

VALIDIERUNG DER FUNKTIONALEN SICHERHEIT BEI DER MOBILEN MANIPULATION MIT SERVICEROBOTERN

Anwenderleitfaden

VALIDIERUNG DER FUNKTIONALEN SICHERHEIT BEI DER MOBILEN MANIPULATION MIT SERVICEROBOTERN

Anwenderleitfaden

Dipl.-Ing. Theo Jacobs

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA in Stuttgart

Projekt: VaSiMa

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

Förderkennzeichen: 01FS11009

Inhalt

1	Einleitung.....	5
2	Gesetze und Normen im Bereich Robotik	6
3	Existierende Normen für Serviceroboter	8
3.1	Normen und ihre Anwendbarkeit auf Serviceroboter.....	8
3.2	Existierende Validierungsmethoden	11
4	Zusätzlicher Validierungsbedarf	14
5	Vorschlag für neue Validierungsmethoden	16
5.1	Bremsweg der Roboterplattform	16
5.2	Bremsweg des Roboterarms	18
5.3	Hindernisvermeidung	20
5.4	Erkennen von Kollisionen	22
5.5	Exaktheit des Hindernismodells	23
5.6	Greifkraft	25

1 Einleitung

Wurden in den vergangenen Jahrzehnten in der industriellen Fertigung meist stationäre Roboter eingesetzt, die mit Hilfe trennender Schutzeinrichtungen vom Menschen getrennt waren, geht der Trend heutzutage zunehmend zu flexiblen mobilen Roboterplattformen mit einem oder mehreren Manipulatoren, die je nach Bedarf einen menschlichen Werker in direkter Interaktion unterstützen können. Auch für Einsatzgebiete außerhalb der industriellen Fertigung, beispielsweise in Haushaltsumgebungen sowie im öffentlichen Bereich, wird vermehrt an mobilen Robotern mit Roboterarmen geforscht, die in direkter Interaktion mit dem Menschen agieren sollen.

Da bei mobilen Systemen, insbesondere im häuslichen Bereich, auf fest installierte Sicherheitssysteme weitestgehend verzichtet werden muss, stellt die Absicherung mobiler Roboter mit Manipulator eine große Herausforderung dar. Um Kollisionen mit dem Menschen oder anderen Hindernissen zu vermeiden, muss der Arbeitsraum eines mobilen Roboters ständig mit Hilfe von Kameras, Laserscannern oder anderer Sensoren überwacht werden, was insbesondere bei veränderlichen Umgebungen hohe Ansprüche an die Robustheit der eingesetzten Systeme stellt. Neben der Gefahr von Kollisionen erfordert der Einsatz in direkter Nähe des Menschen auch weitere Fähigkeiten, beispielsweise den gefahrlosen Transport von Gegenständen.

Existierende Sicherheitsnormen im Bereich der Robotik, beispielsweise ISO 10218-1¹ und -2, beziehen sich hauptsächlich auf klassische, stationäre Industrieroboter, auf mobile Systeme wird dagegen kaum eingegangen. Generelle Sicherheitsnormen für Maschinen geben dagegen nur sehr allgemeine Anforderungen an die sichere Gestaltung mobiler Roboter. Hersteller von mobilen Robotern mit Manipulationsfähigkeiten stehen daher vor dem Problem, dass keine klaren normativen Anforderungen an die Absicherung ihrer Produkte existieren. Insbesondere gibt es kaum Festlegungen für die Validierung der erreichten Sicherheit.

Um Herstellern und Anwendern mobiler manipulierender Roboter die Validierung ihrer Systeme zu erleichtern wurden im Projekt VaSiMa² existierende Validierungsmethoden für die Sicherheit von Servicerobotern untersucht und Vorschläge für weitergehende Methoden zur Validierung der Sicherheit erarbeitet. Der vorliegende Anwenderleitfaden soll den Entwicklern von Servicerobotern aufzeigen, welche normativen Anforderungen an die Validierung bereits heute existieren und wie die in Normen vorgegebenen Tests durch weitere ergänzt werden können, um die Sicherheit von Serviceroboterprodukten umfassend sicherzustellen.

¹ Norm DIN EN ISO 10218-1 - Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter

Norm DIN EN ISO 10218-2 - Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration

² Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Förderkennzeichen 01FS11009

2 Gesetze und Normen im Bereich Robotik

Bevor ein Produkt im europäischen Wirtschaftsraum in Verkehr gebracht werden darf, muss sichergestellt werden, dass dieses allen sicherheitstechnischen Produkthanforderungen genügt. Diese Anforderungen werden für jedes europäische Land bindend in Europäischen Richtlinien festgehalten. Je nach Einsatzgebiet kommen eine oder mehrere Richtlinien zum Einsatz. Im Bereich der Robotik sind dies häufig die Richtlinie 2001/95/EG zur allgemeinen Produktsicherheit, die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG und die Richtlinie zur elektromagnetischen Verträglichkeit 2004/108/EG¹. Da die Richtlinien jedoch oft sehr allgemein gehalten sind, wird an den entsprechenden Stellen, die z.B. eine spezielle Produktgruppe betreffen, auf zusätzlich anzuwendende Normen verwiesen. Diese sogenannten harmonisierten Normen sind im Gegensatz zu den Richtlinien nicht gesetzlich verpflichtend, jedoch kann bei einer Übereinstimmung mit allen anzuwendenden Normen angenommen werden, dass alle Anforderungen der Richtlinie erfüllt sind (Konformitätsvermutung).

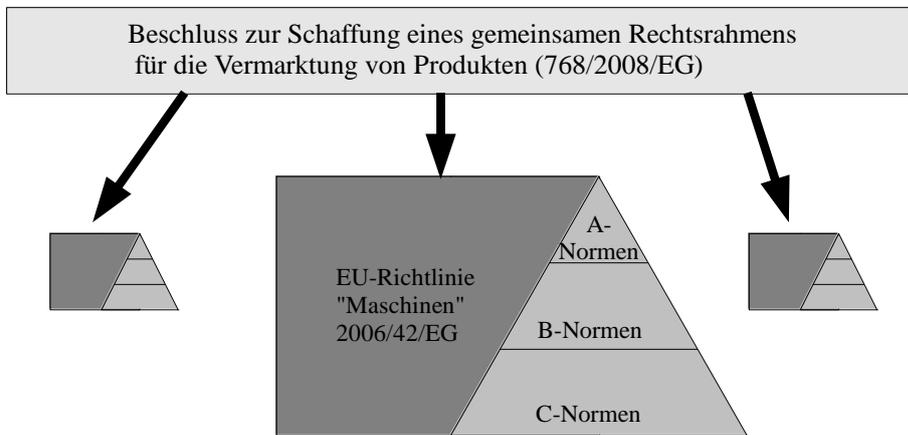


Abbildung 1: EU-Richtlinien und harmonisierte Normen

Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird bei den harmonisierten Normen erneut eine Unterteilung vorgenommen. A-Normen sind Sicherheitsgrundnormen, die allgemeine Aspekte beleuchten, die auf alle Maschinen und Anlagen gleichermaßen zutreffen. In B-Normen werden wiederum für einzelne Produktgruppen speziellere Anforderungen gestellt und C-Normen schließlich geben Aufschluss über einzelne Maschinentypen an sich. Dabei gilt unter anderem, dass, wenn sich verschiedene Normen überschneiden, stets die detaillierteste Norm (also C-Normen vor B- und A-Normen) zu erfüllen ist. Um letztendlich die Verträglichkeit eines Produktes mit den geltenden Richtlinien auszuweisen, wird die CE-Kennzeichnung vergeben. Diese kann je nach Anwendungsfall selbsttätig vom Hersteller angebracht werden, sofern alle erforderlichen Richtlinien und Normen erfüllt und eine entsprechende Dokumentation und weitere Unterlagen dazu erstellt wurden, oder muss von einer benannten Stelle nach Prüfung ausgestellt werden.

Einhergehend mit der steigenden Komplexität der Aufgaben von Robotersystemen wird auch die Entwicklung von neuen Sicherheitsnormen vorangetrieben. Im Bereich der Robotersysteme fällt die Entwicklung neuer Normen sowie die Überarbeitung beste-

¹ Europäische Richtlinien sind generell frei verfügbar unter www.newapproach.org/Directives/DirectiveList.asp

hender Standards unter die Leitung des ISO Gremiums TC 184/SC 2¹. Dieses untergliedert sich wiederum in 5 Arbeitsgruppen, die verschiedene Aspekte betrachten. In der Arbeitsgruppe WG 3 wird seit vielen Jahren der Sicherheitsstandard für Industrieroboter ISO 10218 weiterentwickelt. Für Serviceroboter entsteht derzeit in der Arbeitsgruppe WG 7 erstmals ein Sicherheitsstandard, ISO 13482², der die Sicherheit von „Personal Care Robots“ beschreibt. Es ist davon auszugehen, dass mit der Zeit weitere Sicherheitsnormen für Serviceroboter folgen werden.

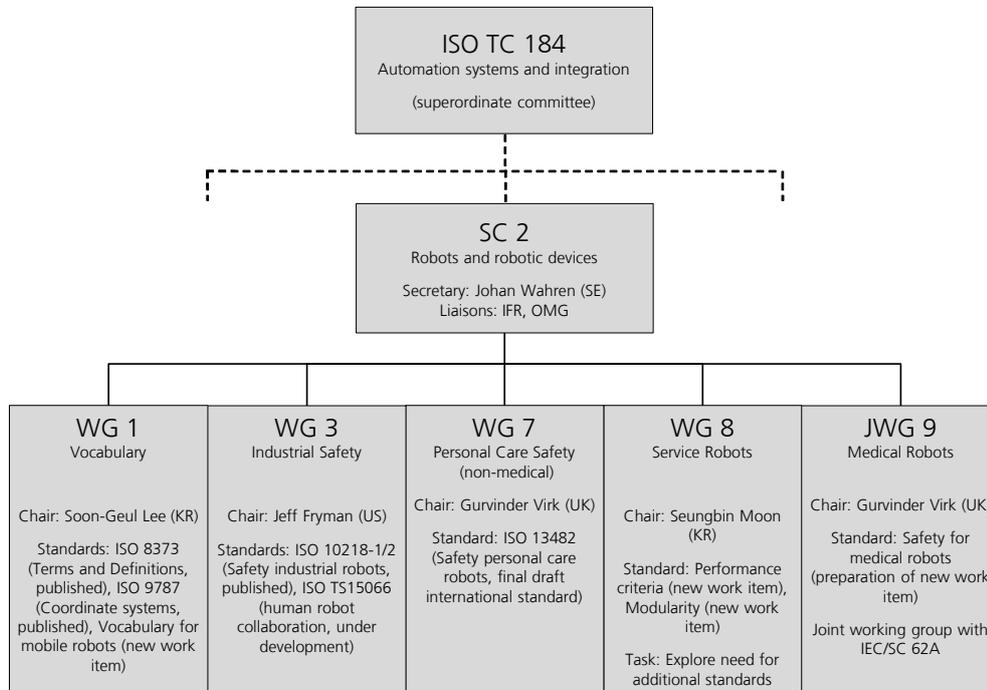


Abbildung 2: Arbeitsgruppen im ISO-Normungsgremium TC 184/SC 2

¹ TC 184/SC 2 Robots and robotic devices:
http://www.iso.org/iso/home/standards_development/list_of_iso_technical_committees/iso_technical_committee.htm?commid=54138

² Norm-Entwurf ISO 13482 - Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots

3 Existierende Normen für Serviceroboter

Existierende Normen für
Serviceroboter

3.1 Normen und ihre Anwendbarkeit auf Serviceroboter

Serviceroboter fallen, wie sämtliche andere Produkte, zunächst unter die Richtlinie 2001/95/EG über die allgemeine Produktsicherheit. Diese legt unter anderem fest, dass nur sichere Produkte in Verkehr gebracht werden dürfen. Betrachtet man die weiteren Richtlinien, so stellt man fest, dass in erster Linie die Richtlinie 2006/42/EG zur Sicherheit von Maschinen (Maschinenrichtlinie) Informationen zur sicheren Auslegung und Dokumentation liefert.

Die Maschinenrichtlinie gilt dabei für Maschinen, austauschbare Ausrüstungen, Sicherheitsbauteile, Lastaufnahmemittel, Ketten, Seile und Gurte, abnehmbare Gelenkwellen und unvollständige Maschinen. Da eine Maschine als „eine mit einem anderen Antriebssystem als der unmittelbar eingesetzten menschlichen oder tierischen Kraft ausgestattete oder dafür vorgesehene Gesamtheit miteinander verbundener Teile oder Vorrichtungen, von denen mindestens eines bzw. eine beweglich ist und die für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt sind“, definiert wird, ist diese für Serviceroboter anzuwenden. Dient ein Roboter jedoch bspw. auch als Haushaltsgerät, können Ausnahmen gelten. Ebenfalls ausgenommen sind „Maschinen, die speziell für Forschungszwecke konstruiert und gebaut wurden und zur vorübergehenden Verwendung in Laboratorien bestimmt sind“, weswegen aktuelle Forschungsplattformen noch nicht sämtliche Anforderungen erfüllen müssen.

Neben der Maschinenrichtlinie existieren weitere Richtlinien, die in Betracht gezogen werden müssen. So fallen Serviceroboter unter die Richtlinie 2004/108/EG zur elektromagnetischen Verträglichkeit, die zum einen festlegt, wie viel Strahlung der Roboter abgeben darf und zum anderen, welche elektromagnetischen Störungen er tolerieren können sollte. Diese ist anzuwenden, wenn es sich um ein Gerät handelt, das „elektromagnetische Störungen verursachen kann oder dessen bzw. deren Betrieb durch elektromagnetische Störungen beeinträchtigt werden kann“, worunter ein Serviceroboter zu zählen ist.

Ebenfalls in Betracht gezogen werden müssen die Richtlinie 2006/95/EG über Niederspannungsgeräte und die Richtlinie 93/42/EWG über Medizinprodukte. Erstere ist anzuwenden, wenn eine Nennspannung ab 75 V Gleichstrom bzw. 50 V Wechselstrom anliegt. Die Richtlinie über Medizinprodukte muss ggf. ebenfalls angewendet werden, wenn der Roboter für medizinische Anwendungen verwendet wird. Gemäß der Definition ist das beispielsweise die Diagnose, Behandlung, oder Verhütung von Krankheiten, Verletzungen oder Behinderungen. zur Anwendung kommt. Nicht unter die Richtlinie fällt beispielsweise der am Fraunhofer IPA entwickelte Care-O-Bot® 3¹, der zwar als Assistenzroboter in Kontakt mit älteren, teilweise gebrechlichen Menschen steht, jedoch nicht zur Behandlung einer Krankheit eingesetzt wird.

Betrachtet man weiterhin die harmonisierten Normen, auf die von der Maschinenrichtlinie verwiesen wird, so stößt man als eine der A-Normen auf die ISO 12100² zur Sicherheit von Maschinen. Diese gibt allgemeine Gestaltungsleitsätze für die Risikoanalyse und greift einige Aspekte der Maschinenrichtlinie genauer auf. Wie in der Richtlinie zur elektromagnetischen Verträglichkeit wird auch in der Maschinenrichtlinie auf die

¹ Haushaltsassistenzroboter Care-O-bot® 3: www.care-o-bot.de

² Norm DIN EN ISO 12100 - Allgemeine Gestaltungsleitsätze Risikobeurteilung und Risikominderung

DIN EN 61000¹ für detailliertere Informationen zur elektromagnetischen Verträglichkeit verwiesen.

Im Bereich der B-Normen ist insbesondere die ISO 13849² über sicherheitsbezogene Teile der Steuerungen zu erwähnen. Diese setzt die in der Risikoanalyse sich ergebenden Informationen nach definierten Gesichtspunkten in Zuverlässigkeitsklassen um. Diese ermöglichen eine objektive Betrachtung des Sicherheitsrisikos und der daraus resultierenden Schutzmaßnahmen, die z.B. eine redundante Auslegung erforderlich machen. Da Serviceroboter in direktem Kontakt mit Menschen stehen und im Gegensatz zu industriellen Anwendungen, in denen vor allem trennende Einrichtungen wie Lichtvorhänge eingesetzt werden, vor allem durch steuerungstechnische Maßnahmen die Sicherheit gewährleisten müssen, ist eine hohe Zuverlässigkeit der Steuerung essentiell. Des Weiteren werden in der ISO 13855³ Hinweise zur Anordnung von Schutzeinrichtungen gegeben. Insbesondere werden dabei die Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen berücksichtigt. Da diese Norm sowohl für berührungslose als auch druckempfindliche Sensoren gilt, ist deren Einhaltung bei Servicerobotern jeglicher Bauform zu beachten.

Trotz der reichlichen Informationen, die diese und weitere A- und B-Normen geben, sind die Anforderungen dennoch recht allgemein gehalten. Im speziellen Anwendungsfall der Serviceroboter bieten sie keine allgemein gültige Grundlage um klare Anforderungen zu stellen. Um genauere Anweisungen und Validierungsmethoden zu erhalten, bieten oft C-Normen eine bessere Grundlage. Da es hier speziell für Serviceroboter keine eigene Norm gibt, muss auf ähnliche Normen zurückgegriffen werden.

Ein Serviceroboter besteht im Allgemeinen aus einer (mobilen) Plattform, ein oder mehreren Manipulatoren und zugehörigen Sensoren. Basierend darauf können entsprechende Normen, die diese Teilaspekte behandeln, herangezogen werden.

Anwendungen von mobilen, autonomen Plattformen sind heutzutage vor allem in der Industrie zu finden, in denen fahrerlose Flurförderzeuge zum Materialtransport eingesetzt werden. „Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sind flurgebundene Fördermittel mit eigenem Fahrtrieb, die automatisch gesteuert und berührungslos geführt werden. Sie dienen dem Materialtransport, und zwar zum Ziehen und/oder Tragen von Fördergut mit aktiven oder passiven Lastaufnahmemitteln.“, wie es im Leitfaden FTS-Sicherheit des VDI⁴ definiert wird. Prinzipiell sind Serviceroboter, die nicht alleinig dem Materialtransport dienen, nicht darunter zu sehen. Jedoch bietet die DIN EN 1525⁵ zur Sicherheit von Flurförderzeugen eine gute Grundlage, um die Sicherheit der mobilen Plattform zu untersuchen.

In Bezug auf Manipulatoren sind insbesondere die Normen ISO 10218-1 und -2 über Sicherheitsanforderungen von Industrierobotern zu betrachten. Diese beschreibt grundlegende Gefährdungen in Verbindung mit Robotern und stellt Anforderungen, um die mit diesen Gefährdungen verbundenen Risiken zu beseitigen oder hinreichend zu verringern. Da diese jedoch auf industrielle Anwendungen beschränkt ist, kann sie nur eine Hilfestellung für die Sicherheitsanforderungen für Manipulatoren von Servicerobotern bieten. Zudem betrachtet sie vor allem stationär angebrachte Roboterarme und bietet kaum Informationen zu deren mobiler Anwendung.

Existierende Normen für
Serviceroboter

¹ Normenfamilie ISO 61000-x - Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

² Norm DIN EN ISO 13849-1 - Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze

³ Norm DIN EN 13855 - Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen

⁴ Leitfaden FTS-Sicherheit, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, Fachausschuss Fahrerlose Transportsysteme (FTS), Download unter <http://www.vdi.de/technik/fachthemen/produktion-und-logistik/fachbereiche/technische-logistik/fa309-fahrerlose-transportssysteme-fts/>

⁵ Norm DIN EN 1525 - Sicherheit von Flurförderzeugen - Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme

Die Sicherheit vor Kollisionen mit der Umgebung und Menschen können sowohl druckempfindliche als auch berührungslose Schutzeinrichtungen gewährleisten. Im Bereich der druckempfindlichen Schutzeinrichtungen wie z.B. Schaltpuffern bietet die DIN EN ISO 13856¹ einen ersten Anhaltspunkt. In ihr werden allgemeine Grundsätze für die Gestaltung solcher Schutzeinrichtungen aufgestellt. Von der Norm ausgenommen sind jedoch Anwendungen an Orten, die für Kinder und ältere Menschen zugänglich sind, da hier zusätzliche Maßnahmen zu treffen sind. Damit kann die Norm zwar eine Grundlage für Serviceroboter bieten, jedoch müssen weitere Schutzmaßnahmen getroffen werden.

Für berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen ist insbesondere die DIN EN 61496² zu nennen. Diese „legt die allgemeinen Anforderungen für Gestaltung, Bau und Prüfung von berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen (BWS) fest, die speziell für die Erkennung von Personen [...] entworfen werden.“ Serviceroboter können je nach Anwendungsgebiet druckempfindliche oder/und berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen enthalten, wodurch nicht unbedingt beide Normen gleichzeitig zutreffen müssen.

Die Vornorm DIN CLC/TS 62046³ zur Anwendung von Schutzeinrichtungen zur Anwesenheitserkennung von Personen spezifiziert Anforderungen, die sowohl für BWS gelten als auch für Schalmatten. Zudem definiert sie Eigenschaften, die in einer Umgebung mit Menschen zu erwarten sind. Die Norm trifft dabei jedoch die Einschränkung, dass die Personen im Alter von 14 Jahren und darüber sein müssen, wodurch ihre Anwendung bei Servicerobotern, die auch in Haushalten mit Kindern eingesetzt werden können, nicht zwingend möglich ist.

Obwohl die bisher aufgeführten Normen nur einen Teil der existierenden Normenwelt widerspiegeln, so lässt sich jedoch feststellen, dass durch bereits existierende Normen immer nur Teilaspekte eines Robotersystems für Serviceanwendungen, wie z.B. die Sensoren oder Plattform, validiert werden können. Zudem gibt es insbesondere im Bereich der C-Normen kaum Normen, unter die jegliche Art von Serviceroboter fällt. Um diesen Umstand zu beheben, befinden sich momentan viele Normen, die in diese Richtung zielen, in Entwicklung. Es sollen hier kurz die relevanten Normen dazu aufgeführt werden.

Im Bereich der Industrieroboter befindet sich die technische Spezifikation ISO TS 15066 „Robots and robotic devices – Collaborative robots“ in Entwicklung, die genauere Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb mit Industrierobotern und den daraus resultierenden Kräfteimits stellen soll. Dies kann insbesondere als Grundlage für die zulässige Kräfteinwirkung von Servicerobotern auf den Menschen dienen.

Speziell im Bereich der Servicerobotik ist besonderes Augenmerk auf die Entwicklung der Norm ISO 13482 „Robots and robotic devices – Safety requirements – Non-medical personal care robot“ zu richten. Obwohl der Normentwurf sich zurzeit noch auf „Personal Care Robots“ beschränkt, das heißt Roboter die in direkter Interaktion mit dem Menschen stehen, ist zu erwarten, dass dieser als Grundlage für Standards im Bereich der Servicerobotik fungieren wird. Die öffentlich verfügbare Entwurfsfassung ISO/DIS 13482 legt Anforderungen und Anleitungen für eine inhärent sichere Konstruktion, für Schutzmaßnahmen und die Benutzerinformation zur Anwendung der Haushalts- und Assistenzroboter fest.

¹ Normenfamilien DIN EN ISO 13856-x - Sicherheit von Maschinen - Druckempfindliche Schutzeinrichtungen

² Normenfamilie DIN EN 61496-x - Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen

³ Vornorm DIN CLC/TS 62046 - Sicherheit von Maschinen - Anwendung von Schutzausrüstungen zur Anwesenheitserkennung von Personen

3.2 Existierende Validierungsmethoden

Um Serviceroboter in Übereinstimmung mit den geltenden Normen und Richtlinien zu entwerfen und auszulegen, ist es erforderlich eindeutige Validierungsmethoden anzuwenden zu können. Dieser Vorgang muss bei der Konstruktion beginnen und letztendlich am realen Produkt enden.

So definiert die Maschinenrichtlinie Grundsätze zur Integration der Sicherheit, die bei der inhärent sicheren Konstruktion beginnt und über geeignete Schutzmaßnahmen bis hin zur Benutzerinformation reicht. Ebenso wird darauf hingewiesen, dass auch vernünftigerweise vorhersehbare Fehlanwendungen der Maschine, z.B. durch den Menschen, mit in die Überlegungen einbezogen werden sollen. So sollen Steuerungssysteme gewisse Fehlertoleranzen aufweisen und gefährliche Funktionen unterbunden werden. Diese Anforderungen sind zwar durchaus verständlich, jedoch werden keine konkreten Methoden genannt, um die Konformität mit diesen nachzuweisen.

Ebenso bieten die A- und B-Normen weitere allgemeine Informationen zur sicheren Auslegung, wie z.B. dass die Validierung durch Analyse und Prüfungen erfolgen soll, jedoch werden ebenfalls keine konkreten Testfälle definiert. So definiert die ISO 13849 Validierungsleitsätze für sicherheitsbezogene Teile der Steuerung. Durch Analyse sollen dabei beispielsweise Gefährdungen identifiziert und durch Fehlereingabeproofungen validiert werden. Im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten definiert die ISO 13855 lediglich Berechnungsformeln für den Mindestabstand von Annäherungseinrichtungen, die einzuhalten sind.

Basierend auf Normen, die einzelne Teile eines Serviceroboters abdecken, können jedoch einige wichtige Grundsätze für Testaufbauten abgeleitet werden. Die Norm ISO 10218 für Industrieroboter bleibt zwar in ihrer Definition von Validierungsmethoden noch ziemlich generell, gibt aber bereits einen ersten Überblick, welcher Art die Methoden sein können. Sie nennt dabei als Methoden die visuelle Inspektion, praktische Tests, Messungen, Beobachtung während der Operation und Überprüfung der gegebenen Daten. Zudem werden erste Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb gestellt. Insbesondere für genauere Geschwindigkeits- und Kraftgrenzen wird jedoch auf die in Entwicklung befindliche ISO TS 15066 verwiesen.

Im Bezug auf druckempfindliche Schutzeinrichtungen nennt die ISO 13856 neben allgemeinen Testmethoden auch spezielle Vorgehensweisen, Prüfkörper und Betätigungskräfte. Diese Methoden beinhalten den Zusammenhang zwischen Betätigungskraft und Annäherungsgeschwindigkeit, den Betätigungsweg und Umwelteinflüsse. Die Validierung, dass die Betätigungskraft die in Abbildung 3 genannte Maximalkraft nicht übersteigt, soll in allen möglichen Richtungen, über die gesamte Sensorhaut, bei den relevanten Annäherungsgeschwindigkeiten, mit den relevanten Prüfkörpern und über die Temperaturspanne erfolgen. Zudem sollen die Versuche an mindestens 5 unterschiedlichen Stellen durchgeführt werden, die als am kritischsten anzusehen sind.

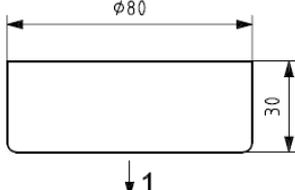
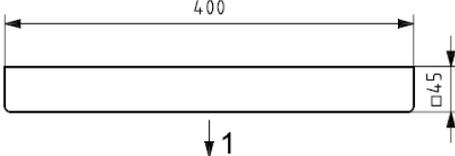
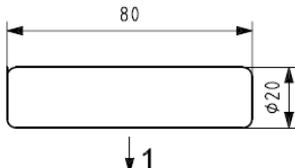
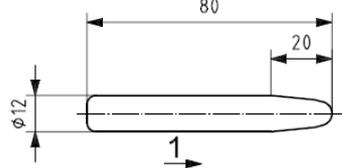
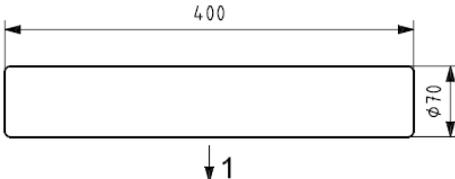
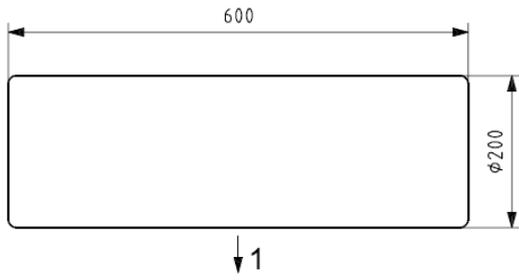
<p>Test piece 1 Actuating force: 150 N Test piece to simulate body part: Head or hand</p>	
<p>Test piece 2 Actuating force: 400 N Body part: Shoulder</p>	
<p>Test piece 3 Actuating force: 50 N Body part: Finger (knuckle)</p>	
<p>Test piece 4 Actuating force: 50 N Body part: Finger (tip)</p>	
<p>Test piece 5 Actuating force: 250 N Body part: Arm or leg</p>	
<p>Test piece 6 Actuating force: 400 N Body part: Whole body</p>	
<p>1 test direction</p>	

Abbildung 3: Prüfkörper gemäß ISO 13856-3:2006

Für berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen bietet die DIN EN 61496 anwendbare Validierungsmethoden. Sie definiert unter anderem die Umgebungsverhältnisse wie eine Umgebungstemperatur von 20°C +/- 5°C, Luftfeuchte von 25-75% und einen Luftdruck zwischen 86kPa und 106kPa. Des Weiteren werden bspw. für Lichtvorhänge genaue Prüfanweisungen gegeben. So soll ein Prüfstab unter verschiedenen Konfigurationen und Geschwindigkeiten durch das Schutzfeld geführt werden (unter 45° und 90°, an den Rändern und in der Mitte, usw.). Zudem wird der Einfluss von Störlichtquellen auf den Sensor untersucht.

In der Vornorm DIN CLC/TS 62046 zur Anwesenheitsüberwachung werden bei der Berechnung der Annäherungsgeschwindigkeit erstmals auch ortsveränderliche Maschinen einbezogen. Zunächst werden wie in ISO 13855 „Annäherungsgeschwindigkeiten mit 1600 mm/s für normales Gehen und 2000 mm/s für normales Greifen ohne Hast“

definiert. Es kann jedoch eine höhere Geschwindigkeit erforderlich sein, wenn Personen in der Umgebung z.B. rennen könnten bzw. wenn die Norm auf ortsveränderliche Maschinen angewandt werden soll. Hier ist eine Risikoanalyse erforderlich, wobei die Geschwindigkeit jedoch höher als die „Geschwindigkeit der ortsveränderlichen Maschine oder 1,6 m/s“ sein muss. Ebenso werden neben der Annäherungsgeschwindigkeit weitere menschliche Eigenschaften genannt, wie z.B. die Anatomie des Menschen, dessen Interaktion mit der Maschine und daraus resultierenden Fehlanwendungen, die beim Entwurf und der Validierung beachtet werden müssen.

Insbesondere für mobile Systeme am aufschlussreichsten sind Normen für fahrerlose Transportsysteme. Diese bieten genaue Prüfaufbauten und –abläufe für die Validierung der Sicherheit. So legt die DIN EN 1525 Prüfkörper fest und dass die sicherheitsbezogenen Teile mindestens der Kategorie 3 nach ISO 13849 entsprechen müssen. Als Prüfkörper für die Testfälle werden dabei die Prüfkörper 5 und 6 der ISO 13856, die den Arm bzw. gesamter Körper widerspiegeln sollen, verwendet. In Hauptfahrrichtung muss dabei Prüfkörper 6 „an beliebiger Stelle des Fahrweges senkrecht zum Fahrweg [...] liegend“ erkannt werden, bevor eine Betätigungskraft von 750N erreicht wird. Ähnliches gilt für den Prüfkörper 5, der jedoch stehend und mit einer Betätigungskraft von maximal 250N erkannt werden muss. Zudem wird definiert, dass das Fahrzeug mit Maximalgeschwindigkeit fahrend und mit Nennlast beladen sein soll. Für den Seitenschutz bei Drehbewegungen genügt die Detektion des stehenden Prüfkörpers 6. Weiterführende Informationen zur Verifizierung der Sicherheit von fahrerlosen Flurförderzeugen stellt der Normentwurf der ISO 3691-4¹ dar. Dieser umfasst zusätzlich zu den druckempfindlichen Sensoren auch berührungslos wirkende. Dabei wird erstmals definiert, dass die Reflexionseigenschaft der Prüfkörper „repräsentativ für die menschliche Kleidung“ sein muss. Nähere Informationen werden dazu allerdings nicht gegeben. Für den Test der Bremsleistung wird zwar kein konkreter Versuchsaufbau vorgegeben, jedoch wird definiert, dass das Fahrzeug mit Nennlast und Nenngeschwindigkeit fahren, sich auf der spezifizierten Boden-Oberfläche bewegen und evtl. auftretende Neigungen berücksichtigt werden sollen. Zusätzlich zu den Versuchen in DIN EN 1525 wird definiert, dass jeder Versuch dreimal wiederholt werden muss, einmal in der Mitte des Detektionsbereichs und an jedem Ende. Die Höchstgeschwindigkeit wird bei Anwesenheit von Menschen auf 0,3 m/s beschränkt und zudem muss eine Not-Aus-Einrichtung erreichbar sein.

Betrachtet man letztendlich die in Entwicklung befindliche ISO 13482, so gibt diese jedoch bisher nur allgemeine Informationen, wie Validierungsmethoden auszusehen haben. So werden in ihr Validierungsmethoden genannt wie visuelle Inspektion, praktische Tests, Messung, Beobachten während der Operation und Review (vgl. ISO 10218 und IEC 61508). Zudem werden einige Hinweise zur Auswertung von einzelnen spezifischen Bauteilen gegeben. So soll die Leistungsfähigkeit von Händen und Greifern durch eine Serie von extremen Bewegungen wie Beschleunigung, Stopps und 180°-Drehungen sowohl für Plattform als auch Manipulator überprüft werden. Diese Versuche sollen mit Maximallast und Maximalgeschwindigkeit durchgeführt werden. Die Bremsleistung soll bei einer gegebenen Oberflächenreibung getestet werden.

¹ Normenentwurf 3691-4 - Flurförderzeuge - Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung - Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme

Wie bereits im vorigen Kapitel erwähnt, gibt es speziell für Serviceroboter keine direkt anwendbaren Normen. Stattdessen ist man darauf angewiesen, einzelne Bauteile des Roboters getrennt zu validieren. Trotz der Möglichkeiten aus verwandten Normen Validierungsmethoden zu gewinnen, gibt es doch einige Aspekte, die bisher keine Norm umfasst. So stellt insbesondere der erwünschte Kontakt mit Menschen eine neue Herausforderung dar. Ebenso erfordern die Kombination einer mobilen Plattform mit einem Manipulator und die neue Art der erforderlichen Bahnplanung neue Herangehensweisen.

Ein Ansatz, um diese Lücken in den Validierungsmethoden zu schließen, ist zunächst, diese nach ihrer Art zu klassifizieren. Grob gesehen lassen sich diese in folgende Kategorien unterteilen:

- (mechanische) Leistungsfähigkeit
 - Bremsweg/Reaktionszeit des Roboterarms und der Plattform
 - auftretende Kräfte, übertragene Energien insbesondere im Kontakt mit Menschen (z.B. auch Greifkraft, Schutzeinrichtungen)
 - Transport von (gefährlichen) Gegenständen (z.B. Flüssigkeiten, die verschüttet werden können)
- Umgang mit Hindernissen
 - Erkennen von Personen/Hindernissen und Umgebung
 - Reaktion auf Personen/Hindernisse und Umgebung (Bahnplanung; ausweichen, stoppen)
- Aufstellen/Überprüfen der Annahmen
 - Identifikation kritischer Kollisionsszenarien
 - Modellierung von Umgebung/Hindernissen/Kinematik

Im Bereich der mechanischen Leistungsfähigkeit bieten bereits existierende Normen zwar gute Anhaltspunkte, jedoch existieren z.B. speziell für die Ermittlung des Bremsweges bei einer Kombination von mobiler Plattform und integriertem Manipulator noch keine Normen. In Kombination mit der Reaktionszeit ist es zudem erforderlich die Möglichkeiten der Detektion von Objekten während des Fahrens in Betracht zu ziehen. Durch den Einsatz von Servicerobotern in Haushalten spielen ebenso Hol- und Bringdienste eine wichtige Rolle. Da hierbei prinzipiell beliebige Gegenstände gegriffen und transportiert werden können, ist es auch wichtig diese sicher zu erkennen (und eventuell nicht zu greifen) bzw. deren sicheren Transport (z.B. kein Verschütten von Flüssigkeiten in offenen Gefäßen) zu gewährleisten.

Ein großes Normen-Neuland stellt der Umgang mit Hindernissen dar. In Industrieumgebungen sind meist die Wege vorgegeben und die Bereiche vom Menschen abgegrenzt. Dies ist allerdings bei Servicerobotern nicht der Fall. Diese müssen selbstständig und unter veränderlichen Umgebungen navigieren und teilweise speziell auf Menschen zugehen.

Zur Detektion von Hindernissen bzw. Personen werden vermehrt neben Laserscannern Kamerasysteme angewandt, die die Umgebung sowohl in 2D als auch 3D abtasten können. Dabei existieren für solche Systeme noch keinerlei Validierungsmethoden, da diese nicht unter die in DIN EN 61496 definierten berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen fallen. Ebenso ist zu berücksichtigen, dass sowohl eine Kollision der Plattform als auch des Manipulators erkannt werden muss. In diesem Zusammenhang ebenso wichtig ist es, gesperrte Bereiche erkennen zu können und gefährliche Untergründe wie Treppenstufen oder übermäßige Schrägen. Zudem müssen Validierungsmethoden die Grenzen der Erkennungsfunktion bestimmen. Darunter fallen zum einen die

benötigten Lichtverhältnisse und zum anderen ob in alle Richtungen gleich gut erkannt werden kann oder auch wie weit entfernt Gegenstände sein dürfen.

Wenn ein Hindernis dann erkannt wurde, muss die richtige Reaktion darauf ergriffen werden. Beim Einsatz von fahrerlosen Transportsystemen in der Industrie genügt es dabei meist, das Fahrzeug zu stoppen solange bis die Gefährdung vorüber ist (vgl. DIN EN 1525). Diese Vorgehensweise führt jedoch bei der Anwendung in nicht industriellen Umgebungen nicht zum gewünschten Ergebnis. Hier soll zwar ebenfalls ein direkter Kontakt mit den Hindernissen vermieden werden, jedoch kann und soll unter Umständen vom zuvor ermittelten Kurs abgewichen werden, um das Hindernis zu umgehen und dennoch das Ziel zu erreichen. Wichtig ist dabei, dass die Bahnplanung richtig arbeitet und beispielsweise ausweicht, wenn ein alternativer Weg besteht, oder stoppt und z.B. eine Person darum bittet, zur Seite zu treten und den Weg freizumachen. Daraus resultiert die Anforderung, dass aufgestellte Annahmen für die Bahnplanung auch möglichst zuverlässig und richtig sein müssen. So muss die Modellbildung korrekt abgelaufen sein, dass sämtliche Gegenstände der Umgebung als auch die Form des Roboters in der aktuellen Konfiguration richtig wiedergegeben werden. Denn basierend auf falschen Ergebnissen könnte ansonsten eine Gefährdung entstehen, wenn der Roboter zu nah an einem Menschen vorbeifährt oder ggf. Wege findet, die nicht existieren.

Um entsprechende Vorkehrungen treffen zu können, ist es notwendig zuvor eine Risikoanalyse durchzuführen und daraus kritische Kollisionsszenarien abzuleiten. Basierend auf diesen müssten die Validierungsmethoden angepasst werden. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass ebenfalls ungeschulte, evtl. körperlich beeinträchtigte Personen oder Kleinkinder in Kontakt mit dem Serviceroboter kommen könnten. Die meisten Normen schließen diese Anwendergruppe ganz aus, wodurch z.B. im Bereich der Annäherungsgeschwindigkeiten und des vorhersagbaren menschlichen Verhaltens keine Aussagen möglich sind.

Zusammengefasst fehlen Validierungsmethoden vor allem im Bezug auf moderne Sichtsysteme, selbstständige Wegfindung in Echtzeit in sich ändernden Umgebungen und beim Zusammenspiel von verschiedenen Plattformen um eine komplexe Aufgabe zu erfüllen. Ebenso sind viele existierende Normen zwar in der Definition der Anforderungen genau, bieten jedoch viel Interpretationsspielraum bei der Wahl geeigneter Validierungsmethoden.

5 Vorschlag für neue Validierungsmethoden

Basierend auf den Ergebnissen von Kapitel 3, in denen der zusätzliche Validierungsbedarf in verschiedenen Bereichen erläutert wurde, wurde im Folgenden der Versuch unternommen, diese Lücken durch geeignete Methoden zu füllen. Dabei wird die Anwendbarkeit der Validierungsmethoden insbesondere am bestehenden Robotersystem des Care-O-Bot® 3 geprüft.

Anhand von bereits existierenden Validierungsmethoden, werden zunächst allgemeine Anforderungen, insbesondere für die Umgebungsbedingungen, definiert.

Versuche sollen, sofern nicht anders angegeben, mindestens dreimal in jeder Konfiguration durchgeführt werden. Des Weiteren sollen sie unter Maximallast und mit der für die jeweilige Anwendung vorgesehenen Höchstgeschwindigkeit durchgeführt werden. Durch Risikoanalyse sollen die kritischen Eigenschaften (Geschwindigkeit, Konfiguration, usw.) ermittelt und entsprechend angepasst werden. Als Prüfkörper sollen die bereits in der Norm 13856 definierten verwendet werden.

Die Umgebungsbedingungen sollen, sofern nicht anders definiert, den folgenden entsprechen:

- Beleuchtung 200 lx ± 50 lx
- Temperatur 23°C ± 5°C
- Luftfeuchtigkeit 50% ± 5%
- Farbtemperatur zwischen 5000 K und 6000 K

Zur Beschreibung der Validierungsmethoden wurde ein Format gewählt, welches die verschiedenen zugehörigen Aspekte mit einbezieht, wie z.B. Einflussfaktoren, typische Gefahrenquellen und die Tätigkeit des Roboters, welche sich gemäß der Risikoanalyse ergeben. Es wurde zwar der Versuch unternommen, die Validierungsmethoden möglichst passend für verschiedene Robotersysteme zu gestalten aber dennoch klare Anweisungen zu definieren. Dennoch müssen die beeinflussenden Faktoren ggf. gemäß einer vorigen Risikoanalyse angepasst werden, da diese im Folgenden speziell an die des Care-O-Bot® 3 angepasst wurden.

Zusätzlich dazu werden eine kurze Beschreibung der Validierungsmethode und deren Umfang gegeben und entsprechende Versuchsaufbauten definiert. Jeder Versuchsaufbau wird nochmals unterteilt in eine genauere Beschreibung, vorbereitende Maßnahmen, den Aufbau, das Vorgehen und abschließend werden Anhaltspunkte für die Auswertung gegeben.

5.1 Bremsweg der Roboterplattform

Bremsweg der Plattform		
Einflussfaktoren/Kriterien	Typische Gefahrenquellen	Tätigkeit des Roboters
<ul style="list-style-type: none"> • Bodenbeschaffenheit (Teppich, Fliesen, Laminat, Rasen) • Zuladung (Maximallast (Manipulator/Plattform), ungünstige Manipulatorhaltung) • Geschwindigkeiten, Beschleunigungsphase • Mechanische Beanspruchung (Vibration, Verschmutzungen) • Klimatische Bedingungen (Tem- 	<ul style="list-style-type: none"> • Überfahren werden • Quetschen • Stoß • Einziehen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahren/Positionieren • Transportieren von Objekten • Standfestigkeit

Versuchsaufbau 2

Vorschlag für neue
Validierungsmethoden

Beschreibung:

Ziel dieses Versuches ist die qualitative Prüfung, ob der Roboter in der Lage ist, rechtzeitig vor der Kollision mit einem Hindernis zum Stehen zu kommen. Die Prüfung soll dabei jeweils für alle relevanten äußeren Faktoren (z.B. Bodenbeläge) ermittelt werden.

Vorbereitung:

Es sind kritische Szenarien herauszuarbeiten, bei denen hohe Bremswege zu erwarten sind. Für diese Szenarien werden Tests durchgeführt. Es werden außerdem geeignete Prüfkörper ausgewählt (vgl. ISO 13856).

Aufbau:

Die Teststrecke besteht aus einem ausreichend langen, geraden Wegstück, auf dem der Roboter zunächst bis zur Maximalgeschwindigkeit beschleunigt und dann auf das Hindernis trifft. Dies sorgt dafür, dass ein Sicherheitssensor anspricht und der Roboter bis zum Stillstand abbremst. Der Untergrund des Weges muss dabei den identifizierten kritischen Szenarien entsprechen. Durch austauschbare Bodenplatten kann eine Teststrecke an mit verschiedenen Untergründen versehen werden.

Die Position der Prüfkörper muss sich an in der Realität zu erwartenden Situationen orientieren (z.B. stehender Mensch/ gestürzter, liegender Mensch). Ein externes Messsystem ist nicht erforderlich. Prüfkörper sollen zunächst fest installiert sein und damit für den Roboter permanent sichtbar. In weiteren Tests kann die Reaktion auf plötzlich auftauchende Hindernisse untersucht werden.

Vorgehen:

Der Roboter wird jeweils bis zur gewünschten Geschwindigkeit beschleunigt und trifft dann auf das Hindernis in seinem Fahrweg. Ggf. kann dieses unter definierten Bedingungen sehr schnell in den Weg des Roboters verschoben werden.

Auswertung:

Es wird qualitativ für jede Testkonfiguration ausgewertet, ob der Roboter rechtzeitig zum Stehen gekommen ist oder ob eine Kollision mit dem Hindernis/dem Prüfkörper stattgefunden hat.

5.2 Bremsweg des Roboterarms

Bremsweg des Arms

Einflussfaktoren/Kriterien	Typische Gefahrenquellen	Tätigkeit des Roboters
<ul style="list-style-type: none"> • Zuladung (Maximallast, ungünstige Haltung des Arms) • Geschwindigkeiten, Beschleunigung • Mechanische Beanspruchung (Vibration, Verschmutzungen) • Klimatische Bedingungen (Temperatur, Feuchte) 	<ul style="list-style-type: none"> • Quetschen • Stoß • Einziehen 	<ul style="list-style-type: none"> • Transportieren von Objekten • Aufnehmen/Ablegen von Objekten • Bewegen von großen, sperrigen Objekten (z.B. Türen) • Entgegennehmen von/Übergeben an den Menschen
<p>Beschreibung: Der Roboter soll in der Lage sein, nach Auslösen eines manuellen Stopps/Not-Stopps, stehen zu bleiben bevor eine gefahrbringende Situation auftreten kann. Dabei müssen eventuell wechselnde äußere Faktoren, wie z.B. die aktuelle Achskonfiguration, ausrei-</p>		

chend berücksichtigt werden.

Diese Validierungsmethode setzt die sorgfältige Prüfung der Sicherheitseinrichtungen an sich nach geltenden Normen voraus. Darauf aufbauend wird das Gesamtsystem des Roboters und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten betrachtet.

Sämtliche hier aufgeführten Versuche müssen ausreichend oft wiederholt werden, um eine genügend hohe Aussagekraft und (Ausfall-)Sicherheit zu erhalten.

Vorschlag für neue
Validierungsmethoden

Versuchsaufbau 1

Beschreibung:

Ziel dieses Versuches ist die Ermittlung des Bremsweges und der Zeit bis zum Stillstand nach Auslösen eines Stopp-Signals in der Steuerung. Der Bremsweg soll dabei jeweils für alle relevanten äußeren Faktoren ermittelt werden.

Vorbereitung:

Es sind kritische Szenarien, (insbesondere Stellungen des Roboterarms) herauszuarbeiten, bei denen hohe Bremswege zu erwarten sind. Für diese Szenarien werden Tests durchgeführt.

Aufbau:

Der Testaufbau besteht aus dem Roboter und einem Messsystem. Der Roboter muss über ausreichend Platz verfügen, um Bewegungen mit dem Roboterarm durchführen zu können. Um den Bremsweg zu ermitteln, müssen sowohl die Armpose, in der der Not-Stopp ausgelöst wurde, als auch die Arm-Pose, in der der Roboterarm später zum Stehen kommt, hinreichend genau gemessen werden. In Frage kommen hier 3D-Kamerasysteme, die eine Positionsbestimmung erlauben oder Tracker-Systeme (z.B. Lasertracker). Eine Messung allein anhand von Encoderwerten des Arms sollte ggf. in Stichproben durch ein externes Messsystem verifiziert werden. Das Signal, dass der Stopp ausgelöst wurde, muss auf geeignete Weise aus dem Roboter herausgeführt und dem Messsystem zur Verfügung gestellt werden.

Vorgehen:

Der Roboterarm wird durch Abfahren einer geeigneten Trajektorie in eine vorgegebene Pose gebracht, wobei sich alle Achsen des Arms mit der gewünschten Geschwindigkeit bewegen. Dann wird (manuel oder automatisch) ein Stopp ausgelöst. Mit Hilfe des Messsystems wird der Bremsweg gemessen.

Auswertung:

Die erforderlichen Bremswege sind in Abhängigkeit von Pose und der Geschwindigkeit sowie von anderen relevanten Einflussfaktoren darzustellen. Zu betrachten sind weiterhin andere Auffälligkeiten, beispielsweise die Abweichung von der Solltrajektorie oder die Stabilität des Roboters während der Bremsung. Die Ergebnisse sollen in der Risikoanalyse kritisch betrachtet werden. Sollten Bremswege in bestimmten Situationen zu groß sein, müssen geeignete Maßnahmen getroffen werden.

Versuchsaufbau 2

Beschreibung:

Ziel dieses Versuches ist die qualitative Prüfung, ob der Roboterarm in der Lage ist, rechtzeitig vor der Kollision mit einem Hindernis zum Stehen zu kommen.

Vorbereitung:

Es sind kritische Szenarien herauszuarbeiten, bei denen hohe Bremswege zu erwarten sind. Für diese Szenarien werden Tests durchgeführt. Es werden außerdem geeignete Prüfkörper ausgewählt (vgl. ISO 13856).

Aufbau:

Der Testaufbau besteht aus dem Roboter und einem Messsystem. Der Roboter muss über ausreichend Platz verfügen, um Bewegungen mit dem Roboterarm durchführen zu können.

Die Position der Prüfkörper muss sich an in der Realität zu erwartenden Situationen orientieren (z.B. stehender Mensch/ gestürzter, liegender Mensch). Ein externes Mess-

system ist nicht erforderlich. Prüfkörper sollen zunächst fest installiert sein und damit für den Roboter permanent sichtbar. In weiteren Tests kann die Reaktion auf plötzlich auftauchende Hindernisse untersucht werden.

 Vorschlag für neue
 Validierungsmethoden

Vorgehen:

Der Roboterarm wird durch Abfahren einer geeigneten Trajektorie in eine vorgegebene Pose gebracht, wobei sich alle Achsen des Arms mit der gewünschten Geschwindigkeit bewegen. Die Position des Prüfkörpers wird so angepasst, dass in diesem Moment eine Schutzeinrichtung anspricht und das Stopp-Signal auslöst. Ggf. kann der Prüfkörper unter definierten Bedingungen sehr schnell in den Weg des Roboterarms verschoben werden.

Auswertung:

Es wird qualitativ für jede Testkonfiguration ausgewertet, ob der Roboterarm rechtzeitig zum Stehen gekommen ist oder ob eine Kollision mit dem Hindernis/dem Prüfkörper stattgefunden hat.

5.3 Hindernisvermeidung

Hindernisvermeidung		
Einflussfaktoren/Kriterien	Typische Gefahrenquellen	Tätigkeit des Roboters
<ul style="list-style-type: none"> • Bodenbeschaffenheit • Manövrierbereich (Platz, Umfahren möglich?) • Hindernisart (Form, Größe, Lage, Geschwindigkeit) • Roboterkonfiguration (Manipulator angelegt, ausgefahren) • Sicht-/Detektionsbereich (z.B. verdeckte Hindernisse) • Zuladung (Maximallast, ungünstige Haltung des Arms) • Geschwindigkeiten, Beschleunigung • Mechanische Beanspruchung (Vibration, Verschmutzungen) • Klimatische Bedingungen (Temperatur, Feuchte) 	<ul style="list-style-type: none"> • Überfahren werden • Quetschen • Stoß • Einziehen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahren/Positionieren • Transportieren von Objekten • Bewegen von großen Objekten (z.B. Tür) • Aufnehmen/Ablegen von Objekten • Entgegennehmen von/Übergeben an den Menschen
<p>Beschreibung: Der Roboter soll in der Lage sein, nachdem ein oder mehrere Hindernisse erkannt wurden, zuverlässig eine der Situation entsprechende Maßnahme einzuleiten (z.B. Stopp oder Umfahren). Dabei soll die Folge-/Ausweichaktion zu keiner neuen Gefährdung führen. Neben statischen Hindernissen sind dabei auch bewegliche Hindernisse zu untersuchen. Diese Validierungsmethode setzt die sorgfältige Prüfung der Sicherheitseinrichtungen an sich nach geltenden Normen voraus. Darauf aufbauend wird das Gesamtsystem des Roboters und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten betrachtet. Sämtliche hier aufgeführten Versuche müssen ausreichend oft wiederholt werden, um eine genügend hohe Aussagekraft und (Ausfall-)Sicherheit zu erhalten.</p>		
<p>Versuchsaufbau 1</p>		
<p>Beschreibung: Ziel dieses Versuches ist der Nachweis, dass Hindernisse sicher umfahren werden können.</p>		

nen. Dies gilt sowohl für den Roboter als Ganzen als auch den Roboterarm. Das Ausweichen stellt letztendlich eine Kombination aus Ausweichen des Arms und der Plattform dar.

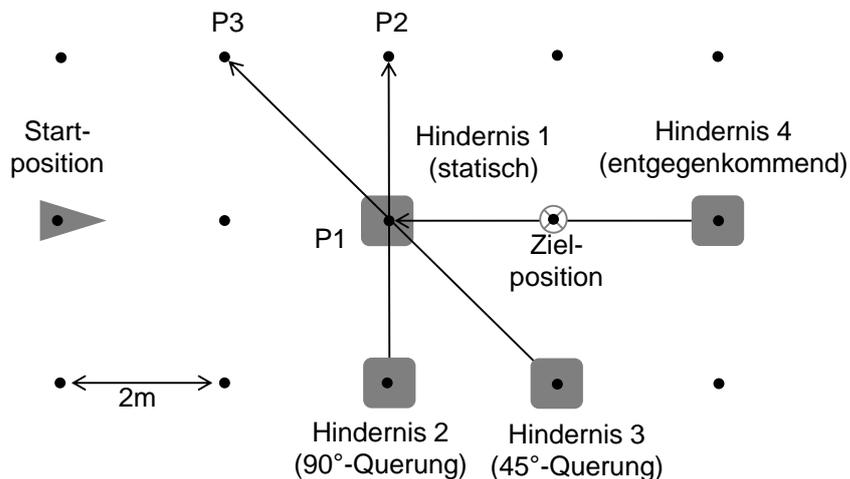
Vorschlag für neue
Validierungsmethoden

Vorbereitung:

Es sind kritische Szenarien, d.h. Konstellationen aus der Position und Bewegung von Plattform, Arm und Hindernissen herauszuarbeiten, bei denen eine hohe Kollisionsgefahr zu erwarten ist. Für diese Szenarien werden Tests durchgeführt. Für die Hindernisse sind passende Prüfkörper nach ISO 13856 auszuwählen.

Aufbau:

Der Roboter wird auf die Startposition gestellt. In einiger Entfernung (für einen menschengroßen Roboter z.B. 6m) wird eine Zielposition definiert, zu der der Roboter später fahren soll. Für den Roboterarm wird ebenso eine Start- und eine Zielpose vorgegeben. Die Hindernisse werden so platziert, dass eine Kollision zwischen Roboter und Prüfkörper stattfinden muss, wenn dieser auf seinem Weg nicht ausweicht oder stoppt. Stationäre Hindernisse werden zwischen den Roboter und sein Ziel platziert. Bewegliche Hindernisse können beispielsweise dem Roboter direkt entgegenkommen oder seine Route im 90°-Winkel oder im 45°-Winkel queren. Die Bewegung muss gleichmäßig, mit definierter Geschwindigkeit erfolgen. Die folgende Abbildung zeigt eine beispielhafte Anordnung der Hindernisse. Diese sollten jedoch für jeden Roboter entsprechend der identifizierten, kritischen Szenarien angepasst werden.



Um später zweifelsfrei feststellen zu können, ob eine Kollision zwischen dem Roboter und dem Prüfkörper stattgefunden hat, sollte ein optisches Messsystem mit mehreren Kameras, die aus verschiedenen Winkeln filmen, verwendet werden.

Vorgehen:

Die Bewegung des Roboters wird gestartet. Im Fall eines beweglichen Hindernisses, wird dieses zur gleichen Zeit gestartet. Es wird beobachtet, wie der Roboter sich gegenüber dem Hindernis verhält und ob es zu Kollisionen kommt. Der Versuch ist beendet, wenn der Roboter seine Zielposition erreicht oder wenn nach einer hinreichend großen Wartezeit die Zielposition nicht erreicht wurde. Die Tests werden der Reihe nach für alle Hindernisse durchgeführt.

Auswertung:

Es wird für jedes Hindernis ermittelt, ob der Roboter eine Kollision erfolgreich und mit ausreichendem Sicherheitsabstand verhindert hat und ob er seine Zielposition nach den Maßnahmen zur Hindernisvermeidung noch erreicht wurde. Weiterhin kann bewertet werden, ob der Roboter jeweils die beste/effizienteste Methode zur Hindernisvermeidung gewählt hat. Sollte die Fähigkeiten des Roboters zur Hindernisvermeidung zu gering sein, müssen Maßnahmen getroffen werden.

Versuchsaufbau 2	
Beschreibung:	Ziel dieses Versuches ist der Nachweis, dass negative Hindernisse (z.B. Senken oder Treppenstufen) sicher umfahren werden können.
Vorbereitung:	Es sind kritische Bodenbeschaffenheiten, beispielsweise nach unten führende Stufen oder Löcher im Boden herauszuarbeiten. Für diese Szenarien werden Tests durchgeführt.
Aufbau:	Negative Hindernisse müssen für den Versuch so präpariert werden, dass sie alle wesentlichen Eigenschaften der realen Hindernisse aufweisen, die die Erkennung durch den Roboter beeinträchtigen. Eventuelle Fangeinrichtungen, um den Roboter im Rahmen der Tests vor einem Absturz zu sichern, dürfen das Versuchsergebnis nicht beeinflussen. Der Roboter wird vor dem negativen Hindernis aufgestellt. Es wird eine Zielposition in gerader Linie hinter dem Hindernis definiert. Das Hindernis dabei soll aus verschiedenen Winkeln angefahren werden.
Vorgehen:	Die Bewegung des Roboters wird gestartet. Es wird beobachtet, wie der Roboter sich gegenüber dem Hindernis verhält und ob dieses überfahren wird.
Auswertung:	Es wird für jedes Hindernis ermittelt, ob der Roboter ein Überfahren der Gefahrenstelle erfolgreich und mit ausreichendem Sicherheitsabstand verhindert hat und ob er seine Zielposition nach den Maßnahmen zur Hindernisvermeidung noch erreicht wurde. Weiterhin kann bewertet werden, ob der Roboter jeweils die beste/effizienteste Methode zur Hindernisvermeidung gewählt hat. Sollte die Fähigkeiten des Roboters zur Hindernisvermeidung zu gering sein, müssen Maßnahmen getroffen werden.

 Vorschlag für neue
 Validierungsmethoden

5.4 Erkennen von Kollisionen

Erkennen von Kollisionen		
Einflussfaktoren/Kriterien	Typische Gefahrenquellen	Tätigkeit des Roboters
<ul style="list-style-type: none"> • Geschwindigkeiten von Hindernis und Roboter • Größe/Beschaffenheit des Objekts, Hindernisses • Reaktionszeit der Steuerung des Roboters • Lage des zu detektierenden Objekts (Ort, Winkel, ...) • Detektionsbereich • Art der Kollision 	<ul style="list-style-type: none"> • Quetschen • Stoß 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnehmen/Ablegen von kleinen Objekten • Transportieren von Objekten • Entgegennehmen von/Übergeben an den Menschen
Beschreibung:		
<p>Der Roboterarm soll in der Lage sein, eine Kollision, die nicht durch andere Sicherheitseinrichtungen verhindert wurde, zu erkennen und entsprechend zu reagieren (z.B. zu stoppen).</p> <p>Diese Validierungsmethode wird eingesetzt, sofern der Roboter über taktile Sensoren verfügt, die eine Kollision erkennen können. Eine sorgfältige Prüfung der Sicherheitseinrichtungen an sich nach geltenden Normen wird vorausgesetzt. Darauf aufbauend</p>		

wird das Gesamtsystem des Roboters und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten betrachtet. Hilfestellung zu grundlegenden Prüfungen bietet die Norm ISO 13856 (unter anderem Prüfkörper für jeden Körperteil).
Sämtliche hier aufgeführten Versuche müssen ausreichend oft wiederholt werden, um eine genügend hohe Aussagekraft und (Ausfall-)Sicherheit zu erhalten.

Vorschlag für neue
Validierungsmethoden

Versuchsaufbau 1

Beschreibung:

Ziel dieses Versuches ist der Nachweis, dass eine bereits stattgefunden Kollision vom Roboter erkannt wird und dass dieser in richtiger Weise darauf reagiert.

Vorbereitung:

Es sind kritische Szenarien, d.h. Situationen, in denen die Erkennung einer Kollision tendenziell schwierig ist, herauszuarbeiten. Wichtige Einflussfaktoren sind der Ort der Kollision und die Höhe der Kräfteinwirkung sowie das Körperteil eines Menschen, mit dem die Kollision stattfindet. Entsprechend der in Frage kommenden Körperteile sind Prüfkörper gemäß ISO 13856 zu wählen.

Aufbau:

Der Aufbau besteht aus dem Roboter selbst und den zu verwendenden Prüfkörpern. Je nach Szenario kann der Roboter still stehen oder sich bewegen und/oder eine Aufgabe erfüllen. Um die Prüfkörper mit einer definierten Kraft auf bestimmte Stellen des Roboters drücken zu können, ist ggf. ein Messsystem zur Ermittlung von Kräften und Drücken (z.B. ein Kraft-Momenten-Sensor) erforderlich.

Alle Sicherheitseinrichtungen, die eine rechtzeitige Erkennung oder Vermeidung der drohenden Kollision erlauben, beispielsweise optische Sensoren, sind vor dem Versuch zu deaktivieren.

Vorgehen:

Entsprechend der identifizierten kritischen Szenarien werden Kollisionen herbeigeführt. Es wird gemessen, welche Betätigungskraft notwendig ist, um den Roboter zu stoppen, bzw. mit welcher Kraft und welchem Druck der Roboter gegen ein Hindernis drückt, bevor er stoppt.

Auswertung:

Für jede Situation wird die bei der Kollision maximal auftretende Kraft und Druck bestimmt. Diese werden mit den zulässigen Grenzwerten verglichen. Hinweise, wie diese Grenzwerte zu bestimmen sind, enthält – zumindest für erwachsene Menschen – der Normentwurf ISO/TS 15066.

5.5 Exaktheit des Hindernismodells

Hindernismodell		
Einflussfaktoren/Kriterien	Typische Gefahrenquellen	Tätigkeit des Roboters
<ul style="list-style-type: none"> • Größe und Beschaffenheit von Hindernissen in der Umgebung des Roboters • Geschwindigkeiten des Roboters während der Kartierung • Gewählte Auflösung der internen Karte 	<ul style="list-style-type: none"> • Quetschen • Stoß • Überfahren werden • Einziehen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fahren/Positionieren • Aufnehmen/Ablegen von kleinen Objekten • Transportieren von Objekten • Entgegennehmen von/Übergeben an den Menschen

Beschreibung:

Um Hindernisse in der Umgebung zu kartieren wird häufig eine Karte der Hindernisse angelegt. Für das Verfahren einer Plattform reicht in der Regel eine zweidimensionale Hinderniskarte. Kommt dagegen ein Roboterarm zum Einsatz ist hingegen in den meisten Fällen ein dreidimensionales Hindernismodell erforderlich. Das Hindernismodell soll die tatsächliche räumliche Struktur so realitätsnah und zuverlässig wie möglich abbilden. Existieren zu große Abweichungen des Modells von der Realität, kann es gefährbringenden Situationen kommen.

Diese Validierungsmethode setzt die sorgfältige Prüfung der Sicherheitseinrichtungen an sich nach geltenden Normen voraus. Darauf aufbauend wird das Gesamtsystem des Roboters und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten betrachtet.

Versuchsaufbau 1**Beschreibung:**

Ziel dieses Versuches ist der Nachweis, dass das interne Hindernismodell mit hoher Genauigkeit der tatsächlichen Umgebung entspricht.

Vorbereitung:

Es sind kritische Szenarien herauszuarbeiten, bei denen hohe Abweichungen des Hindernismodells von der Realität zu erwarten sind. Für diese Umgebungen werden Tests durchgeführt. Erfahrungsgemäß zählen Glasscheiben oder -türen sowie sehr stark oder sehr schwach reflektierende Oberflächen zu den problematischen Umgebungsbedingungen, ebenso wie extreme Beleuchtungsunterschiede.

Aufbau:

Es wird eine Umgebung erstellt, die einer typischen Einsatzumgebung des Roboters entspricht. Entsprechend der zuvor ermittelten kritischen Szenarien werden Hindernisse und geometrische Merkmale in den Raum eingebracht, beispielsweise Wände, Möbelstücke, etc. Die Geometrie des Raumes muss dabei möglichst genau bekannt sein oder mit einem Messsystem, beispielsweise einem Lasertracker entsprechend vermessen werden.

Vorgehen:

Der Roboter wird in der Umgebung platziert und eine neue Karte der Umgebung wird erstellt. Aus dieser Karte werden markante geometrische Merkmale bestimmt und im Hindernismodell vermessen. Anschließend werden die Messwerte mit den geometrischen Verhältnissen in der realen Umgebung verglichen. Eventuell kann der Versuch mit verschiedenen Parametern bei der Kartenerstellung wiederholt werden, beispielsweise einer höheren Auflösung.

Auswertung:

Die beiden Modelle werden nach folgenden Merkmalen verglichen:

- Abstände zwischen markanten Punkten oder Oberflächen
- Parallelität gleich ausgerichteter Kanten
- Lückenlose Erkennung von Konturen und insbesondere sehr kleiner Geometrien
- Konservative Annäherung an die reale Geometrie

Es wird überprüft, ob alle Hindernisse im Hindernismodell erfasst wurden und ob deren geometrische Beziehungen zueinander hinreichend genau sind, um unbeabsichtigte Kollisionen zu verhindern.

.....
Vorschlag für neue
Validierungsmethoden
.....

Greifkraft		
Einflussfaktoren/Kriterien	Typische Gefahrenquellen	Tätigkeit des Roboters
<ul style="list-style-type: none"> • Befreiungsmöglichkeit (Mensch) • Energieversorgung • Objekt (Deformation, Oberfläche, Stabilität) 	<ul style="list-style-type: none"> • Quetschen • Stoß 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufnehmen/Ablegen von Objekten • Transportieren von Objekten • Entgegennehmen von/Übergeben an den Menschen
<p>Beschreibung: Der Roboter soll in der Lage sein, Objekte sicher halten zu können. Dazu muss die Greifkraft ausreichend hoch sein. Auch bei einem Ausfall der Stromversorgung oder bei einem Notaus sollte die Greifkraft groß genug bleiben, so dass gegriffene Objekte nicht plötzlich fallen gelassen werden. Andererseits soll die Greifkraft so gering sein, dass ein versehentlich eingeklemmter Mensch sich aus eigener Kraft befreien kann. Diese Validierungsmethode setzt die sorgfältige Prüfung der Sicherheitseinrichtungen an sich nach geltenden Normen voraus. Darauf aufbauend wird das Gesamtsystem des Roboters und das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten betrachtet. Sämtliche hier aufgeführten Versuche müssen ausreichend oft wiederholt werden, um eine genügend hohe Aussagekraft und (Ausfall-)Sicherheit zu erhalten.</p>		
<p>Versuchsaufbau 1</p>		
<p>Beschreibung: Ziel dieses Versuches ist der Nachweis, dass verschieden beschaffene Gegenstände bei maximaler Greifkraft sicher gehalten werden können.</p>		
<p>Vorbereitung: Es werden kritische Objekte und Oberflächenbeschaffenheiten identifiziert, bei denen das sichere Greifen am schwersten fällt. Das Gewicht der Objekte sollte dabei der maximalen für den Greifer spezifizierten Nutzlast entsprechen. Es werden entsprechende Prüfkörper (z.B. Becher) beschafft.</p>		
<p>Aufbau: Der Prüfkörper wird vom Roboter von einer typischen Ablage, z.B. einem Tisch gegriffen. Anschließend wird der Greifer in die Lage gebracht, die der Roboter auch beim Transport von Gegenständen einnehmen würde. Der jeweilige Prüfkörper wird über ein Seil mit einem Federkraftmesser oder einer Kraftmessdose verbunden.</p>		
<p>Vorgehen: Mit Hilfe des Seils wird vorsichtig am Prüfkörper gezogen und dabei permanent die Zugkraft erfasst. Dabei wird entweder in Richtung der Schwerkraft gezogen oder in die Richtung, in der das gegriffene Objekt am ehesten aus dem Greifer rutschen kann (z.B. koaxial zu einem zylindrischen Griff). Der Versuch endet, wenn der Prüfkörper aus dem Greifer herausrutscht oder wenn eine hinreichend hohe Kraft erreicht wurde.</p>		
<p>Auswertung: Es wird überprüft, ob alle Prüfkörper sicher gehalten wurden. Sowohl durch die Gewichtskraft des Objektes noch durch zu erwartende dynamische auftretende Kräfte darf das Objekt nicht aus dem Greifer rutschen. Zusätzlich wird überprüft, ob das gegriffene Objekt durch den Greifer beschädigt bzw. verformt wurde.</p>		

Versuchsaufbau 2

Beschreibung:

Ziel dieses Versuches ist der Nachweis, dass bei Verlust der Energieversorgung keine gefahrbringende Situation auftritt.

Vorbereitung:

Es werden kritische Objekte und Oberflächenbeschaffenheiten identifiziert, bei denen das sichere Greifen am schwersten fällt. Das Gewicht der Objekte sollte dabei der maximalen für den Greifer spezifizierten Nutzlast entsprechen. Es werden entsprechende Prüfkörper (z.B. Becher) beschafft.

Aufbau:

Der Prüfkörper wird vom Roboter von einer typischen Ablage, z.B. einem Tisch gegriffen. Anschließend wird der Greifer in die Lage gebracht, die der Roboter auch beim Transport von Gegenständen einnehmen würde. Der jeweilige Prüfkörper wird über ein Seil mit einem Federkraftmesser oder einer Kraftmessdose verbunden.

Vorgehen:

Zu Beginn des Versuchs wird die Energieversorgung des Greifers abgeschaltet. Mit Hilfe des Seils wird analog zum vorherigen Versuch am Prüfkörper gezogen und die Kraft sowie die verstrichene Zeit erfasst.

Auswertung:

Es wird überprüft, wie lange der jeweilige Prüfkörper sicher gehalten wird, bevor die Greifkraft soweit nachlässt, dass das Objekt aus dem Greifer rutscht.

Versuchsaufbau 3

Beschreibung:

Ziel dieses Versuches ist der Nachweis, dass die Greifkraft klein genug ist, um es z.B. einem Menschen zu ermöglichen, sich daraus zu befreien.

Vorbereitung:

Anhand der Risikoanalyse wird bestimmt welche Körperteile im Greifer eingeklemmt werden können und entsprechende Prüfkörper gemäß ISO 13856 ausgewählt. Die Prüfkörper werden mit einer druckempfindlichen Folie versehen.

Aufbau:

Die Prüfkörper werden in den Greifer eingelegt und dieser geschlossen. Die druckempfindliche Folie wird mit einem Messsystem verbunden, das die Druckverteilung auf der Oberfläche des Prüfkörpers ermitteln kann.

Vorgehen:

Es wird gemessen welchen Druck bzw. welche Kraft der Greifer auf den jeweiligen Prüfkörper ausübt. Anschließend wird analog zu den vorhergehenden Versuchen die Kraft bestimmt, die benötigt wird, um den Prüfkörper aus dem Greifer zu ziehen. Dabei wird weiterhin der Druck durch den Greifer erfasst.

Auswertung:

Die maximalen Drücke bzw. Kräfte auf die Prüfkörper werden ermittelt. Es wird überprüft, ob sich diese innerhalb der zulässigen Maximalwerte für Kraft und Druck bewegen. Hinweise, wie entsprechende Werte zu ermitteln sind, lassen sich dem Norm-Entwurf ISO/TS 15066 entnehmen.

Vorschlag für neue
Validierungsmethoden
