

# **Ein Radfahrwerk mit passiver Federung für mobile Roboterassistenten**

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

Vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Harald J. Staab  
aus Aschaffenburg

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

Mitberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Wiedemann

Tag der mündlichen Prüfung: 18. November 2008

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2009

# 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

 Universität  
**if** Stuttgart  
Institut für Industrielle  
Fertigung und Fabrikbetrieb

 **Fraunhofer**  
Institut  
Produktionstechnik und  
Automatisierung

Harald J. Staab



# Ein Radfahrwerk mit passiver Federung für mobile Roboterassistenten

Nr. 479

**JUST-JETTER VERLAG**  
Fachverlag · 71296 Heimsheim

Dr.-Ing. Harald J. Staab

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) 3-939890-38-3, ISBN (13) 978-3-939890-38-6

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 des Verfassers

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Robotersysteme am Fraunhofer- Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und seine wertvollen Hinweise, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann danke ich für die konstruktive Diskussion, seine organisatorische Unterstützung und für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Besonderer Dank gilt all jenen ehemaligen Kollegen und Freunden, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Walter Schaaf für viele ermutigende Diskussionen während der Themenfindung, Herrn Dipl.-Ing. Martin Hägele M.S. für seine pragmatischen Hinweise, die inspirierenden Gespräche und seine organisatorische Unterstützung und Herrn Dr.-Ing. Matthias Hans für die Gespräche und vielfältigen Tipps. Besonderen Dank sage ich auch allen Mitarbeitern an dem spannenden Projekt, dessen Ergebnisse diese Arbeit maßgeblich motiviert haben, nämlich den ehemaligen KollegInnen aus meiner Arbeitsgruppe, aus der mechanischen Werkstatt, aus dem Elektrolabor und allen mitwirkenden StudentInnen.

Ein herzliches Dankeschön richtet sich an Herrn Dr.-Ing. Florian Simons, an Herrn Dr.-Ing. Timo Schäfer und an Herrn Dr.-Ing. Arnulf Braatz für die sorgfältige Durchsicht meiner Manuskripte und die zahlreichen Verbesserungsvorschläge. Ihre Hinweise haben besonders zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Ein herzliches Dankeschön sage ich auch Frau Luzia Schuhmacher M.A. für das sorgfältige Korrekturlesen und die wertvollen Hinweise. Schließlich danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Scheibe für seine engagierte organisatorische Hilfe während des Promotionsablaufs.

Meiner Lebensgefährtin danke ich für ihre Geduld während des Promotionszeitraums.

Meinen Eltern danke ich für Ihre kontinuierliche Förderung und Unterstützung während meines Werdegangs. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Mannheim, im Januar 2009

Harald Staab



# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Formelzeichen</b>	<b>12</b>
0.1	Indizes und Formatierung	12
0.2	Lateinische Buchstaben	12
0.3	Griechische Buchstaben	14
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>15</b>
1.1	Problemstellung	15
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	16
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Ausgangssituation</b>	<b>17</b>
2.1	Begriffe und Definitionen	17
2.2	Abgrenzung zu mobilen Robotern anderer Bauart	18
2.2.1	Kategorisierung mobiler Roboter	18
2.2.2	Einordnung der betrachteten mobilen Roboter	19
2.3	Stand der Technik	19
2.3.1	Beispielrealisierungen mobiler Roboterassistenten	19
2.3.2	Treppensteigende Roboterfahrwerke	20
2.3.3	Roboterplattformen	22
2.3.4	Technologien für den Aufbau mobiler Roboter	24
2.3.5	Leistungsdaten von mobilen Roboterplattformen	26
2.3.6	Vergleich von Größe und Nutzlast	26
2.3.7	Fahrdynamik von mobilen Robotern	27
2.3.8	Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik	29
<b>3</b>	<b>Analyse potenzieller Einsatzszenarien und Ableitung von Anforderungen an Fahrwerke für mobile Roboterassistenten</b>	<b>31</b>
3.1	Analyse potenzieller Einsatzszenarien für mobile Roboterassistenten	31
3.1.1	Einsatzgebiete und Nutzenpotenziale	31
3.1.2	Einsatzumgebungen mit hohem Nutzenpotenzial	32
3.2	Analyse der Einsatzumgebungen	34
3.2.1	Analyse von Umwelt- und Umgebungsbedingungen	34
3.2.2	Grundlagen zu explosionsgefährdeten Einsatzumgebungen	36
3.2.3	Analyse der Zündschutzarten zum Explosionsschutz	37
3.2.4	Explosionsschutz für Fahrzeuge und Roboter	38
3.2.5	Analyse des Explosionsschutzes bei Flurförderzeugen	39
3.2.6	Beschreibung der Fahr- und Bodenbedingungen	40
3.2.7	Analyse von Durchgangshöhen und -breiten	41
3.2.8	Analyse von Bewegungsflächen	43
3.2.9	Analyse von Bodenunebenheiten und Bodenöffnungen	45
3.2.10	Analyse von Bodenbelägen hinsichtlich Rutschhemmung	46
3.2.11	Analyse textiler Bödenbeläge	47
3.2.12	Analyse der Bodentragfähigkeit	47
3.2.13	Bodenbeispiele	47

3.3	Analyse von Radaufhängungen und Federungen von Straßenfahrzeugen.....	48
3.4	Hemmnisse für den Einsatz mobiler Roboterassistenten mit gefederten Fahrwerken.....	49
3.5	Folgerungen aus der Analyse und Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten.....	50
3.6	Anforderungen an gefederte Fahrwerke und an Realisierungsvarianten.....	51
3.6.1	Ableitung einer Referenzpassage.....	51
3.6.2	Ableitung von Referenzgeometrien für Bodenunebenheiten.....	52
3.6.3	Ableitung von Anforderungen an das mechanische Gesamtsystem Roboter.....	53
3.6.4	Ableitung von Anforderungen an Räder und Reifen.....	53
<b>4</b>	<b>Konzeption der Teilsysteme eines gefederten Radfahrwerks und von Realisierungsvarianten für das Gesamtsystem.....</b>	<b>56</b>
4.1	Konzeption von Fahrwerksgeometrien.....	56
4.1.1	Grundflächenform des Fahrwerks.....	56
4.1.2	Radvarianten.....	57
4.1.3	Konzeption der Radanordnung.....	59
4.2	Konzeption der Fahrwerksfederung.....	61
4.2.1	Konzeptionelle Überlegungen zur Fahrstabilität.....	61
4.2.2	Konzeption der Lenkradfederung.....	62
4.3	Konzeption von Realisierungsvarianten.....	64
4.3.1	Konzepte für Lenkmechanik, Lenkantriebe und Fahrantriebe.....	64
4.3.2	Konzeptionelle Maßnahmen für die Eignung bei rauen Umweltbedingungen.....	64
4.3.3	Konzept für den Explosionsschutz.....	66
4.3.4	Konzepte für Gesamtsystemvarianten.....	66
<b>5</b>	<b>Entwicklung und Simulation von Fahrdynamikmodellen und Berechnungsgrundlagen für die Auslegung eines Radfahrwerks mit passiver Federung für mobile Roboterassistenten.....</b>	<b>68</b>
5.1	Vorgehensweise und Definitionen.....	68
5.2	Modellierung der Bodenbeschaffenheiten.....	69
5.2.1	Fahrwegsmodelle.....	69
5.2.2	Rampen und kleine Absätze.....	69
5.2.3	Gitterrostboden.....	71
5.3	Reifenmodellierung.....	73
5.3.1	Eigenschaften eines Antriebsreifenmodells.....	73
5.3.2	Vertikalmodell von Antriebsrad und Lenkrad.....	73
5.4	Vertikalmodelle der Lenkradfederung.....	76
5.4.1	Lineares Vertikalmodell.....	76
5.4.2	Vertikalmodelle mit nichtlinearen Kennlinien.....	79
5.5	Teilmodelle der Aufbaudynamik.....	81
5.5.1	Linearisiertes Nickmodell.....	81
5.5.2	Nickmodell mit nichtlinearen Federkennlinien.....	84
5.5.3	Nickmodell mit nichtlinearen Dämpferkennungen.....	86
5.5.4	Lineares Wank- und Vertikalmodell.....	86
5.6	Berechnungsgrundlagen zur Auslegung der Fahrwerkskomponenten.....	91
5.6.1	Stabilitätsgrenzen und Kurvenfahrt.....	91
5.6.2	Zusammenhänge bei Absatzauffahrt.....	91

5.6.3	Berechnungsgrundlagen zur Auslegung der Fahr- und Lenkantriebe.....	94
5.7	Ein Vorgehensmodell zur Entwicklung von Fahrwerk und Gesamtsystem.....	95
5.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	97
5.9	Beiträge zur Modellierung einer Differenzialkinematik auf der Fahrebene.....	98
5.9.1	Simulation der dynamischen Bewegungsgleichungen in der Fahrebene.....	98
5.9.2	Darstellungen des Konfigurationsraums einer Differenzialkinematik.....	100
5.9.3	Darstellung des Tangentialraums.....	102
<b>6</b>	<b>Realisierung und Erprobung einer Gesamtsystemvariante und Verifikation der Berechnungsgrundlagen und Modelle.....</b>	<b>104</b>
6.1	Aufbau und Eigenschaften eines Prototypen.....	104
6.1.1	Aufbau und Beschreibung.....	104
6.1.2	Bestimmung der Massen, Trägheitseigenschaften und statischen Radlasten.....	105
6.1.3	Erfüllbarkeit der Anforderungen.....	105
6.2	Eigenschaften der Fahrwerksbaugruppen.....	106
6.2.1	Federeigenschaften der Antriebsräder.....	106
6.2.2	Eigenschaften der Lenkradfederung.....	107
6.2.3	Messung der Lenkmomente.....	109
6.2.4	Messung der Antriebsmomente in extremen Fahrsituationen.....	111
6.3	Messungen zum dynamischen Verhalten des Fahrwerks.....	115
6.3.1	Messung des Einfederverhaltens.....	115
6.3.2	Messungen zum Nickverhalten.....	116
6.3.3	Identifikation des Nickmodells.....	118
6.3.4	Verifikation des Nickmodells.....	119
6.3.5	Messungen zum Wankverhalten.....	119
6.4	Fahrdynamisches Verhalten in Extremsituationen.....	121
6.4.1	Geradeausfahrt über 20 mm-Absatz.....	121
6.4.2	Schrägfahrt über 20 mm-Absatz.....	122
6.5	Erkenntnisse und Folgerungen.....	124
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>126</b>
<b>8</b>	<b>Summary.....</b>	<b>129</b>
<b>9</b>	<b>Referenzen.....</b>	<b>131</b>

# 0 Formelzeichen

## 0.1 Indizes und Formatierung

$X_{x0}$	Index für unbelasteter Zustand
$X_{xA}$	Index für stationärer Zustand oder Arbeitspunkt
$i \in \{r, l, f, a, W, R\}$	Indizes für <u>r</u> echts, <u>l</u> inks, v <u>o</u> rne ( <u>f</u> ront), hinten ( <u>a</u> ft), Antriebsräder zusammengefasst ( <u>w</u> heel), Lenkrollen zusammengefasst ( <u>r</u> oller)
$\underline{X}$	Variable für gemittelten Wert
<i>kursiv</i>	Variable und Index
<b>fett</b>	Vektor- oder Matrixvariable
unformatiert	Zahlenwert und physikalische Einheit

## 0.2 Lateinische Buchstaben

$b$	[m]	Höhe eines Bodenabsatzes
$C$		horizontiertes Koordinatensystem
$C_E$		erdfestes oder ortsfestes Koordinatensystem und Inertialsystem
$c_R$	[N/m]	Federkonstante des Reifens einer Lenkrolle ( <u>r</u> oller)
$c_S$	[N/m]	Federkonstante einer Lenkrollenfederung ( <u>s</u> uspension)
$C_V$		fahrzeugfestes Koordinatensystem ( <u>v</u> ehicle)
$c_W$	[N/m]	Federkonstante des Reifens eines Antriebsrads ( <u>w</u> heel)
$d_R$	[Ns/m]	Dämpfkonstante einer Lenkrolle
$d_S$	[Ns/m]	Dämpfkonstante einer Lenkrollenfederung
$d_W$	[Ns/m]	Dämpfkonstante des Reifens eines Antriebsrads
$F_C$	[N]	coulombsche Reibung
$F_G$	[N]	Gewichtskraft
$F_H$	[N]	Horizontalkraft
$F_K$	[N]	Krümmungswiderstand
$F_R$	[N]	Rollwiderstand
$F_x$	[N]	Kraft in $x_V$ - Richtung
$F_{X_i}$	[N]	Umfangskraft im Radaufstandspunkt, $i \in \{r, l, W\}$
$F_Y$	[N]	Seitenkraft
$F_{Z_i}$	[N]	Radlast, $i \in \{r, l, f, a, W, R\}$

$G$		Teil des Konfigurationsraums und Liegruppe, beschreibt Positionen und Orientierungen eines Starrkörpers
$g$		Gravitationskonstante $9,81 \text{ m/s}^2$
$g \in G$		Element von $G$
$h_i$	[m]	Höhe der Fahrbahn unter einem Rad über der Referenzebene, $i \in \{r, l, f, a, W, R\}$
$j$		imaginäre Einheit
$J_W$	[kg m <sup>2</sup> ]	axiales Trägheitsmoment eines Antriebsrads ( <u>w</u> heel)
$J_x$	[kg m <sup>2</sup> ]	Trägheitsmoment des Roboters um die $x_V$ - Achse
$J_y$	[kg m <sup>2</sup> ]	Trägheitsmoment des Roboters um Drehpunkt bei Nickschwingung
$J_z$	[kg m <sup>2</sup> ]	Trägheitsmoment des Roboters um die $z_V$ - Achse
$m$	[kg]	Gesamtmasse des Roboters
$M$		Basisraum, $M \subset Q$
$m_i$	[kg]	Teilmasse des Roboters über Radaufstandspunkt, $i \in \{r, l, f, a, W, R\}$
$m_k$	[kg]	Koppelmasse
$M_r, M_l$	[Nm]	Antriebsmoment rechter, linker Antrieb
$M_W$	[Nm]	Antriebsmoment, $M_W = M_r + M_l$
$n$		Systemordnung oder Dimension
$n$	[s <sup>-1</sup> ]	Drehzahl
$Q$		Konfigurationsraum
$\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_n)^T$		Konfiguration(svektor) und Element von $Q$
$r_B$	[m]	Radius des zylinderförmigen Roboterkörpers ( <u>b</u> ody)
$r_{DW}$	[m]	dynamischer Reifenhalbmesser eines Antriebsrads
$r_R$	[m]	statischer Reifenhalbmesser eines Lenkrads
$r_W$	[m]	statischer Reifenhalbmesser eines Antriebsrads
$S, S_X$	[%]	Treibschlupf, Bremsschlupf
$s_S$	[m]	horizontaler Abstand der Lenkachsen ( <u>s</u> teering <u>a</u> xles)
$s_{sub}$	[m]	Subtangente bei progressiven Radlastkennlinien
$s_W$	[m]	axialer Abstand der Antriebsräder
$S_Y$	[%]	Seitenschlupf
$TQ$		Tangentialbündel zu $Q$
$T_q Q$		Tangentialraum zu $Q$ am Element $\mathbf{q}$
$v$	[m/s]	Vorwärtsgeschwindigkeit des Roboters

$z_C$	[m]	Höhe des aufbaufesten Koordinatensystems $C_V$ über dem horizontalen Koordinatensystem $C$ auf der Referenzebene
$z_{\text{cog}}$	[m]	Höhe des Schwerpunkts im fahrzeugfesten Koordinatensystem $C_V$
$z_i$	[m]	Höhe des aufbaufesten Bezugspunkts oder Schwerpunkts einer Teilmasse über der Referenzebene und über dem Radaufstandspunkt, $i \in \{l, r, f, a\}$
$z_{\text{pw}}$	[m]	Abstand der Drehachse der Nickschwingung zu $y_V$
$z_{Si}$	[m]	Höhe des Schwerpunkts der Lenkrollenfederung über der Referenzebene, $i \in \{f, a\}$

### 0.3 Griechische Buchstaben

$\alpha$	[rad]	Schräglaufwinkel
$\delta$	[rad/s]	Abklingkoeffizient der gedämpften harmonischen Schwingung
$\phi_i$	[rad]	Antriebsradwinkel, $i \in \{r, l\}$
$\gamma$	[rad]	Stoßwinkel eines Rads an einem Bodenabsatz
$\varphi$	[rad]	Wankwinkel
$\mu$		Kraftschlussbeiwert
$\mu_g$		Gleitbeiwert
$\mu_h$		Haftbeiwert
$\mu_y$		seitlicher Kraftschlussbeiwert
$\theta$	[rad]	Nickwinkel
$\rho$	[rad]	Steigungswinkel einer Rampe
$\omega_0$	[rad/s]	Kreisfrequenz der ungedämpften harmonischen Schwingung
$\omega_d$	[rad/s]	Kreisfrequenz der gedämpften harmonischen Schwingung
$\psi, \psi_E$	[rad]	Gierwinkel (bzgl. Inertialsystem)

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Der Begriff „Roboti“ wurde 1921 von einem Schriftsteller für fiktive menschenähnliche Maschinen eingeführt, die für Menschen unterschiedliche Arbeiten durchführen. Heute wird unter dem Begriff „Roboter“ eine Vielfalt technischer Entwicklungen und Visionen verstanden. Eine Unterkategorie sind Maschinen ähnlich dem ursprünglichen Verständnis, nämlich mobile Roboterassistenten (Hägele 2001). Ihr Zweck ist, Menschen bei Arbeiten zu unterstützen, zu entlasten, gefährliche Arbeiten zu übernehmen oder Kommunikations- und Informationsdienste zur Verfügung zu stellen.

Bis heute wurden Roboterassistenten für Haushalt, Entertainment und Werkstatt als Forschungsdemonstratoren entwickelt (Graefe 2003), (Graf 2004), (Helms 2003), (Schraft 1998). Sie haben Radfahrwerke und sind für den Einsatz in strukturierten, von Menschen geschaffenen Umgebungen ausgelegt (kein Gelände), in denen sich Menschen unter normalen Umständen ohne besondere Hilfsmittel und Techniken bewegen können (kein Fliegen, Klettern, Schwimmen, Tauchen). Sie bestehen aus einer mobilen Roboterplattform und Aufbauten mit unterschiedlichen Funktionsbaugruppen. Ihre Nutzlasten liegen etwa zwischen 20 kg und 80 kg.

Der Durchbruch von der Forschung zur Serienproduktion steht bei mobilen Roboterassistenten noch bevor (UNECE 2005) und deren wirtschaftliche Lebensfähigkeit wird stark vom Nutzungsgrad abhängen (UNECE 2005). Wegen der hohen Stückkosten sind erste kommerzielle Anwendungen im gewerblichen Bereich zu erwarten, wo Assistenzdienste einen großen Nutzen in Form von Kosteneinsparungen, Qualitätssteigerungen oder höherer Arbeitssicherheit haben. Beispiele können die automatische Gebäudeüberwachung, die Inspektion von Produktionsanlagen (Westkämper 2007), (FhG-IPA 1994) oder die Wartung prozesstechnischer Anlagen sein (Kohlhepp 2002).

Die Plattformen existierender Roboterassistenten haben starre Fahrwerke, die ebenen, harten Boden benötigen. Starre Fahrwerke sind jedoch ein großes Hemmnis für den praktischen Einsatz von Roboterassistenten in Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen, denn sie können selbst wenige Zentimeter hohe Absätze, Bodenunebenheiten, flache Rampen oder Spalten nicht überfahren. Weiterhin benötigen sie zum Fahren und Manövrieren erheblich mehr Platz als ein Mensch.

Bisher existieren noch keine Roboterplattformen mit nicht starren Fahrwerken, die unter beliebigen Boden- und Umgebungsbedingungen, wie sie in Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen herrschen, ohne Mobilitätseinschränkung operieren und auch in Engstellen manövrieren können. Nicht starre, passiv gefederte Fahrwerke werden in der Schienen- und Kraftfahrzeugtechnik ausführlich behandelt (Popp 1993), (Willumeit 1998), (Mitschke 2004), jedoch sind diese Erkenntnisse nicht generell auf mobile Roboter übertragbar, da sich Radanordnungen, Antriebsprinzipien und Bauweisen unterscheiden.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziele der vorliegenden Arbeit sind,

- grundlegende Erkenntnisse für die Gestaltung von mobilen Roboterassistenten mit passiv gefederten Radfahrwerken zu erarbeiten, die in strukturierten Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen unter allen existierenden Boden- und Einsatzbedingungen operieren können,
- Konzepte, Realisierungsvarianten und Auslegungsverfahren für Fahrwerk und mechanisches Gesamtsystem eines Roboterassistenten abzuleiten, so dass ein breites Spektrum von Anforderungen potenzieller Einsatzszenarien erfüllt werden kann und
- einen Prototypen zu realisieren, um die entwickelten Konzepte, Modelle und Auslegungsverfahren zu verifizieren.

Zu einem Roboterfahrwerk im Rahmen dieser Arbeit zählen Räder, Bereifung, Radaufhängungen, Federungen, Radanordnung und Fahrwerksgeometrie. Mit Realisierungsvarianten sind die Einzelbaugruppen und Kombinationen aus Fahrwerk, Fahrgestell, Antriebsstrang und Massengeometrie gemeint, die die gestellten Anforderungen erfüllen und derzeit technisch realisierbar sind.

Um diese Ziele zu erreichen, werden folgende Teilaufgaben bearbeitet:

- Ermittlung von Einsatzszenarien und deren Boden-, Umgebungs- und Einsatzbedingungen und Ableitung funktionaler und technischer Anforderungen für universell einsetzbare, gefederte Fahrwerke von Roboterassistenten (Kapitel 3).
- Entwicklung von Konzepten für passiv gefederte Fahrwerke und für Realisierungsvarianten von Teil- und Gesamtsystemen von Roboterassistenten (Kapitel 4).
- Modellierung passiv gefederter Fahrwerke und Untersuchung der Fahrdynamik in extremen Fahrsituationen zur Ermittlung von Wertebereichen für die wesentlichen physikalischen und technischen Parameter von Fahrwerk und mechanischem Gesamtdesign im Hinblick auf eine stabile Fahrdynamik (Kapitel 5).
- Realisierung eines prototypischen Roboterassistenten mit passiv gefedertem Fahrwerk und Messungen zu Fahrdynamik und Antriebsstrang in extremen Fahrsituationen zur Verifikation der entwickelten Konzepte und Modelle (Kapitel 6).

## 2 Grundlagen und Ausgangssituation

### 2.1 Begriffe und Definitionen

Service-roboter	„Ein Service-roboter 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“ (Schraft 1998).
Roboterassistent	„Roboterassistenten können als eine weitere Evolutionsstufe von Service-robotern verstanden werden. Sie sind Helfer des Menschen, charakterisiert durch ihre erweiterte, dem Menschen ähnliche Wahrnehmungs-, Interaktions- und Kommunikationsfähigkeit und agieren in dessen natürlichen Umgebungen wie zum Beispiel im Haushalt oder in Fertigungshallen“ (Hägele 2001). Sie sind anders als z.B. Reinigungsroboter in ihrer technischen Ausgestaltung nicht auf eine oder wenige spezifische Aufgaben beschränkt. Ein synonyme Begriff ist „Assistenzroboter“.
Personal Robot	Sammelbegriff für kommerzielle Kleinroboter für Privatanwender. Bsp.: Bodenreinigungsroboter (RoboCleaner 2004), (iRobot 2006), Rasenmäherroboter (Robomow 2007), mobiler PC-Roboter (PC-Bot 2007), Spielzeugroboter (AIBO 2006), Unterhaltungs- und Kommunikationsroboter (PaPeRo 2006). Ein Personal Robot wird zum Roboterassistent, wenn er für den Menschen nützliche Dienste ausführt und über soziale Interaktionsfähigkeiten verfügt. Letztgenannte zwei Beispiele tendieren in diese Richtung.
Educational Robot	Sammelbegriff für eine große Variantenvielfalt an kommerziellen kleinen mobilen Roboterplattformen, die Spiel-, Lehr- und Ausbildungszwecken für Schüler und Studenten dienen. Beispiele: aus den 80er Jahren (HERO 2002), (RB5X 2007), aktuell (MerlinRobotics 2005), (PC-Bot 2007). Weitere Beispiele sind Spielbaukästen mit Konstruktionselementen für mobile Roboter z.B. unter den Markennamen LEGO® oder fischertechnik®.
Contest Robot	Sammelbegriff für Roboter, die speziell für Wettbewerbe entwickelt oder modifiziert wurden. Beispiele für Roboterwettbewerbe: Eurobot (jährlich seit 1998, Europa), Robocup (jährlich seit 1997, international), ABU Robocon (seit 2001, Asien), DARPA Grand Challenge (USA), ELROB (Europa), Cleaning Robot Contest (international).
Räder, Rollen und Reifen	Die Begriffe zur Beschreibung von Rädern und Rollen orientieren sich an der Norm EN 12526: Eine Rolle besteht aus einem Gehäuse, einem oder mehreren Rädern, einer Achse und wenn erforderlich aus Zubehörteilen. „Berei-

fung“ und „Reifen“ werden synonym gebraucht.

**Roboterplattform**      Fahrbare Basis eines mobilen Roboters bestehend aus Fahrwerk (vgl. Unterkapitel 1.2), Fahrgestell, Antriebsstrang, Steuerung und Energieversorgung.

**Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten**      Die Begriffe zur Beschreibung von Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten sowie die verwendeten Formelzeichen orientieren sich an DIN 70000.

## 2.2 Abgrenzung zu mobilen Robotern anderer Bauart

### 2.2.1 Kategorisierung mobiler Roboter

Im Rahmen dieser Arbeit meint der Begriff „Roboter“ nur mobile Roboter. Mobile Roboter können nach unterschiedlichen Kriterien kategorisiert werden:

- nach dem Grad an Autonomie (von teleoperiert bis voll autonom)
- nach ihren Anwendungsgebieten (z.B. Inspektion, Reinigung, Brandbekämpfung, Transport)
- nach dem Einsatzzweck (siehe Unterkapitel 2.1)
- nach dem physikalischen Bewegungsraum (siehe Bild 2.1)
- nach Größe und Gewicht
- nach Art und Ausgestaltung ihres Fortbewegungsapparats
- nach ihrer Bauweise (Form, Konstruktionsprinzipien, Materialien)
- nach wirtschaftlichen Aspekten

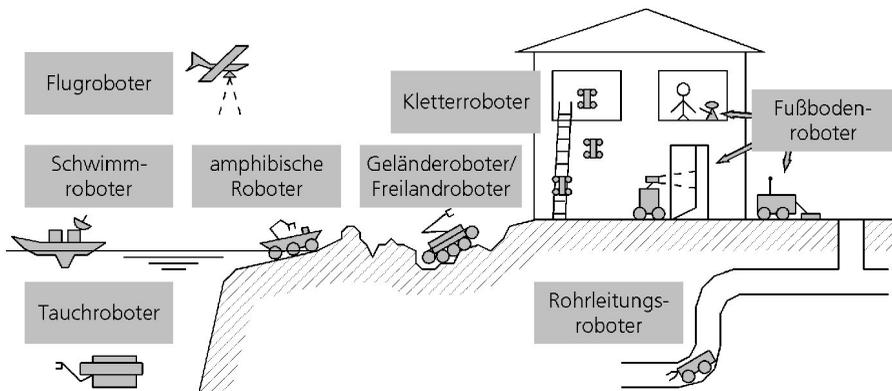


Bild 2.1: Kategorisierung mobiler Roboter nach ihrem Bewegungsraum

Nach der Definition aus Unterkapitel 2.1 sind Roboterassistenten insbesondere Fußbodenroboter, da sie sich in strukturierten Umgebungen bewegen, in denen sich Menschen ohne besondere Hilfsmittel bewegen können.

## 2.2.2 Einordnung der betrachteten mobilen Roboter

Im Rahmen dieser Arbeit werden Fußbodenroboter, aber keine Personal Robots, Educational Robots und Contest Robots nach den Begriffsdefinitionen in Unterkapitel 2.1 betrachtet.

Die sozialen Interaktionsfähigkeiten als ein Hauptmerkmal von Roboterassistenten haben zwar keinen unmittelbar erkennbaren Einfluss auf die Ausgestaltung eines Fahrwerks, trotzdem ist es sinnvoll, die Fahrwerksentwicklung auf diese Klasse von Robotern zu beschränken, denn

- die Beschränkung auf Roboterassistenten liefert definierte Anwendungsfälle, hinter denen ein tatsächlicher Bedarf steht (UNECE 2005) und aus denen sich konkrete Anforderungen ableiten lassen. Trotzdem können die Ergebnisse dieser Arbeit auf andere Arten von mobilen Robotern ohne Einschränkung übertragbar sein, zum Beispiel auf rein teleoperierte Roboter, zu denen es Gemeinsamkeiten geben kann (Hamel 2003).
- die unmittelbare Nähe zum Menschen und der Einsatz in dessen Alltagsumgebung führt zu schärferen Anforderungen als der Einsatz in nur einer spezifischen Betriebsumgebung mit definierten Bedingungen. Ein mögliches Ergebnis besitzt hohe Universalität.

## 2.3 Stand der Technik

### 2.3.1 Beispielrealisierungen mobiler Roboterassistenten



Bild 2.2: Beispielrealisierungen für Forschungsdemonstratoren von mobilen Roboterassistenten

Bild 2.2 zeigt Beispiele mobiler Roboterassistenten, die mit mindestens einem Roboterarm ausgestattet sind. Die Teilbilder oben links zeigen MOVAID (Dario 1999) und HERMES (Bischoff 2004). Beide bestehen aus einer mobilen Basis und einem Oberkörper, den sie nach vorne beugen können, um Gegenstände auf dem Boden greifen zu können. Der Oberkörper von Care-O-bot II (Care-O-bot 2003) ist starr, aber sein Arm hat 7 Freiheitsgrade und große Reichweite. EMIEW (EMIEW 2006) hat zwei relativ schwache Arme, kommt aber in seiner Erscheinung und Mobilität von allen bisher entwickelten radbasierten Roboterassistenten dem Menschen am nächsten. Er hat mit seiner inversen Pendel-Bauweise eine kompakte Grundfläche, kann seinen Oberkörper für agile Fahrmanöver zur Seite kippen und bis 6 km/h schnell fahren, womit er nach Herstellerangaben der weltweit schnellste mobile Roboter ist. Unten rechts ist rob@work (Schraft 2003) abgebildet, einer der kompaktesten Roboterassistenten für den Industriebereich, der bisher entwickelt wurde. Alle Modelle wurden als Forschungsdemonstratoren und Technologieträger entwickelt, aber nicht für den Alltagseinsatz.

Weitere Beispiele für aktuelle, zum Teil bereits kommerzielle mobile Roboterassistenten sind (Wakamaru 2005), (PaPeRo 2006) und (RobovieR 2004). Sie haben weit entwickelte soziale Interaktions- und Kommunikationsfähigkeiten aber keine manipulativen Fähigkeiten – ihre Arme dienen der Kommunikation und dem Erscheinungsbild – sind zum Teil viel kleiner und eher den Personal Robots zuzuordnen.

### **2.3.2 Treppensteigende Roboterfahrwerke**

Um Stufen und Treppen zu überwinden, werden verstellbare oder artikulierte Fortbewegungsmechaniken eingesetzt. Damit sind Antriebsvorrichtungen gemeint, die zur Fortbewegung ihre äussere Gestalt verändern können. Dazu gehören alle Laufmaschinen, schlangenartigen Mechaniken, sowie Rad- und Kettenfahrzeuge, deren Räder oder Ketten in ihrer Lage verstellbar sind.

Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht zum Stand der Technik von artikulierten Roboterfahrwerken, die prinzipiell Treppen auf- und absteigen können und als Fahrwerk für Roboterassistenten geeignet sein könnten. Sie sind jeweils mit einem Platzhalter für den Aufbau eines Roboterassistenten versehen. Variante A ist ein einfaches Radfahrzeug. Demgegenüber sind die Varianten B bis F artikulierte Mechaniken. Die Tabelle beschreibt jeweils, wie Treppenfahrten realisiert werden und beschreibt gleichzeitig nachteilige Eigenschaften jeder Variante, die sich aus dem Konzept heraus oder in der Realisierung ergeben.

Beispiele für weitere Roboterfahrwerke mit anpassungsfähigen Kinematiken zum Überwinden von Stufen und Treppen sind HELIOS (Uchida 1999) und Shrimp III (Bluebotics 2006), doch sie haben sehr geringe Nutzlast und gewisse Einschränkungen in Art und Abmessungen der Treppenstufen und sind deshalb nicht in Tabelle 2.1 aufgelistet.

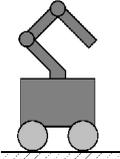
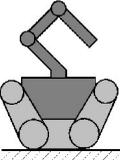
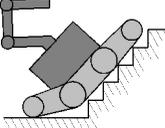
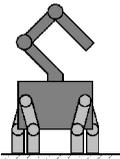
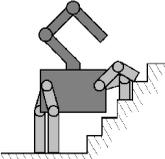
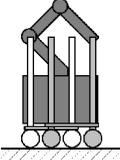
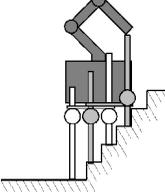
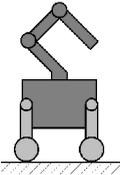
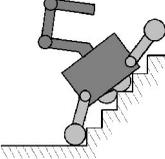
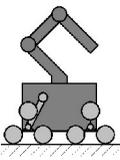
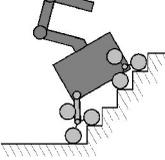
	Skizze	Beschreibung	Treppensteigen	Realisierungen	Spezifische Nachteile	
A		Radanordnung ohne verstellbare Antriebsvorrichtung	i.a. nicht möglich			
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Platzhalter</p> <p> für Aufbauten eines Roboterassistenten mit Roboterarm</p> <p> für Fortbewegungsmechanik</p> </div>					
B		Kettenantrieb mit einem schwenkbaren Kettenausleger vorne und/oder hinten		Anstellen der Kettenausleger auf Treppenschräge, Treppenfahrt auf Kanten der Stufen	(Raposa 2006), (iRobot 2006), (Remotec 2006), (Cyclops 2007), (Gehring 2000)	Kurvenbahn unbestimmt, Ketten reiben bei Kurvenfahrten, problematisch für empfindliche Böden oder spezielle Industrieböden (Gitterroste)
C		vielbeinige Laufmaschine eventuell kombiniert mit Teleskopbeinen		Taktiler Vorwärtsweg einzelner Beine auf nächste Stufe, Balancieren, Gewichtsverlagerung	(Arikawa 1996), (Spenneberg 2002)	viele Freiheitsgrade, viele Antriebe bei ungünstigen Hebelverhältnissen, steuerungstechnisch sehr aufwändig, langsam, schlechter Wirkungsgrad
D		2 Gleitrahmen, längs Fahrtrichtung verschiebbar, min. 2 x 3 Teleskopstelen mit Rädern		Teleskopstelen abwechselnd anheben/abstellen, dazwischen Gleitrahmen verschieben; Aufbauten bleiben immer horizontal	(Schmier 2001), (Ota 2001), (Genta 2000), (US6068073 2000)	mechanisch aufwändig, hoher Platzbedarf, mindestens 7 unabhängige Antriebe nur für Gleitrahmenmechanik + Fahr- und Lenkantriebe
E		Kurbelmechanik oder Laufmechanik mit Rollen oder Ketten		wechselseitiges Überschlagen der Kurbelbeine nach vorne, Balancieren, Gewichtsverlagerung	(Hirose 1995), (Adachi 2001), (Michaud 2003), (Ylönen 2002), (US5515934 1996)	hoher Platzbedarf, steuerungstechnisch aufwändig, Gefahr des Abgleitens
F		Variante von E mit 3-Rad-Kurbelmechanik		gleichzeitiges Vorwärtsdrehen der Kurbelmechaniken, einzelne Räder stehen relativ zu den Stufen still	(Sano 2006), (Stairrobot 2006)	hoher Platzbedarf, nicht für verschiedene Treppen-/Stufengeometrien geeignet

Tabelle 2.1: Stand der Technik für treppensteigende Roboterfahrwerke

Neben den spezifischen Nachteilen, die in Tabelle 2.1 aufgelistet sind, benötigen treppensteigende Fortbewegungsmechaniken zusätzlich Sensoren, die das Treppensteigen taktill überwachen sowie ausgeprägte künstliche Intelligenz für die Sensordatenauswertung, die Interpretation von Situationen und die sinnvolle Ansteuerung der Antriebe. Bei der Komplexität solcher Maschinen besteht eine erhebliche Gefahr, bei Fehlfunktion einer Komponente die Treppe hinunterzufallen oder abzugleiten. Für eine in der Umgebung des Menschen operierende Maschine wäre dies ein inakzeptables Sicherheitsrisiko und aus Haftungsgründen ein Hemmnis für kommerzielle Anbieter. Weiterhin sei hier eine Erkenntnis aus Kapitel 3 vorweggenommen, nämlich dass außer in kleineren Wohnhäusern von Privathaushalten und einigen wenigen Industrieumgebungen alle wahrscheinlichen Einsatzbereiche für Roboterassistenten auch ohne Treppenzugänge erreichbar sind.

Aus diesen Gründen sind die bisher entwickelten treppensteigenden Fahrwerke für die Anwendung auf Roboterassistenten nicht zweckmäßig und es werden im Rahmen dieser Arbeit keine treppensteigenden Fahrwerke berücksichtigt.

### 2.3.3 Roboterplattformen

Entwicklungen und Einsatzbeispiele mobiler Roboter sind in diversen Quellen zu finden (Schraft 1998), (Schraft 2004), (EURON 2007), (UNECE 2005), (Klaaßen 2004). Dieser Abschnitt gibt eine umfassende Darstellung solcher radbasierter mobiler Roboter, deren Plattformen hinsichtlich Größe, Leistungsdaten und technischem Reifegrad prinzipiell eine Plattform für mobile Roboterassistenten sein können. Es werden auch solche Roboterplattformen betrachtet, deren Größe und Nutzlast größer oder kleiner ist, die aber ohne Technologieänderung auf geeignete Größe skaliert werden könnten. Weiterhin werden Gelände-/Freilandroboter mit Radfahrwerken berücksichtigt. Tabelle 2.2 fasst Namen, Quellen und Basisdaten dieser Roboter zusammen.

In der Tabelle werden 3 Kinematiktypen unterschieden:

- *überbestimmte Differenzialkinematiken* haben 4 oder mehr angetriebene, nicht lenkbare Räder. Bei Kurvenfahrt reiben die Räder seitwärts über den Untergrund. Die genannten Roboter sind zum Teil kommerziell erhältlich, haben einen hohen technischen Reifegrad, lange Laufzeit und sind prinzipiell für den Außenbereich geeignet.
- *Differenzialkinematik mit Lenkrollen* bezeichnet Radanordnungen ohne rutschende Radbewegungen und Lenkung über die Drehzahldifferenz der Antriebsräder. Die Lenkrollen sind passiv mitdrehend oder aktiv gelenkt.
- *Omnidirektionale Radkinematiken* sind Roboterplattformen, die sich ohne ihre Ausrichtung zu ändern in alle Richtungen in der Ebene bewegen können.

	<b>Robotername, Quelle</b>	<b>Größe, Gewicht und Nutzlast ohne Applikationsspezifische Baugruppen</b>	<b>Umgebung, Boden</b>
<b>überbestimmte Differenzial- kinematik</b>	A KURT3D, (Worst 2005)	LxBxH: 45 x 33 x 47 cm, 22 kg, ~ 15 kg	Freiland, Ebene
	B ATRV-JR, (ATRV-JR 2006)	LxB: 105 x 65 cm, 118 kg, 100 kg	Freiland, Gelände
	C robuROC4, (Robosoft 200)	LxBxH: 105 x 80 x 70 cm, 140 kg, 100 kg	Freiland, Gelände
	D Andros F6A, (Remotec 2006)	LxBxH: 1,3 x 0,7 x 1,4 m, 220 kg, ~ 100 kg	Freiland, Gelände
<b>Differenzialkinematik mit Lenkrollen</b>	E MX-500, (Neobotix 2006)	LxBxH: 70 x 58 x 39 cm, 70 kg, 50 kg	Freiland, Ebene
	F Segway, (Nguyen 2004)	BxH: ~ 60 x 76 cm, 64 kg, 90 kg	in Gebäuden
	G PowerBot, (MobileRobots 2006)	LxBxH: 85 x 63 x 43 cm, ~ 100 kg, > 100 kg	in Gebäuden
	H Scitos G5, (MetraLabs 2006)	LxBxH: 73,5 x 61 x 57 cm, 58 kg, 50 kg	in Gebäuden
	I HERMES, (Bischoff 2004)	LxBxH: 70 x 70 x 185 cm, 250 kg, ~ 120 kg	in Gebäuden
	J M5-A Scout, (RoboProbe 2006)	ØxH: 61 x 112 cm, 80 kg, 50 kg	Freiland, Ebene
	K rob@work, (Schraft 2003)	LxBxH: 68 x 66 x 57 cm, ~ 200 kg, ~ 80 kg	in Gebäuden
	L FRIEND 2, (Volosyak 2005)	LxB: ~ 75 x ~ 65 cm, ~ 150 kg, ~ 100 kg	in Gebäuden
	M iBot, (iBot 2006)	LxB: 109 x 64 cm, 131 kg, > 100 kg	Freiland, Gelände
	N MB835, (Bluebotics 2006)	ØxH: 70 x 70 cm, 100 kg, 50 kg	in Gebäuden
	O Care-O-Bot I, (Graf 2004)	LxBxH: ~ 65 x 57 x 85 cm, ~ 150 kg, ~ 50 kg	in Gebäuden
P AURORA, (Mandow 1996)	LxBxH: 1,4 x 0,8 x 1 m, ~ 250 kg, ~ 80 kg	in Gebäuden	
Q LABO-4 (LABO-4 2007)	LxBxH: 65 x 58 x 31 cm, 65 kg, 115 kg	in Gebäuden	
<b>Omnidirektionale Radkinematik</b>	R Seekur, (MobileRobots 2006)	LxBxH: 1,4 x 1,3 x 1,1 m, 350 kg, 70 kg	Freiland, Gelände
	S Nomad, (CMU 1997)	LxBxH: 2,4 x 2,4 x 3 m, 550 kg, ~ 200 kg	Freiland, Gelände
	T VUTON-II, (Damoto 2002)	LxBxH: 568 x 568 x 92 mm, 16 kg, 130 kg	Freiland, Ebene
	U XR4000 (Holmberg 2000)	ØxH: 62 x 85 cm, 160 kg, ~ 50 kg	in Gebäuden
	V MEGAN-1 (Diegel 2002)	LxBxH: ~ 70 x 50 x 50 cm, ~ 50 kg, ~ 10 kg	Freiland, Gelände
Ø: Durchmesser, '~' vor geschätzten Werten			

Tabelle 2.2: Mobile Roboter, die sich als Plattform für mobile Roboterassistenten eignen könnten

Die omnidirektionale Kinematik V ist ein Konzept aus omnidirektionalen Mecanumrädern und normalen Rädern für unebenen Boden. Die Kinematiken R, S, T und U sind überbestimmt, so dass Antriebs- und Lenkmotoren koordiniert angesteuert werden müssen. Auch P mit Differenzialkinematik ist überbestimmt, denn Vorder- und Hinterrad sind aktiv gelenkt und mechanisch gekoppelt. Lenkwinkel und Drehzahldifferenz der Antriebsräder müssen aufeinander abgestimmt werden. Dieses Doppellenkkonzept wurde auch bei anderen mobilen Robotern umgesetzt, z.B. RAM-1 (Muñoz 1994) und Shrimp III (Bluebotics 2006).

Tabelle 2.3 zeigt die Radkinematiken der Roboter von der Seite und von unten. Stütz- oder Lenkrollen werden zum Teil als Doppelrad ausgeführt oder haben eine außermittige Lenkachse, um beim Lenken ein Reiben auf dem Boden zu vermeiden. Lenkrollen können passiv oder aktiv gelenkt sein.

Neben den Kinematikvarianten aus Tabelle 2.2 gibt es die 4-Radanordnung von Straßenfahrzeugen und die 3-Radvariante mit 2 un gelenkten Stützrollen und einem kombinierten Antriebs-Lenkrad, die z.B. bei kleinen Elektrostaplern verwendet wird. Sie werden aber selten für mobile Roboter gewählt.

Neben den Roboterplattformen aus Tabelle 2.2 wurden bis heute viele weitere mobile Roboter mit hohem Reifegrad entwickelt, die aber ähnliche Daten haben und prinzipiell in das Schema der Kinematikvarianten von Tabelle 2.3 passen. Deshalb sind die bis hier vorgestellten Roboter eine repräsentative Auswahl für den Stand der Technik.

	überbestimmte Differenzialkinematik		Differenzialkinematik (mit Lenkrollen)			omnidirektionale Radkinematik
Seitenansicht						
Draufsichten und Referenzen (Tabelle 2.2)						
	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li> Lenkrolle</li> <li> Antriebsrad</li> <li> Rolle oder Rad, un gelenkt</li> <li> Omnidirektionalrad</li> <li> Draufsicht Rolle oder Rad, passiv oder aktiv gelenkt</li> <li> Platzbedarf beim Lenken</li> </ul> </div>					

Tabelle 2.3: Varianten von Radanordnungen mobiler Roboter in Seitenansicht und Draufsicht

### 2.3.4 Technologien für den Aufbau mobiler Roboter

Mobile Roboter sind in der Regel modular aufgebaut (Schmierer 2001), (Hans 2005), nur in wenigen Fällen gibt es ein stark integriertes Design, z.B. bei hoch optimierten Robotern zur Planetenerkundung wie Modell S aus Tabelle 2.2. Modulare Lösungen beanspruchen allgemein mehr Platz und Gewicht, sind aber effizienter zu produzieren und zu warten.

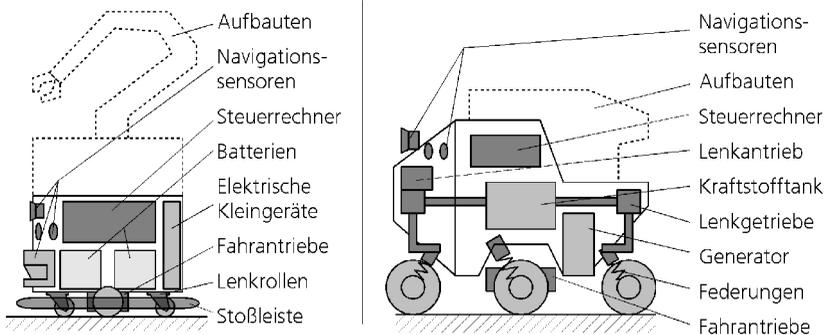


Bild 2.3: Aufbauprinzipien mobiler Roboterplattformen

Die funktionalen Komponenten einer mobilen Roboterplattform sind in Tabelle 2.4 aufgelistet. Sie sind seit über 40 Jahren prinzipiell unverändert (Rosen 1966), nur die Technologien entsprechen dem Stand zur jeweiligen Entwicklungszeit. Bild 2.3 zeigt die zugehörige Aufbaustruktur mobiler Roboter für das Beispiel Differenzialkinematik mit Lenkrollen, links mit elektrischer Energieversorgung und rechts mit der für mobile Roboterplattformen selten verwendeten Variante mit Generator und Verbrennungsmotor (Modell P, AURORA), die z.B. für Roboter in der Landwirtschaft bevorzugt verwendet wird.

Komponente	Verwendete Technologien und Materialien
starrer Rahmen	Stahl, Aluminium, Verbundwerkstoffe
Räder (und Rollen), Bereifung	luftgefüllt, Vollgummi (~ 65 ° bis 85 ° Shore A), Polyurethan (~ 75 ° bis 95 ° Shore A), Polyamid, Vollmetall, Lenkrollen mit Lenk-Traglager
Antriebsstrang	Gleichstrommotoren bürstenbehaftet oder bürstenlos, Synchronmotoren, Getriebe (gekapselt und schmierstoffgefüllt; Planetengetriebe, Stirnradgetriebe), Riementrieb, Inkrementaldrehgeber (induktiv, optisch), Antriebsreglerelektronik (mit Umrichter)
Bremsen (optional)	Feststellbremse am Motor angeflanscht (elektrisch geöffnet), Betriebsbremse über Antriebsregler und Bremswiderstand oder Rückspeisung
Hülle oder Verkleidung (opt.)	Verbundwerkstoffe, Blech, Aluminium, Kunststoffe
Stoßleiste (opt.)	Metall, Gummi, Schaumstoff
elektrische Baugruppen	Spannungswandler, Sicherungen, Verkabelung, Relais, etc.
Steuerrechner	Microcontroller, embedded PC, Desktop PC, Industrial PC
Sensoren zur Kollisionsvermeidung (opt.)	Ultraschallsensoren, optische Sensoren
Navigationssensoren (opt.)	Stereokamera, Kamera mit Kegel-/Rundspiegel, Laserscanner, Ultraschall, Odometrie, Kreisel, Drehratensensoren (mechanisch, optisch)
autonome Navigation (opt.)	Sensordatenverarbeitung mit Lokalisierung und Kartierung, Autonomieverhalten, Reaktionsverhalten, Bahngenerierung auf PC
Energieversorgung	wiederaufladbare Bleibatterien, Bleigelbatterien, Lithiumbatterien, Solarzellen, Generator mit Verbrennungsmotor und Kraftstofftank

Tabelle 2.4: Funktionale Komponenten und Technologien von mobilen Roboterplattformen

### 2.3.5 Leistungsdaten von mobilen Roboterplattformen

Kommerzielle Roboterplattformen werden auf ihre Leistungsdaten hin optimiert, um sich gegenüber dem Wettbewerb hervorzuheben und den Anwenderwünschen besonders nach Mobilität und langer unterbrechungsfreier Laufzeit gerecht zu werden. Tabelle 2.5 stellt die Leistungsdaten einiger Modelle gegenüber, die dem derzeitigen Technologiestand entsprechen. Sie sind gleichzeitig Richtwerte für Realisierungsvarianten von Plattformen mit nicht starrem Fahrwerk.

Name Referenz (Tabelle 2.2)	robuROC 4 C	PowerBot G	Scitos G5 H	ibot M	LABO-4 Q
<b>Plattformbeschreibung</b>	universelle Gelände- plattform	universelle Plattform für Innenräume	universelle Plattform für Innenräume	elektrischer Rollstuhl in inverser Pen- delbauart	universelle Plattform für Innenräume
<b>Maximalgeschwindigkeit [m/s]</b>	2 - 5,5	1,7	1,4	3	2
<b>Leergewicht [kg]</b>	140		58	131	65
<b>Nutzlast [kg]</b>	100	100	50	~100	115
<b>mittlere Laufzeit [h]</b>		2,5	< 12	4 - 10	8 (bei 30 kg Nutzlast)
<b>Batterieladezeit [h]</b>		5	12	6 - 8	
<b>Batteriekapazität [Wh]</b>		2.100	912	*	768
<b>max. Hindernishöhe (beladen) [mm]</b>	200	30	15	~50	
<b>max. Steigung (beladen) [°]</b>	45	8,5	10	10	

\* Reichweite bis 20 km

Tabelle 2.5: Leistungsdaten von mobilen Roboterplattformen lt. Herstellerangaben

### 2.3.6 Vergleich von Größe und Nutzlast

In diesem Abschnitt wird der Platzbedarf, den existierende Roboterplattformen zum Manövrieren benötigen, verglichen. Dazu wird nur ihre mobile Plattform mit Batterien aber ohne Aufbauten betrachtet. Für die Aufbauten eines Roboterassistenten mit mindestens einem Roboterarm, diversen Applikationsgeräten und Transportkapazität wird eine Nutzlast von 120 kg angenommen. Für den Vergleich werden alle Modelle auf diese Nutzlast skaliert und ihre tatsächlichen Grundflächenabmessungen entsprechend vergrößert oder verkleinert. Um die resultierende Grundfläche wird schließlich ein Umkreis gelegt, der den Platzbedarf zum Manövrieren beim Drehen um die eigene Achse (Wendekreis) markiert. Bei den Modellen E, G, H, L und Q ist zusätzlich berücksichtigt, dass ein Drehen auf der Stelle nur um die außermittige Achse zwischen den Antriebsrädern möglich ist, was den Wendekreis vergrößert. Tabelle 2.6 zeigt das Ergebnis für alle in Tabelle 2.2 aufgelisteten Modelle.

Der Vergleich zeigt den generell großen Wendekreis existierender Roboterplattformen von 90 cm oder mehr. Einzige Ausnahme ist Modell T, das funktionsbedingt auf hohe Nutzlast ausgelegt ist, aber nicht für selbst kleine Bodenebenheiten geeignet ist. Ein Roboterassistent für die Alltagsumgebung des Menschen sollte jedoch in seiner Grundfläche den Platzbedarf eines Menschen nicht wesentlich überschreiten.

		Name	Nutzlast der Plattform	Grundflächen-skalierungs-faktor	resultierende Grund-flächenabmessungen	resultierender Wendekreis-durchmesser
überbestimmte Differenzial-kinematik	A	KURT3D	~ 15 kg	8	L x B: 127 x 93 cm	~ 158 cm
	B	ATRV-JR	100 kg	1,2	L x B: ~ 115 x 88 cm	~ 145 cm
	C	robuROC4	100 kg	1,2	L x B: 115 x 88 cm	145 cm
	D	Andros F6A	~ 100 kg	1,2	L x B: 145 x 81 cm	~ 166 cm
Differenzialkinematik (mit Lenkrollen)	E	MX-500	50 kg	2,4	L x B: 108 x 90 cm	187 cm
	F	Segway	90 kg	1,3	L x B: ~ 58 x 69 cm	~ 90 cm
	G	PowerBot	~ 100 kg	1,2	L x B: 93 x 68 cm	~ 129 cm
	H	Scitos G5	50 kg	2,4	L x B: 114 x 95 cm	148 cm
	I	Hermes	~ 120 kg	1,0	L x B: 70 x 70 cm	~ 99 cm
	J	M5-A Scout	50 kg	2,4	Ø: 94 cm	94 cm
	K	rob@work	~ 80 kg	1,5	L x B: 83 x 81 cm	~ 116 cm
	L	FRIEND 2	~ 100 kg	1,2	L x B: 82 x 71 cm	~ 130 cm
	M	iBot	~ 100 kg	1,2	L x B: 119 x 70 cm	~ 138 cm
	N	MB835	50 kg	2,4	Ø: 108 cm	108 cm
	O	Care-O-bot I	~ 50 kg	2,4	Ø: 90 cm	~ 108 cm
	P	AURORA	~ 100 kg	1,2	L x B: 131 x 66 cm	~ 147 cm
Q	LABO-4	115 kg	1,04	L x B: 131 x 66 cm	~ 105 cm	
omnidirektionale Radkinematik	R	Seekur	70 kg	1,7	L x B: 183 x 170 cm	250 cm
	S	Nomad	~ 200 kg	0,6	L x B: 186 x 186 cm	~ 263 cm
	T	VUTON-II	130 kg	0,92	L x B: 55 x 55 cm	77 cm
	U	XR4000	~ 50 kg	2,4	Ø: 96 cm	~ 96 cm
	V	MEGAN-1	~ 10 kg	12	L x B: 242 x 173 cm	~ 298 cm

Tabelle 2.6: Skalierung auf die Nutzlast von 120 kg und Platzbedarf zum Manövrieren

### 2.3.7 Fahrdynamik von mobilen Robotern

In diesem Abschnitt werden die fahrdynamischen Eigenschaften der Roboter aus Tabelle 2.2 untersucht. Tabelle 2.7 listet deren Federungs- und Radeigenschaften auf. Die 4. Spalte beschreibt die Federung und den Federweg und die 5. Spalte die Eigenschaften der Räder, die auch Federwirkung haben können.

Die Modelle F und M haben keine Stützräder und können wie (EMIEW 2006) nur aktiv geregelt aufrecht stehen. Im Fehlerfall oder bei Fahrt über kleinere Absätze kann der Roboter umkippen. Bei 2- und 3-Radanordnungen haben statisch alle Räder Bodenkontakt, aber dynamische Fahrsituationen sind kurzzeitig instabil, wenn ein Rad den Bodenkontakt verliert. Auch sind Aufbaubeschleunigungen und dynamische Belastungen auf die einzelnen Räder größer und Hindernisüberfahrten weniger glatt als bei vergleichbaren Doppel- oder Mehrachsfahrwerken (DIN V 45696-1).

Die Federungen von K und O sorgen nur für ausreichende Radaufstandskraft für die Traktion, weil die Antriebsräder selbst klein und hart sind. Sie sind nicht für Bodenunebenheiten (Schwellen, Spalten, etc.) ausgelegt. P, R und S sind vergleichsweise große und schwere Freiland-/Agrarroboter, die bedingt geländegängig sind. Verglichen mit ihren Abmessungen ist der Federweg klein. Daher können alle Roboterfahrwerke als nahezu oder völlig ungefedert bezeichnet werden.

	Name	Federung, Federweg	Antriebs- und Lenkräder (Abm. Ø x B [mm] z. T. geschätzt)
überbestimmte Differenzialkinematik	A KURT3D	keine	A: Vollgummi ~ 70 ° Shore A, 100 x 40, Stollenprofil
	B ATRV-JR	keine	A: Luft, 300 x 100, leicht ballig, Stollenprofil
	C robuROC4	keine	A: Vollgummi ~ 70 ° Sh., 480 x 130, ballig, Stollenprofil
	D Andros F6A	keine	A: Luft, 300 x 100, leicht ballig, Stollenprofil
Differenzialkinematik (mit Lenkrollen)	E MX-500	keine	A: Luft, 260 x 58, leicht ballig, Stollenprofil L: Lenkrolle, Hartgummi ~ 85 ° Sh., 165 x 45
	F Segway	keine	A: Vollgummi, 450 x 60, leicht ballig
	G PowerBot	keine	A: Luft, 250 x 60, Längsprofil L: Lenkrolle, Hartgummi ~ 85 ° Sh., 120 x 40
	H Scitos G5	keine	A: Hartgummi ~ 85 ° Sh., 160 x 40
	I Hermes	keine	A: Hartgummi, 250 x 60; L: Lenkrolle, hart, 130 x 40
	J M5-A Scout	keine	A: Luft, 260 x 100, flach, Stollenprofil L: Lenkrolle, Luft, 200 x 70, nicht ballig, Stollenprofil
	K rob@work	A: ~ 20 mm L: keine	A: Hartgummi ~ 90 ° Sh., 150 x 40, flach, Stollenprofil L: Lenkrolle, Hartgummi ~ 85 ° Sh., 165 x 45
	L FRIEND 2	keine	A: Vollgummi, 350 x 60 L: Lenkrolle Vollgummi, 200 x 60
	M iBot	keine	A: Luft, 300 x 60, ballig L: Lenkrolle Vollgummi, 150 x 50
	N MB835	keine	A: hart, 160 x 30 L: Doppellenkrollen, Gummi ~ 85 ° Sh., 60 x 20
	O Care-O-bot I	A: ~ 20 mm L: keine	A: Hartgummi ~ 90 ° Sh., 150 x 40, flach, Stollenprofil L: Lenkrolle, Hartgummi ~ 85 ° Sh., 165 x 45
	P AURORA	A: ~ 40 mm, L: ~ 40 mm	A, L: Luft, 400 x 60, leicht ballig, Schrägstollen
	Q LABO-4	keine	A: Luft, 255 x ~ 60, leicht ballig, L: Lenkrolle
omnidirektionale Radkinematik	R Seekur	A+L: 50 mm	A+L: Luft, 400 x 150, flach, Stollenprofil
	S Nomad	bewegliches Fahrgestell	A+L: hart, 760 x 500, ballig, Schrägstollen
	T VUTON-II	keine	A+L: hart, 50 x 20
	U XR4000	keine	A+L: hart, 160 x 20, flach
	V MEGAN-1	keine	A+L: Vollgummi, 120 x 50, leicht ballig

Tabelle 2.7: Federungen und Räder von mobilen Robotern

Viele Modelle verwenden harte Räder ohne Feder- und Dämpfeigenschaften. Bei einigen Modellen gibt es große Luft- oder weichere Vollgummireifen, die beim Auftreffen auf kleinere Absätze den Stoß dämpfen und kleinere Bodenunebenheiten ausgleichen können. Der wirksame Federweg liegt aber auch bei großen, weichen Rädern unter 20 mm.

K, O, und N können sich an Bodenunebenheiten festfahren, wenn die Antriebsräder den Bodenkontakt verlieren, I, J und P können zur Seite kippen. T ist zwar omnidirektional, hat aber kleine, harte Räder und ist nur für flache, harte Böden ausgelegt.

Bild 2.4 illustriert einige der beschriebenen unerwünschten Fahrsituationen, die mit existierenden starren Roboterfahrwerken auftreten können.

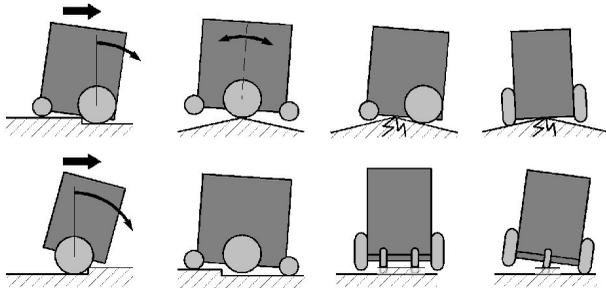


Bild 2.4: Problematische Fahrsituationen mit existierenden Roboterfahrwerken

### 2.3.8 Schlussfolgerungen aus dem Stand der Technik

Aus dem Stand der Technik lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Treppensteigende Roboterfahrwerke haben artikulierte Fortbewegungsmechaniken, die zusätzlichen Bauraum benötigen und eine hohe technische Komplexität besitzen. Bei bisherigen Modellen lässt sich die Absturzgefahr prinzipiell nicht verhindern. Vor allem deshalb sind sie keine sinnvolle Basis für Roboterassistenten in der unmittelbaren Umgebung des Menschen.
- Bisher entwickelte mobile Roboterplattformen, die eine Basis für Roboterassistenten sein könnten, benötigen selbst ohne die obligatorischen Aufbauten mehr Platz zum Manövrieren und Bewegen als Menschen. In engen Alltagsumgebungen sind sie daher nicht als mobile Plattform für Roboterassistenten geeignet.
- Bisher entwickelte mobile Roboterplattformen haben starre Fahrwerke. Sie können Bodenunebenheiten nicht ausgleichen, auf Unebenheiten aufgleiten, sich festfahren und instabil werden. Wenn sie zusätzlich harte Räder haben, sind sie für empfindliche textile Böden und Böden mit regelmäßigen Unebenheiten (z.B. Gitter, Pflaster) ungeeignet.

Mögliche Realisierungen von Plattformen mobiler Roboterassistenten können mit den für mobile Roboter verwendeten Technologien aufgebaut werden, wobei sie sich aus Akzeptanzgründen an den Leistungsdaten derzeit existierender Roboterplattformen orientieren müssen. Für enge Fahrpassagen müssen sie aber mindestens eine kleine Grundfläche haben, wodurch die für Roboterassistenten benötigten Aufbauten im Vergleich zu den Grundflächenabmessungen hoch auftra-

gen werden. Dies birgt prinzipiell die Gefahr des Umkippens. Außerdem darf das Fahrwerk zum Überwinden von Bodenunebenheiten nicht starr sein, wodurch es Aufbaubewegungen geben kann, was die Kippgefahr weiter vergrößert. Es ist nicht bekannt, ob sich unter der Beschränkung existierender Technologien eine Plattform für Roboterassistenten mit passiv gefedertem Fahrwerk entwickeln lässt, die unter beliebigen Boden- und Umgebungsbedingungen, wie sie in Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen herrschen, ohne Mobilitätseinschränkung manövrieren und operieren kann, eine stabile Fahrdynamik hat und das Anforderungsspektrum potenzieller Einsatzszenarien erfüllen kann. Die Lösung dieser Aufgabe erfordert neben der Definition eines Anforderungsspektrums die Entwicklung geeigneter Konzepte und Realisierungsvarianten unter engen physikalischen und technologischen Randbedingungen und ist Gegenstand dieser Arbeit.

## 3 Analyse potenzieller Einsatzszenarien und Ableitung von Anforderungen an Fahrwerke für mobile Roboterassistenten

### 3.1 Analyse potenzieller Einsatzszenarien für mobile Roboterassistenten

In diesem Unterkapitel werden potenzielle Einsatzszenarien identifiziert, in denen aktuell und für die nähere Zukunft mobile Roboterassistenten wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden können. Der Begriff „Einsatzszenario“ beinhaltet das Einsatzgebiet (Haushalt, Industrie) und die Beschreibung der Assistenzdienste.

#### 3.1.1 Einsatzgebiete und Nutzenpotenziale

Tabelle 3.1 listet Einsatzgebiete für mobile Roboterassistenten auf. Unter „Einsatzgebiet und Anwendungsbeschreibung“ werden die Basiseigenschaften eines Roboterassistenten beschrieben, die ein Indikator für seine Komplexität und seine relativen Investitionskosten sind.

Es wird nach 3 Typen von Einsatzgebieten unterschieden:

- *Privathaushalte*: Diese Fahrumgebung umfasst Innenbereiche in Wohngebäuden und unmittelbar angrenzende Außenbereiche auf befestigten Wegen im öffentlichen Raum.
- *Gewerbe*: Diese Gruppe enthält als mögliche Fahrumgebung öffentliche Gebäude, Veranstaltungsbauwerke, Bürogebäude, Flughäfen, Bahnhöfe, Krankenhäuser, Pflege- und Altenheime, Messegelände sowie Industriegebäude und Industrieanlagen, in denen die Umgebungs- und Bodenbedingungen ähnlich wie im öffentlichen Raum sind.
- *Sondergewerbe*: Diese Gruppe enthält Industrieumgebungen mit besonderen Bedingungen, wie sie nicht im öffentlichen Raum anzutreffen sind und unter denen sich Menschen nur mit Schutzausrüstungen oder unter besonderen Maßnahmen aufhalten sollten. Beispiele für solche Bedingungen sind hohe oder niedrige Temperaturen, hohe Windgeschwindigkeiten, extreme Wetterbedingungen, hohe Verschmutzung, große Lärmbelastung, kontaminierte Umgebung, gesundheitsgefährdende Medien, explosive Stoffe und entzündliche Gasgemische.

Die Einschätzungen des Nutzenpotenzials beschreiben die prinzipiellen Vorteile, die der Einsatz von Roboterassistenten im jeweiligen Einsatzgebiet haben kann und das Verhältnis Nutzen / Kosten bewertet grob die relativen Kosten für Anschaffung und Betrieb von Roboterassistenten zu dem Nutzen bzw. Wert, welche deren Assistenzdienste im jeweiligen Einsatzgebiet haben. Je höher das Verhältnis Nutzen / Kosten, desto wahrscheinlicher ist der kommerzielle Einsatz in naher Zukunft.

	<b>Einsatzgebiet und Anwendungsbeschreibung</b>	<b>Einschätzung des Nutzenpotenzials</b>	<b>Bewertung des Verhältnisses Nutzen / Kosten</b>
P1	<i>Privathaushalt</i> als Unterhaltungs- und Kommunikationsroboter mit hohen sozialen Interaktionsfähigkeiten	ähnlicher Nutzen wie Haustiere, Prestige-objekt.	gering / mittel => gering
P2	<i>Privathaushalt</i> als Reinigungsassistent mit hohen sensorischen, motorischen und kommunikativen Fähigkeiten, programmierbar auf Haushaltsarbeiten (putzen, aufräumen, Hol- und Bringdienste)	Zeitersparnis, gesteigerte Lebensqualität	hoch / sehr hoch => mittel
G1	<i>Gewerbe</i> , allgemeine Transportaufgaben mit wenigen Interaktions- und Manipulationsfähigkeiten	Zeit- und Kostenersparnis Prestige-objekt	hoch / mittel => hoch
G2	<i>Gewerbe</i> , allgemeine Transportaufgaben, Hol- und Bringdienste mit mittleren bis hohen Interaktions- und Manipulationsfähigkeiten	Zeit- und Kostenersparnis Prestige-objekt	sehr hoch / sehr hoch => mittel
G3	<i>Sondergewerbe</i> als programmierbarer und voll autonomer Überwachungs- und Manipulationsroboter	Kosteneinsparungen, höhere Sicherheit für Personal, höhere Betriebssicherheit	sehr hoch / sehr hoch => mittel
G4	<i>Sondergewerbe</i> als fernsteuerbarer und programmierbarer Überwachungs- und Manipulationsroboter	Kosteneinsparungen, höhere Sicherheit für Personal, höhere Betriebssicherheit	sehr hoch / hoch => hoch
G5	<i>Sondergewerbe</i> als vollautonomer programmierbarer Inspektionsroboter	Kosteneinsparungen, höhere Sicherheit für Personal, höhere Betriebssicherheit	sehr hoch / hoch => hoch
G6	<i>Sondergewerbe</i> als fernsteuerbarer und programmierbarer Inspektionsroboter	Kosteneinsparungen, höhere Sicherheit für Personal, höhere Betriebssicherheit	sehr hoch / mittel => sehr hoch

Tabelle 3.1: Einsatzgebiete und Nutzenpotenziale mobiler Roboterassistenten

### 3.1.2 Einsatzumgebungen mit hohem Nutzenpotenzial

Nach Tabelle 3.1 liegen Einsatzgebiete mit dem größten Nutzenpotenzial im Sondergewerbebereich. In diesem Abschnitt werden konkrete Einsatzumgebungen aus dem Gewerbe- und Sondergewerbebereich identifiziert, in denen erste Roboterassistenten kommerziell eingesetzt werden könnten. Tabelle 3.2 listet einige potenzielle Einsatzumgebungen auf und beschreibt die Probleme, die sich durch mobile Roboterassistenten adressieren lassen. Im Anschluss werden Beschreibungen zu den einzelnen Umgebungen gegeben und Marktpotenziale beziffert.

		Personen-transport teuer	Personen-transport gefährlich	hohe Personalkosten	unbequeme Arbeitsumgebung	gefährliche Arbeitsumgebung	Lange Wegstrecken
A	Anlagen zur Erzaufbereitung und Erzverarbeitung	✓			✓	✓	✓
B	entlegene Fernmeldeanlagen, entlegene verkehrstechnische, wissenschaftliche und militärische Mess- und Beobachtungsstationen	✓			✓		
C	Raffinerien, chemische Fabriken, Depots und Umschlagplätze für Gefahrgüter					✓	✓
D	Hochseeschiffe für Gütertransport			✓	✓		
E	Offshoreanlagen in der Öl- und Gasindustrie	✓	✓	✓	✓	✓	
F	Hafenanlagen, Depots, Umschlagplätze, Flughafengelände, Kasernen, befestigte militärische Übungsgelände, Industriehallen, Messegelände, Krankenhäuser, Schlachthöfe						✓

Tabelle 3.2: Einsatzumgebungen bei Sondergewerben und spezifische Probleme, die durch mobile Roboterassistenten adressiert werden

Erklärungen zu den Einsatzumgebungen A bis F:

A: Anlagen zur Erzaufbereitung befinden sich wegen der hohen Transportkosten oft in der Nähe von Abbauregionen und Anlagen zur Erzverarbeitung befinden sich häufig an entlegenen Standorten mit niedrigen Energiekosten (IAI 2000).

B: Beispiele: Radarstationen zur Luftraumüberwachung auf Berggipfeln, vorgelagerten Inseln oder an entlegenen Küsten, Leuchttürme, Mess- und Beobachtungsstationen auf Vulkanen, im Hochgebirge, in Wüsten. Mit mobilen, teleoperierten Roboterassistenten können bei Bedarf einfache manipulative Arbeiten durchgeführt werden, die sonst die Anwesenheit von Personal erfordern.

C: Prozesstechnische Anlagen, die entzündliche Medien führen, sind nur zu einem bestimmten Grad wirtschaftlich automatisierbar (Crook 2001), (Gupta 2006), unter anderem weil die Automatisierungstechnik explosionsgeschützt ausgeführt werden muss. Das bedeutet, sie ist ein Vielfaches teurer und sie muss nach den Vorschriften zum Explosionsschutz regelmäßig geprüft werden, was wiederum manuellen Eingriff durch Personal bedeutet. Ein explosionsgeschützter mobiler Roboterassistent kann dagegen bei Bedarf und fernüberwacht in nicht automatisierte Anlagenteile eingreifen. Als ein einziges Automatisierungsgerät kann er so hunderte nicht automatisierter Anlagenteile wie Messuhren, Ventile, Schieber und Bedienpulte automatisieren beziehungsweise fernbedienbar machen. Weiterhin kann er durch regelmäßige Inspektionsfahrten mit Ablesen von Messuhren, Thermografieaufnahmen und Audioanalysen präventive Wartung durchführen (FhG-IPA 1994), denn es wäre unverhältnismäßig teuer, diese Messdaten mit überall installierten Messgeräten zu erfassen (Brown 2006), (Tanner 2003).

D: Beispielkosten: Doppelwandige, in USA registrierte Tanker ab 20.000 DWT (dead weight tons) haben mindestens 30 Besatzungsmitglieder. Die jährlichen Crewkosten eines Schiffs liegen

über 3,6 Mio US\$, was bis 65 % der Gesamtbetriebskosten sind (USACE-CW 1999). Weltweit sind derzeit 4.770 Tanker für Öl- und Gasprodukte und Chemikalien, 5.700 Schüttgutfrachter und 2.800 Containerschiffe über 20.000 DWT registriert (WSR 2007), deren Besatzung durch mobile Roboterassistenten reduziert werden könnte.

E: Weltweit sind etwa 10.000 Offshore-Plattformen und verankerte Produktions- und Lagerschiffe im Einsatz (OPL-WOFD-V1), (OPL-WOFD-V2), (OPL-WOFD-V3), (OPL-NFDG). Für Menschen ist die Arbeit offshore mit großen Belastungen und gesundheitlichen Risiken verbunden (B&B 2005) und für den Betreiber kostet eine bemannte Offshore-Plattform täglich zwischen 35.000 und 150.000 US\$ (B&B 2005), (Volter 2004), von denen ein erheblicher Teil dafür entfällt, Personal und die dafür nötige Infrastruktur zu unterhalten. Zum Beispiel kostet ein Vollzeitbeitsplatz auf einer Nordsee-Bohrplattform für den Betreiber umgerechnet bis zu 500.000 US\$ pro Jahr (Marwede 2006). Roboterassistenten könnten dieselben Assistenzdienste wie unter C beschrieben ausführen und Kosten und Risiken für Personal reduzieren, indem sie einen Teil der Besatzung ersetzen.

F: In weitläufigen Arbeitsumgebungen können fernüberwachte Roboterassistenten Botengänge, Inspektionsfahrten und einfache Routinearbeiten an entfernten Orten ausführen, die wegen langer Wegstrecken für Personal zeitaufwändig wären.

Generell können mobile Roboterassistenten in diesen Einsatzumgebungen eine permanente Besatzung reduzieren, in eine temporäre Besatzung umwandeln oder dauerhaft ersetzen. Die Anwesenheit von Personal kann auf die Wartung der Roboter selbst reduziert werden. Dies setzt wartungsarmen und zuverlässigen Betrieb des Roboters voraus.

Die Einsatzumgebungen C, E und teilweise D erfordern gasexplosionsgeschützte Roboterassistenten. Diese Forderung hat grundlegende Auswirkungen auf die Konzeption und technische Ausgestaltung nahezu aller Teilsysteme einer Realisierungsvariante.

## 3.2 Analyse der Einsatzumgebungen

In diesem Unterkapitel werden für die oben beschriebenen Einsatzszenarien die zugehörigen Umwelt- und Umgebungseinflüsse und die Fahrumgebung (Geometrie der Fahrumgebung, Bodenbeschaffenheit) im Detail analysiert und beschrieben.

### 3.2.1 Analyse von Umwelt- und Umgebungsbedingungen

Einsatzgebiet	Privathaushalt	Gewerbe	Sondergewerbe
<b>mögliche Umwelt- und Umgebungsbedingungen</b>	Klima tropisch (immerfeucht, wechselfeucht, trocken), subtropisch (arid), gemäßigt (wärmegemäßigt, kühlgemäßigt, kältgemäßigt), mit entsprechenden Witterungen, Spritzwasser, Raumklima (evtl. klimatisiert)		wie links; zusätzlich aggressive, korrosive, explosive oder kontaminierte Medien, extreme Wetterbedingungen, Stäube, Nassschmutz, Lärm, Seeatmosphäre

Tabelle 3.3: Umwelt- und Umgebungsbedingungen in verschiedenen Einsatzgebieten

Tabelle 3.3 listet Umwelt- und Umgebungsbedingungen auf, die in den Einsatzumgebungen auftreten können. Umweltbedingungen sind in DIN EN 60721-3 definiert und kategorisiert. Darin

sind auch mechanisch aktive Stoffe (Sand, Staub, Steinchen), chemisch aktive Stoffe (Salz, Gase) und mechanische Umweltbedingungen (Schwingungen, Stöße) enthalten. Für mobile Roboterassistenten in den oben beschriebenen Einsatzumgebungen sind die Hauptabschnitte 5 (Einsatz an und in Landfahrzeugen), 6 (Einsatz auf Schiffen) und 7 (ortsveränderlicher Einsatz, wettergeschützt und nicht wettergeschützt) zutreffend. Als Beispiel wird in Tabelle 3.4 der Hauptabschnitt 7 auf einen Roboterassistenten für die Einsatzumgebungen Bürogebäude (\*) und Erzaufbereitungsanlage ( ) angewendet.

Klasse	Beschreibung	Auswahl zugehöriger Umwelteinflussgrößen	Klimaklassen und Werte für Umwelteinflussgrößen				
			7K1*	7K2	7K3	7K4	7K5
K	Klimatische Umweltbedingungen	Lufttemperatur [°C]	5...40	-5...45	-25...70	-40...70	-65...85
		rel. Luftfeuchte [%]	5...85	5...95	5...100	5...100	4...100
		Betauung möglich	✓	✓	✓	✓	✓
		Niederschlag mögl. Eisbildung möglich	-	-	✓	✓	✓
Z	weitere klimatische Umweltbedingungen	Wärmestrahlung	7Z1* vernachlässigbar		7Z2 an Raumheizung		7Z3 an Industrieöfen
		Luftbewegung [m/s]	7Z4* 5		7Z5 10	7Z6 30	7Z7 50
		Wasser (außer Regen)	7Z8* -	7Z9 Tropfw.	7Z10 Sprühw.	7Z11 Spritzw.	7Z12 Strahlw.
B	biologische Umweltbedingungen	7B1* vernachlässigbar		7B2 Pilze, tier. Schädln.		7B3 Termiten	
C	chemisch-aktive Stoffe	Grenzwerte für: Meersalz H <sub>2</sub> S [mg/m <sup>3</sup> ] SO <sub>2</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	7C1* vernachl. 0,01 0,1		7C2 Salznebel 0,5 1	7C3 Salznebel 10 10	7C4 Salznebel 70 40
S	mechanisch-aktive Stoffe	Sand in Luft [mg/m <sup>3</sup> ]	7S1* 30		7S2 300		7S3 10.000
		Staub (Schwebstoff) [mg/m <sup>3</sup> ]	0,2		5		20
		Staub (Niederschlag) [mg/(m <sup>2</sup> ·h)]	1,5		20		80
M	mechan. Umweltbeding.	Beschl. bei Schwingungen [m/s <sup>2</sup> ] Stoßbeschleunigung [m/s <sup>2</sup> ]	7M1 15 100		7M2* 15 300		7M3 40 1.000

Tabelle 3.4: Klassifizierung der Umweltbedingungen nach EN 60721-7 für einen Roboterassistenten in zwei Beispielumgebungen (Bürogebäude \*, Erzaufbereitungsanlage )

Ein Bürogebäude ist vollständig wettergeschützt, temperaturgeregelt, zugehöriges Freiluftklima ist global, direkter Einfluss aber ausgeschlossen (K1, B1, C1, S1) und die Handhabung des Roboters geschieht ohne besondere Sorgfalt (M2). Eine Erzaufbereitungsanlage ist nicht in allen Teilen wettergeschützt, hohe und niedrige Temperatur und Luftfeuchte, direkte Betauung, Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel) und Eisbildung sind möglich (K3), Nachbarschaft zu industriellen Öfen ist möglich (Z3), maximale Windstärken von 10 bis 30 m/s (~ 6 bis 11 Beaufort) sind möglich (Z6), allseitiges Spritzwasser ist möglich (Z11), tierische Schädlinge und Termiten sind möglich (B3), diverse chemische Schadstoffe in mittleren bis hohen Konzentrationen sind möglich (C3), starke

Sand- und Staubbelastung ist möglich (S3) und Stöße, Vibrationen und Umgang durch Menschen ohne besondere Sorgfalt sind möglich (M3).

Die Anwendung der Hauptabschnitte 5 und 6 von DIN EN 60721 ist entsprechend. In 5 gibt es zusätzlich eine Klassifizierung von Kontaminationsmittel (Öle, Fette, Kraftstoffe, sonst. aggressive Flüssigkeiten) und in 6 sind die klimatischen Umweltbedingungen spezifischer für Schiffe definiert, es gibt Rußablagerungen als mechanisch aktiven Stoff und es gibt vier Klassen unter M.

### **3.2.2 Grundlagen zu explosionsgefährdeten Einsatzumgebungen**

Einige Einsatzumgebungen mit hohem Nutzenpotenzial sind explosionsgefährdet (siehe Abschnitt 3.1.2) und erfordern explosionsgeschützte Roboterassistenten. Während der Schutz vor rauen Umweltbedingungen oft mit konstruktiven Zusatzmaßnahmen erfüllt werden kann, hat der Explosionsschutz Auswirkungen auf die Konzeption und technische Ausgestaltung nahezu aller Teilsysteme einer Realisierungsvariante. Daher muss der Explosionsschutz schon zu Beginn bei allen folgenden Konzepten und Entwicklungen berücksichtigt werden. In diesem Abschnitt werden zunächst die wichtigsten Grundlagen zum Explosionsschutz genannt und existierende explosionsgeschützte Fahrzeuge und Roboter beschrieben.

Eine Explosion wird durch die 3 Faktoren Sauerstoff (Luft), brennbarer Stoff und Zündquelle ausgelöst. Sind die ersten beiden Faktoren vorhanden, dann liegt eine explosionsgefährdete Zone vor. Umgebungen mit Gasen, Dämpfen und Nebeln als brennbarer Stoff werden in 3 Zonen aufgeteilt (IEC60079-10), die im Anlage- oder Gebäudeplan zu kennzeichnen sind. Ein explosives Gemisch tritt im Normalbetrieb in Zone 2 „selten und kurzzeitig“, in Zone 1 „gelegentlich“ und in Zone 0 „häufig, langfristig oder ständig“ auf. Regulär zugängliche Anlagenteile sind normalerweise nicht Zone 0, sondern z.B. das Innere von Tanks und Silos oder die Nähe von Fackeln. Beim Anlagenbau versucht man, Zone 1 möglichst klein zu halten, weil die Vorschriften strenger und entsprechende Geräte teurer sind als für Zone 2. Trotzdem gibt es in Anlagen, die brennbare Medien führen, in der Regel kleinere Bereiche mit Zone 1.

Umgebungen mit Staub als brennbarem Stoff sind ebenfalls in 3 Zonen aufgeteilt. Kriterien und Anforderungen sind zum Teil verschieden und strenger als beim Gasexplosionsschutz: Stäube können sich z.B. durch pneumatische Förderung statisch aufladen und selbst entzünden. Bei längerer Verweilzeit können sich Glimmnester entwickeln, die wegen Luftmangel zu einem schmelzbrandähnlichen Zustand führen und bei Austragung und Luftkontakt eine Explosion verursachen. 80 % aller industriellen Stäube mit Korngrößen 20...400 µm sind brennbar. Drei Viertel aller Staubexplosionen werden durch Holz-, Getreide-, Kunststoff- und Kohlestaub verursacht (STAHL 2004). Beispielumgebungen sind Kohlegruben und Anlagen für pulverförmige Güter. Jedoch gibt es außer im Bergbau fast keine großflächigen Staubexplosionszonen außerhalb von Rohrleitungen und anderen medienführenden Anlagenteilen. Sie sind meist nur auf die unmittelbare Umgebung von Abfüll- und Entnahmestationen und Bereiche, in denen sich Stäube ablagern können (Mühlräume, Schreinerei), beschränkt. Daher wird für mobile Roboterassistenten im Rahmen dieser Arbeit nur Gasexplosionsschutz betrachtet.

In allen Ex-Zonen müssen Zündquellen vermieden werden. Mögliche Zündquellen sind:

- heiße Oberflächen
- mechanisch erzeugte Funken (z.B. Schlagfunken)
- elektrische Funken (z.B. durch elektrostatische Entladung)
- Ultraschall
- elektromagnetische und ionisierende Strahlung (z.B. Radiostrahlung, UV-Strahlung)
- adiabatische Kompression und Stoßwellen
- offene Flammen
- chemische Reaktionen

Es gibt 3 Konzepte zum Explosionsschutz:

- primärer Explosionsschutz: das Entstehen eines zündfähigen Gemischs wird verhindert
- sekundärer Explosionsschutz: die Zündung eines zündfähigen Gemischs wird verhindert
- tertiärer Explosionsschutz: die Auswirkung einer Explosion wird auf ein unbedenkliches Maß beschränkt

Diese 3 Konzepte sind in verschiedenen Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel abgebildet, die in (IEC60079-1 bis IEC60079-15 ) definiert sind und nach denen Geräte und Anlagen entwickelt sein können. Zum Beispiel gehört die Zündschutzart „Ex d“ (druckfeste Kapselung) zum tertiären Explosionsschutz. Ein Gerät nach Ex d erlaubt zwar eine Explosion in dessen Innen – wodurch das Gerät normalerweise zerstört wird, allerdings ist sichergestellt, dass eine explosive Atmosphäre außerhalb dadurch nicht gezündet wird.

Für nichtelektrische Betriebsmittel wird generell nach (DIN EN 13463-1), Abschnitt 5 [1] eine Zündgefahrenbewertung gefordert, in der für „jede einzelne identifizierte Zündgefahr [...] angemessene Schutzmaßnahmen festzulegen sind“ (Beyer 2005).

Grundlagen zum Explosionsschutz mit weiteren Verweisen bieten z.B. (Fritzsche 2005), (STAHL 1998), (STAHL 2000), (CEAG 2004), (Schwedt 2006), (Bartec 2005) und (BAnz 149), speziell zum Staubexplosionsschutz sei auf (STAHL 2004) verwiesen.

### **3.2.3 Analyse der Zündschutzarten zum Explosionsschutz**

Dieser Abschnitt analysiert, inwiefern die existierenden Zündschutzarten für elektrische Betriebsmittel zum Explosionsschutz auf die Komponenten mobiler Roboterplattformen anwendbar sind. Tabelle 3.5 gibt eine Kurzbeschreibung derjenigen Zündschutzarten (Bartec 2005), die für Zone 1 geeignet sind und auf welche Komponenten mobiler Roboterplattformen sie prinzipiell anwendbar sind. Für Zone 2 gibt es weitere Zündschutzarten, die hier nicht betrachtet werden.

Zündschutzart, Bezeichnung gem. IEC60079-0	Schutzprinzip	Merkmale und konstruktive Maßnahmen	Anwendung in der Industrie	Anwendung auf Roboterbaugruppen
Druckfeste Kapselung, „Ex d“	Baugruppe in Gehäuse, Explosion im Innern kann Gasgemisch außen nicht zünden	mechanisch stabiles Gehäuse, definierte zünddurchschlagsichere Spalte	Betriebsmittel mit Funken, Lichtbögen, heißen Teilen im Normalbetrieb	Antriebe, elektrische Baugruppen, Steuerrechner, Bremsen
Überdruckkapselung „Ex p“	Baugruppe in Gehäuse mit Schutzgas und leichtem Überdruck gegenüber außen	mechanisch stabiles Gehäuse, Durchspülung vor dem Einschalten, Abschalten bei Druckverlust	dto., komplexe Industriegeräte mit nicht ex-geschützten Baugruppen, Großmaschinen	mobile Plattform als Gesamtgerät
Sandkapselung „Ex q“	feinkörniges Füllgut umgibt Baugruppe im Gehäuse, Funken bleibt im Füllgut	nur spezielle Füllgüter, kein Gehäuseaustritt des Füllguts	Elektronikbaugruppen, Transformatoren	elektrische Baugruppen
Ölkapselung „Ex o“	Baugruppe in Gehäuse mit nicht brennbarem, nicht leitfähigem Öl, Funken bleibt unter Ölspiegel	nur spezielle Öle/Flüssigkeiten, Zustands- und Füllstandskontrolle, nur ortsfeste Geräte	Große Transformatoren, Schaltgeräte, Anlasswiderstände, Anlagensteuerungen	Bremsen, elektrische Leistungsbaugruppen, nur bedingt sinnvoll
erhöhte Sicherheit „Ex e“	Zuverlässige Maßnahmen verhindern Zündquellen im oder am Gehäuse einer Baugruppe	größere Luft- und Kriechstrecken, hoher IP-Schutz, fehlersichere thermische Überwachung	el. Installationsmaterialien, Transformatoren, Akkumulatoren, Vorschaltgeräte	elektrische Baugruppen, Kollisionssensoren, Navigationssensoren
konstruktive Sicherheit „c“	Konstruktionen so, dass im Normalbetrieb und bei einer Störung keine Zündquellen entstehen	Anforderungen an Gehäusewerkstoffe, keine Reibungswärme, keine elektrostatische Aufladung	<i>neu, Norm im Entwurf, bisher keine Erfahrungen</i>	Lager, Lenkrollen, bewegliche Teile, Bremsen
Vergusskapselung „Ex m“	Vergussmasse umgibt Baugruppe, Funken bleiben innerhalb	Anforderungen an Vergussmasse (Beständigkeit, Durchschlagfestigkeit, ...)	ruhende Spulen, kleinere Relais, Leiterplatten	elektrische Baugruppen
Eigensicherheit „Ex i“	nur eigensichere Stromkreise (keine Zündquellen im Normal- und Fehlerbetrieb)	nur bestimmte elektr. Bauteile, Betrieb mit reduzierter Belastung	Mess- und Überwachungsgeräte, Sensoren, opt. und akust. Aktoren	Kollisionssensoren, Navigationssensoren
Sonderschutz „Ex s“	„Geräte, die nicht in vollem Umfang einer Zündschutzart entsprechen, aber vergleichbare Sicherheit gewährleisten“			alle

Tabelle 3.5: Zündschutzarten für Zone 1 und Anwendung auf Baugruppen von Robotern

### 3.2.4 Explosionsgeschützte Fahrzeuge und Roboter

Auf dem Industriegütermarkt gibt es antriebslose Fahrzeuge wie Hubwägen und Fassadeher in explosionsgeschützter Ausführung (Logitrans 2006). Die wichtigsten Merkmale sind, dass sie mindestens einen antistatischen Reifen (Übergangswiderstand  $< 10 \text{ k}\Omega$ ) und keine größeren nichtleitenden Kunststoffoberflächen haben (IEC60079-0).

Explosionsgeschützte Fahrzeuge mit Antrieben werden als kraftgetriebene Flurförderzeuge und als fahrerlose Transportsysteme kommerziell angeboten (Sichelschmid 2006), (Logitrans 2006),

(MIAG 2006). Die technischen Daten, Materialien und Bauprinzipien können prinzipielle Vorbilder für explosionsgeschützte mobile Roboter sein, auch wenn diese Fahrzeuge zu groß für enge Alltags- und Arbeitsumgebungen sind. Für diese Fahrzeuge gilt die Norm (EN 1755) (Flurförderzeuge „Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen“), die auch für explosionsgeschützte mobile Roboter berücksichtigt werden muss.

Ein mobiler, teleoperierter Roboter mit Kettenantrieb für gasexplosionsgefährdete Bereiche wird in (US5440916 1995) beschrieben. Der Explosionsschutz wird durch die Zündschutzart Überdruckkapselung „Ex p“ nach (IEC60079-2) hergestellt. Er ist mit einem Roboterarm ausgerüstet, der gezielt an vermeintliche Leckagen manövriert werden und Gase analysieren kann. Er ist für den Notfall- oder Katastropheneinsatz konzipiert.

Eine spezielle Kategorie explosionsgeschützter mobiler Roboter sind Inspektions- und Reinigungsroboter für Tanks. Sie sind kabelgebunden und vergleichbar mit Tauchrobotern. Beispiele sind unter (Schempf 1995), (Otis 2006) und (SolexRobotics 2006) beschrieben.

### 3.2.5 Analyse des Explosionsschutzes bei Flurförderzeugen

Für explosionsgeschützte handbetriebene und teilweise handbetriebene Mitgänger-Flurförderzeuge und motorkraftbetriebene Flurförderzeuge gibt es die Norm (EN 1755). Wenn sie Verbrennungsmotoren haben, findet zusätzlich EN 1834-1 Anwendung. Diejenigen Inhalte und Anforderungen, die prinzipiell auch mobile Roboterplattformen betreffen und für Zone 1 gelten sind:

- *Heiße Oberflächen:* im Normalbetrieb kein Überschreiten der maximal zulässigen Oberflächentemperatur, ggf. Überwachungssystem mit Stoppfunktion; Isolierung, die die Oberflächentemperatur verringert, ist unzulässig.
- *Mechanisch erzeugte Funken:* Mindestabstände zwischen drehenden und anderen Teilen; Mindestschutz frei zugänglicher drehender Teile IP20; drehende oder Leichtmetallbauteile nur aus bestimmten Materialien, wenn Berührung durch Reibung oder Schlag möglich oder Abdeckung, die solche Berührung auch bei üblichen Betriebsstörungen verhindert.
- *Elektrostatische Entladung:* Metallteile  $> 100 \text{ cm}^2$  elektrisch mit Rahmen verbinden; elektrischer Widerstand zum Boden  $< 10^6 \Omega$ ; elektrischer Widerstand von Treibriemen gemäß ISO 9563 oder ISO 1813; wenn maximale Fahrgeschwindigkeit  $> 6 \text{ km/h}$ , dann maximaler Oberflächenwiderstand der Räder  $10^{11} \Omega$  gemessen bei 30 % rel. Luftfeuchte; frei zugängliche Kunststoffteile nur, wenn ihre Fläche  $< 100 \text{ cm}^2$  oder  $< 400 \text{ cm}^2$ , wenn sie von Metall umschlossen sind oder maximaler Oberflächenwiderstand wie bei Rädern ist oder wenn es  $< 2 \text{ mm}$  unter der Oberfläche leitfähige Schichten gibt.
- *Elektrische Installation:* gemäß EN 1175-1 oder -2 oder -3 und EN 60079-14; Installation bipolar und Pole isoliert gegenüber dem Rahmen, Ausnahmen: Isolationsüberwachungssystem und eigensichere Stromkreise; elektrische Betriebsmittel gemäß EN 50021; Isolationsüberwachungssystem, muss Fahrzeug zum kontrollierten Stillstand führen, aber noch steuerbar lassen, wenn Isolationswiderstand zwischen Stromkreisen und Rahmen  $< 500 \Omega$ ; alle elektrischen Betriebsmittel gemäß einer Zündschutzart (Tabelle 3.5) und jeweiliger Norm.

- *Bremsen*: im Betrieb kälter als maximal zulässige Oberflächentemperatur; Reibungsbremse: Nichtmetall (Bremsklotz) auf Gusseisen (Brems Scheibe), keine Leichtmetalllegierungen, maximal 40 % Metallanteil im Bremsklotz, keine Bohrungen oder Spalte im Reibbelag; zusätzlich ölgekapselt oder druckfest gekapselt oder überdruckgekapselt oder erweiterte Sicherheit mit jeweils spezifischen Anforderungen.
- *Lastaufnahmemittel*: alle Oberflächen mit Boden- oder Lastberührung belegt mit Kupfer, Kupferzink, nicht rostendem Stahl o.ä. Material oder Nichtmetall (Gummi, Kunststoff).

Die maximal zulässige Oberflächentemperatur wird von dem zündfähigen Stoffgemisch bestimmt, das in der Einsatzumgebung auftreten kann. Für die meisten Stoffe ist diese Temperatur 200 °C oder höher (Ausnahmen: Acetaldehyd, Ethylether, Schwefelkohlenstoff). Bei frei zugängliche Oberflächen muss aus Personenschutzgründen diese Temperatur wesentlich geringer sein.

### 3.2.6 Beschreibung der Fahr- und Bodenbedingungen

Einige Einsatzumgebungen der Einsatzgebiete Privathaushalte, Gewerbe und Sondergewerbe mit hohem Nutzenpotenzial wurden in Unterkapitel 3.1 genannt. Tabelle 3.6 listet weitere Umgebungen und beschreibt jeweils, welche persönlichen Schutzmaßnahmen vorgeschrieben sind und welche Umweltbedingungen auftreten können. Außerdem werden deutsche und europäische Vorschriften und Normen aufgelistet, die im jeweiligen Einsatzgebiet für die Gestaltung von Böden und Durchgängen gültig sind. Standards anderer Länder z.B. USA (ADA 1994) unterscheiden sich nur geringfügig.

Einsatzgebiet	Privat-haushalte	Gewerbe	Sondergewerbe
<b>mögliche Einsatzumgebungen</b>	Bungalows, Ein- und Mehrfamilienhäuser mit Treppenaufgang, Mehrfamilienhäuser mit Aufzug, angrenzende Außenbereiche	Veranstaltungsgebäude, Sporthallen, Kaufhallen, Markthallen und -plätze, Verwaltungsgebäude, Bibliotheken, Flughäfen, Bahnhöfe, Krankenhäuser, Heime, Messegelände, Bürogebäude, Fabriken, Werkstätten, Lagerhallen, Mess- und Beobachtungsstationen	Lagerhallen, Tanklager, Depots, Fabriken, Werkstätten, Reinräume, Schlachthöfe, verfahrenstechnische Anlagen, Produktionsanlagen, Hütten, Walzwerke, Aufbereitungsanlagen, Kraftwerke, meerestechnische Konstruktionen und Schiffe, Mess- und Beobachtungsstationen
<b>mögliche Schutzausrüstung für Personen</b>	keine	keine, branchenspezifische leichte Arbeitskleidung (Schürze, Handschuhe, Kopfbedeckung, Arbeitsanzug, Mundschutz), Kälteschutzkleidung	spezifische Schutzkleidung, Schutzbrille, Gehörschutz, Atemschutz, Schutzhelm, Sicherheitsschuhe, Windjacke, Kälte-/Hitzeschutzkleidung
<b>Normen, Vorschriften</b>	Landesbauordnungen, (MBO), (BauNVO), (DIN 18025-2), (DIN 18025-1), (DIN 18101)	Landesbauordnungen, (BauNVO), (MBO), (DIN 18024-1), (DIN 18024-2), (EN 547-1), (EN 547-3), (VDI 2686), (DIN 15309), (DIN 18225)	Landesbauordnungen, (BauNVO), (MBO), (EN 547-1), (EN 547-3), (VDI 2686), (EN ISO 14122-1), (EN ISO 14122-2), (EN ISO 14122-3), (DIN 18225), (DIN 83221), (EN ISO 3796)

Tabelle 3.6: Beschreibung der Einsatzumgebungen und Anwendung von Normen

Für die unter Gewerbe genannten öffentlich zugänglichen Anlagen, Gebäude und Arbeitsstätten gelten die Normen für barrierefreies Bauen (DIN 18024-1, DIN 18024-2). Sie „müssen in den dem allgemeinen Besucherverkehr dienenden Teilen so errichtet und instand gehalten werden, dass sie von Menschen mit Behinderung, alten Menschen und Personen mit Kleinkindern barriere-

refrei erreicht und ohne fremde Hilfe zweckentsprechend genutzt werden können“ (BayBO). Barrierefreie Privatwohnungen werden in (DIN 18025-2) und speziell für Rollstuhlfahrer in (DIN 18025-1) beschrieben. Wohnhäuser mit mehr als zwei Wohnungen sollen barrierefrei gebaut werden (MBO).

Für nicht barrierefreie Bauten in nicht öffentlich zugänglichen Gewerbe- und Sondergewerbeumgebungen gelten andere Normen, die bezüglich Zugänglichkeiten, Durchgangswegen und Bodenbeschaffenheit einschränkender sind. Die aufgelisteten Normen gelten für Maschinen und Anlagen, Lagergebäude, Industriebauten und Seeschiffe.

### 3.2.7 Analyse von Durchgangshöhen und -breiten

Für die Analyse von Durchgangshöhen und -breiten werden die in Tabelle 3.6 aufgelisteten Normen verwendet. Die Ergebnisse der Analyse sind in Bild 3.1 und Bild 3.2 zusammengefasst.

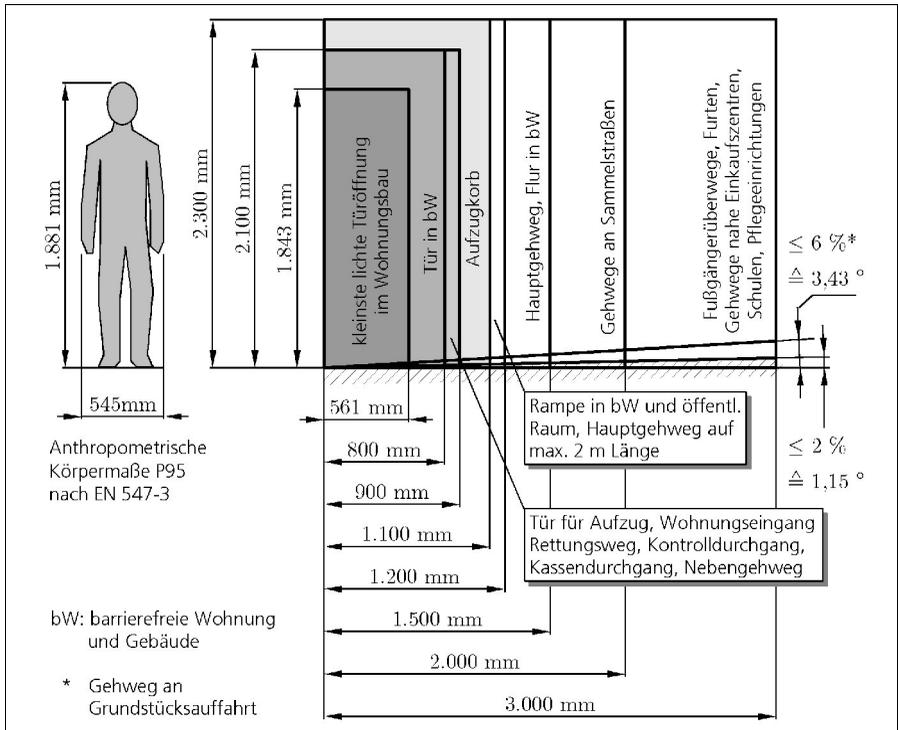


Bild 3.1: Lichte Durchgangsmaße in Gebäuden und im öffentlichen Verkehrsraum

Bild 3.1 links zeigt die maximalen Körpermaße einer Person, unterhalb derer die Körpermaße von 95 % der europäischen Bevölkerung liegen (EN 547-3). Im Vergleich dazu sind rechts die lichten Abmessungen für Türdurchgänge, Gehwege, Kontroll- und Kassendurchgänge und sonstige Wege im öffentlichen Verkehrsraum, in Wohnungen und in öffentlichen und gewerbsmäßig ge-



Der abgebildete minimale Laufstegzugang ist nach (EN ISO 14122-2) nur zulässig, „wenn es durch die Risikobeurteilung und die Einschränkung bezüglich der Maschine oder der Umgebung gerechtfertigt ist“ und „wenn die Arbeitsbühne oder der Laufsteg nur gelegentlich benutzt wird und wenn [es] nur für kurze Distanz“ gilt. Das Durchgangsmaß für Laufstege, Arbeitsbühnen und auch Treppen ist 600 x 2.100 mm, empfohlen werden mindestens 800 mm Breite. Der Transport einer verletzten Person erfordert nach EN 547-1 und -3 mindestens 745 mm Breite. Lichte Normbreiten von Außentüren auf Schiffen sind 600, 750 und 900 mm, Normhöhen sind 1.200, 1.400, 1.600 und 1.800 mm, wobei letzteres Maß bevorzugt werden sollte, die Ecken können verrundet sein. In Fabrikhallen, Werkstätten und anderen Industriebauten hängt die Mindestbreite von der Anzahl an Personen ab, die sich im Einzugsgebiet des Wegs befinden. Die Mindesthöhe ist 2.000 mm, wenn keine die Höhe vergrößemde Schutzausrüstung (Helm) vorgeschrieben ist. Ein Quergefälle ist in oben genannten Normen nicht explizit angegeben und ist in Zweckbaukonstruktionen nicht üblich.

### 3.2.8 Analyse von Bewegungsflächen

Für die Analyse von Bewegungsflächen werden ebenfalls die in Tabelle 3.6 aufgelisteten Normen verwendet. Die Ergebnisse der Analyse sind in Bild 3.3 und Bild 3.4 zusammengefasst.

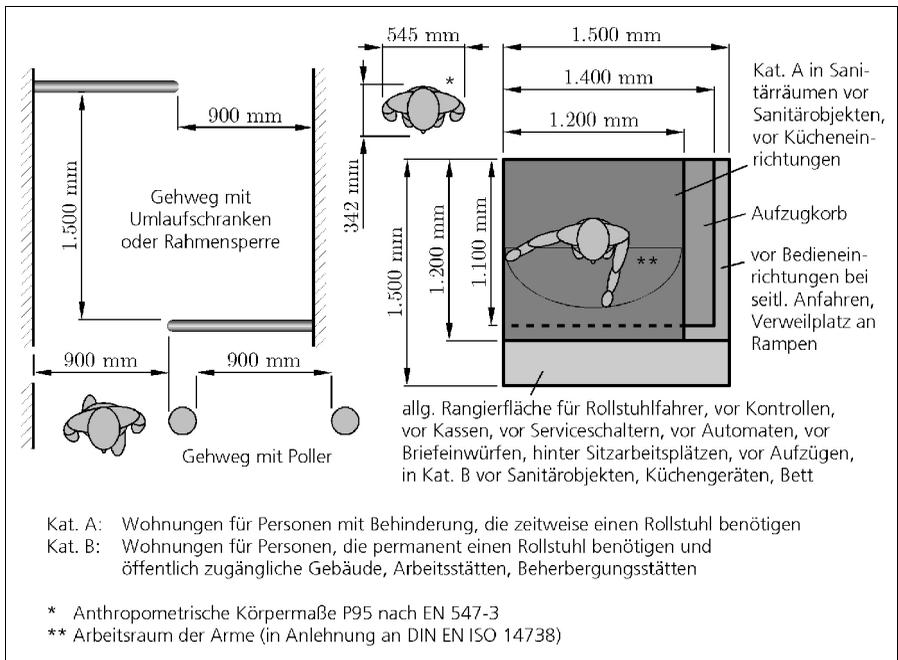


Bild 3.3: Mindestmaße für Bewegungsflächen in barrierefreien Gebäuden und Außenanlagen  
Bild 3.3 Mitte oben (\*) zeigt die Draufsicht der Körpermaße P95 nach (EN 547-3) und (\*\*) den Arbeitsraum der Arme in Anlehnung an (DIN EN ISO 14738). Im Vergleich dazu sind Bewegungs-

und Freiflächen in barrierefreien Bauten vor allem nach (DIN 18030) abgebildet, links ein Gehweg mit Absperrvorrichtungen und rechts Bewegungsflächen in Gebäuden und im öffentlichen Verkehrsraum.

Allgemein sind für Vorwärtsbewegungen in der Ebene mindestens 900 mm und auf Rampen mindestens 1.200 mm nötig. Zum Manövrieren werden für Rollstuhlfahrer allgemein 1.500 x 1.500 mm benötigt, nur in Wohnungen für Menschen, die zeitweise einen Rollstuhl benötigen, gelten 1.200 x 1.200 mm noch als barrierefrei. Bei seitlichem Anfahren von Bedienelementen kann die Breite auf 1.200 mm reduziert werden. Der Aufzugkorb ist mit 1.100 mm eine Ausnahme, allerdings gibt es Vorschriften für eine behindertengerechte Ergonomie der Bedienelemente in Aufzügen. In nicht barrierefreien Wohnungen können Bewegungsflächen kleiner sein, mindestens aber angemessen groß der örtlichen Tätigkeit und den Körpermaßen (\*) und (\*\*) aus Bild 3.3 entsprechend.

Die Mindestmaße in Industriebauten sind in Bild 3.4 zusammengefasst. Zum Vergleich sind wie oben die Körpermaße einer Person mit Arbeitskleidung und Schutzhelm abgebildet. Die Abmessungen sind dieselben wie in Bild 3.2, aber ergänzt mit einer 90 ° Kurve. Die minimale Laufstegweite darf nur nach Risikobeurteilung über kurze Distanz vorkommen, sonst gilt die Mindestbreite von 600 mm. Arbeitsplattformen in Schiffsmaschinenräumen haben die Feldteilung 450 mm, sie haben aber nicht die Funktion eines Laufstegs. Unmittelbar über dem Boden kann die lichte Breite um ca. 16 mm kleiner als die Feldteilung sein, wenn Schraubenköpfe der Geländerbefestigung hineinragen.

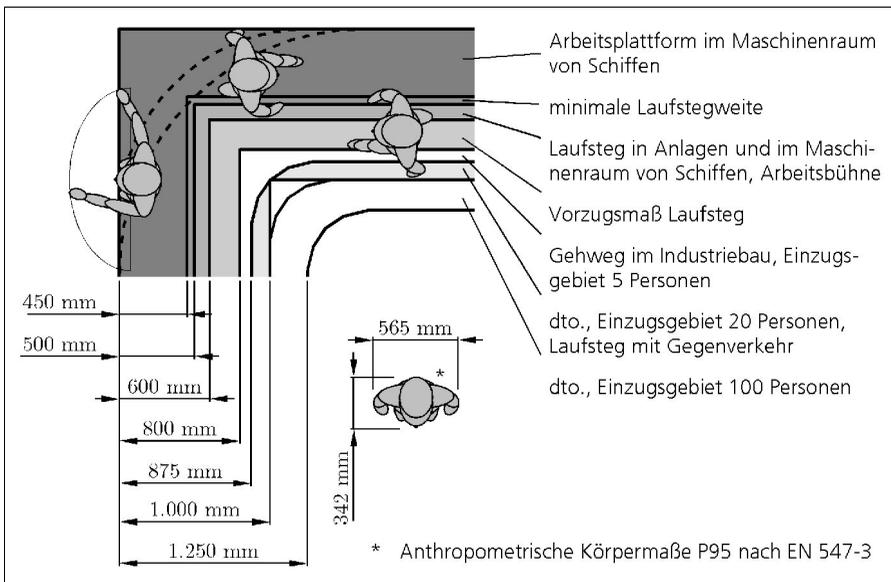


Bild 3.4: Gehwege und Laufstege in industriellen Umgebungen

### 3.2.9 Analyse von Bodenunebenheiten und Bodenöffnungen

Das Ergebnis der Analyse von Bodenunebenheiten ist in Tabelle 3.7 zusammengefasst.

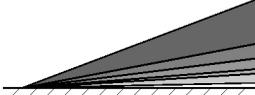
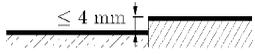
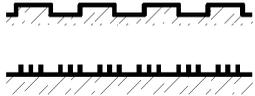
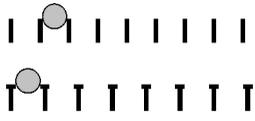
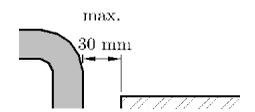
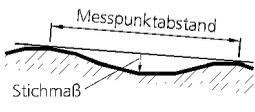
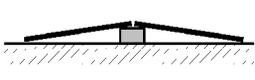
Art	Skizze	Beschreibung	Verweis
Anfang und Ende von Rampen	 von dunkelgrau nach hellgrau: 20 °, 10 °, 7 °, 4,5 °, 3,5 °, 1,7 °	20 ° max. für Fußgänger 10 ° max. empfohlen für Fußgänger 7 ° max. für motorisierte Fahrzeuge 4,5 ° Vorzug für motorisierte Fahrzeuge 3,5 ° (6 %) max. für Rampen (barrierefrei), für von Hand bewegte Fahrzeuge 1,7 ° (3 %) max. für Hauptwege im Freien (barrierefrei)	(EN ISO 14122-1) (DIN 18225) (DIN 18030)
Schwellen	 max. 20 mm	Türschwellen, untere Türansläge, etc. gelten als barrierefrei, wenn $\leq 20$ mm	(DIN 18024-2)
Bodenübergänge	 $\leq 4$ mm	Höhenunterschiede, Bodenübergänge sind keine Stolperstellen, wenn $\leq 4$ mm	(DIN 18225) (BGR 181)
profilierter Bodenbelag		geschlossener Bodenbelag mit Verdrängungsraum, z.B. Rillenfliesen, Noppenpaneele; Profilabstand $\leq 40$ mm	(BGR 181) (Götte 2002) (DIN 51130)
nicht durchgehender Bodenbelag		Arbeitsbühnen und Laufstege - Prüfkugel $\varnothing 35$ mm darf nicht durchfallen; wenn darunter Arbeitsplätze: $\varnothing 20$ mm, Ausführung: Lochblech, Tränenblech, Rost. Roste als Verkehrsflächenabdeckungen können Spaltbreiten $\leq 42$ mm haben.	(EN ISO 14122-2) (DIN EN 124)
Verkehrswege		Qualitative Anforderung: müssen trittsicher sein (keine Löcher, Rillen, Stolperstellen und rutschhemmender Belag, der bei Gebrauch nicht glatt wird) Gehwege müssen „leicht und erschütterungsarm befahrbar“ sein	(DIN 18225) (BGR 181) (DIN 18030)
Öffnungen, Schlitz, Löcher, Abläufe	 max. 30 mm	Wenn Öffnung zwischen Boden und Bauteilen $\leq 30$ mm, dann keine Fußleiste erforderlich. Lüftungsöffnungen in Verkehrsflächenabdeckungen sind $\leq 32$ mm breit, Löcher haben $\varnothing \leq 38$ mm. Abläufe haben max. $31 \times 31$ mm Öffnungen.	(EN ISO 14122-2) (DIN EN 124) (DIN 1253-1)
Bodenebenheit im Hochbau	 Messpunktabstand Stichmaß	Max. Stichmaße bei Messpunktabstand: fertige Oberflächen für untergeordnete Zwecke (z.B. in Lagerräumen, Kellern): 5 mm - 0,1 m, 8 mm - 1 m, 12 mm - 4 m, flächenfertige Böden: 2 mm - 0,1 m, 4 mm - 1 m, 10 mm - 4 m, flächenfertige Böden bei erhöhten Anforderungen: 1 mm - 0,1 m, 3 mm - 1 m, 9 mm - 4 m.	(DIN 18202)
Rampe an Hindernis		Nicht barrierefreies Hindernis, das zugänglich sein soll, kann mit Rampen versehen werden. Dann kann ein Rampengipfel entstehen.	

Tabelle 3.7: Analyse von Bodenunebenheiten und Bodenöffnungen

Bodenöffnungen wirken für ein darüber rollendes Rad wie Unebenheiten, deshalb werden sie zusammen mit Bodenunebenheiten in diesem Abschnitt analysiert.

Bodenunebenheiten von Krankenhausböden müssen mindestens das Verfahren von Betten mit Krankenbettrollen nach (DIN EN 12531) erlauben. Der Raddurchmesser ist  $\geq 100$  mm.

Regelmäßige Bodenunebenheiten werden eingesetzt, um Verdrängungsräume unterhalb der Gehebene für gleitfördernde Stoffe zu schaffen (BGR 181), sie erschweren aber in der Regel die Reinigung. Beispiele sind Rillen, Noppen und Profile. Rostböden haben den größten Verdrängungsraum, aber auch große regelmäßige Unebenheit. Nicht regelmäßige Bodenunebenheiten können sehr unterschiedlich sein.

### 3.2.10 Analyse von Bodenbelägen hinsichtlich Rutschhemmung

Unebene Bodenbeläge mit Verdrängungsraum wurden im vorigen Abschnitt betrachtet. Neben dieser Eigenschaft wird hier die Eigenschaft der Rutschhemmung analysiert. In (BGR 181) werden Bodenbeläge in Arbeitsbereichen und betrieblichen Verkehrswegen betrachtet, die mit gleitfördernden Stoffen in Berührung kommen. Bodenbeläge werden nach (DIN 51130) auf ihre Rutschhemmung bewertet und in Gruppen R9 (geringe Hemmung) bis R13 (hohe Hemmung) eingeteilt. Zur Prüfung trägt eine Testperson definierte Prüfschuhe und begeht eine schiefe Ebene mit dem Prüfbelag und aufgebrachtem definiertem Gleitmittel. Der Neigungswinkel, ab dem die Grenze des sicheren Gehens erreicht wird, bestimmt die Bewertungsgruppe. Die Prüfschuhe haben folgende Eigenschaften: Sicherheitsschuh Form B, Schuhausführung S1 nach DIN EN 345, Laufsohle mit Stollenprofil auf Nitrilkautschuk-Basis,  $72^\circ$  Shore A  $\pm 2$  nach DIN 53505.

Bodenbeläge in gewerblichen Umgebungen müssen je nach Lage und Verwendung rutschhemmend ausgeführt sein. Tabelle 3.8 listet Umgebungen zugeordnet nach ihrer Mindestbewertungsgruppe auf. Bodenbeläge zu R9 können am wenigsten rutschhemmend sein.

Arbeitsräume, Arbeitsbereiche, betriebliche Verkehrswege	R-Gruppe
Eingangsbereiche innen, Pausenräume, Speiseräume, Gasträume, Serviergänge, Verkaufsräume, Kassenbereiche, Krankenhausräume und Flure, Praxen, Labore, Friseursalons, Schalterräume, Flure, Räume und Treppen in Schulen und Kindergärten	R9
Eingangsbereiche außen, Außentreppen, Sanitärräume, Fäkalienräume, Sektionsräume, Keller, Küchen, Bediengänge Fleisch- und Backwaren, Parkbereiche außen und innen, Gehwege, überdachte Laderampen, Fachräume und Pausenhöfe in Schulen und Kindergärten	R10
Eingangsbereiche außen, Außentreppen, Käseerei, Süß- und Backwarenherstellung, Getränkeabfüllung, Großküchen und Spülräume, Kühlräume, Bediengänge Fleisch-, Fisch- und Backwaren, Verkaufsbereiche im Freien, Kraftfutterherstellung, Glas- und Steinverarbeitung, Metalverarbeitung, Maschinenwerkstätten, überdachte Rampen und Betankungsbereiche	R11
Milchverarbeitung, Herstellung und Verpackung von Speiseölen und -fetten, Süß- und Backwarenherstellung, Trockenbereiche Fleischverarbeitung, Gemüseverarbeitung, Großküchen, Aufbereitungsküchen, Spülräume, Kühlräume, Textilherstellung, Metalverarbeitung, Maschinenwerkstätten, Abwasserbehandlungsanlagen, Rampen und Betankungsbereiche im Freien, Feuerwehrhäuser	R12
Fettschmelzen, Speiseölraffinerie, Naßbereiche Fleischverarbeitung, Feinkostherstellung, Fischverarbeitung, Gemüseverarbeitung, Textilherstellung	R13

Tabelle 3.8: Anforderung an Rutschhemmung gewerblicher Bodenbeläge nach (BGR 181)

### 3.2.11 Analyse textiler Bödenbeläge

Textile Bodenbeläge gibt es vor allem in den Einsatzgebieten Privathaushalt und Gewerbe. Für die Polschichtdicke – also die Dicke der Nutzschiicht über Teppichgrund – gibt es nach den Normen keine Obergrenze, so dass Teppiche eine weiche, dicke Nutzschiicht haben können, die sich beim Auftreten zur Seite legt und zusammendrückt. Solche eher empfindlichen Teppiche kann es in Privathaushalten geben, sie sind aber selten ortsfest verlegt und können bei Betrieb eines Roboterassistenten entfernt werden. Textile Bodenbeläge in Gewerbeumgebungen sollten mindestens stuhllängeneeignet nach (DIN 66095-4) sein, was die Eignung für die Radbelastung durch mobile Roboterassistenten weitgehend einschließt.

### 3.2.12 Analyse der Bodentragfähigkeit

Die Tragfähigkeit der meisten Böden im Hochbau ist erheblich größer als für einen mobilen Roboter erforderlich (vgl. Tabelle 2.2), da sein Gewicht aber größer als das eines Menschen und der Druck in kleinen Radaufstandsflächen ein Vielfaches des Drucks unter Schuhsohlen sein kann, sind bei einigen Bodensituationen Tragfähigkeitsprobleme denkbar. Tabelle 3.9 fasst die Aussagen aus oben verwendeten Normen zur Tragfähigkeit zusammen.

Anwendung und Norm	Bodentragfähigkeit
Laufgänge in Maschinenräumen von Schiffen (DIN 83221)	min. 500 kg/m <sup>2</sup> , Eignung bei schweren Einzellasten ist für den Einzelfall festzulegen
Ortsfeste Maschinenzugänge z.B. Roste (Blechprofil-, Gitter- aus Kunststoff, Metall) (EN ISO 14122-2)	min. 2 kN/m <sup>2</sup> , Flächenlast für Tragkonstruktion, an ungünstiger Stelle min. 1,5 kN auf Fläche von 200 mm x 200 mm für den Bodenbelag, Durchbiegung < 1/200 der Stützweite
Aufsätze und Abdeckungen für Verkehrsflächen (DIN EN 124), Flächen für Fußgänger und Radfahrer (Klassifikation A15)	Tragfähigkeitstest: Abdeckung mit lichter Weite (LW) > 250 mm, Prüfkraft 15 kN. LW < 250 mm, Prüfkraft 15 kN*LW/250 mm, min. 9 kN. Verformungstest: Prüfkraft 10 kN, bleibende Verformung < LW/50 und < 6,5 mm für LW < 450 mm, sonst < LW/100

Tabelle 3.9: Analyse der Mindesttragfähigkeit von Böden

### 3.2.13 Bodenbeispiele

Wie Tabelle 3.7 zeigt, können Bodenebenenheiten sehr verschieden sein. Bild 3.5 illustriert zwei Beispiele.

Das Teilbild links aus einer Prozessanlage zeigt zwei verschiedene Gitterböden und lackierten Stahlböden. An den Übergängen gibt es keine Niveauunterschiede und keine Spalten. Der obere Rosttyp ist in zwei verschiedene Richtungen verlegt und hat T-förmige Tragstäbe, auf die ein rutschhemmender Belag aufgebracht ist. Der Rosttyp am unteren Rand hat Ausnehmungen in den Tragstäben, so dass eine gezahnte Tragstaboberseite entsteht, wodurch die Rutschhemmung weiter erhöht wird (Detailbild). Die Roste sind mit Klammern, die 1 bis 2 mm auftragen, gegen Verschieben gesichert.

Anmerkung: Die abgebildeten Roste stammen aus Nordamerika und haben größere Querstabteilung als nach (DIN 24537-1), aber sie erfüllen alle sonstigen Anforderungen deutscher und euro-

päischer Standards an Rutschhemmung, Material, Tragfähigkeit und Verlegung aus (EN ISO 14122-2), (DIN 24537-1), (BGR 181) und (BGI 588).

Das Teilbild rechts zeigt einen Ausschnitt aus einem Hausflur mit einer Türschwelle, Fliesenboden und Teppichboden im Hintergrund. Zum Größenvergleich ist eine 1 EUR Münze an die Schwelle gelehnt. Die Schwelle misst 20 mm und gilt als barrierefrei. Hinsichtlich Rutschhemmung haben diese Bodenbeläge die Bewertungsgruppe R9.



Bild 3.5: Beispiele für Bodenbeläge und Unebenheiten, verschiedene Gitterroste und Stahlboden (links), Hausflur mit Fliesen, Teppichboden und 20 mm hoher Türschwelle (rechts)

### 3.3 Analyse von Radaufhängungen und Federungen von Straßenfahrzeugen

Die Radaufhängungen in Straßenfahrzeugen verbinden die Räder mit dem Aufbau. Sie stützen den Aufbau ab, führen die Räder, gleichen Fahrbahnunebenheiten aus und verteilen bzw. übertragen Kräfte. Sie sind mögliche konstruktive Vorbilder für die Radaufhängungen der Fahrwerke mobiler Roboterassistenten.

Tabelle 3.10 listet die Namen der Grundtypen mit Kurzbeschreibung auf und analysiert die mögliche Anwendung auf mobile Roboterplattformen, die oben und in Unterkapitel 2.3 beschrieben wurden. Anders als beim gefederten Roboterfahrwerk in Bild 2.3 rechts wird hier davon ausgegangen, dass die Antriebe nicht starr mit dem Rad, sondern starr mit dem Aufbau verbunden sein sollen, um die ungefederte Masse gering zu halten. Allerdings ist die Übertragung des Antriebsmoments konstruktiv aufwändig und raumintensiv. Für detailliertere Darstellungen zu Radaufhängungen und Federungen sei auf (Bosch 1995) und (Elbl 2001) verwiesen.

	Fahrwerkskomponente	Varianten	Merkmale (+ Vorteil, - Nachteil, o Vor- und Nachteil bzw. wertungsfrei)	prinzipielle Anwendung auf Roboterfahrwerk
Radaufhängungen	Starrachsen	Banjoachse Trichterachse Deichselachse z.T. mit Panhardstab	<ul style="list-style-type: none"> <li>- große ungefederte Masse</li> <li>- großer Platzbedarf beim Einfedern</li> <li>- gegenseitige Beeinflussung der Räder</li> <li>- z.T. Trampelneigung</li> <li>+ einfach und robust</li> <li>o einfache Kinematik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ einfach und robust</li> <li>- großer Platzbedarf</li> <li>- ungünstig bei Fahrbahnebenheiten</li> </ul>
	Halbstarrachsen	De-Dion-Achse Torsionslenker Koppellenker Verbundlenker z.T. mit Panhardstab	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ einfach und robust</li> <li>o einfache Kinematik</li> <li>+ Wankzentrum konstruktiv wählbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ einfach und robust</li> <li>- ungünstig bei Fahrbahnebenheiten</li> </ul>
	einfache Einzelradaufhängung	Längslenker Schräglenker Pendellenker	<ul style="list-style-type: none"> <li>o nicht als Antriebsachse</li> <li>o einfache Kinematik</li> <li>+ mittlerer bis geringer Platzbedarf</li> <li>+ einfach und robust</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o Lenkrollen</li> <li>+ einfach und robust</li> </ul>
	doppelte Einzelradaufhängung	Doppellenker Längs-/Querlenker Mc Pherson-Bein	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ kleine ungefederte Massen</li> <li>+ guter Straßenkontakt bei Unebenheiten</li> <li>- kinematisch komplex, viele Gelenke</li> <li>- empfindliche Bauweise</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- komplexe Mechanik</li> <li>- hoher Platzbedarf</li> <li>Antriebsräder: <ul style="list-style-type: none"> <li>- doppelte Umlenkung Antriebsmoment nötig</li> </ul> </li> </ul>
	Vorderradaufhängung Zweirad	Gabelnenker	<ul style="list-style-type: none"> <li>o nicht als Antriebsachse</li> <li>+ einfach und robust</li> <li>- Linearführung mit Querkraften</li> <li>- große ungefederte Masse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o nur Lenkrollen</li> <li>- große Änderung der Radabstände beim Einfedern</li> <li>+ gute Platzausnutzung</li> </ul>
Federungen	Federung, konstruktiv einstellbar	Blattfeder Schraubenfeder (Druckfeder; zylindrisch, kegelig) Drehstabfeder Gummifeder	<ul style="list-style-type: none"> <li>o lineare oder progressive Kennlinie, Drehstabfeder nur linear</li> <li>- geringe/keine Querkraftstabilität</li> <li>Blattfeder und Gummifeder: <ul style="list-style-type: none"> <li>o eigene Dämpfung</li> <li>o kleiner Federweg</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ einfach und robust</li> <li>+ konstruktive Freiheit in Anordnung und Ausführung</li> </ul>
	Federung, regelbar	Luftfederung hydropneumatische Federung	<ul style="list-style-type: none"> <li>o teiltragend für besseren Fahrkomfort</li> <li>o volltragend</li> <li>o progressive Kennlinie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- aktive Stellglieder</li> <li>- Druckspeicher</li> <li>- komplex, störanfällig</li> </ul>

Tabelle 3.10: Fahrwerkskomponenten bei Straßenfahrzeugen und prinzipielle Anwendung auf Roboterfahrwerke

### 3.4 Hemmnisse für den Einsatz mobiler Roboterassistenten mit gefederten Fahrwerken

Mobile Roboterassistenten sind komplexe Maschinen, in denen viele Technologien geeignet kombiniert werden und sinnvoll zusammenarbeiten müssen, um einen Nutzen in der Anwendung zu erzeugen. Komplexe technische Produkte haben generell eine lange Reifezeit und die Wahrscheinlichkeit von Ausfällen und Nachbesserungen in ersten Produktreihen ist groß, besonders für Roboterassistenten in rauen Einsatzumgebungen und mit ausgeprägten Autonomiefunktionen. Raue Einsatzumgebungen z.B. 7S3 und 7M3 (vgl. Tabelle 3.4) können besonders für Sensoren zur Umgebungserfassung und Navigation problematisch sein. Hohe technische Zuverlässigkeit und Wartungsarmut sind aber besonders in entlegenen Einsatzumgebungen die entschei-

dende, nutzbringende Komponente. Zuverlässige Autonomiefunktionen wurden zwar in einzelnen beschränkten und definierten Einsatzumgebungen hergestellt (Graf 2004), bisher aber nicht mit hoher Qualität in komplexen Alltags- und Arbeitsumgebungen. Zuverlässige Autonomiefunktionen sind für Einsatzszenarien mit Routinearbeiten aber die entscheidende, nutzbringende Komponente.

Menschen nehmen ihre Umgebung gleichzeitig über mehrere Sinne wahr und kombinieren die Eindrücke mit Wissen und Plausibilitätseinschätzungen, um daraus ein komplexes Bild der Struktur und der Vorgänge in ihrer unmittelbaren Umgebung zu erzeugen. Mit diesem Bild entscheiden sie über nächste Ziele und planen konkrete Handlungen. Technische Systeme sind weit von dieser komplexen Wahrnehmungsfähigkeit entfernt, weshalb mobile Roboterassistenten für einige Einsatzszenarien mit komplexem Autonomieverhalten und hohen kognitiven Fähigkeiten absehbar nicht realisierbar sind und auch die Notwendigkeit gefederter Fahrwerke entfällt.

Bisherige Bewegungssteuerungen für mobile Roboter mit Navigation, Kartierung, Bahnplanung und situativer Hindernisausweichung wurden nicht für gefederte Fahrwerke entwickelt. Obwohl keine prinzipiellen Kompatibilitätsprobleme zu erwarten sind, könnten Eigenschaften wie Bahntreue und Positioniergenauigkeit schlechter als bei starren Fahrwerken sein und sich aufgrund physikalischer Grenzen oder der Qualität vorhandener Sensordaten nicht ausreichend verbessern lassen.

Nach einer Studie sind Hauptthemnisse für den gewerblichen/industriellen Einsatz von mobilen Roboterassistenten mögliche Inkompatibilitäten mit existierenden Normen und fehlende Sicherheitskonzepte (Breckweg 2006). Der Sicherheitsaspekt trifft umso mehr auf den Privatbereich mit schärferen rechtlichen Rahmenbedingungen zu. Ein mobiler Roboterassistent darf durch Fehlfunktion nicht zu Sach- und Personenschäden führen. Speziell mit gefedertem Fahrwerk und ausgeprägten Aufbaubewegungen darf es auch bei extremen Anregungen durch Fahrwegsunebenheiten nicht zu instabilen Fahrsituationen und zum Umkippen kommen. Rechtliche und Haftungs-Fragen (Christaller 2001) können auch technologische Entscheidungen zu Teilsystemen und Gesamtsystem oder die kommerzielle Verwertung wegen zu hoher Risiken prinzipiell in Frage stellen.

### **3.5 Folgerungen aus der Analyse und Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten**

Aus der Analyse und unter Berücksichtigung des Stands der Technik aus Kapitel 2 lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die größtmöglichen Bodenunebenheiten nach der Normenanalyse sind Beginn und Ende von Rampen, Rampengipfel, Schwellen und Bodenflächen für untergeordnete Zwecke. Für die meisten der in 2.3 betrachteten mobilen Roboterplattformen sind sie nicht überwindbar. Größere, nicht normgerechte Unebenheiten sind in realen Arbeits- und Alltagsumgebungen wahrscheinlich, so dass sich aus den oben ermittelten Bodenunebenheiten nur Minimalanforderungen ableiten lassen.

- Räder und Reifen sind Schlüsselkomponenten eines Fahrwerks, die zu allen Analyseergebnissen oben (Umwelt- und Umgebungsbedingungen, Explosionsschutz, lichte Maße von Durchgängen, Bodenbeläge und Bodenunebenheiten) geeignet ausgewählt werden müssen. Weiterhin beeinflussen sie erheblich das dynamische Fahrverhalten und die Fahrstabilität des Gesamtsystems. Auswahl und Auslegung der Räder und Reifen sind daher besonders wichtige Teilaufgaben für die Entwicklung geeigneter gefederter Roboterfahrwerke.
- Um auf den oben identifizierten engen Fahrwegen manövrieren zu können, muss der Roboterassistent eine kleinen Grundfläche und folglich vergleichsweise hohe Aufbauten haben, was zu großer Kippneigung führt. Bei ausgeprägten Aufbaubewegungen durch ein gefeder-tes Fahrwerk kann sich die Kippneigung weiter erhöhen (vgl. Abschnitt 2.3.8). Eine mögliche Lösung liegt daher im Spannungsfeld von Massengeometrie des Roboterassistenten als Gesamtsystem unter den engen geometrischen Restriktionen und dem Feder- und Dämpfverhal-ten des Fahrwerks bei Anregung der Fahrdynamik in extremen Fahrsituationen.
- Mögliche Realisierungsvarianten sind nur dann sinnvoll, wenn sie für die oben identifizierten Einsatzszenarien (Einsatzgebiete + Assistenzdienste) mit ihren teilweise rauen Umgebungen zuverlässig umsetzbar sind. Alle folgenden Konzepte und Entwicklungen müssen daher nicht nur auf Basis der heute verfügbaren Technologien prinzipiell realisierbar, sondern auch mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand realisierbar sein.

Daraus leiten sich folgende Arbeitsschwerpunkte ab:

- Entwicklung von Konzepten für Fahrwerksgeometrien, Teilkomponenten des Fahrwerks und Gesamtsystemvarianten, die im sinnvollen wirtschaftlichen Rahmen technisch realisierbar sind und das Anforderungsspektrum erfüllen können.
- Untersuchung der Fahrdynamik anhand von Modellen und Simulationen und Ableitung von Kenngrößenbereichen für die Massengeometrie des Gesamtsystems, die Feder- und Dämpfeigenschaften des Fahrwerks und der aktiven Fahrwerkskomponenten (Antriebe, Stellglieder).

### **3.6 Anforderungen an gefederte Fahrwerke und an Realisierungsvarianten**

#### **3.6.1 Ableitung einer Referenzpassage**

Aus der Analyse der Bewegungsflächen und der Durchgänge lässt sich eine Referenzpassage ableiten, die ein Roboterassistent passieren können muss und in der er manövrierbar sein muss. Die Referenzpassage erzeugt Grenzwerte für Grundfläche und Höhe des Roboters als Gesamtsystem und stellt zusammen mit dem Wunsch nach dynamischer Fahrstabilität Anforderungen an Räder, Radanordnung und Massengeometrie des Gesamtsystems.

In Industrieumgebungen, die nicht barrierefrei sind, sind die Durchgangsabmessungen und Bewegungsflächen am kleinsten. Die kleinste reguläre Breite von ortsfesten Maschinenzugängen ist 600 mm, die aber nicht ausreichend für den Verletztentransport ist. Die empfohlene Breite ist 800 mm. Die minimale lichte Weghöhe sind 2.000 mm, die Durchgangshöhe kann für kurze Strecke reduziert werden. Für mobile Roboter ist die Höhe weniger beschränkend, deshalb kann als

sinnvolles Höchstmaß die Vorzugshöhe von Schiffstüren von 1.800 mm gewählt werden. Bild 3.6 fasst diese Daten in 2 Referenzpassagen mit 600 mm und 800 mm Breite zusammen.

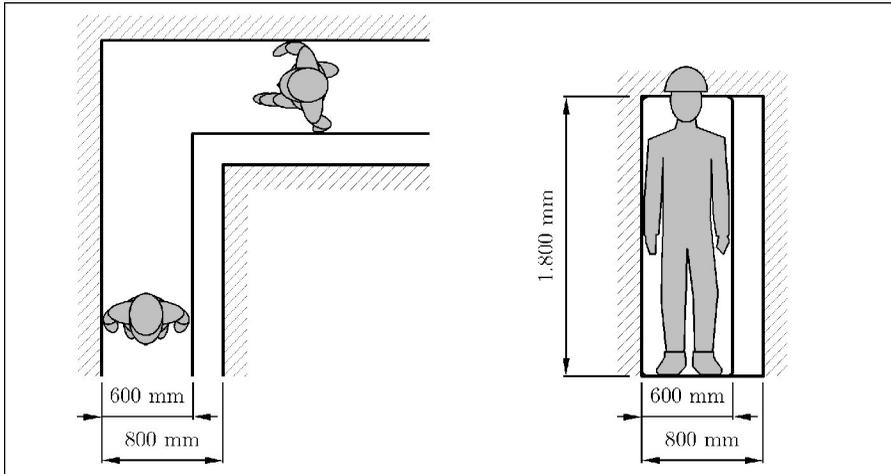


Bild 3.6: Referenzpassagen mit kleinsten sinnvollen Durchgangsabmessungen

### 3.6.2 Ableitung von Referenzgeometrien für Bodenunebenheiten

Aus der Analyse lassen sich Referenzgeometrien für Bodenbedingungen ableiten, die Bild 3.7 zusammenfasst.

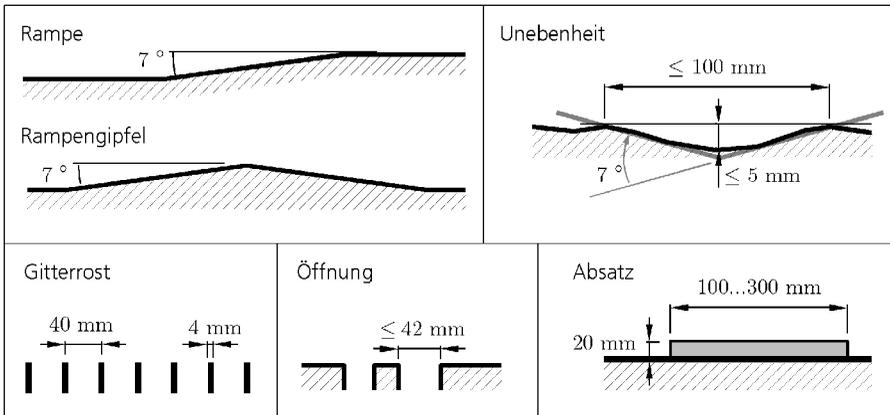


Bild 3.7: Referenzgeometrien für Bodenunebenheiten

Die Referenz für eine Rampe hat  $\leq 7^\circ$  Steigungswinkel, ein entsprechender Rampengipfel  $\geq 166^\circ$  (oben links). Einzelne Unebenheiten auf  $\leq 100$  mm können  $\leq 5$  mm tief sein (oben rechts, Höhe zu Breite nicht maßstäblich), doch ist das weniger als der Knick an einer  $7^\circ$  Rampeauffahrt (grau) und damit in der Referenzrampe enthalten. Ein Referenzgitterrost hat 40 mm

Tragstabteilung, 4 mm Tragstabdicke und keine Querstäbe (unten links). Das sind etwas schärfere Bedingungen als nach Norm (Prüfkugel  $\varnothing$  35 mm), aber darin wird berücksichtigt, dass Roste als einzelne Verkehrsflächenabdeckungen bis 42 mm Öffnungsweite haben können, diese aber nicht als flächiger Bodenbelag vorkommen. Für einzelne Öffnungen sind diese 42 mm das Referenzmaß (unten Mitte). Die maximale Höhe von Bodenschwellen im barrierefreien Bau ist 20 mm. Als konservativere Referenzunebenheit wird die Schwelle zu einem schmalen Absatz verbreitert, weil dann eine stärkere Anregung der Fahrdynamik zu erwarten ist als bei einer kurzen Schwelle (unten rechts). 20 mm müssen eine Minimalsforderung sein, denn größere nicht normgerechte Unebenheiten sind in realen Arbeits- und Alltagsumgebungen wahrscheinlich.

### 3.6.3 Ableitung von Anforderungen an das mechanische Gesamtsystem Roboter

Aus der Analyse ergeben sich unmittelbare Anforderungen an mechanische Gesamtsystem Roboterplattformen und die Teilsysteme des Fahrwerks. Weitere Anforderungen entstehen aus der Kombination von Anforderungen und der Betrachtung von Einsatzszenarien:

- Maximalgeschwindigkeit: In weitläufigen Einsatzumgebungen werden lange Strecken zurückgelegt. Der Roboter sollte schneller als Gehgeschwindigkeit von Personen fahren können, auf Freiflächen ohne Hindernisse und auf breiten Fahrwegen auch erheblich schneller.
- Der Roboter sollte bei mittleren Geschwindigkeiten über Bodenebenheiten nach Bild 3.7 fahren können, ohne sich zu beschädigen, ohne aus der Spur zu kommen, ohne dass Räder den Bodenkontakt verlieren und ohne fahrdynamisch instabil zu werden. Dabei ist eine Schrägfahrt über einen Absatz eine besonders schwierige Fahrsituation, die die Fahrdynamik stark anregt.
- Der Roboter muss besonders für entlegene Einsatzumgebungen technisch zuverlässig, robust und wartungsarm sein.

Alle Anforderungen sind in Tabelle 3.11 zusammengefasst.

### 3.6.4 Ableitung von Anforderungen an Räder und Reifen

Die Anforderungen an Räder und Reifen werden durch die Bodenbedingungen bestimmt. Danach müssen die Reifen von Einzelrädern breiter als 42 mm sein, um nicht an Öffnungen unter Last einzutauchen. Weiche Reifen müssen breiter sein, weil sie sich in spaltförmigen Öffnungen zusammendrücken und eintauchen können. Die Räder einer Doppelrolle können dann etwas schmaler sein, wenn der Radabstand so gewählt wird, dass auf Gitterrosten mindestens ein Rad belastbar auf einem Tragstab steht (Bild 3.8).

Da die Tragstabteilung beliebige Zwischenwerte haben kann oder bei Tragstäben mit T-Profil die Tragstabteilung von der Breite der Oberseite abhängt, ist eine universelle Wahl des Radabstands nicht möglich, so dass auch die Reifen von Doppelrädern breiter als 42 mm sein müssen. Reifen mit großer Balligkeit müssen noch breiter sein, so dass bei statischer Radlast der Latsch breiter als 42 mm ist und eine Öffnung überdecken kann.

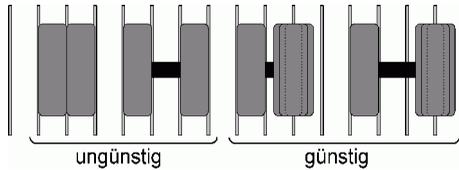


Bild 3.8: Radabstand bei der Doppelrolle auf Gitterrosten

Ein belastetes Rad sollte über den Referenzabsatz rollen können und beim Abrollen auf dem Referenzgitter möglichst wenig zwischen die Tragstäbe eintauchen, so dass kleine Räder mit Durchmesser unter ca. 100 mm prinzipiell ungeeignet sind. Große Raddurchmesser sind zwar günstiger, aber sie haben hohen Platzbedarf.

Beim Abrollen auf Gitterrosten entstehen Vibrationen an der Radachse, die umso kleiner sind, je weicher der Reifen und je größer der Raddurchmesser sind. Es ist nicht sinnvoll möglich, einen exakten analytischen Zusammenhang zwischen Raddurchmesser, Reifenhärte und Vibrationsstärke herzuleiten, aber mit Abrollversuchen auf einem Referenzgitterrost kann ein grober quantitativer Zusammenhang hergestellt werden (Bild 3.9 links), wonach weiche Reifen mit großem Raddurchmesser am günstigsten sind. Ab mittleren Vibrationen sollte ein Rad zusätzlich gefedert werden.

Reifen aus Teils plastischem Material oder hartem ( $> \sim 80^\circ$  Shore A) Elastomer können schon beim langsamen Auftreffen auf scharfe Kanten beschädigt werden (Bild 3.9 rechts) und sind eher ungeeignet. Für die Fahrt über Bodenunebenheiten bei mittleren Geschwindigkeiten können auch Omnidirektionalräder mit ihren im Vergleich zur Radgröße feinen Walzenmechaniken leicht beschädigt werden, aber für entsprechend größere Räder gibt es keinen Bauraum, daher sind sie eher ungeeignet.

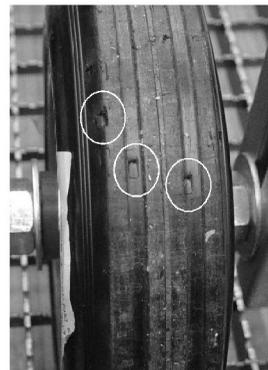
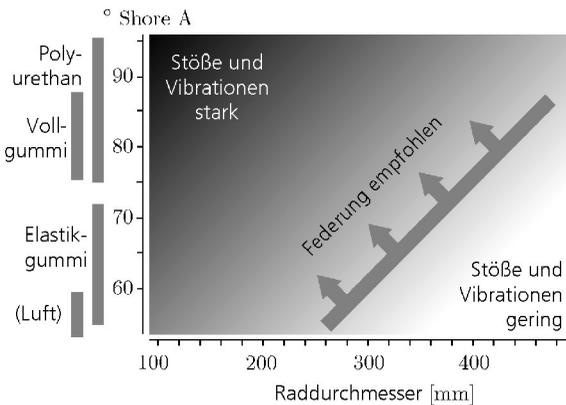


Bild 3.9: Zusammenhang zwischen Radradius, Reifenhärte und Vibrationen auf Gitterrost (links), Beschädigungen eines 85° Shore A Vollgummireifens durch scharfkantigen Absatz (rechts)

Weichere Reifen ( $< \sim 70^\circ$  Shore A) sind nur aus Gummi erhältlich (Bild 3.9 links) – entweder als Elastikgummi-Vollmaterial, als Luftreifen oder als geschäumte Luftreifen. Gummireifen sind nur bedingt UV-beständig und gegenüber Kontamination mit z.B. Öl, Benzin und Paraffin eher unbeständig. Auf scharfkantigen Gitterrosten ist besonders bei Gummi ein erhöhter Reifenverschleiß zu erwarten, so dass Reifen wie bei Straßenfahrzeugen in Abständen ausgetauscht werden müssen. Die Anforderungen an Räder und Reifen sind in Tabelle 3.12 zusammengefasst.

<b>Fahrwerk und Gesamtsystem</b>	A	manövrierbar (Umkehren möglich) in Referenzpassage 600 oder 800 (Bild 3.6)
	B	Maximalgeschwindigkeit $\geq 2$ m/s
	C	Fahrt über alle Bodenunebenheitsreferenzen als Minimalanforderungen (Bild 3.7) mit mindestens mittlerer Geschwindigkeit, bei großflächigem Auftreten der Unebenheiten (Gitterrostboden) mit Maximalgeschwindigkeit
	D	niedriger Schwerpunkt
	E	Fahrdynamisch stabil, kein Radabheben, kein Schleudern, kein Umkippen
	F	gute Spurtreue auch bei Schrägfahrt über Referenzabsatz
	G	geringe Rutschneigung auf R9-Bodenbelag (Abschnitt 3.2.10)
	H	statische Radlast $\leq 1,5$ kN, Gesamtgewicht möglichst $\leq 200$ kg (Tabelle 3.9)
	J	prinzipielle Eignung für Umweltbedingungen 7{K,Z,B,C,S,M}3 oder höher $\Rightarrow$ u.a. Schutzart min. IP54
	K	prinzipielle Eignung für Explosionsschutz gemäß (EN 1755) und (IEC60079-0) für Zone 1, Zündgefahrbewertung für nichtelektrische Betriebsmittel, z.B. nach (Beyer 2005)
	L	lange Laufzeit, niedriger Energieverbrauch, Energieeffizienz
	M	Nutzlast der Plattform $\geq 100..120$ kg
	N	wartungsarm, ausfallsicher, robust
	O	fernsteuerbar und autonom navigierbar (Abschnitt 2.2.2)

Tabelle 3.11: Anforderungen an gefedertes Fahrwerk und Realisierungsvarianten

<b>Räder und Reifen</b>	R1	Latschbreite oder Laufflächenbreite $> 42$ mm, bei weichen Reifen breiter
	R2	Durchmesser $\geq 100$ mm, vorzugsweise größer, aber möglichst klein wegen Platzbedarf
	R3	zusätzlich gefedert, wenn Durchmesser $< \sim 260$ mm und gemäß Bild 3.9
	R4	Reifenhärte möglichst $< \sim 80^\circ$ Shore A
	R5	leicht auswechselbar

Tabelle 3.12: Anforderungen an Räder und Reifen

## 4 Konzeption der Teilsysteme eines gefederten Radfahrwerks und von Realisierungsvarianten für das Gesamtsystem

### 4.1 Konzeption von Fahrwerksgeometrien

In diesem Unterkapitel werden anhand der Analyseergebnisse und passend zu den Anforderungen möglichst optimale Kombinationen von Fahrwerksteilsystemen konzipiert.

#### 4.1.1 Grundflächenform des Fahrwerks

Abmessungen und Form der Grundfläche legen die Fahrwerksgeometrie und viele weitere Größen fest. Die Grundfläche wird vor allem durch Anforderung A bestimmt. Bei großer Grundfläche sind niedrige Aufbauten und ein niedriger Gesamtschwerpunkt möglich, was günstig für eine stabile Fahrdynamik ist (Anforderung E). Tabelle 4.4 listet Grundflächenformen auf, die passend für die Referenzpassage mit 600 mm Breite sind, wobei wegen unvermeidlicher Fahrungenauigkeiten ein Sicherheitsabstand zum Rand von je 50 mm gewählt wird. Für die 800 mm – Referenzpassage vergrößern sich die Abmessungen entsprechend.

	Skizze und Referenzpassage (Abmessungen in mm)	Beschreibung, Flächeninhalt, Vorteile (+), Nachteile (-)
Variante G1		<p><b>Quadratform</b>            nur mit Omnidirektionalfahrwerk möglich            0,250 m<sup>2</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– hohe Bahntreue bei Geradeausfahrt nötig</li> <li>– hohe Bahntreue in Kurve nötig</li> </ul>
Variante G2		<p><b>Dreiecksform</b> (gleichseitiges Dreieck)            Manövrieren mit Drehen und Umkehren            0,125 m<sup>2</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringe Bahntreue in Kurve nötig</li> <li>– hohe Bahntreue bei Geradeausfahrt nötig</li> <li>– hohe Genauigkeit beim Drehen nötig</li> <li>– sehr kleine Fläche</li> </ul>
Variante G3		<p><b>Kreisform</b>            Optimalform von gleichseitigem n-Eck mit größter Fläche            Manövrieren mit Drehen und Umkehren            0,196 m<sup>2</sup></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>+ geringe Bahntreue in Kurve nötig</li> <li>+ kein Verkanten/Festfahren</li> <li>– hohe Bahntreue bei Geradeausfahrt nötig</li> </ul>

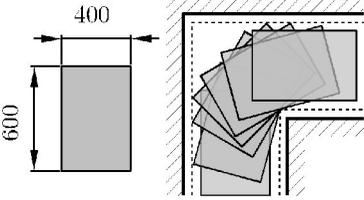
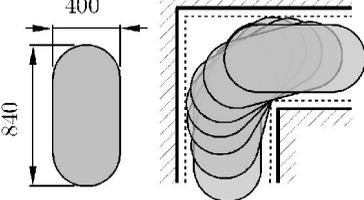
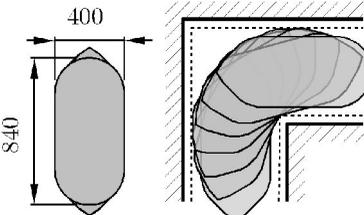
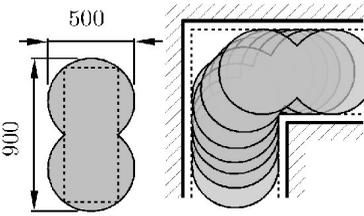
	Skizze und Referenzpassage (Abmessungen in mm)	Beschreibung, Flächeninhalt, Vorteile (+), Nachteile (-)
Variante G4		<p><b>Rechteckform</b>                      Beispiellabmessungen; anderes Verhältnis Länge zu Breite möglich                      Manövrieren mit Vorwärts-/Rückwärtsfahrt                      0,240 m<sup>2</sup>                      + einfache Form, einfaches Design                      + geringe Bahntreue bei Geradeausfahrt nötig                      – hohe Bahntreue in Kurve nötig                      – Risiko des Verkantens/Festfahrens in der Kurve</p>
Variante G5		<p><b>Rechteckform, verrundete Ecken</b>                      Beispiellabmessungen; anderes Verhältnis Länge zu Breite möglich                      Manövrieren mit Vorwärts-/Rückwärtsfahrt                      0,302 m<sup>2</sup>                      + geringe Bahntreue bei Geradeausfahrt nötig                      + große Fläche                      – hohe Bahntreue in Kurve nötig                      – Risiko des Verkantens/Festfahrens in der Kurve</p>
Variante G6		<p><b>Schiffsform</b>                      verrundete Rechteckform + alle Flächen, die bei Kurverfahrt innerhalb der Passage liegen (Spitzen) =&gt; Optimalform von G5; Beispiellabmessungen, anderes Verhältnis Länge zu Breite möglich                      Manövrieren mit Vorwärts-/Rückwärtsfahrt                      0,306 m<sup>2</sup>                      + geringe Bahntreue bei Geradeausfahrt nötig                      + große Fläche                      – hohe Bahntreue in Kurve nötig                      – Risiko des Verkantens/Festfahrens in der Kurve</p>
Variante G7		<p><b>Knochenform</b>                      Rechteckform + alle Flächen, die bei Kurvenfahrt innerhalb der Passage liegen (Spitzen weggelassen); Optimalform von G5; Beispiellabmessungen, anderes Verhältnis Länge zu Breite möglich                      Manövrieren mit Vorwärts-/Rückwärtsfahrt                      0,357 m<sup>2</sup>                      + große Fläche                      – hohe Bahntreue bei Geradeausfahrt nötig                      – hohe Bahntreue in Kurve nötig                      – Risiko des Verkantens/Festfahrens in der Kurve</p>

Tabelle 4.1: Varianten für Grundflächenformen und Manövrieren in der Referenzpassage

#### 4.1.2 Radvarianten

In diesem Abschnitt werden Radvarianten verglichen, die der Anforderung C und den Anforderungen aus Abschnitt 3.6.4 entsprechen. Demnach können weiche Räder ab ~ 260 mm Durchmesser ungefedert sein und als Antriebsrad benutzt werden. Gefederte Antriebsräder sind prinzipiell ungünstig (vgl. Abschnitt 3.3) und erfordern wie bei Straßenfahrzeugen die Übertragung der mechanischen Antriebsleistung auf das Chassis, z.B. durch eine Gelenkwelle. Zusammen mit der Radaufhängung erfordert dies komplexe Mechaniken mit vielen Gelenken und viel Bauraum

im Fahrgestell. Tabelle 4.2 illustriert diese Situation für verschiedene Varianten von Radaufhängungen. Daher werden im Folgenden gefederte Antriebsräder nicht berücksichtigt.

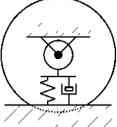
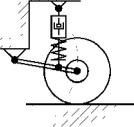
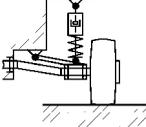
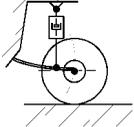
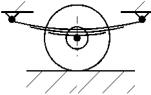
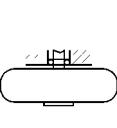
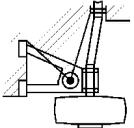
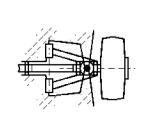
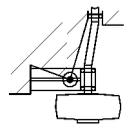
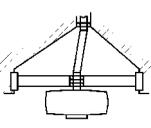
	ohne Aufhängung	Längslenkermechanik	Querlenkermechanik	Längslenker mit Blattfeder	Blattfeder
Seitenansicht					
Draufsicht					
Beschreibung	Radkörper mit Feder- und Dämpfungswirkung, keine Gelenke, keine Gelenkwelle	Schraubenfeder mit Teleskopdämpfer, min. 4 Gelenke + Gelenkwelle	Schraubenfeder mit Teleskopdämpfer, min. 4 Gelenke + Gelenkwelle	Blattfederschwinge mit Radführungseigenschaft und Teleskopdämpfer, min. 2 Gelenke + Gelenkwelle	Blattfederpaket mit Radführungseigenschaft, min. 2 Gelenke + Gelenkwelle
Legende:      • □ Gelenk      ▭ Wälzlager					

Tabelle 4.2: Varianten von Aufhängungen mit Federung für Antriebsräder

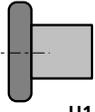
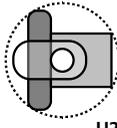
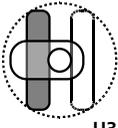
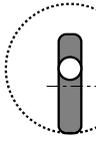
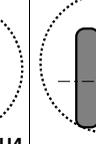
	starres Antriebsrad	gelenktes Antriebsrad	gelenkte Einfach- oder Doppelrolle	passive Lenkrolle	passive Doppellenkrolle	Beschreibung
ungefedert	 U1	 U2	 U3	 U4	 U5	Rad Ø x Breite: ≥ 260 x 60 mm, weich (gemäß Bild 3.9)
		Ø ≥ 300 mm	Ø ≥ 300 mm	Ø ≥ 340 mm	Ø ≥ 370 mm	Platzbedarf
gefedert			 F1	 F2	 F3	Rad Ø x Breite: ≥ 100 x 42 mm (hier: 140 x 45)
			Ø ≥ 180 mm	Ø ≥ 180 mm	Ø ≥ 210 mm	Platzbedarf
Legende:      □ Platzhalter Fahrtrieb      □ Platzhalter Lenkantrieb						

Tabelle 4.3: Draufsichten auf Varianten für Antriebs- und Lenkräder mit Mindestabmessungen

In Tabelle 4.3 sind verbleibende Varianten für Antriebs- und Lenkräder maßstäblich zueinander und mit Angabe der Mindestabmessungen aufgelistet. Schräglenker, wie beim Vorderrad von

Zweirädern, werden nicht aufgelistet, können aber als eine Variante der passiven Lenkrolle gesehen werden. Auch dort sorgt der Nachlauf (Ausladung) – der Abstand zwischen Radaufstandspunkt und Schnittpunkt Lenkachse-Boden – dafür, dass das Rad in Fahrtrichtung einlenkt.

#### **4.1.3 Konzeption der Radanordnung**

Die Radvarianten aus vorigem Abschnitt werden hier mit den Grundflächenvarianten kombiniert, um Radanordnungsvarianten zu erhalten. Als Grundflächen werden nur die Varianten G3, G6 und G7 betrachtet, denn die Varianten G4 und G5 sind durch die Optimalformen G6 und G7 berücksichtigt. Variante G1 ist nur mit Omnidirektionalkinematik möglich und Variante G2 hat eine sehr kleine Grundfläche, daher werden sie nicht weiter betrachtet.

In Tabelle 4.4 sind Radanordnungen für G3, G6 und G7 aufgelistet, mit denen ein Manövrieren durch die Referenzpassage möglich ist. Es sind gleichzeitig die am wenigsten platzintensiven Varianten. Für G7 ist aus Tabelle 4.3 nur eine Radanordnung mit U2 möglich, denn mit anderen Varianten von Antriebs- und Lenkrädern fehlt die Beweglichkeit, um durch die Referenzpassage zu manövrieren. Ungefederte Lenkrollen (U3, U4, U5) sind aus Platzgründen nur bei K2 möglich. Für G3 ist aus Platzgründen nur Differenziallenkung möglich. Wenn F1 für K2 und K3 verwendet wird, können vordere und hintere Lenkrollen wie bei (Madow 1996) mechanisch gekoppelt und ein Lenkantrieb weggelassen werden.

Aus den bisher betrachteten Konzepten wird K3 ausgewählt und weiter im Detail konzipiert, da bei K1 und K2 die Navigationssensoren doppelt ausgeführt sein müssen, sie ohne weitere sensorische Hilfsmittel in Engstellen nicht fern steuerbar sind und die in Tabelle 4.4 aufgeführten Nachteile schwerwiegender erscheinen, als die Nachteile bei K3. Es ist aber nicht ausgeschlossen, dass K1, K2 oder andere Kinematikvarianten zu sinnvollen Realisierungsvarianten führen können, die alle Anforderungen erfüllen.

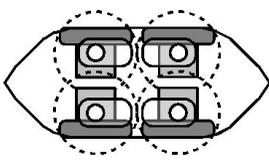
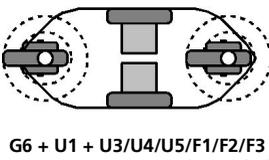
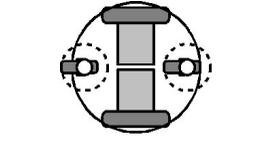
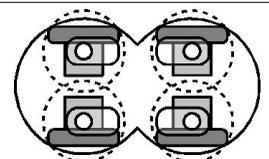
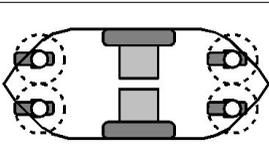
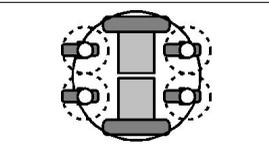
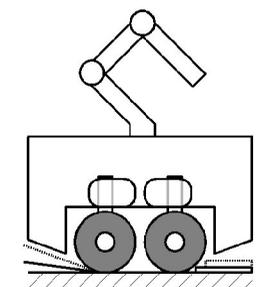
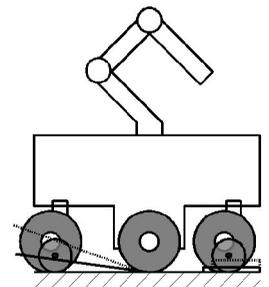
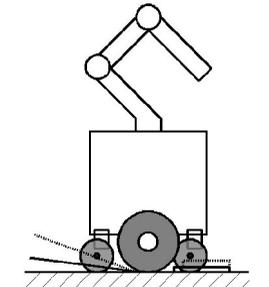
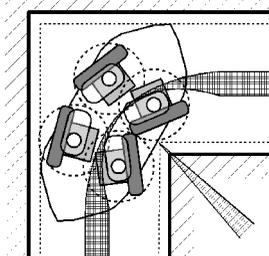
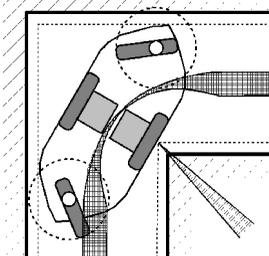
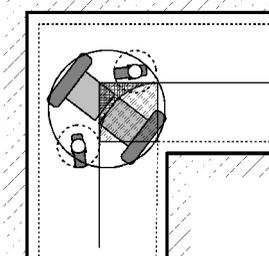
	Kinematikvariante K1	Kinematikvariante K2	Kinematikvariante K3
Draufsicht	 G6 + U2	 G6 + U1 + U3/U4/U5/F1/F2/F3 („/“: oder)	 G3 + U1 + F1/F2/F3
	 G7 + U2	 G6 + U1 + F1/F2/F3	 G3 + U1 + F1/F2/F3
Seitenansicht			
Referenzpassage (600 mm)			
Legende	 <p>Bodenunebenheiten 20 50 mm 7 20 mm</p>	 <p>Mögliche Positionen des Kurvenmittelpunkts bei Kurvenfahrt</p>	 <p>Mögliche Bahnpunkte des Grundflächenmittelpunkts bei Kurvenfahrt</p>
Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Ausgleich von Unebenheiten</li> <li>+ keine zusätzliche Federung</li> <li>+ annähernd omnidirektional</li> <li>- 8 unabhängige Antriebe</li> <li>- komplexe Kinematiksteuerung</li> <li>- großer Platzbedarf</li> <li>- präzise Kurvenbahn, sonst Kollision/Festfahren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- lange Federwege für Ausgleich von Unebenheiten =&gt; großer Platzbedarf</li> <li>+ einfache Kinematiksteuerung</li> <li>- präzise Kurvenbahn, sonst Kollision/Festfahren</li> <li>- ungünstige Radabstände für Differenziallenkung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgleich von Unebenheiten</li> <li>+ einfache Kinematiksteuerung</li> <li>+ kein Festfahren möglich</li> <li>- hoher Schwerpunkt, Kippgefahr</li> <li>+ Manövrierfreiheit in Kurve</li> <li>+ Drehen auf der Stelle ohne Platzbedarf</li> <li>=&gt; fernsteuerbar in Engstellen</li> </ul>

Tabelle 4.4: Kinematikvarianten

## 4.2 Konzeption der Fahrwerksfederung

### 4.2.1 Konzeptionelle Überlegungen zur Fahrstabilität

Zu Kinematikvariante K3 gibt es je nach Wahl der Lenkräder 5 Untervarianten, die in Tabelle 4.5 aufgelistet sind. Die schraffierte Fläche, die Stabilitätsfläche, entsteht durch Verbinden der Radaufstandspunkte und sie markiert den Bereich, innerhalb dessen die Resultierende aus Gewichtskraft und Horizontalkraft im Schwerpunkt den Boden schneiden darf, ohne dass der Roboter kippt (vgl. Skizze in Tabelle 4.6 links). Auf schrägem Boden gilt Entsprechendes, wobei die erforderliche Horizontalkraft zum Hangabwärtskippen geringer ist als auf horizontalem Boden.

I	II	III	IV	V
<b>passive Lenkrollen</b>			<b>gelenkte Lenkrollen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- passive Lenkrollen können keine Querkräfte aufnehmen</li> <li>- Stabilitätsfläche in Fahrtrichtung (in Skizze nach rechts) kleiner</li> <li>=&gt; höhere Kippgefahr nach vorne beim Bremsen, beim Auftreffen des vorderen Rads auf Absatz und bei Abfahrt von Absatz oder auf Abwärtsrampe</li> <li>- hohe Kippgefahr bei Kurvenfahrt und gleichzeitigem Beschleunigen/Bremsen, da Lenkrollen keine Querkräfte aufnehmen können</li> <li>=&gt; ungünstig für Anforderung E</li> <li>- schlechte Spurtreue bei Schrägfahrt über Absatz (Anforderung F)</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Lenkrollen können Querkräfte aufnehmen</li> <li>+ geringere Kippgefahr bei Kurvenfahrt und gleichzeitigem Beschleunigen/Bremsen</li> <li>=&gt; günstig für Anforderung E</li> <li>+ gute Spurtreue bei Schrägfahrt über Absatz (Anforderung F), wenn Lenkwinkel von außen nicht verdreht werden kann</li> <li>+ Eindrehen der Lenkrollen kann Feststellbremse ersetzen</li> </ul>	
 Stabilitätsfläche zwischen den Radaufstandspunkten				

Tabelle 4.5: Untervarianten der Kinematikvariante K3 und Vergleich der Stabilitätsflächen zwischen Varianten mit passiven und gelenkten Lenkrollen

Aus der Bewertung in Tabelle 4.5 geht hervor, dass gelenkte Lenkrollen, deren Lenkwinkel nicht durch äußere Kräfte verdreht werden kann, günstiger sind. Daher werden die Kinematikvarianten K3-IV und K3-V im Folgenden bevorzugt betrachtet, jedoch sind alle noch folgenden Ergebnisse prinzipiell auf K3-I, -II und -III übertragbar.

Tabelle 4.6 rechts zeigt Untervariante V beim Drehen auf der Stelle und Kurvenfahren. Beim Drehen auf der Stelle können die Lenkräder nach innen oder außen gedreht werden, außen ist der Stand stabiler, innen ist ein Drehen in der engen Referenzpassage möglich. Bei der Kurvenfahrt vergrößert sich an der äußeren Kurvenbahn der Lenkräder die Stabilitätsfläche. Dieser Effekt ist bei Variante IV vernachlässigbar, weshalb V eine bessere Fahrstabilität hat.

<p>maximale Horizontalkraft an der Kippgrenze</p>	<p>Stand und Drehen in Referenzpassage</p>	<p>Stand und Drehen mit hoher Stabilität</p>	<p>Kurvenfahrt (Pfeil)</p>

Tabelle 4.6: Stabilität und Manövrierbarkeit der Variante K3V

Die gestrichelten Linien in Tabelle 4.6 rechts zwischen vorderer und hinterer Lenkachse deuten eine mechanische Kopplung der Lenkwinkel an, wodurch je ein Lenkantrieb eingespart werden kann, denn der Lenkwinkel bei vorderem und jeweils hinterem Rad ist immer gleich.

### 4.2.2 Konzeption der Lenkradfederung

Die charakteristischen Eigenschaften einer passiven Federung sind Federweg, Federkennlinie und Dämpfungskennlinie. Der Mindestfederweg kann durch Betrachtung der in der Analyse identifizierten Bodenunebenheiten bestimmt werden. In Tabelle 4.7 wird dies für die Radanordnung K3-V und die oben verwendeten Abmessungen durchgeführt. Zusätzlich wird die ungefähre Radlastverteilung angegeben. Alle Situationen seien statisch und der Schwerpunkt sei mittig über der Antriebsachse.

<p>Fahrwerk auf ebenem Boden</p>	<p>Beide Lenkrollen auf Absatz</p>	<p>Fahrwerk auf 7° - Rampengipfel</p>	<p>Antriebsräder auf Absatz</p>	<p>Auffahrt auf Absatz, Nicken</p>	<p>ein Antriebsrad auf Absatz</p>
<p>Abstand der Lenkachsen <math>s_s \approx 400</math> mm, Radlastbezeichnungen: <math>F_{Za}</math>, <math>F_{Zl}</math>, <math>F_{ZW} = F_{Zl} + F_{Zr}</math></p>	<p>Einfederweg je 20 mm, <math>F_{ZW}</math> noch ausreichend groß für Traktion</p>	<p>Ausfederweg je ~ 24 mm, <math>F_{Za}</math> und <math>F_{Zl}</math> ausreichend groß, um Nicken zu vermeiden.</p>	<p>Ausfederweg je 20 mm, kleiner als bei C</p>	<p>geringer Federweg benötigt, als links, <math>F_{Za} &gt; F_{Zl}</math></p>	<p>geringer Federweg benötigt als links</p>

Tabelle 4.7: Benötigte Federwege bei Bodenunebenheiten und ungefähre Radlastverteilungen

Wenn die Lenkradfedern 24 mm ausgefedert sind (C), müssen sie noch eine ausreichende Gegenkraft erzeugen, um den Roboter aus einem Nickwinkel zurück in die Senkrechte zu drücken. Der Ausfederweg muss daher größer als 24 mm sein. Beim Einfedern sollte es in der mechanischen Ausführung einen Endanschlag geben, der erst nach dem Einfedern um mindestens 20 mm ansprechen darf (B). Bei D, E und F sind die benötigten Federwege kleiner.

Nach diesen Ergebnissen illustriert Bild 4.1 einen groben konzeptionellen Entwurf des Bereichs, in dem die Federkennlinie der Lenkrollen liegen muss. Mögliche Verläufe der Feder- und Dämpferkennung werden in Kapitel 5 entwickelt.

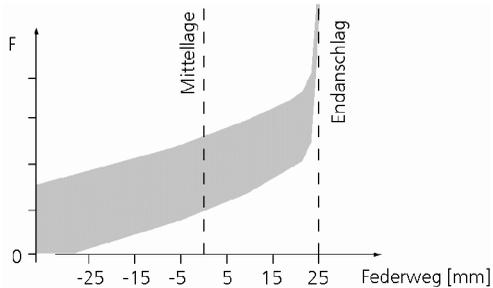


Bild 4.1: Bereich, in dem die Federkennlinie liegen muss

Bei steileren Rampen und höheren Absätzen als von den Anforderungen vorgegeben vergrößern sich die Mindestfederwege entsprechend. Tabelle 4.8 listet zusätzliche Beispielwerte für die Rampensteigungen 10 ° (dünne Schrift) und 20 ° (graue Schrift) und die Absatzhöhen 30 mm und 50 mm auf. Die Werte steigen auch mit größerem Lenkachsenabstand.

Kreisgrundflächen-Ø [mm]	Lenkachsenabstand $s_s$ [mm]	min. Ausfederweg bei Rampengipfel [mm]			min. Gesamtfederweg bei Absatzhöhe [mm]								
					20 mm			30 mm			50 mm		
		7 °	10 °	20 °	7 °	10 °	20 °	7 °	10 °	20 °	7 °	10 °	20 °
500	400	<b>24</b>	34	72	<b>44</b>	54	92	<b>54</b>	64	102	<b>74</b>	84	112
600	500	<b>30</b>	43	90	<b>50</b>	63	110	<b>60</b>	73	120	<b>80</b>	93	140
700	600	<b>36</b>	52	108	<b>56</b>	72	128	<b>66</b>	82	138	<b>86</b>	102	158

Tabelle 4.8: Federwege in Abhängigkeit des Lenkrollenabstands bei verschiedenen Rampenwinkeln und Absatzhöhen

Je nach Höhe des Gesamtschwerpunkts können Rampen ab 10 ° schon so steil sein, dass der Aufbau bei Auffahrt weit nach hinten nickt und die Antriebsräder so weit entlastet werden, dass sie nicht mehr die nötige Traktion zum Aufwärtsfahren erzeugen können. 20 °-Steigungen können möglicherweise nur noch mit einer aktiv verstellbaren Vorder- und Hinterradfederung, die den Aufbau in einem kleineren Winkel zur Ebene als dem Steigungswinkel hält, überwunden werden.

### 4.3 Konzeption von Realisierungsvarianten

#### 4.3.1 Konzepte für Lenkmechanik, Lenkantriebe und Fahrtriebe

Lenkmechanik, Lenkantriebe und Fahrtriebe können aus Komponenten der industriellen Antriebstechnik zusammengestellt werden. Sie müssen entsprechend dem Gesamtgewicht des Roboters, dem Platzangebot und den Anforderungen B (Geschwindigkeit  $> 2 \text{ m/s}$ ), C (Fahrt über Referenzrampe und -absatz) und K (niedriger Energieverbrauch) ausgewählt und dimensioniert werden.

Tabelle 4.9 listet mögliche Konzepte für Realisierungsvarianten auf. Der Lenkantrieb muss selbsthemmend sein, was z.B. über ein Schneckengetriebe mit hoher Übersetzung erreicht werden kann. Rechts sind Varianten für die Fahrtriebe abgebildet, entweder als Kombination aus Getriebe und Motor oder als Direktantrieb. Getriebe können auch in die Radnabe hineinragen. Antriebe über Ketten und Riemen werden nicht berücksichtigt, da sie im Allgemeinen wartungsanfälliger sind, sie sind aber prinzipiell möglich. Neben Elektromotoren sind auch Hydraulikmotoren denkbar, sie sind aber in der Regel nicht für präzisen Langsamlauf geeignet und haben zusammen mit einem Hydrauliksystem einen niedrigen Gesamtwirkungsgrad.

	Schneckentriebe an Lenkachsen, Lenkmotor treibt Koppelwelle		Planetengetriebe + Servomotor, axial
	Kegelräder an Lenkachse, Lenkmotor treibt Koppelwelle		Planetenwinkelgetriebe oder Kegelradgetriebe + Servomotor nach oben stehend
	überkreuzte, beidseitig befestigte Ketten, Riemen oder Seile, Lenkmotor treibt eine Lenkachse		Stirnradflachgetriebe, schräg nach oben stehend + Servomotor
	Einzelantriebe: links Riemen/Kette, rechts Schneckentrieb		Hochpoliger Servomotor (Direktantrieb)
	Lenkrad, Lenkachse, Platzbedarf beim Lenken		Getriebe
	Lenkantrieb (z.B. Getriebemotor)		Fahrtriebsmotor

Tabelle 4.9: Varianten für Lenkmechanik und Lenkantriebe (links) und Fahrtriebe (rechts)

#### 4.3.2 Konzeptionelle Maßnahmen für die Eignung bei rauen Umweltbedingungen

Anforderung J in Tabelle 3.11 verlangt mindestens, dass IP54 (Staub- und Spritzwasserschutz) erfüllbar ist. Weitere Bedingungen und mögliche konzeptionelle Maßnahmen sind in Tabelle 4.10 zusammengestellt. Diese Maßnahmen sind als Maximalliste zu verstehen und sie müssen nur prinzipiell erfüllbar sein. Je nach konkreter Einsatzumgebung können weniger scharfe Bedingungen angenommen werden.

Bedingungen nach EN 60723-3-7 gemäß Anforderung J		Maßnahmen im und am Gehäuse des Roboters	Anwendung auf
7(K3, 7ZX)	+ 70 °C, Sonnen- und Wärmestrahlung min. 1.120 W/m <sup>2</sup>	Schutz gegen Überhitzung (Kühlkörper, Luft, Flüssigkeitskühlung, Kondensationskühlung) geeignete Außenmaterialien, Lacke und Materialpaarungen	elektrische Betriebsmittel Mechanik
	- 25 °C	selektive Baugruppenheizung	elektrische Betriebsmittel
	rascher Wechsel zwischen - 25 °C und + 30 °C	konstruktiv (z.B. mit Materialpaarungen mit ähnlichem Wärmeausdehnungskoeffizient, Ausgleichsfugen), Schutz vor Kondensation konstruktiv und durch Trockenmittel	Gesamtmechanik, Verbindungselemente
	5 – 100 % rel. Luftfeuchte		elektrische Betriebsmittel
	Spritzwasser, Betauung, Eisbildung, Niederschlag, Regen ≤ 6 mm/min, 5 °C	Korrosionsschutz Schutz gegen Wassereintritt	Gesamtmechanik elektrische Betriebsmittel, bewegliche Mechanik
	Wind bis 30 m/s	kleiner Strömungswiderstand der Außenform, niedriger Schwerpunkt	Gesamtmechanik
7(B,C,S,M)3	tierische Schädlinge	IP54, geeignete Außenmaterialien	Gesamtmechanik
	Salznebel, verschiedene Gase	Korrosionsschutz, geeignete Materialien, IP54	elektrische Betriebsmittel Gesamtmechanik
	Sand, Staub (hohe Konz. <sup>1</sup> )	IP54, geeignete Außenmaterialien, Lacke	Gesamtmechanik
	Vibrationen, Stöße <sup>1</sup>	Schutz empfindlicher Baugruppen	Rechner, Sensoren, Feinmechanik, u.a.

<sup>1</sup> genaue Spez. siehe DIN EN 60723-3-7

Tabelle 4.10: Konzeptionelle Maßnahmen gegen Umweltbedingungen nach EN 60723-3-7 gemäß Anforderung J

Aus den Einzelmaßnahmen aus Tabelle 4.10 lässt sich ein mögliches Gesamtkonzept formulieren: Die mobile Roboterplattform hat schlag- und stoßfeste, wasser- und staubdichte (IP64) Gehäuseabdeckungen, hinter denen Fahr- und Lenkantriebe, Lenkmechanik, elektrische Baugruppen, und soweit möglich Navigationssensoren geschützt sind. Das Gehäuse umschließt entweder nur die Roboterplattform oder den gesamten Roboterassistenten. Für einen kleinen Strömungswiderstand für horizontalen Wind ist das Gehäuse glatt und die Außenform hat möglichst keine Einschnitte, Abrisskanten und Erhebungen. Alle Außenteile sind gegen Korrosion, Sonneneinstrahlung und eventuell aggressive Gase geschützt, entweder durch Lacke oder als Material. Lacke sind stoß- und schlagfest. Die drehenden Antriebs- und Lenkachsen führen über abgedichtete Lager oder geschmierte Wellendichtringe nach außen. Die Antriebsräder sind luftgefüllt oder ausgeschäumt und sind leicht austauschbar. Die kleineren Lenkräder sind gefedert und so an der Lenkachse befestigt, dass sie zur Wartung und Reparatur einfach demontiert werden können. Die Lenkradlager sind abgedichtet und die Mechanik der Radaufhängung und Federung ist unempfindlich gegenüber Schmutz, Stößen und andere der oben genannten Umweltbedingungen. Bei Bedarf gibt es im Gehäuse Heizungen für elektrische Baugruppen und Trockenmittel gegen Kondensation. Stoßempfindliche Baugruppen sind auf Gummielementen oder mit Federn gelagert.

### 4.3.3 Konzept für den Explosionsschutz

Mit dem Aufbaukonzept aus dem vorherigem Abschnitt ist das nächstliegende Konzept für den Explosionsschutz die Zündschutzart Ex p, wobei das Gehäuse des gesamten Roboters gasdicht und alle elektrischen Baugruppen und Antriebe überdruckgekapselt sind, wie z.B. in (US5440916 1995) vorgeschlagen. Ein Nachteil ist, dass das Restvolumen des Gehäuses vor dem Einschalten der nicht explosionsgeschützten Betriebsmittel mehrfach durchspült werden muss, bevor der Roboter betriebsbereit ist. Im Betrieb kann es an den Antriebs- und Lenkachsendichtungen Leckverluste geben. Für beide Fälle muss ein Spülgasvorrat mitgeführt werden. Alternativen zu Ex p wären Ex q (Sandkapselung), Ex o (Ölkapselung) oder Ex m (Vergusskapselung), wobei jedoch das Gesamtgewicht erheblich zunehmen würde und für den obligatorischen Luftspalt in Elektromotoren, wie auch für andere nicht auffüllbare Baugruppen ein Alternativkonzept nötig wäre.

Zusätzlich müssen die Anforderungen aus Abschnitt 3.2.5 beachtet werden, die aber in keinem prinzipiellen Widerspruch zu bisherigen Konzepten stehen. Danach können einige Leichtmetallverbindungen nicht oder nur unter bestimmten Bedingungen verwendet werden, es muss Mindestabstände zwischen Rädern und Fahrgestell bzw. Gehäuse geben, die Räder dürfen einen maximalen Oberflächenwiderstand nicht überschreiten und es darf – auch bei wahrscheinlichen Betriebsstörungen – keine heißen Oberflächen, mechanische Funken oder andere Zündquellen geben. Besonders bodennahe Gehäuse- und Fahrwerksteile können ähnlich der Lastaufnahmemittel in Abschnitt 3.2.5 verkleidet werden. Die gesamte Gehäuseoberfläche ist nicht berührsicher und darf sich weder von innen noch von außen aufheizen lassen, was durch geeignete innere Wärmeverteilung verhindert werden kann. Sie ist daher in jedem Fall kälter als die für Explosionsschutz maximal zulässige Oberflächentemperatur. An Motoren, Getrieben und Leistungselektronik treten Verlustleistungen auf, die durch entsprechende Dimensionierung und guten thermischen Kontakt mit z.B. dem metallenen Gehäuserahmen verteilt werden können. Getriebelose Direktantriebe sind aus thermischen Gründen besonders gut als Fahrmotoren geeignet. Auch an den außen liegenden Lenkradfederungen darf es keine heißen Oberflächen und mechanische Funken geben, was die Verwendung von hydraulischen Stoßdämpfern einschränkt. Alle außen liegende Bedienelemente – mindestens ein Ein-/Ausschalter – sind explosionsgeschützte Betriebsmittel.

### 4.3.4 Konzepte für Gesamtsystemvarianten

Bis hierher sind Realisierungsvarianten von Teilsystemen und Aufbauprinzipien entwickelt worden. Sie können zusammen mit beliebigen funktionalen Aufbauten zu Gesamtsystemvarianten von Roboterassistenten kombiniert werden, die alle Anforderungen aus Unterkapitel 3.6 erfüllen – also als Roboterassistenten mit gefederten Fahrwerken unter beliebigen Boden- und Umgebungsbedingungen, wie sie in Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen herrschen, ohne Mobilitätseinschränkung operieren können. Zwei Beispiele mit 500 mm Grundflächendurchmesser in der Kinematikvariante K3-V sind in Bild 4.2 maßstäblich zu einer Person abgebildet – links ein Aufbau mit einem eingeklappten langen Roboterarm und rechts ein universeller zweiarmiger Roboterassistent z.B. für Servicedienste in Bürogebäuden und Haushalt. In der Draufsicht wird die kompakte Bauweise zum Vergleich mit einer gehenden Person illustriert.

Die für Fahrstabilität und Fahrdynamik entscheidenden Fahrwerksbaugruppen werden im nächsten Kapitel anhand von Fahrdynamikmodellen und Simulationen entwickelt.

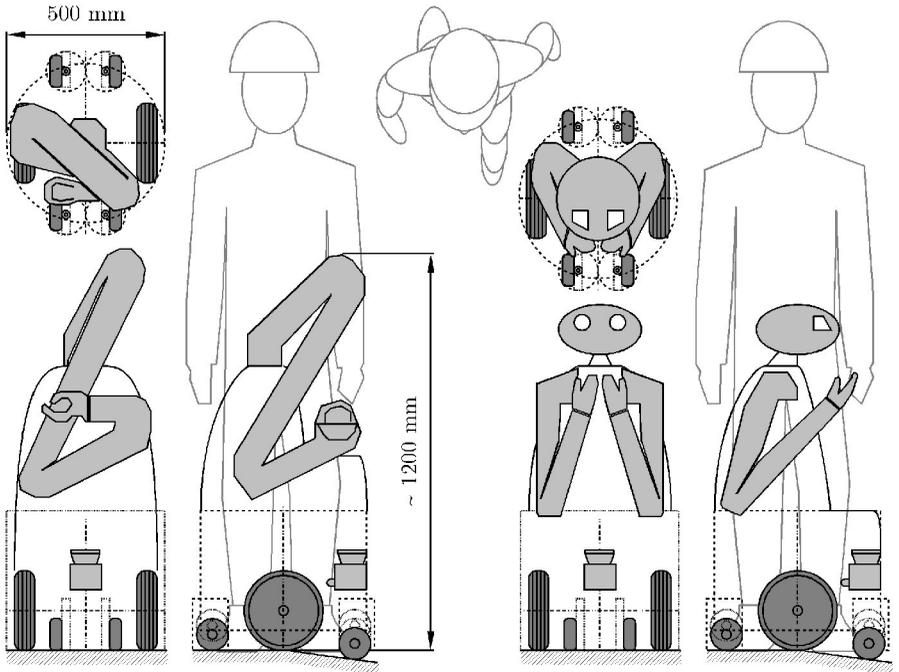


Bild 4.2: Konzepte für Gesamtsysteme von Roboterassistenten maßstäblich zur einer Person P95 nach EN 547-1,-3

## 5 Entwicklung und Simulation von Fahrdynamikmodellen und Berechnungsgrundlagen für die Auslegung eines Radfahrwerks mit passiver Federung für mobile Roboterassistenten

### 5.1 Vorgehensweise und Definitionen

Das in Kapitel 4 entwickelte Systemkonzept für Fahrwerke von mobilen Roboterassistenten besteht aus der Kinematikvariante K3 (Tabelle 4.5), den Starrkörpern des Aufbaus mit Antriebsreifen und den im Vergleich dazu kleinen ungefederten Teilmassen der Lenkrollen. In Unterkapitel 4.2 wurden die wesentlichen Randbedingungen für die Fahrstabilität aufgeführt und gezeigt, wie das Konzept eines gefederten Fahrwerks aussehen kann. Dieses Fahrwerk unterscheidet sich wesentlich von Fahrwerken herkömmlicher Straßen- und Schienenfahrzeuge, so dass Auslegungsverfahren generell nicht übertragbar sind. Daher werden in diesem Kapitel Modelle für das statische und dynamische Fahrzeugverhalten und das Kontaktverhalten zur Fahrbahn sowie Berechnungsgrundlagen für Fahrwerkskomponenten entwickelt, mit denen ein gefedertes Fahrwerk ausgelegt werden kann. Soweit möglich, werden Konzepte und Modelle aus der Dynamik von Straßenfahrzeugen verwendet oder weiterentwickelt.

Bild 5.1 zeigt die Koordinatensysteme und wichtige Größenbezeichnungen für die folgenden Berechnungen und Modelle. Die Bezeichnungen orientieren sich an (DIN 70000).

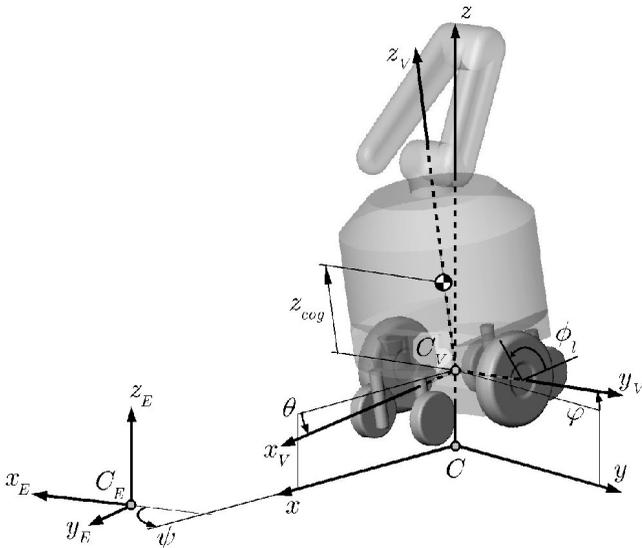


Bild 5.1: Koordinatensysteme eines Roboters für das räumliche Modell

$C_E$  ist das ortsfeste Inertialsystem, wobei  $(x_E, y_E)$  eine horizontale Ebene aufspannen.  $C$  bewegt sich auf dieser Ebene gegenüber  $C_E$  mit dem Gierwinkel  $\psi$  und liegt vertikal unter dem fahrzeugfesten  $C_V$ .  $C_V$  liegt auf der Mitte der Antriebsradachse,  $\theta$  ist der Nickwinkel und  $\varphi$  ist der Wankwinkel. Im Schwerpunkt liegt das Koordinatensystem  $C_S$ , das gegenüber  $C_V$  verschoben aber nicht verdreht ist. Bei diesem Typ Roboter wird angenommen, dass der Schwerpunkt bei  $z_{\text{cog}}$  auf der  $z_V$ - Achse liegt.

## 5.2 Modellierung der Bodenbeschaffenheiten

### 5.2.1 Fahrwegsmodelle

In der Dynamik von Straßenfahrzeugen werden Bodenunebenheiten nicht als Funktionen des Orts, sondern der Zeit modelliert, da sie bei gegebener Fahrgeschwindigkeit die Fahrdynamik über die Zeit anregen. Sie werden auf 3 verschiedene Arten beschrieben:

1. als periodische Anregung

$$h(t) = h_0 + \hat{h}_1 \sin(\omega t + \epsilon_1) + \hat{h}_2 \sin(2\omega t + \epsilon_2) + \dots + \hat{h}_i \sin(i\omega t + \epsilon_i) + \dots \quad \text{mit } i=3,4,\dots, \quad (5.1)$$

2. als stochastische Anregung mit der spektralen Unebenheitsdichte oder

3. als Einzelhindernisse mit differenzierbaren Funktionen, z.B.  $(1 - \cos)$ -Funktion, Parabelstücke.

Für ausführliche Darstellungen sei auf (Kortüm 1994), (Willumeit 1998) und (Mitschke 2004) verwiesen. Diese Modelle können ohne Einschränkung für mobile Roboter übernommen werden, wenn er sich auf nicht weiter spezifiziertem Boden bewegt, nur einige Zahlenwerte z.B. für die Fahrgeschwindigkeit sind verschieden. Spezielle Bodenbedingungen aus den Anforderungen werden in den folgenden Abschnitten modelliert.

### 5.2.2 Rampen und kleine Absätze

Rampen und kleine Absätze im Fahrweg können als Unebenheiten modelliert werden. Ein Absatz ist ein Einzelhindernis wie unter 3. im vorigem Absatz. Bei genauer Betrachtung ist diese Beschreibung jedoch ungenau, denn wie eine Absatzüberfahrt auf die Fahrdynamik wirkt, hängt – anders als in o.g. Literatur für Straßenfahrzeuge beschrieben – wesentlich von Durchmesser und Nachgiebigkeit des belasteten Reifens ab. Dies wird in diesem Abschnitt im Detail untersucht. Dazu ist in Bild 3.9 links die Achsbahn eines Rads bei Absatzauffahrt,  $r + h(s)$  illustriert, die durch Abrollen an der Kante entsteht.

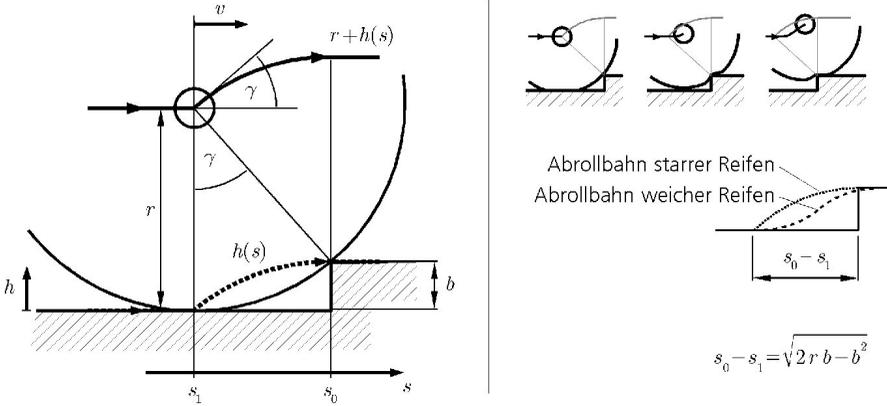


Bild 5.2: Absatzauffahrt eines Reifens und wirksamer Bodenhöhenverlauf als Abrollbahn  
 Nach Auflösen der Geometriebeziehungen und Verschiebung der Bahn um  $r$  nach unten erhält man den für die Fahrdynamik wirksamen Bodenhöhenverlauf (gepunktete Kurve)

$$h(s) = \begin{cases} 0 & , s \leq s_1 \\ b - r \left( 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{s - s_0}{r} \right)^2} \right) & , s_1 < s \leq s_0 \\ b & , s > s_0 \end{cases} \quad (5.2)$$

Die entsprechende Abhängigkeit von der Zeit bei konstanter Fahrgeschwindigkeit  $v$  erhält man durch Substitution von  $s_{(i)} = v t_{(i)}$ .

Das Rad trifft mit einem Stoßwinkel  $\gamma$  auf den Absatz, wobei der Zusammenhang mit Radradius  $r$  und Absatzhöhe  $b$

$$\frac{b}{r} = 1 - \cos \gamma \quad (5.3)$$

ist. Größere Stoßwinkel erzeugen große horizontale Kraftstöße und mechanische Belastungen, sie sollten daher vermieden werden.

Gleichung (5.2) gilt für starre Reifen, mit denen die Stoßbelastung für Boden, Reifen und Radlager am größten ist. In Bild 3.9 wurde ein dadurch beschädigter Reifen bei nur wenigen kg Radlast gezeigt. Bei weichen Elastikumgummi- oder Luftreifen ist der wirksame Bodenhöhenverlauf weicher, wie in Bild 5.2 rechts oben illustriert. Dann ist die Beschreibung eines Absatzes mit einer  $(1 - \cos)$ -Funktion oder mit Parabelstücken eine gute Näherung. Die Breite des Anstiegsstücks lässt sich für starre Reifen geometrisch herleiten und ist

$$s_0 - s_1 = \sqrt{2rb - b^2} \quad \text{bzw.} \quad t_0 - t_1 = \frac{1}{v} \sqrt{2rb - b^2} \quad (5.4)$$

Bei weichen Reifen ist das Anstiegsstück etwas breiter, trotzdem kann Gleichung (5.4) auch dafür als konservative Näherung verwendet werden.

Bei Rampen kann der Einfluss des Reifendurchmessers vernachlässigt werden, da der Bodenverlauf stetig und der Knick am Rampenbeginn und -ende verglichen mit dem Reifendurchmesser klein ist. Mit dem Steigungswinkel  $\rho$  ist die Gleichung für den Bodenverlauf einer ansteigenden Rampe aus  $h(s_0) = 0$

$$h(s) = (s - s_0) \tan \rho \approx (s - s_0) \rho \quad \text{bzw.} \quad h(t) \approx v \rho (t - t_0) . \quad (5.5)$$

Für eine absteigende Rampe aus  $h(s_0) = h_0$  gilt Entsprechendes.

### 5.2.3 Gitterrostboden

Bei einigen Einsatzszenarien gibt es Gitterrostboden, der hier gesondert modelliert wird. Speziell wird das Referenzgitter aus Bild 3.7 beschrieben. Die Anregungen der Fahrdynamik durch Gitterboden wird auch von Geometrie und Art der Räder bestimmt, daher ist eine Gitterbodenmodellierung nur zusammen mit den Rädern sinnvoll. Durch die Lenkräder, die kleiner und härter als die Antriebsräder sind, gibt es die stärksten Anregungen, deshalb werden im Folgenden nur die Lenkräder betrachtet.

Der Roboter kann in beliebigem Winkel zur Gitterrichtung fahren. Wenn er parallel zu den Gitterstegen mit 40 mm Abstand fährt, dann laufen die breiteren Reifen längs auf mindestens zwei benachbarten Stegen und wenn er schräg fährt, dann laufen sie schräg und auf sich kreuzenden Gitterstegen. In beiden Fällen gibt es eine geschwindigkeitsabhängige vertikale Anregung der Fahrdynamik, weil der Reifenkörper auf den Stegen leicht eingedrückt und dazwischen entspannt wird. Die stärksten Anregungen gibt es dann, wenn der Roboter senkrecht zu den Gitterstegen mit 40 mm Abstand fährt. In diesem Fall dringen die Räder am tiefsten in die Gitterroste ein und es gibt die größten Vertikalbeschleunigungen. Bild 5.3 links zeigt, wie ein Rad zwischen zwei Gitterstegen eindringt. Die Amplitude  $\hat{h}$  der Vertikalbewegung kann man durch Beschreibung des eingezeichneten rechtwinkligen Dreiecks aus

$$(r_R - \hat{h})^2 + 18 \text{ mm}^2 = r_R^2 \quad (5.6)$$

berechnen, wodurch sich die rechts gezeigte Abhängigkeit vom Radradius  $r_R$  ergibt.

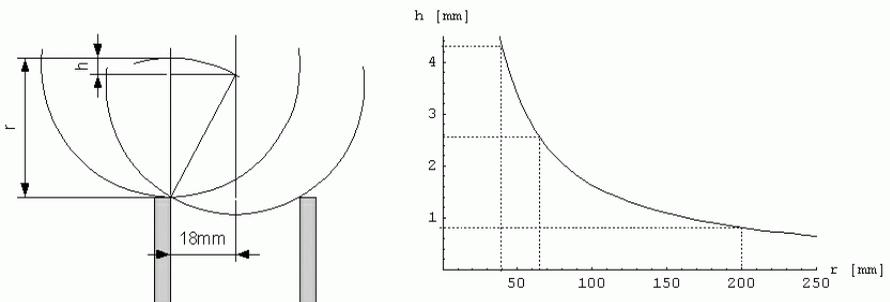


Bild 5.3: Eindringtiefe  $\hat{h}$  in das Referenzgitter in Abhängigkeit vom Radradius  $r_R$

Dieser Zusammenhang gilt nur für starre Räder. Bei elastischen Reifenkörpern verschiebt sich die Kurve um die Verformung des belasteten Reifens nach oben.

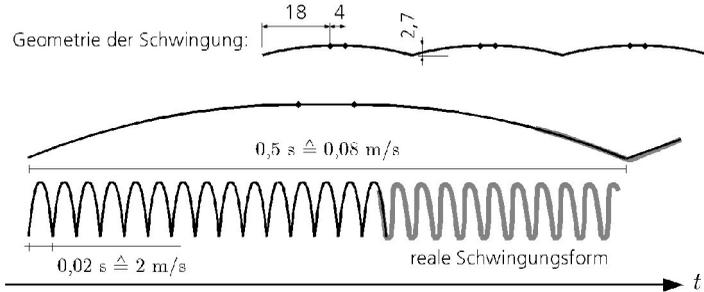


Bild 5.4: Schwingungsform der Lenkervibration auf Referenzgitterrost

Die Bahn, die der Radmittelpunkt beschreibt, ist für den Beispielwert  $r_R = 65 \text{ mm}$  in Bild 5.4 oben skizziert, sie besteht aus Geradenstücken und Kreissegmenten mit Radius  $r_R$ . Darunter sind die Bahnen über die Zeit für verschiedene Vorwärtsgeschwindigkeiten aufgetragen, einmal für  $0,08 \text{ m/s}$  (Mitte) und für  $2 \text{ m/s}$  (unten). Bei elastischen Reifen ist nicht nur  $\hat{h}$  etwas größer, sondern durch die dynamische Verformung des Reifens werden die Spitzen der Bahnkurve abgerundet (unten rechts).

Die Vertikalbeschleunigung  $\hat{h}$  ist für starre Räder im Schwingungstal theoretisch unendlich und in der Praxis von Raddeformation, Trägheit und Steifigkeit des Untergrunds abhängig. In diesem Fall gäbe es eine hohe Belastung für Rad und Boden, weshalb starre Räder auf Gitterrostboden ungünstig sind. Bei elastischen Reifen kann man grob mit einer harmonischen Schwingung approximieren und die Maximalbeschleunigung mit

$$\hat{h} = -\hat{h}\omega^2 = \frac{-4\hat{h}\pi^2}{T^2} \quad (5.7)$$

abschätzen. Mit  $\hat{h} = 3 \text{ mm}$  und der konservativen Annahme der halben Schwingungsdauer wie in Bild 5.4 ist die Maximalbeschleunigung  $\hat{h} \approx 590 \text{ m/s}^2 \approx 60 g$ . Diese Abschätzung berücksichtigt zwar nicht die Trägheit des Rades und Elastizitäten, trotzdem ist er für diese Anwendung schon sehr groß. Der Einfluss der Vibrationen auf die Kontaktdynamik der Lenkräder wird also mit zunehmender Geschwindigkeit größer. Eine Folge ist, dass die maximalen Seitenkräfte  $F_y$ , die die Lenkräder übertragen können, geringer werden und die Fahrstabilität reduziert wird. Die Situation ist sinngemäß vergleichbar mit einem Körper, der flächig auf einer leicht geneigten Platte aufliegt, aber abgleitet, wenn die Platte in Vibrationen versetzt wird.

Die Anregung durch Fahrt auf Gitterboden lässt sich also mit

$$h(t) = \hat{h} \sin(\omega t + \epsilon) \quad \text{mit} \quad \omega = \frac{2\pi v}{s_G} \quad (5.8)$$

beschreiben, wobei  $\epsilon$  ein beliebiger Phasenwinkel,  $v$  die Vorwärtsgeschwindigkeit des Roboters und  $s_G = 40 \text{ mm}$  der Abstand der Referenzgitterstege (vgl. Bild 3.7) sind.

## 5.3 Reifenmodellierung

### 5.3.1 Eigenschaften eines Antriebsreifenmodells

Als Antriebsreifen werden Luftreifen, ausgeschäumte Luftreifen oder weiche Elastikgummireifen mit weniger als ca.  $60^\circ$  Shore A, die mindestens leicht ballig sind, verwendet. Sie sind damit zwar verschieden von Straßenfahrzeugreifen, trotzdem sind Merkmalsbeschreibungen übertragbar: Es gilt z.B. nach (Mitschke 2004), dass in Umfangsrichtung vor allem der Rollwiderstand  $F_R$  wirkt, wohingegen Schwallwiderstand, Lagerreibung bei Verwendung von Wälzlagern, Vorspurwiderstand und dynamischer Anteil durch Vertikalbewegungen des Roboters vernachlässigbar sind. Der Latsch ist nicht vernachlässigbar und wird mit steigender Radlast  $F_z$  länger und bei stark balligen Reifen auch breiter. Auch die Kraftschluss-Schlupf Kennlinien sind qualitativ übertragbar. Auf glatten Böden kann es wegen kleinerer Haftbeiwerte  $\mu_h$  zum Gleiten kommen, dagegen kommt es auf Gitterboden praktisch zum Formschluss mit dem Reifen, wenn der Latsch länger als einige Gitterabstände ist, so dass Brems- und Treibschlupf  $S$  annähernd 0 sind. Besonders bei engen Kurvenradien und beim Drehen auf der Stelle treten Seitenkräfte  $F_y$  und Karkassenverformungen auf. Dagegen gibt es bei dieser in Kapitel 4 konzipierten Radanordnung und Bauweise – anders als bei Straßenfahrzeugen – keinen Sturz und praktisch keinen Schräglauf, d.h.  $\alpha=0$ .

### 5.3.2 Vertikalmodell von Antriebsrad und Lenkrad

Fahrzeuge, die nur auf ihren Reifen schwingen, z.B. Ackerschlepper und Baumaschinen, werden in der Kraftfahrzeugdynamik z.B. in (Mitschke 2004) mit einem einfachen Ersatzsystem beschrieben, das Bild 5.5 zeigt, links eine Ersatzskizze des belasteten Reifens, in der Mitte das lineare Ersatzmodell und rechts der Frequenzgang der Vergrößerungsfunktion  $\hat{F}_z/\hat{h}$  bei Anregung durch die Fahrbahn.  $\hat{F}_z/\hat{h}$  ist maßgebend für die Fahrsicherheit. Die Vergrößerungsfunktion für die Aufbaubeschleunigung  $\hat{z}/\hat{h}$ , die maßgebend für den Fahrkomfort ist, hat qualitativ denselben Verlauf. Die Gummidämpfung ist frequenzabhängig und näherungsweise mit  $(c \tan \delta)/\omega$  beschreibbar,  $\delta$  ist der Gummi-Verlustwinkel.

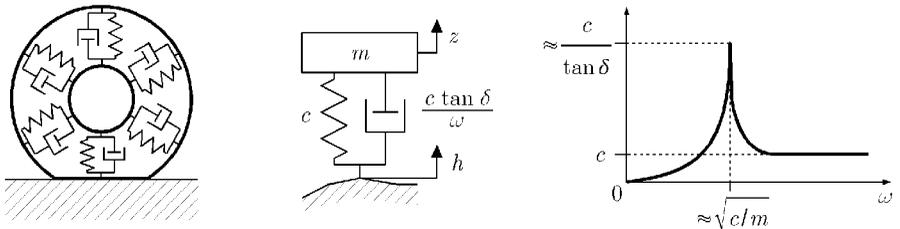


Bild 5.5: Radmodell nach (Mitschke 2004) mit frequenzabhängiger Dämpfung

Dieses Modell ist prinzipiell auf die Antriebsräder des mobilen Roboters übertragbar. Allgemein sind Fahrzeuge, die nur auf den Reifen federn, bei höheren Geschwindigkeiten fahrsicher, weil die Anregungsfrequenzen durch die Fahrbahn in den Bereich der Resonanzüberhöhung kom-

men. Sie werden deshalb auf kleine Höchstgeschwindigkeiten beschränkt. Dies könnte auch auf den mobilen Roboter zutreffen, was im Folgenden untersucht wird.

Die stärksten Anregungen mit höheren Frequenzen gibt es auf Gitterböden, der in Abschnitt 5.2.3 beschrieben wurde, wobei die Anregung der Lenkräder größer ist als die der Antriebsräder. Mit Gleichung (5.8) sollte

$$\sqrt{\frac{c}{m}} > \frac{2\pi v}{s_G} \quad \text{oder} \quad \frac{c}{m v^2} > 25.000 \text{ m}^{-2} \quad (5.9)$$

erfüllt sein (mit gegebenem Gitterabstand  $s_G = 40 \text{ mm}$ ), wobei  $m$  die auf dem Rad liegende Teilmasse ist. Setzt man praxisnahe Wertebereiche für  $m$  und  $v$  ein, dann erhält man für  $c$  Werte, wie sie Tabelle 5.1 zeigt. Diese Federsteifigkeiten sind aber viel zu hoch, um für die geringen Massen noch eine Federwirkung zu haben. Dies ist ein weiterer Grund, warum eine weitere Federung für die Lenkräder benötigt wird. Bei den Antriebsrädern tritt dieses Problem prinzipiell auch auf, aber die Amplitude ist wegen des größeren Radradius kleiner (Bild 5.3). Wenn ausserdem der Latsch mehrere Gitterstege lang ist, dann gibt es praktisch keine Vertikalanzregung mehr.

$c \text{ [N/mm]}$		$m \text{ [kg]}$				
		<b>10</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>70</b>	<b>90</b>
$v \text{ [m/s]}$	<b>1</b>	2.500	7.500	12.500	17.500	22.500
	<b>2</b>	10.000	30.000	50.000	70.000	90.000
	<b>3</b>	22.500	67.500	112.500	157.500	202.500

Tabelle 5.1: Beispiel-Wertekombinationen für Gleichung (5.9)

Die Bewegungsgleichungen in Vertikalrichtung sind für Antriebsrad und Lenkrad prinzipiell gleich, nur die Zahlenwerte unterscheiden sich, insbesondere ist  $c_R \gg c_W$ . Da eine Lenkradfederung benötigt wird, wird die Vertikaldynamik eines Lenkrads hier nicht einzeln modelliert, sondern zusammen mit der Lenkradfederung in Unterkapitel 5.4. Alle hier folgenden Überlegungen betreffen die Antriebsräder.

Bild 5.6 links zeigt das Ersatzmodell für ein Antriebsrad des mobilen Roboters mit relevanten Größen. Der Index  $i$  steht für links und rechts. Die Teilmasse  $m_i$  bestimmt im Arbeitspunkt die statische Radlast,  $F_{WZA} = m_i g$ . Ihr Schwerpunkt liegt  $z_i$  über dem Referenzniveau, der Bodenhöhenverlauf wird mit  $h_i$  beschrieben. Die Dämpfung  $d_W$  wurde oben beschrieben und die Federhärte  $c_W$  ergibt sich durch Linearisierung mit der Subtangente. Bild 5.6 rechts zeigt  $F_Z(\Delta z)$ -Kennlinien für einen balligen Luftreifen (260 x 85) als Beispiel, der als Antriebsrad verwendet werden kann. Wegen der Balligkeit sind die Kennlinien progressiver als bei Straßenfahrzeugen (vgl. Willumeit 1998, Mitschke 2004). Für das Modell kann die Kennlinie mit der Subtangente im Arbeitspunkt linearisiert werden. Im Modell hat das Rad dann keinen Bodenkontakt mehr, wenn  $z_i > z_{W0} + h_i$  und es gilt  $z_A = z_{W0} - s_{sub}$ .

Die Kennlinien  $F_Z(\Delta z)$  sind vom Untergrund abhängig, wie Bild 5.6 rechts auch zeigt. Je kleiner die Summe der Auflageflächen auf den Tragstäben im Latsch, desto weiter drückt sich der Reifen

bei gleicher Last ein. Ein ausgeschäumter Luftreifen (dunkelgrau) ist härter als ein luftgefüllter Reifen (hellgrau) gleicher Bauart und drückt sich weniger ein. Bild 5.7 zeigt den zu den Kennlinien gehörigen Reifen bei  $F_z = 981$  N. Der Latsch ist etwa  $4 s_c$  lang und bis 50 mm breit.

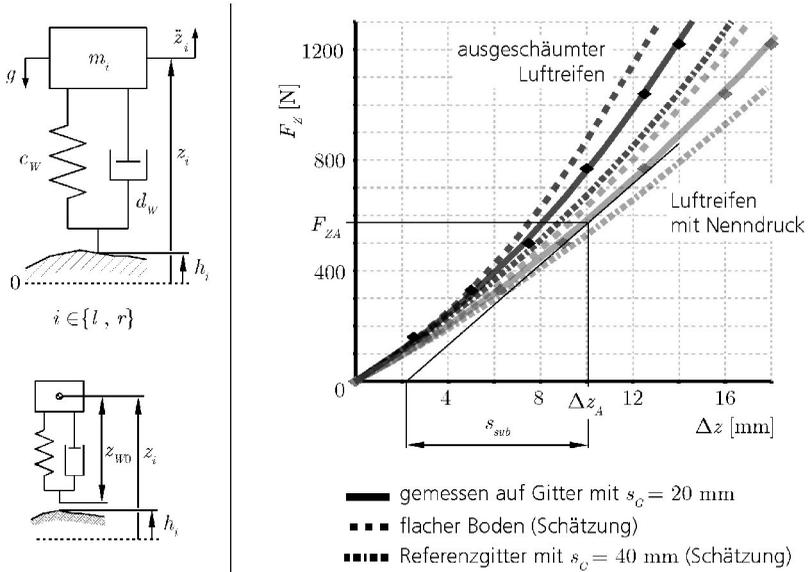


Bild 5.6: Größen im Antriebsradmodell (links),  $F_z(\Delta z)$ -Kennlinien und Subtangente (rechts)

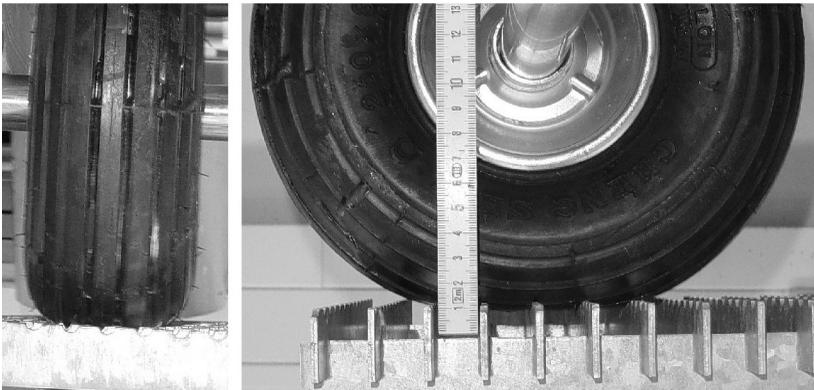


Bild 5.7: Latschbild eines ausgeschäumten Luftreifens auf Gitterrost,  $s_c = 22$  mm,  $F_z = 981$  N

Die Beispielsubtangente in Bild 5.6 rechts hat die Steigung  $c_w \approx 70$  kN/m. Auch dieser Wert ist deutlich kleiner als die theoretischen Mindestwerte in Tabelle 5.1. Mit  $m_t = 50$  kg wäre die Resonanzüberhöhung bei  $\omega \approx 37$  rad/s  $\hat{=} 6$  Hz. Die Anregungsfrequenzen durch den Boden sollten bei Höchstgeschwindigkeit kleiner sein, auf Gitterrosten sind sie aber größer. Das heißt, die

Fahrdynamik könnte instabil werden. Das kann nur dadurch verhindert werden, dass der Latsch über mehrere Gitterstege geht und immer auf mindestens zwei Wellenbergen aufsteht, so dass die Vertikalanregung nahezu vollständig verschwindet.

Nach diesen Überlegungen können die Bewegungsgleichung für das Modell in Bild 5.6 links aus der Kräftebilanzgleichung hergeleitet werden zu

$$m_i \ddot{z}_i = -m_i g + \begin{cases} 0 & , z_i > (z_{w0} + h_i) \\ c_W(z_{w0} - z_i + h_i) - d_W(\dot{z}_i - \dot{h}_i) & , z_i \leq (z_{w0} + h_i) \end{cases} \quad (5.10)$$

Im Modell werden Unwucht, Höhenschlag und Radialkraftschwankung durch Reifenungleichförmigkeit vernachlässigt.

## 5.4 Vertikalmodelle der Lenkrafederng

### 5.4.1 Lineares Vertikalmodell

Für die Lenkräder sind Federungen vorgesehen, die Bodenebenheiten ausgleichen und den Fahrkomfort erhöhen sollen. Im ersten Schritt wird die noch zu spezifizierende Federung als lineares Kelvin-Element modelliert.

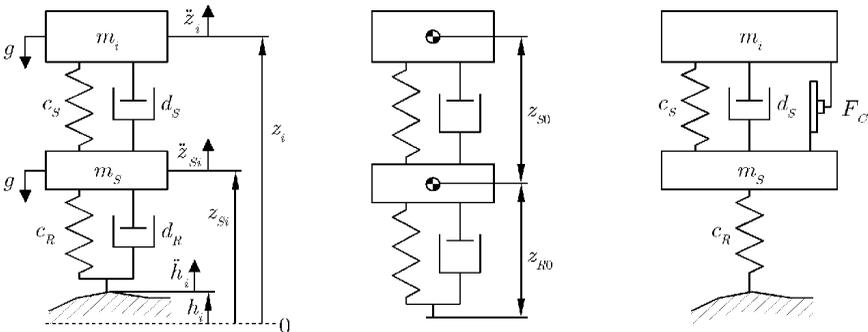


Bild 5.8: Größen eines linearen Modells für die Lenkrafederng (links), vollständig entlastet (Mitte), vereinfacht mit coulombscher Reibung (rechts)

Bild 5.8 links zeigt das Modell einer Lenkrafederng mit Lenkrad. Der Index  $i$  ist Platzhalter für  $f$  (vorne – front) und  $a$  (hinten – aft),  $S$  bezeichnet die Lenkrafederng (suspension) und  $R$  die Lenkräder (roller).  $m_s$  fasst die Massen für Rad, Lager, Achse und dem damit starr verbundenen Teil der Federungsmechanik zusammen. Berücksichtigt man wie in Bild 5.5 die maximal geöffneten Stellungen der Federung des Reifens  $z_{R0}$  und der Lenkrafederng  $z_{S0}$ , dann sind die Bewegungsdifferentialgleichungen

$$m_s \ddot{z}_{S_i} = -m_s g + c_R(z_{R0} - z_{S_i} + h_i) - d_R(\dot{z}_{S_i} - \dot{h}_i) - c_S(z_{S0} - z_{S_i} + z_i) + d_S(\dot{z}_i - \dot{z}_{S_i}) \quad (5.11)$$

und

$$m_i \ddot{z}_i = -m_i g + c_S(z_{S0} - z_i + z_{S_i}) - d_S(\dot{z}_i - \dot{z}_{S_i}) \quad (5.12)$$

Wenn das Rad vom Boden abhebt, also  $(z_{Si} - h_i) > z_{R0}$ , dann verschwindet die Federwirkung, also  $c_R(z_{R0} - z_{Si} + h_i) = 0$ . Reibung und Endanschläge werden zunächst nicht berücksichtigt.

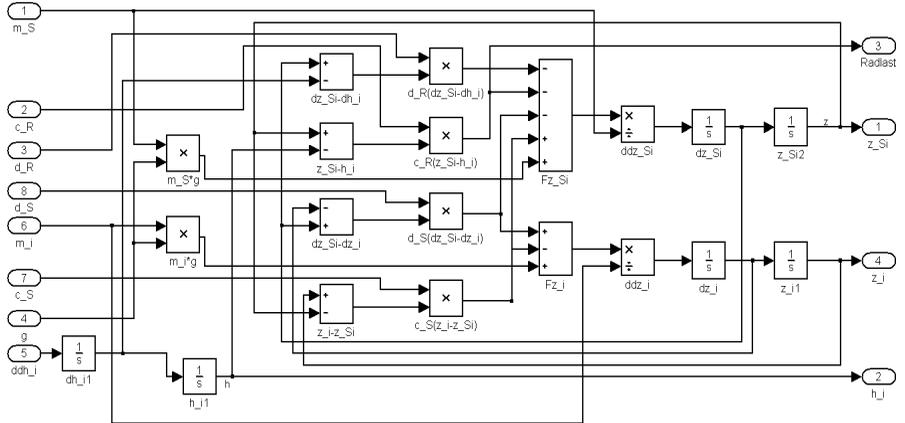


Bild 5.9: Blockschaltbild der Gleichungen für ein einfaches Lenkradfederungsmodell

Bild 5.9 zeigt ein Simulationsmodell der Bewegungsgleichungen unter Simulink® in Blockschaltbilddarstellung. Es soll beispielhaft für kommende Modelle sein, die aus Platzgründen nicht abgebildet werden. Links stehen die Konstanten und der Bodenhöhenverlauf  $h_i$  als Eingangsgröße, rechts werden die Verläufe von  $z_\mu$ ,  $z_{S\mu}$ ,  $h_i$  und  $F_{Zi}$  abgegriffen.

Unter den Annahmen  $c_R \gg c_S$  und  $m_i \gg m_S$  hat der Dämpfungsterm mit  $d_R$  einen geringen Einfluss auf die Lösung der Bewegungsgleichung und kann vernachlässigt werden.

Eine Simulation der Vertikaldynamik dieses Modells einer Lenkradfederung zeigt Bild 5.10. Von oben nach unten sind in schwarz die Zeitverläufe von  $z_\mu$ ,  $z_{S\mu}$ ,  $h_i$  und in grau  $F_{Zi}$  aufgetragen. Die Parameter für dieses Beispiel sind:  $m_i = 50$  kg,  $m_{Si} = 2$  kg,  $c_R = 100$  kN/m,  $c_S = 15$  kN/m,  $d_S = 500$  Ns/m,  $z_{R0} = 0.1$  m und  $z_{S0} = 0,3$  m. Der Bodenverlauf  $h_i$  ist die anregende Eingangsgröße mit einem 30 mm hohen Absatz von  $t = 2$  s bis  $t = 3$  s.

Zunächst schwingt sich das System aus dem unbelasteten Zustand auf Stationärwerte ein. Die Aufbaumasse  $m_i$  schwingt deutlich sichtbar auf der Federung während das härtere Gummirad dem Verlauf von  $h_i$  sehr eng folgt. Der Verlauf der Radlast zeigt erwartungsgemäß eine Spitze beim Auftreffen auf den Absatz. Nach  $t = 3$  s fällt  $F_{Zi}$  für kurze Zeit auf 0, was bedeutet, dass das Rad keinen Bodenkontakt hat.

Für die Ausführung der Lenkradfederung wird eine Führungsmechanik benötigt, in der es auch nicht geschwindigkeitsabhängige, konstante (coulombsche) Reibung gibt. Berücksichtigt man diesen Reibungsterm in (5.11) und (5.12), dann erhält man

$$m_S \ddot{z}_{Si} = -m_S g + c_R (z_{R0} - z_{Si} + h_i) + \text{sgn}(\dot{z}_i - \dot{z}_{Si}) F_C - c_S (z_{S0} - z_{Si} + z_i) + d_S (\dot{z}_i - \dot{z}_{Si}) \quad (5.13)$$

und

$$m_i \ddot{z}_i = -m_i g + c_S (z_{S0} - z_i + z_{Si}) - d_S (\dot{z}_i - \dot{z}_{Si}) - \text{sgn}(\dot{z}_i - \dot{z}_{Si}) F_C \quad (5.14)$$

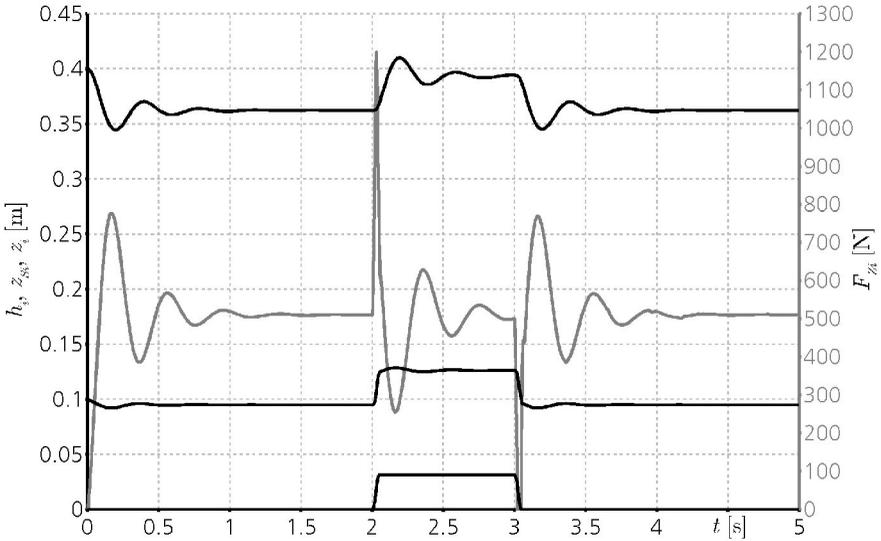


Bild 5.10: Verlauf der Vertikalbewegung (schwarz) und der Radlast (grau) des linearen Modells einer Lenkradfederung nach Gleichungen (5.13) und (5.14) mit  $F_c=0$  bei Fahrt über 30 mm hohen Absatz

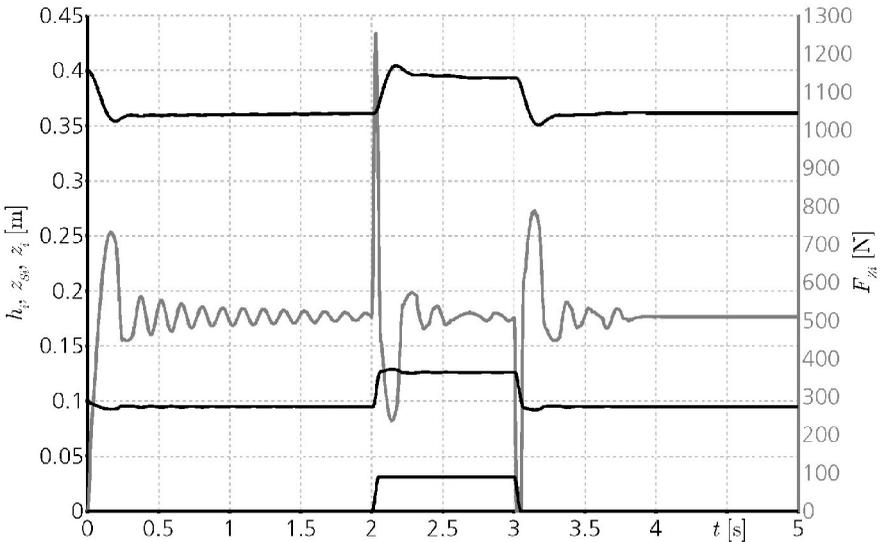


Bild 5.11: Verlauf der Vertikalbewegung (schwarz) und der Radlast (grau) des linearen Modells einer Lenkradfederung nach Gleichungen (5.13) und (5.14) mit hoher coulombscher Reibung,  $F_c=100$  N bei Fahrt über 30 mm hohen Absatz

Bild 5.11 zeigt die Simulation mit gleichen Werten wie oben und dem Reibungsterm mit  $F_c = 100 \text{ N}$ . Im Verhältnis zu den anderen Größen ist dieser Wert sehr hoch und repräsentiert eine beschädigte Führungsmechanik. Im Normalbetrieb dürfte er in der Größenordnung  $1 \text{ N}$  liegen. Die Simulation zeigt schnelleres Einschwingen wegen größerer Gesamtdämpfung, aber ein langes Nachschwingen des Rads. Dies ist in der Praxis unrealistisch und ist ein Effekt der Vereinfachung  $d_R = 0$ .

In der Kraftfahrzeugdynamik heißt das Modell einer Radaufhängung wie in Bild 5.8 Viertelfahrzeugmodell. Es fasst alle 4 Räder mit Radaufhängung zusammen und dient der vereinfachten Untersuchung der Vertikaldynamik. Wegen der anders gefederten Antriebsräder und der unterschiedlichen Radanordnung ist diese Vereinfachung jedoch nicht auf das Robotermodell übertragbar, um die Vertikaldynamik zu beschreiben. Das Viertelfahrzeugmodell kann nur für einzelne Lenkradfedern verwendet werden.

#### 5.4.2 Vertikalmodelle mit nichtlinearen Kennlinien

Außer dem Term für coulombsche Reibung sind die vorigen Modelle in ihrem Wertebereich linear. Die Vertikaldynamik kann aber mit nichtlinearen Kennlinien gezielt verbessert werden. Dazu werden hier progressive und degressive Kennlinien für die Lenkradfederung untersucht. Bild 5.12 zeigt Beispielkennlinien im Vergleich zu  $c_s = 15 \text{ kN/m}$  (hellgrau) aus vorigem Zahlenbeispiel. Die Stationärwerte für  $z_i$  und  $F_{z_i}$  sind gleich wie bei der linearen Kennlinie.

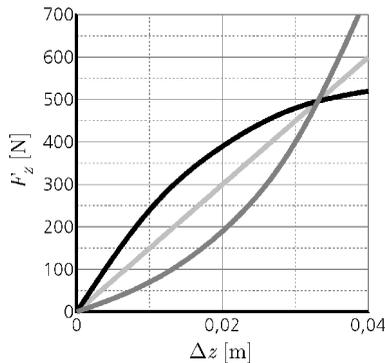


Bild 5.12: Progressive und degressive Kennlinien für die Lenkradfederung

Unter sonst gleichen Zahlenwerten und Bedingungen wie oben und mit  $F_c = 1 \text{ N}$  werden die Verläufe für die progressive (Bild 5.13) und degressive (Bild 5.14) Kennlinie simuliert.

Die progressive Federung führt zu viel ausgeprägterem Ausschlagen, weil die Feder die gleiche Gegenkraft erst bei größerer Auslenkung aufbringt. Weiterhin ist die maximale Aufbaubeschleunigung  $\ddot{z}_{i,max}$  viel größer als bei der degressiven Kennlinie. Eine degressive Lenkradfederung ist also günstig für eine ruhige Vertikaldynamik und hohen Fahrkomfort.

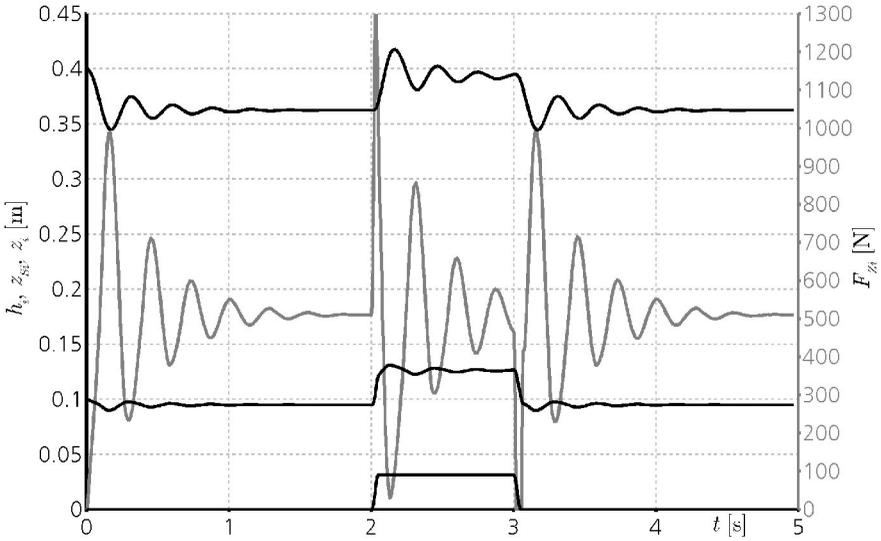


Bild 5.13: Verlauf der Vertikalbewegung (schwarz) und der Radlast (grau) des Modells einer Lenkrafedderung nach Gleichungen (5.13) und (5.14) bei Fahrt über 30 mm hohen Absatz, mit progressiver Federkennlinie aus Bild 5.12 für  $c_s$

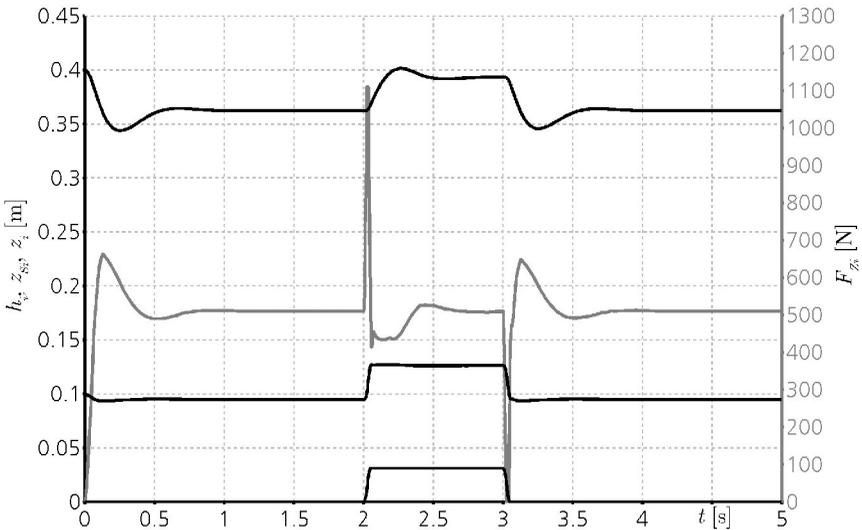


Bild 5.14: Verlauf der Vertikalbewegung (schwarz) und der Radlast (grau) des Modells einer Lenkrafedderung nach Gleichungen (5.13) und (5.14) bei Fahrt über 30 mm hohen Absatz, mit degressiver Federkennlinie aus Bild 5.12 für  $c_s$

## 5.5 Teilmodelle der Aufbaudynamik

### 5.5.1 Linearisiertes Nickmodell

Da die Lenkräder größere Bodenunebenheiten ausgleichen müssen, wird deren Federung weicher sein als die der Antriebsräder, also  $c_W > c_S$ . Dies führt dazu, dass die Längsdynamik mit Nickbewegungen ausgeprägter als die Querdynamik mit Wankbewegungen sein wird. Weiterhin wird beim Auftreffen auf Bodenunebenheiten in Fahrtrichtung vor allem die Längsdynamik ange-regt. Im ersten Schritt soll untersucht werden, inwieweit sich Nickbewegungen mit einem einfachen linearen Modell beschreiben lassen, das Bild 5.15 skizziert. Es gilt für alle Kinematikvarianten von K3. Bei K3III und K3V können die je zwei Lenkradfederungen vorne und hinten zu einer Federung zusammengefasst werden.

Folgende vereinfachende Annahmen wurden getroffen: der Roboter führt reine Nickbewegungen um eine Querachse ohne Vertikalbewegung aus, die Antriebsräder sind starr und stehen mit konstanter Radlast  $F_{ZW} = F_{Zl} + F_{Zr} = \text{const.}$  auf.  $F_{ZW}$  ist über die Geometrie einstellbar und sollte größer sein als die stationären Radlasten der Lenkrollen,  $F_{ZRA} = F_{ZlA} + F_{ZrA}$ . Die Lenkräder werden als starr angenommen und die Masse  $m_S$  wird vernachlässigt.  $z_{pm}$  bezeichnet den Abstand der Querachse in  $z_V$ -Richtung zur  $y_V$ -Achse. Er liegt zwischen dem Aufstandspunkt der Antriebsräder und der  $y_V$ -Achse und kann je nach Fahrsituation und eingepprägtem Antriebsmoment in diesem Bereich schnell variieren. Bodenunebenheiten werden mit  $h_i$  beschrieben, wobei  $h_f = -h_a$  gelten soll, damit  $F_{ZW} \approx \text{const.}$  erfüllt bleibt. Die Antriebsmomente des linken und rechten Antriebs werden zusammengefasst in  $M_W = M_r + M_l$ .  $M_W$  und  $h_i$  sind Eingangsgrößen. Die Auslenkungen seien klein, so dass der Abstand zwischen vorderem und hinterem Radaufstandspunkt als konstant  $s_S$  und  $\sin \theta = \tan \theta = \theta$  angenommen werden kann.

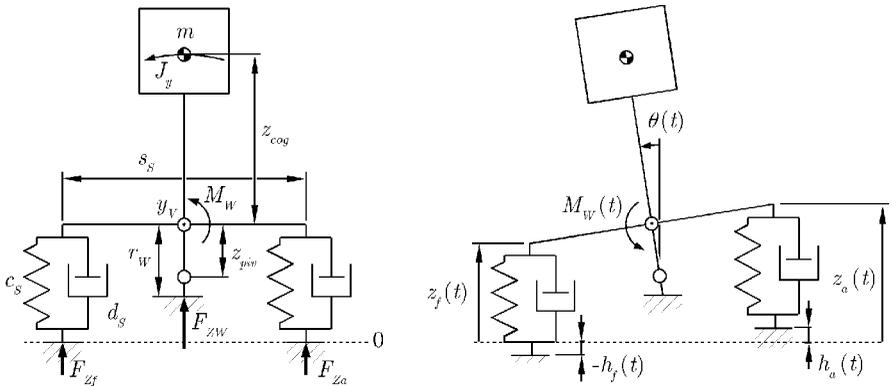


Bild 5.15: Aufbau und Größenbezeichnungen des vereinfachten linearen Nickmodells

Trotz der Vereinfachungen sollen mit diesem Modell in erster Näherung Zusammenhänge zwischen den Auslegungsparametern  $m$ ,  $F_{ZW}$ ,  $z_{cog}$ ,  $s_S$ ,  $c_S$ ,  $d_S$  und  $r_W$  beschrieben werden.

Zunächst sei  $z_{pm} = 0$ , was bei aktivem Antrieb der Normalfall ist. Die Momentbilanz ist dann

$$\begin{aligned}
 -J_y \ddot{\theta} + (mg - F_{ZW}) z_{cog} \theta - \frac{s}{2} \left( c_s (z_{s0} - z_f + h_f) + d_s (\dot{z}_f - \dot{h}_f) \right) \\
 + \frac{s}{2} \left( c_s (z_{s0} - z_a + h_a) + d_s (\dot{z}_a - \dot{h}_a) \right) + M_W = 0
 \end{aligned} \tag{5.15}$$

wobei das Trägheitsmoment des Roboters um die  $y_V$ -Achse  $J_y = z_{cog}^2 m$  ist. Der zweite Summand berücksichtigt, dass die Gewichtskraft des außermittigen Schwerpunkts bei  $\theta \neq 0$  zur Momentbildung beiträgt, allerdings vermindert um die Radaufstandskraft der Antriebsräder. Die anderen Terme modellieren die Lenkradfederung vorne und hinten wie in Abschnitt 5.4.1, wobei  $z_{sA}$  die Höhe im stationären Zustand oder Arbeitspunkt ist. Um eine Differenzialgleichung in  $\theta$  zu erhalten, lassen sich folgende Terme substituieren:

$$(z_{s0} - z_f + h_f) = \frac{s}{2} \theta, \quad (z_{s0} - z_a + h_a) = -\frac{s}{2} \theta, \quad \dot{z}_f - \dot{h}_f = -\frac{s}{2} \dot{\theta}, \quad \dot{z}_a - \dot{h}_a = \frac{s}{2} \dot{\theta}. \tag{5.16}$$

Nach Einsetzen und Neuordnung erhält man schließlich

$$z_{cog}^2 m \ddot{\theta} + \frac{s^2 d_s}{2} \dot{\theta} + \left( \frac{s^2 c_s}{2} - (mg - F_{ZW}) z_{cog} \right) \theta = M_W + \frac{s_s c_s}{2} (h_a - h_f) + \frac{s_s d_s}{2} (\dot{h}_a - \dot{h}_f), \tag{5.17}$$

wobei sich wegen  $h_f = -h_a$  die rechte Seite weiter zu  $M_W + s_s (c_s h_a + d_s \dot{h}_a)$  vereinfachen lässt.

Wenn sich die Nickdynamik mit einer linearen Differenzialgleichung 2. Ordnung beschreiben lässt, dann sollte sie so eingestellt werden, dass sie von einer Anfangsauslenkung mit leichtem Überschwingen und nach sehr wenigen Schwingungen in die Ruhelage geht. Dann lassen sich folgende Kennwerte bestimmen: Die Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung ist

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_s^2 c_s}{2 z_{cog}^2 m} - \frac{mg - F_{ZW}}{z_{cog} m}} \tag{5.18}$$

und die Kreisfrequenz und der Abklingkoeffizient der gedämpften Schwingung sind

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \quad \text{und} \quad \delta = \frac{d_s s_s^2}{4 z_{cog}^2 m}. \tag{5.19}$$

Die Lage des Polpaars ist  $-\delta \pm j\omega_d$ . Für ein Überschwingen  $\leq 5\%$  muss  $\omega_d \leq \delta$  sein. Die homogene Lösung der Bewegungsgleichung mit den Anfangsbedingungen  $\theta(0) = \theta_A$  und  $\dot{\theta}(0) = 0$  ist

$$\theta(t) = \theta_0 e^{-\delta t} \left( \cosh \omega_d t + \frac{\delta}{\omega_d} \sinh \omega_d t \right). \tag{5.20}$$

Im zweiten Fall sei  $z_{piv} = r_W$ , was der andere Extremwert von  $z_{piv}$  ist. Er tritt dann auf, wenn die Antriebe auf Drehzahl 0 geregelt werden oder blockieren, dann sind die Räder Teil des starren Aufbaus. Gleichung (5.17) ändert sich zu

$$(z_{\text{cog}} + r_W)^2 m \ddot{\theta} + \frac{s_s^2 d_s}{2} \dot{\theta} + \left( \frac{s_s^2 c_s}{2} - (mg - F_{zW}) (z_{\text{cog}} + r_W) \right) \theta = \frac{s_s c_s}{2} (h_a - h_f) + \frac{s_s d_s}{2} (\dot{h}_a - \dot{h}_f), \quad (5.21)$$

und  $\omega_0$  und  $\delta$  verringern sich auf

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_s^2 c_s}{2(z_{\text{cog}} + r_W)^2 m} - \frac{mg - F_{zW}}{(z_{\text{cog}} + r_W) m}} \quad \text{und} \quad \delta = \frac{d_s s_s^2}{4(z_{\text{cog}} + r_W)^2 m}. \quad (5.22)$$

Bei der Auslegung eines Roboterfahrwerks sind einige der Parameter in gewissen Grenzen gegeben, andere sind frei wählbar. Zur Dimensionierung können vor allem die Gleichungen (5.18) und (5.19) bzw. (5.22) herangezogen werden.

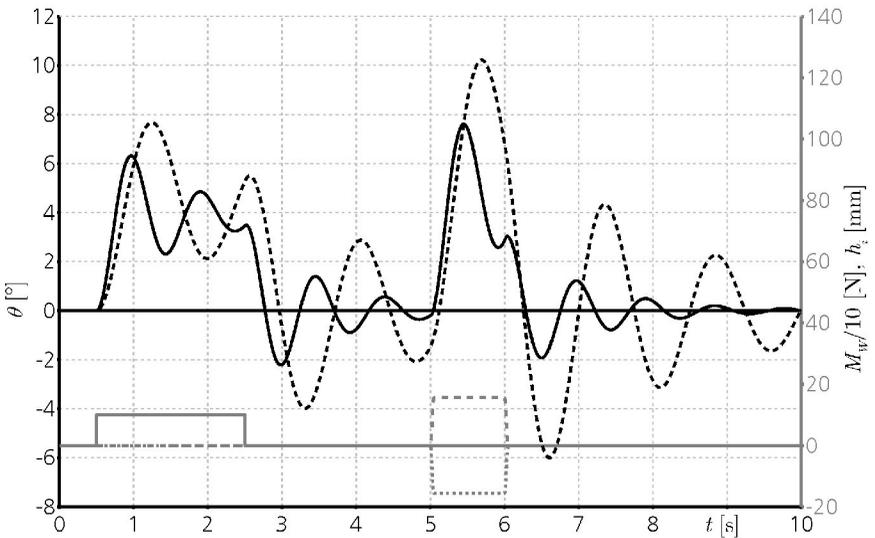


Bild 5.16: Verlauf des simulierten Nickwinkels  $\theta(t)$  des linearen Nickmodells für  $z_{\text{piv}} = 0$  (schwarz, durchgehend) und  $z_{\text{piv}} = 0,2$  m (schwarz, gestrichelt) bei Anregung durch  $M_W = 100$  Nm (grau, durchgehend) und Fahrt über 30 mm hohen Absatz (grau, gestrichelt)

Die Gleichungen (5.17) bzw. (5.21) berücksichtigen Eingangssignale, die das System anregen. Sie werden mit vergleichbaren Zahlenwerten zu den Simulationen in Abschnitt 5.4.1 simuliert, um zu untersuchen, wie sich die Nickdynamik mit schon bekannten Lenkradfedern verhält. Die Zahlenwerte sind:  $m = 200$  kg,  $F_{zW} = 981$  N (d.h. die stationäre Radlast auf einer Lenkrolle ist  $g \cdot 50$  kg),  $c_s = 15$  kN/m,  $d_s = 500$  Ns/m,  $s_s = 0,5$  m,  $z_{\text{cog}} = 0,3$  m,  $\theta_0 = 5^\circ$  und  $z_{s0} = 0,3$  m. Die Eingangsgrößen sind der Bodenverlauf mit  $h_a(t)$  und  $h_f(t) = -h_a(t)$ , die wie oben einen 30 mm hohen Absatz über 1 s beschreiben und das Antriebsmoment  $M_W(t)$ . Bild 5.16 zeigt das Ergebnis für die Anregung durch  $M_W = 100$  Nm von  $0,5 \text{ s} \leq t < 2,5 \text{ s}$  (grau, durchgehend) und durch die beschriebene Bodenunebenheit bei  $5 \text{ s} \leq t < 6 \text{ s}$  (grau, gestrichelt). Die Kurven in schwarz zei-

gen die Verläufe von  $\theta(t)$  für  $z_{piv} = 0$  (durchgehend) und  $z_{piv} = 0,2 \text{ m}$  (gestrichelt). Der Drehpunkt liegt am günstigsten bei  $z_{piv} = 0$ , denn Eigenfrequenz und Dämpfung sind größer.

Mit diesem linearisierten und vereinfachten Modell kann das „Kleinsignalverhalten“, also kleine Auslenkungen um die Ruhelage untersucht werden. Dies entspricht dem Arbeitsbereich bei relativ glattem Bodenbelag mit im Vergleich zu den Raddurchmessern sehr kleinen Unebenheiten oder bei Boden mit hohem Verdrängungsraum mit regelmäßigen Unebenheiten (Noppen, Rillen, Gitterrost). Bei größeren Unebenheiten wie Rampenansätzen und Absätzen und für die Betrachtung der Stabilitäts- und Kippgrenzen ist das linearisierte Modell im Bereich großer Auslenkung ungenau, da es keine Nichtlinearitäten in den Kennlinien und Wertebereichsgrenzen (Endanschlag) enthält.

### 5.5.2 Nickmodell mit nichtlinearen Federkennlinien

Wie die Vertikaldynamik wird hier die Längsdynamik bei progressiver und degressiver Federkennlinie untersucht. Die Größen und Bezeichnungen entsprechen Bild 5.15, wobei die Gegenkraft der Federung  $F_{si} = f(z_{sA} - z_i)$  ist. Wie oben lässt sich die Bewegungsgleichung aus der Momentbilanz aufstellen:

$$\begin{aligned} -(z_{cog} + z_{piv})^2 m \ddot{\theta} + (mg - F_{ZW})(z_{cog} + z_{piv})\theta - \frac{s}{2} \left( f(z_{s0} - z_j + h_f) + d_s(\dot{z}_j - \dot{h}_f) \right) \\ + \frac{s}{2} \left( f(z_{s0} - z_a + h_a) + d_s(\dot{z}_a - \dot{h}_a) \right) + M_W = 0 \end{aligned} \quad (5.23)$$

aufstellen. Die Argumente von  $f$  berechnen sich nach den Substitutionsgleichungen (5.16) bei gegebenem  $\theta$ . Nach Einsetzen und Umgruppieren erhält man

$$\begin{aligned} -(z_{cog} + z_{piv})^2 m \ddot{\theta} - \frac{s_s d_s}{2} \dot{\theta} + (mg - F_{ZW})(z_{cog} + z_{piv})\theta - \frac{s_s}{2} \left( f(z_{s0} - z_j + h_f) - f(z_{s0} - z_a + h_a) \right) \\ + \frac{s_s d_s}{2} (\dot{h}_a - \dot{h}_f) + M_W = 0. \end{aligned} \quad (5.24)$$

Zum Vergleich werden dieselben Kennlinien und Parameter wie in Abschnitt 5.4.2 verwendet und das Nickmodell simuliert. Die Verläufe von  $\theta(t)$  zeigen Bild 5.17 für progressive und Bild 5.18 für degressive Lenkradfederung und mit  $z_{piv} = 0$  (durchgehend) und  $z_{piv} = 0,2 \text{ m}$  (gestrichelt). Die Anregungen sind dieselben wie unter Bild 5.16 beschrieben.

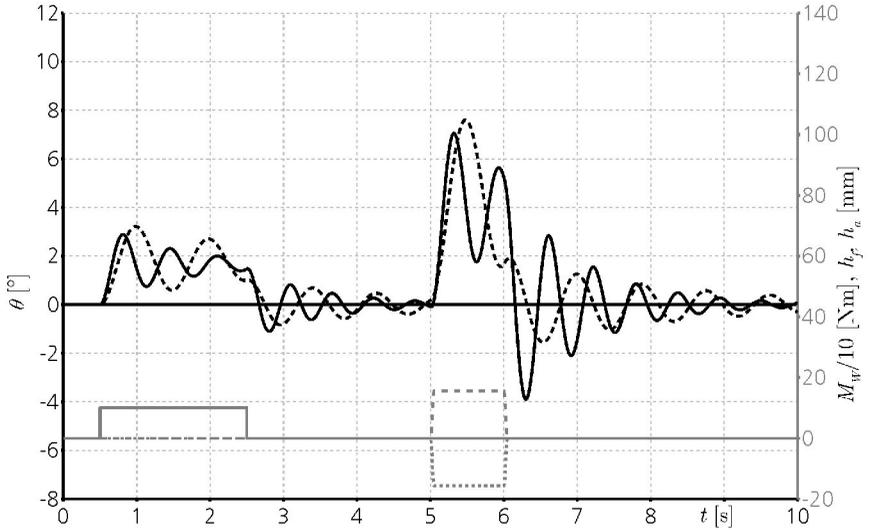


Bild 5.17: Verlauf des simulierten Nickwinkels  $\theta(t)$  des Nickmodells (schwarz) mit progressiver Federkennlinie aus Bild 5.12 für  $c_s$ ;  $z_{piv} = 0$  (durchgehend) und  $z_{piv} = 0,2$  m (gestrichelt); Anregung (grau) durch  $M_W = 100$  Nm (durchgehend) und Fahrt über 30 mm hohen Absatz (gestrichelt)

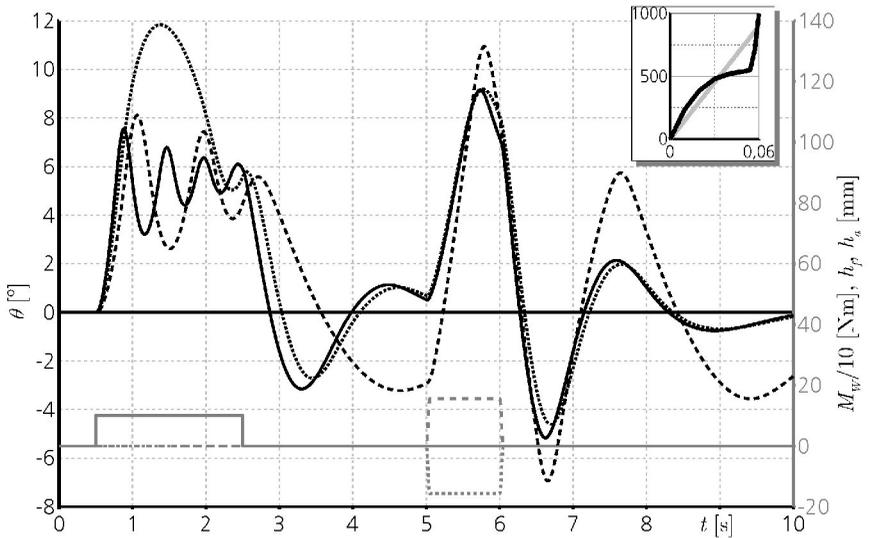


Bild 5.18: Verlauf des simulierten Nickwinkels  $\theta(t)$  (schwarz) des Nickmodells mit degenerativer Federkennlinie aus Bild 5.12 für  $c_s$  (gepunktet); Federkennlinie mit weichem Endanschlag wie in Teilbild rechts oben für  $z_{piv} = 0$  (durchgehend) und  $z_{piv} = 0,2$  m (gestrichelt); Anregung (grau) durch  $M_W$  (durchgehend) und Fahrt über 30 mm hohen Absatz (gestrichelt)

Bild 5.17 zeigt höhere Eigenfrequenz und kleinere Amplituden als die Simulation der linearen Federung in Bild 5.16, weshalb auch der Einfluss von  $z_{piv}$  geringer wird. In Bild 5.18 sind die Verläufe für 2 Federkennlinien aufgetragen, punktiert für die degressive Kennlinie aus Bild 5.12 und  $z_{piv} = 0$  und durchgezogen (für  $z_{piv} = 0$ ) und gestrichelt ( $z_{piv} = 0,2 \text{ m}$ ) für dieselbe Kennlinie, die aber ab  $\Delta z = 0,55 \text{ m}$  einen weichen Endanschlag hat wie oben rechts skizziert. In der mechanischen Ausführung wird ein Endanschlag vorhanden sein, so dass der punktierte Verlauf nicht praxisrelevant ist. Außerdem ist das Modell ohne Endanschlag für den großen  $\hat{\theta} \approx 12^\circ$  schon relativ ungenau und wird bei größeren Anregungen oder größerem  $z_{piv}$  instabil. Tatsächlich ist in der Simulation  $M_W = 80 \text{ Nm}$ , weil das Modell für  $M_W = 100 \text{ Nm}$  bereits instabil ist. Auch mit Endanschlag sind die Amplituden größer als beim linearen Modell und im Arbeitspunkt ist die Eigenfrequenz kleiner wegen der flacheren Kennlinie.

Anders als für die Vertikaldynamik sind für die Längsdynamik degressive Lenkradfederungen ungünstiger als lineare oder progressive. Mit gezieltem Kennliniendesign für die Lenkradfederung kann also die Fahrdynamik des Roboters gezielt beeinflusst werden. Eine Einschätzung, wie die Federsteifigkeit und Dämpfung mit den Größen der Massengeometrie zusammenhängen, liefert Gleichung (5.22) für lineare Federungen. Sie kann auch für nichtlineare Federkennlinien erste Einschätzungen zum dynamischen Verhalten liefern.

### 5.5.3 Nickmodell mit nichtlinearen Dämpferkennungen

Auch die Kennlinie der Dämpfung kann nichtlinear ausgelegt werden. Bei hydraulischen Dämpfern gibt es bauartbedingt leicht unterschiedliche Dämpfungskonstanten  $d$  zwischen Ziehen und Schieben. Auf unebenem Fahrbahnen lässt sich allgemein durch progressive Kennlinien die Fahrsicherheit erhöhen, weil Radlastschwankungen kleiner werden, allerdings steigen die Aufbaubeschleunigungen und der Fahrkomfort sinkt. Bei degressiven Kennungen verhält es sich umgekehrt (Mitschke 2004).

### 5.5.4 Lineares Wank- und Vertikalmodell

Für die Wankdynamik lässt sich ähnlich wie bei der Nickdynamik ein einfaches linearisiertes Modell entwickeln, denn auch hier ist im Normalbetrieb der Wankwinkel klein und kann linearisiert werden, also  $\sin\varphi = \tan\varphi = \varphi$ . Die Lenkradfederungen sind weicher und liegen näher zur Längsachse als die Antriebsräder (K3-III, V) oder auf ihr (K3-I, II, IV), daher kann ihr Einfluss auf Wankbewegungen vernachlässigt werden. Man kann weiter annehmen, dass sich – anders als beim Nickmodell – der Schwerpunkt bei kleinen Wankwinkeln unwesentlich zur Seite verschiebt. Dann ist das Wankmodell vergleichbar mit dem eines Straßenfahrzeugs und ist mit den hier verwendeten Größen in Bild 5.19 skizziert. Im Unterschied zum Nickmodell wird das Vertikalverhalten modelliert. Allerdings geht die veränderte Höhe des Schwerpunkts nicht in das Modell mit ein.

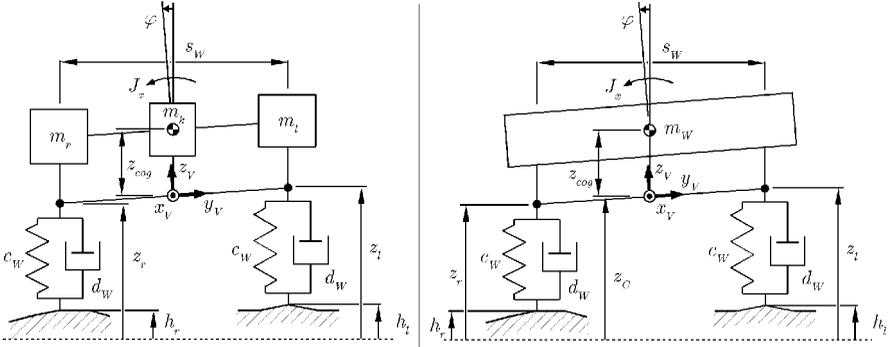


Bild 5.19: Wankmodelle mit unterschiedlichen Aufbaumassen und Kopplungsverhalten

Teilbild links ist eine Verdopplung des Rad-Teilmassenmodells aus Bild 5.6. Die Koppelmasse  $m_k$  ist eine rechnerische Größe im Gesamtschwerpunkt und ist ein Maß dafür, wie stark Anregungen der linken Seite zu Aufbaubeschleunigungen der rechten Seite führen und umgekehrt. Bei vielen Straßenfahrzeugen ist  $m_k \approx 0$  und wird in Modellen weggelassen (Kortüm 1994, Willumeit 1998, Mitschke 2004). Wenn eine Seite durch Unebenheit angeregt wird, ist der Drehpunkt des Aufbaus im Schwerpunkt der jeweils anderen Seite. Dann sind die Modellgleichungen voneinander entkoppelt und lauten wie Gleichung (5.10)

$$\begin{aligned} m_r \ddot{z}_r &= -m_r g + c_w(z_{w0} - z_r + h_r) - d_w(\dot{z}_r - \dot{h}_r) \\ m_l \ddot{z}_l &= -m_l g + c_w(z_{w0} - z_l + h_l) - d_w(\dot{z}_l - \dot{h}_l) \end{aligned} \quad (5.25)$$

Die Bedingungen für das Radabheben sind weggelassen, um die Darstellung der Gleichungen übersichtlich zu halten. Der Wankwinkel und seine Ableitungen können geometrisch mit

$$\varphi = \frac{z_l - z_r}{s_w} \quad (5.26)$$

berechnet werden.

Das Modell in Teilbild rechts geht von einer verteilten Aufbau Masse aus, so dass sich die Aufbau beschleunigungen links und rechts gegenseitig beeinflussen, was verglichen mit dem vorigen Modell die realistischere Annahme ist. Wenn man die Masse freischneidet, dann sind die Bilanzgleichungen für Kräfte und Momente

$$m_w \ddot{z}_c = -m_w g + F_r + F_l \quad \text{und} \quad J_x \ddot{\varphi} = \frac{s_w}{2} (F_l - F_r), \quad (5.27)$$

wobei

$$F_i = \begin{cases} 0 & , z_i > (z_{w0} + h_i) \\ c_w(z_{w0} - z_i + h_i) - d_w(\dot{z}_i - \dot{h}_i) & , z_i \leq (z_{w0} + h_i) \end{cases}, \quad i \in \{l, r\}. \quad (5.28)$$

Durch Substitution von  $\varphi$  mit (5.26) und  $z_G = (z_l + z_r)/2$  werden (5.27) zu Gleichungen in  $z_l$  und  $z_r$ . Durch Einsetzen und Auflösen erhält man die Bewegungsgleichungen für die Aufbaubeschleunigungen über dem linken und rechten Rad

$$\ddot{z}_r = -g + \frac{1}{m}(F_l + F_r) - \frac{s_W^2}{4J_x}(F_l - F_r) \quad \text{und} \quad \ddot{z}_l = -g + \frac{1}{m}(F_l + F_r) + \frac{s_W^2}{4J_x}(F_l - F_r) . \quad (5.29)$$

Die folgenden Verläufe zeigen Simulationsergebnisse der beiden Modellgleichungen (5.25) und (5.29) mit (5.28) bei einer Fahrt des linken Rads über einen ca. 30 mm hohen Absatz mit  $v = 2$  m/s. Das ist eine heftige, aber nach den Anforderungen mögliche Anregung der Fahrdynamik. Die Anstiegszeit des Bodenhöhenverlaufs  $h_i(t)$  ist mit diesen Zahlenwerten nach Gleichung (5.4) ca. 40 ms. Weitere Zahlenwerte sind ähnlich zu obigen Simulationen:  $m_W = 120$  kg,  $J_x = 10$  kg m<sup>2</sup>,  $c_s = 70$  kN/m,  $d_s = 800$  Ns/m und  $s_W = 0,5$  m. Der Reifendurchmesser sei 260 mm und die Subtangente entsprechend der in Bild 5.6 rechts, wodurch  $z_{W0} = 0,128$  m wird. Wird die Federkennlinie nicht linearisiert, sondern entsprechend dem progressiven Verlauf nach Bild 5.6 modelliert, dann gilt ebenfalls (5.29), wobei

$$F_i = f(\Delta z) - d_W(\dot{z}_i - \dot{h}_i) , \quad i \in \{ l, r \} \quad (5.30)$$

und  $z_{W0} = 0,13$  m.

Bild 5.20 zeigt die Zeitverläufe von  $h_i(t)$ ,  $z_l(t)$  und  $z_r(t)$  (schwarz) des linearisierten Modells ohne Koppelmasse und den Wankwinkel  $\varphi(t)$  (grau). Wie bei den Simulationen der Vertikalmodelle schwingt sich das System vom unbelasteten Zustand auf den Stationärwert ein. Der Absatz unter dem linken Rad führt nur zur Auslenkung von  $z_l(t)$ . Das linke Rad hebt zweimal kurzzeitig vom Boden ab, einmal nach der Absatzauffahrt und einmal beim Herunterfahren.

Bild 5.21 zeigt das Simulationsergebnis für das Modell mit kontinuierlicher Masseverteilung bei gleicher Anregung. An Stelle des Wankwinkels sind die Radlastverläufe abgebildet.  $z_l(t)$  ist praktisch gleich und  $z_r(t)$  wird phasenversetzt auch ausgelenkt. Die Kraftverläufe sind gegenphasig zu den Auslenkungen, wobei bei abhebendem Rad die Aufstandskraft verschwindet und nur die Schwerkraft wirkt. Der Kraftspitzenwert ist in diesem Zahlenbeispiel mit 2.300 N fast das 4-fache der statischen Last. Die Zeiten mit abhebendem Rad sind etwa gleich wie beim entkoppelten ( $m_k = 0$ ) Modell.

Bild 5.22 zeigt das Simulationsergebnis mit progressiver Federkennlinie, was den Reifen genauer beschreibt als die Linearisierung mit der Subtangente. Alle anderen Zahlenwerte sind gleich wie bei der vorigen Simulation. Bei der Absatzauffahrt ist die Gegenkraft des Reifens deutlich größer – das 6,7-fache der statischen Last in diesem Zahlenbeispiel – und entsprechend die Reaktion der Aufbaubeschleunigungen heftiger, so dass das Rad zweimal und länger als vorher den Bodenkontakt verliert. Wie oben verliert es auch beim Abfahren den Bodenkontakt. Der Spitzenwert von  $z_l(t)$  ist etwa 220 mm im Vergleich zu 178 mm in Bild 5.21.

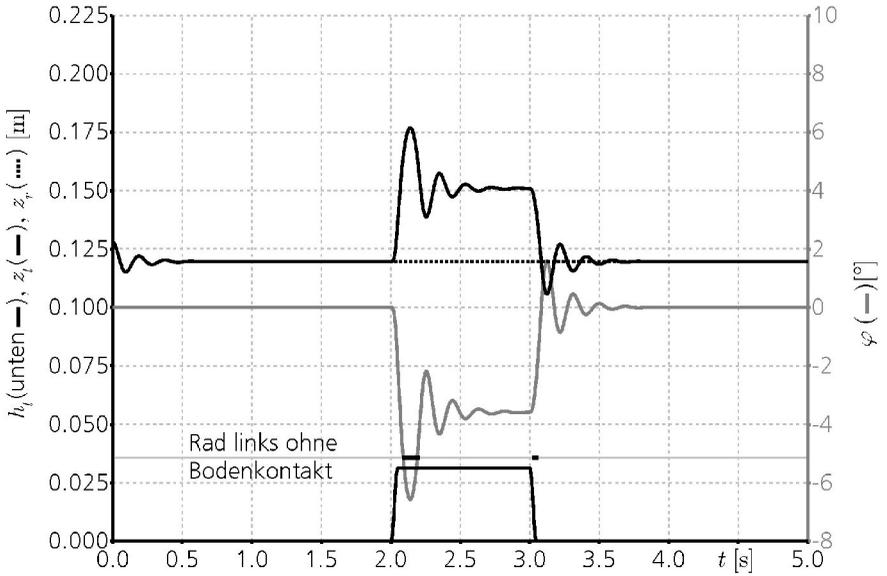


Bild 5.20: Simulierte Verläufe des Wankmodells, linearisiert und entkoppelt nach Gl. (5.25); Anregung durch 30 mm Absatzüberfahrt mit linkem Antriebsrad

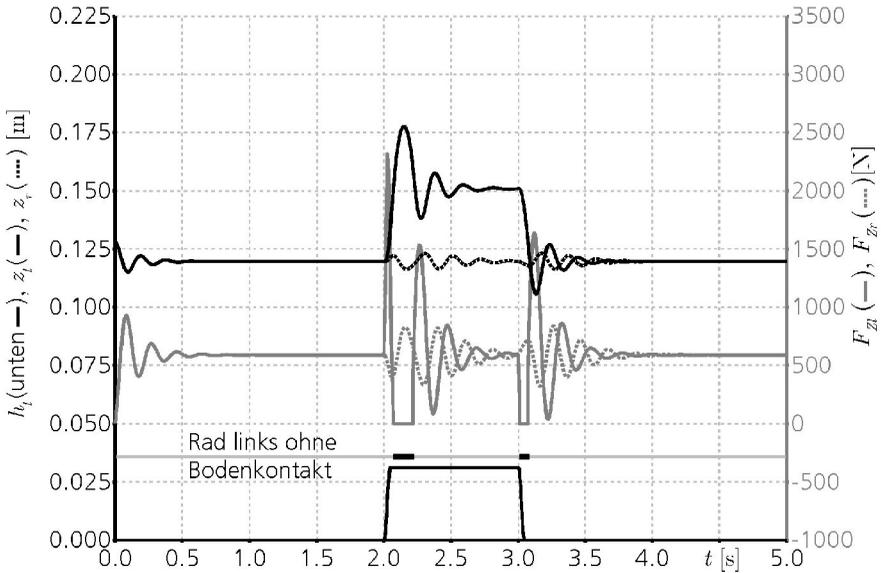


Bild 5.21: Simulierte Verläufe des Wankmodells nach Gl. (5.29) mit (5.28); Anregung durch 30 mm Absatzüberfahrt mit linkem Antriebsrad

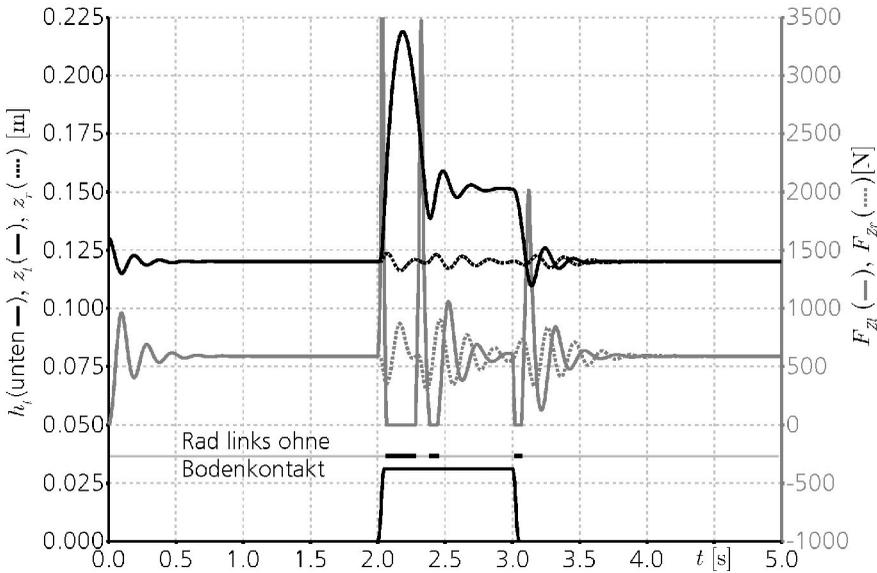


Bild 5.22: Simulierte Verläufe des Wankmodells nach Gl. (5.29) mit (5.28) und progressiver Federkennlinie des Reifens nach Bild 5.6; Anregung durch Absatzüberfahrt mit linkem Antriebsrad  
 Die Federkennlinien der Reifen in Bild 5.6 wurden statisch und bei gleichmäßigem Eindrücken auf flächigem Boden aufgenommen. Für die Simulation wurde die Kennlinie für die großen Kraftwerte von 4.000 N extrapoliert und abgeschätzt. Da bei Absatzauffahrt der Reifen nicht flächig, sondern an einer Kante eingedrückt wird, wird die reale Gegenkraft geringer sein als in Bild 5.22 simuliert und entsprechend die Auslenkung von  $z_l(t)$  geringer. Das reale Verhalten wird zwischen den beiden letzten Modellen liegen, wobei das mit progressiver Kennlinie für die Auslegung des Roboterfahrwerks als konservative Annahme verwendet werden kann.

Bei diesen Wankmodellen wurde angenommen, dass der Drehpunkt im oder nahe des Masse-schwerpunkts liegt und dass die Schwerpunktverlagerung auf eine Seite vernachlässigbar ist. In Realität dürften der Drehpunkt aber eher tiefer als  $C_v$  liegen und der Masseschwerpunkt deutlich darüber. Dadurch werden die Eigenfrequenz der Wankschwingung kleiner und die dynamischen Auslenkungen etwas größer sein als in den Simulationsergebnissen dieses Abschnitts.

Die Dämpfung wurde als Konstante von 800 Ns/m angenommen, was für Gummireifen zu hoch abgeschätzt ist. Der Grund für diesen hohen Wert liegt lediglich darin, dass die Darstellung der Zeitverläufe in obigen Bildern übersichtlicher wird. Eine kleinere Dämpfung würde nur zu längerem Ausschwingen bei minimal höherer Eigenfrequenz, aber nicht zu prinzipiell anderen Ergebnissen führen.

## 5.6 Berechnungsgrundlagen zur Auslegung der Fahrwerkskomponenten

### 5.6.1 Stabilitätsgrenzen und Kurvenfahrt

In Abschnitt 4.2.1 wurden prinzipielle Überlegungen zu Fahrstabilität und Kippgrenzen angestellt. Bild 5.23 zeigt die Fahrsituationen Rampenfahrt und Kurvenfahrt, in denen die Kippgefahr am größten ist. Auf der Rampe kann bei gleichzeitigem Einfedern die maximale Horizontalkraft für Bremsen oder Beschleunigen sehr klein werden (rechts). Bei der Kurvenfahrt (links) ändert sich die Radlast auf den Antriebsrädern um

$$\Delta F_Z = \frac{(z_{\text{cog}} + r_w) v^2}{s_w r_K g} F_G \quad (5.31)$$

und theoretisch ist die Kraft, bei der der Roboter zu kippen beginnt  $\Delta F_{Z, \text{max}} = \frac{1}{2} F_{ZW}$ . Allerdings kann die Kurvenfahrt bei Differenziallenkung schon vorher zu Instabilität neigen, denn das innere Antriebsrad muss ausreichend Aufstandskraft zum bahntreuen Lenken haben und die Drehzahlregelung des äußeren Rads muss auch unter höherer Last ausreichend genau zum bahntreuen Lenken sein.

Im Betrieb sind Kurvenfahrten mit hohen Geschwindigkeiten, bei denen Stabilitätsprobleme auftreten, steuerungstechnisch vermeidbar, denn der Roboter kann zum Richtungswechsel auch auf der Stelle drehen.

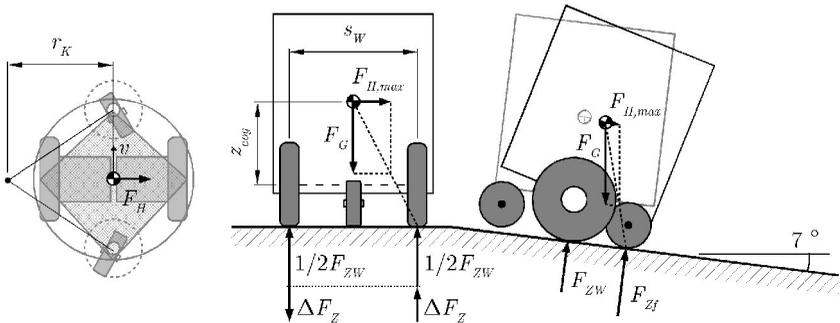


Bild 5.23: Horizontalkräfte und Kippgrenzen

### 5.6.2 Zusammenhänge bei Absatzauffahrt

Die Auffahrt auf einen Absatz aus dem Stand ist eine extreme Fahrsituation, bei der kurzzeitig das größte Antriebsmoment benötigt wird. Sie kann als Auslegungskriterium für die Fahrtriebe verwendet werden. Die benötigte Antriebskraft hängt vor allem von den Größen Masse  $m$ , Absatzhöhe  $b$ , Lenkgradradius  $r_R$ , Antriebsradradius  $r_w$  und der statischen Radlastverteilung zwischen Antriebs- und Lenkrädern nach der Gleichung

$$M_w = M_r + M_t \approx F_{xw} r_w = \frac{F_{Zi}}{r_i - b} \sqrt{2r_i b - b^2}, \quad i \in \{R, W\} \quad (5.32)$$

ab. Sie kann aus einfachen Geometrieüberlegungen hergeleitet werden. Der Index  $i$  berücksichtigt, ob ein Lenkrad oder ein Antriebsrad auffährt.  $F_{zi}$  ist die statische Radlast des auffahrenden Rades. Die Gleichung ist insofern nicht exakt, da sich beim Auffahren  $F_{zi}$  bei allen Rädern ändert und Effekte wie Rollwiderstand, Reibung, Raddeformation und Einfedern der Lenkradfederungen nicht berücksichtigt werden. Gerade die letzten beiden Effekte verringern das tatsächlich benötigte Moment. Daher ist (5.32) eher zu konservativ und daher als Auslegungsgleichung geeignet. Die Bilder 5.24 und 5.25 zeigen die Auswertung von Gleichung (5.32) passend zu den Größen aus den Anforderungen und zu Standarddurchmessern für Räder und Rollen. Damit können ähnlich wie bei einem Nomogramm Parameterkombinationen für Roboterfahrwerke durch Verbinden der Funktionswerte gefunden werden.

In den Zahlenbeispielen wiegt der Roboterassistent 220 kg und die statische Radlastverteilung zwischen Antriebs- und Lenkrädern sei 50:50. Er soll aus dem Stand über 30 mm-Absätze fahren können. Man beginnt im Diagramm rechts unten und geht zum Diagramm rechts oben, um die erforderliche Traktionskraft zu bestimmen. Über die Antriebsraddurchmesser erhält man das erforderliche Antriebsmoment links oben. Durch Variation z.B. des Raddurchmessers können andere Ergebnisse unmittelbar abgelesen werden und andere Parameterkombinationen gefunden werden. Im Beispiel von Bild 5.25 sind die Antriebsmomente für 2 unterschiedliche Raddurchmesser eingezeichnet. Aus dem Beispiel in Bild 5.24 ist  $M_{tr} = 118 \text{ Nm}$ . Beim Auffahren mit einem 160 mm Lenkrad würde man zwar nur 88 Nm benötigen, weil man aber für die Auffahrt der Antriebsräder ohnehin 118 Nm benötigt, können auch die platzsparenderen 125 mm Lenkräder gewählt werden.

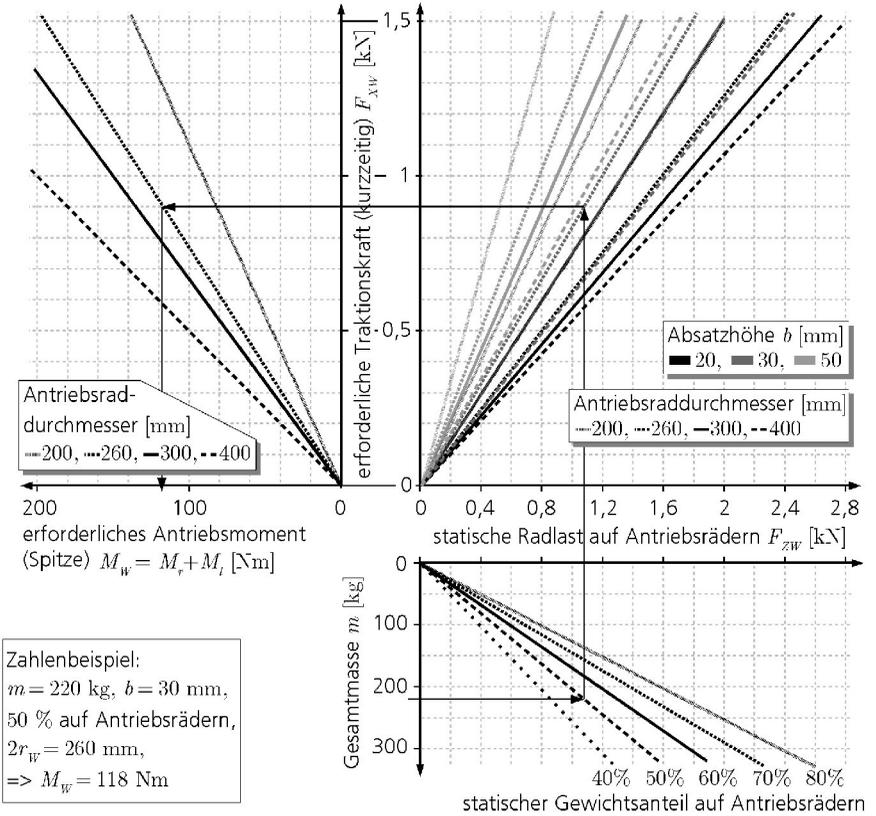


Bild 5.24: Auslegungsdigramm für Absatzauffahrt aus dem Stand, auffahrende Antriebsräder

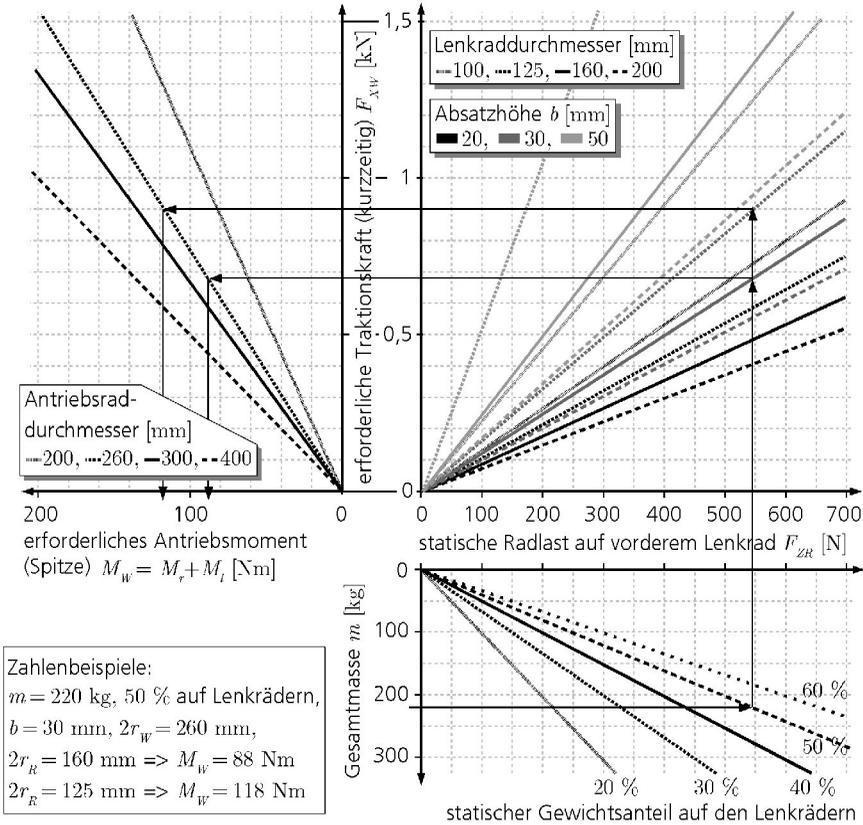


Bild 5.25: Auslegungsdiagramm für Absatzauffahrt aus dem Stand, auffahrendes Lenkrad

### 5.6.3 Berechnungsgrundlagen zur Auslegung der Fahr- und Lenkantriebe

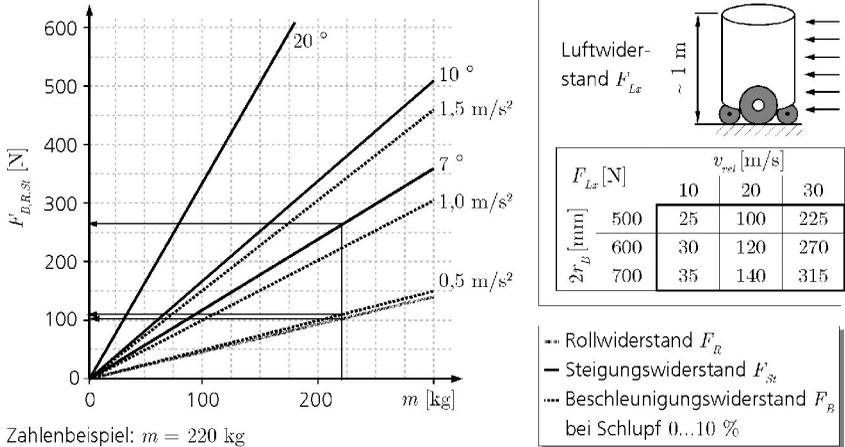
Weitere Kenngrößen der Fahrantriebe neben dem Spitzenmoment sind Dauermoment und Drehzahl. Die erforderliche Drehzahl lässt sich einfach mit

$$n = \frac{v}{2\pi r_w}, \quad [s^{-1}] \quad (5.33)$$

berechnen. Das größte Dauermoment entsteht bei Beschleunigung und gleichzeitiger Rampenauffahrt. Es gelten dieselben Beziehungen wie in der Fahrzeugtechnik, z.B. ist nach (Mitschke 2004) die erforderliche Zugkraft

$$Z = F_R + F_{Lx} + F_{St} + F_B, \quad (5.34)$$

wobei  $F_R$  der Rollwiderstand aller Räder,  $F_{Lx}$  der Luftwiderstand,  $F_{St}$  der Steigungswiderstand und  $F_B$  der Beschleunigungswiderstand sind. Auf die bisherigen Bedingungen eines mobilen Roboterassistenten angewendet lässt sich ein weiteres Auslegungsdigramm erstellen (Bild 5.26).



Zahlenbeispiel:  $m = 220$  kg

$$Z = F_R + F_B + F_{St} + F_{Lx} = 105 + 110 + 265 + 25 = 505 \text{ N}$$

Bild 5.26: Auslegungsdigramm für Zugkraft gegen Fahrwiderstände

Im Diagramm links und in der Tabelle rechts können die Fahrwiderstände abgelesen werden. Weitere konservative Annahmen darin sind: der Roboterkörper sei zylinderrförmig mit  $c_w = 0,8$ , Luftdichte  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ,  $J_w = 0,056 \text{ kg m}^2$  und Rollwiderstandsbeiwert 0,05 (entspricht Acker-schlepper/Baumaschine auf befestigtem Erd-/Feldweg; zum Vergleich: Kraftfahrzeugreifen  $\sim 0,01$  (Mitschke 2004)). Konservativ kann man annehmen, dass die Lenkräder den gleichen hohen Rollwiderstandsbeiwert wie die Antriebsräder haben, tatsächlich ist er jedoch geringer. Dafür werden Lagerreibungen nicht berücksichtigt. Das angegebene Zahlenbeispiel gilt wie oben für  $m = 220$  kg und  $2r_B = 500$  mm für den Fall, dass der Roboter an einer  $7^\circ$ -Rampe bei mittlerem Gegenwind mit  $0,5 \text{ m/s}^2$  beschleunigen soll. Die erforderliche Zugkraft ist 505 N, das erforderliche Antriebsmoment kann in Bild 5.25 oben links abgelesen werden.

Um die erforderlichen Momente für die Lenkantriebe zu bestimmen, müssen vor allem statische Radlast, Transmission und gewünschte Drehgeschwindigkeit berücksichtigt werden. Die Auslegung kann mit bekannten Methoden aus der Antriebstechnik erfolgen.

## 5.7 Ein Vorgehensmodell zur Entwicklung von Fahrwerk und Gesamtsystem

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse lässt sich die Vorgehensweise, um einen Roboterassistenten mit dynamischem Radfahrwerk zu entwickeln, in einem Vorgehensmodell schematisieren, wie in Bild 5.27 dargestellt. Es zeigt die Anforderungen, Entwicklungsschritte zu den Teilsystemen und die gegenseitigen Abhängigkeiten, um schließlich zum Ergebnis einer Realisierungsvariante eines Gesamtsystems zu kommen, welche das Anforderungsspektrum abdecken kann.

<b>1. Anforderungen</b>	A* manövr. in Referenzpassage
B* Maximalgeschw. > 2 m/s	Fahrt über Bodenebenenheiten (Bild 3.7) als Minimalanforderung; über seltene großflächige mit Maximalg.
C* anforderung: über seltene großflächige mit Maximalg.	D niedriger Gesamtschwerpkt.
E fahrdynamisch stabil	F gute Spurtreue bei Schrägladung auf Absatz
G geringe Rutschneigung auf R9-Bodenbelag	H Gewicht möglichst < 200 kg Radlast < 1,5 kN
J* Eignung für 7{K,Z,B,C,S,M}3	K* Eignung f. Ex-Schutz Zone 1
L lange Laufzeit, niedriger Energieverbrauch, Effizienz	M* Nutzlast ~ 100...120 kg
N wartungsarm, ausfallsicher	O fernsteuerbar und autonom navigierbar
R1* Latschbreite > 42 mm	R2* Rad-Ø > 100 mm, aber möglichst klein
R3* wenn Rad-Ø < ~260 mm, Rad zusätzlich gefedert	R4 Reifenhärte < 80° Shore A
R5 einfacher Radwechsel	

\* je nach Einsatzszenario genauer spezifizierbar

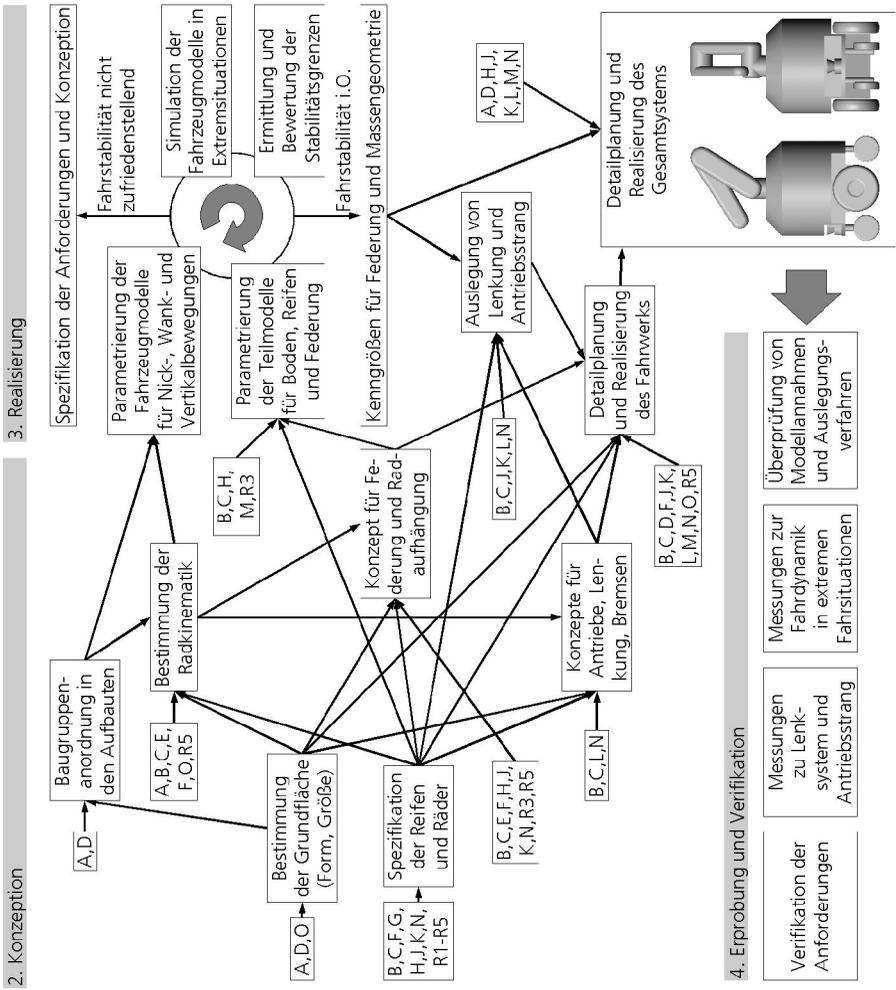


Bild 5.27: Vorgehensmodell für die Entwicklung eines passiv gefederten Radfahrwerks

Ein kritischer Entwicklungsschritt ist die Parametrierung von Teil- und Fahrzeugmodellen (rechts oben), um eine stabile Fahrdynamik zu erhalten. Die entsprechenden Modelle wurden in diesem Kapitel entwickelt. Wenn in den Berechnungen und Simulationen keine zufriedenstellende Lösung möglich ist, können gegebenenfalls Anforderungen aufgeweicht und Konzepte für Teilsysteme überarbeitet werden.

## 5.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In den Unterkapiteln 5.2 bis 5.5 wurden Modelle zu Teilsystemen, die für das dynamische Fahrverhalten relevant sind, ausgehend von existierenden Modellen aus der Dynamik von Straßenfahrzeugen beschrieben und simuliert. Speziell für die Anwendung der betrachteten mobilen Roboterassistenten konnten folgende Unterschiede aufgezeigt werden:

- Für die Beschreibung der Referenz-Bodenunebenheiten sind existierende Fahrwegsbeschreibungen ungenau bzw. nicht zutreffend. Im Unterkapitel 5.2 wurden dazu spezifische Modellannahmen getroffen und Gleichungen hergeleitet.
- Die Beschreibung mit einem Viertelfahrzeugmodell ist für den Kinematiktyp K3 (vgl. Tabelle 4.5, S. 61) nicht geeignet, da Lenkräder und Antriebsräder unterschiedliches Federverhalten haben und die Nickbewegungen groß im Vergleich zu den Wank- und Vertikalbewegungen sind.
- Die linearisierte Beschreibung der Antriebsreifen mit Subtangente liefert deutlich geringere Wankbewegungen als die realistischere Beschreibung mit progressiver Kennlinie und ist daher für die Fahrdynamikbeschreibung und -auslegung dieses Kinematiktyps eines mobilen Roboterassistenten ungeeignet.

Darüberhinaus wurden in diesem Kapitel folgende Erkenntnisse zur Fahrdynamik des betrachteten Radfahrwerks eines mobilen Roboterassistenten gewonnen:

- Obwohl degressive Federkennlinien bei reinen Vertikalbewegungen vorteilhaft sind, zeigen die Simulationen zum Nickverhalten, dass Lenkradfederungen mit progressiver Kennlinie im Vergleich zu linearen oder degressiven Kennlinien (unter sonst gleichen Bedingungen) zu den geringsten Nickbewegungen führen und für eine ruhige Fahrdynamik mit geringen Aufbaubewegungen am günstigsten sind. Trotz der nichtlinearen Federkennlinien kann zur Auslegung der Federkennlinie im Arbeitspunkt das linearisierte Modell aus Abschnitt 5.5.1 verwendet werden.
- Aus theoretischen Überlegungen wurde gefolgert, dass für den Einsatz auf Gitterrostboden ungefederte Räder nur dann verwendet werden sollten, wenn der Latsch über mehrere Gitterstäbe reicht. Sonst wären erstens ab mittleren Geschwindigkeiten wegen des Vibrationseffekts nur geringe Quer- und Umfangskräfte zwischen Rad und Boden übertragbar und zweitens können Vertikalanregungen im Bereich der Resonanzüberhöhung der Vergrößerungsfunktion (Bild 5.5 rechts) schon bei geringen Geschwindigkeiten zu schwingenden Vertikalbewegungen („Trampeln“) führen. Diese Erkenntnis unterstützt die prinzipiellen Überlegungen, die zur Auswahl der Räder und zur Notwendigkeit einer Federung in Bild 3.9 links (S. 54) gemacht wurden.

Die entwickelten Modelle für Nick-, Wank- und Vertikalbewegungen können verwendet werden, um das dynamische Verhalten eines Roboterassistenten mit der Radanordnung K3 (Tabelle 4.5, S. 61) in Extremsituationen zu simulieren und um sinnvolle Wertekombinationen aus Feder- und Dämpfeigenschaften und Massengeometrie zu bestimmen. Weiterhin werden in Unterkapitel 5.6 Zusammenhänge zwischen Gesamtgeometrie, Massengeometrie, Antriebsgrößen, Rädern, statischer Radlastverteilung und erwarteten Bodenunebenheiten hergestellt, nach denen das Fahrwerk eines mobilen Roboterassistenten ausgelegt werden kann. Eine vollständige Vorgehensweise zur Entwicklung eines Roboterassistenten mit gefedertem Radfahrwerk wird schließlich in Bild 5.27 (S. 96) illustriert.

## 5.9 Beiträge zur Modellierung einer Differenzialkinematik auf der Fahrebene

Die Fahrtriebe können wie oben gezeigt, die Fahrdynamik anregen und werden auf der anderen Seite über Fahrtriebsregler und Umrichter von der Kinematiksteuerung mit Sollwerten angesteuert. Die Modellierung und Steuerung einer Differenzialkinematik ist daher ein Thema, das an ihre Fahrdynamik angrenzt. In diesem Unterkapitel werden dazu einige Beiträge geliefert. Dies gehört zwar nicht zur unmittelbaren Zielsetzung dieser Arbeit, erweitert aber dieses angrenzende Fachgebiet um einige neue Betrachtungsweisen.

### 5.9.1 Simulation der dynamischen Bewegungsgleichungen in der Fahrebene

In diesem Abschnitt werden die Zusammenhänge zwischen Antriebsmomenten als Eingangsgrößen und Bewegung in der Ebene als Ausgangsgröße beschrieben. Für einen mobilen Roboter mit Differenzialkinematik und starrem Fahrwerk sind die kinematischen Zusammenhänge bekannt und aus geometrischen Überlegungen herleitbar. Sie sind gleichzeitig Beschreibung der  $k$  Bindungen (oder Zwangsbedingungen), dass die Antriebsräder nur rollen, nicht durchrutschen und nicht seitwärts gleiten. Die Bindungen sind nichtholonom. Man kann sie in allgemeiner Form schreiben als

$$\omega_i^j(q) \dot{q}^i = 0, \text{ mit } i=1, \dots, n, \quad j=1, \dots, k \quad (5.35)$$

und angewendet auf den mobilen Roboter mit den bisher verwendeten Bezeichnungen als

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\frac{r_w}{2} \cos \psi & -\frac{r_w}{2} \cos \psi \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{r_w}{2} \sin \psi & -\frac{r_w}{2} \sin \psi \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{r_w}{2 s_w} & \frac{r_w}{2 s_w} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{pmatrix} = \mathbf{0} . \quad (5.36)$$

Die dynamischen Gleichungen können aus der Lagrangegleichung 2. Art unter Einarbeitung der Bindungsgleichungen abgeleitet werden (Ostrowski 1998), nämlich aus

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \lambda_j \omega_j^i = \tau_i \text{ mit } L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{1}{2} J_z \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} J_W (\dot{\phi}_r^2 + \dot{\phi}_l^2), \quad (5.37)$$

mit den verallgemeinerten Kräften  $\tau_i$  und den Lagrange-Multiplikatoren  $\lambda_j$ , die durch Einsetzen der Bindungen berechnet werden können. Man erhält die bekannten dynamischen Bewegungsgleichungen (Ostrowski 1998, Murray 1997 u.a.)

$$\left( \frac{m r_W^2}{4} + \frac{J_z r_W^2}{2 s_W^2} + 2 J_W \right) \ddot{\phi}_r + \left( \frac{m r_W^2}{4} - \frac{J_z r_W^2}{2 s_W^2} \right) \ddot{\phi}_l = -M_r, \quad (5.38)$$

und

$$\left( \frac{m r_W^2}{4} - \frac{J_z r_W^2}{2 s_W^2} \right) \ddot{\phi}_r + \left( \frac{m r_W^2}{4} + \frac{J_z r_W^2}{2 s_W^2} + 2 J_W \right) \ddot{\phi}_l = -M_l, \quad (5.39)$$

wobei auf der rechten Seite die Antriebsmomente stehen. Diese Bewegungsgleichungen gehen davon aus, dass der Schwerpunkt auf der  $z_V$ - Achse liegt, und sie berücksichtigen keine Verluste durch Reibung, Rollwiderstand, Kurvenwiderstand und andere Verlustgrößen.

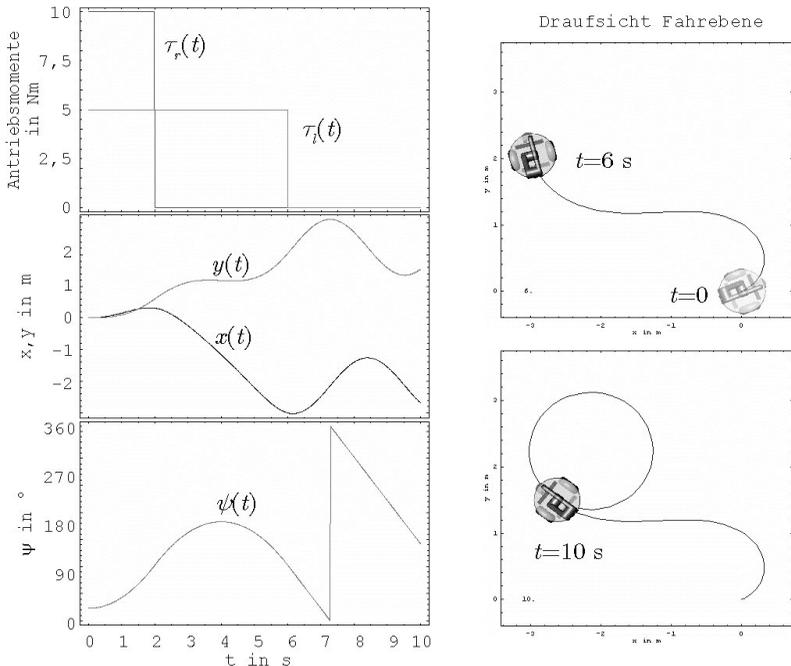


Bild 5.28: Simulation: Signalverläufe (links) und Roboterbahn in der Ebene (rechts)

Zur Verifikation der Gleichungen wurden sie mit folgenden Zahlenwerten simuliert:  $m = 250 \text{ kg}$ ,  $J_z = 13,2 \text{ kg m}^2$  (Vollzylinder mit homogener Masseverteilung und  $r_B = 0,325 \text{ m}$ ),  $r_W = 0,15 \text{ m}$ ,  $s_w = 0,64 \text{ m}$  und  $J_W = 0,056 \text{ kg m}^2$ .

Bild 5.28 zeigt das Ergebnis eines Simulationslaufs mit zwei beliebig gewählten Verläufen der Antriebsdrehmomente  $M_1$  und  $M_2$  als Eingangsgrößen. Links sind die Signalverläufe und rechts die Bahn auf der Ebene dargestellt. Ab  $t = 6 \text{ s}$  werden die Antriebsmomente auf 0 gesetzt und der Roboter fährt wegen der Bindungen endlos im Kreis. Dies ist nicht zu verwechseln mit dem Fall, dass die Antriebe in den Leerlauf geschaltet werden. Dann würde nämlich die Trägheit des Roboters die Antriebsmomente so beeinflussen, dass er nach kurzer Zeit auf einer Geraden weiterrollt. Dies berücksichtigen die Gleichungen (5.38) und (5.39) allerdings nicht, weshalb sie nur eingeschränkt dafür geeignet sind, das physikalische Verhalten zu modellieren und darauf aufbauend Steuerungsalgorithmen zu entwickeln. Dieser Hinweis fehlt in der entsprechenden Fachliteratur.

### 5.9.2 Darstellungen des Konfigurationsraums einer Differenzialkinematik

In der Fachliteratur zur Steuerungstheorie mechanischer Systeme (Murray 1994, Montforte 2001, Bloch 2003) wird der Konfigurationsraum  $Q$  eines mobilen Roboters mit Differenzialkinematik

$$Q = SE(2) \times S^1 \times S^1 \tag{5.40}$$

als Faserbündel beschrieben. Diese Art der Beschreibung ist Teil eines universellen theoretischen Überbaus zur steuerungstechnischen Modellierung mechanischer Systeme, jedoch gibt es bisher fast keine anschaulichen Darstellungen dieses Konzepts. In diesem Abschnitt wird versucht, wie auch in (Ebetiuc 2006), Konfigurationsraum und Faserbündelstruktur auf bildlichem Weg zu beschreiben.

In Gleichung (5.40) ist  $S^1$  ein Unterraum, der von einem Antriebsradwinkel  $\phi$  aufgespannt wird. Bild 5.29 illustriert Konfigurationsräume einiger einfacher Mechaniken sowie für den mobilen Roboter den Unterraum  $M = S^1 \times S^1$  der Antriebsradwinkel als Steuervariablen (auch 'Gestaltvariablen'), der auch Basis heißt. Die Markierungen auf den Konfigurationsräumen entsprechen den jeweils abgebildeten Stellungen der Mechanik.

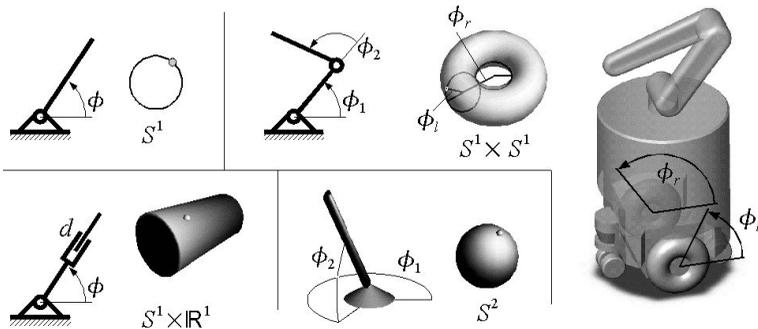


Bild 5.29: Konfigurationsmannigfaltigkeiten einfacher mechanischer Systeme

Der Unterraum  $G=SE(2)$  ist die Faser und bezeichnet eine spezielle euklidische Gruppe, die Positionen und Orientierungen (die Lage) in einer Ebene beschreibt. Er sieht lokal aus wie der euklidische Raum  $\mathbb{R}^3$ , ist aber eine Struktur in  $\mathbb{R}^4$ . Er ist sozusagen eine 'unendlich lange Röhre mit unendlicher Wandstärke'. Bild 5.30 (rechts) illustriert das Aussehen von  $SE(2)$  und beispielhaft 2 Lagen des Roboters in der Ebene, nämlich  $g_0$  im Ursprung des Inertialsystems und eine weitere Lage  $g_1$ . Entsprechend sind  $g_0$  und  $g_1$  rechts in  $SE(2)$  eingetragen.

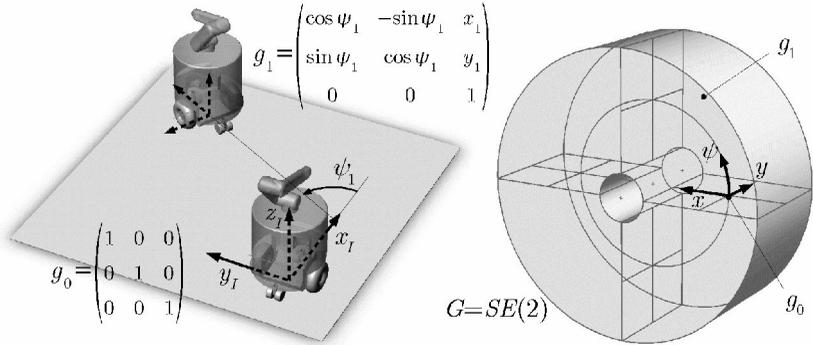


Bild 5.30: Lagebeschreibung des Roboters mit  $SE(2)$

Jedes Baselement aus  $M=S^1 \times S^1$  wird orthogonal von einer Faser  $G=SE(2)$  durchzogen. Alle Fasern und die Basis beschreiben  $Q$  als Faserbündel, was lokal 5-dimensional und global eine 7-dimensionale Struktur ist. Bild 5.31 links versucht eine Illustration dieser Struktur.

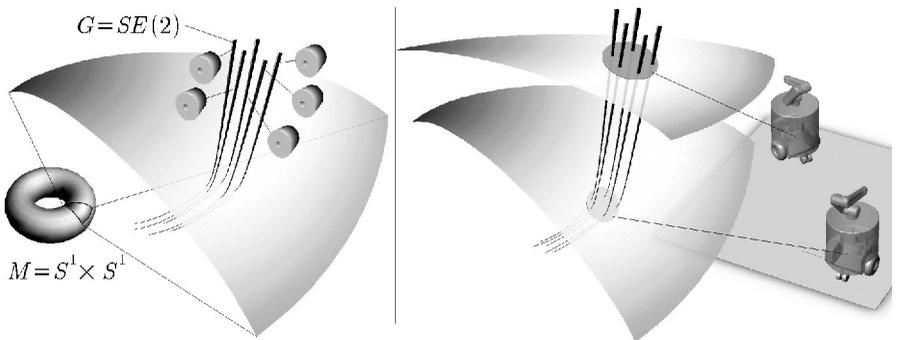


Bild 5.31: Konfigurationsraum des mobilen Roboters als Faserbündel (links) und Illustration verschiedener Lagen auf der Ebene (rechts)

Jede schwarze Faser ist ein  $SE(2)$  wie in Bild 5.30. Zur besseren Darstellung sind nur einige Fasern eingezeichnet, tatsächlich wird jeder Punkt der Torusfläche von einer Faser durchzogen. Bild 5.31 rechts zeigt, wie verschiedene Lagen des Roboters im Faserbündel repräsentiert werden. Wie in Bild 5.30 sind 2 Lagen eingezeichnet, die 2 verschiedenen 'Höhen' in den Fasern entsprechen.

chen. Sie werden mit den grauen gekrümmten Kreisflächen angedeutet. Tatsächlich repräsentieren diese Kreisflächen wiederum die vollständigen Torusoberflächen von  $S^1 \times S^1$ .

Eine interessante Frage ist, welchen Einfluss die Bindungen (5.36) auf die „Beweglichkeit“ von  $g$  in  $SE(2)$  haben. Das kann mit folgenden Überlegungen beantwortet werden: Bei  $\psi = 0$  und  $\psi = \pi$  bewegt sich der Roboter nur parallel zu  $x_i$  und bei  $\psi = \pi/2$  und  $\psi = 3\pi/2$  nur parallel zu  $y_i$ . Schneidet man diese Bewegungsrichtungen aus  $SE(2)$  heraus, dann erhält man parallele sich nicht schneidende, verdrehte und in sich geschlossene Bänder. Sie repräsentieren die (infinitesimal kurze) Geradeausfahrt des Roboters bei beliebigem, festem  $\psi$ .

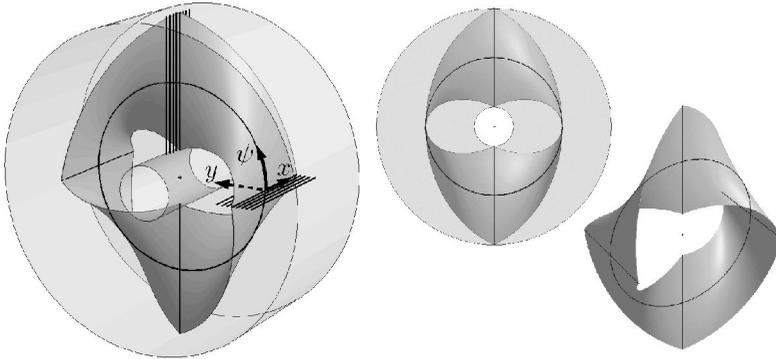


Bild 5.32: Zwangsbedingter  $SE(2)$  mit verdrehten, parallelen Bändern

Bild 5.32 zeigt eines der Bänder, wie es innerhalb von  $SE(2)$  liegt (perspektivisch und frontal), sowie angedeutet einige parallele Schnittlinien benachbarter Bänder bei  $\psi=0$  und  $\psi=\pi/2$ . Durch Kurvenfahrten kann der Roboter zwischen den Bändern wechseln. Je kleiner der Kurvenradius, desto schneller verläuft der Bandwechsel. Bei Kurvenradius 0, also beim Drehen um die eigene Achse, bleiben  $x$  und  $y$  fest und  $g$  bewegt sich mit dem sich ändernden  $\psi$  auf einer Kreisbahn durch  $SE(2)$ . Diese Bänderstruktur innerhalb von  $SE(2)$  gilt nicht nur für den mobilen Roboter, sondern für alle in der Ebene mobilen mechanischen Systeme, deren Bindungen keine Seitwärtsbewegung erlauben, wie viele Arten von Radfahrzeugen und Systeme mit Kufen.

### 5.9.3 Darstellung des Tangentialraums

Bewegungen werden mit Geschwindigkeitsvektoren an  $q \in Q$  beschrieben, die Elemente des Tangentialraums  $T_q Q$  sind. Der Sinn des Konzepts des Tangentialraums ist, Ableitungen aus der reellen Analysis auf Konfigurationsräume übertragbar zu machen. Die Menge aller  $T_q Q$  für jedes  $q \in Q$  heißt Tangentialbündel  $TQ = \cup_{q \in Q} T_q Q$ . Die Elemente von  $TQ$  sind alle Vektoren  $(q, \dot{q})$ , dementsprechend ist  $\dim(TQ) = 2n$ .  $TQ$  hat auch eine Bündelstruktur: die Basis ist  $Q$  und die Fasern sind alle  $T_q Q$ . Bild 5.33 illustriert  $TQ$  für das Teilsystem Antriebsrad. Es ist bildlich gesprochen ein unendlich langes, dünnes Rohr ( $S^1 \times \mathbb{R}^1$ ). Wenn das Rad mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega_1$  rotiert, bewegt sich  $(q, \dot{q})$  auf konstanter 'Höhe'  $\dot{q} = \omega_1$  über der Basis  $S^1$ .

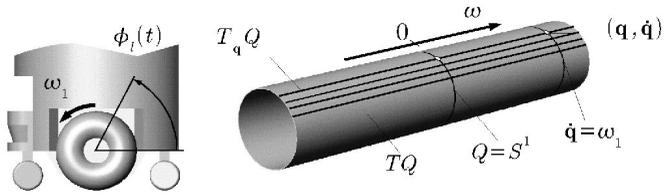


Bild 5.33: Tangentialbündel für das linke Antriebsrad

Diese bildlichen Darstellungen der Konfigurationsräume können für Leser mit ingenieurwissenschaftlichem Hintergrund den Einstieg in das theorieelastige und mathematisch anspruchsvolle Fachgebiet der Modellierung und Steuerungstheorie mechanischer Systeme mit differenzialgeometrischen Methoden erleichtern. Diese Methoden sind nicht auf diese Kinematik eines mobilen Roboters beschränkt, der wie oben erwähnt, mit einem direkten geometrischen Ansatz kinematisch sehr einfach modelliert werden kann, sondern sie sind auf viele auch komplexe mobile mechanische Systeme anwendbar. Besonders interessant sind solche Systeme, die sich auf anderem Weg nur sehr schwer modellieren lassen, weil sie durch Gestaltänderungen Fortbewegung erzeugen, z.B. schlangenartig kriechende und andere biomimetische Bewegungsapparate.

## 6 Realisierung und Erprobung einer Gesamtsystemvariante und Verifikation der Berechnungsgrundlagen und Modelle

### 6.1 Aufbau und Eigenschaften eines Prototypen

#### 6.1.1 Aufbau und Beschreibung

Die in dieser Arbeit entwickelten Konzepte, Modelle und Berechnungsgrundlagen wurden in einem Prototypen eines mobilen Roboterassistenten für die Inspektion prozesstechnischer Anlagen umgesetzt. Bild 6.1 zeigt den Aufbau des Prototyps von der Seite mit Bezeichnung einiger wichtiger Komponenten und von unten im Größenvergleich zur Referenzpassage mit 800 mm und einer gehenden Person nach EN 547.

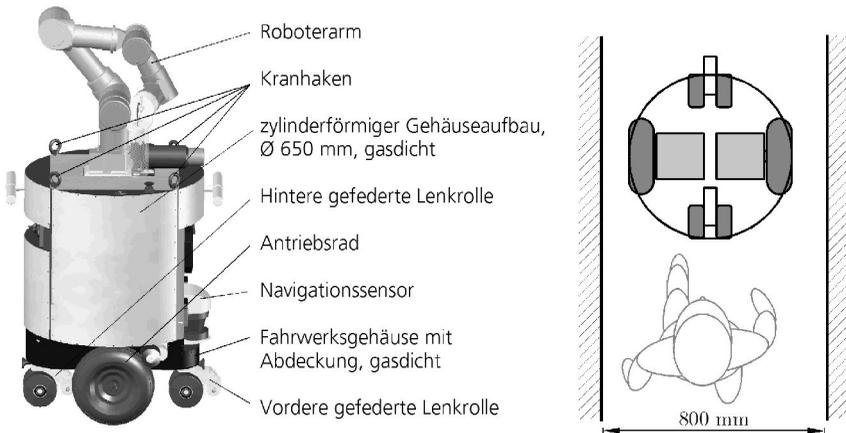


Bild 6.1: Aufbau und Grundfläche eines Prototyps

Die Einsatzumgebung des Roboters ist vergleichbar mit dem Beispiel einer Erzverarbeitungsanlage aus Abschnitt 3.2.1, nur mit geringerer Belastung durch mechanisch aktive Stoffe (7S1 statt 7S3) und Lufttemperaturen  $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Der Prototyp wurde gemäß dem Konzept aus Unterkapitel 4.3 realisiert. Er ist explosionsgeschützt und alle elektrischen Betriebsmittel mit Ausnahme einiger explosionsgeschützter Bedienelemente sitzen innerhalb eines überdruckgekapselten Gehäuses, das gleichzeitig vor rauen Umgebungseinflüssen schützt, oder sie sind an das Spülsystem angeschlossen. Im Gehäuse sitzen Trockenpatronen, die die relative Feuchte im Inneren unter 40 % halten. Das Gehäuse ist zylinderförmig mit 650 mm Durchmesser, alle Gehäuseteile und Dichtungen erfüllen (EN 1755) zum Explosionsschutz und sind für die Bedingungen der Einsatzumgebung geeignet, d.h. insbesondere korrosionsbeständig, UV-beständig, beständig gegenüber vielen aggressiven Medien und stoß- und schlagfest. Nur die Reifen sind aus Gummi (NR) und gegenüber einigen selten auftretenden Medien bedingt oder nicht beständig. Gehäuse und Baugruppen sind so entwickelt, ausgewählt und angeordnet, dass der Schwerpunkt möglichst nied-

rig und auf der  $z_V$ -Achse liegt. Die Radanordnung ist K3IV nach Tabelle 4.5. Die Fahrtriebe sind getriebelose Direktantriebe und die Lenkachsen sind mit überkreuzenden Seilen gekoppelt (vgl. Tabelle 4.9) und über ein Getriebe durch einen Servomotor angetrieben. Die Antriebsräder haben ballige, ausgeschäumte Luftbereifung mit den Abmessungen 300 x 100. Sie sitzen direkt auf der Motorwelle, die aus dem überdruckgekapselten Gehäuse herausführt. Die Lenkrollen haben Doppelräder mit den Einzelabmessungen 125 x 50. Sie sind an einem gezogenen Längslenker aufgehängt (vgl. Tabelle 3.10), der über ein Gummielement als Primärfeder abgestützt ist. Die Bemessungsdrehzahl der Fahrtriebe entspricht einer Fahrgeschwindigkeit von 5,6 m/s (20 km/h). Weder Lenkräder noch Antriebsräder erfüllen bei diesem Prototypen die Anforderungen zum Oberflächenwiderstand nach (EN 1755). Aus Kostengründen wurden Standardausführungen eingesetzt und ein leitfähiger Kontakt zum Untergrund über elastische Schleifbänder hergestellt. Prinzipiell können jedoch antistatische Gummimischungen mit denselben elastischen Eigenschaften durch weitere Rußeinlagerung hergestellt werden.

### 6.1.2 Bestimmung der Massen, Trägheitseigenschaften und statischen Radlasten

Massen und Trägheitseigenschaften können gemessen bzw. unter vereinfachten Annahmen berechnet werden. Tabelle 6.1 listet die Masseneigenschaften des Prototypen mit Ermittlungsmethode und geschätztem Fehler auf. Danach ist unter anderem das Radlastverhältnis 63,3 % auf den Antriebsrädern zu 36,7 % auf den Lenkrollen.

Beschreibung	Ermittlung	Bezeichnung	Wert	geschätzt. Fehler
Gesamtmasse des Prototypen	gemessen, Kranwaage	$m$ [kg]	262	1 %
Höhe Schwerpunkt über Radachse	gemessen, Kippversuch	$z_{\text{cog}}$ [m]	0,23	15 %
Trägheitsmoment um $x_V$ -Achse	berechnet über Ersatzkörper Zylinder, Masse $m$ , $O \times H$ : 650 mm x 2 ( $z_{\text{cog}} + r_W$ )	$J_x$ [kg m <sup>2</sup> ]	31,5	20 %
Trägheitsmoment um $y_V$ -Achse		$J_y$ [kg m <sup>2</sup> ]	31,5	20 %
Trägheitsmoment um $z_V$ -Achse	berechnet, Zylinder, Masse $m$ , $O$ 650 mm	$J_z$ [kg m <sup>2</sup> ]	13,8	5 %
Masse eines Antriebsrads	gemessen	$m_W$ [kg]	6,0	10 %
Trägheitsmoment um Radachse	berechnet über Ersatzkörper	$J_W$ [kg m <sup>2</sup> ]	0,072	5 %
Radlast auf einem Antriebsrad	gemessen, Personenwaagen	$F_{Z,r}$ [N]	804	5 %
Radlast auf einer Lenkrolle		$F_{Z,l}$ [N]	480	5 %

Tabelle 6.1: Masseneigenschaften und statische Radlasten des Prototypen

### 6.1.3 Erfüllbarkeit der Anforderungen

Mit dem mechanischen Design sowie der Auswahl und Dimensionierung der Fahrwerkskomponenten nach den Erkenntnissen aus Kapitel 5 wurden die meisten der Anforderungen an eine Gesamtsystemvariante aus Unterkapitel 3.6 erfüllt. Tabelle 6.2 gibt eine detaillierte Auflistung.

Anforderung		Entsprechende Eigenschaften des Prototypen oder Maßnahmen bei der Konzeption und Realisierung
A	manövrierbar (Umkehren möglich) in Referenzpassage 600 oder 800 (Bild 3.6)	kreisförmige Grundfläche und eine Radanordnung, die Drehen um den Mittelpunkt erlaubt
B	Maximalgeschwindigkeit $\geq 2 \text{ m/s}$	mit Fahrantrieben möglich
C	Fahrt über alle Bodenunebenheitsreferenzen (Bild 3.7)	Mechanisch robuste Ausführung der Radaufhängung, ausreichende Antriebsmomente; Messungen und Verifikation s.u.
D	niedriger Schwerpunkt	Auswahl eher schwerer Fahrwerkskomponenten, Leichtbauarm
E	Fahrdynamisch stabil, kein Radabheben, kein Schleudern, kein Umkippen	Auswahl und Auslegung nach den Ergebnissen von Kapitel 5; Messungen der Lenkradfedern und der Fahrdynamik im Stand und in extremen Fahrsituationen (inkl. Schrägfahrt über Referenzabsatz) s.u.
F	gute Spurtreue auch bei Schrägfahrt über Referenzabsatz	
G	geringe Rutschneigung auf R9-Bodenbelag (Abschnitt 3.2.10)	weiche Antriebsreifen mit großem Latsch, unterschiedliche Profilierung (Stollen, Rillen) je nach Bodenbelag
H	statische Radlast $\leq 1,5 \text{ kN}$ , Gesamtgewicht möglichst $\leq 200 \text{ kg}$ (Tabelle 3.9)	Radlastverteilung auf 4 Räder, Gesamtgewicht jedoch höher
J	prinzipielle Eignung für Umweltbedingungen 7{K,Z,B,C,S,M}3 oder höher	siehe Beschreibung in Abschnitt 6.1.1 (erfüllt) explosionsgeschützt mit Schutzart Ex p (überdruckgekapselt), keine heißen Oberflächen
K	prinzipielle Eignung für Explosionsschutz	
L	lange Laufzeit, niedriger Energieverbrauch	Fahrertriebe getriebelos; keine energiebetätigte Feststellbremse
M	Nutzlast der Plattform $\geq 100 \dots 120 \text{ kg}$	Aufbauten ohne Batterien $\sim 100 \text{ kg}$ , Zuladung $\sim 30 \text{ kg}$ möglich bei Reduktion der Fahrgeschwindigkeit
N	wartungsarm, ausfallsicher, robust	im Dauerbetrieb Austausch der Räder alle 6-12 Monate nötig, sonst wartungsfrei
O	fernsteuerbar und autonom navigierbar (Abschnitt 2.2.2)	auch fernsteuerbar in Engstellen wegen Kreisform und Drehen um Mittelpunkt, Laserscanner als Navigationssensor

Tabelle 6.2: Erfüllbarkeit der Anforderungen durch den Prototypen

## 6.2 Eigenschaften der Fahrwerksbaugruppen

### 6.2.1 Federeigenschaften der Antriebsräder

Die Federkennlinien für verschiedene Antriebsräder und Bodenarten wurden in Bild 5.6 für einen ausgeschäumten Reifen mit  $260 \times 85$  gemessen und abgeschätzt. Im Prototypen werden ballige Reifen gleicher Bauart und  $300 \times 100$  verwendet, von denen man dieselben Kennlinien annehmen kann. Für die statische Radlast sind in Bild 6.2 die Eindrücktiefen im Arbeitspunkt, die Subtangente und die statischen Reifenhalmesser anhand der Kennlinien hergeleitet und aufgelistet.

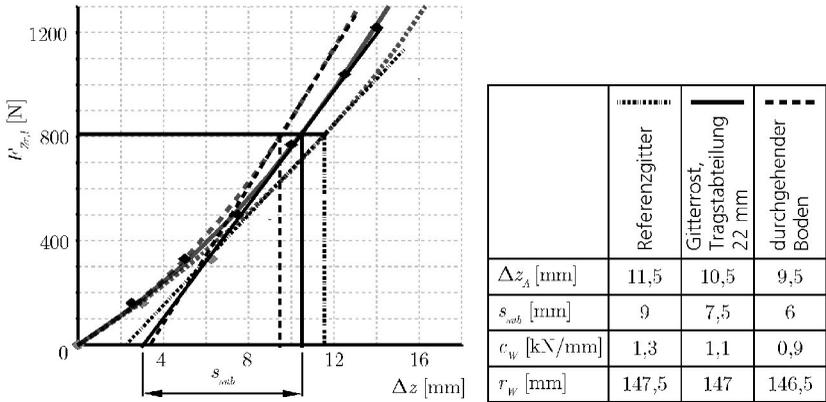


Bild 6.2: Eindrücktiefen im Arbeitspunkt, Subtangente, Federhärte und statische Reifenhalfmesser des Antriebsrads auf verschiedenen Böden

### 6.2.2 Eigenschaften der Lenkrafederung

Die Lenkrafederung wird durch Federhärten, Federkennlinien, Dämpfung, Geometrie und Federweg charakterisiert. Im Folgenden werden diese Eigenschaften an der Lenkrafederung des Prototypen bestimmt.

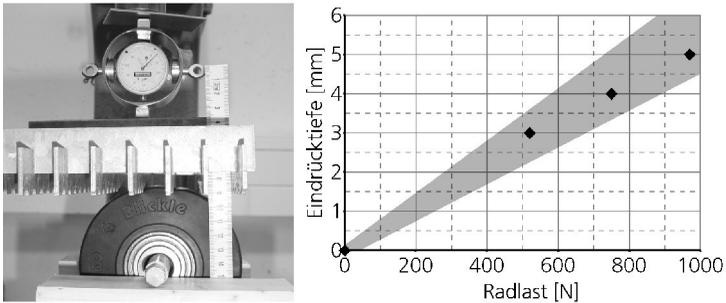


Bild 6.3: Eindrückverhalten eines Lenkrads in einen Gitterrost

Ein Gummirad wird auf einem Gitterrost belastet, um Verformung und Federkennlinie zu messen. Bild 6.3 zeigt den Messaufbau mit einem Ringkraftmesser und Messwerte. Die Messwerte sind davon abhängig, wie viele Gitterstäbe sich gerade in den Reifen eindrücken. Diese Unsicherheit wird mit dem grau hinterlegten Bereich angedeutet. Die wirksame Federhärte einer Doppelrolle ist im Mittel  $c_R \approx 2 \cdot 180 \cdot 10^3 \text{ N/m} = 360 \text{ kN/m}$ . Auf durchgehendem Boden wird der Reifen flächig eingedrückt und die wirksame Federhärte ist größer (etwa  $c_R = 500 \text{ kN/m}$ ), so dass die Kennlinie etwa unterhalb des grauen Bereichs verläuft. Die Eindrücktiefe einer Doppelrolle bei der in Tabelle 6.1 gemessenen statischen Radlast liegt je nach Boden zwischen 1 mm und 1,7 mm.

Die Längslenker der Lenkradfederung sind in der Drehachse mit Gleitlagern und Anlaufscheiben gelagert. Die Primärfeder ist eine auf Metall aufvulkanisierte Parabel-Feder mit 55 ° Shore A, die im Temperaturbereich 0...50 °C annähernd gleich bleibende Feder- und Dämpfeigenschaften hat.

Bild 6.2 zeigt die gemessenen Einfederkennlinien für zwei verschiedene Einbaulagen der Parabelfeder (schwarze und graue Kennlinie) und den zugehörigen Versuchsaufbau. Die Federn wurden im Versuch etwas über die Maximallast laut Datenblatt belastet. Auch im Betrieb können dynamische Lastsituationen kurzzeitig zu Überlastung führen. Allgemein wird Gummi bei permanenter Überlastung zunehmend viskoelastisch und im Bereich der Vulkanisationsfläche auf Metall treten sehr große Spannungen auf, die zu Rissbildung führen können (Fleiss 2006). Andererseits ist zu erwarten, dass der Überlastungsfall nur kurzzeitig und in seltenen extremen Fahrsituationen auftritt. Auch bei leichten Beschädigungen und bleibender Verformung behält das Gummielement federnde und dämpfende Eigenschaften.

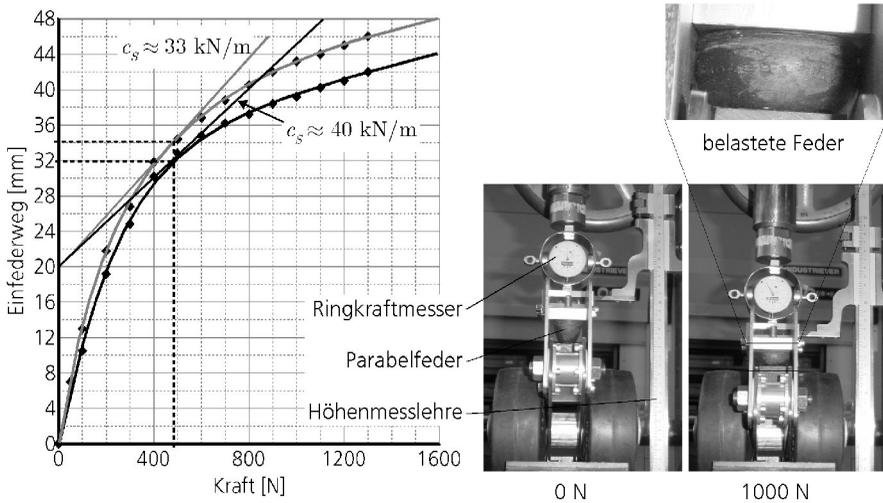


Bild 6.4: Kennlinienmessungen an einer Lenkradfederung des Prototypen

Im Diagramm sind in den Arbeitspunkten die linearisierten Federkennlinien mit Federhärte eingetragen, allerdings zeigt der Vergleich mit den tatsächlichen Kennlinien, dass sie für diese Ausführung der Lenkradfederung eine sehr ungenaue Näherung sind.

Die gemessenen Kennlinien zeigen, dass der nutzbare Einfederweg ab dem Arbeitspunkt (gestrichelte Linien bei 32 bzw. 34 mm) unter 20 mm liegt und die konzeptionellen Vorgaben (Bild 4.1) nicht erreicht. Der kleinere Federweg führt dazu, dass bei Absatzauf- und abfahrten stärkere Nickbewegungen angeregt werden. Die Ausfederkennlinien bei Gummielementen liegen links neben den Einfederkennlinien, die eingeschlossene Fläche eines Ein- Ausfederzyklus ist gleich der in Wärme umgewandelten Bewegungsenergie und ein Maß für die Dämpfung.

### 6.2.3 Messung der Lenkmomente

Das Lenkmoment wird indirekt über den Effektivwert des Lenkmotorstroms gemessen. Um die Beziehung zwischen Lenkmoment und Strom zu bestimmen, wird das Lenkmoment über die Tangentialkraft in definiertem Abstand zur Lenkachse gemessen. Bild 6.5 zeigt Messaufbau und Messergebnis.

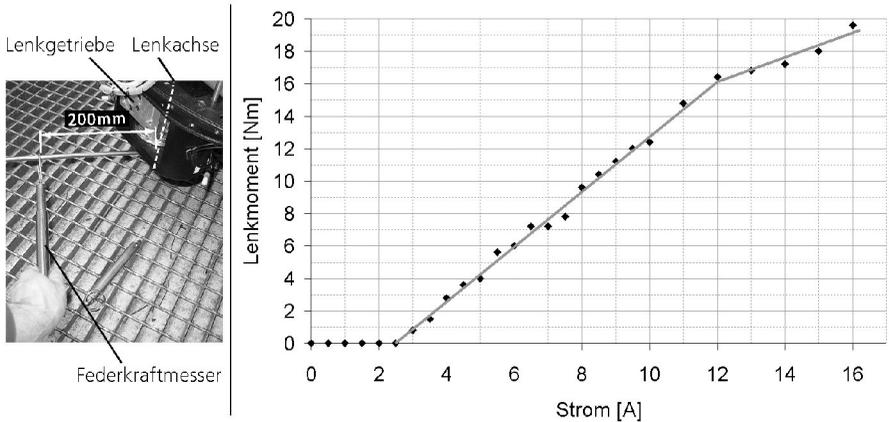


Bild 6.5: Zusammenhang zwischen Strom und Lenkmoment und zugehöriger Messaufbau (links). Der Messfehler liegt, bedingt durch Reibung und Ablesungenauigkeit, bei geschätzt 10 - 20 %. Das ist zwar relativ hoch, aber genau genug, um Aussagen über die Größenordnung der auftretenden Lenkmomente zu machen. Durch die Messpunkte lassen sich zwei Näherungsgeraden legen. Somit gilt:

$$M_L \begin{cases} =0, & I_L < 2,5 \\ \approx 1,7 I_L - 4,25, & 2,5 \leq I_L < 12 \\ \approx 0,75 I_L + 7, & 12 \leq I_L < 16 \end{cases}$$

In den folgenden Versuchen werden die Lenkmomente in 4 verschiedenen Situationen gemessen:

1. die Lenkräder sind unbelastet
2. der Roboter steht auf glattem ebenem Boden
3. der Roboter steht auf ebenem Gitterrost und
4. der Roboter steht auf Gitterrost mit einem Lenkrad auf einer 20 mm Stufe, so dass die Radlast  $F_{ZR}$  größer ist.

Für die Messung dreht der Lenkantrieb die Lenkmechanik und die Lenkrollen mit der eingestellten Maximalgeschwindigkeit 1,06 U/s von  $0^\circ$  auf  $90^\circ$ . Bild 6.6 zeigt den Stromverlauf für die Situation 1, der mit dem Antriebsregler aufgenommen wurde. Der Maximalstrom dieses Reglers ist

kurzzeitig 16 A und im Dauerbetrieb 8 A. Die Regelabweichung für den Lenkwinkel ist nahezu 0, so dass der eingezeichnete Lenkwinkelverlauf für den Sollwert und Istwert gilt.

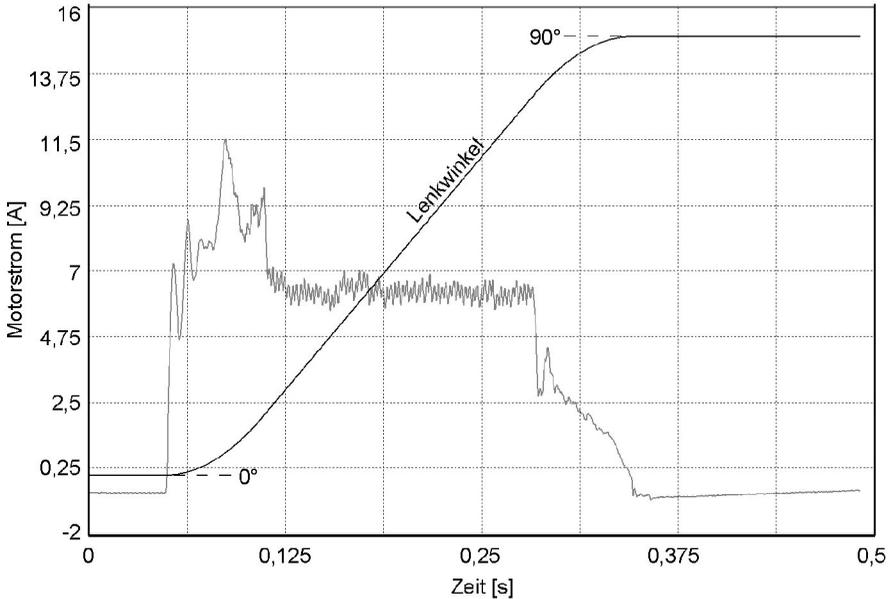


Bild 6.6: Stromverlauf des Lenkantriebs beim Drehen von  $0^\circ$  auf  $90^\circ$ , Lenkräder unbelastet  
In der Beschleunigungsphase ist der Motorstromverlauf wegen der Trägheitsmomente von Getriebe und Lenkrädern überhöht und beim Drehen mit konstanter Geschwindigkeit bei ca. 6,5 A, also 6,8 Nm. Dieses doch beachtliche Drehmoment ist gleich dem Gegenmoment, das bei dieser hohen Lenkgeschwindigkeit durch Reibung im Schneckengetriebe und durch Reibung in den gespannten Lenkachsenlagern erzeugt wird. Bei kleineren Lenkgeschwindigkeiten verringert sich das Moment etwa proportional.

Bild 6.7 zeigt die übereinandergelagerten Stromverläufe in den Situationen 1 bis 4. Interessant ist, dass es praktisch keinen Unterschied zwischen glattem Boden und Gitterrostboden gibt und der Rollwiderstand der Lenkrollen offensichtlich gleich ist. Wenn ein Lenkrad auf der 20 mm Stufe steht (Situation 4), wird der Stellbereich des Stromreglers im Mittel um ca. 80 % ausgenutzt. Trotzdem gibt es auch bei dieser Maximalbelastung keine merkliche Regelabweichung im Lenkwinkelregler.

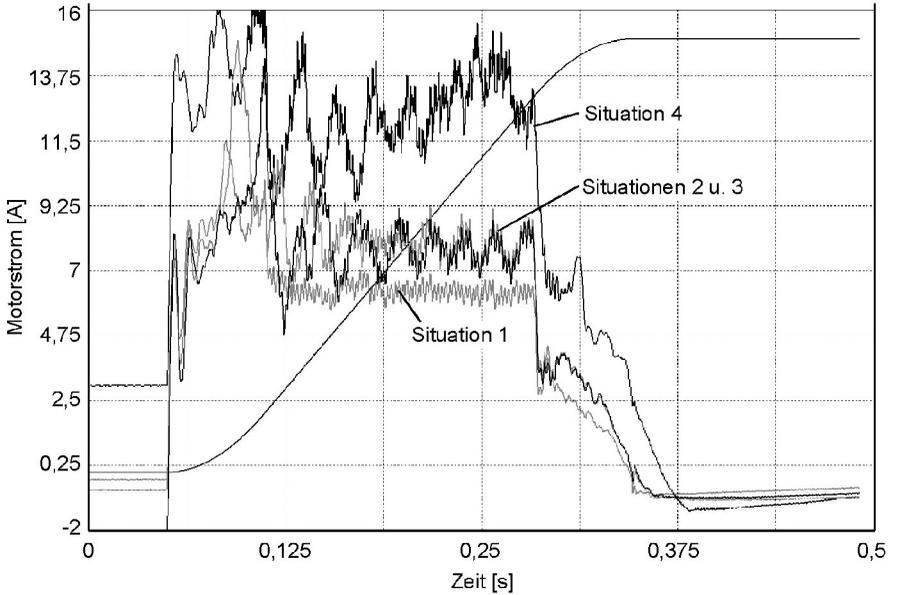


Bild 6.7: Lenkmotorstromverläufe in 4 Situationen: 1. Lenkrollen unbelastet, 2. unter Nennlast auf glattem Boden, 3. auf Gitterboden, 4. eine Lenkrolle auf 20 mm - Absatz

### 6.2.4 Messung der Antriebsmomente in extremen Fahrsituationen

Wie beim Lenkantrieb werden die Antriebsmomente indirekt über den Effektivstrom gemessen. Auch dazu wird zunächst der Zusammenhang zwischen Moment und Strom gemessen.

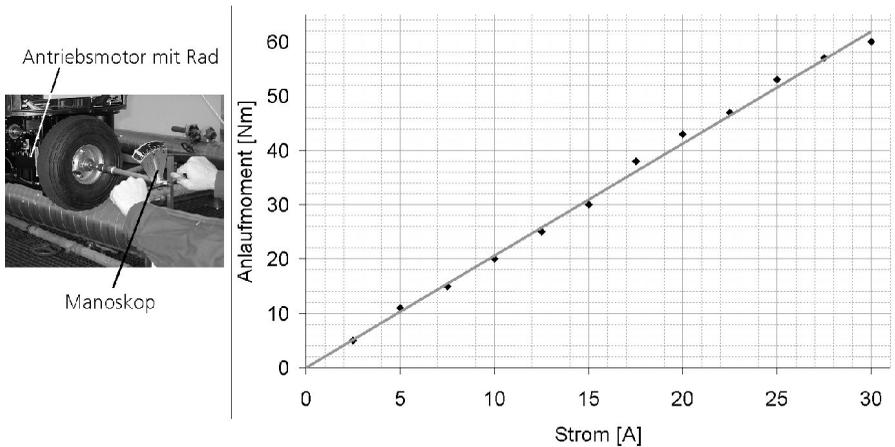


Bild 6.8: Zusammenhang zwischen Strom und Anlaufmoment eines Antriebsmotors und zugehöriger Messaufbau (links)

Bild 6.8 links zeigt den Messaufbau: Der Motor wird bestromt, aber mit einem Stahlwellenmanoskop an der Welle still gehalten. Am Manoskop wird das Anlaufmoment abgelesen. Es ist etwas geringer als das Drehmoment bei laufendem Motor und gleichem Strom. Der rechts gemessene Zusammenhang ist also etwas konservativer als der tatsächliche. Als lineare Funktion angenähert ist er  $M_A \approx 2,03 I_A$ .

In den folgenden Versuchen fährt der Prototyp über einen 20 mm hohen Absatz von ca. 0,22 m Länge (gemäß den Anforderungen aus Bild 3.7), wobei die Motorströme gemessen werden. Boden und Absatz bestehen aus Gitterrost, wobei es auf dem Absatz nur in Fahrtrichtung verlaufende Tragstäbe gibt, was eine besonders große Belastung der Oberfläche eines auftreffenden Reifens ist. Diese Fahrsituation kann nach den Anforderungen als extrem angenommen werden und soll unter anderem zur Überschlagsrechnungen Verifikation der in Unterkapitel 5.6 entwickelten Berechnungsgrundlagen dienen. Eine genaue Messung der einzelnen Fahrwiderstände ist dazu nicht erforderlich und wird in der Praxis ohnehin als schwierig angesehen (Wiedemann 2000).

In den ersten 3 Versuchen steht der Roboter ca. 0,4 m vor dem Absatz, wird langsam beschleunigt und sofort nach dem Absatz abgebremst. Der Fahrweg ist ca. 1,3 m.

In Versuch 1 fährt er langsam vorwärts und rechtwinklig über den Absatz. Bild 6.9 zeigt die Verläufe eines der beiden Antriebe für die Soll- und Istwerte der Drehzahl (schwarz) und den Verlauf des Stroms, der wegen der einfachen Umrechnung auf das Antriebsmoment skaliert ist (grau). Die Zeitpunkte der wichtigen Ereignisse sind mit Pfeilen markiert. Der Maximalstrom ist aus elektrischen Gründen auf 20 A für max. 1 s begrenzt, was etwa 40 Nm entspricht.

Das glatte Rampensignal ist der Sollwertverlauf der Drehzahl. Der Istwert ist stark verrauscht, was am Gebersignal und an der Signalverarbeitung im Antriebsregler liegt. Auffällig ist, dass bis ca. 2 s noch vor dem Absatz die Ist Drehzahl schwingt und es beachtliche Regelabweichungen gibt, was zu den Teils heftigen Ausschlägen im Strom-(Moment-)verlauf führt. Optisch ist dies jedoch nicht als Fahrzeugruckeln wahrnehmbar, sondern der Roboter beschleunigt gleichmäßig. Die Regelabweichungen begründen sich in einer „scharfen“ Einstellung des Drehzahl- und des Stromreglers, die schnell reagieren sollen, wenn die Räder auf einen Absatz treffen. Diese beiden Ereignisse, Auftreffen des vorderen Lenkkrads und der Antriebsräder, sind im Diagramm markiert. Auffällig ist, dass beim Auffahren des Lenkkrads kein sehr großes Moment benötigt wird. Die weiche Lenkradfederung gibt leicht nach und lässt den Roboter etwas nach hinten nicken. Wenn dagegen die Antriebsräder auf den Absatz treffen, geht die Drehzahl fast bis auf 0 zurück. Der Stromregler reagiert nach ca. 10 ms und erzeugt das Maximalmoment, um den Großteil des Roboter gewichts den Absatz hinaufzuheben. Gleich danach, wenn die Antriebsräder gerade über die Kante rollen, muss der Regler abbremsen, indem er in die Stromversorgung rückspeist (negative Drehmomente). Die Rückspeisung dauert an, weil nach 0,22 m die Antriebsräder den Absatz wieder herunter rollen. Eine weitere Rückspeisung gibt es beim Abbremsen nach dem Absatz.

In Versuch 2 fährt der Roboter rückwärts, sonst sind alle Bedingungen wie bei Versuch 1. Bild 6.10 zeigt die Verläufe, die qualitativ gleich aussehen wie in Versuch 1. Erwähnenswert ist, dass

das Lenkrad rückwärts, also wenn die Längslenker der Federung nicht gezogen, sondern geschoben werden, keine höheren Antriebsmomente benötigt, sondern ebenso leicht einfedert.

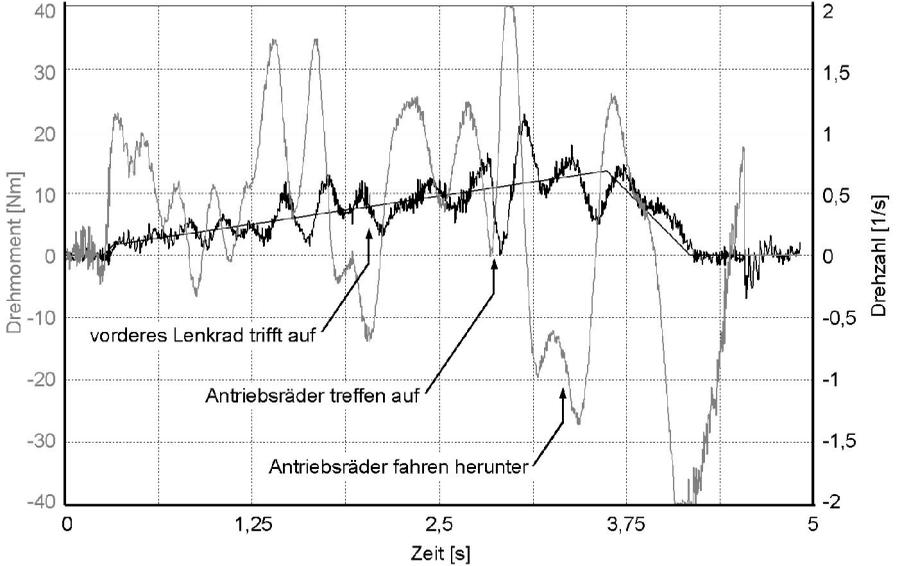


Bild 6.9: Verlauf des Antriebsmoments bei langsamer Fahrt vorwärts über 20 mm-Absatz

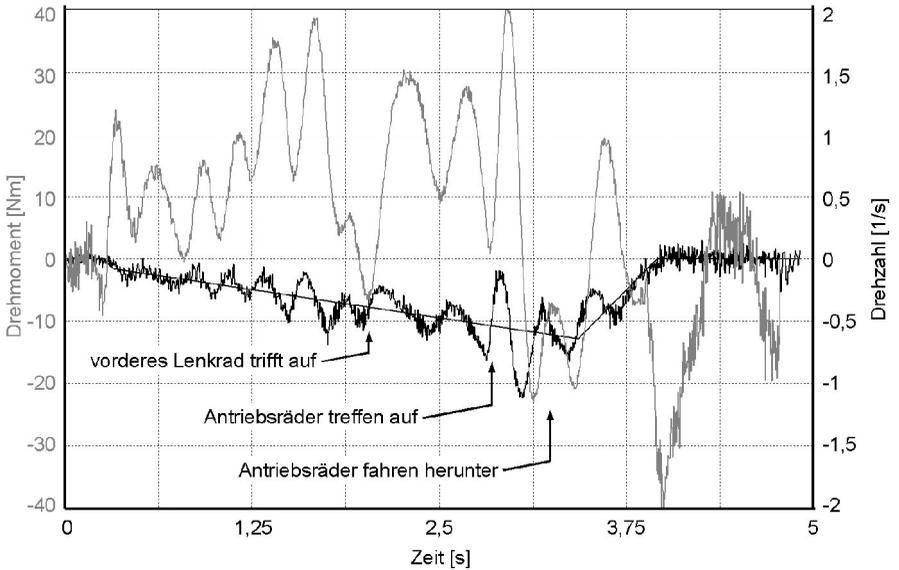


Bild 6.10: Verlauf des Antriebsmoments bei langsamer Fahrt rückwärts über 20 mm-Absatz

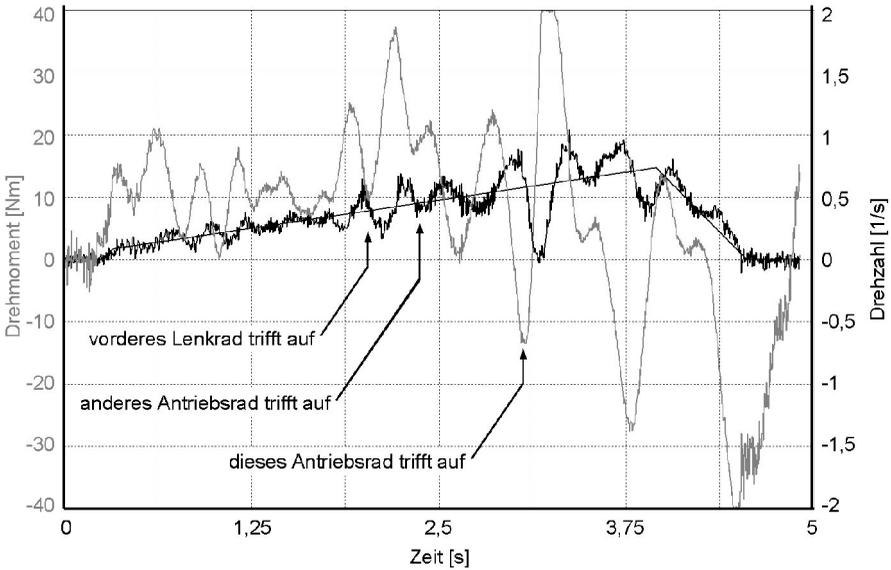


Bild 6.11: Verlauf des Antriebsmoments bei langsamer Fahrt vorwärts schräg über 20 mm-Absatz

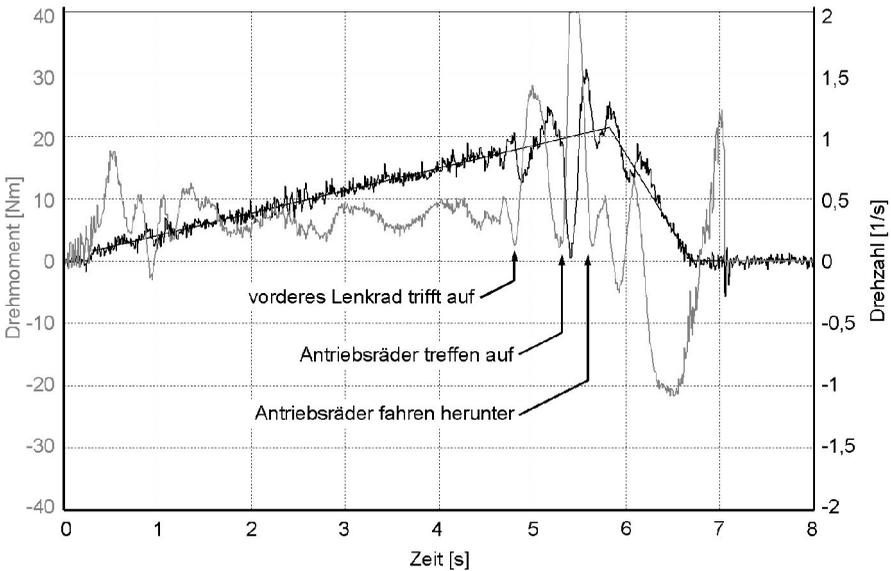


Bild 6.12: Verlauf des Antriebsmoments bei schneller Fahrt vorwärts über 20 mm-Absatz  
In Versuch 3 fährt der Roboter wie in Versuch 1, aber schräg über den Absatz. Bild 6.11 zeigt die Verläufe. Auffällig ist, dass wenn dieses Antriebsrad auf den Absatz fährt, der Maximalstrom doppelt so lange benötigt wird, als bei Geradeausauffahrt. Der Grund ist, dass dieser Antrieb

mehr Arbeit verrichten muss, um den Roboter den Absatz hinauf zu heben, als der andere Antrieb, dessen Rad zuerst auf den Absatz fährt.

In Versuch 4 fährt der Roboter schneller und rechtwinklig über den Absatz. Die Massenträgheit sollte dabei helfen, ihn über den Absatz zu rollen. Das Messergebnis in Bild 6.12 zeigt aber keinen erkennbaren Einfluss der Massenträgheit. Auch hier wird der Antrieb fast zum Stillstand gebracht, wenn das Rad auf die Kante trifft.

Die Versuche zeigen, dass die Antriebe selbst mit dem auf  $40 \text{ Nm}$  reduzierten Maximalmoment eine Absatzauffahrt bewältigen können. Die in Unterkapitel 5.6 getroffenen konservativen Annahmen wurden mit diesen Messungen als konservativ und damit als zutreffend bestätigt und die Fahrtriebe erfüllen die gestellten Anforderungen hinsichtlich Drehzahl und Drehmoment.

### 6.3 Messungen zum dynamischen Verhalten des Fahrwerks

#### 6.3.1 Messung des Einfederverhaltens

Die Messung des Einfederverhaltens des Fahrwerks soll das Verhältnis der Härte der Lenkradfederung zur Antriebsradfederung aufzeigen. Es wird gemessen, indem der Roboter schrittweise auf seine Räder abgesenkt wird. Die vier Räder stellen sich dabei auf vier Personenwaagen, um die Radaufstandskraft bzw. das Aufstandsgewicht zu messen. Die 4 Waagen sind baugleich und geeicht, der Messfehler einer Waage inklusive Ablesungenauigkeit liegt bei maximal 5 %, der Boden ist eben.

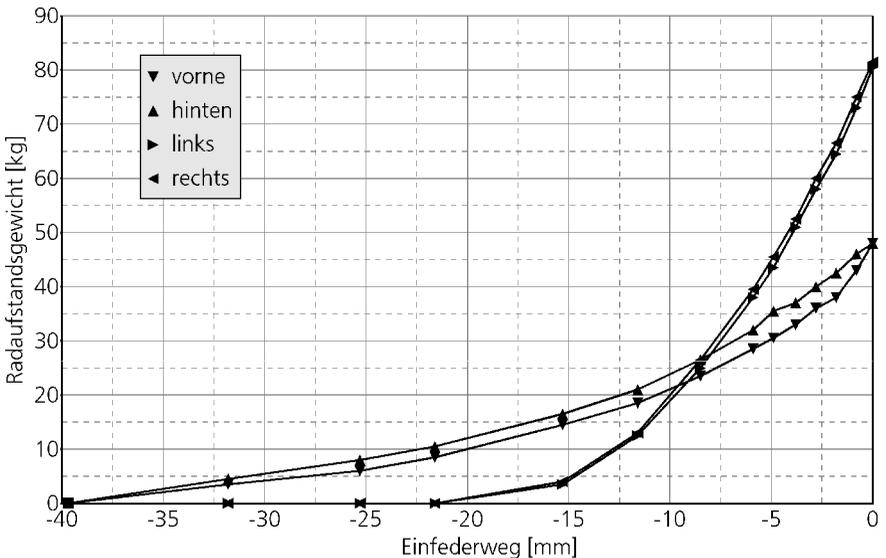


Bild 6.13: Einfederverhalten der Antriebsräder (links, rechts) und der Lenkräder (vorne, hinten)

Bild 6.13 zeigt das Ergebnis der Messung. Der Einfederweg sei dann 0, wenn das gesamte Gewicht des Roboters auf den Rädern liegt. Bei - 40 mm setzten die Lenkradfederingen ein, bei ca. - 20 mm die Antriebsreifen. Bei 0 mm erhält man die bereits oben angegebene statische Radlastverteilung von 63,3 % auf den Antriebsrädern zu 36,7 % auf den Lenkrollen. Dieses Verhältnis kann mit Verstellung der Härte der Lenkradfederung in beide Richtungen geringfügig verschoben werden.

Erwartungsgemäß sind alle Einfederkennlinien progressiv. Interessant bei den Kennlinien der Antriebsräder ist, dass sie von - 20 bis - 10 mm weich einsetzen und ab etwa - 8 mm relativ hart und grob genähert linear weiterlaufen. Dies erklärt sich dadurch, dass die Reifen ballig sind und sich die Latschfläche daher anfangs stark vergrößert und später nur noch wenig. Qualitativ verläuft die Latschflächenkennlinie über dem Einfederweg etwa gleich wie die Einfederkennlinie. Weiter interessant sind die kleinen Unterschiede zwischen den Kennlinien der Antriebsräder und die größeren Unterschiede bei den Kennlinien der Lenkräder. Da die Antriebsräder und die Lenkradfederingen jeweils baugleich sind, ist dies ein Hinweis darauf, dass der Schwerpunkt nicht auf der geometrischen Mittelachse des Roboters liegt, sondern leicht nach rechts und etwas stärker nach hinten verschoben ist.

### 6.3.2 Messungen zum Nickverhalten

Das Nickverhalten wird mit einer statischen und einer dynamischen Messung identifiziert. Statisch werden die Beziehungen zwischen den Radaufstandskräften oder Gewichten, dem Nickwinkel und der horizontalen Auslenkekraft gemessen. Dynamisch wird mittels Videoanalyse das Ausschlagen der Nickbewegung untersucht. Die Räder stehen auf Waagen auf horizontalem Boden. Am Chassis des Roboters greift eine Horizontalkraft in Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung an, die einen Nickwinkel erzeugt und die Radaufstandskräfte verändert. Diese Kraft wird mit einem Federkraftmesser gemessen. In großem Abstand zum Roboter nimmt eine Kamera Bilder bei verschiedenen Auslenkekraften auf, aus denen der Nickwinkel ermittelt wird. Der perspektivische Fehler in den Bildern ist vernachlässigbar.

Grundsätzlich gibt es viele Möglichkeiten, den Nickwinkel zu messen, wobei die digitale Bildauswertung nicht als die Nächstliegende erscheinen mag. Mit aktuellen Kameras sind jedoch hochauflösende Bilder und mit Grafikprogrammen hoch genaue Bildvermessungen möglich, so dass dieser einfache Messaufbau andere Geometrie-Messgeräte sehr gut ersetzen kann.

Die Ergebnisse dieser Messung zeigt Bild 6.14. Das obere Diagramm zeigt die Radaufstandskräfte bzw. Gewichtsverteilung abhängig von der Auslenkekraft. Auch hier wird der progressive Verlauf der Lenkradfederung vorne und hinten deutlich. Mit steigender Auslenkung verringert sich außerdem die Aufstandskraft auf den Antriebsrädern sehr deutlich, weil sich der Schwerpunkt in Richtung eines Lenkrades verschiebt. Das Diagramm unten zeigt den Zusammenhang zwischen Nickwinkel und Auslenkekraft. Auch hier gibt es einen leicht progressiven Verlauf wegen der progressiven Lenkradfederung. Die Auslenkekraft wurde für die Messung in Vorwärtsrichtung bis auf 350 N erhöht, obwohl dies die Mechanik der Lenkradfederung in 90 ° Lenkwinkelstellung statisch leicht überlastet und sich die Gabelbleche der Lenkradschwinge elastisch verbiegen.

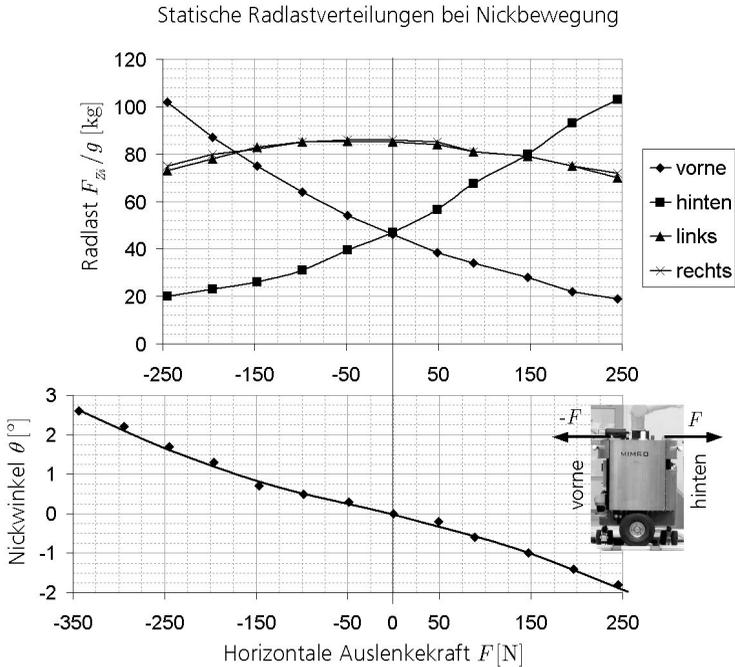


Bild 6.14: Statische Messung zum Nickverhalten

Auf den ersten Blick sieht der Kennlinienverlauf in Bild 6.14 unten nicht plausibel aus, denn die Nickwinkeländerung  $d\theta/dF$  wird mit steigendem Kraftbetrag größer und nicht kleiner. Bei progressiver Kennlinie der Lenkradfederung müsste sie eigentlich kleiner werden. Der Eindruck täuscht aber, weil auch das Radaufstandsgewicht überproportional steigt (Bild 6.14 oben). Würde man  $\theta$  über dem Radaufstandsgewicht auftragen, bekäme man den in Bild 6.4 gemessenen progressiven Verlauf. Trotzdem zeigt diese Messung, dass die Nickfederung des gesamten Roboters – und das zeigt das Diagramm in Bild 6.14 unten – gegenüber horizontal wirkenden Kräften (Beschleunigungskräften) im Arbeitsbereich einen leicht degressiven Verlauf hat. Das ist zwar günstig, da

1. plötzliche Stöße (hohe Radaufstandskraft) weicher abgefedert werden (vgl. Abschnitt 5.4.2) und
2. kleine Schwingungen schneller abklingen (harte Federung beim Nickmodell, Unterkapitel 5.5),

dagegen klingen größere Schwingungen langsamer ab.

Eine zweite Messung soll das dynamische Nickverhalten identifizieren. Dazu wird der stehende Roboter mit einem Seil an den Kranhaken und einem Federkraftmesser horizontal mit ca. 350 N ausgelenkt, dann das Seil durchtrennt und den Roboter ausschwingen lassen (Bild 6.15 rechts

oben). Der Nickwinkel  $\theta$  wird mit der Analyse der Videobilder des Ausschwingvorgangs gemessen. Die Videoaufnahme liefert alle 20 ms ein auswertbares Halbbild.

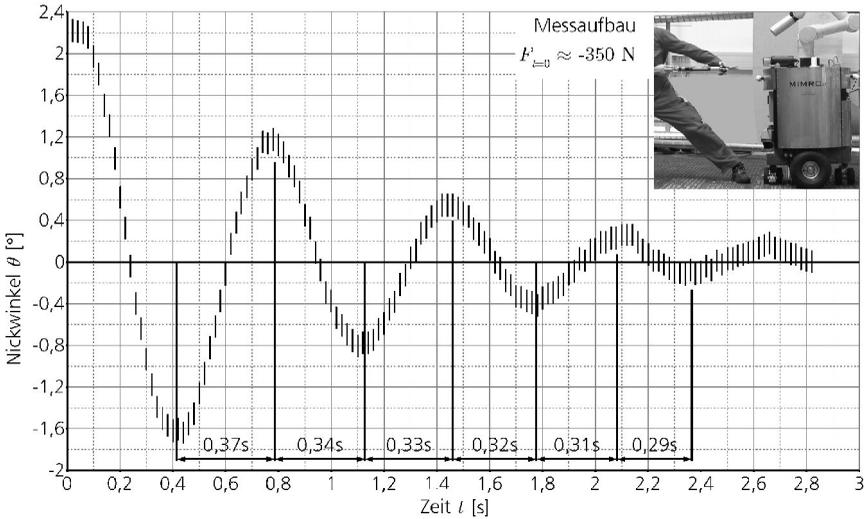


Bild 6.15: Messung der abklingenden Nickschwingung nach Anfangsauslenkung

Eine Beobachtung während des Ausschwingens ist, dass die Schwingungsenergie eine kleine Wank- und eine kleine Drehbewegung um die  $z_v$ -Achse anregt. Die Schwingungsenergie wurde also nicht nur in Walgarbeit an den Parabelfedern der Lenkräder, sondern zu einem kleinen Teil auch in Walgarbeit an den Antriebsreifen umgewandelt. Die gemessene Dämpfung ist dadurch etwas größer als die der reinen Nickfederung der Roboters. Dieser Effekt weist, wie bereits die Messung des Einfederverhaltens in Abschnitt 6.3.1 darauf hin, dass der Schwerpunkt des Roboters nicht auf der  $z_v$ - Achse liegt, sondern ein Stück in  $y_v$ - Richtung verschoben ist.

Die Messpunkte sind als Toleranzbalken eingetragen. Die Messgenauigkeit der Bildanalyse liegt mindestens bei  $\pm 0,075^\circ$ . Die Höhe der Messpunkte ist mit ca.  $0,2^\circ$  noch etwas konservativer angenommen.

### 6.3.3 Identifikation des Nickmodells

Der gemessene Verlauf der Nickschwingung kann durch ein lineares PT2-System angenähert und die Parameter identifiziert werden.  $\omega_0$  kann aus der mittleren Periodendauer bestimmt werden. Mit den Beziehungen

$$\left| \frac{A_{k+1}}{A_k} \right| = \ddot{u} = \exp\left( \frac{-\pi \delta}{\omega_0 \sqrt{1 - (\delta^2 / \omega_0^2)}} \right) \quad \text{und} \quad \omega_0 = \sqrt{\omega_d^2 + \delta^2} \quad (6.1)$$

lassen sich  $\omega_0$  und  $\delta$  bestimmen, wobei  $A_k$  die Schwingungsmaxima und -minima sind. Tabelle 6.3 zeigt die Auswertung des Verlaufs und die Ergebnisse.

$k$	$A_k$	$\ddot{u}_k$	$\ddot{u}$	$D=\delta/\omega_0$	$\omega_d$	$\omega_0$	$\delta$	$s_{1,2}$
0	2,20		1,41	(Dämpfungsgrad)	(Eigenfrequenz)		(Abklingkonstante)	(Pole)
1	-1,60	1,376		$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{\ln \ddot{u}}\right)^2}}$	$= \frac{2\pi}{T} \approx \frac{2\pi}{0,668\text{s}}$	$= \frac{\omega_d}{\sqrt{1-D^2}}$	$= D \omega_0$	$= -\delta \pm j\omega_d$
2	1,15	1,391						
3	-0,80	1,438						
4	0,55	1,450						
5	-0,40	1,375						
6	0,25	(1,6)			$= 0,106$	$= 9,406 \text{ s}^{-1}$	$= 9,501 \text{ s}^{-1}$	$= 1,01 \text{ s}^{-1}$

Tabelle 6.3: Identifizierte Kenngrößen aus dem gemessenen Verlauf der Nickschwingung

### 6.3.4 Verifikation des Nickmodells

In Abschnitt 5.5.1 wurde ein linearisiertes Nickmodell entwickelt und die Gleichungen für die Kenngrößen angegeben. In diesem Abschnitt werden diese Gleichungen mit den Parametern des Prototyps berechnet und die so berechneten Kenngrößen mit denen des identifizierten Modells verglichen, um die Modellgleichungen zu verifizieren.

Bei der Messung der abklingenden Nickschwingung ist der Drehpunkt etwa im Radaufstandspunkt. Die Kennkreisfrequenz und Periodendauer berechnen sich demnach mit Gleichung (5.22) und den Werten  $s_s = 0,53 \text{ m}$  und  $c_s = 33 \text{ kN/m}$  zu

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s_s^2 c_s}{2(z_{cog} + r_w)^2 m} - \frac{m g - F_{zW}}{(z_{cog} + r_w) m}} = 2 \pi f_0 \approx 9,9 \text{ s}^{-1} = 2 \pi 1,6 \text{ s}^{-1} \text{ und } T_0 = 0,63 \text{ s} \quad (6.2)$$

Dieser Wert ist etwas höher als der der identifizierten Schwingung, allerdings wurden beim linearisierten Nickmodell sehr starke Vereinfachungen getroffen, es gibt Messungenauigkeiten bei  $F_{zW}$  und  $m$  und die Linearisierung  $c_s$  an der gemessenen Kennlinie der Lenkradfederung ist relativ ungenau. Unter diesen Umständen ist das linearisierte Modell eine sehr gute Basis für die Modellierung der Nickdynamik und die Auslegung der Lenkradfederung.

Die Dämpfung einer Lenkradfederung lässt sich durch einfache Messung nicht bestimmen, daher ist ein Vergleich mit den Modellgleichungen nicht möglich. Bei einer Gummifeder ist der Dämpfungswert eine Bauteileigenschaft und von Federgeometrie und Gummimischung abhängig. Eine beliebige Parametrierung ist nicht möglich. Der Verlauf in Bild 6.15 zeigt mehrmaliges Überschwingen und eine lange Einschwingzeit. Besser wären nur geringes Überschwingen, z.B. die häufig verwendeten 5 % und ein schnelles Einschwingen, was durch größere Dämpfung erreicht werden könnte. Andererseits würde eine größere Dämpfung die höherfrequenten Vibrationen durch Gitterroste schlechter aufnehmen. Daher ist das Verhalten der prototypischen Lenkradfederung ein möglicher Kompromiss für die Anforderungen aus den Bodenbedingungen.

### 6.3.5 Messungen zum Wankverhalten

Zum Wankverhalten wird nur eine dynamische Messung durchgeführt, weil Ergebnisse einer statischen Messung mit dem Messergebnis in Bild 5.6 bereits vorliegen. Anders als bei der Nick-

schwingung ist der Effekt der Schwerpunktverlagerung viel geringer, weil die Federhärte der Antriebsreifen größer ist als die der Lenkradfederungen (Bild 6.13). Bei einer Horizontalkraft von ca. 320 N an den Kranhaken ist der Wankwinkel auch nur  $0,7^\circ$ , wie das Messergebnis in Bild 6.16 zeigt. Der Messaufbau ist gleich wie bei dem Ausschwingversuch zum Nickverhalten. Die Messpunkte sind als Toleranzbalken von  $\pm 0,075^\circ$  eingetragen, was mindestens der Messgenauigkeit der Bildanalyse entspricht.

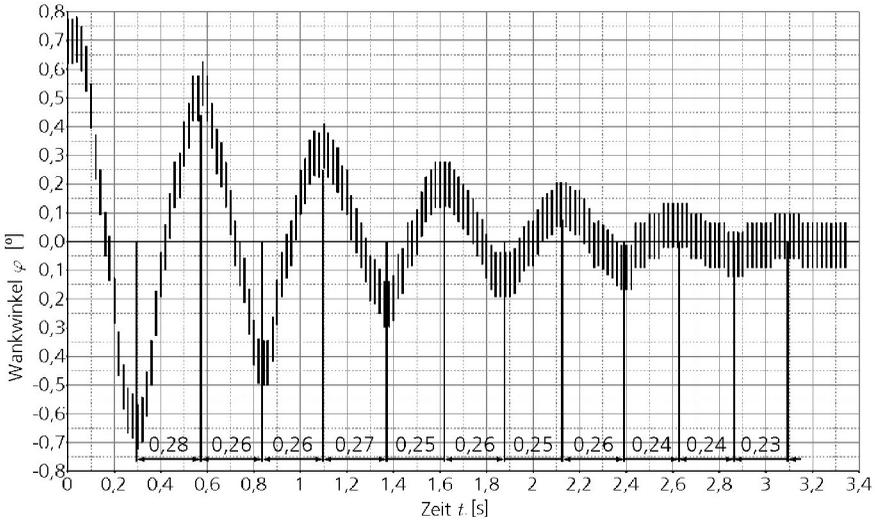


Bild 6.16: Messung der abklingenden Wankschwingung nach Anfangsauslenkung

Die Frequenz ist wegen der größeren Federhärte wie erwartet höher als bei der Nickschwingung. Die Dämpfung ist gummitypisch gering. Wie bei der Nickschwingung nimmt die Frequenz bei kleinerer Auslenkung leicht zu, was zunächst verblüffend ist, denn es ist das Verhalten einer leicht degressiven Federkennlinie. Dieser Effekt wird erklärbar bei Betrachtung der Krümmung der Kennlinie (Bild 6.2). Sie ist bei kleinen Kräften groß und um den Arbeitspunkt und bei größeren Kräften klein. Bei den größeren Anfangsauslenkungen in der Messung ist das entlastete Rad in weicheren Bereich mit großer Krümmung, während das belastete Rad auf dem fast linearen Kennlinienteil liegt. In der Summe ist die Federung weicher und die Eigenfrequenz kleiner.

Auch hier ist beim Ausschwingen beobachtbar, dass ein kleiner Teil der Energie in eine kleine Nickschwingung übergeht, was darauf hinweist, dass der Schwerpunkt auch in  $x_V$ -Richtung nicht exakt auf der  $z_V$ -Achse liegt.

Bei der Simulation des linearisierten Wankmodells in Abschnitt 5.5.4 mit den Werten des Prototypen (Tabelle 6.1, Bild 6.2 und  $s_W = 0,55 \text{ m}$ ) erhält man eine Periodendauer der abklingenden Schwingung von  $0,32 \text{ s}$ , was deutlich geringer als die in Bild 6.16 ablesbaren ca.  $0,5 \text{ s}$  sind. Offenbar hat das vereinfachte Wankmodell zu große Ungenauigkeiten, besonders wegen der in 5.5.4 bereits diskutierten Drehpunktlage im Massenschwerpunkt. Die reale Drehpunktage liegt

eher zwischen Boden und  $C_v$ , wodurch sich die Eigenfrequenz des Modells verringert und dem gemessenen Verlauf in Bild 6.16 annähert.

## 6.4 Fahrdynamisches Verhalten in Extremsituationen

Hier werden Versuche durchgeführt, um die Fahrdynamik des entwickelten Roboterfahrwerks zu testen und zu überprüfen, ob die Auslegungskriterien und Berechnungsgrundlagen für die prototypische Ausführung eines dynamischen Fahrwerks geeignet sind. In den Versuchen werden extreme Fahrsituationen an dem 20 mm Absatz durchgeführt, was von allen möglichen Bodenunebenheiten (Bild 3.7) zu den größten Anregungen der Fahrdynamik führt. Darüber hinaus ist die Absatzlänge von ca. 0,22 m fast so lang wie der Abstand Lenkrad-Antriebsrad. Wenn bei der Überfahrt ein Rad auftrifft, fährt ein anderes vom Absatz herunter, was zu besonders heftigen Anregungen der Fahrdynamik führt.

### 6.4.1 Geradeausfahrt über 20 mm-Absatz

In diesem Versuch wird der Roboter beschleunigt und trifft mit 0,75 m/s senkrecht auf den 20 mm Absatz. Wenn der Roboter vom Absatz vollständig heruntergefahren ist, bremsen die Antriebsmotoren ab. Es ist derselbe Ablauf wie bei der Messung zum Antriebsmoment in Bild 6.12. Dabei wird das dynamische Fahrverhalten beobachtet und speziell der Nickwinkel gemessen.

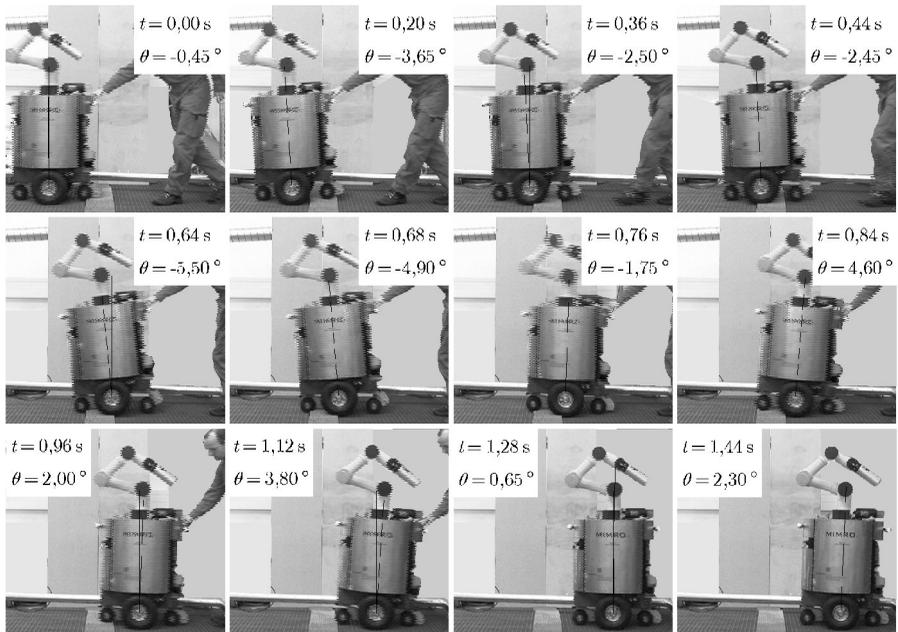


Bild 6.17: Messung des Nickverhaltens bei Geradeausfahrt über kurzen 20 mm-Absatz

Bild 6.17 zeigt die wichtigsten Momentaufnahmen. Die Person auf dem Bild, die den Versuch durchführt, übt keine Kraft auf den Roboter aus, sondern beschleunigt und bremst den Roboter mit einem Handgriff am Chassis, der joystickähnliche Funktion hat und die Antriebe steuert. Die Meßgenauigkeit des Nickwinkels ist mindestens  $\pm 0,075^\circ$  und die Zeitauflösung ist 40 ms.

Die Zeitmessung beginnt mit dem Auftreffen des vorderen Lenkrads. Wenn es auf den Absatz fährt, regt es eine leichte Nickschwingung an und lässt den Roboter nach hinten kippen ( $t = 0,20$  s). Wenn die Antriebsräder auffahren, heben sie den Roboter nach oben, wobei der Roboter nach hinten geneigt bleibt ( $t = 0,36 - 0,44$  s). Weil das hintere Lenkrad nun plötzlich entlastet ist, kippt der Roboter weiter nach hinten ( $t = 0,64$  s). Das vordere Lenkrad ist entlastet und fast ganz ausgefedert. Wenn das hintere Lenkrad auffährt, stößt es eine Drehbewegung des Roboters um die Antriebsachse an, gleichzeitig fahren die Antriebsräder ab, was diese Drehbewegung verstärkt ( $t = 0,68$  s). Unmittelbar danach (ca. bei  $t = 0,70$  s) scheinen die Antriebsräder gegenüber dem Boden kurz still zustehen. Stattdessen geht diese Drehbewegung weiter, indem die Motoren unterstützt von der Massenträgheit den kompletten Roboterkörper um die Antriebsachse nach vorne drehen, bis die vordere Lenkradfederung voll eingefedert ist und ein Weiterdrehen verhindert (bei  $t = 0,84$  s). Ein Gleitschutz an der vorderen Lenkradfederung hat in diesem Moment fast Bodenkontakt. Erst dann fährt der Roboter weiter. Die Videoanalyse in diesem Moment zeigt außerdem, dass die Antriebsräder deutlich entlastet werden und der Roboter 1-2 cm in  $z_V$ -Richtung 'hüpft'. Diese Vertikalschwingung erreicht bei  $t = 0,96$  s ein Minimum, so dass die Antriebsräder wieder voll belastet sind und bei  $t = 1,12$  s erneut ein Maximum. Wegen der großen Vorwärtsneigung drückt das Maximum sehr stark auf die vordere Lenkradfederung und vergrößert  $\theta$ . Auch wenn der Roboter wieder auf ebenem Boden fährt, ist der Nickwinkel von  $3,8^\circ$  noch deutlich außerhalb des Diagramms der Messung von Bild 6.14. Die Lenkradfederung dürfte überlastet sein. Verlängert man die Kennlinie in Bild 6.14 bis  $3,8^\circ$ , dann erhält man eine Lenkradlast ca. 2 kN. Die Unebenheiten dieser Teststrecke schaffen tatsächlich eine extreme Fahrsituation, in der hohe dynamische Beanspruchungen im ungünstigen Moment weiter verstärkt werden.

Das nächste Maximum der Vertikalschwingung fällt mit annähernd  $\theta = 0$  zusammen, so dass sie kein Nicken mehr verstärkt und nach einem weiteren kleinen Maximum nicht mehr wahrnehmbar ist. Gleichzeitig klingt die angeregte heftige Nickschwingung nach wenigen Sekunden ab (wie in Bild 6.15) während der Roboter abbremst. Während der gesamten Überfahrt ist fast keine Wankbewegung beobachtbar.

Dieser Versuch zeigt, dass unerwartete Wechselwirkungen und ungünstige Anregungen durch Bodenunebenheiten zu sehr hohen dynamischen Belastungen und Überlastungen führen können.

#### 6.4.2 Schrägfahrt über 20 mm-Absatz

In diesem Versuch fährt der Roboter schräg im ca.  $60^\circ$ -Winkel mit  $0,75$  m/s über den 20 mm Absatz. Sonst ist der Ablauf derselbe wie bei der Geradeausfahrt. Der Roboter wird von hinten und von der Seite gefilmt, um Nick- und Wankbewegungen gleichzeitig messen zu können. Bild 6.18 zeigt die wichtigsten Momentaufnahmen. Die Messgenauigkeit der Winkel ist mindestens

$\pm 0,075^\circ$  und die Zeitauflösung ist 40 ms.  $t = 0,00$  s ist der Zeitpunkt, zu dem das vordere Lenk-  
rad auf den Absatz trifft.

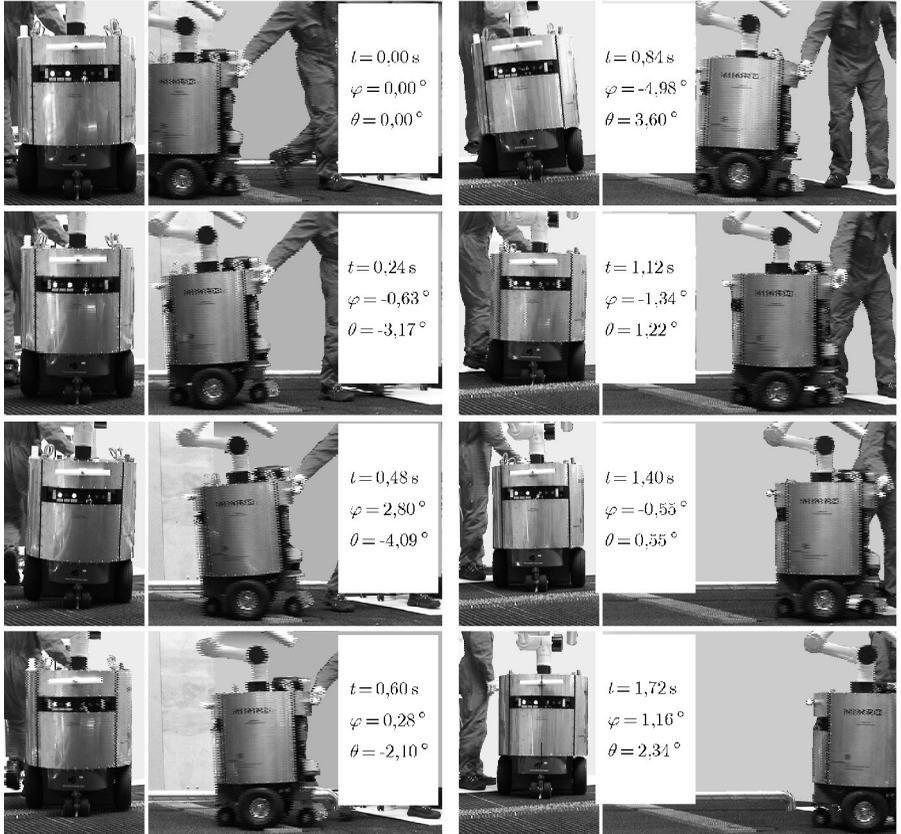


Bild 6.18: Messung des Nick- und Wankwinkels bei Schrägfahrt über kurzen 20 mm-Absatz

Das vordere Lenkrad behält den Lenkwinkel bei, obwohl es mit dem linken Rad der Doppelrolle zuerst auftrifft, wodurch ein Lenkmoment nach links auf das Lenkrad wirkt. Durch das Auffahren neigt sich der Roboter nach hinten ( $t = 0,24$  s). Danach fährt das linke Antriebsrad auf ( $t = 0,24 - 0,48$  s), wodurch sich der Roboter weiter nach hinten und nach rechts neigt. Das vordere Lenkrad fährt wieder ab und ist fast vollständig entlastet.

Interessant ist die Beobachtung, dass der Roboter geradeaus weiterfährt und nicht kurz nach links dreht, wenn das linke Antriebsrad auf den Absatz trifft, denn die Messungen (Bild 6.12) haben gezeigt, dass in diesem Moment das linke Antriebsrad kurz beinahe stillsteht, während das rechte weiterdreht. Trotzdem behält der Roboter die Fahrtrichtung bei, was daran liegt, dass das hintere Lenkrad weiter in Fahrtrichtung lenkt und in diesem Moment eine hohe Radlast hat, was

die Spurtreue weiter verbessert. Der Messung in Bild 6.14 zufolge sollte es bei  $t = 0,24$  s deutlich größer als das Aufstandsgewicht des linken Antriebsrads sein.

Bei  $t = 0,60$  s fährt das rechte Antriebsrad auf und das linke fast zeitgleich herunter, was mehrere Folgen hat:

1. Es wird eine leichte Nickbewegung nach vorne angestoßen, wodurch die Lenkräder entlastet werden und sich deren Einfluss auf die Fahrtrichtung verringert.
2. Der Roboter dreht um die  $z_1$ -Achse leicht nach rechts, weil das rechte Rad anstößt und das linke durch das Herunterfahren kurz angeschoben wird. Die Lenkräder können das nicht verhindern, weil ihre Radlast in diesem Moment gering ist.
3. Es wird eine heftige Wankbewegung nach links angestoßen.

Die Teilbilder bei  $t = 0,84$  s und  $t = 1,12$  s zeigen die Auswirkungen dieser Ereignisse: Das rechte Antriebsrad hebt vollständig ab und hat auf dem Absatz fast keinen Bodenkontakt, sondern erst ein Stück dahinter, es „fliegt“ für ungefähr  $0,3$  m. Auch das hintere Lenkrad ist wenig belastet, so dass das gesamte dynamische Robotergewicht auf dem linken Antriebs- und dem vorderen Lenkrad liegt. Bei  $t = 0,84$  s dürfte das dynamische Robotergewicht wegen des 'Abhebens' weniger als  $260$  kg sein und bei  $t = 1,12$  s, wenn das rechte Antriebsrad maximal belastet und die Wankschwingung am rechten Maximalwert ist, entsprechend mehr. Auffällig ist der große Wankwinkel bei  $t = 1,12$  s, obwohl der Roboter wieder auf ebenem Gitterrost fährt. Er ist gut doppelt so hoch wie bei der Wankmessung oben (Bild 6.16). Selbst bei den hohen Wank- und Nickwinkeln bei  $t = 0,84$  s besteht noch keine Gefahr, dass der Roboter umkippt. Eine weitere Auswirkung ist, dass die Fahrtrichtung des Roboters sich um wenige Grad nach rechts geändert hat, weil die Lenkräder kurz entlastet waren.

Nachdem der Roboter den Absatz passiert hat (ab  $t = 1,40$  s) bremst er ab, wodurch eine kleine Nickschwingung erzeugt wird. Der maximalen Auslenkung bei  $t = 1,72$  s folgen aber nur zwei weitere beobachtbare Maxima, dann ist die Nickschwingung nach ca.  $1,5$  s vollständig abgeklungen – viel schneller als in der Messung nach Bild 6.15. Stattdessen geht die Energie in die gleichzeitige Wankschwingung über, die erst ca.  $3,5$  s nach  $t = 1,72$  s abgeklungen ist.

## 6.5 Erkenntnisse und Folgerungen

Die Versuche zum fahrdynamischen Verhalten bei Absatzüberfahrten zeigen, dass ein dynamisches Fahrwerk, das nach den Konzepten, Modellen und Erkenntnissen aus den Kapiteln 4 und 5 entwickelt worden ist, für den praktischen Einsatz unter schwierigen Bodenbedingungen geeignet ist. Die Messungen und Versuche dieses Kapitels zeigen auch, dass die Realisierung eines mobilen Roboterassistenten trotz der vielseitigen, einschränkenden Anforderungen nach derzeitigem Stand der Technik möglich ist. Die zu Beginn gestellten Anforderungen werden weitgehend erfüllt (Tabelle 6.2).

Bei Fahrzeugen, die bei genügend hoher Geschwindigkeit über Unebenheiten fahren, kann es generell zu starken Aufbaubewegungen und zum kurzfristigen Radabheben kommen. Diese Grenze wurde auch bei dem realisierten Prototypen mit dem letzten Fahrversuch (Schrägfahrt

über 20 mm – Absatz) überschritten. Trotzdem kommt es nicht zum Schleudern oder anhaltenden instabilen Fahrzuständen, sondern die Spur wird weitgehend beibehalten.

Die Nickschwingung ist nur schwach gedämpft, wie die Messung in Bild 6.15 zeigt und was Vor- und Nachteile hat (vgl. Diskussion in Abschnitt 6.3.4). Dies führt auch zu größeren Auslenkungen bei den stoßartigen Anregungen einer Absatzüberfahrt als eine stärkere Dämpfung und ist eher nachteilig. Trotzdem ist die Beobachtung erwähnenswert, dass die Nickschwingung bei gleichzeitiger Anregung der gesamten Fahrdynamik schneller abzuklingen scheint als im Ausschwingversuch (Bild 6.15) und nach ca. 1 bis 2 Maxima optisch kaum wahrnehmbar ist. Der Grund ist, dass es durch den leicht außermittigen Schwerpunkt eine Kopplung zu Wankbewegungen gibt und durch Verformung der großen Gummikörper der Antriebsräder viel kinetische Energie in Wärme umgewandelt wird. Dies ist ein günstiger Nebeneffekt und spricht für einen leicht außermittigen Schwerpunkt.

Mathematische Modelle sollten generell möglichst einfach und nur so komplex wie für die Aufgabenstellung erforderlich sein. Für die Auslegung von Radfahrwerken für diesen Kinematiktyp haben sich die verwendeten vereinfachten ebenen Modelle zwar als ausreichend herausgestellt, allerdings konnten die realen Kopplungen zwischen Nick-, Wank- und Vertikalbewegungen in extremen Fahrsituationen sowie Aufbaubewegungen bei gleichzeitiger und eventuell zeitlich ungünstiger Anregung damit nicht vorhergesagt werden. Obwohl die Auslegung und Realisierung zielführend war, würde man mit räumlichen Modellen bereits in der Entwicklungsphase genauere Aussagen zum dynamischen Verhalten und zu Aufbaubewegungen in extremen Fahrsituationen treffen können.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Mobile Roboterassistenten sind mobile Roboter, die Menschen bei Alltags- und Arbeitsaufgaben unterstützen und entlasten, gefährliche Arbeiten übernehmen und mit Menschen interagieren können. Sie sollen sich in Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen bewegen können. Bisher wurden Forschungsdemonstratoren entwickelt, die starre Radfahrwerke haben.

Im Stand der Technik (Kapitel 2) wurde gezeigt, dass die Radfahrwerke existierender Roboterassistenten und praktisch aller mobilen Roboter starr sind, ebenen, harten Boden benötigen und einen größeren, meist erheblich größeren Platzbedarf zum Manövrieren haben als ein Mensch. Sie sind daher nicht universell in Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen einsetzbar, in denen es Engstellen und verschiedenartige Bodenunebenheiten gibt.

Ziel dieser Arbeit war es daher, zu untersuchen, ob sich Radfahrwerke für mobile Roboterassistenten nicht mit starren, sondern gefederten Radaufhängungen entwickeln lassen, mit denen es möglich ist, Bodenunebenheiten auszugleichen, Stöße und Vibrationen durch Unebenheiten im Fahrweg aufzunehmen und dabei Schleudern oder Kippen unter allen zu erwartenden Fahrsituationen zu verhindern. Ausgangspunkt dieser Untersuchungen sollten die Erkenntnisse zur Fahrdynamik von Straßen- und Schienenfahrzeugen sein, die sich aber nur beschränkt auf Radfahrwerke mobiler Roboterassistenten übertragen lassen. Aufgabe war es daher, grundlegende Erkenntnisse für die Gestaltung von passiv gefederten Radfahrwerken für Roboterassistenten zu erarbeiten und mögliche Realisierungsvarianten abzuleiten, die ein breites Spektrum von Anforderungen potenzieller Einsatzszenarien erfüllen können.

Aus der Analyse (Kapitel 3) der Einsatzszenarien ging hervor, dass wegen der noch hohen Investitionskosten für einen Roboterassistenten erste kommerzielle Anwendungen im gewerblichen Bereich zu erwarten sind, besonders dort, wo der Personaleinsatz teuer oder gefährlich ist. Beispiele sind Stationen und Industrieanlagen in entlegenen oder unwirtschaftlichen Regionen, prozesstechnische Anlagen, Hochseeschiffe, Offshoreanlagen in der Öl- und Gasindustrie und weitläufige Anlagen unterschiedlichster Art, in denen Personal lange Wegstrecken zurücklegen muss. Einige dieser Umgebungen sind gasexplosionsgefährdete Bereiche, die sehr spezielle Anforderungen an technische Ausrüstungen stellen. Die detaillierte Analyse der Umgebungsbedingungen brachte außerdem hervor, dass in allen Alltags- und Arbeitsumgebungen die lichten Mindestdurchgangsbreiten von begehbaren Wegen 600 mm bzw. 800 mm und die Mindesthöhe 1.800 mm sind. Die gemäß gültigen Normen ungünstigsten Bodenunebenheiten sind Rampen mit 7 ° Steigung und Rampengipfel, Absätze mit 20 mm Höhe, spaltförmige Einzelöffnungen bis 42 mm Breite und Gitterrostböden mit 40 mm Tragstabteilung. Daraus und aus weiteren Einsatzbedingungen wurden eine Reihe von Anforderungen an Fahrwerk und Gesamtsystem von mobilen Roboterassistenten abgeleitet.

In der Konzeption (Kapitel 4) wurden Kombinationen aus Grundflächenformen, Rädern, Radaufhängungen und Radanordnungen diskutiert und verglichen. Als eine für die Anforderungen günstige Variante wurde eine kreisförmige Grundfläche mit zwei ungefederten Antriebsrädern

über der Querachse und vorderen und hinteren gefederten Lenkrollen mit Stützfunktion identifiziert. Die Lenkrollen können entweder über der Längsachse der Grundfläche oder symmetrisch links und rechts davon liegen. Sie können passiv oder aktiv gelenkt werden, wobei eine aktive Lenkung Vorteile für Spurtreue und Fahrstabilität bringt. Darüber hinaus wurden weitere Konzepte für die Teilsysteme des Fahrwerks und deren technische Ausgestaltung entwickelt, um das Anforderungsspektrum möglichst umfassend abzudecken.

Die nicht vermeidbare, kritische Eigenschaft dieser Konzepte ist, dass der Roboterassistent viel höher als sein Grundflächendurchmesser sein muss und prinzipielle Kippgefahr bei bestimmten Fahrmanövern und Anregungen der Fahrdynamik durch Bodenunebenheiten besteht. Daher wurde für dieses Fahrwerkskonzept im Folgenden untersucht (Kapitel 5), ob und wie sich unter als extrem angenommenen Anregungen durch Bodenunebenheiten eine stabile Fahrdynamik erreichen lässt. Dazu konnten existierende Ansätze aus der Dynamik von Kraftfahrzeugen nur zum Teil verwendet werden, weiterhin wurden spezifische mechanische Modelle für Teilsysteme des Fahrwerks und für das Gesamtsystem entwickelt. In Simulationen dieser Modelle in mehreren Variationen wurde das Zeitverhalten bei als extrem angenommenen Anregungen der Fahrdynamik durch den Boden und die Antriebe untersucht. Darüber hinaus wurden Berechnungsgrundlagen für die Auslegung dynamischer Fahrwerke und des Antriebsstrangs von Roboterassistenten für die oben ausgewählten Fahrwerkskonzepte entwickelt. Aus der Kombination von Simulationen der Modelle mit in engen Bereichen wählbaren Parametern und den Berechnungsgrundlagen ist es nun möglich, dynamische Fahrwerke von Roboterassistenten mit dem als am geeignetsten identifizierten Fahrwerkskonzept auszulegen. Dieser Entwicklungs- und Auslegungsprozess wurde in einem Vorgehensmodell schematisiert. In einem ergänzenden Unterkapitel wurden visuelle Darstellungen zur Steuerungstheorie mobiler Roboter mit Differenzialkinematik entwickelt und ein existierendes Modell kritisch diskutiert.

Mit den Erkenntnissen aus der Konzeption, den Simulationen zur Fahrdynamik und den Berechnungsgrundlagen zu Fahrwerk und Antriebsstrang wurde schließlich der Prototyp eines mobilen Roboterassistenten mit dynamischem Fahrwerk realisiert. In zahlreichen Messungen und Fahrversuchen (Kapitel 6) wurden die Eigenschaften des Fahrwerks und des Antriebsstrangs untersucht, diskutiert und verifiziert. Damit wurde nachgewiesen, dass die Entwicklung eines Roboterassistenten mit dynamischem Fahrwerk, der in Alltags- und Arbeitsumgebungen des Menschen manövrieren kann, auf Basis der oben entwickelten dynamischen Fahrwerksmodelle und Berechnungsgrundlagen nach derzeitigem Technologiestand möglich ist.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit stehen wesentliche Grundlagen für die Auslegung und Realisierung von Radfahrwerken mit passiver Federung für mobile Roboterassistenten zur Verfügung. Es wurde eine Realisierung durchgeführt, die zwar das Anforderungsspektrum erfüllt, aber nur für die 800 mm breite Referenzpassage ausgelegt wurde und nur gerade die Mindestanforderungen aus den Bodenbedingungen erfüllt. Künftige Realisierungen sollten weiter verbesserte Eigenschaften haben, insbesondere auch für die schmalere Referenzpassage (600 mm) und für größere Bodenunebenheiten geeignet sein. Dabei könnten auch aktiv verstellbare Lenkradfedern und elektronische Stabilitätsprogramme zum Einsatz kommen.

Eine künftige Kommerzialisierung erfordert außerdem die Entwicklung intelligenter Steuerungstechnik mit für die jeweilige Anwendung sinnvollen kognitiven Fähigkeiten und die Integration zu sicheren, zuverlässig funktionierenden und anwendungsspezifischen Gesamtsystemen. Diese Entwicklungsaufgaben sind zwar noch in einem aktiven Forschungsstadium, aber teilweise weit vorgeschritten, so dass sich in wenigen Jahren mobile Roboterassistenten in ersten Anwendungsfeldern etablieren könnten.

## 8 Summary

Mobile robot assistants are a special type of mobile service robots. They are universal in the sense that they are not designed for a specific task, such as floor cleaning. Rather they support humans in various tasks in their everyday life at home and at their workplace. Indeed they are particularly useful for exhausting and hazardous work. Until now, only experimental and research prototypes have been developed, but no clear commercial product breakthrough has yet been made. There are two specific reasons why, at least in part, this is the case. The first is due to the difficulty of overcoming uneven floors, typical of many locations in human environments, because the undercarriage is inflexible. The second is that large footprints and additional space required for turning on the spot makes maneuvering in confined spaces and through narrow passages virtually impossible.

In the state of the art survey, Chapter 2, it was shown that nearly all existing mobile robotic platforms have a rigid undercarriage without suspended wheels. Further, it was found that those that are suitable as a base for robot assistants still require even, solid floor and significantly more space for maneuvering compared to a human. Thus they cannot be used as universal platforms for robot assistants in everyday life environments, where narrow passages, various bumps and gaps are prevalent.

Hence the scope of this thesis was to examine the feasibility of developing undercarriages for mobile robot assistants with suspended wheels in order to compensate for realistic drive surface conditions. Under the limitation of a small footprint and consequently a center of gravity high above ground, it is essential to avoid fishtailing or tipping over at any expected driving situation. To assess such feasibility it was necessary to develop basic knowledge regarding the design of dynamic wheeled undercarriages for robot assistants and to derive possible realization variants which are capable of meeting a broad spectrum of requirements of potential application scenarios.

This spectrum of requirements was developed with a thorough analysis of all relevant fields related to mobile robot assistants as described in Chapter 3. Due to inherently high investment costs that result from the universal nature and interaction capabilities of such robots, first commercial applications can be expected in industry, particularly where there are high costs and hazards for staff assignment. Examples include remote stations and industrial plants, process plants, large ocean-going vessels, offshore installations in oil and gas sector, and spacious plants of any kind where staff must travel long distances between working stations. Some of these work environments are hazardous areas with explosive atmosphere. In such cases, special technical equipment must be used that meet explosion protection standards.

Another result of the analysis was a detailed description of floor conditions and clearances of passageways in everyday life environments at home, in public areas, and in industry. Walkable passages were found to be at least 600 mm or 800 mm in width and 1.800 mm in height. Most

adverse floor conditions according to existing standards are ramps with  $7^\circ$  slope, steps with 20 mm in height, gap openings of 42 mm in width, and gratings with a 40 mm pitch.

In the conceptual phase, detailed in Chapter 4, combinations of footprint geometries, wheels, wheel suspensions, and wheel arrangements were compared and discussed. The variant found to be most able to satisfy all requirements was one with a circular footprint and two unsuspended differential drive wheels, each with soft and thick tires to the left and right. Front and rear support is provided through two smaller suspended wheels or pairs of wheels, which can be either passive or actively steered and located either above the front to rear center-line or symmetrically to the left and right. Active steering may be preferred for good path tracking and good driving stability. Moreover, concepts for essential parts of the undercarriage as well as concepts for how to meet the requirements in the best possible way were developed.

An inherent property of these concepts is that the robot assistant is higher than the diameter of its footprint and consequently the center of gravity is higher above the ground compared to most other vehicles. There always is the danger of tipping over at certain driving situations, particularly when encountering uneven floor. Hence the undercarriage concept developed in Chapter 4 was examined in detail in Chapter 5, with focus of obtaining stable driving dynamics while being stimulated by extreme floor unevenness as identified in Chapter 3. It was found that existing methods and models from classical vehicle dynamics could only be used to a limited extent. As a result, specific mechanical models for subsystems and complete systems were developed. The behaviors of these models were studied in various simulations and for extreme driving situations. Moreover, fundamental methods for dimensioning and designing dynamic undercarriages, drive train, and the complete system mass properties were developed. When combining the simulation results of the models with parameters within limited ranges and the design fundamentals, one is now able to dimension and develop undercarriages for robot assistants that make use of the above selected family of wheel arrangements. For this developing methodology and for engineering of such undercarriages a procedural method was developed. In an additional subchapter, visual representations for existing control theory of mobile robots with differential wheel kinematics were developed and an existing dynamic model of mobile robots was critically discussed.

Based on the presented results of conceptualization, design fundamentals, driving dynamics modeling and simulation a mobile robot assistant prototype with suspended undercarriage was realized for a process plant environment. In Chapter 6, the properties of the developed undercarriage and drive train subsystems were examined through various experimental tests. Thus it was shown that it is possible to develop robot assistants with stable drive dynamics, based on the previously developed models and fundamental design principles, to successfully maneuver in confined everyday life environments at home, in public areas, and in industry.

## 9 Referenzen

- ADA 1994 Code of Federal Regulations. Excerpt from 28 CFR Part 36, Revised as of July 1, 1994: ADA Standards for Accessible Design. U.S. Department of Justice.
- Adachi 2001 Adachi, H.; Koyachi, N.: Development of a Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot and Its Step-Passing Algorithm. In: Proceedings IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, Hawaii, USA, 29. Okt. - 3. November 2001. S. 728-733
- AIBO 2006 SONY Corporation: AIBO support, Sony Entertainment Robots Europe (2006), <http://support.sony-europe.com/aibo/index.asp> (19.3.07)
- Arikawa 1996 Arikawa, K.; Hirose, S.: Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems, IROS 96. 4. - 8. November 1996, Osaka, Japan. Band 1, S. 208-214
- ATRV-JR 2006 Instituto de Sistemas e Robótica, Instituto Superior Técnico, Torre Norte – 6.18 Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa: Produktseite. [rescue.isr.ist.utl.pt/atrvjr.php](http://rescue.isr.ist.utl.pt/atrvjr.php) (15.5.06)  
(Anm.: Hersteller des ATRV-JR war die Fa. iRobot, Produkt und Support abgekündigt)
- B&B 2005 B&B Informationsverlag & Versand: Arbeiten auf Ölbohrinseln – Firmenprofile und Bewerbungsadressen, 5. Auflage, 2005 - Broschüre
- BAnz 149 Verzeichnis der Normen gemäß Verordnung über das Inverkehrbringen von Geräten und Schutzsystemen für explosionsgefährdete Bereiche – Explosionsschutzverordnung, (11. GSGV), Veröffentlicht im Bundesanzeiger Nr. 149 vom 3. August 2002, S. 19030-19031 mit 2. Nachtrag, BAnz Nr. 23 vom 4. Februar 2003, S. 2008
- Bartec 2005 BARTEC GmbH (Linström, H.-J.): Grundlagen Explosionsschutz. 5. überarbeitete Auflage. Bad Mergentheim, 2005 - Firmenschrift
- BauNVO Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke (BauNVO). In der Fassung vom 23. Januar 1990 (BGBl. I 1990, Seite 132), zuletzt geändert am 22. April 1993 (BGBl. I 1993, Seite 466)
- BayBO Bayerische Bauordnung (BayBO). In der Fassung vom 4. August 1997 (GVBl. S. 433, BayRS 2132-1-I), zuletzt geändert am 26. Juli 2005
- Beyer 2005 Beyer, M.: Zur Methode der Zündgefahrenbewertung für explosionsgeschützte nicht-elektrische Geräte. In R. Stahl GmbH: ExZeitschrift 37 (2005), ISSN 0176-2419, S. 74-81
- BGI 588 Berufsgenossenschaftliches Merkblatt BGI 588: Merkblatt für Metallroste, Januar 1996

- BGR 181 Berufsgenossenschaftliche Regel BGR 181: Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr. Aktualisierte Fassung Oktober 2003
- Bischoff 2004 Bischoff, R.; Graefe, V.: HERMES – a Versatile Personal Robotic Assistant. In: Proceedings of the IEEE 92 (2004), Nr. 11, S. 1759-1779
- Bloch 2003 Bloch, A. M. (in Zus.-Arb. mit Baillieul, J.; Crouch, P.; Marsden, J.): Nonholonomic Mechanics and Control. New York: Springer, 2003
- Bluebotics 2006 BlueBotics SA, PSE-C, CH-1015 Lausanne, Schweiz: Custom developments & standard products (2006), [www.bluebotics.com/solutions](http://www.bluebotics.com/solutions) (15.1.06)
- Bosch 1995 Robert Bosch GmbH (Hrsg.): Kraftfahrtechnisches Handbuch. 22. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995
- Breckweg 2006 Breckweg, Achim; Meyer, Christian: Assistenzroboter für die Produktion. Stand der Technik – Herausforderungen – Potenziale. Ergebnisse einer Umfrage des Fraunhofer IPA. Stuttgart, 2005 – Firmenschrift
- Brown 2006 Brown, Malcolm: Refineries of the Future. In: Frontiers, the BP magazine of technology and innovation 15 (2006), S. 12-17
- Care-O-bot 2003 Fraunhofer IPA: Care-O-bot mobile Roboter (2003), <http://www.care-o-bot.de/index.php> (20.3.07)
- CEAG 2004 Cooper Crouse-Hinds GmbH: Grundlagen Explosionsschutz. Druckschrift Nr. 1213/6/04.04/SD Scholz Druck und Medienservice, Dortmund, 2004
- Christaller 2001 Christaller, T.; Decker, M.; Gilsbach, J.-M.; Hirzinger, G.; Lauterbach, K.; Schweighofer, E.; Schweitzer, G.; Sturma, D.: Robotik. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2001 (Wissenschaftsethik und Technologiefolgenbeurteilung; Bd. 14)
- CMU 1997 Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, USA: The Atacama Desert Trek with the NOMAD robot (1997), [www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/lri-13/www/atacamatrek](http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/lri-13/www/atacamatrek) (15.7.06)
- Crook 2001 Crook, J.: Fieldbus goes offshore. In: IEE Review 47 (2001), Nr. 4, S. 31-34
- Cyclops 2007 Deltic Group Inc., Oakville, Ontario, Kanada: Cyclops ROV (2007), <http://www.delticgroup.com/CyclopsROV.htm>, (25.4.07)
- Damoto 2002 Damoto, R.; Hirose, S.: Development of Holonomic Omnidirectional Vehicle "Vuton-II" with Omni-Discs. In: Journal of Robotics and Mechatronics 14 (2002), Nr. 2, S. 186-192, Tokyo: Fuji Technology Press
- Dario 1999 Dario, P.; Guglielmelli, E.; Laschi, C.; Teti, G.: MOVAID: a personal robot in everyday life of disabled and elderly people. In: Technology and Disability 10 (1999), Nr. 2, S. 77-93
- Diegel 2002 Diegel, O.; Potgieter, J.; Badve, A.; Bright, G.; Tlale, S.: Improved Mecanum Wheel Design for Omni-Directional Robots. In: Friedrich, Werner; Lim, Patrick

(Hrsg.): Australasian Conference on Robotics and Automation, 27. bis 29. November 2002, Auckland, Neuseeland. Auckland: 2002, S. 118-121

- DIN 1229 Normentwurf DIN 1229 2006-06: Aufsätze und Abdeckungen für Verkehrsflächen - Sicherung des Deckels und Rostes im Rahmen
- DIN 1253-1 Norm DIN 1253-1 2003-09: Abläufe für Gebäude, Teil 1: Anforderungen
- DIN 15309 Norm DIN 15309 2002-12: Aufzüge. Personenaufzüge für andere als Wohngebäude sowie Bettenaufzüge. Baumaße, Fahrkorbmaße, Türmaße
- DIN 18024-1 Norm DIN 18024 Teil 1 1998-01: Barrierefreies Bauen, Teil 1: Straßen, Plätze, Wege, öffentliche Verkehrs- und Grünanlagen sowie Spielplätze. Planungsgrundlagen
- DIN 18024-2 Norm DIN 18024 Teil 2 1996-11: Barrierefreies Bauen, Teil 2: Öffentlich zugängliche Gebäude und Arbeitsstätten. Planungsgrundlagen
- DIN 18025-1 Norm DIN 18025 Teil 1 1992-12: Barrierefreie Wohnungen, Teil 1: Wohnungen für Rollstuhlbenutzer. Planungsgrundlagen
- DIN 18025-2 Norm DIN 18025 Teil 2 1992-12: Barrierefreie Wohnungen, Teil 2. Planungsgrundlagen
- DIN 18030 Normentwurf DIN 18030 2006-01: Barrierefreies Bauen. Planungsgrundlagen
- DIN 18101 Norm DIN 18101 1985-01: Türen für den Wohnungsbau. Türblattgrößen, Bandsitz und Schloßsitz, gegenseitige Abhängigkeit der Maße
- DIN 18202 Normentwurf DIN 18202 2004-11: Toleranzen im Hochbau – Bauwerke
- DIN 18225 Norm DIN 18225 1988-06: Industriebau. Verkehrswege in Industriebauten
- DIN 24537-1 Norm DIN 24537 Teil 1 2006-04: Roste als Bodenbelag – Teil 1: Gitterroste aus metallischen Werkstoffen
- DIN 51130 Norm DIN 51120 2004-06: Prüfung von Bodenbelägen – Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft - Arbeitsräume und Arbeitsbereiche mit Rutschgefahr, Begehungsverfahren - Schiefe Ebene
- DIN 66095-4 Norm DIN 66095 Teil 4 1988-06: Textile Bodenbeläge. Produktbeschreibung. Zusatzezeichnungen - Einstufung, Prüfung, Kennzeichnung
- DIN 70000 Norm DIN 70000 1994: Straßenfahrzeuge: Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten – Begriffe
- DIN 83204 Norm DIN 83204 2002-08: Treppen und Geländer in Maschinen- und Kesselräumen von Seeschiffen. Grundsätzliche Anforderungen
- DIN 83221 Norm DIN 83221 2006-07: Laufgänge für Maschinen- und Kesselräume in Schiffen
- DIN EN 124 Norm DIN EN 124 1994-08: Aufsätze und Abdeckungen für Verkehrsflächen - Baugrundsätze, Prüfungen, Kennzeichnung, Güteüberwachung

- DIN EN 12531 Norm DIN EN 12531 1999-05: Räder und Rollen. Krankenbettenrollen
- DIN EN 13463-1 Norm-Entwurf , 2007-05: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Teil 1: Grundlagen und Anforderungen
- DIN EN 60721-3-5 Norm DIN EN 60721 Teil 3 Hauptabschnitt 5 1998-06: Klassifizierung von Umweltbedingungen - Teil 3: Klassen von Umweltgrößen und deren Grenzwerte. Hauptabschnitt 5: Einsatz an und in Landfahrzeugen
- DIN EN ISO 14738 Norm DIN EN ISO 14738 2005-03: Sicherheit von Maschinen – Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen
- DIN V 19580 Vornorm DIN V 19580 2003-04: Entwässerungsrinnen für Verkehrsflächen - Witterungsbeständigkeit, Einheitsgewicht und Fremdüberwachung
- DIN V 45696-1 Vornorm DIN V 45696 Teil 1 2006-02: Ganzkörper-Schwingungen - Leitfaden zur Verringerung der Gefährdung durch Schwingungen - Teil 1: Technische Maßnahmen durch die Gestaltung von Maschinen
- Ebetiuc 2006 Ebetiuc, S.; Staab, H.: Geometric Approach to Kinematic Modeling in Mobile Robotics. In: WSEAS Transactions on Systems 5 (2006), Nr. 1, S. 33-40
- Elbl 2001 Elbl, H.; Föll, W.; Schüler, W.: Tabellenbuch Fahrzeugtechnik. 21. Aufl. Stuttgart: Holland + Josenhans Verlag, 2001
- EMIEW 2006 Hitachi Ltd.: Mechanical Engineering Research Laboratory - Hitachi's robot "EMIEW" (2006), <http://www.hqrd.hitachi.co.jp/merle/emiew.cfm> (20.3.2007)
- EN 1127-1 Norm EN 1127 Teil 1: 1997: Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz, Teil 1: Grundlagen und Methodik
- EN 12526 Norm EN 12526 1998-09: Räder und Rollen: Vokabular, empfohlene Formelzeichen und mehrsprachiges Wörterbuch
- EN 1755 Norm EN 1755 2000: Sicherheit von Flurförderzeugen; Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen – Verwendung in Bereichen mit brennbaren Gasen, Dämpfen, Nebeln oder Stäuben
- EN 547-1 Norm EN 547 Teil 1 1996: Sicherheit von Maschinen; Körpermaße des Menschen, Teil 1: Grundlagen zur Bestimmung von Abmessungen für Ganzkörper-Zugänge an Maschinenarbeitsplätzen
- EN 547-3 Norm EN 573 Teil 3 1996: Sicherheit von Maschinen; Körpermaße des Menschen, Teil 3: Körpermaßdaten
- EN ISO 14122-1 Norm EN ISO 14122 Teil 1 2002-01: Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen, Teil 1: Wahl eines ortsfesten Zugangs zwischen zwei Ebenen
- EN ISO 14122-2 Norm EN ISO 14122 Teil 2 2002-01: Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen, Teil 2: Arbeitsbühnen und Laufstege
- EN ISO 14122-3 Norm EN ISO 14122 Teil 3 2002-01: Ortsfeste Zugänge zu maschinellen Anlagen, Teil 3: Treppen, Treppenleitern und Geländer

- EN ISO 3796 Norm EN ISO 3796 1999-10: Schiffe und Meerestechnik – Lichte Öffnungen für einflügelige Außentüren
- EURON 2007 European Robotics Research Network: Robot Gallery (2007), <http://www.euron.org/resources/robotgallery.html> (19.3.07)
- FhG-IPA 1994 Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) (Hrsg.): Serviceroboter – ein Beitrag zur Innovation im Dienstleistungswesen. Stuttgart: September 1994
- Fleiss 2006 Fleiss, R.: Berechnung und Gestaltung von Gummifedern. In: Konstruktion 6 (2006), S. 83-90
- Fritzsche 2005 Fritzsche, R.; Gaus, H.: Explosionsschutz an Flurförderzeugen – Juristisch/Technische Betrachtung. Fa. Miag Fahrzeugbau GmbH, Braunschweig, 2005 – Merkblatt
- Gehring 2000 Gehring, Hagen R.: Verfahren zur Steigerung der Mobilität von teleoperierten kettenbasierten Manipulatorfahrzeugen. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2000 (IPA-IAO Forschung und Praxis; 309). Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Diss., 2003
- Genta 2000 Genta, G.; Amati, N.; Chiaberge, M.; Miranda, E.; Reyneri, L. M.: WALKIE 6-A Walking Rover Demonstrator for Planetary Exploration. In: Space Forum 5 (2000), Nr. 4, S. 259-277
- Götte 2002 Götte, Thomas: Prüfung und Bewertung der Rutschhemmung von Bodenbelägen vor Ort. Berufsgenossenschaft für den Einzelhandel, Bonn, 2002 - Firmenschrift
- Graefe 2003 Graefe, V.; Bischoff, R.: Past, present and future of intelligent robots. In: IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. 16. bis 20 Juli 2003, Kobe, Japan. Piscataway NJ: IEEE Operations Center, 2003, Vol. 2, S. 801-810
- Graf 2004 Graf, B.; Hans, M.; Schraft, R. D.: Mobile robot assistants. In: IEEE Robotics & Automation Magazine 11 (2004), Nr. 2, S. 67-77
- Gupta 2006 Gupta, S.: Automation – Altering the Visage of the Oil Industry. In: IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 13.-15. November 2006, Bangkok, Thailand
- Hägele 2001 Hägele, Martin; Neugebauer, Jens; Schraft, Rolf-Dieter: From Robots to Robot Assistants. In: ISR 2001 Proceedings of the 32<sup>nd</sup> International Symposium on Robotics in conjunction with IMS 2001. 19. bis 21. April 2001, Seoul, Korea. Vol. 1, S. 404-409
- Hamel 2003 Hamel, William R.: Intersection between Telerobotics and Assistive Robotics. In: Armanda, M.; González de Santos, P. (Hrsg.): Proceedings Service, Assistive and Personal Robots. 3<sup>rd</sup> IARP International Workshop, 14. bis 16. Oktober 2003, Madrid, Spanien, S. 35-45

- Hans 2005 Hans, Matthias: Eine modulare Kontrollarchitektur für den Hol- und Bringdienst von Roboterassistenten. Heimsheim: Jost Jetter Verlag, 2005. Stuttgart, Univ., Fak. Maschinenbau, Diss., 2005
- Helms 2003 Helms, E.: Assistor - Assistierende, interaktive und sicher im industriellen Umfeld agierende ortsflexible Roboter. In: Schraft, Rolf-Dieter (Hrsg.) u.a.: OTS-Systeme in der Robotik. 2. Workshop, 24. Juni 2003, Stuttgart. Stuttgart: FpF – Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2003, S. 87-102
- HERO 2002 Robert L. Doerr: Robotgallery – preserving the History of Robots (2002), <http://www.robotswanted.com/robotgallery/healthkit/index.html> (19.3.07)
- Hirose 1995 Hirose, S.; Takeuchi, H.: Roller-Walker: A Proposal of New Leg-Wheel Hybrid Mobile Robot. In: Proceedings of the 7th International Conference on Advanced Robotics, ICAR'95, (UPC, ISBN 84-7653-576-7), Sant Feliu de Guixols, Spanien, 1995. S. 917-922
- Holmberg 2000 Holmberg, Robert; Khatib, Oussama: Development and Control of a Holonomic Mobile Robot for Mobile Manipulation Tasks. In: The International Journal of Robotics Research 19 (2000), Nr. 11, S. 1066-1074
- IAI 2000 International Aluminium Institute: Aluminium Smelting (2000), <http://www.world-aluminium.org/production/smelting/index.html> (3.4.2007)
- iBot 2006 Independence Technology, Endicott, NY 13760, USA: Produktseite (2006), <http://www.ibotnow.com/ibot/index.html> (15.11.06)
- IEC60079-0 Norm IEC 60079-0:2004: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 0: Allgemeine Bestimmungen
- IEC60079-1 Norm IEC 60079-1:2004: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 1: Druckfeste Kapselung d
- IEC60079-2 Norm IEC 60079-2:2004: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 2: Überdruckkapselung p
- IEC60079-7 Norm IEC 60079-7:2004: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 7: Erhöhte Sicherheit e
- IEC60079-10 Norm IEC 60079-10:2004: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 10: Klassifizierung explosionsgefährdeter Bereiche
- IEC60079-11 Norm IEC 60079-11:2004: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 11: Erhöhte Sicherheit i
- IEC60079-15 Norm IEC 60079-15:2004: Elektrische Betriebsmittel für gasexplosionsgefährdete Bereiche, Teil 15: Zündschutzart n
- iRobot 2006 iRobot Corp., 63 South Avenue, Burlington, MA 01803, USA: Hauptseite (2006), <http://www.irobot.com> (15.11.06)

- Klaaßen 2004 Klaaßen, B.; Delipetkos, E.; Hertzberg, J. u.a.: Landbasierte mobile Roboter - Stand der Technik und Trends. Hrsg.: Fraunhofer-Institut für Naturwissenschaftliche Trendanalysen (INT), Appelsgarten 2, Euskirchen, Juni 2004
- Kohlhepp 2002 Kohlhepp, Peter; Bretthauer, Georg: Cooperative Service Robots for the Predictive Maintenance of Process Plants. In: Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Schmucker, Ulrich (Hrsg.): Autonomous and Mobile Systems. Internationales Kolloquium, 25. und 26. Juni 2002, Magdeburg. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2002, S. 53-60
- Kortüm 1994 Kortüm, W.; Lugner, P.: Systemdynamik und Regelung von Fahrzeugen. Berlin u.a.: Springer, 1994
- LABO-4 2007 Applied AI Systems Inc.: LABO-4, High Payload Intelligent Mobile Robot (2007), <http://www.aai.ca/robots/lab04.html> (29.04.07)
- Logitrans 2006 Logitrans A/S, Dänemark: Produktseiten für explosionsgeschützte Hubwagen und Palettenheber (2006), <http://www.logitrans.com/Produkte.aspx> (15.3.06)
- Mandow 1996 Mandow, A.; Gomez-de-Gabriel, J. M.; Martinez, J. L.; Munoz, V. F.; Ollero, A.; Garcia-Cerezo, A.: The autonomous mobile robot AURORA for greenhouse operation. In: IEEE Robotics & Automation Magazine (1996), Nr. 3, Issue 4, S. 18-28
- Marwede 2006 Marwede, J., Gamechanger, Shell International Exploration & Production, Bellaire Technology Center, Huoston, USA. Gespräch über die Kosten von Exploration und Produktion in der Ölindustrie, Stuttgart, 23.06.2006, 16:00h
- MBO Musterbauordnung (MBO). In der Fassung vom 16. Oktober 2002
- MerlinRobotics 2005 Merlin Systems Corp. Ltd.: Produktseiten für Educational Robots (2005), <http://www.merlinrobotics.co.uk/merlinrobotics/> (19.3.07)
- MetraLabs 2006 MetraLabs GmbH, Ehrenbergstraße 11, 98693 Ilmenau: Research robots and robottuning, <http://www.metralabs.com/de/rtindex.html> (15.11.06)
- MIAG 2006 MIAG Fahrzeugbau GmbH: Produktseite für explosionsgeschützte Flurförderzeuge (2006), <http://www.miag.de/Produkte/produkte.html> (15.3.06)
- Michaud 2003 Michaud, F.; Letourneau, D.; Arsenaault, M.; Bergeron, Y.; Cadrin, R.; Gagnon, F.; Legault, M.-A.; Millette, M.; Pare, J.-F.; Tremblay, M.-C.; Lapage, P.; Morin, Y.; Bisson, J.; Caron, S.: AZIMUT, a leg-track-wheel robot. In: Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems IROS 2003, Vol. 3. 27.-31. Oktober 2003, Las Vegas, Nevada, USA. S. 2553-2558
- Mitschke 2004 Mitschke, Manfred; Wallentowitz, Henning: Dynamik der Kraftfahrzeuge. 4. Aufl. Berlin u.a.: Springer, 2004
- MobileRobots 2006 MobileRobots Inc., 19 Columbia Drive, Amherst, NH 03031 USA: Intelligent mobile robot packages, systems & bases (2006), [www.activrobots.com/ROBOTS/index.html](http://www.activrobots.com/ROBOTS/index.html), (15.11.06)

- Montforte 2001 Montforte, J. C.: Geometric, control and numerical aspects of nonholonomic systems. Madrid, University Carlos III, Diss. 2001
- Muñoz 1994 Muñoz, V.; Martínez, J. L.; Ollero, A.: Navigation with Uncertain Position Estimation in the RAM-1 Mobile Robot. In: Artificial Intelligence in Real Time Control ARTIC (1995), S. 215-219
- Murray 1994 Murray, R. M.; Li, Z.; Sastry, S. S.: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. Boca Raton, New York: CRC Press, 1994
- Murray 1997 Murray, Richard M.: Nonlinear Control of Mechanical Systems: A Lagrangian Perspective. In: Annual Reviews in Control (1997), Nr. 21, S. 31-45
- Neobotix 2006 GPS GmbH, Stuttgart: Multifunktionsroboter "MX-500", <http://www.neobotix.de/de/products/MX-500.html> (15.10.06)
- Nguyen 2004 Nguyen, H. G.; Morrell, J.; Mullens, K.; Burmeister, A.; Miles, S.; Farrington, N.; Thomas, K.; Gagee, D. W.: Segway Robotic Mobility Platform. In: Gage, W. D. (Hrsg.): SPIE Proceedings Vol. 5609, Mobile Robots XVII. Conference, 27.-28. Oktober 2004, Philadelphia, PA, USA. S. 207-220
- OPL-NFDG North Sea Field Development Guide, 10<sup>th</sup> Edition, Offshore Publications Limited, ISBN: 1-902157-63-X.
- OPL-WOFD-V1 World Offshore Field Development Guide Series – Volume 1: Mediterranean, Middle East & Africa, Offshore Publications Limited, ISBN: 1-902157-48-6
- OPL-WOFD-V2 World Offshore Field Development Guide Series – Volume 2: Asia, India, Australasia & Far East, 5<sup>th</sup> Edition, Offshore Publications Limited, ISBN: 1-902157-68-0
- OPL-WOFD-V3 World Offshore Field Development Guide Series – Volume 3: The Americas, 4<sup>th</sup> Edition, Offshore Publications Limited, ISBN: 1-902157-52-4
- OPL-WOFD-V4 World Offshore Field Development Guide Series – *Volume 4: The Caspian Region*, 1<sup>st</sup> Edition, Offshore Publications Limited, ISBN: 1-902157-59-1
- Ostrowski 1998 Ostrowski, J. P.; Burdick, J. W.: The Geometric Mechanics of Undulatory Robotic Locomotion. In: International Journal of Robotics Research (1998), Nr.17, S. 683-702
- Ota 2001 Ota, Y.; Yoneda, K.; Ito, F.; Hirose, S.; Inagaki, Y.: Design and Control of 6-DOF Mechanism for Twin-Frame Mobile Robot. In: Journal of Autonomous Robots 10 (2001), Kluwer Academic Publishers, Niederlande, S. 297-316
- Otis 2006 Praxair Services Inc., 9115-K Whiskey Bottom Rd, Laurel, MD 20723, USA: Produktseite Tankreinigungsroboter (2006), <http://www.intank.com/web/robots/otis/default.htm> (15.5.06)
- PaPeRo 2006 NEC Corporation: Personal Robot Research Center (2006), [http://www.incx.nec.co.jp/robot/english/robotcenter\\_e.html](http://www.incx.nec.co.jp/robot/english/robotcenter_e.html) (19.3.07)

- PC-Bot 2007 White Box Robotics Inc.: Produktseite für den mobilen Roboter 914 PC-Bot (2007), <http://www.whiteboxrobotics.com/PCBOTS/index.html> (19.3.07)
- Popp 1993 Popp, K.; Schiehlen, W.: Fahrzeugdynamik. Stuttgart: Teubner, 1993
- Raposa 2006 IdMind, Edificio Empresarial 3, Polo Tecnologico de Lisboa, Estrada do Paco do Lumiar, 1600-546 Lisboa, Portugal: Service Robotics – Raposa (2006), <http://www.idmind.pt/en/service/Raposa.php> (15.11.06)
- RB5X 2007 General Robotics Corporation: Produktseite RB5X (2007), [http://www.generalrobotics.com/g\\_home.html](http://www.generalrobotics.com/g_home.html) (19.3.07)
- Remotec 2006 Northrop-Grumman Corp., USA: Remotec Products (2006), <http://www.es.northropgrumman.com/remotec/products.htm>, (10.10.06)
- RoboCleaner 2004 Alfred Kärcher Vertriebs-GmbH: Produktseite für den Robo Cleaner RC 3000 (2004), <http://www.robocleaner.de/german/work1.html> (19.3.07)
- Robomow 2007 Friendly Robotics Inc.: Produktseite für den autonomen Rasenmäher Robomow® (2007), <http://www.friendlyrobotics.com/robomow/> (17.3.07)
- RoboProbe 2006 RoboProbe Technologies Inc., Palatine, Illinois 60078, USA: M5-A Scout (2006), [http://www.roboprobe.com/PRODUCTS/P90-KT\\_SCOUT-ROBOT.html](http://www.roboprobe.com/PRODUCTS/P90-KT_SCOUT-ROBOT.html) (15.11.06)
- Robosoft 2006 Robosoft, Technopole d'Izarbel, 64210 Bidart, Frankreich: Mobile Platforms Roburoc (2006) [www.robosoft.fr](http://www.robosoft.fr) (20.5.2007)
- RobovieR 2004 ATR Intelligent Robotics and Communication Laboratories: Robovie R ver.2 Produktseite (2004), <http://www.irc.atr.jp/productRobovie/robovie-r2-e.html> (21.3.07)
- Roman 1991 Roman, Harry T.: Robots Cut Risks and Costs in Nuclear Power Plants. In: IEEE Computer Applications in Power 4 (1991), Nr. 3, S. 11-15
- Rosen 1966 Rosen, C. A.; Nilsson, N. J.: Application Of Intelligent Automata to Reconnaissance. Technical Report. Stanford Research Institute, November 1966. Note: Project 5953 Interim Report 1, From the Nilsson archives – SHAKEY papers
- Sano 2006 Sano Transportgeräte GmbH, Am Holzpoldlgut 22, 4040 Lichtenberg / Linz, Österreich: Homepage (2006), [www.sano-treppensteighilfe.com](http://www.sano-treppensteighilfe.com) (15.9.06)
- Schempf 1995 Schempf, H.; Chemel, B.; Everett, N.: Neptune: above-ground storage tank inspection robot system. In: IEEE Robotics & Automation Magazine, Volume 2, Issue 2 (1995), S. 9-15
- Schmierer 2001 Schmierer, G.: Ein modulares Baukastensystem für Kletterroboter nach dem Gleitrahmenprinzip. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag, 2001. Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions- und Fertigungstechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss., 2001

- Schraft 1998 Schraft, R. D.; Schmierer, G.: Serviceroboter – Produkte, Szenarien, Visionen. Berlin, Heidelberg, New-York: Springer, 1998
- Schraft 2003 Schraft, R. D.; Helms, E.: rob@work - robot assistant in industrial environments. In: Automatisierungstechnische Praxis 45 (2003), Nr. 2, S. 67-72
- Schraft 2004 Schraft, R. D.; Hägele, M.; Wegener, K.: Service Roboter Visionen. München, Wien: Hanser-Verlag, 2004
- Schwedt 2006 Schwedt, K.-H.: Das IECEx-Schema. In: Technische Überwachung, Band 47, Ausgabe 3-2006. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2006, S. 12-17
- Sichelschmid 2006 Sichelschmid GmbH: Produktseiten von explosionsgeschützten Flurförderzeugen (2006), <http://www.sichelschmid.de/> (15.3.06)
- SolexRobotics 2006 Solexrobotics Inc., Houston, TX, USA: Produktseiten (2006), <http://www.solexrobotics.com> (15.11.06)
- Spenneberg 2002 Spenneberg, D.; Kirchner, F.: SCORPION: A biomimetic walking robot. In: Dillmann, R.; Schraft, R. D.; Wörn, H. (Hrsg.): Robotik 2002: Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends. Tagung Ludwigsburg, 19. und 20. Juni 2002, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002 (VDI-Berichte 1679), S.677-682
- STAHL 1998 R. Stahl Schaltgeräte GmbH: Explosionsschutz-Grundlagen. Druckschrift Nr. S-SD-02-D-12/98 scanner GmbH, Künzelsau, 1998
- STAHL 2000 R. Stahl Schaltgeräte GmbH: Pflichten und Aufgaben für Betreiber von elektrischen Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen. Druckschrift Nr. S-SD-03-D-04/00, scanner GmbH, Künzelsau, 2000
- STAHL 2004 R. Stahl Schaltgeräte GmbH, Waldenburg: Grundlagen Staubexplosionsschutz. Druckschrift Nr. S-PB-staubex-00-de-04, VISUELL, Stuttgart, 2004
- Stairrobot 2006 AATA international B.V., Kerkstraat 79, 2377 AX Oude Wetering, The Netherlands: Homepage (2006), [www.stairrobot.com](http://www.stairrobot.com) (15.9.06)
- Tanner 2003 Tanner, R. K.; Boyce, G.; Quarini, J.; Head, P.; Dick, J.: Technology Transfer into the Offshore Oil and Gas Industry. In: Society of Petroleum Engineers: Offshore Europe. 2. bis 5. September 2003, Aberdeen, Grossbritannien. Paper-Nr.: 83984-MS
- Uchida 1999 Uchida, Y.; Furuichi, K.; Hirose, S.: Fundamental Performance of a 6 Wheeled off-road Vehicle HELIOS-V. In: Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, USA, Mai 1999. S. 2336-2342
- UNECE 2005 United Nations Economic Commission for Europe, International Federation of Robotics: World Robotics: Statistics, Market Analysis, Case Studies And Profitability of Robot Investment, 2005. Genf: United Nations Publication 2005
- US5440916 1995 Schutzrecht US 5,440,916 (1995-08-15), National Aeronautics and Space Administration NASA, USA

- US5515934 1996 Schutzrecht US 5,515,934 (1996-05-14), Stuart D. Davis, Santa Clara, CA, USA
- US6068073 2000 Schutzrecht US 6,068,073 (2000-05-30), Cybernet Systems Corporation, Ann Arbor, Michigan, USA
- USACE-CW 1999 United States Army Corps of Engineers – Civil Works: ESTIMATED US FLAG TANKER COSTS: DOUBLE HULL (FY99 PRICE LEVELS) (1999), <http://www.usace.army.mil/cw/cecw-cp/library/egms/egm99-05g.pdf> (3.4.2007)
- VDI 2686 Norm VDI 2686 1993-12: Anforderungen der Lagertechnik an die Baukonstruktion
- Volosyak 2005 Volosyak, I.; Ilev, O.; Gräser, A.: Rehabilitation Robot FRIEND II - The General Concept and Current Implementation. In: Proc. of IEEE 9th Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, Chicago, IL, USA, 28. Juni – 1. Juli 2005, S. 540-544
- Wakamaru 2005 Mitsubishi Heavy Industries Ltd.: Life with a robot – Wakamaru (2005), <http://www.mhi.co.jp/kobe/wakamaru/english/index.html> (20.3.07)
- Westkämper 2007 Westkämper, Engelbert (Hrsg.); Verl, Alexander (Hrsg.); Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Fahrerlose Transportsysteme (FTS) und mobile Roboter. Tagung Stuttgart, 25. April 2007. Stuttgart: FpF – Verein zur Förderung produktionstechnischer Forschung, 2007
- Wiedemann 2000 Wiedemann, Jochen: Road Simulation Requirements and Techniques. In: Wiedemann, Jochen; Hucho, Wolf-Heinrich (Hrsg.): Progress in Vehicle Aerodynamics – Advanced experimental Techniques. Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 2000, S. 48 - 63
- Willumeit 1998 Willumeit, Hans-Peter: Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik. Stuttgart, Leipzig: Teubner, 1998
- Wolter 2004 Wolter, M.; Kaci, V.: Condition Monitoring für Offshore Bohrplattformen in der Erdöl- und Erdgasindustrie. In: Seeliger, A.; Burgwinkel, P. (Hrsg.): Aachener Kolloquium für Instandhaltung, Diagnose und Anlagenüberwachung AKIDA. 5. Kolloquium, 8. und 9. November 2004, Aachen. Aachener Beiträge zur angewandten Rechnertechnik Bd. 46., Aachen: Verlag Mainz, 2004
- Worst 2005 Worst, R.; Surmann, H.; Christaller, T.: Erkundung unzugänglicher Bereiche mit mobilen Robotern. In: Busch, W.; Maas, K.; Meier, G.; Sroka, A.; Löbel, K.-H.; Klapperich, H.; Tondera, D. (Hrsg.): 5. Altbergbau-Kolloquium, TU Clausthal, 3.-5. November 2005, S. 90 - 99
- WSR 2007 World Shipping Register: Datenbankabfrage (2007), <http://www.world-register.org/ships.htm> (25.3.2007)
- Ylönen 2002 Ylönen, S. J.; Halme, A. J.: WorkPartner – Centaur like Service Robot. In: Proc. IEEE/RJS Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems IROS 2002, Vol. 1. 30. Sep. - 4. Okt. 2002, Zürich. S. 727-733

