

# LS-DYNA Simulation of Robot-Dummy Crash Tests for Robot Safety Assessment

Susanne Oberer

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:

New technologies and processes enhance the need for direct human robot interaction, to fully exploit the potential of robots' accuracy and humans' adaptability. Therefore, the hazardous potential of the involved robot manipulator needs to be minimised. Limits must be set, so that only an acceptable severity of injury for the human will remain in case of an unintended contact between the robot and a human. Current standardisation for industrial robot systems does not sufficiently address the subject of close human robot cooperation, thereby restricting the implementation of the newest technology. The aim of the reported research is to demonstrate the possibilities to assess the safety performance of robot systems by robot-dummy impact evaluation.

Methods from the automotive industry are investigated on their transferability to the situation in robotics. Anthropomorphic test devices, so called crash test dummies, that resemble the human's kinematic response in car crashes are analysed during a robot-dummy impact. A simulation setup with the FAT ES-2 representing the operator and an industrial robot is realised within LS-DYNA to conduct impacts of the robot arm against the head and the chest. The resulting Head Injury Index (HIC) and the Viscous Criteria (VC) for the chest are discussed, showing the potential and the limitations for the situation in robotics.

## Keywords:

safety in robotics, harmless robot, robot-human-cooperation, robot crash tests.

## 1 Einführung

Für eine sichere Mensch-Maschine-Kooperation müssen die Gefahren, die von der Maschine für den Menschen ausgehen, bekannt sein und auf ein Minimum reduziert werden. Dabei müssen für die Robotik Grenzwerte definiert werden, so dass nur ein zulässiges Maß an Verletzung bei einem Fehlverhalten des Menschen oder der Maschine auftreten kann.

In Kapitel 2 wird die aktuelle Situation in der Robotik beschrieben und auf die Ziele der vorliegenden Crash-Evaluierung von Robotersystemen mit Hilfe von Dummies näher eingegangen. Die heutigen Normen und Regulierungen hinken den Möglichkeiten technischer Innovationen hinterher und müssen damit noch weiter harmonisiert werden. Die Möglichkeiten, die sich dabei aus der Bewertung von Roboter-systemen hinsichtlich ihrer intrinsischen Sicherheit ergeben, eröffnen ein hohes Potential an Optimierung in der Robotersicherheit.

In Kapitel 3 werden mit LS-DYNA Crash Tests mit einem Roboter und einem Dummy modelliert und ausgewertet. Mit Hilfe des Robotermodells SMART NS 16 von Comau und dem Seitenaufprall-Dummy FAT ES-2, der den Werker in der Mensch-Roboter-Kooperation darstellt, werden Szenarien betrachtet, die hinsichtlich auftretender Verletzungswerte ausgewertet werden. Der Head Injury Index (HIC) und das Viscous Criteria (VC) werden dabei berechnet und untersucht.

## 2 Motivation und Ziel

### 2.1 Trends in der Robotik

Seit der Markteinführung der ersten Industrieroboter Mitte der 60er Jahre haben sich die Einsatzgebiete und die damit zusammenhängenden Entwicklungsrichtungen in der Robotik verändert. Während der weltweite Bedarf an Industrierobotern 2005 um 25 Prozent gegenüber dem Vorjahr gestiegen ist, verzeichnet der europäische Markt einen Rückgang um 9 Prozent. Eine Stagnation im traditionellen Einsatzgebiet der Automobilbranche senkt in Europa den Bedarf, während gleichzeitig der Anteil der Roboter in neuen Branchen wie der Lebensmittelindustrie, in der Fertigung von Haushaltsgegenständen, Holz- und Möbelbearbeitung steigt [IFR06]. Neben neuen Branchen und Verfahren für die Robotertechnik werden auch zunehmend neue Kommunikations- und Bedienmöglichkeiten erschlossen. Waren früher Roboter einzig zu Montage- und Schweißarbeiten in der Industrie zu finden, streng abgesichert hinter Stahl- oder Aluminiumzäunen, finden sie heutzutage vermehrt ihren Einsatz als Assistenzsysteme in Industrie bis hin zum Haushalt und kommen dabei dem Lebensraum des Menschen immer näher [Schraft04].

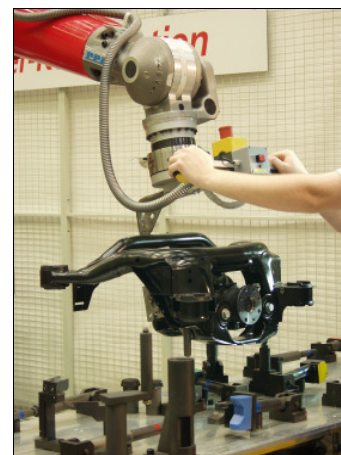


Bild 1: Mensch-Roboter-Kooperation am Fraunhofer IPA

Lange Zeit ließ sich der Arbeitsbereich des Roboters, in dem dieser seine Tätigkeiten im Automatikmodus ausführt, strikt von den Bereichen, in denen der Mensch arbeitet, trennen. Allerdings erfordern die neuesten Innovationen im Bereich der Mensch-Maschine-Kooperation eine Zusammenarbeit des Roboters und des Werkers auf engstem Raum [Helms03]. Nur so können die Vorteile der Adaptivität und Entscheidungsfähigkeit des Menschen mit der Präzision und Stärke des

Roboters optimal in flexible und effiziente Systeme für Produktion und bearbeitendes Gewerbe umgesetzt werden. Immer mehr rückt dabei die aktive und passive Sicherheit in den Fokus der Entwicklung, da nicht durch Abschirmung des Roboters und spezielles Training der Bediener ein Kontakt zwischen Mensch und Maschine verhindert werden soll, sondern gerade der Kontakt gesucht wird, um die jeweils inhärenten Vorteile zu verbinden [Corke99]. Dies verlangt nach einer Sicherung der minimalen Gefährdung des involvierten Werkers.

## 2.2 State of the Art in der Robotersicherheit: Mensch-Roboter-Kooperation

Als aktuelle Grundlage zur Sicherheit einer Roboterzelle diente bisher die Europäische Norm „DIN EN 775 Industrieroboter: Sicherheit“ [DIN-EN775], die momentan überarbeitet wird zu einer internationalen Norm der „ISO 10218: Robots for industrial environments – Safety requirements“. Nachdem auch schon mit der DIN EN 775 die Verwendung eines Roboters im Bewegungsradius des Menschen unter höchsten Sicherheitsbedingungen als Möglichkeit ausgewiesen war, ist es Ziel der ISO 10218, weitere Standardisierungen für die Roboter-Mensch-Kooperation zur Verfügung zu stellen. In Bild 2 ist die Entwicklung der Roboterzelle in der Industrie aufgezeigt. Links sieht man die klassische nach EN 775 zertifizierte Zelle, bei der Mensch und Roboter strikt örtlich getrennt arbeiten. Die mittlere Installation in Bild 2 löst die örtliche Trennung in der Zelle auf, behält aber eine zeitliche Trennung der von Mensch und Roboter genutzten Bereiche bei. Der aktive Arbeitsbereich des Roboters wird dabei begrenzt so lange der Mensch in der Nähe ist und wieder erweitert, sobald der Weg frei ist. Erst mit Einführung der ISO 10218 lassen sich Roboterzellen, wie rechts in Bild 2 beschrieben zertifizieren, bei denen sich der Mensch im aktiven Arbeitsbereich des Roboter aufhält, so dass eine gleichzeitige Handhabung oder Bearbeitung von Objekten durch Mensch und Roboter möglich ist.

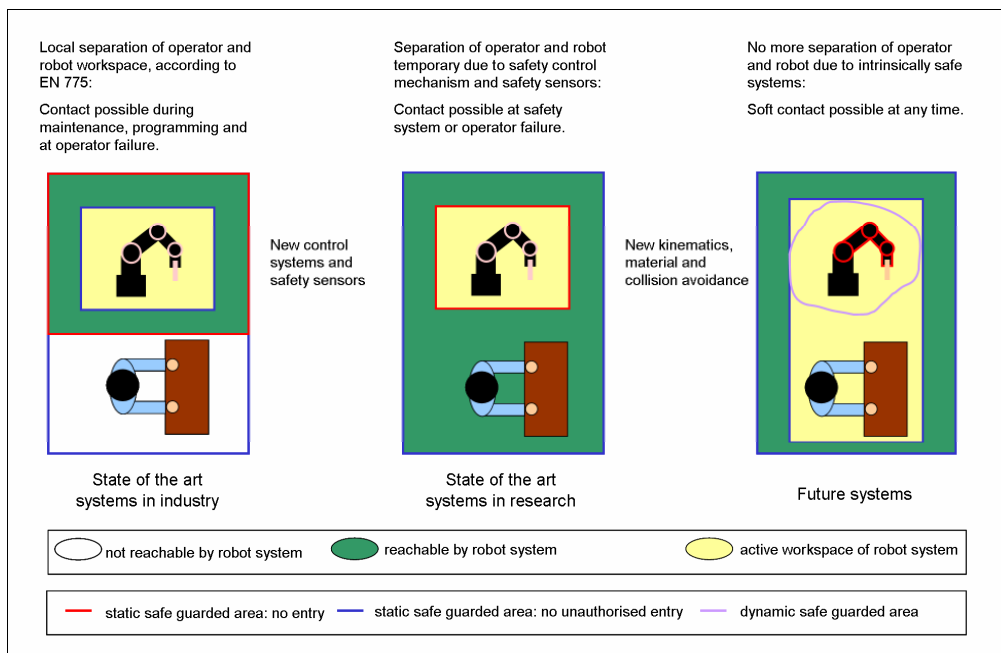


Bild 2: Möglichkeiten kooperierender Roboterarbeitsplätze

Der seit August 2006 erhältliche 1. Teil der Norm, „Robot“, beschäftigt sich rein mit der technischen Spezifikation des Roboters. Es werden Richtlinien und Informationen zu eigensicherem Design und Schutzmaßnahmen zur Absicherung eines Robotersystems angegeben, um Gefährdungen, die von einem Industrieroboter ausgehen, auszuschließen oder weitreichend zu reduzieren [ISO10218-1]. Erst der zweite Teil, der momentan noch in Bearbeitung ist, wird sich mit den Funktionalitäten und dem Betrieb des Roboters beschäftigen und dabei den Automatikbetrieb bei Mensch-Roboter-Kooperation regeln, so dass bei ausreichender Absicherung der Aufenthalt im Arbeitsbereich des Roboters zugelassen werden kann.

Mit Hilfe technologischer Schlüsselentwicklungen für die Robotersicherheit, wie z.B. dem Safety Controller, der eine sichere Überwachung der Geschwindigkeit und Position der Roboterbewegung erlaubt [Som03], kann eine Unterteilung des Arbeitsbereiches für verschiedene Bewegungsabläufe des Roboters vorgenommen werden:

- Nicht sicherer Bereich – „Klassische“ Roboterzelle:
  - Absicherung durch externe Sensorik gegen unbefugten Zutritt während Automatikmodus
  - Unabhängig von Roboter-Design und -Kinematik, Maximalgeschwindigkeiten möglich
- Sicherer Bereich (Kategorie 3 nach ISO 13849-1:1999) – Safe-Production:
  - Beschränkter Automatikmodus durch Reduktion der achsspezifischen und kartesischen Maximalgeschwindigkeiten
  - Geschwindigkeitsüberwachung durch redundante Übertragung der Ist-Werte
  - Stillstandsüberwachung durch Transformation der Achswerte
  - Mögliche Vorgabe virtueller, unzulässiger Arbeitsbereiche
  - Abhängig von Roboter-Design und -Kinematik

Somit können virtuelle Arbeitsbereiche eingerichtet werden, in denen der Roboter mit beliebigen Geschwindigkeiten verfährt, ohne auf die dabei wirkenden Kräfte zu achten, während er innerhalb des als „sicher“ definierten Bereiches, angepasst an den auszuführenden Prozess sowie an die Prozessumgebung, begrenzte Maximalgeschwindigkeiten an der Spitze des Roboters sowie für die einzelnen Achsen einhält. Bild 1 rechts zeigt die Installation „Powermate“ am Fraunhofer IPA, bei der durch die Integration des Safety-Controllers zulässige Geschwindigkeiten eingehalten werden können, so dass in direktem Kontakt mit dem Roboter ein Getriebe in ein Gehäuse gebracht werden kann [Schraft05]. In Bild 1 links wird ein Verfahren zum Programmieren durch manuelles Führen des Roboters umgesetzt.

### 2.3 Zielsetzung

In der Kfz-Branche werden Leistungen von Automobilen in Crash-Tests als verkaufsteigerndes oder -minderndes Mittel eingesetzt und fördern damit die Entwicklung verbesserter Sicherheitssysteme. In der Robotik ist das Vorgehen, reale Unfalldaten sowie Simulationen von Kollisionen mit Crash Test Dummies auszuwerten und zur Verbesserung des Designs und der Funktionalitäten des Roboters zu nutzen, bisher noch nicht angewandt worden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse, ob die Methoden zur Bewertung der Crashworthiness im Automobilbereich in der Robotik angewandt werden können. Es wird untersucht, welche Ansätze und Auswertungsschemata auf die Robotik übertragen werden können, um die Safety Performance von Robotersystemen zu bewerten und zu verbessern. Dazu werden in Kapitel 3 Roboter-Dummy Szenarios in LS-DYNA implementiert und hinsichtlich auftretender Verletzungswerte bei einem unbeabsichtigten Kontakt des Roboters gegen den Kopf und die Brust ausgewertet.

Ziel soll es dabei sein, auf diese Weise Grenzwerte zu ermitteln, die maschinenunabhängig festgelegt werden können, ohne dabei die Charakteristiken des spezifischen Robotersystems zu vernachlässigen. Im Vergleich zu bisherigen Richtlinien, die Maximalgeschwindigkeiten des Roboters im Beisein einer Person unabhängig von der vorliegenden Roboterkinematik festlegen, ergeben sich durch die Vorgabe von Verletzungsgrenzen, für verschieden Maschinen, mit unterschiedlichem Gefahrenpotential, auch unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten. Aus gleichen Sicherheitsanforderungen resultieren geringere Einschränkungen an den Betrieb leichter und abgesicherter Systeme. Z.B. die Verwendung neuer Leichtbaumaterialien sowie die Entwicklung von Parallelkinematiken, die weitaus niedrigere Massenträgheiten auf die Roboterspitze aufbringen, versprechen eine erhöhte Sicherheit für die Mensch-Maschine Kooperation und ermöglichen dabei weitaus höhere zulässige Maximalgeschwindigkeiten [Brogardh02, Hirzinger02].

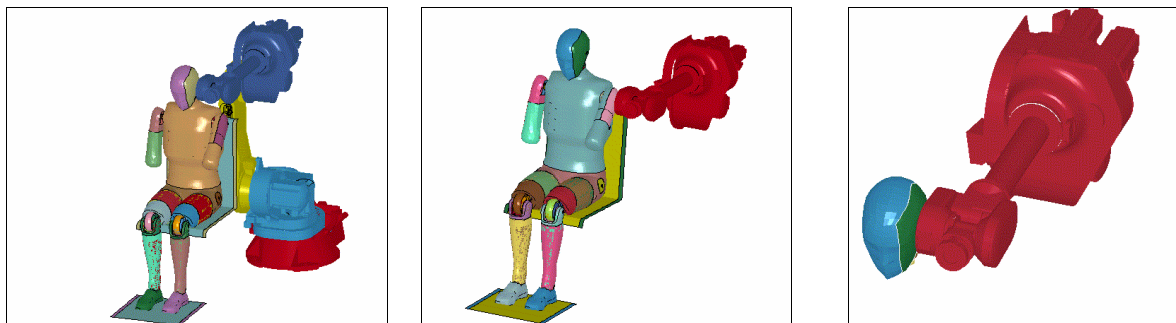
Diese Forschungsarbeit ist eingebettet in das Projekt *SMErobot - Die europäische Robotik-Initiative zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit von kleinen und mittelständischen Produktionsbetrieben*. Ziel des Projektes, dessen Konsortium unter anderem die 5 größten europäischen Roboterhersteller umfasst, ist es, angepasst an die typischen Einsatzfelder kleiner und mittelständischer Produktionsbetriebe (KMUs), grundlegend neue Automatisierungslösungen zu entwickeln, die auf einer neuen Generation von Industrierobotern basieren. Bisher sind bei KMUs mit entsprechend niedrigen Stückzahlen Robotersysteme noch unterrepräsentiert, da sie durch Anschaffungs- und

Installationskosten nicht rentabel sind. Das Arbeitsspektrum das dabei von einem Roboter abgedeckt werden soll, erfordert für diesen Bereich flexible Prozesse und Umstellungen, die nur durch Mensch-Roboter-Kooperation ermöglicht werden können.

### 3 Roboter Crash Modellierung in LS-DYNA

Für die Robotik gibt es meist keine oder nur unzureichende Studien über Unfälle und dabei auftretende Verletzungen. Eine der wenigen öffentlich zugänglichen Daten finden sich in einer schwedischen Studie. Obwohl damalige Roboterinstallationen noch keinen Kontakt zwischen Mensch und Maschine zuließen, kam es zu einer Anzahl oft schwerer Unfälle durch menschliches Versagen, entweder durch Missachtung oder durch bewusstes Umgehen von Sicherheitsvorrichtungen [Carlsson85]. Ein Ergebnis der Studie ist, dass Kopfverletzungen einen hohen Anteil besonders bei den Unfällen mit schweren Auswirkungen auf die Gesundheit des Werkers darstellen. Besonders die Vermeidbarkeit eines Großteils der Unfälle durch Einhalten aller Sicherheitsvorschriften durch den Werker bestätigen den Bedarf an klaren Richtlinien und Vorgaben für den Betrieb eines Robotersystems.

Um die Crash-Simulation in der Robotik als Methodik zur Optimierung des Designs und der Festlegung von Grenzwerten für die Mensch-Roboter-Kooperation zu etablieren, sollen kommerziell erhältliche Tools genutzt und auf ihre Möglichkeiten und Grenzen hin untersucht werden. Dazu wurde für die vorliegenden Untersuchungen der explizite Finite Elemente (FE) Löser LS-DYNA<sup>1</sup> ausgewählt, der spezifische Kontaktformulierungen für Crash-Szenarien zur Verfügung stellt. Ausgehend von CAD-Daten der Roboterhersteller wird das zu betrachtende Robotermodell vernetzt und in LS-DYNA integriert. Mit dem FE-Modell des FAT ES-2 Seitenaufprall-Dummies, der von der DYNAMore GmbH und Partnern, in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), entwickelt wurde, wird ein Crash-Szenario mit Kontakt zwischen dem Roboter und dem Dummy simuliert und ausgewertet.



*Bild 3: COMAU SMART NS 16 und FAT ES-2 Simulation Setups*

Analog zur Crash-Auswertung im Automobilbereich sollen Verletzungswerte zu verschiedenen Körperteilen evaluiert werden. Dazu wird der Aufprall des Roboters auf den Dummy an verschiedenen Positionen des Körpers simuliert und an Kopf und Rippen des Dummymodells Beschleunigungen und Eindrückungen ausgelesen. Das simulierte Szenario (s. Bild 3 links) entspricht einem sitzenden Werker<sup>2</sup>, der seitlich von einem Roboterarm getroffen wird, dem er in Aufprallrichtung frei ausweichen kann.

Das Finite Element Modell des Roboters wurde mit Hilfe des Netzgenerators in LSPREPOST als Starrkörper (Rigid Body) modelliert. Die Vernetzung besteht aus Viereckelementen. Der Roboterarm simuliert während des Crashes einen Impaktor der ungebremst, mit einer konstanten Drehgeschwindigkeit um die 1. Roboterachse von  $v = 5$  %s bis 50 %s, auf den Dummy auftrifft. Zur Optimierung der Rechenzeit wurde das geometrische Robotermodell auf den oberen Teil (3. - 6. Achse) des Roboters, an dem der Kontakt während des Crashes auftritt, reduziert. Bei den hier

---

<sup>1</sup> LS-DYNA by Livermore Software Technology Corporation: <http://www.lsdyna.com/>

<sup>2</sup> Das kinematische Verhalten des Körpers im Fall ist hierbei nicht zu untersuchen, so dass sich daraus keine Einschränkung der zu betrachtenden Szenarien ergibt. Für die Auswertung der Verletzungswerte sind lediglich die ersten Millisekunden nach dem Impact von Interesse.

betrachteten Steifigkeitsverhältnissen zwischen einem etwa 200 kg schweren Industrieroboter und dem maßgeblich elastisch modellierten Dummymodell können die Gelenke des Roboters zwischen den einzelnen Achsen in der Reaktion vernachlässigt werden (s. Bild 3 Mitte) und der ganze übrige Roboterarm als ein einziger Starrkörper angenommen werden. Für den Impaktor ergeben sich aus den technischen Spezifikationen des verwendeten SMART NS 16 die in Tabelle 1 aufgelisteten Materialcharakteristiken.

	Material	Poisson $\mu$	Dichte $\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	Elastizitätsmodul $E \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$
Smart NS 16	Rigid – MAT_020	0.34	2 800.00	72 600.00

Tabelle 1 Materialeigenschaften des Comau SMART NS 16 für die LS-DYNA Simulation

Die Kontaktdefinition zwischen dem Roboterarm und dem Dummy erfolgt durch den Automatic Surface/Surface Kontakt des LS-DYNA Codes mit einem statischen und dynamischen Reibungskoeffizienten von  $f = 0.3$  [LSDYNA03].

### 3.1 Simulierter Kopf-Impakt mit COMAU SMART NS 16 und FAT ES-2

Als das Körperteil, das sowohl bei einem hohen Anteil von Unfällen verletzt wird, und gleichzeitig das Körperteil, dessen Verletzungen in vielen Fällen schwerwiegende Folgen aufweisen, wie biomechanische Studien belegen, wurde der Kopf identifiziert [IRCOBI06]. Da dies mit den Erfahrungen aus der schwedischen Studie über Verletzungen mit Industrierobotern übereinstimmt [Carlsson85], sollen im Folgenden Crashes des Roboters gegen den Kopf des Dummies untersucht werden.

Um die benötigte Rechenzeit dabei zu verringern, wurde in ersten Simulationen das Verhalten der Kopfkinematik in Abhängigkeit der Steifigkeit des übrigen Dummykörpers untersucht. Dazu wurde der Kopf des ES-2 Modells vom übrigen Dummy-Körper gelöst und separat, mit freier Bewegung zum Nacken gerechnet (s. Bild 3 rechts). Anschließend wurden die Ergebnisse mit denen, bei welchen der komplette ES-2 gerechnet wurde, verglichen.

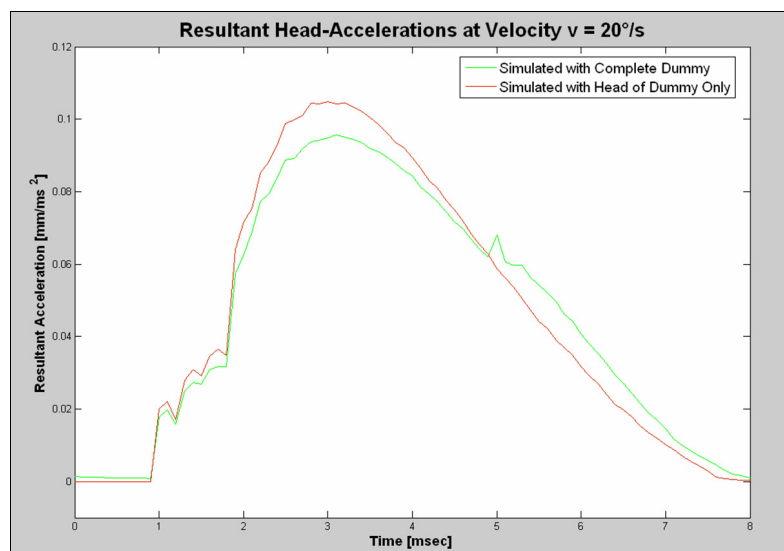


Bild 4: Vergleich der auf den Kopf wirkenden Beschleunigung bei komplettem und reduziertem Modell des ES-2

In Bild 4 sind die auf den Dummykopf wirkenden Beschleunigungen abgebildet, die bei einem Impact des Roboters mit einer Geschwindigkeit von 20°/s um die 1. Achse erreicht werden. Die Auswertung

erfolgt über das Auslesen des Beschleunigungsmessers, der im Schwerpunkt des Dummykopfs definiert ist. Bei den hierbei untersuchten Impact-Simulationen mit Bahngeschwindigkeiten des Kontaktpunktes des Roboters von  $v = 0.093 \text{ m/s}$  bis  $v = 0.93 \text{ m/s}$  ergibt sich für das Maximum der resultierenden Beschleunigung des Dummykopfes eine Abweichung von ca. 5 Prozent, während Länge und Form der Beschleunigungskurve nahezu unverändert bleiben.

Dies ergibt eine ausreichende Genauigkeit für die hier verfolgte Zielsetzung. Die Analyse wird außerdem gestützt durch die Aussagen anderer Autoren, dass bei einem Kurzzeit-Impakt gegen den menschlichen Kopf (hier  $\leq 10 \text{ ms}$ ) das kinematische Verhalten des Kopfes unabhängig von der Steifigkeit des Nackens ist (s. z.B. [Willinger99], [Belingardi05]).

Um die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsreihe auszuwerten, wird der in der Literatur bekannteste Verletzungswert, der Head Injury Index (HIC), hinzugezogen [Crash05]. Er berechnet sich aus dem normierten Maximum des Integralwertes der linearen Beschleunigung des Schwerpunktes des Kopfes, vgl. Gleichung (1):

$$HIC = \max \left\{ (t_2 - t_1) \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \left( \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^2 \right)^{\frac{1}{5}} \right\}, \quad (1)$$

mit dem zugehörigen Zeitintervall  $I = [t_1, t_2]$ , hier  $|I| \leq 15 \text{ ms}$  in  $[s]$  und der resultierenden linearen Kopfbeschleunigung  $a(t)$  in  $[g]$ .

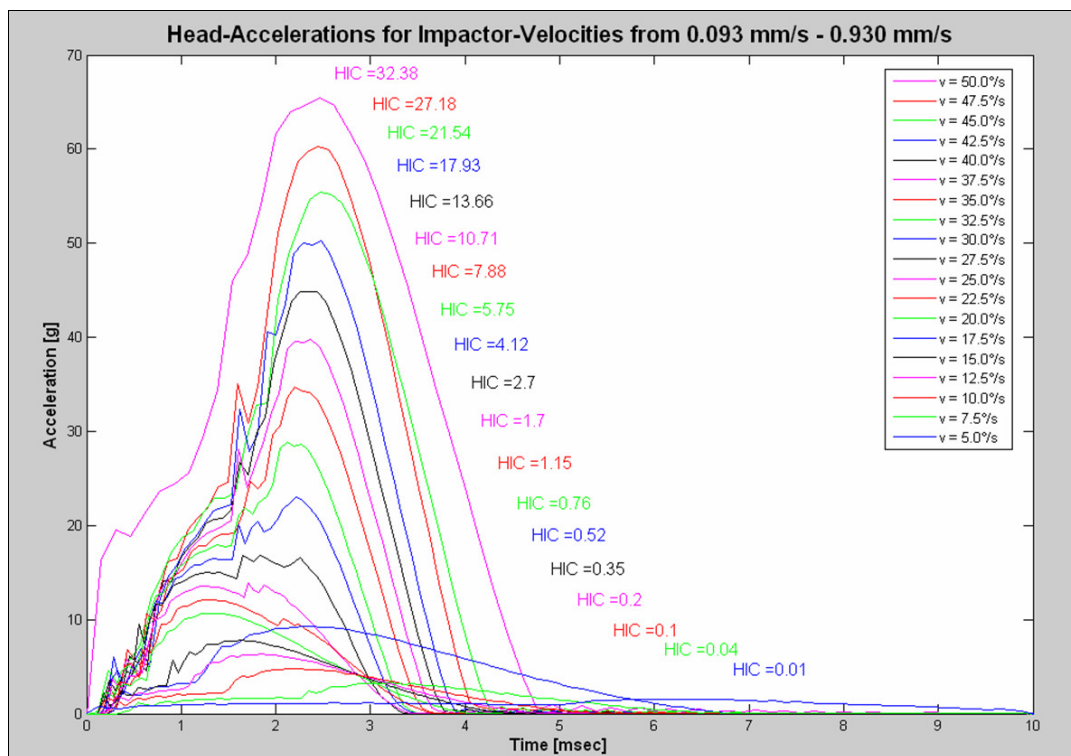


Bild 5: Verlauf der Kopfbeschleunigung bei Impact des ES-2 durch den SMART NS 16 bei verschiedenen konstanten Drehgeschwindigkeiten um die 1. Achse, mit entsprechendem HIC-Wert

In Bild 5 sind die Simulationsläufe mit der oben beschriebenen reduzierten Robotergeometrie und dem reduzierten ES-2-Modell (s. Bild 3 rechts) ausgewertet. Auf der y-Achse ist der Verlauf der resultierenden Beschleunigung des Kopfes, ausgelöst durch den Impact des Roboterarms gegen die linke Seite des Kopfes aufgezeichnet. Dabei wurden unterschiedliche Geschwindigkeiten, mit denen der Roboterarm um seine 1. Achse gedreht wird, betrachtet. Die Beschleunigung steigt innerhalb der

ersten 3 ms nach dem Kontakt steil bis zum Maximum an und fällt anschließend steil wieder auf 0 zurück, wobei bei den niedrigeren Geschwindigkeiten, die zu einer niedrigeren Beschleunigung führen, ein langsames Abklingen zu beobachten ist. Es zeigt sich, dass die Form der Beschleunigungskurve unabhängig von der Geschwindigkeit erfolgt. Vielmehr wird sie durch Form, Material und Bewegungsart des Roboters bestimmt [Oberer06]. Eine reine Variation der Geschwindigkeit beeinflusst vor allem die Höhe des Maximalwertes der Beschleunigung.

Zur Auswertung des HIC-Wertes, der in Bild 5 neben den Beschleunigungskurven angegeben ist, wurde die Formel aus Gleichung (1) berechnet. In der Literatur wird beim HIC abhängig von der Dauer des Impakts noch unterschieden zwischen der Auswertung der Impaktintervalle  $|t| \leq 15$  ms, HIC15 und  $|t| \leq 36$  ms, HIC36. Bezugnehmend auf diese Intervalle werden verschiedene Grenzen für die Bewertungsstufen des Verletzungswertes vorgegeben, wobei vermieden wird, dass zusätzliche Stöße bei einem weiteren Aufprall die Berechnung verzerren. Aus Bild 5 ergibt sich jedoch für den kurzen steifen Aufprall des Roboters gegen den Dummy ein weitaus kleineres Impaktintervall von  $|t| \leq 5$  bis 10 ms. Die in der vorliegenden Simulation berechneten HIC-Werte von  $HIC15 = 0.01 - 32.38$  liegen weit unter den Grenzen, die im Automobilbereich als schwerwiegend vorgegeben werden. Gerade aber die Abweichungen in der Länge des Impaktintervalls erschweren eine Interpretation des berechneten HIC-Wertes. Die Vorgaben an Verletzungsgrenzwerte aus dem Automobilbereich sind spezifisch auf die dort auftretenden Crash-Szenarien abgestimmt. Bei kurzen, harten Stößen wie hier vorliegend, sind möglicherweise die Beschleunigungen nicht diejenige mechanische Belastung, die die größten Schäden hervorruft.

Es zeigt sich somit, dass zwar Tools aus der Crash-Evaluierung im Automobilbereich übernommen werden können, aber die Auswertung nicht ohne weitere Anpassung an die Robotik möglich ist. Zusätzlich gilt es zu beachten, dass der HIC sowohl der bekannteste als auch der umstrittenste Verletzungswert ist. An vielen Stellen wird auf seine begrenzte Aussagefähigkeit bezüglich möglicherweise auftretender Gehirnverletzungen hingewiesen [IRCOBI06]. Bevor Grenzwerte für die Robotik aufgestellt werden können, müssen potentielle Verletzungen, die durch kurze harte Impakts verursacht werden, noch genauer betrachtet werden. Vielversprechend sind dabei 3D-Kopfmodelle wie z.B. das ULP-Modell der Universität Louis-Pasteur Strasbourg, die speziell gegen Experimente mit harten Kurzzeitstößen validiert wurden [Willinger99, Willinger06].

### 3.2 Simulierter Brust-Impakt mit COMAU SMART NS 16 und FAT ES-2

Als weiterer Verletzungswert wird das „Viscous Criteria“ (VC) untersucht, das die Einwirkung des Impaktes auf die Brust beschreibt [Crash05]. Das zu Beginn des Kapitels beschriebene Szenario wird beibehalten, wobei der Roboter so positioniert wird, dass er auf Höhe der mittleren Rippe des ES-2, der den Arm leicht angewinkelt hat, auftrifft (Bild 6). Das Robotermodell sowie die Bewegung und Geschwindigkeiten des Roboters entsprechen denen beim Kopfpakt in Kapitel 3.1.

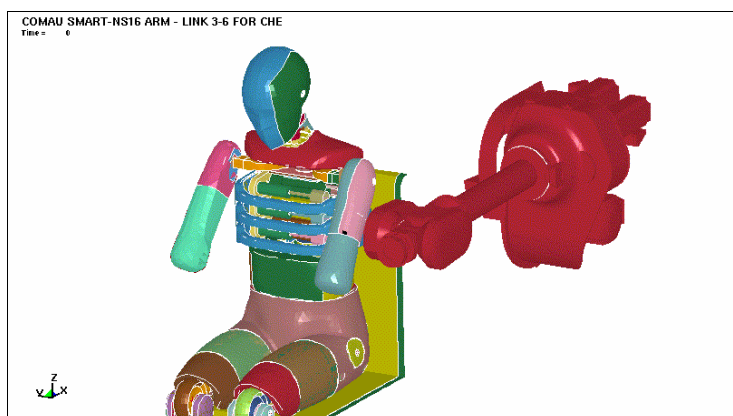


Bild 6: LS-DYNA Simulationssetup für Brustimpakt mit SMART NS 16 und ES-2

Die Auswertung der erfolgten Brust eindrückung zeigt für die drei Rippen des ES-2 je eine ähnliche Verlaufskurve, wobei bei der untersten Rippe die größte Eindrückung erfolgt, da dort der schützende Arm weniger wirkt und durch die Kinematik des Dummies das geringste Wegkippen vor der Impaktbewegung erfolgt. Als Verletzungskriterium wird das Produkt der relativen Kompression  $d(t)$  und der Deformationsgeschwindigkeit  $v(t)$ , deren Maximum das VC bestimmt, nach Gleichung (2) berechnet:

$$VC = \max\{d(t) * v(t)\} = \max\left\{\frac{y(t)}{0.5 * b} * \frac{d[y(t)]}{dt}\right\} \quad (2)$$

Dabei beschreibt  $y(t)$  die Deformation des Brustkorbs, die aus der Rippeneindrückung ausgelesen wird und  $b$  eine dummiespezifische Konstante, die die Brusttiefe des verwendeten Dummies beschreibt (hier  $b = 140\text{mm}$ ).

Zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Geschwindigkeiten wurden die Geschwindigkeitsprofile so gewählt, dass der Roboterarm ab Kontakt mit dem Dummy eine Bahn von 200 mm zurücklegt, bevor er stoppt. In Bild 7 links ist die relative Eindrückung der unteren Rippe des ES-2 über die zurückgelegte Strecke des Roboterarms angegeben. Rechts in Bild 7 ist die VC-Kurve abgebildet, deren Maximum das Viscous Criteria beschreibt. Der zeitliche Verlauf der Eindrückung der Rippe lässt sich aus der Graphik nicht erkennen, wird aber direkt bei Berechnung des VC berücksichtigt.

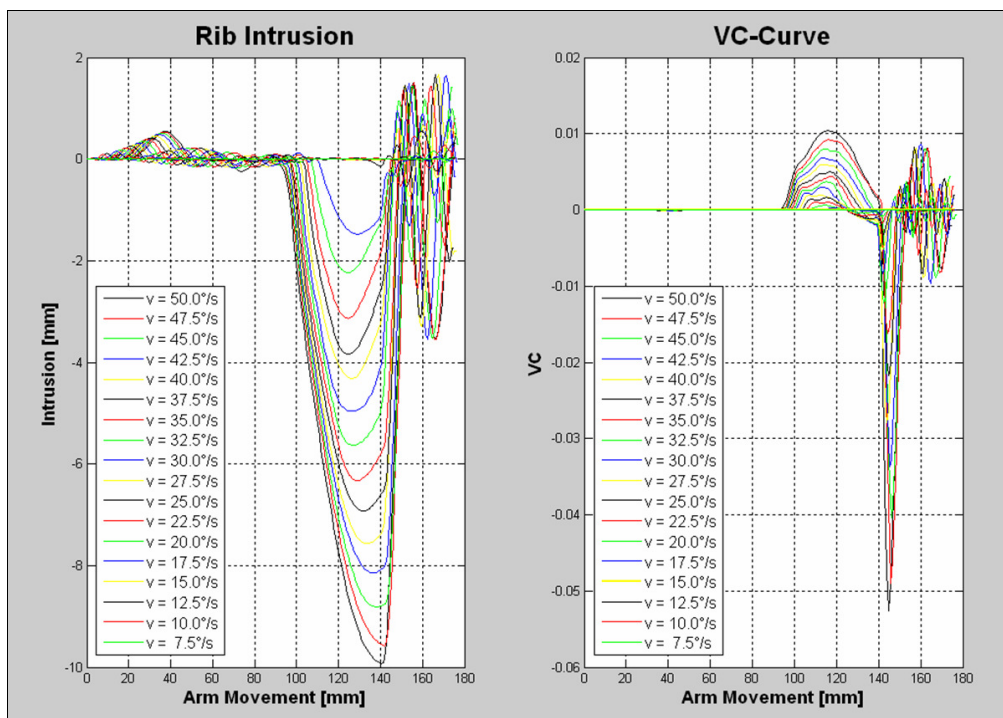


Bild 7: Auswertung der Brust eindrückung an der mittleren Rippe des ES-2

Auch hier lassen sich mit VC-Wert  $\leq 0.06$  nur recht niedrige Verletzungswerte für die Brust erkennen. Der Verlauf der Intrusionskurve in Bild 7 links zeigt ein stabiles Verhalten des Dummymodells, das eigentlich für ein anders gestaltetes Crash-Szenario ausgelegt ist. Zwar zeigt sich eine konsistente Entwicklung der Intrusionskurve bei erhöhter Geschwindigkeit des Impaktors, allerdings müssen noch weitere Kenntnisse bezüglich des Verhaltens des menschlichen Körpers bei Kurzzeit-Stößen hinzugezogen werden, bevor die Höhe des hierbei berechneten VC-Wertes interpretiert werden kann.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Methoden und Tools aus dem Automobilbereich, in denen mit Hilfe von anthropomorphen Crash Test Dummies die Sicherheit von einzelnen Kfz-Typen analysiert wird, bieten ein hohes Potential für

die Übertragbarkeit auf die Robotik. In den hier untersuchten Simulationen eines Roboter-Dummy-Crashes, mit einem Comau SMART NS 16 und dem Seitenaufpralldummy FAT ES-2 in LS-DYNA, weist das Finite Elemente Modell für Kopf- und Brustimpakte eine hohe Robustheit auf. Die Auswertung liefert schlüssige Verläufe für die Kopfbeschleunigung und Brusteingedrücktung. Gleichzeitig zeigen jedoch die berechneten Verletzungswerte eine abweichende Größenordnung zu den beim Automobil-Dummy Crashes berechneten Ergebnissen.

Die im Automobilbereich vorliegenden Bewertungstabellen sind daher nicht direkt anwendbar auf die Robotik. Die Bewertungsmöglichkeiten für Roboter-Dummy-Crash-Tests müssen spezifisch für die hierbei vorliegenden Charakteristika wie Steifigkeit und Länge des Crashes aufgestellt werden. Dabei ist es unumgänglich, zusätzliches Knowhow aus der Biomechanik bezüglich der Belastbarkeit des menschlichen Körpers zu betrachten. Verglichen mit dem Crash im Automobilbereich, scheinen beim Roboter-Dummy Crash andere mechanische Einwirkungen auf den Körper die schwerwiegenden Verletzungen zu verursachen.

## 5 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/>

## 6 Literatur

- [Belingardi05] Belingardi, G.; Chiandussi, G.; Gaviglio, I.: „Development and validation of a new finite element model of human head“. 19thESV (Enhanced Safety of Vehicles), Washington D.C., Juni 2005.  
<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/pdf/nrd-01/esv/esv19/05-0441-O.pdf>
- [Brogardh02] Brogardh, T.: „PKM Research - Important Issues, as seen from a Product Development Perspective at ABB Robotics“. In: Proceedings of the WORKSHOP on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators. Gosselin, C.M. and Ebert-Uphoff, I. Eds.; Quebec City, QC, Canada, 2002, S. 68-82.
- [Carlsson85] Carlsson, J.: „Robot Accidents in Sweden“. Report published by the National Board of Occupational Safety and Health, Sweden. In: „Robot Safety“, Bonney, M. C.; Yong, Y. F. et al. Eds.. Kempston; Bedford: IFS Publications, Springer Berlin/Heidelberg, 1985, S. 49-64.
- [Corke99] Corky, P. I.: „Safety of advanced robots in human environments – A discussion paper for the IARP“. International Advanced Robotics Programme 1999.
- [Crash05] 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.
- [DIN-EN775] DIN EN 775 08.1993: „Industrieroboter: Sicherheit - (ISO 10218:1992, modifiziert)“. 1993.
- [Helms03] Helms, E.: „Assistierende, interaktive und sicher im industriellen Umfeld agierende ortsflexible Roboter“. In: Tagungsband 2. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik – Mensch und Roboter ohne trennende Schutzsysteme. Stuttgart, 2003, S. 87-102.
- [Hirzinger02] Hirzinger, G.; Sporer, N.; Albu-Schäffer, A.; Hahnle, M.; Krenn, R.; Pascucci, A.; Schedl, M.: „DLR's torque-controlled light weight robot III - are we reaching the technological limits now?“. In Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation, ICRA '02. Vol. 2, 2002, S. 1710-1716.
- [IFR06] International Federation of Robotics, Statistical Department: „World Robotics 2006, First Results“. <http://www.ifrstat.org/>, August 2006.

- [IRCOBI06] International Research Council on the Biomechanics of Impact: „Future Research Directions in Injury Mechanics and Passive Safety Research“. Mai 2006.  
<http://www.ircobi.org/Future%20Research%20Booklet.pdf>
- [ISO10218-1] ISO 10218-1:2006(E): „Robots for industrial environments — Safety requirements — Part 1: Robot“, August 2006.
- [LSDYNA03] „LS-DYNA Keyword user manual“. Version 970, Livermore Software Technology Corporation, April 2003.
- [Masch06] „Hand in Hand“, 24.02.2006,  
[http://www.maschinenmarkt.de/fachartikel/mm\\_fachartikel\\_2677283.html](http://www.maschinenmarkt.de/fachartikel/mm_fachartikel_2677283.html), 2006.
- [Oberer06] 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. Düsseldorf, VDI-Verlag 2006 (VDI-Berichte 1956), 17 S. (CD-ROM), Abstract S. 87.
- [Schraft04] Schraft, R. D.; Helms, E.; Hans, M.; Thiemermann, S.: „Man-Machine-Interaction and Co-Operation for Mobile and Assisting Robots“. In: Proceedings of Engineering of Intelligent Systems (EIS) 2004. Almada Cardoso, A.I. de, University of Madeira, University of Maribor Ed., 2004, 7 S. (CD-ROM).
- [Schraft05] Schraft, R. D.; Meyer, C.; Parlitz, C.; Helms, E.: „PowerMate - A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks“. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 2005, ICRA 2005. April 2005, S. 4074- 4079.
- [SOM03] Som, F.: „Sichere Steuerungstechnik für den OTS-Einsatz von Robotern“. In: Tagungsband 2. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik – Mensch und Roboter ohne trennende Schutzsysteme. Stuttgart, 2003, S. 59-73.
- [Willinger99] Willinger, R.; Kang, H.-S.; Diaw, B.: „Three-Dimensional Human Head Finite-Element Model Validation Against Two Experimental Impacts“. In: Annals of Biomedical Engineering. Springer Netherlands, 1999, Vol. 27, S. 403-410.
- [Willinger06] Raul, J. S.; Baumgartner, D.; Willinger, R.; Ludes, B.: „Finite element modelling of human head injuries caused by a fall“. In: International Journal of Legal Medicine. Springer Berlin/Heidelberg, 2006, Vol. 120, S. 212-218.