, Rolf Dieter; Hägele, Martin; Wegener, Kai (Hrsg.): *Service Roboter Visionen*. München Wien: Hanser, 2004, S. 33-45.
- [Sabatini2002] Sabatini, A. M.; Genovese, V.; Pacchierotti, E.: *A Mobility Aid for the Support to Walking and Object Transportation of People with Motor Impairments*. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oktober 2002, Lausanne, Schweiz, S. 1349-1354.
- [Schraft1996] Schraft, Rolf Dieter; Volz, Hansjörg: *Serviceroboter. Innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996.
- [Schraft2006] Schraft, Rolf Dieter: *Automatisierung ist Chefsache*. In VDI-Z 148 (2006), Nr. 7/8, S. 3.
- [Shiller2000] Shiller, Zvi: *Online Suboptimal Obstacle Avoidance*. In: International Journal of Robotic Research 15 (2000), Nr. 5, S. 480-497.
- [Shim2005] Shim, Hyeon-Min; Lee, Eung-Hyuk; Shim, Jae-Hong; Lee, Sang-Moo; Hong, Seung-Hong: *Implementation of an Intelligent Walking Assistant Robot for the Elderly in Outdoor Environment*. In: IEEE 9th International Conference on Rehabilitation Robotics, Juni/Juli 2005, Chicago, USA, S. 452-455.
- [Spenko2006] Spenko, Matthew; Yu, Haoyong; Dubowsky, Steven: *Robotic Personal Aids for Mobility and Monitoring for the Elderly*. In: IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 14 (2006), Nr. 3, S. 344-351.

- [Thrun2002] Thrun, Sebastian: *Robotic Mapping: A Survey*. Technical Report CMU-CS-02-111, Carnegie Mellon University, Computer Science Department, Pittsburgh, PA, USA, 2002.
- [Traub2002] Traub, Andreas: *Eine komponentenbasierte Softwarearchitektur für mobile Serviceroboter*. Heimsheim: Jost Jetter Verlag, 2002. Stuttgart, Univ., Diss., 2002.
- [Vanhooydonck2003] Vanhooydonck, Dirk; Demeester, Eric; Nuttin, Marnix; Van Brussel, Hendrik: *Shared Control for Intelligent Wheelchairs: an Implicit Estimation of the User Intention*. In: ASER '03 1st International Workshop on Advances in Service Robotics, 2003, S. 176-182.
- [Verl2006] Verl, A.; Kremer, M.; Kircher, C.; Sekler, P.: *Steuerungstechnik - Quo Vadis?* In: Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart (FTK 2006). S. 77-98. Gesellschaft für Fertigungstechnik 2006.
- [VDI2221] Norm VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. Beuth Verlag, 1993.
- [VDI2222] Norm VDI 2222: *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. Beuth Verlag, 1997.
- [Westkämper2001] Westkämper, Engelbert: *Mehr Intelligenz in der Maschine. Technische Intelligenz und Miniaturisierung im Maschinen- und Anlagenbau*. In: F & M 109 (2001), Nr. 10, S. 75-77.
- [Wikimedia2007] Wikimedia Foundation Inc.: *Wikipedia. Die freie Enzyklopädie* (2007) <http://de.wikipedia.org> (29.2.2007).

- [Yanco2000] Yanco, Holly A.: *Shared User-Computer Control of a Robotic Wheelchair System*. Massachusetts Institute of Technology, USA, Diss., 2000.
- [Yu2003] Yu, Haoyong; Spenko, Matthew; Dubowsky, Steven: *An Adaptive Shared Control System for an Intelligent Mobility Aid for the Elderly*. In: *Autonomous Robots* 15 (2003), Nr. 1, S. 53-66.

Lebenslauf

Persönliches

Name: Birgit Graf
Geburtsdatum: 20. April 1972
Geburtsort: Stuttgart

Schulbildung

09/78 - 07/82 Österfeldschule, Stuttgart
09/83 - 05/91 Fanny-Leicht-Gymnasium, Stuttgart,
Abschluss: Abitur

Studium

10/92 - 03/99 Informatik an der Universität Stuttgart,
Abschluss: Diplom-Informatikerin
02/98 - 12/98 Diplomarbeit an der University of Western Australia, Perth

Praktika und Aushilfstätigkeiten

11/91 - 09/92 Au-Pair im Tessin, Schweiz
11/95 -12/97 Wissenschaftliche Hilfskraft im Robotiklabor der Universität Stuttgart
04/96 - 07/96 Praktikum bei der Allianz Lebensversicherungs-AG, Stuttgart

Berufstätigkeit

Seit 03/99 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fraunhofer Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart
Seit 08/07 Gruppenleiterin in der Abteilung Robotersysteme

