

Kollisionsfolgenabschätzung bei der Mensch-Roboter-Kooperation mit einem Seitenaufprall Dummy

Susanne Oberer und Christian Meyer

Fraunhofer IPA, Stuttgart, Deutschland

Korrespondenz

Fraunhofer IPA, Robotersysteme
Susanne Oberer
Nobelstr. 12, D-70569 Stuttgart
Tel: +49 (0)711-970-1279
eMail: susanne.oberer@ipa.fraunhofer.de

Abstract:

To prepare new generations of robot systems for direct human-robot-cooperation new design criteria have to be set up, not only focussing on process specific characteristics but as well on a minimum hazard potential. In case of any failure only negligible injuries can result for a human. Robot cells that do not facilitate a complete separation of the human from the operating space of the robot will ever retain the risk of a collision in free space especially when contact between the user and the robot is the substantial feature of the cooperation.

Scenarios with an industrial robot and a side impact dummy are set up to analyse the dummy characteristics during different collision configurations to enable a classification of the hazard. By means of LS-DYNA simulations and an experimental measurement setup these impacts are evaluated. Potentials and limitations are then discussed how these crashworthiness study can be used to draw conclusions for the assessment of the passive safety of a robot.

Keywords:

Robot Safety, Human-Robot-Cooperation, Robot Crash Tests.

1 Einleitung

Neben Standardanwendungen mit Industrierobotern in der Massenproduktion finden Serviceroboter, die nicht mehr einen eigenen monotonen Arbeitsablauf ausführen, sondern vielmehr dem Menschen einen „Service“ zur Verfügung stellen, ihren Weg in die Produktion und Instandhaltung sowie auch in den öffentlichen und privaten Sektor. Die Roboterverbände der International Federation of Robotics zählten in 2005 weltweit an die 3 Millionen Serviceroboter und rechnen bis 2009 mit der Installation von weiteren 5,5 Millionen Systemen [1]. Damit stützen sie die Prognosen von Bill Gates, dass bis 2013 in jedem Haushalt ein Roboter zu finden ist und erklären das Interesse von Microsoft, mit seinem Robotics Studio bei der Entwicklung zukünftiger Systeme mitzuwirken [2]. Die konsequente Trennung der Arbeitsräume des Menschen und des Roboters, wie sie derzeit in Produktionsumgebungen umgesetzt werden, lassen sich hierbei nicht mehr realisieren.

Die Mensch-Roboter-Kooperation wird gerade in ersten Szenarien in Produktionsumgebungen implementiert, meist im Rahmen einer örtlichen Überschneidung der Arbeitsräume Mensch-Roboter bei zeitlich abwechselnder Nutzung dieses Bereiches. Sogenannte „assistierende Roboter“ eröffnen ein großes Feld zur kombinierten Nutzung von Präzision, Ausdauer und Wiederholbarkeit des Roboters mit der Flexibilität und Entscheidungsfähigkeit des Bedieners [3],[4]. Weitergehende Kooperationsszenarien, die sogar eine gemeinsame Manipulation von Werkstücken vorsehen sowie Robotersysteme, die in dynamischen Umgebungen neben den Menschen koexistieren, bringen neben den vielen Möglichkeiten aus der Interaktion auch neue Probleme durch mögliche Gefährdungen des Nutzers. Das Design klassischer Manipulatoren orientiert sich an Vorgaben wie Steifigkeit und Geschwindigkeit, die der Roboter für den Prozess vorweisen muss und ist in den meisten Fällen durch steife Strukturen und Kanten umgesetzt. Für die Nutzung von Robotersystemen zur direkten Mensch-Roboter-Kooperation müssen andere Designvorgaben aus den möglichen Verletzungsfolgen am Menschen und deren Vermeidung abgeleitet werden.

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung, inwieweit Ergebnisse aus Untersuchungen der Aufprallfolgen von Robotern auf den Menschen neue Erkenntnisse für die Absicherung assistierender Robotersysteme und für Designempfehlungen an zukünftige Manipulatoren geben können. In Kapitel 2 wird auf die momentanen Vorgaben und Entwicklungen im Bereich der Robotersicherheit eingegangen, inwieweit die Beschreibung von potentiellen Verletzungsfolgen des Menschen innovativen Entwicklungen in der Robotik einen neuen Fokus geben kann. Kapitel 3 beschreibt die ersten Versuche, wie mit Hilfe von Crash-Simulationen in LS-DYNA der Aufprall eines Industrieroboters auf einen Seitenaufpralldummy durchgeführt wird. Anschließend werden die realen Crash Tests beschrieben, die mit einem vergleichbaren Robotermodell und einem Seitenaufpralldummy im Crash Center der DEKRA durchgeführt wurden. In Kapitel 4 werden die Testergebnisse diskutiert und ein Ausblick auf die noch notwendigen Adaptionen des Simulationsmodells gegeben, das mit Hilfe der Testergebnisse validiert werden soll. Außerdem wird ein kurzer Ausblick auf das weitere Vorgehen zur Klassifizierung der Robotersicherheit basierend auf Verletzungswerten gegeben.

2 Sicherheit in der Robotik

2.1 Aktive und Passive Sicherheit

Robotersysteme, die heutzutage in Produktionsumgebungen eingesetzt werden, sind mit Hilfe trennender Schutzeinrichtungen gegen das Eindringen von Menschen abgesichert. Dies wird realisiert über physische Zäune bis hin zu Lichtvorhängen und rotierenden Laserscannern. Berührungslose Überwachungssensorik spielt auch für assistierende Robotersysteme eine existentielle Rolle, wobei Kamerasystemen eine immer größer werdende Bedeutung zukommt. Um eine sichere direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter zu realisieren, benötigen Robotersysteme Kenntnisse über ihre dynamische Umgebung, die online ausgewertet werden muss, um auf veränderte Abstände zu Material und Bediener zu reagieren. In der Literatur finden sich verschiedene Strategien zum Abbremsen und Ausweichen beim Eindringen von Hindernissen in den Bewegungsraum, die in den meisten Fällen auf einer Kalkulation aus Roboterträgheit, Abstand zum detektierten Hindernis und Relativ- oder Absolutgeschwindigkeit der Systeme basieren [5],[6]. Neue Technologien aus dem Bereich der Kameratechniken, z.B. PMD-Kameras, die eine zuverlässige dreidimensionale Auswertung der Umgebung ermöglichen, liefern die Grundlage für online Auswertungen von Szenen mit überlappenden Arbeitsräumen von Mensch und Roboter [7].

Gerade in produzierenden Umgebungen stellen sich die Herausforderungen an das Design eines assistierenden Roboters als die Vereinbarkeit der maximalen Prozesskraft mit der garantierten Benutzersicherheit zu jedem Zeitpunkt der Interaktion. Im Vordergrund der Robotersicherheit steht dabei nach wie vor die Vermeidung von Kollisionen durch die generelle Vermeidung eines physischen Kontaktes zwischen Bediener und Roboter. Allerdings zeigen Studien, dass es selbst bei der geplanten physischen Trennung der Arbeitsräume schon heutzutage immer wieder, teils durch Fehlfunktionen, oft durch Manipulation der Schutzeinrichtungen und Fehleinschätzungen durch den Bediener, zu Unfällen mit teilweise schwerwiegendem Ausgang für den Bediener kommt [8]. Solche Studien, zusammen mit dem Bedarf der direkten Mensch-Roboter-Kooperation in der Servicerobotik, verlangen nach einer Klassifizierung der Robotersysteme bezüglich ihrer passiven Sicherheit.

Dabei definiert sich die Passive Robotersicherheit wie folgt:

- Konstruktive Maßnahmen die eine Verletzung des Bedieners verhindern oder zumindest das Risiko einer Verletzung senken

Um eine Unterscheidung zwischen einem gewollten Kontakt und einer zu vermeidenden Kollision durchzuführen, ohne, wie in Produktionsumgebungen üblich, eine ständige Aktivierung des Systems durch einen Zustimmschalter zu fordern, sind auch der Technik Grenzen gesetzt. Für Robotersysteme, die in einer ihnen unbekanntem Umgebung agieren und die einen engen physischen Kontakt mit dem Bediener erlauben sollen, können nur solche Systeme zugelassen werden, die ein intrinsisch sicheres Design bezüglich des Kollisionsverhaltens ihrer Struktur aufweisen.

Um allerdings eine solche Klassifizierung vornehmen zu können, müssen Kenntnisse über die Kollisionsfolgen verschiedener Roboterstrukturen erworben und Möglichkeiten zur Quantifizierung der passiven Robotersicherheit etabliert werden. Es gilt maschinenunabhängige Grenzwerte aufzubauen, ohne die Charakteristiken des spezifischen Robotersystems zu vernachlässigen. Im Vergleich zu den bisherigen Richtlinien, die Maximalgeschwindigkeiten und Energien des Roboters im Beisein einer Person unabhängig von der vorliegenden Roboterkinematik festlegen [9], können Verletzungswerte, die sich aus den Kollisionsfolgen ableiten lassen für ein unterschiedliches Gefahrenpotential, auch unterschiedliche Maximalwerte für die Leistungsparameter eines Roboters ergeben.

Die Einführung von standardisierten Verletzungswerten in der Robotik ermöglicht die Klassifizierung eines Roboters erstmal unabhängig von einer zusätzlichen Absicherung der Umgebung. Mit Hilfe aktiver Sicherheitsüberwachungen durch externe oder interne Sensorik können Anlagen und ihre Sicherheit weiter klassifiziert werden, allerdings lässt sich für zukünftige Serviceroboter die Umgebung nicht standardisieren und zusätzlich absichern, so dass hier das Design von vornherein die Sicherheit des Systems festlegt. Das Verletzungsrisiko, die Verletzungsschwere gekoppelt mit der Wahrscheinlichkeit Ihres Auftretens, muss letztendlich das Maß sein, an dem die Sicherheit eines Systems für die Mensch-Roboter-Kooperation gemessen werden muss. Mit Hilfe der Abschätzung von Kollisionsfolgen durch die Analyse der dabei auftretenden Verletzungen können Grenzwerte ermittelt und Designvorgaben abgeleitet werden, um eine der größten Gefährdungen durch Robotersysteme, die mechanische Gefährdung des Bedieners, zu quantifizieren.

2.2 Verletzungswerte in der Robotik

Verletzungswerte für verschiedene Körperteile, besonders für den Kopf, werden seit den 70er Jahren von Biomechanikern diskutiert und vor allem für den Bereich der Automobilsicherheit ausführlich analysiert sowie zugehörige Verletzungsmechanismen in Modellen nachgebildet [10]. Ausführliche Studien über die Möglichkeiten und Grenzen der aktuell eingesetzten Systeme und Modelle finden sich z.B. in [11],[12].

In der Robotik ist die Analyse von Verletzungswerten für den Kopf analog dem Vorgehen aus der Automobilindustrie erstmals von Zinn et al. in [13] aufgenommen worden. Die Autoren verwenden darin ein einfaches 2-dimensionales Masse-Feder-Modell, um über die Auswertung der Bewegungsgleichungen die Kopfbeschleunigung und daraus das Head Injury Criteria (HIC) bei einem freien Impakt zu berechnen. In [14] wird diese Modellierung detaillierter erklärt und auch kurz die Übertragung der Verletzungswerte auf andere Körperteile angesprochen. Die Autoren beider Artikel

fokussieren sich dabei auf die Entwicklung neuer Antriebe und deren Regelung, die Nachgiebigkeit in den Gelenken zwischen den Robtorachsen ermöglicht und somit die Energie aus einer freien Kollision an jeder beliebigen Stelle in der Roboterstruktur herausnehmen kann.

Bei der Zertifizierung des Serviceroboters „Wakamaru“ wird ein Modell eines Kind-Dummies hinzugezogen, um die auftretenden HIC-Werte bei einem Verlust der Standfestigkeit des Roboters mit einem kletternden Kind zu analysieren [15]. Yamada beschäftigt sich in [16] nicht direkt mit Verletzungswerten, geht aber über die Klassifizierung von Schmerzgrenzen für verschiedene Körperteile einen ähnlichen Weg in Richtung der Klassifizierung von Robotersystemen für die Mensch-Roboter-Kooperation.

In [17] wird erstmals die komplette Auswertung von einem Ganzkörpermodell, hier einem Seitenaufprall-Dummy, in Form von freien Roboter-Dummy Impacts zur Klassifizierung der passiven Robotersicherheit analog zum Vorgehen in der Automobilsicherheit vorgestellt. Mit Hilfe der Finite-Elemente-Simulation wird dabei das Kollisionsverhalten einer klassischen, steifen Industrieroboter Struktur evaluiert. Dieses Vorgehen wird in [18],[19] näher erläutert und Simulationsergebnisse werden aufgeführt.

Besonders relevant sind diese ersten Ergebnisse im Hinblick auf die Evaluierung des HIC. Die erreichten Verletzungswerte mit dem Roboter-Dummy-Aufprall liegen weit unterhalb der Skala, die die im Automobil-Crash erreichten kritischen Werte aufzeigen. Der Peak der Kopfbeschleunigung wird innerhalb der ersten 3-5 ms erreicht, was eine rechtzeitige Reaktion durch die Robotersteuerung auf einen taktilen Kontakt am Roboterarm, wie er in vielen Ansätzen zur Kollisionssicherheit vorgeschlagen wird, bei den aktuellen Konfigurationen nur schwer möglich macht. Diese Ergebnisse werden auch in [20] bestätigt, wo die Autoren ihre Ergebnisse aus den Kollisionsuntersuchungen mit einer Leichtbaukinematik, dem LBR III, beschreiben. Sie verwenden dabei sowohl Ergebnisse der in [13], [14] beschriebenen 2-dimensionalen Modellierung, als auch Dummy-Messungen für einen Frontal-Impakt mit einem Hybrid III.

In den folgenden Kapiteln werden die bisherigen LS-DYNA Ergebnisse und die Testmessungen mit einem Seitenaufpralldummy dokumentiert, mit denen ein validiertes FE-Modell für den Mensch-Roboter-Impakt aufgebaut wird. Da bei einem Dummy-Modell die relevanten Verletzungsmechanismen, die bei einem Kurzzeitimpakt mit einem steifen Impaktor aktiviert werden, nicht implementiert sind, müssen die Arbeiten im Weiteren auf den Einsatz von Mensch-Modellen ausgeweitet werden.

3 Erste FE-Simulationen mit Roboter-Dummy Impact Szenarios

In einem ersten Schritt wurden Crash Szenarios mit Robotern mittlerer Traglast und einem Seitenaufprall-Dummy ES-2 in LS-DYNA implementiert. Dabei ist die Geometrie des Robotermodells teilweise auf die oberen Achsen reduziert, mit denen der Aufprall stattfindet und das Robotermodell als ein Starrkörper modelliert. Über eine geführte Drehbewegung des Roboterarms mit einer konstanten Geschwindigkeit wird der Aufprall des Roboterarms auf verschiedene Körperpartien des ES-2 durchgeführt. Dabei werden Bahngeschwindigkeiten am Roboterflansch von $v = 0.1$ m/s bis $v = 1.0$ m/s analysiert.



Bild 1: Crash Simulation Konfigurationen mit COMAU SMART NS 16 Roboter und ES-2 Dummy

Die Szenarios beschreiben einen frei sitzenden nicht fixierten Dummy, der von links durch den ungebremsten Roboter getroffen wird und der nach rechts frei ausweichen kann. Eine ausführlichere Beschreibung des Simulations-Setups und der verwendeten Parameter sowie eine Auswertung finden sich in [18],[19]. In Bild 2 sind die Ergebniskurven für die Kopfbeschleunigungen, Brusteindrücke und die Schambeinfugenkraft aufgelistet.

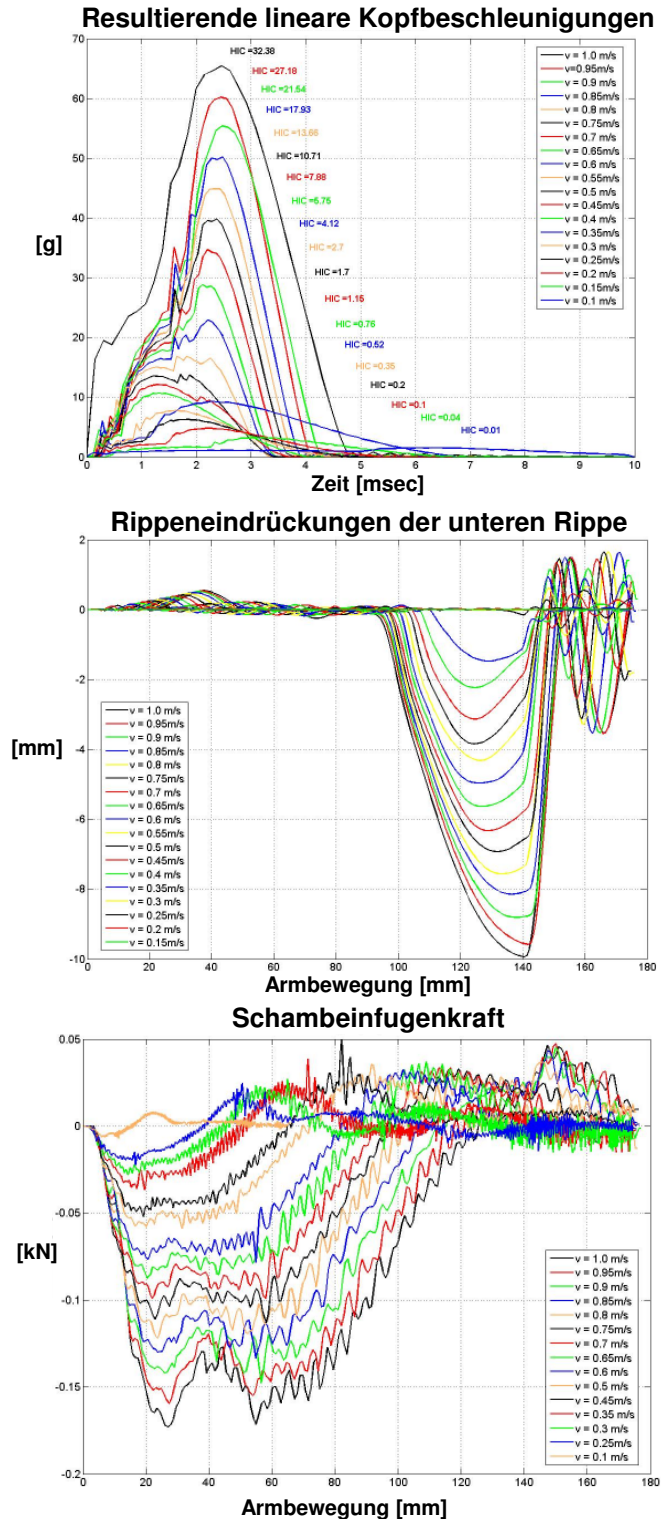


Bild 2: Ergebniskurven der LS-DYNA Simulation mit COMAU SMART NS 16 gegen ES-2 Dummy

4 Crash Tests mit Roboter und Dummy

4.1 Beschreibung des Crash Test Aufbaus

Zur Validierung der vorangegangenen Simulationen wurden die in der Simulation gestellten Szenarios nun auch mit Messungen an einem realen Dummy durchgeführt. Dazu wurde im Crashzentrum der DEKRA ein Messszenario mit einem Industrieroboter - KUKA KR16 - und einem Seitenaufprall-Dummy - ES-1 - mit 28 Messkanälen aufgebaut und in 4 verschiedenen Roboterkonfiguration etwa 30 Messungen mit unterschiedlichen, konstanten Robotergeschwindigkeiten durchgeführt.

Der Dummy, der einen Bediener innerhalb des Arbeitsraumes des Roboters simuliert, sitzt ohne zusätzliche Fixierung vom Roboter abgewandt auf einem Tisch. Nach jedem Aufprall wird der Dummy in seine anfängliche Position zurückgebracht. Durch die geringen Energien, die durch den langsamen ($< 15 \text{ km/h}$) steifen Aufprall auf den Dummy aufgebracht werden, muss keine Kalibrierung zwischen den einzelnen Messungen vorgenommen werden.

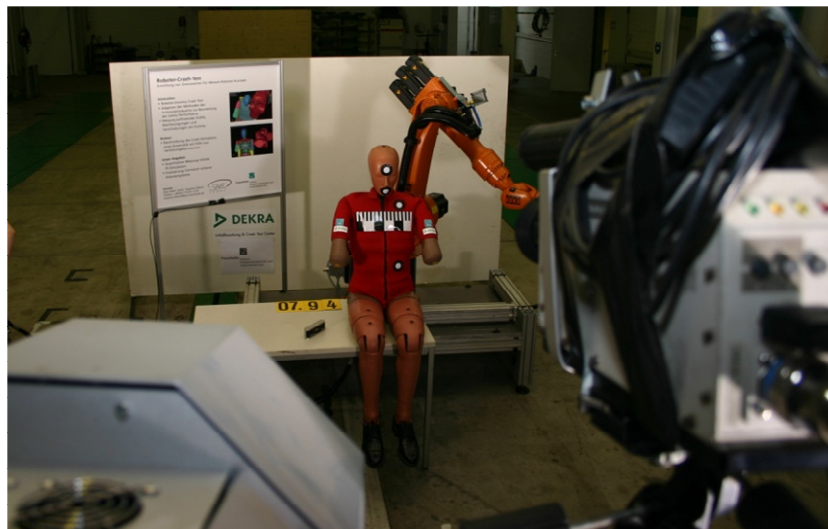


Bild 3: Crash Setup mit KUKA KR16 und ES-1 im Crash Center der DEKRA

Bild 3 zeigt den Versuchsaufbau und verschiedene Konfigurationen zum Kopfanprall, zum Brustanprall und zum Hüftanprall. Die verschiedenen Konfigurationen ergeben sich aus dem Körperteil, auf das der Roboter aufprallt. Oberhalb der Szene ist eine Highspeed-Kamera mit einer Aufnahme rate von 500Frames/s montiert, um bei der Auswertung die Bewegungen des Dummies auf ein biofideles Verhalten hin zu analysieren. Zusätzlich können mit Hilfe der Aufnahmen die Geschwindigkeiten des Roboters kontrolliert und mögliche Abweichungen im Geschwindigkeitsprofil aufgrund von Überlast detektiert werden.

Tabelle 1 listet die Messstellen für die jeweiligen Impact-Konfiguration auf, die ausgewertet werden, um zum einen die erreichten Verletzungswerte zu berechnen und zum anderen als Testdaten für die Validierung der Simulation zur Verfügung zu stehen.

Aufprallpunkt	Messstellen	Filter
Kopf	Kopfbeschleunigung in X,Y,Z	CFC 1000
	Halskraft in X,Y,Z	CFC 1000
	Halsmoment in X,Y,Z	CFC 600
Brust	Halskraft in X,Y,Z	CFC 1000
	Halsmoment in X,Y,Z	CFC 600
	Schulterblockbeschleunigung in X,Y,Z	CFC 180
	Rippenbeschleunigung oben/mitte/unten in Y	CFC 180
Abdomen	Rippeneindrückung oben/mitte/unten in Y	CFC 180
	Lendenwirbelsäulenbeschleunigung in X, Y, Z	CFC 180
	Abdomenkraft vorne/mitte/hinten in Y	CFC 600
Hüfte	Beckenbeschleunigung in X, Y, Z	CFC 180
	Schambeinfugenkraft in Y	CFC 600

Tabelle 1: Aktive Messstellen am ES-1

4.2 Testauswertung

Die erste Auswertung der Messungen mit dem Seitenaufprall-Dummy wird in diesem Kapitel aufgeführt. In Bild 4 sind die linearen Kopfbeschleunigungen in y-Richtung, die im Schwerpunkt des Kopfes des ES-1 mit Hilfe eines 3-axialen Beschleunigungssensors aufgezeichnet wurden, abgebildet. Analog zu den Simulationsergebnissen ergibt sich hier bei einem direkten Aufprall des Roboters gegen den Kopf des Dummies eine steil ansteigende Beschleunigungskurve, die nach nur wenigen Millisekunden genauso steil wieder abfällt.

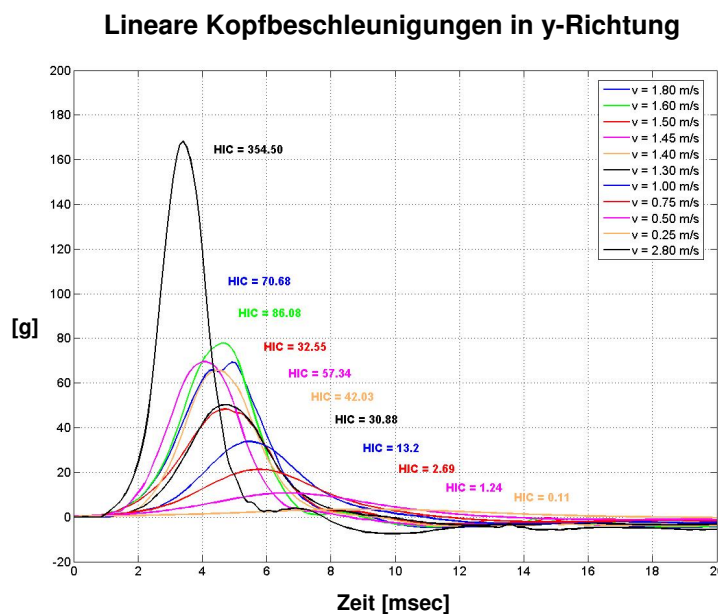


Bild 4: Kopfbeschleunigung des Dummies in die dominierende y-Richtung

Ein direkter Vergleich der berechneten und gemessenen resultierenden linearen Kopfbeschleunigungen zeigt, dass in der Simulation etwas höhere Maximalwerte für die Beschleunigungskurven erreicht wurden. Außerdem weicht das Beschleunigungsprofil dahingegen voneinander ab, dass die reale Kurve flacher verläuft als in den Simulationen vorausgesagt. Die Ähnlichkeit der Profile zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung des Verhaltens des realen Dummies mit dem numerischen Modell auch für den steifen Kurzzeitimpakt, der hier vorliegt. Bild 5 zeigt die Graphen der experimentellen und aus den Simulationen bestimmten resultierenden Beschleunigungen des Seitenaufprall-Dummies für die Geschwindigkeiten des Impaktors $v = 0.25$ m/s bis $v = 1.0$ m/s.

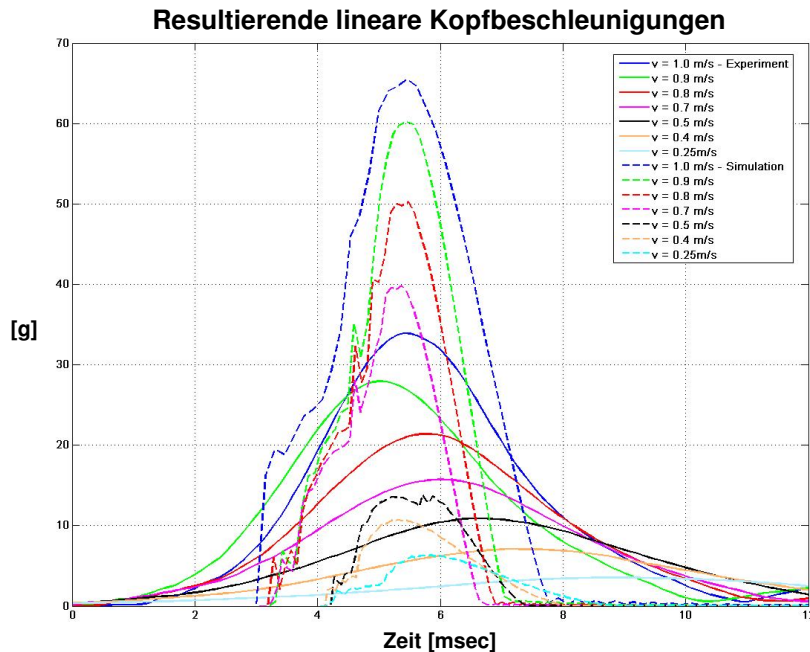


Bild 5: Vergleich der resultierenden Kopfbeschleunigungen in Simulation und Messung

Tabelle 2 zeigt die Abweichungen der berechneten HIC-Werte aus der Simulation zu denen aus den Messwerten im Crashzentrum auf.

Geschwindigkeit	HIC aus Simulation	HIC aus Messung
0.25 m/s	0.20	0.12
0.40 m/s	0.76	0.50
0.50 m/s	1.70	1.28
0.70 m/s	7.88	2.78
0.80 m/s	13.66	5.23
0.90 m/s	21.54	8.95
1.00 m/s	32.38	13.44

Vergleich HIC-Werte Simulation und Experiment

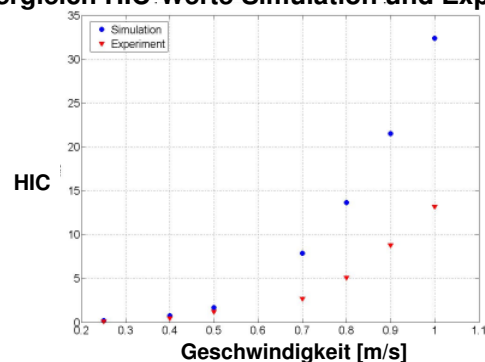


Tabelle 2: Abweichende HIC-Werte in Simulation und Messung

Bild 6 zeigt die Auswertung der Halssensorik des Dummy-Modells. Der ES-1 ist mit einer Kraftmessdose am unteren Ende des Halses ausgestattet, die Kräfte und Momente in alle 3 Achsen aufnimmt.

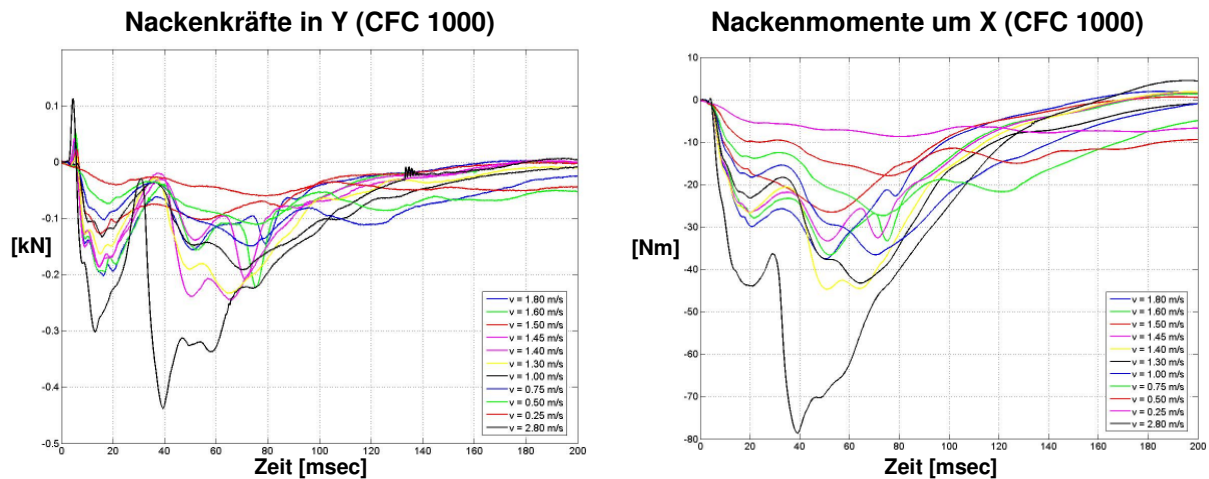


Bild 6: Halskräfte und -momente des Dummies in Abhängigkeit der Zeit

Die Maximalwerte bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 2.80 m/s ergeben sich bei der Halskraft zu $F = 0.44 \text{ kN}$ und bei den Halsmomenten zu $M = 78.64 \text{ Nm}$.

Sowohl die erreichten HIC-Werte, als auch die Kräfte und Momente die am Hals des Dummies gemessen werden, befinden sich im Vergleich zu den Crashtest Szenarien im Automobilbereich eher in einem niedrigen Bereich, erreichen allerdings für die hohen Geschwindigkeiten durchaus relevante Messwerte, was Hinweise auf mögliche Verletzungen angeht. Da wir bei dem hier vorliegenden Impact-Szenario einen sehr steifen und punktuell wirkenden direkten Impact vorliegen haben, kann bei der Auswertung nicht der direkte Vergleich mit den Verletzungsskalen der Automobilskalen hergenommen werden.



Bild 7: Roboter Impact gegen die Brust des ES-1 mit der Highspeed-Kamera aufgenommen

Deutlich wird dies auch bei der Betrachtung der Auswirkungen des Impacts auf die Brust des Dummies. In Bild 8 sind dazu die Eindrücke der 3 Rippen, mit denen der Dummy ausgestattet ist, für Impactorgeschwindigkeiten von 0.5 m/s bis 1.7 m/s aufgezeichnet.

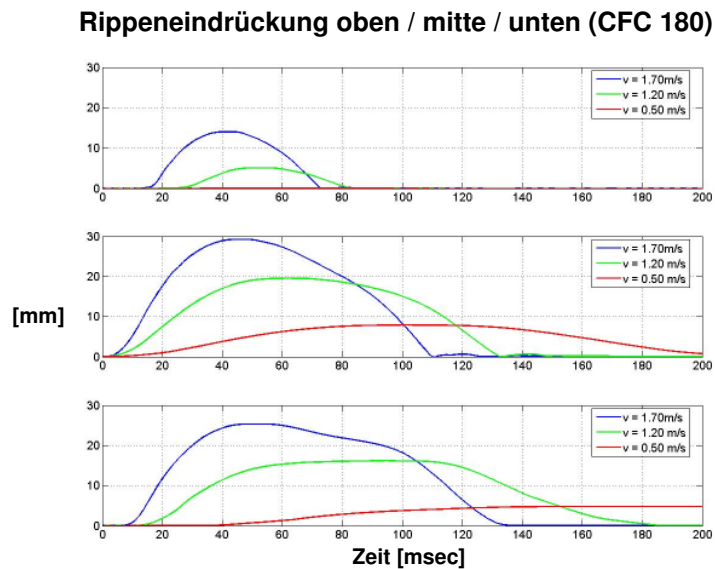


Bild 8: Eindrückung der oberen, mittleren und unteren Rippe des Dummies in Abhängigkeit der Zeit

Der Grenzwert, den es nach dem EuroNCAP für die Brusteindrückung einzuhalten gilt [21], liegt bei 42 mm. Mit einer maximalen Eindrückung, hier gemessen an der mittleren Rippe, von 29.24 mm, würde ein akzeptables Verletzungsrisiko bezüglich der Rippenbelastung angegeben. Allerdings vermittelt der Dummy mit seinen Stahlrippen und deren gemessene Eindrückung lediglich einen Eindruck, welches Gesamtverhalten aus einer flächigen Eindrückung auf den gesamten Thorax resultiert. Die punktuelle Kräfteinwirkung und dabei auftretende Belastungsspitzen, die im vorliegenden Impact durch den Roboterarm auf eine einzelne Rippe wirken, werden dabei nicht betrachtet, da die Kräfteinwirkung an der direkten Auftrefffläche unberücksichtigt bleibt. Mögliche Folgeverletzungen der inneren Organe, die ein Bruch der Rippen verursachen kann lassen sich dadurch nicht untersuchen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die hier aufgeführten Simulationen und Messungen des Roboter Dummy Crash Tests eröffnen neue Möglichkeiten zur Bewertung der Passiven Sicherheit von Robotermodellen. Neue Generationen von Robotermodellen, die in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation bestehen wollen, müssen neben ihren prozessspezifischen Charakteristiken ein minimales Gefährdungspotential aufweisen, das auch im Fehlerfall nur vernachlässigbare Verletzungen am Menschen verursacht. Bei Szenarien, in denen eine Abschirmung des Menschen vom Bewegungsraum des Roboters nicht mehr möglich ist, können Kollisionen im freien Raum nicht in jedem Fall vermieden werden, vor allem wenn der Kontakt zwischen Mensch und Roboter das Grundelement der Interaktion darstellt.

Impact of KR16 against ES-2

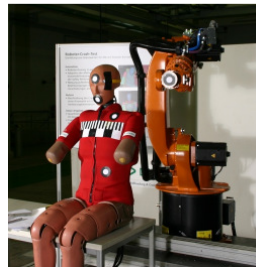
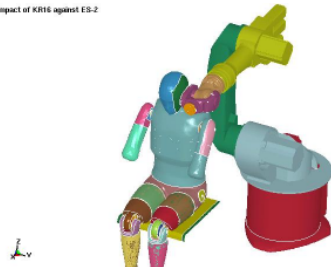


Bild 9: Crash Setup mit KUKA KR 16 und ES-2 Dummy

Neben dem Potential, das diese Bewertung der Kollisionssicherheit aufweist, zeigen die durchgeführten Verletzungsanalysen allerdings auch die Grenzen der Dummymodelle für Auswertungen des Roboter-Mensch-Impakts. Der direkte freie Impact eines Roboters mit dem Menschen benötigt zusätzliche Informationen für die Auswirkungen der punktuellen Kräfteinwirkung, daraus folgenden äußeren Verletzungen und deren möglichen Folgen für innere Verletzungen. Erst

damit können wirkliche Grenzen für die relevanten Gefährdungen bei der Roboter-Mensch-Kollision erarbeitet werden. Viel versprechend sind dabei die Möglichkeiten, die sich aus den digitalen Mensch-Modellen geben, bei denen Verletzungsmechanismen in einer anderen Detaillierung simuliert werden können, als es mit den Dummymodellen derzeit möglich ist.

Die nächsten Schritte zur Betrachtung der Passiven Robotersicherheit bestehen darin, ein verbessertes Simulationsmodell durch eine Validierung der aufgenommenen Messdaten zu erhalten. Das hierzu implementierte Roboter-Dummy-Impakt Modell muss durch Veränderungen der Roboterparameter wie Steifigkeit, Dämpfung, Trägheit und Geometrie verbessert werden, um eine ausreichende Korrelation der gemessenen und simulierten Dummy-Belastungswerte zu erhalten. Dieses Modell soll dann im Folgenden zur Implementierung von Modellen einzelner Körperteile und eines Mensch-Modells genutzt werden, um daraus tiefere Einblicke in die Folgen einer Kollision mit einem Roboter zu gewinnen. Gerade die Simulation möglicher Verletzungen bei einem Roboter-Mensch-Impakt ermöglicht einen iterativen Prozess der Verbesserung der Passiven Sicherheit eines Robotersystems schon während der Designphase, da daraus Vorgaben zu Designempfehlungen bezügliche Materialien, Formen und daraus zulässigen Geschwindigkeiten und Energien abgeleitet werden können.

6 Acknowledgment

This work has been (partially) funded by the European Commission's Sixth Framework Programme under grant no. 011838 as part of the Integrated Project SMERobot.

Weitere Information über das Projekt und die darin erfolgten Arbeiten finden Sie unter: <http://www.smerobot.org>

7 Literatur

- [1] International Federation of Robotics, Statistical Department, VDMA, Robotics and Automation Association, Fraunhofer IPA: „World Robotics 2006 – Statistics: Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment“, Frankfurt, September 2006.
- [2] Microsoft: <http://msdn2.microsoft.com/robotics/>, August 2007.
- [3] Schraft, R. D., Meyer, C.: „Assistenzroboter in der Produktion“, Industrie-Management, Vol. 22, No.2, 2006, S.17-20.
- [4] Koeppel, R. et al.: „Robot-Robot and Human-Robot Cooperation in Commercial Robotics Applications“, Robotics Research, STAR 15, 2005, S.202-216.
- [5] Kulic, D., Croft, E. A.: „Real-time safety for human–robot interaction“, Robotics and Autonomous Systems 54, 2006, S.1-12.
- [6] Khatib, O.: „Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots“, International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, 1986, S.90-98.
- [7] Winkler, B.: „Safe space sharing human-robot cooperation using a 3D time-of-flight camera“, in: ISR - 38th International Symposium on Robotics, Rosemont – Chicago, Juni 2007.
- [8] UAW Health and Safety Department: „Review of Robot Injuries - One of the Best Kept Secrets“, Proceedings; National Robot Safety Conference, Ypsilanti, Michigan, October 2004.
- [9] ISO 10218-1: „Robots for industrial environments - Safety requirements - Part 1: Robot“, Juni 2006.
- [10] Versace, J.: „Review of the Severity Index“. SAE 710881, In: Proceedings of the 15th Stapp Car Crash Conference, 1971, S. 771-796.
- [11] International Research Council on the Biomechanics of Impact: „Future Research Directions in Injury Biomechanics and Passive Safety Research“, January 2006. Available from: <http://www.ircobi.org>, August 2007.

- [12] Simpson, A.M. and Davidson, J.S.: „A Comprehensive Study of Statistics, Governmental Regulations, and Biomechanical Models for Vehicle Induced Head Injury”, report submitted to the Center for Injury Sciences, August 2001.
Available from: <http://www.eng.uab.edu/cee/faculty/jdavidson/homepage/crash.htm>, August 2007.
- [13] Zinn, M., Khatib, O., Roth, B., Salisbury, K.: „Playing it Safe - A New Actuation Concept for Human-Friendly Robot Design”, in: IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 11, Issue 2, Juni 2004, S.12-21.
- [14] Bicchi, A., Tonietti, G.: „Fast and “Soft-Arm” Tactics - Dealing with the Safety-Performance Tradeoff in Robot Arms Design and Control”, in: IEEE Robotics & Automation Magazine, Vol. 11, Issue 2, Juni 2004, S.22- 33.
- [15] Kabe, T.; Hiura, R.; Ikeda, H.; Sugimoto, N.: „Safety Certification of Service Robot “Wakamaru””, Safety of Industrial Automated Systems 2005, USA, 2005.
- [16] Yamada, Y., Hirasawa, Y., Huang, S., Umetani, Y., Suita, K.: „Human–Robot Contact in the Safeguarding Space”, IEEE/ASME Transaction on Mechatronics, Vol. 2, No. 4, December 1997, S. 230-236.
- [17] Oberer, S., Malosio, M., Schraft, R.D.: „Investigation of Robot-Human Impact”, in: Proceedings of the Joint Conference on Robotics ISR 2006, 37th International Symposium on Robotics and ROBOTIK 2006, 4th German Conference on Robotics. Duesseldorf, VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1956), 17 S. (CD-ROM), Abstract S. 87.
- [18] Oberer, S.: „LS-DYNA Simulation of Robot-Dummy Crash Tests for Robot Safety Assessment“, 5th German LS-DYNA Forum, Ulm, Oktober 2006.
- [19] Oberer, S., Schraft, R. D.: „Robot-Dummy Crash Tests for Robot Safety Assessment”, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'07, Rom, April 2007, S. 2934-2939.
- [20] Haddadin, S., Albu-Schäffer, A., Hirzinger, G.: „Dummy Crashtests for Evaluation of Rigid Human-Robot Impacts”, in: International Workshop on Technical Challenges for dependable robots in Human Environments, April 2007.
- [21] Arbeitskreis Messdatenverarbeitung Fahrzeugsicherheit, Arbeitsgruppe Algorithmen; Cichos, D.; de Vogel, D.; Otto, M.; Schaar, O.; Zölsch, S.: „Crash-Analyse, Beschreibung der Kriterien”. Edition 1.6.2, April 2005.