Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436–4980–2024–03–54

Automatisierung rund um die funktionale Sicherheit

CARA: Mensch-Roboter-Kollaboration leichter umsetzen

M. El-Shamouty, M. Sompura, T. Jacobs

ZUSAMMENFASSUNG Das Engineering-Tool CARA (Computer-Aided Risk Assessment) des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA erleichtert die Einführung von Anwendungen mit Mensch-Roboter-Kollaboration in der Industrie, indem es die Risikobeurteilung vereinfacht und teilweise automatisiert. Laut Entwicklungspartner DENSO Corporation konnte der technische Aufwand für die Risikoanalyse und Risikominderung durch CARA um mehr als 55 % reduziert werden.

STICHWÖRTER

Automatisierung, Industrieroboter, Sicherheit

CARA: Making human-robot collaboration easier to implement – Automation for functional safety

ABSTRACT The engineering tool CARA (Computer-Aided Risk Assessment) from the Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA aims to ease the implementation of applications with human-robot collaboration in industry by simplifying and partially automating the risk assessment process. The development partner DENSO Corporation reported that CARA allows for a more than 55 % reduction in engineering effort for risk assessment and risk reduction.

1 Einleitung

Die Komplexität bei der manuellen Durchführung der Risikobeurteilung sind ein Hauptgrund dafür, dass Anwendungen mit Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) langsamer als gedacht in Produktionsumgebungen ankommen. In einer kollaborativen Umgebung birgt die Interaktion zwischen Mensch und Roboter zahlreiche potenzielle Gefährdungen, welche es zu bewerten und zu minimieren gilt. Diese Risikobeurteilung macht es schwer, tatsächlich modulare und rekonfigurierbare cyber-physische Systeme zu haben, wie sie im Industrie-4.0-Kontext vorgesehen sind.

Ein Grund ist, dass die Risikobeurteilung größtenteils manuell durchgeführt wird und ausschließlich an Sicherheitsfachleute und deren Wissen geknüpft ist. Dies bedeutet einerseits mehr technischen Aufwand, andererseits mangelt es schon in der Entwicklungsphase eines MRK-Systems an Transparenz. Das zeigt sich insbesondere, wenn es um die wichtigsten Leistungsindikatoren (KPIs) wie Kosten, Zykluszeit und Nutzungsdauer geht, also die Einschätzung der wirtschaftlichen Machbarkeit der Anwendung, noch ehe diese konkret eingeführt wird. Doppelt ungünstig wird es, wenn nach der Inbetriebnahme Änderungen nötig werden, um die KPIs und die Sicherheitsanforderungen zu erfüllen.

Teile der Risikobeurteilung zu automatisieren, ist eine Lösung, um den Prozess weiter zu standardisieren und die Transparenz bei der Machbarkeitsprüfung zu erhöhen bevor die Anwendung eingeführt wird, und diese Einführung zu beschleunigen sowie spätere Änderungen zu vermeiden [1].

2 Herausforderungen der manuellen Risikobeurteilung und Forschungsstand

In der EU schreibt die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG die Risikobeurteilung vor, um eine Roboteranwendung in einer industriellen Umgebung legal einzusetzen und zu betreiben. Harmonisierte Sicherheitsnormen unterstützen technisch bei der Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen. ISO 12100 beschreibt die Risikobeurteilung als iterativen Prozess mit mehreren Schritten. Dazu gehören die Identifizierung von Gefährdungen unter Berücksichtigung der Grenzen der Maschine, die Quantifizierung von Risiken in einer Roboteranwendung und die Reduzierung von Risiken durch Sicherheitsmaßnahmen.

Aktuell führen Sicherheitsexperten die Risikobeurteilung manuell auf Papier oder digital anhand von Checklisten durch [2]. Dieser Ansatz hat folgende Nachteile:

1. Die Bewertung ist sehr anwendungsspezifisch, einschließlich etwa Robotertyp, Layoutkonfiguration, gehandhabte Materialien, durchgeführte Fertigungsprozesse. Dies erfordert eine gründliche und lange Untersuchung durch Fachpersonal.
2. Sicherheitsexperten betonen die Maßnahmen zur Risikominderung naturgemäß stark, um mögliche Gefährdungen zu minimieren. Das kann aber gleichzeitig die Produktivität der MRK-Zelle (zu) stark beeinträchtigen.
3. Sicherheitsexperten können schwer zu erkennende Gefährdungen, wie das Umgreifen von Schutzeinrichtungen, übersehen [1].

Bisherige Arbeiten zum Thema schlagen eine regelbasierte [1, 3] und formale Überprüfung [4] der Konformität von MRK-Systemen mit den Normen vor. Solche Ansätze erfordern eine

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

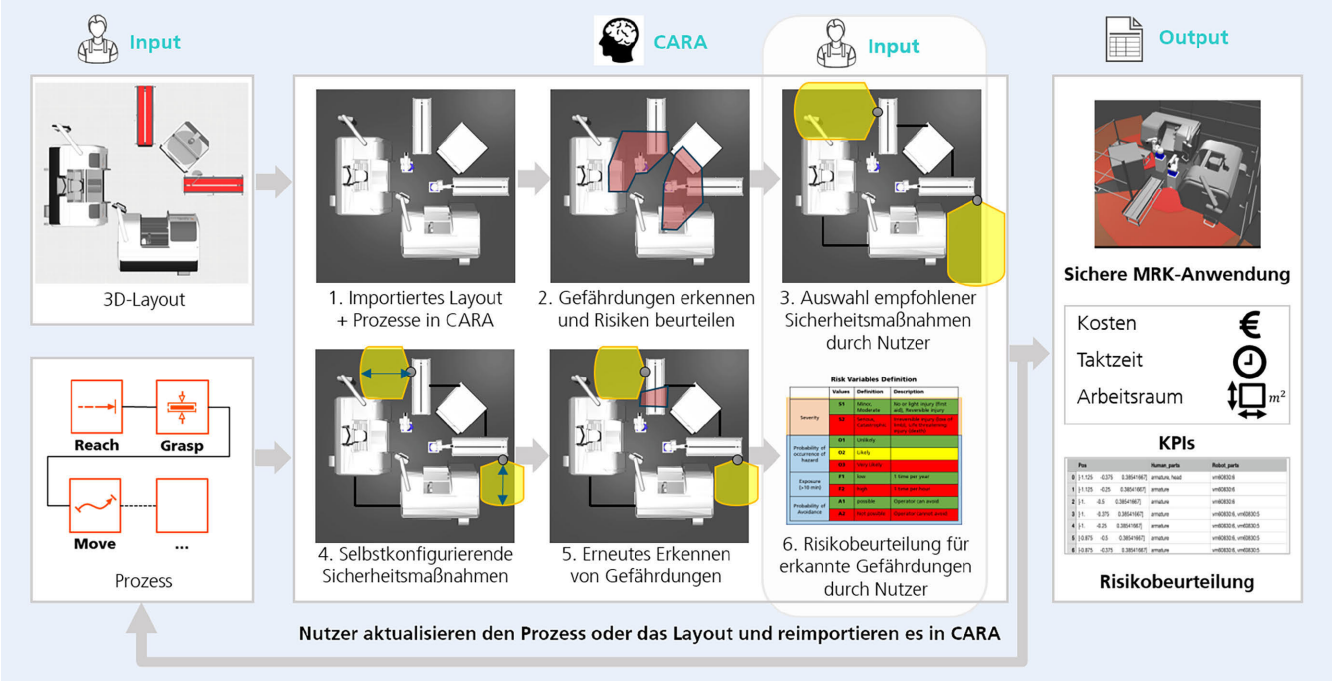

Bild 1. Ablauf der Risikobeurteilung mit CARA sowie Prozessschritte 1 bis 6, in denen CARA unterstützt. *Grafik: Fraunhofer IPA*

fortgeschrittene Systemmodellierung, lassen aber die Systemdynamik und Modelle des menschlichen Verhaltens (sofern überhaupt berücksichtigt) außer Acht. Beide sind jedoch für die Ermittlung von Gefährdungen, etwa durch transiente und quasistatische Kontakte, und für die Risikoeinschätzung bedeutsam.

Andere Methoden berücksichtigen die Systemdynamik, modellieren das menschliche Verhalten anhand grundlegender Bewegungen und verwenden stochastische Suchalgorithmen, um Gefährdungen zu erkennen [5, 6].

3 Sechs Schritte mit CARA bis zur sicheren Roboteranwendung

Ziel von CARA ist es, einen ganzheitlichen Ansatz für die Bewertung mechanischer Gefährdungen zu bieten, um die Risikobeurteilung bereits in der Entwurfsphase sowohl für Sicherheitsexperten als auch für Nicht-Sicherheitsexperten transparenter zu machen. Dies erleichtert es, die Machbarkeit zu überprüfen und reduziert den technischen Aufwand in den verschiedenen Phasen von der Entwurfs- bis zur Implementierungsphase sicherer MRK-Anwendungen (**Bild 1**).

CARA erreicht dies durch

- die automatische Identifizierung mechanischer Gefährdungen, die von Robotern bei der Bewegung in ihrer Umgebung ausgehen,
- die Quantifizierung der physikalischen Werte von Kräften und Druck, die sich aus solchen Gefährdungen ergeben, auf Grundlage der ISO TS 15066 und darauf aufbauenden internen Kontaktmodellen
- und die Bereitstellung von Hinweisen, um Risiken mit zusätzlichen Maßnahmen minimieren zu können.

Schritt 1: Layout und Prozesse in CARA importieren

Der Input für die Verwendung von CARA ist das 3D-Layout (zum Beispiel URDF, CAD-Modelle) der Roboteranwendung und des -prozesses. Dieses kann aus Planungs- oder Simulationswerkzeugen, wie zum Beispiel „Visual Components“, exportiert werden. Dieser digitale Schatten dient als Grundlage für alle nachfolgenden Auswertungen, sodass die Risikobeurteilung auf der geplanten Einsatzumgebung basiert. So gewinnt CARA ein ganzheitliches Verständnis vom Arbeitsraum des Roboters und berechnet dementsprechend, wie dieser für den Menschen zugänglich ist. Derzeit benötigt CARA keine Modellierung des menschlichen Prozesses.

Schritt 2: Ermittlung der Gefährdungen und Bewertung der Risiken

CARA modelliert Gefährdungsbereiche als Schnittpunkt zwischen den für den Menschen zugänglichen und den prozessspezifischen, für den Roboter erreichbaren Bereichen, wobei die vom Roboter gehandhabten Objekte berücksichtigt werden. Das Tool schätzt die Erreichbarkeit für den Menschen automatisch mithilfe von heuristisch basierten Suchalgorithmen.

Für jede Gefahr liefert CARA Informationen über das Roboterteil, das die Gefahr verursacht, die betroffenen menschlichen Körperteile und die geschätzten Kontaktdetails bei Kollision oder Einklemmen wie Kräfte, Druck und Geschwindigkeit. Transiente Kräfte können in Anlehnung an die ISO TS 15066:2016 geschätzt werden. Für Klemmgefahren gibt es bisher keine Standardmethode, um die Kräfte abzuschätzen. Daher unterstützt das Tool die Integration von Kollisionsmodellen, die auf physikalischen Messungen auf Prüfständen basieren, um solche Kräfte abzuschätzen [7] (siehe Kapitel 5).

Für jede Gefährdung muss eingeschätzt werden, wie hoch das mögliche Risiko ist. Es ist wichtig, die erste Risikoeinschätzung ohne Schutzmaßnahmen durchzuführen, da die Höhe des Risikos bestimmt, welche Schutzmaßnahmen eingesetzt werden können und welcher Performance Level des Steuerungssystems erforderlich ist. In CARA kann der Benutzer aus den identifizierten Gefährdungen auswählen und die Risikobeurteilung für eine

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

Gefährdung durchführen. Dabei werden die Schwere des Schadens, die Häufigkeit der Exposition des Menschen gegenüber diesem Schaden und die Wahrscheinlichkeit, dass der Mensch den Schaden vermeiden kann, berücksichtigt. Um die Parameter einzuschätzen, bietet CARA folgende Möglichkeiten, bei denen teilweise über die Standards hinausgehende Ansätze zur Ermittlung von Kräften und Drücken verwendet werden:

- Um den Schweregrad zu bewerten, kann der Benutzer die geschätzten Kraft- und Druckinformationen zusammen mit dem verursachenden Roboterteil und den betroffenen menschlichen Körperteilen verwenden. CARA ermöglicht auch eine detaillierte Druckanalyse durchzuführen und berücksichtigt dabei die Kontaktrichtung, die Oberfläche des Roboterteils, das den Kontakt verursacht, und das betroffene Körperteil.
- Die Gefährdungsexposition des Menschen kann abgeschätzt werden, falls der menschliche Prozess modelliert und in CARA importiert wird. Dann hängt die Exposition vom Zeitanteil des Prozesses ab, in dem sich Personen in einem Gefahrenbereich befinden.
- Für die Ausweichwahrscheinlichkeit des Menschen bei transienten Gefährdungen ist die Information über die Robotergeschwindigkeit nutzbar. Bei einer niedrigen Geschwindigkeit, zum Beispiel weniger als 250 mm/s wie in der ISO 10218-1 genannt, kann diese Wahrscheinlichkeit hoch angesetzt werden.

Schritt 3: Benutzereingabe: Auswahl und Positionierung von Schutzeinrichtungen

Im Anschluss an den vorherigen Schritt visualisiert CARA die gefährlichen Bereiche und wie der Mensch auf diese Bereiche zugreift. Entsprechend kann der Benutzer manuell die empfohlenen Schutzeinrichtungen auswählen und positionieren, um den Zugang zu den visualisierten Gefahrenbereichen während des Roboterbetriebs zu reduzieren oder zu unterbinden. CARA unterstützt derzeit Zäune, Roboterfunktionen zur Kraft- und Leistungsbegrenzung (basierend auf den Definitionen in ISO TS 15066) sowie ausgewählte Systeme zur Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung. Bei der Kraft- und Leistungsbegrenzung hebt das Tool Gefährdungsbereiche hervor, in denen die Kontaktkraft die maximal zulässigen Kraftwerte überschreitet. CARA erlaubt dem Benutzer auch, den Druck an verschiedenen Kontaktpositionen auf jenem Roboterteil zu überprüfen, das die Gefahr verursacht. Sicherheitsfunktionen zur Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung stellen sicher, dass stets ein Schutzabstand eingehalten wird, um die Risiken zu minimieren. Das Tool unterstützt derzeit Laserscanner, Radarsensoren, Lichtvorhänge und Trittmatten.

Schritt 4: Automatische Konfiguration von Schutzeinrichtungen

Bei der Verwendung einer Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung werden Sicherheitsabstände empfohlen, die auf den Eigenschaften der geschätzten Gefährdungen, des Roboters und der ausgewählten Schutzeinrichtung beruhen (gemäß ISO 13854 und ISO 13855). Bei der Berechnung des Sicherheitsabstands werden Informationen, wie die Lage der Gefährdungen, die im ungünstigsten Fall erforderliche Zeit zum Anhalten des Roboters zum Zeitpunkt der Gefahr unter Berücksichtigung der gehandhabten Nutzlast und die Reaktionszeit der Schutzeinrichtung, berücksichtigt. Wie in ISO 13855 definiert, kann der Sicherheitsabstand S wie folgt berechnet werden:

$$S = K * T + C,$$

wobei K die menschliche Annäherungsgeschwindigkeit, T die zum Anhalten benötigte Gesamtzeit und C ein Entfernungsoffset auf der Grundlage der Anordnung und Detektionsfähigkeit der Sensoren ist.

Diese Berechnungen manuell durchzuführen, kann mühsam und zeitaufwendig sein, vor allem bei komplexen Roboteranwendungen. Deshalb berechnet CARA automatisch den Sicherheitsabstand und gibt ihn als Empfehlung weiter. Außerdem bietet das Tool die Möglichkeit, die Geschwindigkeit des Roboters auf der Basis eines benutzerdefinierten Sicherheitsabstands anzupassen oder eine Kraft- und Leistungsbegrenzung zu unterstützen.

Schritt 5: Erneutes Identifizieren von Gefährdungen

Nach dem Hinzufügen der erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen kann der Benutzer den Mechanismus zur Gefährdungsberechnung erneut ausführen und die verbleibenden Risiken entsprechend bewerten. Es können neue Gefährdungen auftreten, etwa wenn Zäune zu nahe an den Bereichen aufgestellt werden, die der Roboter erreichen kann, und somit die ISO 13854 nicht eingehalten wird. Zudem können ermittelte Gefährdungen bestehen bleiben, wenn die für Menschen zugänglichen Bereiche nicht vollständig abgedeckt sind, zum Beispiel durch für Laserscanner nicht einsehbare Bereiche oder durch falsch konfigurierte Schutzvorrichtungen.

Schritt 6: Benutzereingabe: Risikobeurteilung für identifizierte Gefährdungen und KPI-Optimierung

Für das neue Sicherheitskonzept müssen die Risiken abgeschätzt werden, welche mit den verbleibenden Gefährdungen verbunden sind. Sind die Risiken inakzeptabel, braucht es zusätzliche Maßnahmen und die oben genannten Schritte werden wiederholt. Wenn die Risiken akzeptabel sind, können die KPIs bewertet und mit anderen, vom Nutzer erstellten Sicherheitskonzepten verglichen werden. Anschließend kann der Benutzer eine Optimierung zwischen den Risiken und KPIs vornehmen und daraufhin das endgültige Sicherheitskonzept auswählen sowie die hinzugefügten Schutzmaßnahmen zurück in das ursprüngliche Fabrikplanungs- und Simulationswerkzeug exportieren. CARA exportiert auch eine Dokumentation der bewerteten Risiken und der Maßnahmen zur Risikominderung.

4 Anwendung von CARA für eine Felgenbaugruppe

Bild 2 Schritt 1 zeigt den Anwendungsfall der Montage von Kraftfahrzeugfelgen im Simulationswerkzeug Visual Components.

Die bedienende Person holt die Teile aus Kisten und legt sie auf den Arbeitstisch. Ein Roboter nimmt die Radfelge vom Förderband und legt sie auf den Arbeitstisch. Der Mensch nimmt kleinere Anpassungen vor und fügt dann die Schrauben hinzu. Ein zweiter Roboter führt den Befestigungsvorgang durch und der erste Roboter legt das montierte Rad wieder auf das Förderband.

Mit dem CARA-Import-Plugin werden das 3D-Modell und der Roboterprozess in CARA importiert. Nach dem Import kann der Benutzer des Tools den Mechanismus zur Gefährdungsberechnung ausführen, die Gefährdungen ohne Sicherheitsvorkehrungen visualisieren und eine erste Risikobeurteilung vorneh-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

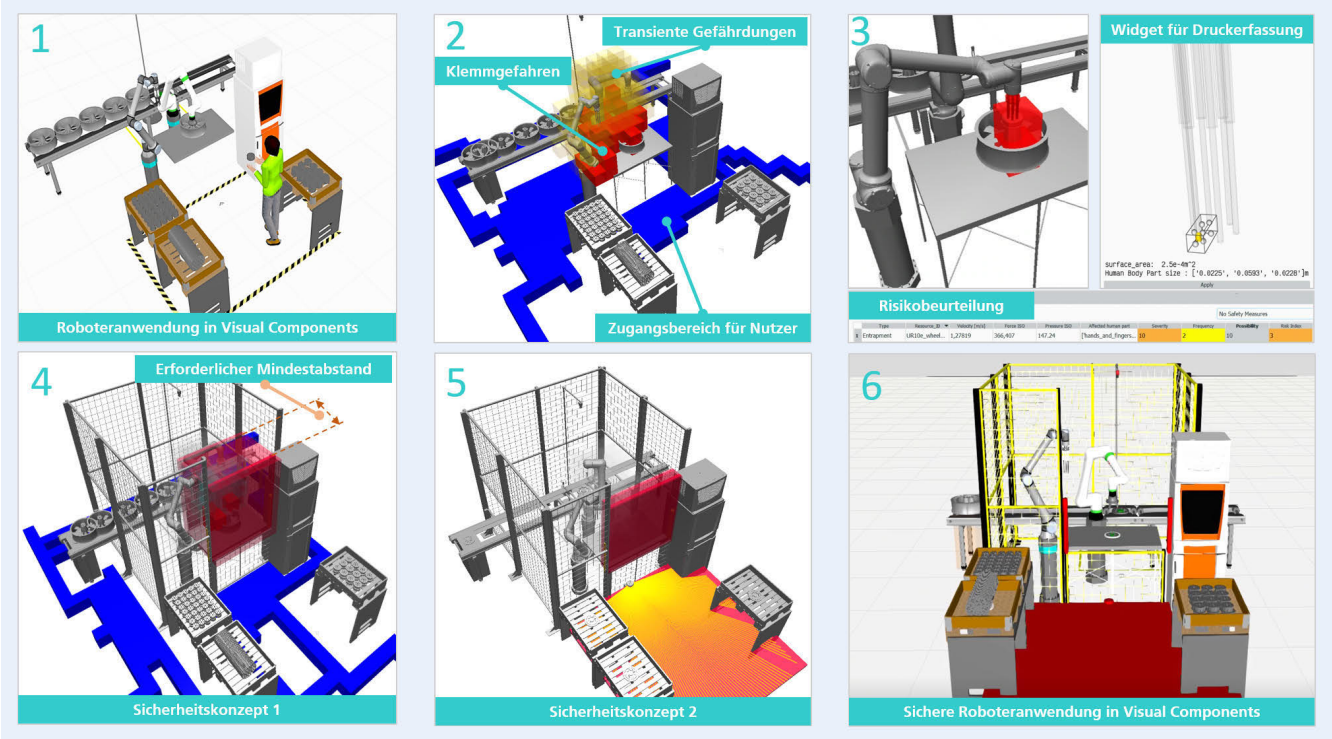

Bild 2. Workflow von CARA entsprechend den Nummern 1 bis 6. *Grafik: Fraunhofer IPA*

men, um zwischen signifikanten und nicht signifikanten Gefährdungen zu unterscheiden. Zum Beispiel hat das Schraubwerkzeug des zweiten Roboters eine spitze Geometrie, was zu hohen Druckwerten führen kann, die den Finger oder die Hand der bedienenden Person verletzen können.

Um die Risiken zu hoher Drücke bei Kollisionen oder in Klemmsituationen zu verringern, werden zunächst Zäune um die Zelle angebracht, die den unerwünschten Zugang von Menschen verhindern. Nun können Menschen die Zelle und den Arbeitstisch nur vom gewünschten Bereich aus erreichen. Zusätzlich kann ein Lichtvorhang hinzugefügt werden, der beide Roboter anhält, wenn der Mensch den überwachten Bereich betritt. Der Benutzer kann CARA verwenden, um den Sicherheitsabstand automatisch zu berechnen. Wenn der Benutzer den Lichtvorhang dennoch falsch platziert und den erforderlichen Mindestsicherheitsabstand nicht einhält, markiert CARA die entsprechenden Risiken als „nicht reduziert“, wie in Bild 2 Schritt 4, in Rot dargestellt.

Eine Lösung, um die verbleibenden Gefährdungen abzudecken, ist es, den Lichtvorhang so weit vom Gefährdungsbereich weg zu bewegen, dass der Mindestsicherheitsabstand eingehalten wird. Allerdings müsste sich der Mensch beim Einlegen der Teile dann strecken und beugen, was nicht ergonomisch ist. Eine andere Lösung wäre, den erforderlichen Sicherheitsabstand zu verringern, indem man die Roboter permanent mit reduzierter Geschwindigkeit arbeiten lässt. Das Beispiel zeigt stattdessen die vom Menschen entwickelte Lösung, einen Laserscanner hinzuzufügen, welcher die Roboter nur dann abbremst, wenn sich der Mensch nähert (Bild 2 Schritt 5).

Für die Auslegung des Laserscanners bietet CARA auch eine Visualisierung der Laserstrahlen, sodass der Benutzer nicht einsehbare Bereiche erkennen kann. Sobald das Sicherheitskonzept festgelegt ist, werden die Ergebnisse mithilfe des CARA-Plugins wieder in Visual Components importiert. CARA exportiert auch die Dokumentation der Risikobeurteilung und des Risikominderungskonzepts und stellt die Ergebnisse anderen CARA-Plugins zur Verfügung, wie im Folgenden beschrieben wird.

5 CARA als Plattform

Die Kernfunktionalität von CARA besteht darin, die Risikobeurteilung von Roboteranwendungen zu vereinfachen und zu beschleunigen. Weitere Erleichterungen für Integratoren lassen sich darüber hinaus erreichen, indem an die Datenbasis und die Simulation von CARA angeknüpft wird, um weitere Aspekte zu automatisieren. CARA nimmt so die Funktion einer Plattform ein, an die weitere Tools anknüpfen (**Bild 3**). Derzeit werden vier Plugins entwickelt.

Der „Contact Models Estimator“ verbindet CARA mit Kollisionsprüfständen, um ein Kollisionsmodell für verschiedene Roboter mit Endeffektoren in unterschiedlichen Anwendungsfällen nach der in [7] definierten Methodik zu approximieren. Die Kontaktmodelle können dann in CARA integriert und automatisch verwendet werden, um physikalische Werte in Anwendungsfällen mit ähnlichen Robotererreichbarkeitsszenarien zu quantifizieren. Dementsprechend werden Szenarien aufgezeigt, in denen die ISO-TS 15066 die Kraftwerte unter- oder überschätzt [8].

„RoboDashcam“ ist ein Plugin, das KPIs von Robotersystemen optimiert, die bereits im Einsatz sind. Dies wird erreicht, indem das Verhalten der Menschen in der Nähe der Roboteranwendung kontinuierlich datenschutzkonform überwacht wird. Darauf basierend empfiehlt RoboDashcam Änderungen an der Konfiguration von Schutzeinrichtungen (als Teil einer neuen Risikobeurteilung).

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Bild 3. CARA und die Integration von Plugins. *Foto: Fraunhofer IPA*

Der „Human Behavior Modeler“ unterstützt die Abschätzung von Risikovariablen, indem er menschliche Prozesse simuliert und nachteilige menschliche Verhaltensweisen modelliert.

Der „Sicherheits-SPS-Konfigurator“ unterstützt den Einsatz der Schutzeinrichtungen im realen System, indem er Spezifikationen oder Schaltpläne für Sicherheitssteuerungen bereitstellt.

6 Resümee

CARA beschleunigt die Risikobeurteilung von Roboteranwendungen, indem es automatisch Gefährdungen identifiziert und Anleitungen an die Hand gibt, welche Maßnahmen zur Risikominderung und zur Erfüllung der einschlägigen Normen infrage kommen. Mithilfe der Simulationsumgebung lassen sich Gefährdungen zudem intuitiv verstehen, was den Prozess vereinfacht und auch weniger erfahrenen Personen zugänglich macht.

Der Entwicklungspartner DENSO Corporation konnte durch den Vergleich der Auslegungsaufwände mehrerer Roboterzellen mit und ohne CARA verifizieren, dass der technische Aufwand für die Risikobewertung und -minderung mit CARA um mehr als 55 % reduziert werden konnte. Bisher assistiert CARA bei der Risikobeurteilung von stationären Industrierobotern. In Zukunft soll CARA erweitert werden, um auch mobile Robotermanipulatoren und Maschinentypen wie Förderbänder zu unterstützen. Verschiedene Plugins zur Optimierung des Layouts, der Platzierung von Schutzvorrichtungen und der Roboterprozesse sind ebenfalls für zukünftige Arbeiten vorgesehen.

Literatur

[1] Awad, R.; Fechter, M.; van Heerden, J.: Integrated risk assessment and safety consideration during design of HRC workplaces. 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Limassol, Cyprus, 2017, pp. 1–10. Internet: ieeexplore.ieee.org/document/8247648. Zugriff am 01.02.2024

[2] Ericson, C. A. (ed.): Hazard Analysis Techniques for System Safety. Hoboken, N.J.: Wiley 2005

[3] Sierhuis, M.; Clancey, W. J.; van Hoof, R J J.: Brahms: a multi-agent modelling environment for simulating work processes and practices. International Journal of Simulation and Process Modelling (IJSPM), 3 (2007) 3

[4] Askarpour, M.; Mandrioli, D.; Rossi, M. et al.: Safer HRC: Safety Analysis Through Formal vERification in Human-Robot Collaboration. In: Skavhaug, A; Guiochet, J.; Bitsch, F. (eds.): Computer Safety, Reliability, and Security. SAFECOMP 2016. Cham: Springer International Publishing 2016, pp. 283–295. Internet: re.public.polimi.it/bitstream/11311/1005782/2/1.Main.pdf. Zugriff am 01.02.2024

[5] Huck, T P.; Ledermann, C.; Klose, S. et al.: Development of a Simulation-based Risk Assessment Tool for HRC Applications. Proceedings of the 54th International Symposium on Robotics (ISR Europe), München, 2022

[6] Huck, T P.; Ledermann, C.; Kroger, T.: Testing Robot System Safety by Creating Hazardous Human Worker Behavior in Simulation. IEEE Robotics and automation letters 7 (2022) 2, pp. 770–777. Internet: arxiv.org/pdf/2111.14433. Zugriff am 01.02.2024

[7] Schlotzhauer, A.; Stotz, T.; Awad, R. et al: Virtual Validation of Power and Force Limiting Setups in Human-Robot-Collaboration. Procedia CIRP 107 (2022), pp. 845–850

[8] Kirschner, R J.; Mansfeld, N.; Abdolshah, S. et al.: ISO/TS 15066: How Different Interpretations Affect Risk Assessment, 2022. Internet: arxiv.org/abs/2203.02706. Zugriff am 01.02.2024

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

Mohamed El-Shamouty, M.Sc.
Foto: Fraunhofer IPA

Mrunal Sompura, M.Sc.

Dr.-Ing. Theo Jacobs

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Sichere Roboteranwendungen und Cobots
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1660
mohamed.el-shamouty@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de/robotersysteme

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-03-60 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY