

# Interaktionsfähige intrinsisch sichere Roboter für vielseitige Zusammenarbeit mit dem Menschen

D. Surdilovic<sup>1</sup>, A. Bastidas-Cruz<sup>1</sup>, J. Radojicic<sup>1</sup>, P. Heyne<sup>1</sup>

## baua: Fokus

Kooperative Roboter, kurz KOBOTs, wie sie seit mehreren Jahren am Fraunhofer IPK entwickelt wurden, bilden menschliche Fähigkeiten nicht nach, sondern unterstützen sie optimal. Sie nehmen dem menschlichen Arbeiter körperlich anstrengende Tätigkeiten ab, überlassen ihm jedoch die volle Bewegungskontrolle. Das große Plus der KOBOTs ist ihr Synergieeffekt: sie verstärken die Leistung, Genauigkeit und Flexibilität von konventionellen Robotern und kombinieren sie mit der Geschicklichkeit, Intelligenz und Erfahrung des Menschen.

## Inhalt

1 Einführung .....	1
2 Kooperation vs. Kollaboration .....	3
3 Mensch-Roboter Kooperation .....	4
4 Mensch-Roboter Kollaboration .....	7
5 Mensch-Roboter Kooperation/Kollaboration .....	8
6 Zeit-Raum Mensch-Roboter Modelle .....	9
7 Fazit und Ausblick .....	11
Literatur .....	12

## 1 Einführung

Trotz bedeutenden technischen Fortschritten in der Robotik-Welt, existieren immer noch viele Aufgaben, die schwer zu automatisieren sind und ohne menschliche Unterstützung nicht optimal realisierbar wären. Zahlreiche Anwendungsbeispiele, zum Beispiel komplexe Montage- und Handhabungsvorgänge, für welche bisher noch keine ausreichenden technischen und wirtschaftlichen Konzepte für eine flexible Automatisierung geschaffen wurden, zeigen den dringenden Bedarf an neuen Konzepten und Lösungen.

Zum einen gibt es vollautomatisierte Lösungen mit konventionellen Industrie-Robotern, die hohe Investitionen erfordern und deren Anpassung an Produktvarianten zeit- und kostenintensiv ist. Kollaborative Roboter (synonym auch: Cobots, Koboter, Roboterassistenten) haben vor Kurzem Einzug in die Märkte Fertigung und Service gehalten. Die ersten praktischen An

<sup>1</sup>Fraunhofer IPK, Berlin.

Diese Veröffentlichung ist ein Beitrag zum 3. Workshop „Mensch-Roboter-Zusammenarbeit - Gestaltung sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeit“ am 29./30.03.2017 in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) in Dortmund. Die gesamte Workshop-Dokumentation finden Sie unter: [www.baua.de/dok/8733424](http://www.baua.de/dok/8733424)

wendungen zeigen deutlich die potenziellen Vorteile dieser neuen Technologie: Die heterogene Stärke von Mensch und Roboter wird kombiniert und optimal genutzt, um Anwendern bei mental und physisch schweren Arbeitsbelastungen zu helfen und die Arbeit humaner, ergonomisch sicherer sowie effizienter zu gestalten. Initial im Jahr 2013 als UR Roboter (Universal Robots) ohne Schutzzaun für die Automobilmontage entwickelt, wächst das Interesse für kollaborative Roboter zunehmend. Das Marktwachstum wird bis 2015 als exponentiell prognostiziert. Momentan sind etwa 20 tatsächlich kollaborative Robotermodelle auf dem Markt erhältlich. Fast alle sind leichte Roboter mit einer Nutzlast von 1 – 5 kg. In jüngster Zeit wurden auch die ersten Schwerlast-Roboter, beispielweise COMAU AURA (110 kg Traglast), entwickelt.

Zum anderen gibt es einige Lösungen mit passiven technischen Hilfsmitteln (Manipulatoren, Balanciers usw.), die die Flexibilität und Intelligenz des Menschen nutzen. Die Handhabungsmanipulatoren gleichen dabei das Gewicht der Nutzlast aus, aber nicht die Inertia (s.g. Inertia Management) bei der Beschleunigung/Abbremsen. Entwicklungsziel ist dabei die Menschen zu unterstützen, um die Ergonomie zu verbessern, damit körperliche und psychische Belastungen minimiert werden.

Die rapide Erforschung von neuen nachgiebigen Aktoren (Vanderborght et al., 2013), die die intrinsische Sicherheit des Menschen während der Interaktion gewährleisten, öffnet neue Möglichkeiten, innovative kollaborative Roboter zu entwickeln, die für die Interaktion mit Mensch und Umgebung spezialisiert sind.

Die wichtigsten Einsatzszenarien von neuen interaktiven Robotern, die auf einer weiteren Entwicklung dieser drei Gruppen (Abbildung 1) von Systemen (Industrieroboter, Handhabungsmanipulatoren und die neuen, von Anfang an für die Kollaboration mit dem Mensch konzipierten Systeme) basieren, um eine effiziente und sichere Zusammenarbeit mit Menschen zu ermöglichen, sowie die ersten Prototypen, die am Fraunhofer IPK entwickelt wurden, bzw. sich noch in der Entwurfsphase in zahlreichen Projekten befinden, werden kurz dargestellt und diskutiert.

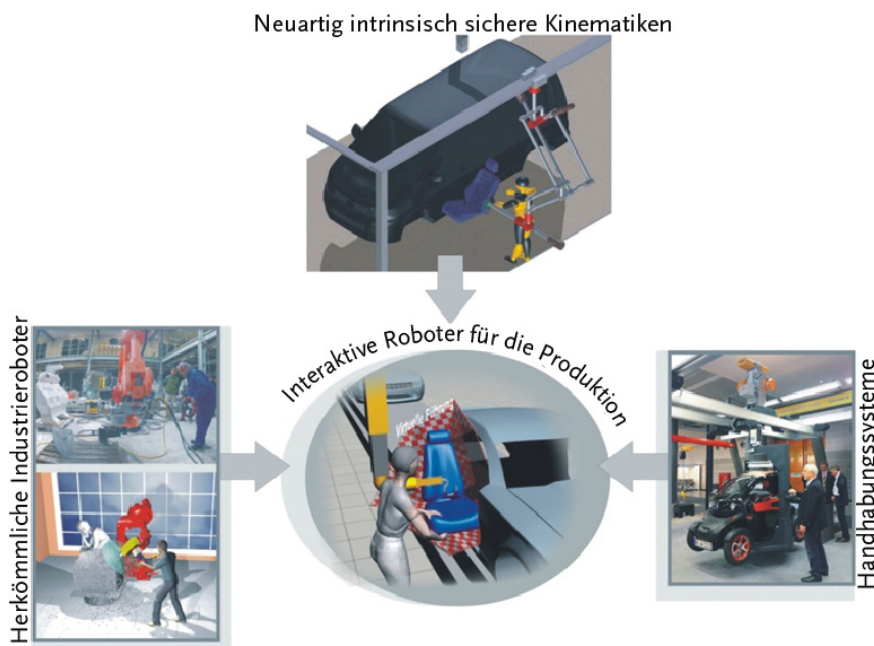


Abb. 1 Entwicklung der interaktiven Roboter für die Produktion aus drei Perspektiven.

## 2 Kooperation vs. Kollaboration

Es gibt eine vielversprechende Option, die Fähigkeiten von Menschen und Roboter-Systemen so zu kombinieren, dass spezifische Vorteile (Abbildung 2) von allen Beteiligten zum Vorschein kommen. Eine typische Aufgabe, die die Vorteile der Mensch-Roboter-Zusammenarbeit nutzt, ist die Montage. Montageaufgaben werden immer noch durch den Menschen aufgrund seiner Fertigkeiten und Kognition durchgeführt und können derzeit nur schwer allein durch einen Roboter automatisiert werden (Dumora et al., 2012). In vielen kollaborativen Anwendungsszenarien wurde Robotern eine untergeordnete Rolle zugeordnet, während der Mensch meistens als Aufseher und/oder Kontrollautorität erscheint. Bei der Arbeitsverteilung übernimmt der Roboter relativ einfache und wiederholbare Bewegungen („pick-and-place“), während der Mensch die geschickten Tätigkeiten mit Hilfe seiner Erfahrung und Intelligenz erledigt. Diese Tätigkeiten sind mit harten räumlichen und zeitlichen Einschränkungen vordefiniert.

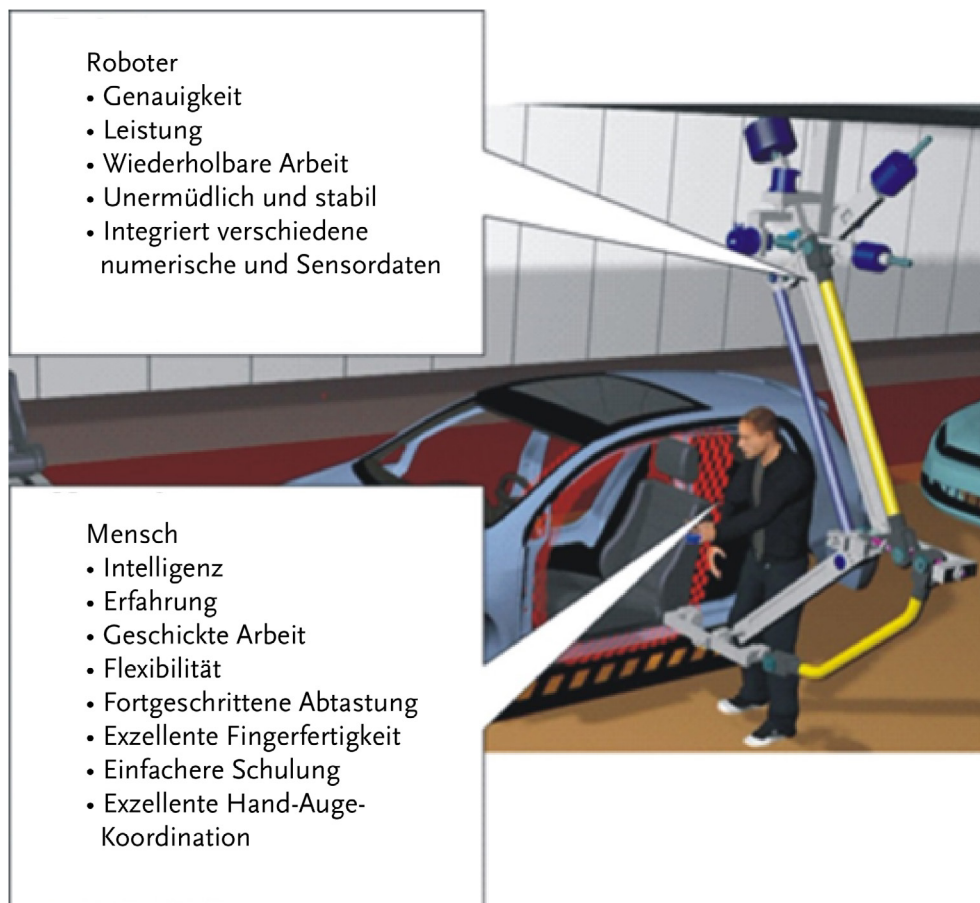


Abb. 2 Ergänzende Vorteile von Menschen und Roboter.

Die Mensch-Roboter-Interaktion (Human-Robot-Interaction **HRI**) umfasst zahlreiche Anordnungen von Mensch-Roboter-Verhältnissen, Größen von HRI-Modellen und Kommunikationsmethoden in verschiedenen Anwendungsbereichen. Die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter beinhaltet oft direkten Kontakt, bzw. physische Interaktion (**pHRI**), was aus steuerungstechnischer Sicht eine Herausforderung ist.

Dabei sind zwei grundsätzliche Formen zu unterscheiden: *Kooperation* und *Kollaboration*. Diese beiden Bezeichnungen werden häufig als Synonym verwendet, um alle Mensch-Roboter-Beziehungen oder allgemeine Aspekte der Teamarbeit zu beschreiben. Zu beachten ist, dass die Begriffe Kooperation und Kollaboration im Zusammenhang mit der Mensch-Roboter-Arbeit grundsätzlich verschiedene Dinge bedeuten.

### 3 Mensch-Roboter Kooperation

Bei der „Kooperation“ verfolgen Mensch und Roboter ihre eigenen Teilaufgaben und kombinieren ihre jeweilige Geschicklichkeit, um die Aufgabe zu erfüllen. Dabei entstehen aus der Kooperation durch Synergien auch neue Arbeitsfähigkeiten, welche die Teilnehmer vorher nicht hatten. Ein typisches Beispiel stellen die am Fraunhofer IPK entwickelten kraftverstärkenden Koter dar (Surdilovic et al., 2010), die als Erweiterung von Handhabungssystemen in Richtung leichterer kostengünstiger Portalroboter entstanden sind, wobei die Fähigkeit der automatischen Durchführung einiger Operationen (zum Beispiel Teile-Bereitstellung) weiterhin bestehen bleibt (Abbildung 3).

Im „IP-PISA“-Projekt (Krüger et al., 2010) wurde ein flexibler kraftverstärkender Roboter für die teilautomatisierte Montage von Windschutz- und Heckscheiben für die Automobilindustrie entwickelt (Abbildung 3). Die eigentliche Montage erfolgt in Kooperation zweier Werker zusammen mit dem Roboter. Die am Portal einstellbaren Reibantriebe steuern dabei die maximal einsetzbaren Kräfte.



**Abb. 3** PISA-Koboter-Demonstrator am Fraunhofer IPK für die halbautomatische Windschutzscheibenmontage (VW-Touran): Walk-Through. Programmierung (oben links), automatisierte Windschutzscheiben-Aufnahme (oben rechts) und die Positionierung in der Nähe der beweglichen Karosserie (unten links) sowie abschließende interaktive Mensch-Koboter-Mensch-Montage (unten rechts).

Die komplexeren Montage-Operationen erfolgen durch physische Kooperation nach dem „Admittanz-Prinzip“ (Vukobratovic et al., 2009): Die Bewegungskommandos oder Kräfte, mit denen ein Mensch auf das gemeinsame Werkstück einwirkt, werden hierbei mit einem Kraft/Momenten-Sensor erfasst und in eine entsprechende Roboterbewegung umgesetzt. Dabei wird das Roboterverhalten so transparent geregelt, dass der Mensch die virtuelle Masse-Dämpfer-Feder-Systemreaktion in allen Bewegungsfreiheitsgraden spürt. Die Parameter des virtuellen Systems lassen sich durch die Steuerung beliebig an die Aufgabe oder den Menschen anpassen.

Das BMBF-Projekt „KobotAERGO“ ([www.kobotaergo.de](http://www.kobotaergo.de)) stellt den Menschen in den Mittelpunkt der Forschung und fokussiert die Anpassungsfähigkeit der Technik an den Menschen. Um eine leichte Beweglichkeit zu realisieren, wird grundsätzlich die große Trägheit des Objekts reduziert (bis einige kg). Eine größere Dämpfung ist bei präziser Montage und Kontakten mit einer steifen Umgebung erforderlich. Eine nützliche Besonderheit ist die Möglichkeit, virtuelle passive und aktive Hindernisse durch die Steuerung zu erzeugen (sogenannte

virtuelle Wände und Führungen). Dies unterstützt und erleichtert die Führung des Menschen bei der Montage komplexer Teile (Abbildung 4, 5).

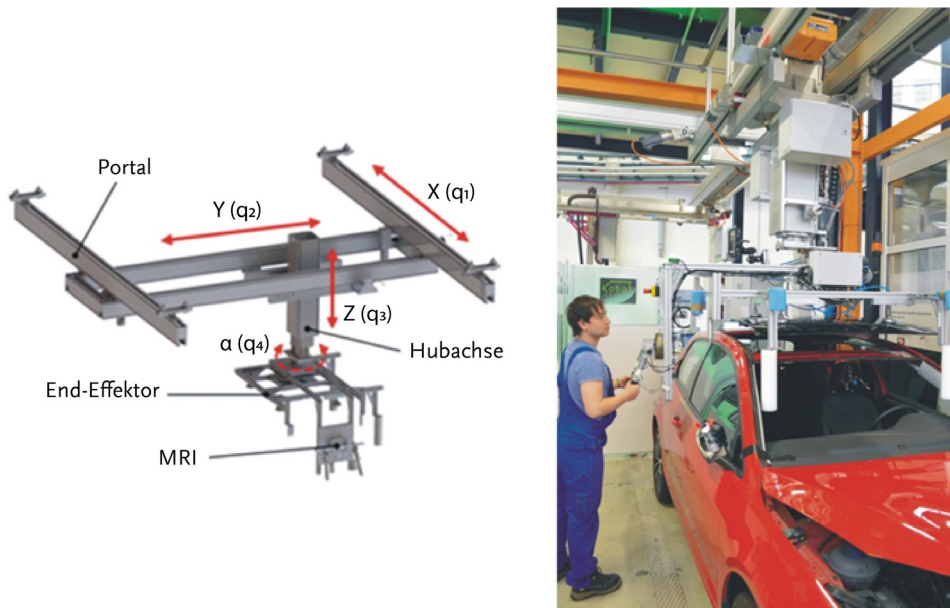
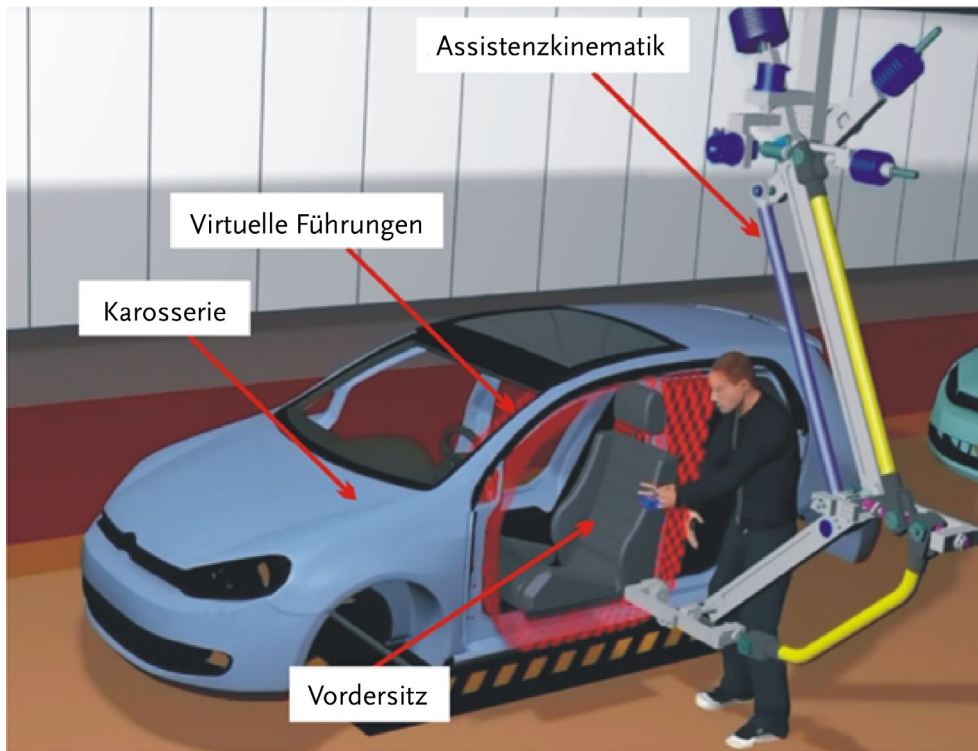


Abb. 4 KobotAERGO Aufbau (links) und Erprobung am IPK (rechts).



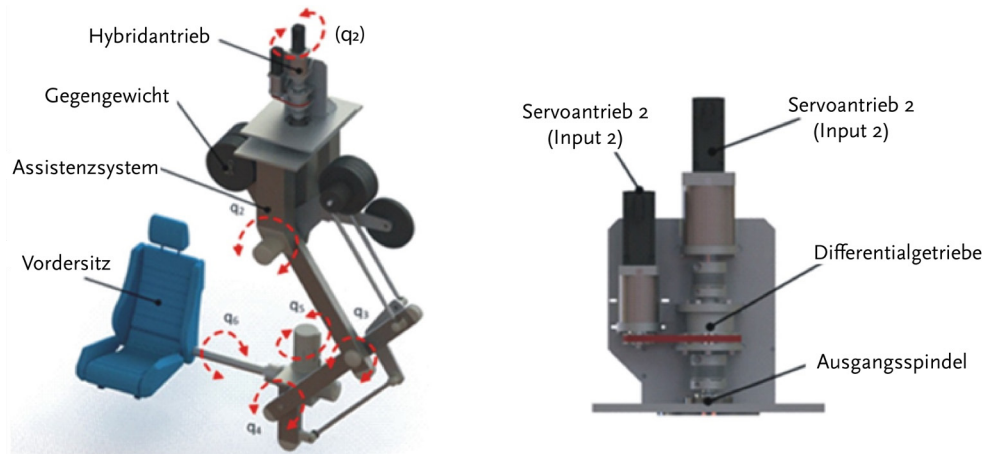
Abb. 5 Koter kann automatisch ein Panoramadach von einer Klebstation abholen (links), sich in vorderen Rahmen zentrieren (mit Hilfe von Kraft/Nachgiebigkeitsregelung) und kooperativ mit Mensch das Dach montieren (unterstützt durch eine virtuelle Führung in Form einer abgeschnittenen quadratischen Pyramide – rechts).

Um die Sicherheit weiter zu erhöhen, und die Zertifizierung einfacher und effizienter zu machen, wurde im vor Kurzem abgeschlossenen Fraunhofer-Leitprojekt E3 (Neugebauer, 2017) die schwere Hubachse durch neuartige leichte und ausbalancierte Kinematiken (Abbildung 6) mit intrinsisch sicheren hybriden Antrieben mit differentiellen Getrieben, die die übertragbare Leistung an den Mensch regeln und zusätzliche Bewegungen realisieren, ersetzt.



**Abb. 6** Virtuelle Führung und Redundanz des Koboters mit 8 Freiheitsgraden erleichtern die Sitzmontage durch vordere Türen.

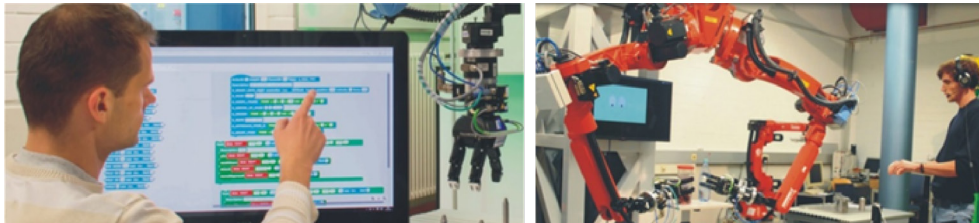
Für einen komplexeren Montageprozess, wie z.B. die Sitzmontage, die mehr als 3 Freiheitsgrade verlangt (auch Redundanz, um die Hindernisse im Arbeitsraum, z.B. Tür-Eingang Rand, zu vermeiden), wurde das Konzeptdesign einer neuen intrinsisch sicheren Kinematik entwickelt. Ein leichter und kostengünstiger Roboterarm wird verschiedene innovative Konzepte für die ergonomisch sichere physische Mensch-Roboter-Interaktion integrieren (Abbildung 7).



**Abb. 7** Intrinsisch sicherer dualer Hybridantrieb. Bei der Kollision mit dem Mensch verteilt das Differentialgetriebe die Störmomente stärker an den Servoantrieb 2, der begrenzte Momente realisieren kann, was zu einer Abweichung von Nominal-Bewegung, bzw. Geschwindigkeiten (wessen Regelung hauptsächlich Servoantrieb 1 übernimmt) führt.

Eine Besonderheit dieser Kinematik ist das menschengerechte und -angepasste Leichtbau-Design, bei dem vier Antriebe und Gegengewichte an der Portalkonstruktion angebracht sind. Die Kinematik ist des Weiteren durch sichere Achsen mit den intrinsisch sicheren Hybrid-

Antrieben (gleichzeitige Überwachung/Regelung der Geschwindigkeiten und Momenten) in relevanten Gelenken noch weiter für die Zusammenarbeit mit dem Menschen optimiert. Der E3-Demonstrator wurde für die Montage des Vordersitzes (24 kg) entwickelt (Abbildung 7).



**Abb. 8** Erweiterungen des i3-Frameworks (Fraunhofer IPK) um Scratch-Programmierung (links) und Instruieren durch Sprache und Gestik mit Leap Motion (rechts).

## 4 Mensch-Roboter Kollaboration

In einem „Kollaborationsszenario“ führen Mensch und Roboter synchron oder zeitlich getrennt eigene Teilaufgaben im gemeinsamen Arbeitsraum aus, um ein „gemeinsames Ziel“, zum Beispiel eine Montageaufgabe, zu erreichen. Konventionelle Industrie-Roboter ohne Schutzzaun und mit virtueller sowie dynamischer kartesischer Arbeits- und Bewegungsraumbegrenzung sind im Prinzip für solche Szenarios geeignet. Die zusätzlichen Sensoren sind jedoch erforderlich, um den Menschen im Kollaborationsarbeitsraum zu überwachen (Geschwindigkeit und Separation). Eine sichere manuelle Führung (Programmierung) verlangt neue Schnittstellen und sichere Roboterfunktionen, die zusätzliche Energie und Kräfte begrenzen (auf Basis der neuesten Sicherheitsstandards ISO-10218 und technischer Spezifikation TS15066, die maximale Kräfte, bzw. mechanische Energie an verschiedenen Körperteilen, und eine quantitative Gefahrenanalyse des physischen Kontakts definiert).

Diese Verfahren für konventionelle Roboter werden in jüngster Zeit in dem EU-Projekt „Robo-Partner“ ([www.robopartner.eu](http://www.robopartner.eu)) entwickelt. Ein besonderer Schwerpunkt liegt in der offenen Roboter-Steuerung und Echtzeit-Integration von Sensoren und Verfahren, beispielsweise in einer am Fraunhofer IPK entwickelten robusten Kraft- und Nachgiebigkeitsregelung (Surdilovic, 2007). Das Fraunhofer IPK setzt sich zusätzlich im Projekt für den Entwurf einer intuitiven interaktiven/instruktiven (i3) taskorientierten Roboterprogrammierung, die in MRI-Systemen eine besondere Rolle spielt, auseinander. Mithilfe einer neuen universalen C++ Roboter-Programmierungssprache (CURL++, publiziert vor Kurzem in ROS) werden neue Befehle (wie Approach, Attach, Insert und so weiter) einfach durch den Menschen über multimodale Schnittstellen (Sprache, Augmented Reality, Gestik etc.) an den Roboter übertragen (Abbildung 8).

Mit seinen neuen »Aura«-Robotern (Advanced Use Robotic Arm) stellte der italienische Roboterhersteller COMAU auf der AUTOMATICA 2016 in München eindrucksvoll unter Beweis, dass auch Industrieroboter mit großer Nutzlast gefahrlos mit dem Menschen interagieren können. Die neuen »Aura«-Roboter von COMAU sind mit einer speziellen Außenhülle versehen, die sie Berührungen von Personen und anderen Geräten fühlen lassen. Zudem nehmen sie mit Kamerasystemen und Laserscannern Bewegungen von Menschen in ihrem Umfeld wahr. Sie können ihre Bewegungsbahnen selbständig entsprechend anpassen oder vollständig vom Menschen geführt werden (Abbildung 9). Solche Technologien machen Schutzzäune überflüssig, menschliche Werker können unmittelbar mit großformatigen Assistenten zusammenarbeiten.



Abb. 9 Die neuen »Aura«-Roboter können Bearbeitungsaufgaben automatisch (links) oder in direkter physischer Interaktion mit dem Mensch ausführen (rechts).

Prinzipiell dieselbe interaktive Regelung (Kraft und Impedanz-Regelung) von IPK wurde sowohl im AURA System als auch in die Koboten, die auf den Handhabungssystemen basieren (Surdilovic, 2017) eingesetzt.

## 5 Mensch-Roboter Kooperation/Kollaboration

Die Kollaborations- und Kooperationsaspekte der Teamarbeit sind in einem Diagramm (Abbildung 10) verdeutlicht. Es ist erwähnenswert, dass gemischte HRI Fälle, die sowohl Kollaborations- und Kooperationsaspekte beinhalten, sowohl in der Industrie, als auch im Service-Bereich möglich sind.

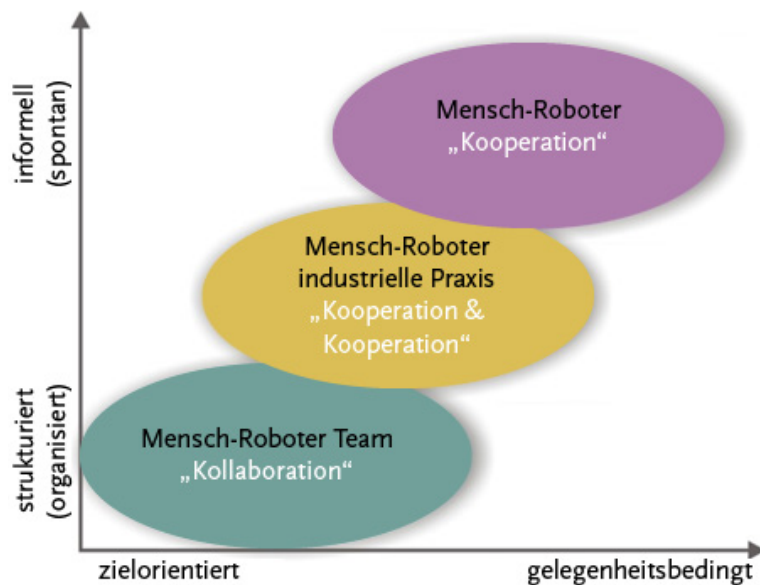


Abb. 10 Mensch-Roboter-Team Arbeitsmodelle.

Wie erwähnt, obwohl oft als Synonym benutzt, zwischen Mensch-Roboter Kooperation und Kollaboration gibt es deutliche Unterschiede im Hinblick auf verschiedene Eigenschaften die in Tabelle 1 zusammengefasst sind.



**Tab. 1** Kollaboration und Kooperation – Besonderheiten.

	HRI	
	Kollaboration	Kooperation
<b>EIGENSCHAFTEN</b>		
Gruppenarbeit	<b>kollektiv</b>	<b>konnektiv</b>
Verantwortung	individuelle	gemeinsame
Fähigkeit	individuelle	geteilte
Planung	Autorität / Priorität	selbstgeführt / selbsttragend
Beteiligung	„peer-to-peer“, verteiltes Netzwerk	spontan, selbstorganisierend
Priorität (Individuum / Gruppe)	Gruppe	
Entfernung	größer	kleiner, nah
Vorschriften / Schnittstellen	Regeln der Autorität / Quelle von Konflikten	spontan, dynamischer, natürlich
Gruppengröße	signifikant	nicht relevant
Ziele	gemeinsame / Zusammensetzung	individuelle / Dekomposition
Autorität	vertikale, hierarchisch (pyramidenartige)	horizontale
Gruppenwerte	Verknüpfte einzelne Werte	Entstehung neuer Arbeiten von Gruppenwerten

Die Anwendung in Abbildung 10 kann man auch als eine Mischung (Kombination) aus Kooperation und Kollaboration betrachten. Die manuelle Programmierungsphase stellt hauptsächlich eine Kooperation dar (links), während die automatische Ausführung der Polierenaufgabe, wobei der Mensch gleichzeitig andere Aufgabe ausführen kann, eine Kollaboration ist.

## 6 Zeit-Raum Mensch-Roboter Modelle

Eine grundlegende Klassifikation der HRI ist die Zeit/Raum-Taxonomie. Diese Taxonomie wurde ursprünglich für das Gebiet der s.g. „computer-supported-cooperative-work (CSCW)“ entwickelt, kann aber auch an die Thematik der Mensch-Roboter-Interaktion angepasst und prinzipiell übernommen werden. Dementsprechend geht es hierbei um eine Grundmatrize für Roboter-gestützte-kooperative-Arbeit („robot-supported-cooperative-work“ RSCW).

Die verbesserte Zweimal-zwei-Matrix in HRI (RSCW), die ursprünglich für CSCW in Johansen (1988) vorgeschlagen wurde, ist in Abbildung 11 dargestellt. Danach kann die HRI nach Zeit/Raum-Klassifizierung auf vier Arten eingeteilt werden:

- Dieselbe Zeit / derselbe Ort - Arbeitsplatz-Sharing-Roboter, die den gleichen Raum mit Menschen teilen (ohne Zäune). Eine Unterkategorie umfasst den körperlichen Kontakt (pHRI);
- Dieselbe Zeit / verschiedene Orte - synchronisierte entfernte Produktionslinien mit Menschen und Robotern;
- Verschiedene Zeiten / derselbe Ort - Time-Sharing-Roboter - Menschen und Roboter arbeiten am gleichen Ort zu verschiedenen Zeiten;
- Verschiedene Zeiten / verschiedene Orte - asynchrone Produktionslinien mit Menschen und Robotern.

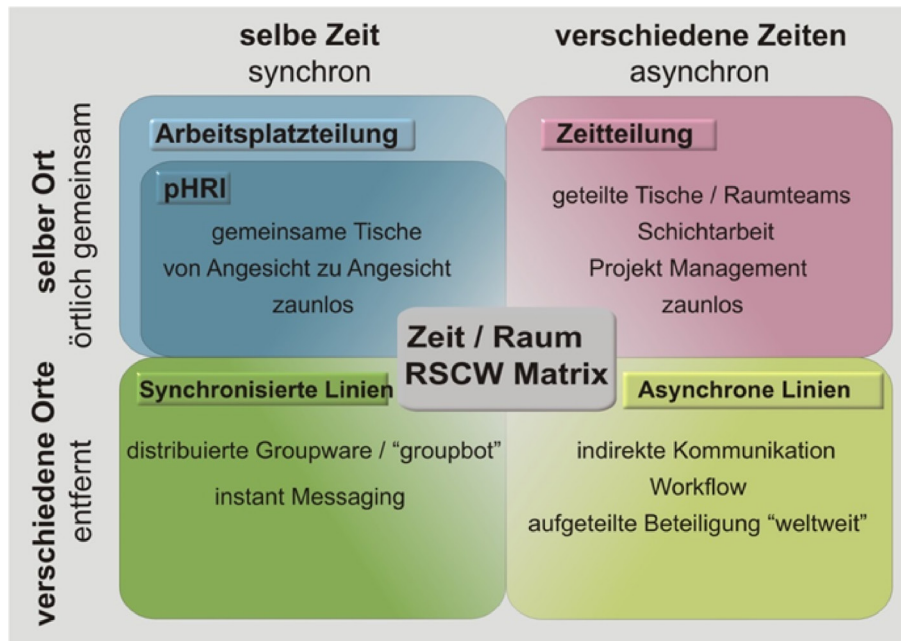


Abb. 11 Zeit/Raum Matrix für Roboter gestützte Kooperative Arbeit.

Die obige Matrix ist nützlich, um HRI-Systeme in der Industrie zu beschreiben. Arbeitsraum- und Time-Sharing-Roboter sind ein Novum in der Branche. Typisch für die neuen Anwendungen sind gemeinsame Arbeitsräume (zusammen oder an den gleichen Arbeitstischen, in gemeinsamen Zimmern usw.) sowie zaunlose Roboter, die beträchtliche Vorteile durch ihre einfache Installation und niedrigere Kosten bieten. Die Arbeitsbereichsteilung spielt sich entweder ohne physische Kontakte oder auf Basis von pHRI ab.

Die in Abbildung 12 dargestellten Arbeitsplatz-Sharing-Roboter-Szenarien wurden auch im EU FP6 IP-PISA-Projekt ([www.pisa.org](http://www.pisa.org)) behandelt. Für den Time-Sharing-Fall wurde ein neuer anthropomorpher Dual-Arm-Roboter entwickelt, der im gleichen Arbeitsbereich wie der Mensch (ohne wesentliche Anpassungen) arbeiten kann (Abbildung 13).

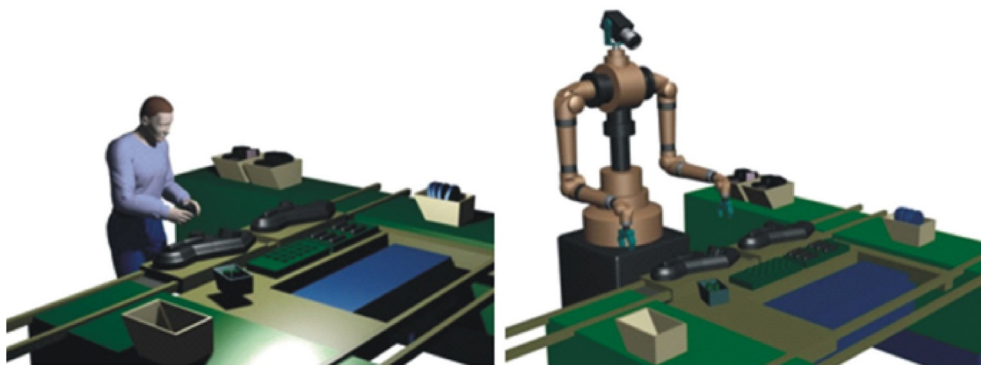
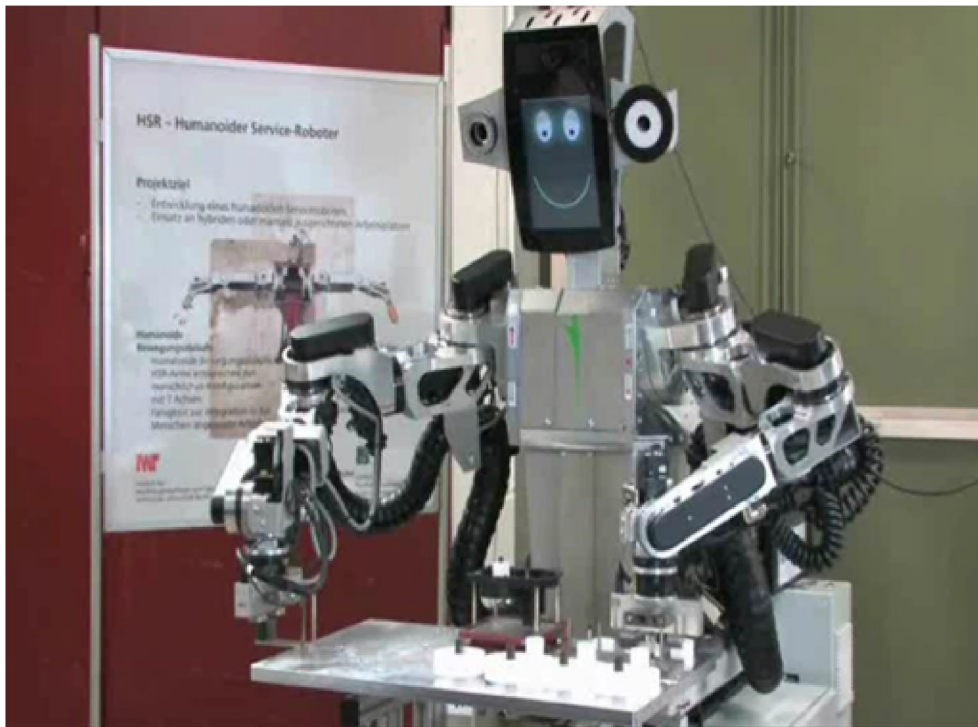


Abb. 12 Zeitteilung des Arbeitsraums von einem Mensch und einem anthropomorphen Dual-Arm-Roboter.



**Abb. 13** Workerbot I – Time-Sharing Robot für geschickte Montage mit dual-arm geregelter Kraft- und Nachgiebigkeit (Impedanz) Regelung.

## 7 Fazit und Ausblick

Kollaborative und kooperative Roboter bieten eindeutig neue technologische Lösungen und Funktionalitäten, die die Arbeit in den nächsten 10 Jahren revolutionieren und noch effizienter, flexibler und menschenfreundlicher machen werden (Elkmann, 2013). Aus neuesten Entwicklungen, die im Bericht dargestellt wurden, ist es gut nachvollziehbar, dass dieser Trend noch stärker fortgesetzt wird. Die Industrie und End-User haben letztendlich erst knapp 10 Jahre nach erster Erscheinung der neuen Sicherheitsstandards (ISO 101218 und RIA TS15066) die klaren Vorteile von MRI erkannt und akzeptiert. Neue Sicherheitslösungen wie z.B. künstliche Haut, Kraft- und Momentensensoren, sogar neue Antriebe (SEA) wurden akzeptiert und eingesetzt. Die intensive Erforschung von diesen Innovationen und erste Markteinführungen von neuen Produkten unterstützt diese Entwicklung. Obwohl kollaborative Systeme ursprünglich grundsätzlich auf kleinere Roboter begrenzt waren ([www.robotiq.com](http://www.robotiq.com)), wurden in jüngster Zeit erste größere Roboter (Traglast bis 110 kg) auf den Messen vorgeführt, die für viele Anwendungen dringend erforderlich sind, z.B. für Montageaufgaben. Zum Beispiel hat der Roboterhersteller COMAU angekündigt etwa 1000 neue AURA Robotersysteme mit einer Traglast von etwa 100-200 kg schon im Jahr 2017 auf den Markt zu bringen.

Die bisherigen Entwicklungen am IPK bieten eine solide technologische Basis für die Realisierung verschiedener Interaktionsszenarien in der Industrie. Eine multiseitige Entwicklung, die sowohl eine Anpassung von existierenden Systemen (Industrieroboter und Handhabungs-Manipulatoren), als auch Entwurf von innovativen Robotern für Kooperation und Kollaboration umfasst, bietet deutliche Vorteile für einen breiteren Einsatz in der Industrie und optimale Anpassung an spezifische Aufgaben. Ein besseres Verständnis von Mensch-Roboter Zusammenarbeit Modellen, hilft dabei die besten Lösungen zu finden und zu implementieren.

Viele derzeit laufende Forschungsaktivitäten konzentrieren sich mehr auf die menschlichen Aspekte, wie Ergonomie, gegenseitiges Mensch-Roboter-Bewusstsein, Vertrauen zu inter-

aktiven Systemen, Akzeptanz, Training und so weiter, sowie auf die Entwicklung praktischer Metriken zur Bewertung der interaktiven Roboter-Systeme.

## Literatur

Dumora, J., Geffard, F., Bidard, C., Brouillet, T. & Fraise, P. (2012). „Experimental study on haptic communication of a human in a shared human-robot collaborative task“, Proc. IEEE/RSJ Int’l Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 5137–5144.

Elkmann, N. (2013). Mensch-Roboter-Interaktion und Assistenzrobotik: neue Entwicklungen am Fraunhofer IFF, Fachtagung Mensch-Roboter-Kooperation, Magdeburg.

Krüger J., Katschinski V., Surdilovic D. & Schreck G. (2010). Flexible assembly systems- through work-place sharing and time-sharing human-machine cooperation (PISA). Robotics (ISR), Fraunhofer IPK.

Negebauer R. (2017). Ressourcen-Effizienz, Springer Viewweg.

Surdilovic D. & Radojicic J. Robust Control of Interaction with Haptic Interfaces. Proceedings of 2007 ICRA, Rome, Italy.

Surdilovic, D. & Bernhardt, R. (2005). „Novel Interactive Human-Robot-Systems“, Proc. 16th IFAC World Congress, Vol. 16 No. 1, p. 1314.

Surdilovic, D., Schreck, G. & Schmidt, U. (2010). „Development of Collaborative Robots (COBOTS) for Flexible Human-Integrated Assembly Automation“, Proc. 41st Int’l Symp. Robotics (ISR) and 6th German Conf. Robotics (ROBOTIK), pp. 1–8.

Surdilovic, D., Schreck G. & Schmidt U. (2010). Development of collaborative robots (COBOTS) for flexible human-integrated assembly automation, ISR/ROBOTIK 2010.

Vanderborght, B., Albu-Schaeffer, A., Bicchi, A., Burdet, E., Caldwell, D., Carloni, R., Catalano, M., Eiberger, O., Friedl, W., Ganesh, G., Garabini, M., Grebenstein, M., Grioli, G., Haddadin, S., Hoppner, H., Jafari, A., Laffranchi, M., Lefeber, D., Petit, F., Stramigioli, S., Tsagarakis, N., van Damme, M., van Ham, R., Visser, L. & Wolf, S. (2013). „Variable impedance actuators: A review“, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 61 No. 12, pp. 1601–1614.

Vukobratović, M., Surdilovic, D., Ekalo, Y., Ekalo, Y. & Katic, D. (Eds.) (2009). Dynamics and robust control of robot-environment interaction, New frontiers in robotics, Vol. 2, World Scientific Pub. Co., Singapore, Hackensack, N.J.