

Sicherheit mobiler Roboter

Safety of Mobile Robots

Jürgen Adamy und Peter Bechtel

In der mobilen Robotik sind in Zukunft viele Anwendungen wie z. B. Reinigungs- und Transportaufgaben denkbar, die verglichen mit Industrierobotern viel höhere Sicherheitsanforderungen stellen. Dies liegt an der größeren erforderlichen Autonomie dieser Systeme und dem direkten Kontakt mit Menschen. Es ist daher nötig, Konzepte zu entwickeln, um die sichere Funktion von mobilen Robotern zu gewährleisten, wenn diese einsetzbar sein sollen. Ziel dieser Arbeit ist es, für verschiedene Typen von mobilen Robotern die typischen Gefährdungen herauszuarbeiten, sowie grundlegende Sicherheitsstrukturen und Anforderungen für den Einsatz zu beschreiben.

In future mobile robots are most likely to serve as e. g. cleaning or transport aids. Compared to industrial robots this causes much stricter safety requirements due to increased autonomy and direct contact to persons. Obviously, concepts guaranteeing the safe function of mobile robots are to be developed. In this work specific hazards, possible safety solutions and requirements for the applications for different types of mobile robots are presented.

Schlagwörter: Mobile Roboter, Sicherheit, Verlässlichkeit, Unfall

Keywords: Mobile robots, safety, reliability, accident

1 Einleitung

Derzeit werden kommerzielle mobile Roboter hauptsächlich für Flächenreinigungsaufgaben [22; 51] und Transportaufgaben [23] sowie als Informationsroboter [8; 39] verwendet. Je nach Aufgabentyp und weiteren Einflussfaktoren birgt der Einsatz spezifische Gefahren für Personen, Sachen und den Roboter selbst. Ein wichtiges Ziel ist es, wie bei allen technischen Geräten, während des Betriebs Sicherheit zu gewährleisten, d. h. Schäden durch den Betrieb des Roboters auszuschließen. Das bedeutet, dass Gefahren erkannt werden müssen und eine geeignete Reaktion erfolgen muss.

Umfangreiche Sicherheitsuntersuchungen und spezielle Methoden existieren vor allem in technischen Bereichen, in denen entweder sehr schwerwiegende Schäden möglich sind und/oder Schäden sehr häufig auftreten, wie z. B. in der Kerntechnologie [26], der Raum- und Luftfahrt [7] oder auch im Straßenverkehr [25]. Allgemein abgefasste Lehrbücher zur Sicherheit [34; 58], Zuverlässigkeit [4; 5; 10] und Risikoanalyse [50] orientieren sich daher häufig ebenfalls an diesen Bereichen. Außerdem existie-

ren Arbeiten zu Methoden zur Gefahrenanalyse [38; 41], z. B. Fehlerbaum- und Ereignisbaumanalysen. Daneben gibt es eine Reihe von Normen [13–19; 33] und Richtlinien [44; 48], die für alle neu entwickelten Geräte einzuhalten sind und Sicherheitsmindeststandards garantieren sollen.

In der Robotik findet man speziellere Informationen in [3; 11; 12], die sich jedoch ausschließlich auf Industrieroboter beziehen. Entsprechende allgemeine Überlegungen zur Sicherheit mobiler Roboter existieren bisher nicht oder nur in Ansätzen [30; 60]. Dies mag daran liegen, dass derzeit zum einen für mobile Roboter häufig Grundlagenforschung ohne konkrete Anwendung betrieben wird. Zum anderen kann die Sicherheit bei Industrierobotern getrennt von der Funktion betrachtet werden und ist daher nicht Gegenstand der Forschung. In [9] findet sich eine Beurteilung der ethischen Auswirkungen des Einsatzes von Service Robotern.

Bei kommerziellen Robotern in der menschlichen Arbeitswelt oder im Privatbereich ist aufgrund der selbständig vorgenommenen Aktionen von autonomen mobilen Robo-

tern ein sehr hohes Sicherheitsniveau des Systems erforderlich. Bei Industrierobotern verhält es sich ähnlich, jedoch wird die Sicherheit durch die in der Praxis übliche strikte Trennung der Arbeitsräume von Mensch und Maschine erreicht. Da mobile Serviceroboter im Aufenthaltsbereich von Menschen arbeiten sollen, sind bei der Handlungsausführung Sicherheitsanforderungen untrennbar mit der Funktion verbunden.

Ansatzweise werden bei sicherheitskritischen Anwendungen Sicherheitsanforderungen beschrieben, z. B. sind dies Arbeiten zu autonomen Baggern [52–54; 57] und die Arbeit von Rachkov [43], die sich mit Kletterrobotern befasst. Des Weiteren sind autonome Rollstühle [36; 40; 42], extraterrestrische Roboter [27; 61; 62] und Human Care Robots [30] sicherheitskritische Anwendungen. Die Arbeit von Traver *et al.* [60] betont die Notwendigkeit eines Sicherheitskonzepts für alle Serviceroboter.

Vereinzelt finden sich auch Methoden zur Verbesserung der Sicherheit mobiler Roboter, z. B. Fehlererkennung bei Sensoren [45], zur Verifikation [55] oder zur sicherheitsorientierten Sensorfusion [21; 46; 47]. Des Weiteren existieren Arbeiten zur Absatzerkennung und Vermeidung von Stürzen des Roboters an Absätzen, wie z. B. Treppen [1; 2] und zur Erkennung gefährlicher Hindernisse [28].

Im nächsten Kapitel wird auf die Relevanz der Sicherheitsfragen für mobile Roboter eingegangen. Kapitel 3 enthält die klassische Definition von Gefahren. In Kapitel 4 werden verschiedene Gefahrenszenarien vorgestellt, bevor im fünften Kapitel die Vermeidung und das Verhalten bei Gefahren diskutiert werden. Das sechste Kapitel enthält die Prävention von Unfällen und rechtliche Rahmenbedingungen.

2 Relevanz von Sicherheitsbetrachtungen bei mobilen Robotern

Mit der Sicherheit [19] eines Roboters hängen mittelbar Begriffe und Eigenschaften eines Systems, wie Verlässlichkeit [37], Zuverlässigkeit [13], Verfügbarkeit [13] und Instandhaltbarkeit [13] zusammen. Bild 1 zeigt die Definitionen. Die Sicherheit des Roboters gibt an, in welchem Maß die Vermeidung von Schäden an Personen und Gegenständen sowie am Roboter selbst, in allen Situationen gewährleistet ist.

Sie hat damit eine andere Zielsetzung als Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Instandhaltbarkeit, die Aussagen über den ausfallfreien Zeitraum machen. Die Verlässlichkeit („dependability“ [37]) beschreibt zusammenfassend sowohl Sicherheits- als auch Zuverlässigkeitsaspekte, wobei insbesondere Einwirkungen der Umgebung mit einzubeziehen sind. Dies trifft auf mobile Roboter in besonderem Maß zu, da der Arbeitsbereich nicht unveränderlich und streng eingegrenzt ist und damit nicht alle Einwirkungen vorhersehbar sind.

Der Sicherheit des mobilen Roboters muss Priorität vor der Zuverlässigkeit eingeräumt werden. Zwar tragen Ver-

Sicherheit:	Freiheit von unvermeidbaren Risiken [19].
Verlässlichkeit:	Eigenschaft eines Systems, eine vertrauenswürdige Systemleistung zu erbringen [37].
Zuverlässigkeit:	Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach vorgegebenen Zeitspannen bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen [13].
Verfügbarkeit:	stationäre: Mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen dividiert durch die Summe aus mittlerer Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen und mittlerer Störungsdauer [13].
Instandhaltbarkeit:	Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung für die Instandhaltung bei festgelegten Mitteln und Verfahren [13].

Bild 1: Definitionen aus [19; 37; 13].

besserungen der Zuverlässigkeit oft auch zur Verbesserung der Sicherheit bei. Durch stetige Verbesserung der Zuverlässigkeit allein kann kein optimales Sicherheitsniveau erreicht werden, da trotzdem die Möglichkeit eines Systemausfalls besteht und unvorhergesehene Situationen auftreten können. Anstatt alle Ausfälle vermeiden zu wollen, ist es vielversprechender, die Aktionen des Roboters zu überwachen und Ausfälle und Gefahrensituationen zu erkennen und geeignet darauf zu reagieren. Welche Teilsysteme konkret notwendig sind, ist unter anderem von der Umgebung, der Aufgabe und der Bauart des Roboters abhängig. Man kann sich dies und die Relevanz der Sicherheit an einigen denkbaren Szenarien veranschaulichen:

1. „Roboter überfährt Kleinkind“: Allein die Navigation des Roboters in einer Umgebung, in der sich auch Personen bewegen, kann zu schwerwiegenden Unfällen führen. Der Roboter braucht eine außerordentlich zuverlässige Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidungsstrategie.
2. „Roboter stürzt Treppe hinunter“: Auch bei diesem Beispiel haben ein Fehler in der Navigation und die Nichterkennung einer besonders gefahrenträchtigen Umgebung schwerwiegende Folgen. Dem muss durch eine kontinuierliche Überprüfung des Untergrundes (Absatzerkennung) in dieser oder vergleichbaren Umgebungen Rechnung getragen werden [2].
3. „Roboter setzt Gefahrgutlager in Brand“: Hier wird der Unfall noch stärker als im letzten Beispiel durch die gefährliche Umgebung begünstigt und die Folgen verstärkt. Ausgelöst werden kann dieser Unfall beispielsweise durch elektrische Funken oder zu hohe Temperaturen in einem Teilsystem des Roboters. Hier könnte man durch eine besondere Bauart des Roboters und/oder vorgeschriebene Mindestabstände die Gefahren verringern.

Die Liste ließe sich noch beliebig erweitern, etwa durch Fälle, in denen die Tätigkeit des Roboters nur mittelbar zu Schäden führt, z. B. bei der Blockade eines Notausganges.

Bei der Konzeption eines mobilen Roboters sind daher folgende Fragen zu beantworten:

1. Durch welche Gefährdungen werden Schäden verursacht?
2. In welchen Situationen ist bei mobilen Robotern mit welchen Unfällen zu rechnen?
3. Welche Aktion hat welches Gefährdungspotential?
4. Wie kann auf die Gefährdungen reagiert werden, so dass Schäden vermieden werden?
5. Wie gewährleistet man in anderen technischen Bereichen Sicherheitsstandards und können diese auf mobile Roboter übertragen werden?
6. Welche Konsequenzen können Defizite in der Sicherheitstechnik eines mobilen Roboters haben, d.h. welches Restrisiko¹ verbleibt?

Antworten auf obige Fragen soll diese Arbeit geben.

3 Gefährdungen: Normen und Definitionen

In Bild 2 ist der Aufbau der Normenreihe „Sicherheit von Maschinen“ dargestellt. Es wird dort zwischen Normen des Typs A (Sicherheitsgrundnorm), B (Sicherheitsgruppennorm) und C (Maschinensicherheitsnorm) unterschieden. Dabei enthalten die Sicherheitsgrundnormen allgemeine Anforderungen und anerkannte Verfahren zur Erhöhung der Sicherheit. Dies sind Rahmenbedingungen, die auch auf mobile Roboter anzuwenden sind, aber aus denen nicht direkt die Konstruktion eines sicheren mobilen Roboters abgeleitet werden kann.

In den Sicherheitsgruppennormen werden bestimmte häufig benötigte Geräteteile (z. B. NOTAUS-Schalter) [16] oder Konstruktionsrichtlinien (z. B. Mindestsicherheitsabstände) definiert. Die Maschinensicherheitsnormen beschreiben dann, wie eine bestimmte Maschine normgerecht zu konstruieren ist, damit sie die Sicherheitsanforderungen erfüllt. Eine Maschinensicherheitsnorm für mobile Roboter, wie sie z.B. für Industrieroboter [33] existiert, gibt es derzeit – wahrscheinlich aufgrund der geringen Verbreitung – nicht.

In [15] ist ein Grundprinzip zur sicheren Auslegung von Maschinen enthalten, das durch Bild 3 veranschaulicht werden kann. Es wird dabei gefordert, dass keine Schäden entstehen dürfen, auch wenn die Maschine nicht (mehr) im ordnungsgemäßen Zustand ist.

Ebenso dürfen keine Schäden eintreten, wenn die Maschine nicht bestimmungsgemäß verwendet wird. Nur wenn beides zusammentrifft, d.h. wenn eine nicht ordnungsgemäße

¹ Als Risiko ist versicherungstechnisch das Produkt aus Schadenshöhe (z. B. in Euro) und Schadenswahrscheinlichkeit definiert, vgl. [19].

<p>DIN-Normen: Normenreihe EN 292 [14], [15] Typ A: Sicherheitsgrundnorm (z. B.: EN 292) Typ B: Sicherheitsgruppennorm (z. B.: EN 954, [17]) Typ C: Maschinensicherheitsnorm (z. B. für Industrieroboter DIN ISO10218 [33], für mobile Roboter noch nicht vorhanden)</p>
--

Bild 2: Normenreihe DIN EN 292.

Gebrauch Zustand	bestimmungs- gemäßer Gebrauch	nicht bestimmungs- gemäßer Gebrauch
ordnungs- gemäßer Zustand	sicher, vorhersehbare Gefährdungen	sicher, vorhersehbare Gefährdungen
nicht ordnungs- gemäßer Zustand	sicher, vorhersehbare Gefährdungen	unsicher, nicht vorhersehbare Gefährdungen

Bild 3: Forderung der DIN EN 292.

Maschine gleichzeitig nicht bestimmungsgemäß verwendet wird, gelten die entstehenden Gefährdungen als nicht durch den Konstrukteur vorhersehbar. Das bedeutet aber auch, dass in diesem letztgenannten Fall selbst eine normgerechte Maschine als unsicher anzusehen ist. Ein wichtiges Ziel ist deshalb, das Zusammentreffen dieser beiden Fehler wirksam zu verhindern.

Umgekehrt kann man daraus ableiten, dass für die drei in Bild 3 hellgrau eingefärbten Felder alle Gefährdungen vor-
 ausgesehen und abgestellt werden müssen. Dies ist eine sehr weit reichende Forderung.

Bei der Umsetzung gibt es in Übereinstimmung mit [44] verschiedene Möglichkeiten, die in nachstehender Reihenfolge anzuwenden sind. Vorrangig sollten Maßnahmen ergriffen werden, die das Gefährdungspotential minimieren. Falls das nicht möglich oder nicht ausreichend ist, müssen die Schäden durch Sicherheitseinrichtungen ausgeschlossen werden. Bleibt ein – unvermeidbarer – Anteil der Gefährdung bestehen, so muss der Benutzer darauf hingewiesen werden. Eventuell wird auch eine Spezialausbildung zur Benutzung der Maschine und/oder das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung (PSA) erforderlich. Letzteres ist zumindest für mobile Roboter in Alltagsumgebungen nicht möglich.

4 Gefährdungen: Szenarien

Bevor in Bild 4 auf Sicherheitsanforderungen verschiedener Robotersysteme eingegangen wird, sind zunächst in Bild 5 die in der DIN EN 292 [14; 15] genannten möglichen Gefährdungen durch Maschinen dargestellt. In erster Linie sind Gefährdungen durch mechanisch-kinetische

	Niedrige Sicherheits- anforderungen	▶	Hohe Sicherheits- anforderungen
Bauart/Typ des Roboters:	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Geringes Gewicht ▶ Radgetriebener Roboter 		<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hohes Gewicht ▶ zweibeiniger Laufroboter
Aufgaben des Roboters:	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ungefährliche Aufgaben ▶ Einfache Aufgaben ▶ Ferngesteuerter Roboter 		<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gefährliche Aufgaben ▶ Komplexe Aufgaben ▶ Autonomer Roboter
Einsatzgebiet/ Umgebungs- bedingungen:	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Ungefährliche Atmosphäre ▶ Ungefährliche Umgebung ▶ Innen ▶ getrennt von Menschen 	▶ mit Menschen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gefährliche Atmosphäre ▶ Gefährliche Umgebung ▶ Außen ▶ Zusammenarbeit mit Menschen

Bild 4: Sicherheitsanforderungen in Abhängigkeit des Robotertyps und der Einsatzbedingungen.

Einwirkung von Energie:	
▶ mechanisch/kinetisch	— Quetschen, Scheren, ..., Stoß
▶ chemisch	— Auslaufende Flüssigkeiten
▶ thermisch	— Verbrennungen
▶ Strahlenbelastung	— Laser, Ultraschall, Mikrowellen, ...
▶ elektrisch	— Elektrostatik, Kurzschluss
▶ Vibration	
Sonstige Beeinträchtigungen:	
▶ Vernachlässigung ergonomischer Aspekte	— fehlerhaftes Handbuch, umständliche Bedienung
▶ Freisetzung von Stoffen	— Nahrungsaufnahme, Einatmen

Bild 5: Ursachen für Gefährdungen nach [14; 15].

Energie vorhanden. Diese können bei Kollisionen zu Stößen, Quetschungen, Scherungen usw. führen. Um Schäden zu vermeiden, kann z. B. einerseits die maximale Energie durch Höchstgeschwindigkeiten begrenzt werden, andererseits sollten z. B. bei der Bauform gefährliche Kanten vermieden werden.

An Teilen des Roboters, die mit Menschen oder Gegenständen in Berührung kommen können, dürfen keine schädigenden elektrischen Spannungen anliegen und auch keine zu hohen Temperaturen auftreten. Neben direkten Verletzungen der Menschen durch zu hohe Temperaturen besteht noch ein Brandrisiko. Durch den Roboter dürfen keine zu starken Vibrationen erzeugt werden und es darf keine gefährliche Strahlung emittiert werden. Letzteres ist vor allem bei der Auswahl der Sensoren, z. B. Lasersensoren oder Mikrowellenradar, zu beachten. Es dürfen keine Chemikalien auslaufen oder freigesetzt werden, die Menschen oder die Umgebung schädigen können. Darüber hinaus kann auch die Vernachlässigung ergonomischer Aspekte, wie z. B. ein unverständliches Handbuch oder eine schlechte Mensch-Maschine-Schnittstelle zu einer erheblichen Erhöhung des Gefährdungspotentials führen.

Für bestimmte Anwendungen und Typen von Robotern sind nur ein Teil der Gefährdungen relevant. Derzeit werden mobile Roboter hauptsächlich für Flächenreinigungsaufgaben [22; 51] und Transportaufgaben [23] sowie als Informationsroboter [8; 39] verwendet. Die bei diesen mobilen Robotern relevanten Gefährdungen sind in Bild 5 grau hinterlegt. Je nach Aufgabentyp und weiteren Einflussfaktoren birgt der Einsatz weitere spezifische Gefahren.

Bild 4 zeigt, welche Eigenschaften eines mobilen Roboters Einfluss auf das Gefährdungspotential und die Sicherheitsanforderungen haben. Dazu gehören die Eigenschaften der Bauart des Roboters, die Aufgaben und das Einsatzgebiet bzw. die -umgebung. Wesentlich bei der Bauart sind das Gewicht und der Typ des Roboters, wobei höheres Gewicht und die Sturzgefahr beim zweibeinigen Laufen [35; 49] die Sicherheitsanforderungen erhöhen.

Ebenso erhöhen sich die Anforderungen, falls der Roboter gefährliche Aufgaben, wie z. B. das Arbeiten mit Schneidwerkzeugen wie beim Rasenmähen oder das Transportieren von gefährlichen Gütern übernehmen muss. Daneben ist auch die Komplexität der Aufgabe und der Grad der Autonomie wesentlich. Je schwieriger die zu bewältigende Aufgabe ist und je mehr Entscheidungen der Roboter selbstständig treffen muss, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Aufgabe nicht erfüllt werden kann bzw. ein Schaden auftritt. Bei mobilen Robotern, die in gefährlicher Atmosphäre oder in gefährlichen Umgebungen, z. B. im Bereich chemischer Anlagen, agieren, besteht ein höheres Risiko von Schäden, als wenn dies nicht der Fall ist. Wenn der Roboter sich nur in gefahrarmen Innenräumen bewegt und weniger Kontakt zu Menschen besteht, sinken die Sicherheitsanforderungen.

Im Bild 4 grau hinterlegt sind beispielhaft die relevanten Eigenschaften für einen Pioneer-II-Roboter der Firma ActiveMedia. Man erkennt, dass bei einem solchen Roboter, der beispielsweise für Transportaufgaben von ungefährlichen Gütern in Büroumgebungen eingesetzt wird, vergleichsweise geringe Sicherheitsanforderungen bestehen. Ledig-

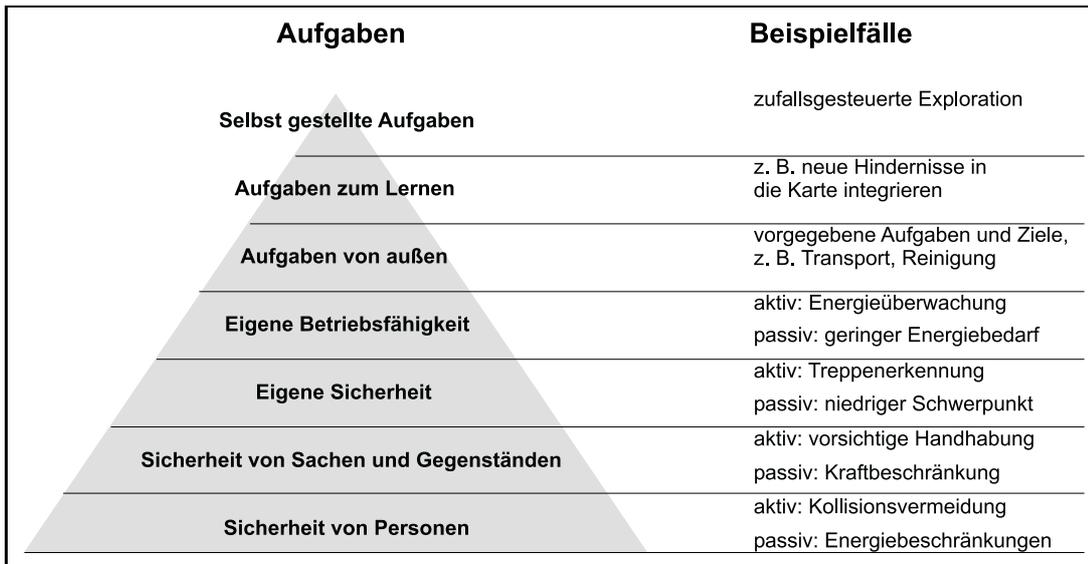


Bild 6: Aufgabenpyramide zur Gewährleistung der Sicherheit.

lich hinsichtlich der durch die Autonomie und den Umgang mit Menschen hervorgerufenen Gefährdungen müssen erhöhte Anforderungen erfüllt werden.

Betrachtet man die existierenden Transport-, Reinigungs- und Informationsroboter, so fällt auf, dass bei allen ein relativ geringes bis mittleres Gefährdungspotential vorliegt. Alle Modelle sind radgetrieben, bewegen sich vergleichsweise langsam in nicht besonders gefährlichen Innenräumen und haben einfache, ungefährliche Aufgaben. Je nach Anwendung kann allerdings das Robotergergewicht sehr hoch sein, z. B. mehrere hundert Kilogramm bei Transport- und Reinigungsrobotern. Abgesehen von Informationsrobotern ist keine direkte Zusammenarbeit mit Menschen notwendig. Durch die hohe Autonomie bestehen jedoch erhöhte Sicherheitsanforderungen.

Ein weiterer Aspekt besteht darin, die nötigen Sicherheitsfunktionen mit den anderen Funktionen des Roboters in Beziehung zu setzen. Da die erfolgreiche Erledigung anderer Aufgaben in keinem Fall entstandene Schäden rechtfertigt, ist es notwendig, den Sicherheitsfunktionen höchste Priorität einzuräumen.

In Bild 6 ist diesbezüglich schematisch eine sinnvolle Rangordnung dargestellt. Nach unten hin nimmt die Wichtigkeit der Aufgaben zu, die tiefer gelegenen Schichten bilden das Fundament für die darüber liegenden. Rechts daneben sind beispielhaft Möglichkeiten gezeigt, die zur Erreichung der Funktionen verwendet werden können. Als passiv werden die Möglichkeiten bezeichnet, die durch die Konstruktion oder Auslegung festgelegt wurden, als aktiv solche, die während des Betriebes verwendet werden können.

Am wichtigsten ist es, die Sicherheit der anwesenden Personen zu gewährleisten, danach folgt die Sicherheit von Sachen² und Gegenständen. Für diese unteren Schichten

sollten immer auch passive Methoden verwendet werden, da diese selbst im Fehlerfall wirksam sind. Eventuell können sie mit aktiven Maßnahmen kombiniert werden. Erst darüber folgt die Sicherheit des Roboters und der Erhalt der Betriebsfähigkeit. Und erst danach die Durchführung von Aufgaben von außen, z. B. der Transport von Gegenständen oder die Reinigung eines Fußbodens. Wenn bis zu dieser Ebene alle Anforderungen sicher erfüllt werden können, wird der mobile Roboter sehr nützlich sein. Die darüber liegenden Schichten sind ein Beispiel für Erweiterungsmöglichkeiten. Es könnte ebenso gut gewünscht sein, dass der Roboter einfach nichts tut, wenn ihm keine Aufgabe von außen gestellt wird, anstelle seine Umgebung zu erkunden, um dazulernen, oder sich selbst Aufgaben zu stellen, z. B. in schon vollständig bekannten Räumen Tätigkeiten auszuführen, die dort schon oft angefordert wurden.

5 Vermeidung von Gefährdungen und Verhalten bei Gefahren

Das Grundkonzept von Sicherheitsstrategien ist oftmals das Erkennen einer Gefahr oder eines Defektes und eine geeignete Reaktion [32]. Bei unausweichlichen Gefahren oder nicht mehr korrigierbaren Fehlern ist die laufende Aktion abzubrechen und ein sicherer Zustand einzunehmen. Voraussetzung hierfür ist die Definition dieses sicheren Zustands. Dies muss nicht notwendigerweise das Abschalten der Maschine sein, auch wenn dies oft ausreichend ist. Ähnlich wie beim Flugzeug, bei dem man eine Notlandung (und anschließende Abschaltung) als solchen Zustand ansehen kann, sind auch bei mobilen Robotern Situationen denkbar, in denen sofortiges Anhalten und Abschalten nicht die richtige Lösung ist. Wenn sich der Roboter zum Beispiel in einem engen Durchgang befindet, den er versperren würde, sollte er wenn möglich diese Stelle erst noch langsam verlassen und an einem vorgesehenen Abstellplatz abschalten. Die Definition des sicheren Zustands

² Bei Schadenereignissen sind Tiere in der deutschen Rechtsprechung mit Sachen gleichgestellt.

kann schwierig sein und limitiert das erreichbare Sicherheitsniveau.

Für mobile Roboter lassen sich zwei Steuerungsarten unterscheiden, die die verwendbaren Sicherheitskonzepte festlegen:

Eine ist die verhaltensbasierte Steuerung. Charakteristisch dabei ist, dass der Roboter durch das Zusammenspiel vieler einfacher Verhaltensweisen gesteuert wird [6;42;63]. Dabei werden nur „lokale“ Informationen, d.h. Informationen, die der Roboter selbst wahrnimmt, verwendet. Der Roboter reagiert dann auf sehr unterschiedliche Situationen gleich. Er hat ein „generalisierendes“ Verhalten. Die Struktur der Algorithmen ist vergleichsweise einfach. Ein passendes Sicherheitskonzept ist, alle geplanten Aktionen zu filtern und nur die als sicher eingestuften zuzulassen.

Bei der funktionalen Steuerung [59] werden globale Strategien verwendet, bei denen der Roboter Zugriff auf Informationen von außen hat. Diese können z.B. aus Vorwissen, aus einer selbst erstellten Karte oder durch Übertragung von einem Steuerungssystem stammen. Weil nun unterschiedliche Situationen wahrgenommen werden, wird eine differenziertere Unterscheidung möglich. Für das Sicherheitskonzept bedeutet dies, dass bei gleich gutem Sicherheitsniveau größere Aktionsmöglichkeiten verbleiben. Dies wird mit erhöhtem Informationsbedarf und höherer Komplexität des Systems erkauft.

Bild 7 zeigt verschiedene Methoden, die Sicherheit eines mechatronischen Systems – und ein Roboter ist ein solches – bei der Konstruktion des Gerätes bzw. der Softwareentwicklung zu verbessern. Bei diesen Methoden wird vorausgesetzt, dass keine Schäden verursacht werden, wenn das System in ordnungsgemäßen Zustand ist [14]. Sie dienen zum einen dazu die ordnungsgemäße Funktion durch Bauteilauswahl, Funktionstests und Fehlerdiagnose [31] aufrecht zu erhalten.

Zum anderen erlauben sie, das System, z. B. durch redundante Verwendung von Bauteilen, fehlertolerant zu machen. Dazu tragen auch die Aufgabenverteilung und Filterung

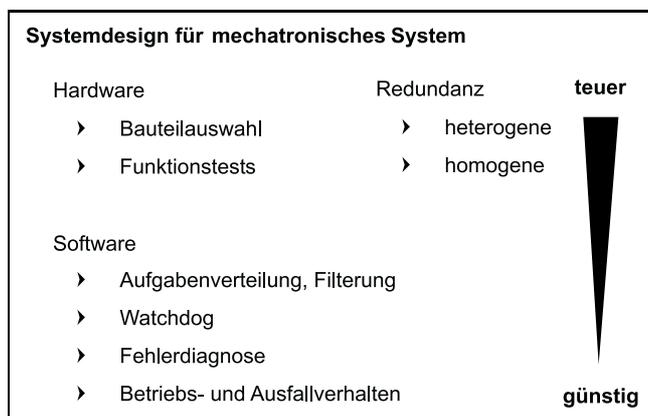


Bild 7: Sicherheitsdesign für mechatronisches System.

von verbotenen Handlungen bei. Ein definiertes Ausfallverhalten kann ergänzend im Fehlerfall Schäden vermindern.

Dabei sind die hier beschriebenen Methoden bei der Hardware deutlich teurer als bei der Software. Bei der Redundanz unterscheidet man homogene Redundanz, d.h. die (parallele) Verwendung von gleichartigen Bauteilen, und heterogene Redundanz, z.B. Verwendung von zwei Sensoren mit unterschiedlichen Wirkprinzipien zur Messung derselben Größe. Heterogene Redundanz ist sicherer als homogene, da „common-case“-Fehler bei unterschiedlichen Systemen seltener sind, aber zumeist auch teurer zu realisieren.

Bei mobilen Robotern wird die Lage dadurch komplizierter, dass auch im ordnungsgemäßen Zustand, z. B. durch Fremdeinwirkung, Schäden möglich sind.

Um das Zusammentreffen von nicht bestimmungsgemäßer Nutzung und nicht ordnungsgemäßen Zustand gemäß [14] auszuschließen, wäre es eine Möglichkeit, alle Fehler, die an den Teilen des mobilen Roboters auftreten können, z. B. durch Fehlererkennungsverfahren zu entdecken. Dann kann, wie in Bild 8a gezeigt, vorgegangen werden. Während des Betriebs wird permanent der ordnungsgemäße Zustand überwacht. Falls dieser vorliegt kann der Normalbetrieb aufrecht erhalten werden. Tritt ein Fehler auf, muss der Roboter in einen sicheren Zustand überführt werden. Auf diesem Grundkonzept basieren viele Fehlererkennungs- und Fehlerdiagnoseverfahren [31].

Alternativ ist es theoretisch möglich, den bestimmungsgemäßen Gebrauch zu überwachen und dadurch die Sicherheit zu gewährleisten. Die Vorgehensweise ist in Bild 8b zu sehen. Nun wird der Roboter in den sicheren Zustand gebracht, wenn ein nicht bestimmungsgemäßer Gebrauch erkannt wird. In den meisten Fällen wird dies schwieriger zu realisieren sein als die Überwachung des ordnungsgemäßen Zustands. Insbesondere ist es schwierig, geeignete Sensorik dafür zu finden.

Es ist – wenn dies möglich ist – sinnvoll, beide Verfahren zu kombinieren. Dies ist in Bild 8c gezeigt. Dabei sind die beiden Prüfungen des ordnungsgemäßen Zustands und des bestimmungsgemäßen Gebrauchs „hintereinander geschaltet“. Fällt eine der Prüfungen negativ aus, wird in den sicheren Zustand gewechselt.

Die weiter vorne erwähnte Methode der Filterung aller Aktionen aus Sicherheitsgründen ist in Bild 8d dargestellt. Nach der Planung einer Aktion wird geprüft, ob diese, ohne Schaden zu verursachen, ausgeführt werden kann. Wird die Aktion erlaubt, wird sie ausgeführt; ansonsten wechselt der Roboter in den sicheren Zustand. Entweder er bleibt dort, oder es wird eventuell eine neue Aktion geplant (gestrichelter Pfad). Wurde eine erlaubte Aktion ausgeführt, wird geprüft, ob das Ziel bereits erreicht ist. Falls ja, wartet der Roboter auf neue Anweisungen. Falls nein, wird eine neue Aktion zur Erreichung des Ziels geplant und der Zyklus

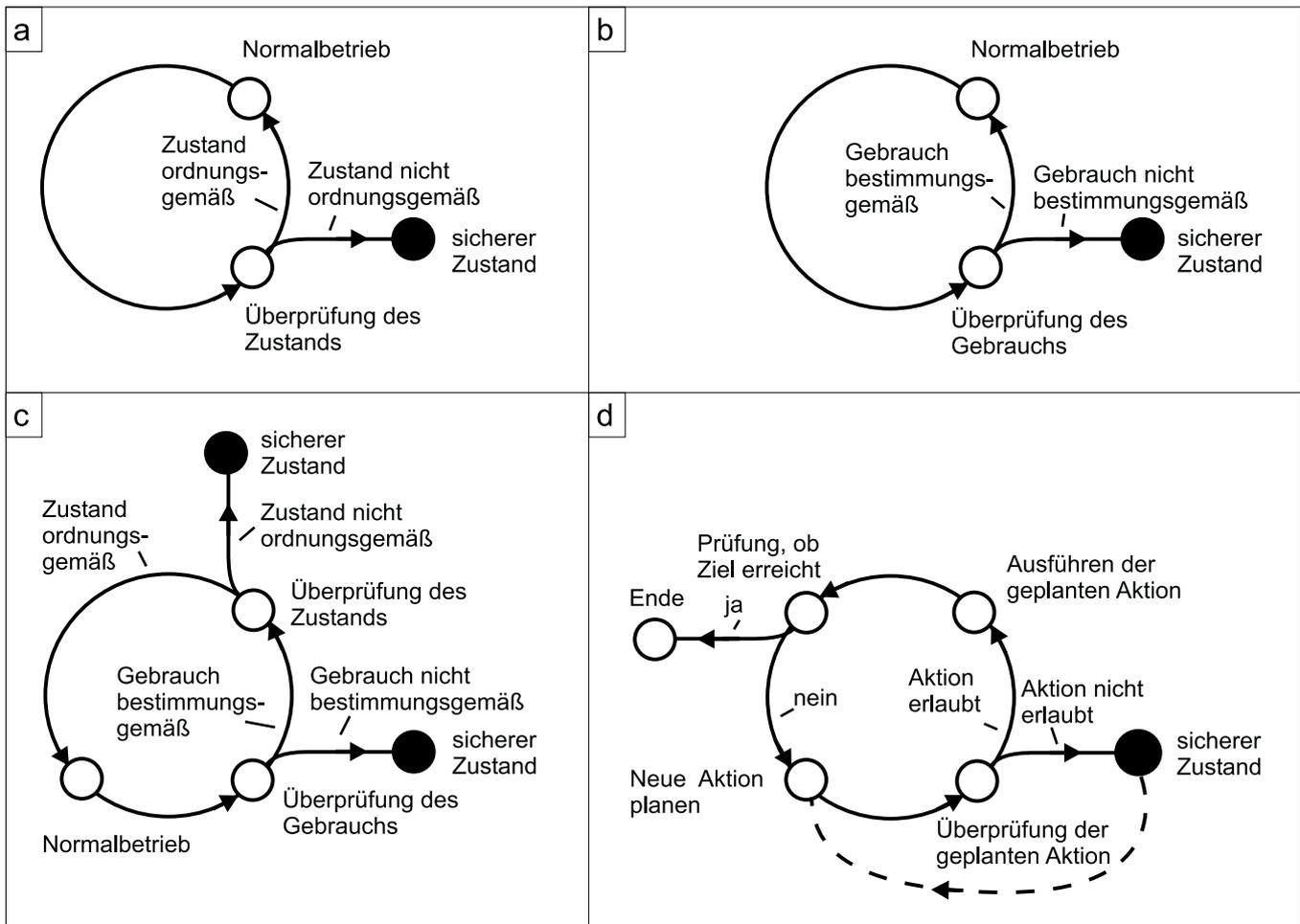


Bild 8: Verschiedene Konzepte zur Überwachung autonomer mobiler Roboter: a: Überwachung des Zustands, b: Überwachung des Gebrauchs, c: Überwachung des Zustands und des Gebrauchs und d: Filterung der geplanten Aktionen.

beginnt von vorn. Während die Methoden aus Bild 8a–c der Überwachung der fehlerfreien Funktion dienen, wird durch die Filterung nach Bild 8d die Sicherheit der geplanten Aktionen abhängig von der aktuellen Situation überprüft.

Als Beispiel wird ein radgetriebener Transportroboter, der in Büroumgebungen agiert, betrachtet. Ein solcher Roboter verwendet oft Odometriesensoren, Gyroskope und Ultraschallsensoren zur Navigation und Tastsensoren zur Hinderniserkennung.

Basis für die Sicherheit eines mobilen Roboters ist die Navigation. Fällt z.B. die Ultraschallsensorik aus, kann die Navigation nicht mehr sicher durchgeführt werden, d.h. der Roboter ist nicht im „ordnungsgemäßen Zustand“. Der fehlerhafte Ultraschallsensor muss durch ein Fehlerdiagnosesystem erkannt werden und gemäß Bild 8a ein sicherer Zustand eingenommen werden. Zwei Möglichkeiten bestehen: der sofortige Stopp oder das Fahren zu einem sicheren Platz mit anschließendem Stopp. Der sofortige Stopp ist möglich, wenn keine Notausgänge blockiert werden. Wäre das der Fall, muss der Roboter allein mit Odometrie, Gyroskop und seiner Karte einen sicheren Platz erreichen und eventuell, z.B. bei der Annähe-

rung an eine Wand, auf die Tastsensoren zurückgreifen. Die Auswahl einer dieser beiden Aktionen geschieht nach Bild 8d.

Ein Beispiel für einen nicht bestimmungsgemäßen Gebrauch ist der Einsatz des Roboters außerhalb von Gebäuden, sodass er z.B. auf Straßen gelangen könnte. Offensichtlich ergibt sich daraus eine Reihe von Gefahren. Eine einfache Methode festzustellen, ob der Roboter sich in einem Raum befindet, ist ein nach oben gerichteter Ultraschallsensor zur Deckenerkennung. Wird keine Decke erkannt, schlussfolgert der Roboter, dass er sich im Freien befindet. Gemäß Bild 8b ist ein sicherer Zustand einzunehmen: der sofortige Stopp.

Durch Fremdeinwirkung von Personen oder auch durch verkettete Fehlerereignisse kann trotz obiger Sicherheitskonzepte keine absolute Sicherheit gewährleistet werden. Als Anhaltspunkte bezüglich der Handhabung der dadurch verbliebenen Restrisiken können Vorschriften aus anderen Bereichen, z.B. aus dem Kraftfahrzeugbau und dem Eisenbahnbetrieb, dienen. Dort darf eine neue Technik bei sicherheitskritischen Komponenten nur dann eingesetzt werden, wenn mit dem Einsatz ein gleich hohes oder geringeres Risiko als mit der herkömmlichen Tech-

nik verbunden ist [29]. Existieren keine solchen Anhaltspunkte wird oft ein zu akzeptierendes Grenzkrisiko [20] definiert.

6 Prävention und Behandlung von Unfällen

Auch wenn bei der Konstruktion alle Möglichkeiten zur Verbesserung der Sicherheit ausgeschöpft wurden, bleiben Restrisiken bestehen. Diese werden durch unvorhersehbare Gefahren (Verkettung von Einzelereignissen, Verknüpfung ungünstiger Umstände usw.) und Gefahren hervorgerufen, für die es (noch) keine technische Abhilfe gibt. Mögliche Auswirkungen der verbleibenden Risiken sind die verringerte Akzeptanz in der Gesellschaft bis hin zum Verbot des Einsatzes. Wie stark die Bereitschaft ist, das Risiko in Kauf zu nehmen, hängt auch davon ab, ob es sich um selbstgewählte oder unausweichliche, bzw. um zeitlich begrenzte oder dauerhafte Risiken handelt und wie hoch der Nutzen des Systems ist [24;56]. Unausweichliche und dauerhafte Risiken werden dabei naturgemäß nur in weit geringerem Ausmaß geduldet. Bei einem denkbaren flächendeckenden Einsatz von mobilen Robotern sind die Risiken für die betroffenen Personen als unausweichlich einzuordnen und werden deshalb nur akzeptiert, wenn sie sehr niedrig sind.

Dies bedeutet nicht zwangsläufig, dass der Einsatz dann verboten werden wird. Wenn der Nutzen ebenfalls sehr groß ist (wie z. B. bei Kraftfahrzeugen), werden die Risiken möglicherweise in Kauf genommen. Dann ist damit zu rechnen, dass zur Verbesserung der Sicherheit einige der in Bild 9 aufgeführten Auflagen zum Gebrauch vorgeschrieben werden. Kennzeichnungspflicht, Versicherungszwang, Führerscheinpflicht, vorgeschriebene Wartungsintervalle, Sicherung gegenüber Missbrauch, Checklisten und Höchstgeschwindigkeiten werden auch in anderen Bereichen, wie z. B. bei Kraftfahrzeugen oder Flugzeugen, schon

Mögliche Auflagen

- › Klassifizierung nach Gefährdungspotential
- › Kennzeichnungspflicht
- › Versicherungszwang
- › Sicherung gegenüber Missbrauch
- › „Führerschein“ für Eigentümer/Besitzer oder Anwender
- › vorgeschriebene Kontroll-/Wartungsintervalle
- › Checklisten
- › Signalisierung, z. B. Blinklicht
- › Höchstgeschwindigkeiten, Höchstkräfte
- › Einschränkung der Umgebungsbedingungen
- › Mindestalter von Personen für den Umgang mit Robotern

Bild 9: Mögliche Auflagen für den Betrieb autonomer mobiler Roboter.

verwendet. Bei mobilen Robotern wäre darüber hinaus noch die Einschränkung von Umgebungsbedingungen sowie ein Mindestalter von Personen beim Umgang mit Robotern denkbar.

Wenn Schäden durch Unfälle doch auftreten, dann stellt sich als nächstes die Frage, wer den materiellen Schaden in welcher Höhe ersetzen muss. Die Haftung durch Verschulden ist in der deutschen Rechtsprechung unbegrenzt, bei Haftung durch Gefährdung (Betriebsgefahr) ist die Haftungssumme begrenzt. Dabei können sowohl der Eigentümer als auch der Hersteller des mobilen Roboters haftbar sein. Diese sollten dann auch in der Lage sein, Schadenersatz zu leisten. Ein Versicherungszwang ist also eventuell sinnvoll.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Sicherheit mobiler Roboter. Es wurde beschrieben, dass Überlegungen zur Sicherheit bei allen mobilen Robotern notwendig sind. Dabei kann die Entwicklung von Handlungssteuerungsalgorithmen nicht unabhängig von den Sicherheitskonzepten betrachtet werden. Es wurden verschiedene Gefährdungsszenarien betrachtet und Konzepte zur Verbesserung der Sicherheit abgeleitet. Dabei wurden insbesondere auch Vorgaben aus DIN- und ISO-Normen auf mobile Roboter übertragen, für die zur Zeit noch keine spezielle Sicherheitsnorm existiert.

Literatur

- [1] A. Albert, M. Suppa, W. Gerth, „Detection of stair dimensions for the path planning of a bipedal robot“, *Proc. of IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, Como, Italy, 2001*, S. 1291–1296.
- [2] P. Bechtel, A. Schatz, L. Dieterle, J. Adamy, „Absatzerkennung bei autonomen mobilen Robotern“, *Automatisierungstechnik, 51(2003)4*, S. 171–177.
- [3] G. Becker, G. Pritschow, „Robotersicherheit“, *In: Sicherheit von Technik, K. H. Lindackers (Hrsg.), Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1994, ISBN 3-8249-0224-9*, S. 53–69.
- [4] F. Beichelt, „Zuverlässigkeit strukturierter Systeme“, *VEB Verlag Technik, Berlin, 1988*.
- [5] F. Beichelt, „Zuverlässigkeits- und Instandhaltungstheorie“, *B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1993*.
- [6] R. A. Brooks, „A robust layered control system for a mobile robot“, *IEEE Journal of Robotics and Automation 2(1986)1*, S. 14–23.
- [7] T. van Beveren, „Runter kommen sie immer: Die verschwiegenen Risiken des Flugverkehrs“, *Campus Verlag, Frankfurt/Main, 1997*.
- [8] T.-Y. Chen, A. M. S. Zalzal, „Safety Considerations in the Optimization of Paths for Mobile Robots Using Genetic Algorithms“, *Proc. of the IEE Int. Conf. on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, Sheffield, UK, 1995*, S. 299–306.
- [9] T. Christaller *et al.*, „Robotik: Perspektiven für menschliches Handeln in der zukünftigen Gesellschaft“, *Springer, Berlin, 2001*.
- [10] M. Dal Cin, „Fehlertolerante Systeme: Modelle der Zuverlässigkeit“, *B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1979*.

- [11] B. S. Dhillon, „Robot Reliability and Safety“, *Springer, New York, 1991*.
- [12] W. Dicke, K. Kuhn, „Alles über sichere Industrieroboter: Gestaltung, Einsatz, Produktionsübersicht, Rechtsgrundlagen“, *Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1993, ISBN 3-89429-256-3*.
- [13] „DIN 40041: Zuverlässigkeit – Begriffe“, *Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, 1990*.
- [14] „DIN EN 292: Safety of machinery; basic concepts, general principles for design: basic terminology, methodology“, *Teil 1, Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, 2000*.
- [15] „DIN EN 292: Safety of machinery – Basic concepts, general principles for design: Technical principles“, *Teil 2, Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, 2000*.
- [16] „DIN EN 418: Safety of machinery; emergency stop equipment, functional aspects; principles for design“, *Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, 1992*.
- [17] „DIN EN 954: Safety of machinery – Safety-related parts of control systems: General principles for design“, *Teil 1, Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, 1997*.
- [18] „DIN EN 1050: Safety of machinery – Principles for risk assessment“, *Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, 1993*.
- [19] „DIN EN 61508: Funktionale Sicherheit elektrischer/elektronischer/programmierbar elektronischer sicherheitsbezogener Systeme: Begriffe und Abkürzungen“, *Teil 4, Europäische Norm, Beuth Verlag, Berlin, 2002*.
- [20] „DIN VDE 31000: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse – Begriffe der Sicherheitstechnik – Grundbegriffe“, *Teil 2, Beuth Verlag, Berlin, 1987*.
- [21] K. Djath, M. Dufaut, D. Wolf, „Mobile robot multisensor reconfiguration“, *Proc. of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn (MI), USA, 2000, S. 110–115*.
- [22] H. Endres, W. Feiten, G. Lawitzky, „Field test of a navigation system: autonomous cleaning in supermarkets“, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Leuven, Belgium, Vol. 2, 1998, S. 1779–1781*.
- [23] J. Evans *et al.*, „Handling real-world motion planning: a hospital transport robot“, *IEEE Control Systems Magazine, 12(1992)1, S. 15–19*.
- [24] B. Fischhoff, S. Lichtenstein, P. Slovic, S. L. Derby, R. L. Kleeney, „Acceptable Risks“, *Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1981*.
- [25] D. Frank, G. Reichard, „Grenzen der Verkehrssicherheit und gesellschaftliche Akzeptanz“, *Campus Verlag, Frankfurt/Main, 1997*.
- [26] Gesellschaft für Reaktorsicherheit (Hrsg.), „Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke Phase B“, *Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1990, ISBN 3-588585-809-6*.
- [27] C. J. M. Heemskerck, R. A. Bosman, „HERA: A Reliable and Safe Space Robot“, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France, 1992, S. 2799–2801*.
- [28] L. Henriksen, E. Krotkov, „Natural Terrain Hazard Detection with a Laser Rangefinder“, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, USA, 1997, S. 968–973*.
- [29] A. Hinzen, „Wirtschaftlichkeit von Sicherheitsmaßnahmen und rechtlich zulässiges Risiko“, *In: VDI-Berichte 1546: Sicherheit komplexer Verkehrssysteme, VDI Verlag, Düsseldorf, 2000, S. 65–77*.
- [30] K. Ikuta, M. Nokata, H. Ishii, „Safety Evaluation Method of Human-Care Robot Control“, *Proc. of Int. Symposium on Micromechanics and Human Science, Nagoya, Japan, 2000, S. 119–127*.
- [31] R. Isermann, „On the design and control of mechatronic systems—a survey“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 43(1996)1, S. 4–15*.
- [32] R. Isermann (Hrsg.), „Überwachung und Fehlerdiagnose: Moderne Methoden und ihre Anwendungen bei technischen Systemen“, *VDI Verlag, Düsseldorf, 1994*.
- [33] „ISO 10218: Manipulating industrial robots; safety“, *Internationale Norm, Beuth Verlag, Berlin, 1992*.
- [34] A. Kuhlmann, „Einführung in die Sicherheitswissenschaft“, *Vieweg, Wiesbaden, 1981*.
- [35] Y. Kusuda, „The humanoid robot scene in Japan“, *Industrial Robot 29(2002)5, S. 412–419*.
- [36] A. Lankenau, O. Meyer, B. Krieg-Brückner, „Safety in Robotics: The Bremen Autonomous Wheelchair“, *Proc. of IEEE Workshop of Advanced Motion Control (AMC), Coimbra, Portugal, 1998, S. 524–529*.
- [37] J. C. Laprie, „Dependability – Its Attributes, Impairments and Means“, *in „Predictably Dependable Computing Systems“, B. Randell, J. C. Laprie, H. Kopetz, B. Littlewood (Hrsg.), Springer, Berlin, 1995, S. 1–28*.
- [38] X. Laufenberg, „Ein modellbasiertes qualitatives Verfahren für die Gefahrenanalyse“, *Universität Stuttgart, Dissertation, 1996*.
- [39] J. Y. Lew, Y.-T. Jou, H. Pasic, „Interactive Control of Human/Robot Sharing Same Workspace“, *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan, 2000, S. 535–540*.
- [40] B. Lohmann, „The Autonomous Wheelchair EASY and its Feedback Control Components“, *Proc. of the Int. Colloquium on Autonomous and Mobile Systems, Magdeburg, 2002, S. 31–35*.
- [41] P. D. T. O’Connor, „Zuverlässigkeitstechnik: Grundlagen und Anwendung“, *VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990*.
- [42] G. Pires, R. Araújo, U. Nunes, A. T. de Almeida, „ROB-CHAIR – A Powered Wheelchair Using A Behavior-Based Navigation“, *Proc. of the IEEE Workshop on Advanced Motion Control (AMC), Coimbra, Portugal, 1998, S. 536–541*.
- [43] M. Rachkov, „Safety Systems of Technological Climbing Robots“, *Proc. of IEEE Int. Symposium of Industrial Electronics, Guimaraes, Portugal, 1997, S. 660–665*.
- [44] Rat der Europäischen Gemeinschaften, „Directive 98/37/EC of the european parliament and of the council on the approximation of the laws of the member states relating to machinery“, *Beuth Verlag, Berlin, 1998*.
- [45] S. I. Roumeliotis, G. S. Sukhatme, G. A. Bekey, „Sensor Fault Detection and Identification in a Mobile Robot“, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Victoria B. C., Canada, 1998, S. 1383–1388*.
- [46] A. Rudolph, „Quantification and Estimation of Differential Odometry Errors in Mobile Robotics with Redundant Sensor Information“, *International Journal of Robotics Research, 22(2003)2, S. 117–128*.
- [47] A. Rudolph, A. Siegel, J. Adamy, „Ein integriertes Navigationssystem für einen mobilen Roboter“, *Thema Forschung 01/2002, ISSN 1434-7768, S. 84–89*.
- [48] „Safety terms for automation systems“, *VDI-Richtlinie 3542, VDI Verlag, Düsseldorf, 2000, Blatt 1–4*.
- [49] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, K. Fujimura, „The intelligent ASIMO: system overview and integration“, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Saitama, Japan, Vol. 3, 2002, S. 2478–2483*.
- [50] J. Schneider (Hrsg.), „Risiko und Sicherheit technischer Systeme“, *Birkhäuser Verlag, Basel, 1991*.
- [51] M. Schofield, „Neither master nor slave . . . ‘. A practical case study in the development and employment of cleaning robots“, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation, Barcelona, Spain, Vol. 2, 1999, S. 1427–1434*.

- [52] D. W. Seward, D. A. Bradley, F. W. Margrave, „Hazard Analysis Techniques for Mobile Construction Robots“, *Proc. of 11th Int. Symposium on Robotics in Construction, Brighton, England, 1994*, S. 35–42.
- [53] D. W. Seward, F. Margrave, I. Sommerville, G. Kotonya, „Safe Systems for Mobile Robots – The Safe-SAM Project“, *Proc. of the 3rd Safety-critical Systems Symposium, Brighton, England, F. Redmill, T. Anderson (Hrsg.), Springer, 1995*, S. 153–170.
- [54] D. W. Seward, S. Quayle, „System Architectures and Safety for Mobile Construction Robots“, *Proc. of 13th Int. Symposium on Robotics in Construction, Tokyo, Japan, 1996*, S. 727–732.
- [55] R. Simmons, C. Pecheur, G. Srinivasan, „Towards Automatic Verification of Autonomous Systems“, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan, 2000*, S. 1410–1415.
- [56] P. Slovic, B. Fischhoff, S. Lichtenstein, „Perceived Risks“, *In: Societal Risk Assessment: How safe is safe enough?, R. C. Schwing, W. A. Albers Jr. (Hrsg.), Plenum Press, 1980*, S. 181–216.
- [57] I. Sommerville, D. Seward, R. Morrey, S. Quayle, „Safe Systems Architecture for Autonomous Robots“, *Proc. of the 5th Safety-critical Systems Symposium, Brighton, England, 1997*, S. 203–215.
- [58] W. Steinhorst, „Sicherheitstechnische Systeme: Zuverlässigkeit und Sicherheit kontrollierter und unkontrollierter Systeme“, *Vieweg, Braunschweig, 1999*.
- [59] R. Stenzel, „Steuerungsarchitekturen für autonome mobile Roboter“, *RWTH Aachen, Dissertation, 2002*.
- [60] V. J. Traver, A. P. del Pobil, M. Pérez-Franzisco, „Making Service Robots Human-Safe“, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Takamatsu, Japan, 2000*, S. 696–701.
- [61] E. Tunstel, A. Howard, „Approximate Reasoning for Safety and Survivability of Planetary Rovers“, *Fuzzy, Sets and Systems 134(2003)1*, S. 27–46.
- [62] E. Tunstel, A. Howard, H. Seraji, „Fuzzy Rule-Based Reasoning for Rover Safety and Survivability“, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Seoul, Korea, 2001*, S. 1413–1420.
- [63] Y. Zhang, „A Foundation for the Design and Analysis of Robotic Systems and Behaviors“, *University of British Columbia, Kanada, Dissertation, 1994*.

Manuskripteingang: 26. Mai 2003.



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy ist Leiter des Fachgebietes Regelungstheorie und Robotik im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt. Hauptarbeitsgebiete: Regelungsverfahren, Computational Intelligence, Bionik und autonome mobile Roboter.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Landgraf-Georg-Str. 4, D-64283 Darmstadt, Fax: + 49-(0)6151-16-2507, E-Mail: adamy@rtr.tu-darmstadt.de



Dipl.-Ing. Peter Bechtel ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik im Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt. Hauptarbeitsgebiet: Autonome mobile Roboter.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Petersenstr. 20, D-64287 Darmstadt, Fax: + 49-(0)6151-16-7424, E-Mail: petbec@rtr.tu-darmstadt.de