

Ansatz zur Integration biomechanischer Grenzwerte in Prozesssimulationen kollaborativer Mensch-Roboter-Arbeitssysteme

Clara FISCHER, Sebastian SCHLUND

*Institut für Managementwissenschaften
Technische Universität Wien
Theresianumgasse 27, A-1040 Wien*

Kurzfassung: Der Einsatz von kollaborativen Robotersystemen schafft neue Herausforderungen für die Gewährleistung der Personensicherheit. Speziell im Falle einer Kollision muss die Einhaltung biomechanischer Grenzwerte sichergestellt werden. Da diese zum aktuellen Stand nicht in Prozesssimulationsprogramme integriert sind, ist eine automatisierte Sicherheitszertifizierung per digitalem Zwilling nicht möglich. Ein Ansatz zur Lösung des Problems wird am Beispiel der Software Tecnomatix Process Simulate vorgestellt. Anhand der Simulation einer Mensch-Roboter-Kollaboration wird überprüft, ob sich die für die Grenzwerte benötigten physikalischen Größen in der Software darstellen oder aus ihr ableiten lassen. Dadurch soll eine Grundlage für die Entwicklung von automatisierten Tests für Cobot-Anwendungen, direkt in Prozesssimulationen, geschaffen werden.

Schlüsselwörter: Biomechanische Grenzwerte, Prozesssimulation, Mensch-Roboter Kollaboration, Cobot, Digitaler Zwilling, Robot Safety

1. Einleitung

Mensch-Roboter-Kollaborationen (MRK), bei denen sogenannte Cobots, schutzzaunlose Leichtbauroboter, mit dem Menschen interagieren und als dritte Hand unterstützen, können Qualität und Effizienz eines Produktionsprozesses, beispielsweise im Bereich der Montage, erhöhen (Bauer, et al. 2016). Durch den gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Maschine entstehen jedoch auch neue Herausforderungen an die Safety und Security der Systeme (Vincentini 2019), besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Gewährleistung der Personensicherheit (Hofbauer & Rathmair 2019). Im Falle einer Kollision zwischen Mensch und Roboter müssen sogenannte biomechanische Grenzwerte, Maximalwerte für Kraft und Druck, die in der technischen Spezifikation ISO/TS 15066 für spezifische Körperregionen festgelegt sind, eingehalten werden (ISO/TS 15066 2016).

Aktuell sind Risikobeurteilung und Zertifizierung aufwändig und benötigen reale Tests und Laboraufbauten. Jede Anwendung muss individuell zertifiziert werden und standardisierte Prozeduren hierfür existieren nicht. Prozesssimulationen mit einem digitalen Zwilling des Arbeitssystems bieten die Chance, Zertifizierungsprozesse drastisch zu vereinfachen und die -aufwände zu reduzieren. Nach dem aktuellen Stand sind biomechanische Grenzwerte nicht in Simulationssoftwares integriert (TÜV Austria et. al 2017).

Zur Lösung der Problemstellung wird in diesem Paper ein Konzept vorgestellt, das als Ansatz zur Integration der Grenzwerte in eine bestehende Simulationssoftware herangezogen werden kann.

2. Konzept zur Ermittlung der Grenzwerte

Das Konzept beschreibt wie biomechanische Grenzwerte aus bereits vorhandenen Simulationsdaten einer MRK Anwendung, inklusive dargestellter Kollision, und weiteren Daten von Roboter und ISO/TS 15066, mittels geeigneten Formeln berechnet werden können. Außerdem können daraus auch jene Daten, die für eine automatisierte Berechnung in die Simulation integriert werden müssen, abgeleitet werden. Zur Veranschaulichung ist dieses Konzept in Abbildung 1 grafisch dargestellt.

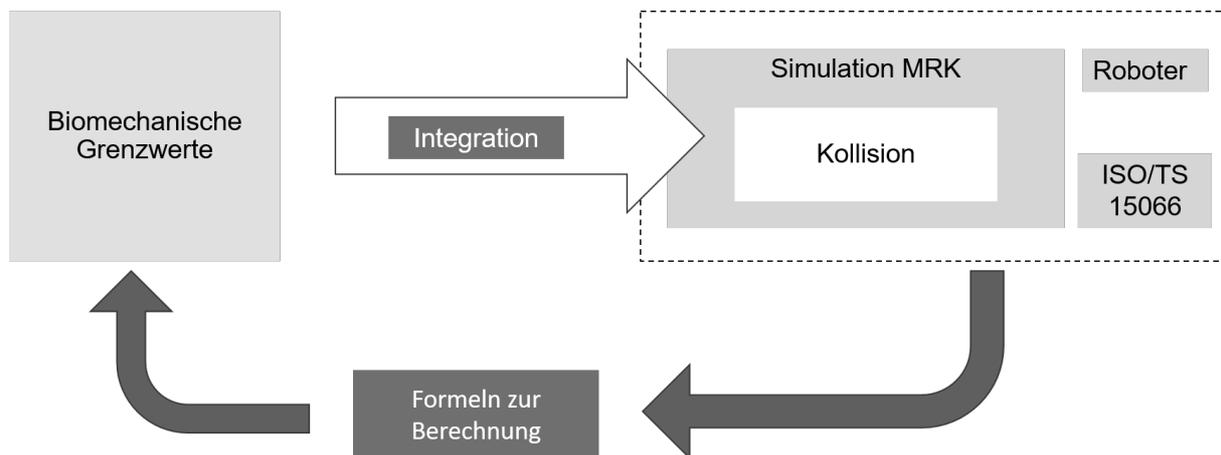


Abbildung 1: Konzeptbild – Weg zur Problemlösung

3. Vorgangsweise

Angewendet wurde dieses Konzept auf eine Simulation in der Software Tecnomatix Process Simulate, in der einer Kollision, zwischen einem Menschmodell und einem Universal Robot UR5 erstellt wurde, dargestellt in Abbildung 2. Für diesen einen statischen Fall wurde zuerst eine allgemeine Lösung erarbeitet und später eine konkrete Berechnung zur Überprüfung der Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte durchgeführt. Außerdem wurden aus der allgemeinen Lösung die benötigten Daten und Berechnungsalgorithmen abgeleitet, die für eine automatisierte Berechnung in das Programm zu integrieren sind.

Vor der Darstellung der Ergebnisse muss noch erwähnt werden, dass die ISO/TS 15066 zwei Arten von Kollisionen definiert: quasistatischer Kontakt (Einklemmen, Quetschen) und transienter Kontakt (dynamischer Stoß), letzterer ist in Abbildung 2 dargestellt (ISO/TS 15066 2016). Zur Vereinfachung der Berechnung wird im Rahmen dieses Papers nur eine Kollision, die über einen transienten Kontakt stattfindet, untersucht.

3.1 Allgemeiner Lösungsansatz

Zu Beginn müssen die Kontaktart (quasistatisch oder transient) und die beteiligten Kollisionspartner, Körperregion des Menschen und Robotergelenk, festgestellt werden. Diese Daten lassen sich visuell aus der Software ermitteln. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, werden die Kollisionspartner rot eingefärbt. Weiteres lässt sich aus der Simulation der Zeitpunkt der aufgetretenen Kollision, t feststellen. Davon ausgehend kann die Geschwindigkeit, $v(t)$, des betroffenen Robotergelenks zum Zeitpunkt t aus dem Geschwindigkeitsverlauf des Roboters abgelesen werden.

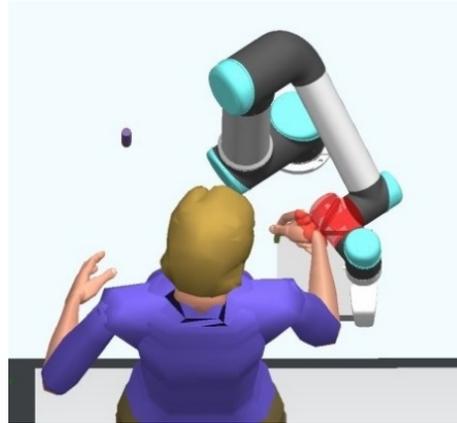


Abbildung 2: Kollision einer MRK in Tecnomatix Process Simulate (in Rot hervorgehobener Bereich)

Anhand der Information der betroffenen Körperregion, können aus Anhang A der ISO/TS 15066 weitere Daten abgelesen werden, wie effektive Federkonstante k und effektive Masse m_H . Außerdem können für den untersuchten Kollisionsfall, mittels der Information über die Kontaktart, die biomechanischen Grenzwerte, maximal zulässiger Kontaktdruck p_{max} und maximal zulässige Kontaktkraft F_{max} aus der technischen Spezifikation entnommen werden.

Darüber hinaus werden auch die Masse der beweglichen Teile des Roboters M und dessen Nutzlast m_L , Massen von Werkzeug, Greifer, m_G und Werkstück m_W für die Berechnung benötigt. Diese Daten sind aktuell nicht in der Software hinterlegt und müssen für den jeweiligen Roboter inklusive Last separat herangezogen werden.

Sind all diese Daten vorhanden, kann im Falle eines transienten Kontaktes die Kontaktkraft anhand folgender Formel für die übertragene Energie E , aus dem Anhang A der ISO/TS 15066 berechnet werden:

$$E = \frac{F^2}{2k} = \frac{1}{2} \mu v_{rel}^2 \quad (1)$$

Durch Umformung von (1) ergibt sich für die Kontaktkraft F :

$$F = v_{rel} \sqrt{\mu k} \quad (2)$$

Wobei v_{rel} die relative Geschwindigkeit zwischen Roboter und Körperregion, also $v(t)$, und μ die reduzierten Massen darstellen. Nach Anhang A der ISO/TS 15066 ist μ folgendermaßen definiert:

$$\mu = \left(\frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1} \quad (3)$$

Wobei m_R die effektive Masse des Roboters darstellt, die sich nach Anhang A der ISO/TS 15066 wie folgt ermitteln lässt:

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L \quad (4)$$

Der Kontaktdruck p kann anschließend folgendermaßen berechnet werden:

$$p = \frac{F}{A} \quad (5)$$

A steht für die Kontaktfläche zwischen den beiden Kollisionspartnern, die im Rahmen dieses Papers vereinfacht als quadratische Fläche gesehen wird, deren Größe durch Abschätzung ermittelt wird. Für eine aussagekräftigere Lösung soll anschließend überprüft werden, ob die angenommene Fläche größer oder gleich der minimal zulässigen Kontaktfläche A_{\min} ist, die sich folgendermaßen berechnen lässt:

$$A_{\min} = \frac{F}{p_{\max}} \quad (6)$$

Zur Überprüfung der Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte müssen folgenden Ungleichungen verfüllt sein:

$$F \leq F_{\max} \text{ und } p \leq p_{\max} \quad (7)$$

Zusammenfassend sind alle benötigten Daten und Vorgangsschritte für das vorliegende Konzept in Abbildung 3 grafisch dargestellt.

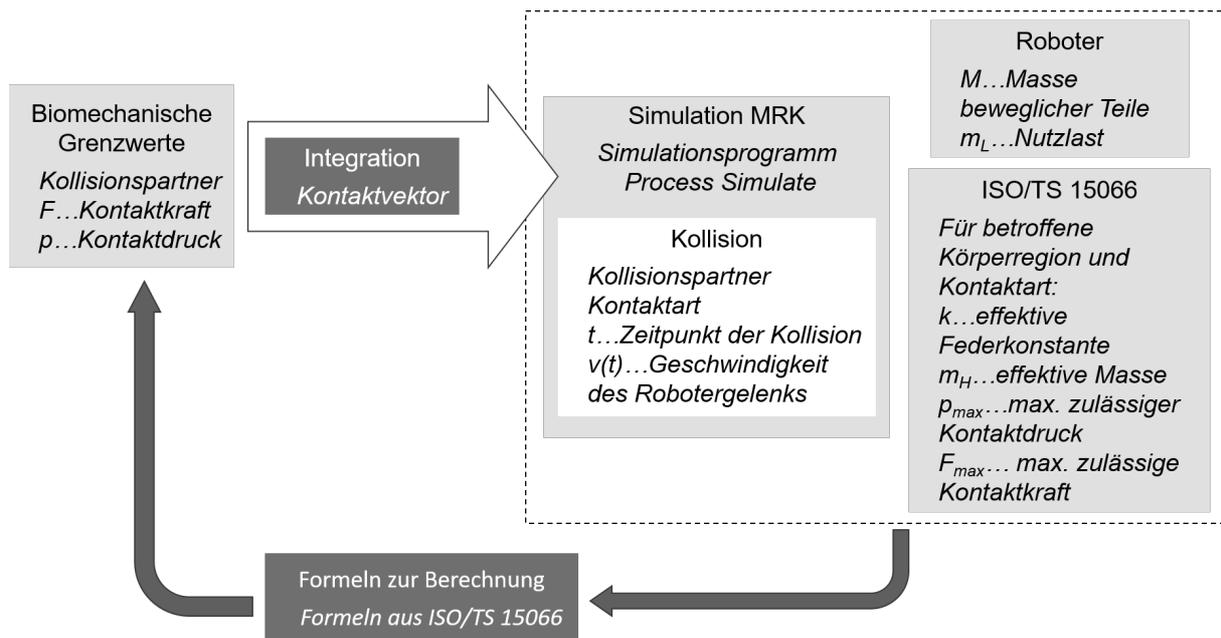


Abbildung 3: Konzeptbild allgemeiner Lösungsansatz

3.2 Benötigte Schritte für eine automatisierte Berechnung

Ausgehend vom allgemeinen Lösungsansatz, können im Hinblick auf eine automatisierte Berechnung jene Daten, beziehungsweise Berechnungsalgorithmen, die in die Simulation zu integrieren sind, abgeleitet werden. Am beschriebenen Beispiel wurde für die verwendete Prozesssimulationssoftware folgendes festgestellt:

Für das Menschmodell ist es notwendig für alle in der ISO/TS 15066 definierten expliziten Körperregionen die Werte für k und m_H zu hinterlegen. Darüber hinaus sind

die biomechanischen Grenzwerte F_{\max} und p_{\max} für einen transienten und quasistatischen Kontakt für jede Körperregion zu integrieren. Auch die Roboter Massen M und m_L sind in die Software zu integrieren.

Nachdem die aktuelle Software erkennt, welche Körperregionen und wie viele Kollisionspartner an einer Kollision beteiligt sind, sollen daraus zum einen die entsprechenden Werte für k und m_H abgerufen werden. Zum anderen ist es notwendig einen Algorithmus zu hinterlegen, der aus der Anzahl der Kontaktpartner (KP) eine Aussage über die Kontaktart treffen kann: Transienter Kontakt bei $KP = 1$ und quasistatischer Kontakt bei $KP > 1$. Für die jeweilige Kontaktart kann dann auf die entsprechenden Werte für p_{\max} und F_{\max} zugegriffen werden.

Außerdem sind die Formeln (2) bis (4) im Programm zu hinterlegen, um durch Abrufung der benötigten Daten die Kontaktkraft zu berechnen. Diese ist anschließend auf Einhaltung der maximal zulässigen biomechanischen Kraft zu überprüfen.

3.3 Lösung anhand eines Beispiels

Tabelle 1 stellt die Daten für die Simulation in Abbildung 2 dar.

Tabelle 1: Daten aus der Simulation

Art des Kontaktes	Transient	
Kollisionspartner	rechter Handrücken (Menschmodell) WRIST 1 (Roboter)	
Zeitpunkt der Kollision	t	8,10 s
Geschwindigkeit	$v(t) = v_{rel}$	18,86 mm/s

Tabelle 2 stellt die Werte, die für den rechten Handrücken und einen transienten Kontakt aus der ISO/TS 15066 entnommen wurden, und die Massen des Roboters da.

Tabelle 2: Werte aus der ISO/TS 15066 und Daten des Roboters

effektive Federkonstante k	k	75 N/mm
effektive Masse	m_H	0,6 kg
maximal zulässiger Druck	p_{\max}	400 N/cm ²
maximal zulässige Kraft	F_{\max}	280 N
Masse der beweglichen Teile	M	18,4 kg
Nutzlast	m_L	0,73 kg

Für die Kontaktfläche am Handrücken wurde eine quadratische Form mit der Größe $A = 36 \text{ cm}^2$ angenommen. Anschließend konnten anhand der Formeln (2) – (6) folgende Werte berechnet werden, wie in Tabelle 3 dargestellt werden.

Tabelle 3: Werte für Kontaktkraft und -druck für Simulation Abbildung 2

Kontaktkraft	F	3,885 N
Kontaktdruck	p	0,108 N/cm ²
minimal zulässige Fläche	A_{\min}	0,971 mm ²

Die Werte für F und p liegen somit deutlich unter den zulässigen Grenzwerten, wodurch die Ungleichung aus (7) erfüllt ist. Der angenommene Querschnitt liegt weit

über dem minimal zulässigen Wert. Somit sind die biomechanischen Grenzwerte eingehalten, sodass für diesen statischen Fall die Kollision schmerzfrei abläuft.

4. Diskussion

Anhand des vorgestellten Konzepts konnten biomechanische Grenzwerte für eine Kollision in einer Prozesssimulationssoftware ermittelt und ein Ansatz für eine automatisierte Berechnung geschaffen werden. Analog dazu kann diese Vorgangsweise auch für weitere Simulationsprogramme, wie ema imk, verwendet werden.

Dieser Ansatz ist allerdings auf einen transienten Kontakt limitiert, für einen quasi-statischen müssen aufgrund anderer kinematischer Bedingungen die Formeln für die Berechnung geändert werden. Außerdem ist das Konzept auf eine Kollision, die an einem Robotergetriebe stattfindet, limitiert. Für andere Kontakte, z.B. zwischen Körperregion und Werkstück, fehlt die Aussage über die Geschwindigkeit. Weiteres wurde die Größe der Kontaktfläche nur abgeschätzt. Bei Einhaltung der minimal tolerierbaren Fläche ist dieser Ansatz jedoch aussagekräftig. Schließlich ist dieses Konzept nur auf einen statischen Kollisionsfall anwendbar, interessant wären jedoch Berechnung und Integration des Kraftvektors für eine Vielzahl von Fällen inklusive Risikoabschätzung.

Im Rahmen weiterführender Arbeiten soll diese Konzept ausgeweitet werden. Außerdem wird in weiterer Folge das simulierte Beispielszenario als reales Experiment aufgebaut, Kontaktkraft und –druck werden mit einem biomechanischen Messgerät gemessen und mit den Werten der Berechnung verglichen.

5. Literatur

- W. Bauer, M. Bender, M. Braun, P. Rally, O. Scholtz (2016) - Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach EINFACH anfangen – Fraunhofer- Institut Für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
- M. Hofbauer, M. Rathmair (2019) Physische Sicherheit in der Mensch-Roboter Kollaboration - Elektrotechnik & Informationstechnik (2019) 136/7: 301–306.
- ISO/TS 15066:2016- Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter - DIN-Normenausschuss Maschinenbau (2016).
- TÜV Austria, Fraunhofer Austria Research GmbH, JOANNEUM RESEARCH (2017) Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration Risikobeurteilung und –minimierung – WhitePaper zweite Ausgabe
- F. Vincentini (2019) Terminology in safety of collaborative robotics - Robotics and Computer Integrated Manufacturing 63 (2020) 101921.

Danksagung: Ein besonderer Dank gilt den ExpertInnen von TÜV Austria für die Unterstützung im Rahmen des SafeSecLab (Research Lab for Safety and Security in Industry), in dem die Ergebnisse dieses Papers entstanden sind. Darüber hinaus wird die Forschung durch die BMK-Stiftungsprofessur HCCPPAS (Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems) ermöglicht.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Arbeit HUMAINE gestalten

67. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie (WiPs)
Ruhr-Universität Bochum

Institut für Arbeitswissenschaft (IAW)
Ruhr-Universität Bochum

3. - 5. März 2021

GfA-Press

Bericht zum 67. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 3. - 5. März 2021

**Lehrstuhl Wirtschaftspsychologie, Ruhr-Universität Bochum
Institut für Arbeitswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum**

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.
Dortmund: GfA-Press, 2021
ISBN 978-3-936804-29-4

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet:

- den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen,
- den Kongressband oder Teile daraus in Print- und/oder Nonprint-Medien (Webseiten, Blog, Social Media) zu verbreiten.

Die Verantwortung für die Inhalte der Beiträge tragen alleine die jeweiligen Verfasser; die GfA haftet nicht für die weitere Verwendung der darin enthaltenen Angaben.

Screen design und Umsetzung

© 2021 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de