



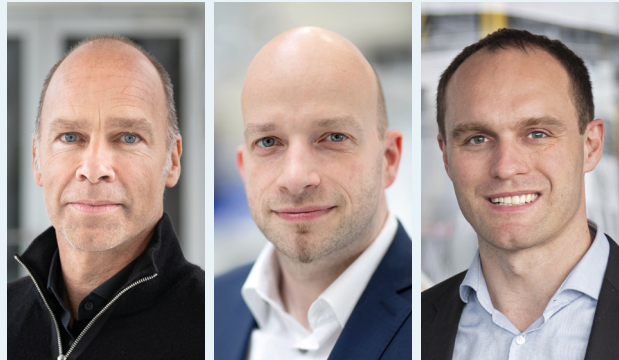
Aulon Bajrami

Mensch-Roboter- Kollaboration (MRK) in der industriellen Praxis

Hrsg.: Thomas Bauernhansl, Marco Huber, Werner Kraus

Im Rahmen des

Vorwort



Künstliche Intelligenz (KI) ist eine der zentralen Technologien für die Zukunft. Ihre Einführung und der Einsatz fordern Unternehmen im besonderen Maß heraus. Es gilt, das Potenzial zu erkennen und dieses wirtschaftlich nutzbar zu machen. Lassen Sie sich dabei von Europas größter Forschungskoooperation auf dem Gebiet der KI, Cyber Valley, begleiten.

Mit dem KI-Fortschrittszentrum vom Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO und Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und als Teil von S-TEC, dem Stuttgarter Technologie- und Innovationscampus, unterstützen wir Unternehmen dabei, das Potenzial von KI nutzbringend einzusetzen. An der Schnittstelle zwischen anwendungsorientierter Wissenschaft und exzellenter Forschung des Cyber-Valley-Konsortiums entwickeln wir innovative KI-Anwendungen für die Praxis und treiben damit die Kommerzialisierung von KI voran. Erklärtes Ziel ist dabei, menschenzentrierte KI-Lösungen zu entwickeln. Denn nur wenn Menschen mit einer neuen Technologie intuitiv interagieren und vertrauensvoll zusammenarbeiten, kann ihr Potenzial optimal ausgeschöpft werden.

Die Studienreihe »Lernende Systeme und Kognitive Robotik« des KI-Fortschrittszentrums gibt Einblick in die Potenziale und die praktischen Einsatzmöglichkeiten von KI. Dabei wurden bereits übergreifende Themen wie Zuverlässigkeit, Erklärbarkeit (xAI), cloudbasierte Plattformen, Technologien und Einführungsstrategien sowie einzelne Anwendungsbereiche vorgestellt. Mit der Fortsetzung der Reihe kommen zahlreiche neue Themen hinzu. Diese reichen von der Bildverarbeitung über die effiziente Software- und Systemintegration in der Robotik, die Gestaltung von KI-Systemen, Sprachmodelle in der Praxis bis hin zu KI-basierten Assistenzsystemen und dem Beitrag von KI zur Fachkräftesicherung.

Kollaborative Roboter gelten als Antwort auf den wachsenden Druck in der industriellen Fertigung. Ob sie dieses Versprechen einlösen, ist weniger klar. Diese Studie geht der Frage nach, wie MRK in deutschen Unternehmen heute wirklich umgesetzt wird, wo die Normen an ihre Grenzen stoßen und was Systemintegratoren in der Praxis tatsächlich bewegt. Die Grundlage bilden eine quantitative Befragung sowie qualitative Experteninterviews, ergänzt durch die Vorstellung des am Fraunhofer IPA entwickelten Robo-DashCam-Systems zur datengestützten Risikobeurteilung.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre, und freuen uns, wenn wir in Zukunft auch Sie mit unserer Expertise auf Ihrem Weg zur menschenzentrierten KI unterstützen dürfen.

Handwritten signatures of Thomas Bauernhansl, Marco Huber, and Werner Kraus. The signatures are written in black ink and are positioned above the printed names.

Thomas Bauernhansl, Marco Huber, Werner Kraus
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung IPA

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Vorwort | 2 |
| 1. Einleitung | 5 |
| 1.1. Zweck der Studie | 5 |
| 1.2. Forschungsziele und Aufbau des Berichts | 6 |
| 2. Marktanalyse und Branchentrends | 7 |
| 2.1. Überblick über den globalen Cobot-Markt | 7 |
| 2.2. Globaler Markt für Industrieroboter | 7 |
| 2.3. Cobots als wachstumsstärkstes Segment | 8 |
| 2.4. Service-, mobile und medizinische Robotik | 8 |
| 2.5. Prognose und Markttreiber | 9 |
| 3. Grundlagen der Mensch- Roboter-Kollaboration | 10 |
| 3.1. Definition und Interaktionsgrade der MRK | 10 |
| 3.2. Sicherheitskonzepte | 11 |
| 3.3. Normative Grundlagen | 13 |
| 3.4. Risikoanalyse in der MRK | 14 |
| 4. Forschungsdesign und Methodik | 16 |
| 4.1. Methodischer Ansatz und Stichprobe | 16 |
| 4.2. Forschungsthese(n) | 17 |
| 5. Ergebnisse der empirischen Forschung | 18 |
| 5.1. Überblick und Stichprobencharakteristik | 18 |
| 5.2. Aktuelle MRK-Praxis in deutschen Unternehmen | 19 |
| 5.3. Ergebnisse zur Überprüfung der Forschungsthese(n) | 19 |
| 5.4. Ergebnisse zu den zentralen Forschungsfragen | 22 |
| 6. Fazit und Handlungsempfehlungen | 24 |
| 6.1. Zusammenfassung der Erkenntnisse | 24 |
| 6.2. Beantwortung der Forschungsfragen | 25 |
| 6.3. Handlungsempfehlungen | 25 |
| 6.4. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf | 27 |

| | |
|---|-----------|
| Liste der Standards und Normen | 28 |
| KI-Fortschrittszentrum | 29 |
| Fraunhofer | 30 |
| Impressum | 31 |

1. Einleitung

1.1. Zweck der Studie

Die industrielle Fertigung ist im Umbruch. Globalisierung, Fachkräftemangel, geopolitische Unsicherheiten und der Wunsch nach individualisierten Produkten setzen Unternehmen unter Druck. Unterbrochene Lieferketten und der zunehmende Trend zur Rückverlagerung von Produktion (Reshoring) verstärken den Bedarf an flexibler Automatisierung zusätzlich. Kunden wollen heute nicht mehr das Standardprodukt vom Band, sondern Varianten, die zu ihren spezifischen Anforderungen passen. Das treibt die Variantenvielfalt in die Höhe, während gleichzeitig die Losgrößen schrumpfen. Produktionssysteme müssen flexibler werden. Dazu kommt: Produktlebenszyklen werden kürzer, Lieferzeiten knapper, und in Hochlohnländern wie Deutschland steigt zunehmend der Kostendruck.

Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) hat in diesem Zusammenhang Potenzial. Anders als klassische Industrieroboter, die hinter Schutzgittern arbeiten, sind sogenannte Cobots – kollaborative Roboter, die speziell für die direkte Zusammenarbeit mit Menschen konzipiert sind – darauf ausgelegt, ohne trennende Schutzeinrichtungen mit Menschen zusammenzuarbeiten. Der Ansatz: Man kombiniert die Flexibilität und Problemlösungsfähigkeit des Menschen mit der Präzision, Ausdauer und Wiederholgenauigkeit eines Roboters. Eine Art Arbeitsteilung nach Stärken.

MRK verspricht nicht nur mehr Flexibilität in Produktionssystemen, sondern auch ergonomischere Arbeitsplätze. Cobots übernehmen repetitive oder körperlich belastende Aufgaben, während Menschen sich auf komplexere Tätigkeiten konzentrieren. Besonders für kleine und mittelständische Betriebe wirkt das Versprechen verlockend, dass Cobots lassen sich vergleichsweise einfach programmieren und schnell in Betrieb nehmen lassen, ohne gleich eine komplette Produktionslinie umzubauen.

Aber in der Praxis sieht das oft anders aus. Wenn Mensch und Roboter sich einen Arbeitsraum teilen, entstehen Sicherheitsrisiken. Normen wie ISO 10218 und ISO/TS 15066 schreiben vor, wie diese Risiken zu minimieren sind. Das Problem: Diese Sicherheitsanforderungen können die Wirtschaftlichkeit massiv beeinträchtigen. Roboter müssen langsamer fahren, ihre Leistung wird gedrosselt. Was auf dem Papier sicher ist, rechnet sich dann plötzlich nicht mehr. Hinzu kommt die Komplexität der Risikobeurteilung selbst. Unerfahrene Ingenieure haben häufig Schwierigkeiten, die Vorgaben umzusetzen. Zudem erfordert jede wesentliche Veränderung an der Anlage eine erneute Bewertung.

Genau hier setzt die vorliegende Studie an. Sie untersucht, vor welchen konkreten Herausforderungen Systemintegratoren bei der Umsetzung von MRK-Projekten stehen und welches Potenzial datenbasierte Ansätze zur Unterstützung der Risikoanalyse bieten.

1.2. Forschungsziele und Aufbau des Berichts

Die Studie verfolgt deshalb drei Ziele. Zunächst geht es darum, die theoretischen Grundlagen der MRK aufzuarbeiten, besonders was Sicherheitsanforderungen und die geltenden Normen angeht. Das ist notwendig, um einordnen zu können, womit Unternehmen konfrontiert sind. Dann richtet sich der Blick auf den Markt: Welche Trends zeichnen sich ab? Was treibt die Entwicklung voran, was bremst sie? Und schließlich folgt ein empirischer Teil. Eine quantitative Befragung kombiniert mit qualitativen Experteninterviews zeigt, wie die Umsetzung von MRK in der Praxis tatsächlich läuft.

Der Aufbau des Berichts folgt dieser Logik. Nach der Einleitung kommt in Kapitel 2 die theoretische Grundlage: verschiedene Interaktionsgrade zwischen Mensch und Roboter, Sicherheitsprinzipien und normative Vorgaben. Kapitel 3 widmet sich mit aktuellen Zahlen und Prognosen dem Markt. In Kapitel 4 werden das methodische Vorgehen und die Befragungsinstrumente erklärt. Die Ergebnisse selbst präsentiert Kapitel 5, sowohl aus der Befragung als auch aus den Interviews. Kapitel 6 fasst die »Lessons Learned« zusammen und gibt Empfehlungen für künftige Arbeiten in Unternehmen und in der Forschung.

2. Marktanalyse und Branchentrends

2.1. Überblick über den globalen Cobot-Markt

Kollaborative Roboter (Cobots) ermöglichen es Mensch und Maschine, ohne trennende Schutzgitter im selben Arbeitsraum zu agieren. Anders als klassische Industrieroboter, die in vollautomatisierten Zellen abgeschottet arbeiten, sind Cobots für flexible Umgebungen ausgelegt und unterstützen Beschäftigte bei Montage, Inspektion, Verpackung und Materialhandhabung. Sie markieren damit einen grundlegenden Wandel in der industriellen Automatisierung – und sind zugleich das am schnellsten wachsende Segment der Industrierobotik.

2.2. Globaler Markt für Industrieroboter

Laut World Robotics 2025 der International Federation of Robotics (IFR) hat sich die weltweite Nachfrage nach Industrierobotern in Fabriken innerhalb von zehn Jahren mehr als verdoppelt: Während 2014 rund 221 000 Einheiten installiert wurden, lag das Volumen 2024 bei 542 000 Einheiten. Die jährlichen Installationen bewegen sich seit 2021 stabil auf einem hohen Plateau zwischen 541 000 und 553 000 Einheiten. Der weltweite operative Bestand wuchs parallel auf rund 4,66 Millionen Einheiten (+9 Prozent gegenüber 2023) und damit auf einen historischen Höchststand.

Regional dominiert Asien/Australien mit einem Anteil von rund 75 Prozent an den weltweiten Neuinstallationen, gefolgt von Europa mit 16 Prozent und Amerika mit 9 Prozent. China bleibt mit 295 000 neu installierten Einheiten der mit Abstand größte Einzelmarkt und vereint 54 Prozent aller globalen Installationen auf sich. Auf den weiteren Plätzen folgen Japan (44 500), die USA (34 200), Südkorea (30 600) und Deutschland (27 000); zusammen entfallen auf die Top-5-Märkte rund 80 Prozent der Nachfrage. Bemerkenswert ist die Verschiebung in der Branchenstruktur: Während die Automobilindustrie 2014 noch 43 Prozent der Installationen ausmachte, ist ihr Anteil 2024 auf 23 Prozent gesunken. Demgegenüber hat das Segment der allgemeinen Industrie (»General Industry«) seinen Anteil von 36 Prozent auf 53 Prozent ausgebaut, ein deutliches Indiz für die fortschreitende Diversifizierung der Anwendungsfelder.

2.3. Cobots als wachstumsstärkstes Segment

Innerhalb dieses Marktes wachsen kollaborative Roboter überdurchschnittlich. 2024 wurden weltweit 64 542 Cobots neu installiert, ein Plus von 12 Prozent gegenüber dem Vorjahr. Damit erreicht ihr Anteil an allen Industrieroboter-Installationen 11,9 Prozent gegenüber lediglich 2,8 Prozent im Jahr 2017. Dieser Anteil hat sich innerhalb von sieben Jahren mehr als vervierfacht und steigt kontinuierlich, während der Gesamtmarkt für Industrieroboter im selben Jahr stagnierte (± 0 Prozent). Cobots sind damit das einzige Segment der industriellen Robotik mit zweistelligen Wachstumsraten.

Treiber dieser Entwicklung sind vor allem der zunehmende Arbeits- und Fachkräftemangel, die einfache Bedienung und schnelle Inbetriebnahme sowie die Eignung für flexible Anwendungen in kleinen und mittleren Unternehmen. Cobots erlauben es, Automatisierungslücken dort zu schließen, wo klassische, eingebaute Industrieroboter wirtschaftlich oder räumlich nicht in Frage kommen, etwa bei Maschinenbeschickung, Montage, Qualitätsprüfung oder Verpackung.

2.4. Service-, mobile und medizinische Robotik

Ein weiteres dynamisches Segment bilden professionelle Service- und mobile Roboter. Laut IFR World Robotics 2025 wurden 2024 rund 199 000 neue professionelle Serviceroboter installiert (+9 Prozent). Den größten Anteil machen mit 52 Prozent Anwendungen in Transport und Logistik aus, gefolgt von Gastronomie (21 Prozent), professioneller Reinigung (13 Prozent) und Landwirtschaft (10 Prozent). Besonders dynamisch wuchsen 2024 die professionelle Reinigung (+34 Prozent), Search & Rescue/Security (+19 Prozent) sowie Transport und Logistik (+14 Prozent).

Die medizinische Robotik verzeichnete mit 16 700 neu installierten Einheiten ein außergewöhnliches Wachstum von 91 Prozent. Innerhalb dieses Segments wuchs die Chirurgierobotik um 41 Prozent, Rehabilitation und nicht-invasive Therapie um 106 Prozent und Diagnostik bzw. Laborautomatisierung sogar um 610 Prozent. Diese Zahlen unterstreichen, dass sich der Einsatz von Robotern zunehmend über die klassische Fertigung hinaus in sicherheitskritische und stark regulierte Anwendungsfelder ausweitet.

2.5. Prognose und Markttreiber

Trotz fragiler makroökonomischer Rahmenbedingungen, geopolitischer Spannungen und erhöhter Unsicherheit prognostiziert die IFR für die kommenden Jahre einen positiven globalen Wachstumspfad.

*Tabelle: Prognose der jährlichen Industrieroboter-Installationen weltweit; mit * markierte Jahre sind Prognosen (Quelle: IFR World Robotics 2025)*

| | 2023 | 2024 | 2025* | 2026* | 2027* | 2028* |
|--|------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Jährliche Installationen weltweit (Tsd.) | 541 | 542 | 575 | 619 | 662 | 708 |
| Wachstum ggü. Vorjahr | – | ±0 Prozent | +6 Prozent | +8 Prozent | +7 Prozent | +7 Prozent |

Die jährlichen Installationen werden sich nach IFR-Schätzung von 542 000 Einheiten im Jahr 2024 auf rund 708 000 Einheiten im Jahr 2028 erhöhen, was einer durchschnittlichen Wachstumsrate von etwa 7 Prozent pro Jahr entspricht. Asien/Australien bleibt dabei mit prognostizierten 550 000 Einheiten im Jahr 2028 die mit Abstand größte Region.

Als zentrale Markttreiber identifiziert die IFR den anhaltenden Arbeits- und Fachkräftemangel, den demografischen Wandel, die zunehmende Verfügbarkeit von KI-gestützten Anwendungen (»Physical AI«, Generative AI), neue Geschäftsfelder jenseits der klassischen Fertigung sowie die Erschließung neuer Kundensegmente durch flexiblere Robotertypen und Robot-as-a-Service-Modelle. Humanoide Roboter werden von der IFR derzeit noch im Übergang vom Forschungs- in den Serien-Status verortet: Erste Hersteller bereiten die Serienfertigung vor, konkrete Anwendungsfelder müssen sich in der Praxis aber erst noch etablieren.

Parallel zu diesem Wachstum gewinnt das Thema Sicherheit zunehmend an Bedeutung. Mit der wachsenden Verbreitung kollaborativer Systeme, mobiler Manipulatoren und neuer Robotertypen entstehen neue Gefährdungspotenziale, deren Validierung norm-konform und wirtschaftlich darstellbar sein muss – ein Aspekt, der sich angesichts der prognostizierten Stückzahlen zu einem zentralen Engpass für die weitere Marktdurchdringung entwickeln kann.

3. Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration

3.1. Definition und Interaktionsgrade der MRK

Wenn von Mensch-Roboter-Kollaboration die Rede ist, ist im Kern eine Arbeitsform gemeint, bei der Menschen und Roboter sich denselben Raum teilen und gemeinsam an Aufgaben arbeiten. Dies bricht mit altbekannten Konventionen in der industriellen Fertigung. Dort stehen Roboter hinter Schutzzäunen in abgesperrten Zellen. Ein direkter Kontakt mit dem Menschen ist nicht vorgesehen.

Tatsächlich gibt es verschiedene Abstufungen, wie eng Mensch und Roboter zusammenarbeiten. Fünf Grade werden üblicherweise unterschieden, je nachdem, wie nah sie sich räumlich kommen und wie intensiv die Zusammenarbeit ist (Abbildung 1). Im ersten Schritt steht die klassische Roboterzelle: Mensch und Roboter komplett voneinander getrennt durch einen Zaun. Eine Stufe höher kommt die Koexistenz. Der Zaun fällt weg, aber die Arbeitsbereiche bleiben trotzdem getrennt. Bei der synchronisierten Arbeit wird es schon interessanter: Mensch und Roboter nutzen denselben Arbeitsraum, allerdings nicht gleichzeitig. Einer arbeitet, der andere wartet. Dann folgt die Kooperation, bei der beide zeitgleich im selben Raum tätig sind, aber an unterschiedlichen Werkstücken hantieren. Und ganz oben steht die eigentliche Kollaboration: Mensch und Roboter arbeiten gemeinsam am selben Werkstück, an derselben Aufgabe.

Hier zeigt sich eine gewisse Begriffsverwirrung. Streng genommen meint Mensch-Roboter-Kollaboration nur diesen höchsten Grad der Zusammenarbeit. In der Praxis wird der Begriff aber häufig weiter gefasst und als Sammelbegriff für alles verwendet, was ohne Schutzzaun auskommt. Das kann manchmal zu Missverständnissen führen, wenn jemand von MRK spricht und eigentlich nur Koexistenz oder Kooperation meint.

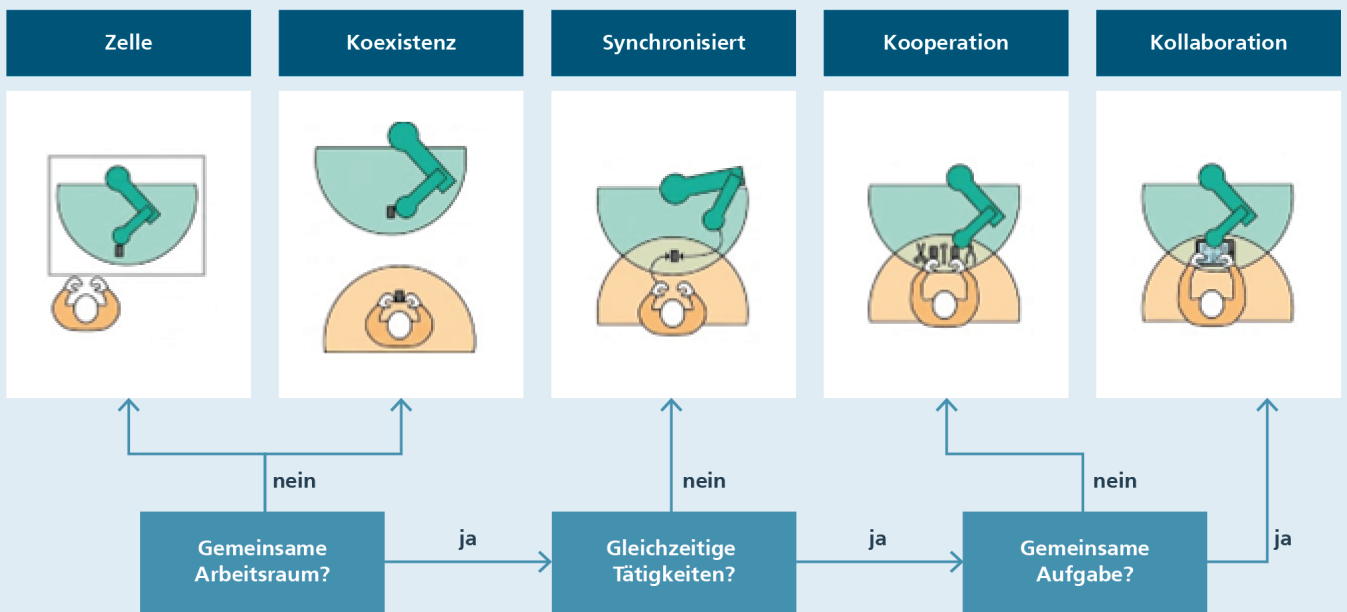


Abbildung 1: Die fünf Interaktionsgrade der Mensch-Roboter-Kollaboration.
Quelle: Fraunhofer IPA

3.2. Sicherheitskonzepte

Die Sicherheit des Menschen bei der Arbeit mit Robotern erfordert spezifische Schutzmaßnahmen. Die einschlägigen Normen definieren vier grundlegende Sicherheitsprinzipien für die MRK (siehe Abbildung 2).

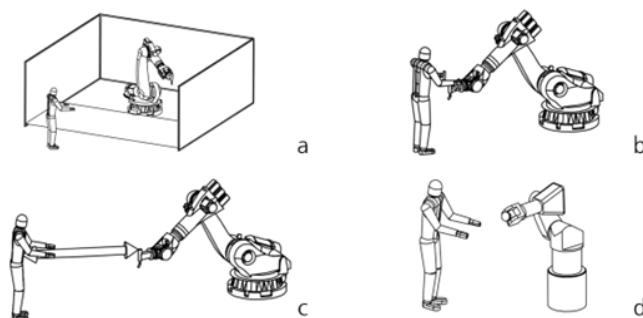


Abbildung 2: Sicherheitsprinzipien der MRK nach ISO 10218 und ISO/TS 15066: (a) Sicherheitsgerichteter Stopp, (b) Handführung, (c) Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung, (d) Kraft- und Leistungsbegrenzung.

Beim sicherheitsgerichteten Stopp stoppt der Roboter alle Bewegungen, sobald ein Mensch den definierten Arbeitsbereich betritt. Externe Sensoren wie Laserscanner oder Kamerasysteme erfassen die Annäherung. Der Roboter setzt seine Arbeit erst fort, wenn der Mensch den Bereich wieder verlassen hat.

Die Handführung ermöglicht dem Bediener, den Roboter physisch zu führen. Durch direkte Manipulation lassen sich Bewegungen anpassen. Der Roboter folgt dabei den Bewegungen des Menschen, was eine intuitive Programmierung oder Positionierung für bestimmte Aufgaben erlaubt.

Bei der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung passt der Roboter seine Geschwindigkeit dynamisch an die Entfernung zum Menschen an. Je näher sich der Mensch nähert, desto langsamer bewegt sich der Roboter. Unterschreitet der Abstand einen definierten Mindestwert, stoppt der Roboter vollständig.

Kraft- und Leistungsbegrenzung erlaubt direkten Kontakt zwischen Mensch und Roboter. Die dabei auftretenden Kräfte und Drücke sind jedoch auf biomechanisch sichere Werte begrenzt. Die ISO/TS 15066 definiert zulässige Grenzwerte für verschiedene Körperregionen.

Neben diesen vier Prinzipien unterscheidet man zwischen globaler und lokaler Absicherung. Die globale Absicherung nutzt extern installierte Sicherheitseinrichtungen wie Lichtschranken oder Laserscanner, die einen größeren Bereich überwachen. Bei der lokalen Absicherung ist das System direkt am Roboter installiert und überwacht nur dessen unmittelbare Umgebung. In der Praxis lassen sich beide Ansätze kombinieren, um ein umfassendes Sicherheitskonzept zu realisieren.

3.3. Normative Grundlagen

Die Sicherheit von MRK-Anlagen wird durch eine hierarchische Struktur von Normen geregelt, die vom Allgemeinen zum Speziellen verläuft.



Abbildung 3: Hierarchische Struktur der Normen für MRK-Anlagen. Eigene Darstellung nach einer Grafik aus Schunk (2022): »Die Handhabung in der Mensch-Roboter-Kollaboration«: https://industrieanzeiger.industrie.de/wp-content/uploads/VIo/Vortrag_Schunk.pdf

Auf der obersten Ebene stehen die Typ-A-Normen, die allgemeine Sicherheitsgrundsätze für alle Maschinen festlegen. Die ISO 12100 bildet hier die Grundlage für Risikobeurteilung und Risikominderung. Sie definiert die grundlegenden Prinzipien der Maschinensicherheit und stellt sicher, dass bei der Konstruktion die Eigensicherheit berücksichtigt wird.

Die mittlere Ebene bilden die Typ-B-Normen, die sich auf spezifische Sicherheitsaspekte und Komponenten konzentrieren. Dazu gehört die ISO 13849, die Anforderungen an sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen definiert. Die IEC 62061 regelt die funktionale Sicherheit elektrischer Steuerungssysteme. Die ISO 13855 legt Sicherheitsabstände und Annäherungsgeschwindigkeiten fest und gibt Vorgaben für die Platzierung von Sensoren und Schutzeinrichtungen.

Auf der untersten und spezifischsten Ebene stehen die Typ-C-Normen, die Sicherheitsanforderungen für bestimmte Maschinentypen definieren. Für Industrieroboter sind dies die ISO 10218-1, die Anforderungen an den Roboter selbst stellt, und die ISO 10218-2, welche die

Integration von Robotern in Anlagen regelt. Speziell für die Mensch-Roboter-Kollaboration wurde die ISO/TS 15066 entwickelt. Diese technische Spezifikation definiert biomechanische Grenzwerte für den Kontakt zwischen Mensch und Roboter und legt akzeptable Kraft- und Druckgrenzen für verschiedene Körperregionen fest.

3.4. Risikoanalyse in der MRK

Die Risikoanalyse ist ein zentraler Bestandteil bei der Planung und Inbetriebnahme von MRK-Anlagen. Sie dient der systematischen Identifikation, Bewertung und Minimierung von Gefahren, die durch die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter entstehen können.

Der Prozess gliedert sich in mehrere Schritte (Abbildung 4). Zunächst werden die räumlichen Grenzen der Anlage definiert: der Bewegungsbereich des Roboters, die erforderlichen Sicherheitsabstände und der Platzbedarf für Installation und Wartung. Im zweiten Schritt werden alle potenziellen Gefahren identifiziert, die von der Anlage ausgehen können. Das umfasst mechanische, elektrische, thermische und weitere Gefährdungen über den gesamten Lebenszyklus der Anlage hinweg, von der Montage über den Betrieb bis zur Entsorgung.

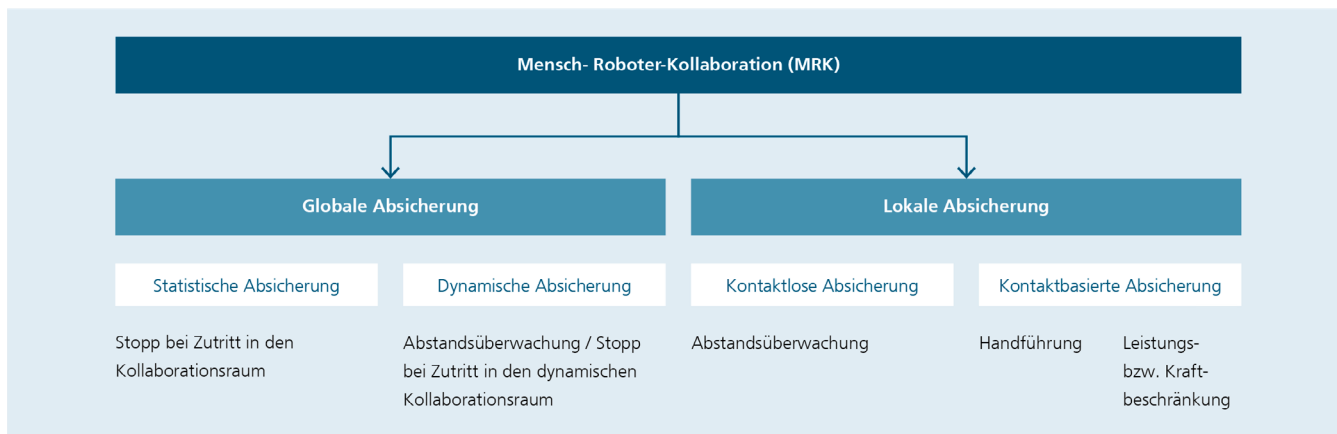


Abbildung 4: Sicherheitskonzepte der Mensch-Roboter-Kollaboration. Eigene Abbildung nach Grafik von Kossmann, M. R. (2019): »Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion durch einen biofidelen Bewertungsansatz«, Dissertation an der Technischen Universität München.

Der dritte Schritt ist die Risikoabschätzung. Dabei wird das Ausmaß möglicher Schäden bewertet und die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens eingeschätzt. Faktoren wie die Häufigkeit und Dauer des Aufenthalts von Personen im Gefahrenbereich fließen in diese Bewertung ein. Im vierten Schritt folgt die eigentliche Risikobewertung, bei der entschieden wird, ob Maßnahmen zur Risikominderung erforderlich sind. Anschließend werden entsprechende Schutzmaßnahmen definiert und umgesetzt. Danach wird der gesamte Prozess erneut durchlaufen, um die Wirksamkeit der Maßnahmen zu überprüfen.

Typischerweise führen Sicherheitsingenieure die Risikoanalyse durch, wobei diese zu einem erheblichen Teil auf deren persönlicher Erfahrung und Einschätzung basiert. Ansätze zur Objektivierung und Automatisierung der Risikoanalyse, etwa durch datenbasierte Methoden, sind Gegenstand aktueller Forschung. Ein solcher Ansatz ist Computer Aided Risk Assessment (CARA), bei der softwaregestützte Werkzeuge den Prozess der Risikobeurteilung strukturieren

und teilweise automatisieren. In diesem Kontext wird am Fraunhofer IPA mit Robo-Dashcam ein kameragestütztes System entwickelt, das sicherheitsrelevante Daten in MRK-Arbeitsräumen erfasst. Solche Systeme können unter anderem Aufenthaltshäufigkeiten von Personen in Gefahrenbereichen statistisch erfassen und so eine objektivere Grundlage für die Risikobeurteilung schaffen.

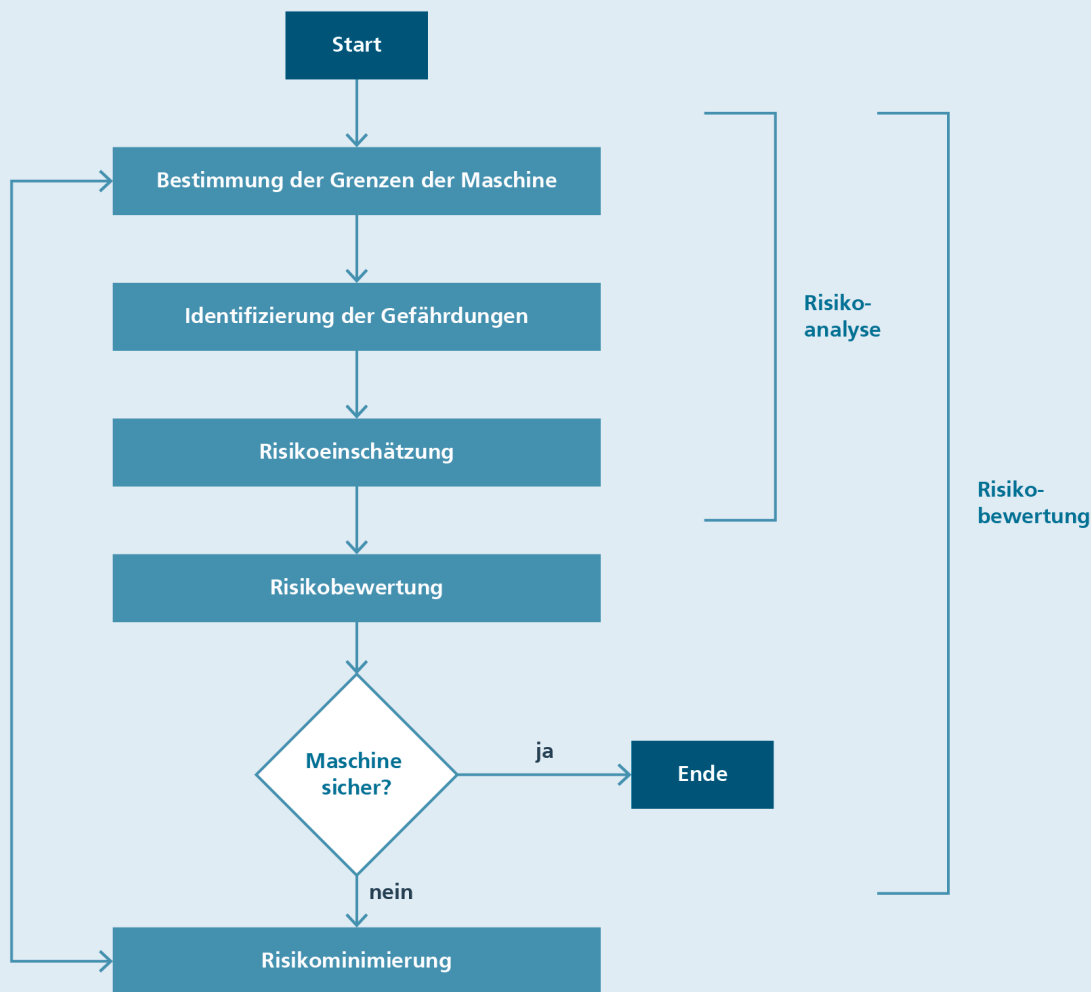


Abbildung 5: Ablauf der Risikobeurteilung gemäß EN ISO 12100

Ein weiterer kritischer Aspekt ist der hohe Zeitaufwand. Umfangreiche Veränderungen an einer MRK-Anlage erfordern eine erneute Beurteilung, was die Flexibilität und Wirtschaftlichkeit der Anlagen beeinträchtigen kann. Die Balance zwischen Sicherheitsanforderungen und betrieblicher Effizienz stellt daher eine zentrale Herausforderung bei der Implementierung von MRK dar.

4. Forschungsdesign und Methodik

4.1. Methodischer Ansatz und Stichprobe

Die Studie folgt einem Mixed-Methods-Ansatz aus quantitativer Online-Befragung und qualitativen Experteninterviews. Der Fragebogen wurde auf Basis explorativer Gespräche mit Vertretern führender Roboterhersteller sowie eigener Praxiserfahrung aus dem MRK-Umfeld entwickelt. Er deckt sieben Themenkategorien ab: rechtliche Rahmenbedingungen, Arbeitsraum, Prozesse, Sicherheitssysteme, kollaborative Roboter, menschliche Faktoren und die Rolle der Systemintegratoren. Für die Interviews diente ein halbstrukturierter Leitfaden mit Fragen zu MRK-Erfahrung, Sicherheitsnormen, Implementierungsherausforderungen und datenbasierter Risikoanalyse. Details zur Instrumentenentwicklung finden sich im Anhang.

Zielgruppe waren erfahrene Systemintegratoren in Deutschland. Kontaktiert wurden 4 054 Unternehmen aus neun Branchen (39,6 Prozent Maschinen- und Anlagenbau, 17,2 Prozent Automobil und Luftfahrt, 11,7 Prozent Beratung; übrige Anteile: Elektrotechnik, Metallverarbeitung, Logistik u. a.). Auswahlkriterium war ein öffentlich dokumentierter Bezug zu MRK, Cobots oder industrieller Robotik. Die Befragung erfolgte online mit einer Bearbeitungszeit von 10 bis 15 Minuten, inklusive Erinnerungsversand an alle Kontakte, die nicht teilgenommen hatten.

Die finale Stichprobe umfasst 24 vollständig ausgefüllte Antworten. Die Rücklaufquote von unter 1 Prozent ist für spezialisierte B2B-Zielgruppen typisch; MRK war zum Erhebungszeitpunkt für viele Unternehmen noch kein Kerngeschäftsfeld. Die Stichprobe erhebt keinen Anspruch auf Repräsentativität, liefert aber Einblicke erfahrener Praktiker. Teilnehmer wurden nach Anzahl realisierter MRK-Projekte in fünf Erfahrungsstufen klassifiziert. Die Branchenverteilung spiegelt die Struktur des deutschen Automatisierungsmarkts wider, mit Schwerpunkt auf Maschinen- und Anlagenbau sowie Automobilindustrie.

Die quantitative Auswertung erfolgte über Häufigkeitsverteilungen, Mittelwerte und Analyse der Likert-Zustimmungswerte. Die Interviews wurden transkribiert, inhaltsanalytisch ausgewertet und mit den quantitativen Ergebnissen trianguliert.

4.2. Forschungsthese

Aus den Expertengesprächen und der Praxiserfahrung im MRK-Umfeld kristallisierten sich zentrale Spannungsfelder heraus: zeitaufwendige und stark subjektiv geprägte Risikoanalysen, normative Einschränkungen der Anlagenperformance sowie das bislang wenig erprobte Potenzial datenbasierter Ansätze. Daraus wurden sieben Thesen abgeleitet, die im Fragebogen empirisch überprüft werden:

These 1: Es existieren noch unbekannte Schwächen und Potenziale einer datenbasierten Risikoanalyse.

These 2: Sicherheitsbezogene Normen limitieren die Performance von Cobots.

These 3: Bei der Umsetzung von MRK treten unerwartete Probleme auf.

These 4: Die Risikoanalyse muss objektiver werden.

These 5: Cobots sind für viele Aufgaben nicht geeignet.

These 6: Entscheidungsträger sind nicht von der MRK überzeugt.

These 7: Das Planungsziel des Sicherheitskonzepts entspricht nicht dem Endergebnis.

5. Ergebnisse der empirischen Forschung

5.1. Überblick und Stichprobencharakteristik

Die empirische Erhebung generierte verwertbare Antworten von 24 erfahrenen Systemintegratoren aus Deutschland. Die Ergebnisse werden in drei thematischen Kategorien präsentiert: allgemeine MRK-Befunde, Überprüfung der Forschungsthese sowie Beantwortung der zentralen Forschungsfragen.

Die Befragten verteilen sich auf verschiedene Funktionsbereiche innerhalb ihrer Unternehmen. Der größte Anteil entfällt mit 40,8 Prozent auf das Management, gefolgt von der Projektleitung mit 22,5 Prozent. Die Anlagenplanung macht 14,3 Prozent aus, Sicherheitsabnahme und Programmierung zusammen 10,2 Prozent. Weitere 12,2 Prozent ordneten sich keiner der genannten Kategorien zu.

Die Erfahrung der Teilnehmer wurde anhand der Anzahl persönlich begleiteter Inbetriebnahmen von MRK-Anlagen erfasst und in fünf Erfahrungsstufen kategorisiert. Die Verteilung zeigt einen hohen Anteil an Teilnehmern mit grundlegender Erfahrung (Erfahrungslevel 1: 1 bis 5 Inbetriebnahmen), während die höheren Erfahrungsstufen (Level 2 bis 4) geringer vertreten sind. Diese Verteilung spiegelt den Stand der MRK-Verbreitung zum Erhebungszeitpunkt wider. Angesichts des seither beobachteten Marktwachstums ist davon auszugehen, dass der Erfahrungsgrad der Systemintegratoren mittlerweile insgesamt gestiegen ist (siehe Abbildung 6).

Erfahrungslevel

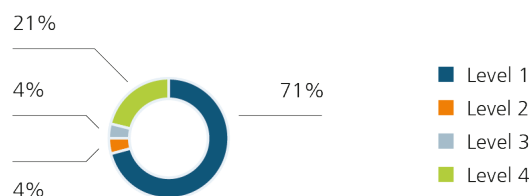


Abbildung 6: Anteil der Systemintegratoren mit MRK-Erfahrung (in Prozent) je Erfahrungslevel (1-4)

5.2. Aktuelle MRK-Praxis in deutschen Unternehmen

Die Befragung zeigt eine klare Dominanz bestimmter Hersteller im deutschen Markt. Universal Robots führt mit 33,3 Prozent der Nennungen, gefolgt von Kuka mit 19 Prozent, ABB mit 14,3 Prozent und Fanuc mit 9,5 Prozent. Alle weiteren Hersteller liegen jeweils unter 5 Prozent. Die führende Position von Universal Robots entspricht der allgemeinen Marktwahrnehmung.

Die Analyse der Anwendungsfälle zeigt eine Konzentration auf wenige Kernbereiche. Pick-and-Place-Anwendungen dominieren mit 24,1 Prozent, gefolgt von Maschinenbestückung mit 20,7 Prozent und dem Greifen einzelner Teile mit 15,5 Prozent. Montage- und Fügeoperationen machen lediglich 8,6 Prozent aus.

Eine Kategorisierung der Anwendungsfälle zeigt: 56,9 Prozent entfallen auf den Transport von Produkten, 25,8 Prozent auf das Greifen und Fügen von Teilen. Qualitätskontrolle, Anwendungen mit Werkzeugen sowie sonstige Einsatzgebiete sind mit jeweils unter 7 Prozent deutlich unterrepräsentiert. Diese Verteilung bestätigt die in der Literatur beschriebene Dominanz von Handhabungsanwendungen im MRK-Bereich.

Bei den eingesetzten Sicherheitskonzepten zeigt sich eine relativ gleichmäßige Verteilung über drei Ansätze: Die Kraft- und Leistungsbegrenzung wird am häufigsten genannt mit 26,2 Prozent, gefolgt von der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung sowie dem sicherheitsgerichteten Stopp bei Zutritt mit jeweils 23 Prozent. Der klassische Schutzzaun kommt noch in 19,7 Prozent der Fälle zum Einsatz, während die Handführung mit 8,1 Prozent am seltensten verwendet wird.

Die Befragung identifizierte zwei Projektphasen, in denen die Systemintegratoren besonderen Unterstützungsbedarf sehen. Risikoanalyse und Planungsphase wurden von jeweils 38 Prozent der Befragten genannt. Dokumentation, Systemspezifikation, Inbetriebnahme und Design folgen mit nur 6 Prozent deutlich abgeschlagen.

5.3. Ergebnisse zur Überprüfung der Forschungsthese

These 1: Datenbasierte Risikoanalyse bietet Potenzial, das in der Praxis bisher wenig erschlossen ist

Die erste These setzt voraus, dass noch unbekannte Schwächen und Potenziale einer datenbasierten Risikoanalyse existieren. Unter datenbasierter Risikoanalyse wird die softwaregestützte Erfassung und Auswertung sicherheitsrelevanter Daten verstanden. Ein Beispiel ist das System Robo-Dashcam (vgl. Kapitel 3.4), das über Kameras im Arbeitsraum Bewegungsdaten von Personen erfasst und so Aufenthaltshäufigkeiten in Gefahrenbereichen dokumentiert. Ziel ist es, den bisher überwiegend manuellen und subjektiven Prozess der Risikobeurteilung durch messbare Daten zu objektivieren. Die Ergebnisse bestätigen diese These teilweise.

Die Befragten nannten mehrere Nachteile des Konzepts. An erster Stelle stehen Bedenken bezüglich Privacy und Security mit 24,5 Prozent, gefolgt von der Sorge, dass Normen nicht vollständig eingehalten werden könnten mit 22,5 Prozent. Allgemeine Vorbehalte gegenüber Kameras im Werk wurden mit 20,4 Prozent genannt.

In den offenen Antworten wurden zusätzliche Bedenken geäußert: Zweifel an der Aussagekraft der erhobenen Daten, die Notwendigkeit der Zustimmung zustimmungsbedürftiger Gruppen wie Betriebsrat oder Berufsgenossenschaften, strikte Sicherheitsbestimmungen in Großkonzernen ohne Diskussionsspielraum sowie Kostenaspekte.

Auf die Frage, ob eine datengestützte Neubewertung einer bereits laufenden MRK-Anlage sinnvoll wäre – beispielsweise, um auf Basis realer Bewegungsdaten die Sicherheitskonfiguration zu optimieren –, antworteten die Befragten zurückhaltend: Die Wahrscheinlichkeit liegt bei nur 32 Prozent. Das deutet darauf hin, dass der potenzielle Nutzen einer nachträglichen, datenbasierten Optimierung in der Praxis noch nicht erkannt wird.

Zu den fehlenden Funktionen zählen: die Integration eigener Sicherheitsfunktionen (25 Prozent), eine Datenbank für verschiedene Aufgaben und Risiken (13 Prozent), die Überwachung des Roboterverhaltens und der Bauteilhandhabung (13 Prozent) sowie ein minimaler Konfigurationsaufwand (13 Prozent). Allerdings gaben 38 Prozent an, dass sie ohne praktische Nutzung keine fehlenden Funktionen benennen können.

These 2: Einschränkungen durch sicherheitsbezogene Normen

Die These, dass sicherheitsbezogene Normen und Regularien die Performance von Cobots limitieren, findet deutliche Unterstützung in den Daten. Insgesamt fühlen sich 75 Prozent der befragten Systemintegratoren durch Normen in der optimalen Nutzung von MRK eingeschränkt.

Die ISO/TS 15066, die spezifische technische Spezifikation für die MRK, wird dabei mit großem Abstand am häufigsten genannt (45,8 Prozent). Fachgrundnormen Typ B2 zu Schutzeinrichtungen folgen mit 12,5 Prozent, Fachgrundnormen Typ B1 zu Sicherheitsaspekten mit 8,3 Prozent. Maschinensicherheitsnormen Typ C und Grundnormen werden mit jeweils 4,2 Prozent nur vereinzelt genannt.

Lediglich 25 Prozent der Befragten gaben an, sich durch keine der genannten Normen eingeschränkt zu fühlen. Die Ergebnisse bestätigen die in der Literatur beschriebene Problematik, dass normative Anforderungen als wesentliches Hindernis für eine breitere Marktabtastung der MRK wahrgenommen werden.

These 3: Unerwartete Probleme bei der MRK-Umsetzung

Die These, dass bei der Umsetzung von MRK unerwartete Probleme auftreten, wird durch die Ergebnisse tendenziell bestätigt. Jede der im Fragebogen angebotenen Problemkategorien wurde mindestens zweimal bis zu zwölfmal ausgewählt.

Drei Probleme wurden mit jeweils 15 Prozent am häufigsten genannt: Die Komplexität im Bereich MRK-Sicherheit wurde unterschätzt, wiederholte Anpassung von Sicherheitskonfigurationen sowie zu lange dauernde Risikoanalysen.

Insgesamt weisen 43,8 Prozent der genannten Probleme einen direkten Bezug zur Risikoanalyse auf. Im Einzelnen: Risikoanalyse dauert zu lange (15 Prozent), Bestimmung von Sicherheitsabständen (12,5 Prozent), Einrichten von Schutzfeldern (8,8 Prozent) und übersehene Gefährdungen (7,5 Prozent).

In den offenen Antworten wurden zusätzlich genannt: sehr schlechte Software, die Notwendigkeit, zustimmungsbedürftige Gruppen zu überzeugen, sowie der Hinweis, dass bei richtiger Planung keine Probleme auftreten würden.

These 4: Bedarf an objektiverer Risikoanalyse

Die These, dass die Risikoanalyse objektiver werden muss, findet Unterstützung in den Daten. Die Wahrscheinlichkeit, dass sicherheitsrelevante Daten den Systemintegratoren bei der Risikoanalyse und Gefahrenbewertung helfen würden, liegt bei 66 Prozent (ziemlich wahrscheinlich).

Dieses Ergebnis zeigt eine positive Tendenz und deutet auf einen grundsätzlichen Bedarf an datenbasierter Unterstützung im Risikoanalyseprozess hin. Allerdings bleibt unklar, für welchen konkreten Zweck die Systemintegratoren diese Daten primär nutzen würden: zur Standardisierung des Bewertungsprozesses, zur Erhöhung der Anlageneffektivität oder zur Verbesserung der Analyseobjektivität.

These 5: Eignung von Cobots für verschiedene Aufgaben

Die These, dass Cobots für viele Aufgaben nicht geeignet sind, lässt sich auf Basis der Daten weder bestätigen noch widerlegen, das sie bei 50 Prozent. Die Ergebnisse zeigen lediglich die Häufigkeit der Cobot-Nutzung für verschiedene Anwendungsfälle, nicht deren grundsätzliche Eignung.

Die Hauptanwendungsfälle konzentrieren sich zu 82,8 Prozent auf zwei Kategorien: Transport von Produkten sowie Greifen und Fügen von Teilen. Anwendungsfälle, bei denen Roboter mit Werkzeugen arbeiten, Qualitätskontrolle durchführen oder sonstige Aufgaben übernehmen, werden deutlich weniger genutzt. Ob dies auf mangelnde Eignung zurückzuführen ist oder andere Faktoren wie fehlende Erfahrung oder wirtschaftliche Überlegungen eine Rolle spielen, lässt sich aus den Daten nicht ableiten.

These 6: Überzeugung des Managements

Die These, dass Entscheidungsträger nicht von der MRK überzeugt sind, wird durch die Ergebnisse widerlegt. Die durchschnittliche Überzeugung des Managements liegt bei 78 Prozent in der Anzahl (diese haben wir als »etwas überzeugt« identifizieren können).

Eine differenzierte Analyse zeigt, dass Systemintegratoren mit höherer Erfahrung deutlich überzeugter von der MRK sind als solche mit geringerer Erfahrung. Das lässt vermuten, dass praktische Erfahrung mit der Technologie zu einer positiveren Einschätzung führt.

Die Ergebnisse legen nahe, dass das Management nicht als Hindernis für die Verbreitung der MRK betrachtet werden sollte.

Überzeugung (in%) von MRK

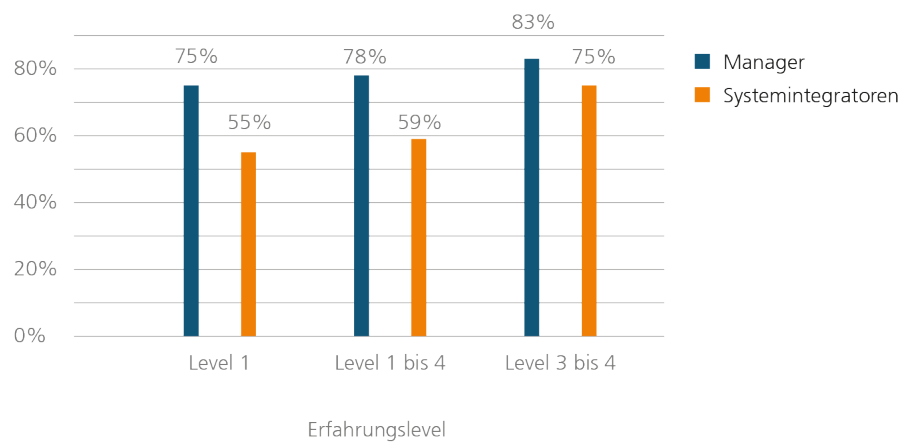


Abbildung 7: Überzeugung (in Prozent) der Manager und Systemintegratoren von MRK je Erfahrungsniveau

These 7: Abweichungen zwischen Planungsziel und Endergebnis

Die These, dass bei der Installation einer MRK-Anlage das Planungsziel des Sicherheitskonzepts nicht dem Endergebnis entspricht, zeigt eine neutrale Tendenz. Mit 55 Prozent liegt die durchschnittliche Abweichung vom Planungsziel im mittleren Bereich.

Eine eindeutige Bestätigung oder Widerlegung der These lässt sich daraus nicht ableiten.

Das Ergebnis deutet allerdings darauf hin, dass moderate Abweichungen zwischen Planung und Realität in der Praxis vorkommen, diese aber nicht als gravierend wahrgenommen werden.

5.4. Ergebnisse zu den zentralen Forschungsfragen

Eine zentrale Forschungsfrage betrifft die Bereitschaft der Systemintegratoren, auf Basis datenbasierter Erkenntnisse die Geschwindigkeit von Robotern über die vorgegebenen Normwerte hinaus zu erhöhen. Grundlage hierfür wäre eine Datenbasierte Risikoanalyse, die durch umfangreiche Messdaten nahelegt, dass bestimmte kritische Gefährdungen in der Praxis extrem unwahrscheinlich sind. Die Ergebnisse zeigen eine neutrale Tendenz mit einer durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent (vielleicht).

Diese Zurückhaltung erscheint angesichts der rechtlichen und sicherheitstechnischen Implikationen nachvollziehbar. Auch wenn die Anwendung von Normen grundsätzlich freiwillig erfolgt, würde eine Geschwindigkeitserhöhung außerhalb der Normvorgaben erhebliche Haftungsrisiken mit sich bringen und erfordert eine fundierte Absicherung durch objektive Daten.

Das Interesse an einer marktreifen Lösung zur datenbasierten Risikoanalyse liegt bei 54 Prozent (vielleicht). Diese neutrale Tendenz deutet auf eine abwartende Haltung der Systemintegratoren hin.

Eine detaillierte Analyse der interessierten Teilnehmer (Antworten ziemlich wahrscheinlich und ganz sicher) zeigt folgendes Profil: Sie stammen aus verschiedenen Arbeitsbereichen (Management, Sicherheitsabnahme, Projektleitung, Programmierung) und verteilen sich auf unter-

schiedliche Erfahrungslevel mit Schwerpunkten bei Level 1 und 4. Ihre Bereitschaft zur Geschwindigkeitserhöhung außerhalb der Normen liegt um 16,7 Prozent höher als im Durchschnitt. Als häufigste Nachteile sehen sie Kameras im Werk und die nicht vollständige Normeinhaltung. Der Unterstützungsbedarf konzentriert sich primär auf die Projektphase der Risikoanalyse (40 Prozent).

Tabelle: Thesen und Ergebnisse der Überprüfung

| These | Inhalt | Ergebnis | Tendenz |
|-------|--------------------------------------|-----------------------|--|
| 1 | Unbekannte Schwächen und Potenziale | Teilweise bestätigt | Neutral bis negativ |
| 2 | Einschränkungen durch Normen | Bestätigt | Positiv (75 Prozent fühlen sich eingeschränkt) |
| 3 | Unerwartete Probleme bei Umsetzung | Tendenziell bestätigt | Positiv |
| 4 | Bedarf an objektiverer Risikoanalyse | Tendenziell bestätigt | Positiv (66 Prozent) |
| 5 | Eignung für verschiedene Aufgaben | Nicht bewertbar | Neutral |
| 6 | Überzeugung des Managements | Widerlegt | Positiv (78 Prozent überzeugt) |
| 7 | Abweichungen Planung/Endergebnis | Nicht bestätigt | Neutral (55 Prozent) |

Die empirischen Ergebnisse zeichnen ein differenziertes Bild der aktuellen MRK-Praxis in Deutschland. Einerseits bestätigen sie die in der Literatur identifizierten Herausforderungen: Die normative Komplexität wird als Haupthindernis wahrgenommen, der Prozess der Risikoanalyse ist zeitaufwendig, und die Sicherheitskonfiguration erfordert häufige Anpassungen. Andererseits zeigen sich auch positive Entwicklungen. Das Management steht der MRK aufgeschlossen gegenüber, und mit zunehmender praktischer Erfahrung wächst die Überzeugung von der Technologie. Ein grundsätzlicher Bedarf an datenbasierter Unterstützung im Risikoanalyseprozess scheint vorhanden zu sein.

Die neutrale Haltung gegenüber einer marktreifen Lösung und die geringe Bereitschaft zu Neubewertungen laufender Anlagen deuten allerdings darauf hin, dass der konkrete Nutzen einer datenbasierten Risikoanalyse noch besser kommuniziert werden muss. Die hohen Sicherheitsbestimmungen insbesondere in Großkonzernen könnten bedeuten, dass kleine und mittelständische Unternehmen eine geeignetere Zielgruppe für innovative Ansätze im Bereich der MRK-Sicherheit darstellen.

6. Fazit und Handlungsempfehlungen

6.1. Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die vorliegende Untersuchung gibt Einblicke in den Stand der Mensch-Roboter-Kollaboration aus Sicht erfahrener Systemintegratoren in Deutschland. Ein besonderer Fokus lag dabei auf den Herausforderungen der Risikoanalyse und dem Potenzial datenbasierter Ansätze zur Optimierung von MRK-Anlagen. Durch die Kombination aus umfassender Literaturanalyse, Marktrecherche und empirischer Erhebung unter 24 erfahrenen Systemintegratoren lassen sich fundierte Aussagen über den Status quo und mögliche zukünftige Entwicklungsrichtungen treffen.

Der globale Cobot-Markt befindet sich in einer Phase dynamischen Wachstums mit prognostizierten Wachstumsraten von über 30 Prozent jährlich bis 2029. Deutschland nimmt als einer der am stärksten automatisierten Märkte weltweit eine Schlüsselposition ein. Die empirische Erhebung bestätigt, dass MRK-Anwendungen in deutschen Unternehmen zunehmend etabliert sind. Handhabungsaufgaben wie Pick-and-Place und Maschinenbestückung dominieren dabei.

Die Befragung zeigt auch, dass das Management der MRK-Technologie grundsätzlich aufgeschlossen gegenübersteht. Mit einer durchschnittlichen Überzeugung von 78 Prozent lässt sich die These, dass Entscheidungsträger die Verbreitung der MRK behindern, als widerlegt betrachten. Vielmehr scheint die Überzeugung mit zunehmender praktischer Erfahrung zu steigen, was auf einen positiven Lerneffekt hindeutet.

Die Untersuchung identifiziert die normative Komplexität als zentrales Hindernis für eine breitere Marktetablierung der MRK. 75 Prozent der befragten Systemintegratoren fühlen sich durch Normen in der optimalen Nutzung von MRK eingeschränkt, wobei die ISO/TS 15066 mit 45,8 Prozent der Nennungen am häufigsten genannt wird.

Die drei häufigsten unerwarteten Probleme bei der Umsetzung von MRK-Projekten betreffen alle den Sicherheitsbereich: die unterschätzte Komplexität der MRK-Sicherheit, wiederholte Anpassungen von Sicherheitskonfigurationen sowie die Dauer der Risikoanalyse. Insgesamt weisen 43,8 Prozent aller genannten Probleme einen direkten Bezug zur Risikoanalyse auf. Ansätze wie Computer Aided Risk Assessment (CARA) könnten hier ansetzen, indem sie den Analyseprozess durch Automatisierung und Standardisierung beschleunigen und gleichzeitig die Dokumentation vereinheitlichen.

Diese Befunde scheinen die in der Literatur beschriebene Problematik zu bestätigen. Der Aufwand zur Gewährleistung der Sicherheit steht häufig in keinem angemessenen Verhältnis zum Nutzen, und es fehlen öffentliche Handlungsempfehlungen für eine normgerechte Anlagengestaltung und Risikobewertung.

Die Ergebnisse zeigen einen grundsätzlichen Bedarf an datenbasierter Unterstützung im Risikoanalyseprozess. 66 Prozent der Befragten gaben an, dass sicherheitsrelevante Daten ihnen bei der Risikoanalyse und Gefahrenbewertung helfen würden. Der größte Unterstützungsbedarf wird in den Projektphasen Risikoanalyse und Planung gesehen, die von jeweils 38 Prozent der Befragten genannt wurden.

Gleichzeitig offenbart die Untersuchung auch Vorbehalte. Die Bereitschaft, auf Basis datenbasierter Erkenntnisse die Geschwindigkeit von Robotern über Normvorgaben hinaus zu erhöhen, liegt bei nur 50 Prozent. Das Interesse an einer marktreifen Lösung zur datenbasierten Risikoanalyse zeigt mit 54 Prozent ebenfalls eine neutrale Tendenz. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Neubewertung laufender MRK-Anlagen als notwendig erachtet wird, liegt sogar bei nur 32 Prozent.

Als Hauptbedenken wurden Privacy- und Security-Aspekte (24,5 Prozent), die nicht vollständige Normeinhaltung (22,5 Prozent) sowie allgemeine Vorbehalte gegenüber Kameras im Werk (20,4 Prozent) genannt. Ergänzend wurde auf strikte Sicherheitsbestimmungen in Großkonzernen hingewiesen, die keinen Spielraum für Diskussionen lassen.

6.2. Beantwortung der Forschungsfragen

Welche Probleme treten bei der Umsetzung von MRK auf? Die Hauptprobleme liegen in der unterschätzten Sicherheitskomplexität, dem Zeitaufwand für die Risikoanalyse und der Notwendigkeit wiederholter Anpassungen. 43,8 Prozent aller genannten Probleme betreffen direkt die Risikoanalyse.

Welches Potenzial haben datenbasierte Ansätze? Der Bedarf an objektiveren Daten besteht (66 Prozent), die Bereitschaft zur praktischen Umsetzung bleibt aber verhalten (Interesse an marktreifen Lösungen: 54 Prozent; Neubewertung laufender Anlagen: 32 Prozent). Der konkrete Nutzen muss noch überzeugender demonstriert werden.

6.3. Handlungsempfehlungen

Aus den Erkenntnissen der Untersuchung lassen sich folgende Handlungsempfehlungen für die weitere Entwicklung und Vermarktung datenbasierter Ansätze zur MRK-Optimierung ableiten:

1) **KMU sind First Mover in MRK**

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass kleine und mittelständische Unternehmen eine geeignete Zielgruppe für innovative Ansätze im Bereich der MRK-Sicherheit darstellen könnten als Großkonzerne. Die in Großunternehmen vorherrschenden strikten Sicherheitsbestimmungen lassen oft keinen Diskussionsspielraum und erschweren die Einführung neuer Konzepte. KMU verfügen hingegen häufig über flexiblere Entscheidungsstrukturen und könnten von der Unterstützung bei der komplexen Risikoanalyse besonders profitieren.

2) Systemintegratoren müssen noch vom Nutzen überzeugt werden

Die neutrale Haltung der Systemintegratoren gegenüber datenbasierten Lösungen lässt vermuten, dass der konkrete Nutzen noch nicht ausreichend kommuniziert wurde. Eine klare Nutzenargumentation erscheint notwendig. Diese sollte wirtschaftliche Vorteile aufzeigen: Zeitersparnis bei der Risikoanalyse, eine möglicherweise höhere Anlageneffektivität durch optimierte Sicherheitskonfigurationen, weniger Aufwand für wiederholte Anpassungen und eine verbesserte Dokumentation und Nachweisführung.

3) Best practices kommunizieren

Eine Wirtschaftlichkeitsrechnung anhand eines konkreten Beispielszenarios könnte die Argumentation unterstützen und den Return on Investment für potenzielle Anwender verdeutlichen.

Dass 38 Prozent der Befragten ohne praktische Nutzung keine fehlenden Funktionen benennen können, unterstreicht die Bedeutung praxisnaher Demonstrationen. Empfohlen wird die Durchführung von Online-Webinaren zur Vorstellung des Konzepts und der Funktionsweise datenbasierter Risikoanalyse. Pilotprojekte mit aufgeschlossenen Unternehmen könnten zudem helfen, praktische Erfahrungen zu sammeln. Die Dokumentation von Erfolgsbeispielen würde als Referenz für weitere Interessenten dienen.

4) Safety, security, privacy gesamtheitlich angehen

Die identifizierten Bedenken bezüglich Privacy, Security und Kameraeinsatz im Werk sollten proaktiv adressiert werden. Transparente Kommunikation über Datenschutzkonzepte erscheint notwendig, insbesondere der Hinweis, dass keine personenbezogenen Daten gespeichert werden. Eine frühzeitige Einbindung von Betriebsräten und Berufsgenossenschaften in Projektplanungen könnte Vorbehalte abbauen. Zudem sollten Konzepte entwickelt werden, die eine schrittweise Heranführung an die Technologie ermöglichen.

5) Durchgängige Prozesskette bzw. Digitalisierung der Risikoanalyse

Angesichts der zentralen Bedeutung der Normenkonformität für die Systemintegratoren sollte jede datenbasierte Lösung so konzipiert sein, dass sie die Einhaltung bestehender Normen unterstützt und dokumentiert. Die Positionierung sollte nicht als Ersatz für normkonforme Risikoanalysen erfolgen, sondern als Ergänzung. Langfristig könnte eine solche Lösung zur evidenzbasierten Weiterentwicklung der Normung beitragen.

Die empirischen Ergebnisse deuten darauf hin, dass der sicherheitsgerichtete Stopp bei Zutritt und die Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung zusammen 46 Prozent der eingesetzten Sicherheitsprinzipien ausmachen. Eine datenbasierte Lösung sollte primär für diese Prinzipien optimiert werden, da hier möglicherweise der größte Anwendernutzen zu erwarten ist.

6.4. Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Die Untersuchung identifiziert mehrere Bereiche, in denen weiterer Forschungsbedarf besteht:

- Die Ursachen-Wirkungs-Beziehung zwischen normativen Einschränkungen und Performance-limitierungen sollte detaillierter untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen zwar, dass sich Systemintegratoren eingeschränkt fühlen, der konkrete Einfluss auf messbare Performance-kennzahlen bleibt jedoch unklar.
- Eine quantitative Erhebung mit größerer Stichprobe wäre wünschenswert, um die identifizierten Tendenzen statistisch abzusichern und repräsentative Aussagen zu ermöglichen.
- Der Vergleich zwischen verschiedenen Unternehmensgrößen verdient eine systematische Untersuchung. Die Hinweise auf unterschiedliche Rahmenbedingungen in KMU und Großkonzernen rechtfertigen eine vertiefte Analyse.
- Eine Längsschnittstudie könnte die Entwicklung der Einstellungen gegenüber datenbasierten Ansätzen im Zeitverlauf erfassen, insbesondere nach der Einführung erster marktreifer Lösungen.
- Die MRK-Technologie steht möglicherweise an einem kritischen Punkt ihrer Entwicklung. Der prognostizierte Marktboom und die zunehmende industrielle Akzeptanz treffen auf anhaltende Herausforderungen im Bereich der Sicherheit und Normung. Datenbasierte Ansätze zur Unterstützung der Risikoanalyse haben das Potenzial, diese Herausforderungen zu adressieren und die Performancelimitierungen aktueller MRK-Anlagen zu überwinden.

Der Erfolg solcher Ansätze dürfte davon abhängen, ob es gelingt, den konkreten Nutzen für die Anwender überzeugend zu demonstrieren, Vorbehalte bezüglich Datenschutz und Normenkonformität auszuräumen und praktische Erfolgsbeispiele zu generieren. Die vorliegende Untersuchung liefert dafür eine Grundlage und zeigt konkrete Ansatzpunkte für die weitere Entwicklung auf.

Die Zukunft der MRK liegt in der adaptiven Kopplung menschlicher Entscheidungsfähigkeit mit robotischer Wiederholgenauigkeit bei gleichzeitig dynamischer Risikobewertung zur Laufzeit. Datenbasierte Methoden, insbesondere lernbasierte Absicherungsansätze wie CARA, ermöglichen es erstmals, diese Kopplung normkonform nach ISO 10218-2 und ISO/TS 15066 zu validieren, ohne auf konservative Worst-Case-Annahmen zurückzufallen. Damit erschließen sich Anwendungsfelder, die bislang aus Sicherheitsgründen ausgeschlossen waren: mobile Manipulation, humanoide Assistenzsysteme und variantenreiche Kleinserienmontage.

Liste der Standards und Normen

ISO 10218-1: Robots and robotic devices –Safety requirements for industrial robots Part 1: Robots

ISO 10218-2: Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots Part 2: Robot systems and integration

ISO 12100_2011: Safety of machinery – General principles for design –Risk assessment and risk reduction

ISO 13849-1: Robots and robotic devices –Safety requirements for industrial robots Part 1: Robots

ISO 13854_2020: Safety of machinery – Minimum gaps to avoid crushing of parts of the human body

ISO 13855_2010: Safety of machinery – Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body

ISO 13857_2020: Safety of machinery – Safety distances to prevent hazard zones being reached by upper and lower limbs

ISO TS 15066_2016: Technical Specification – Robots and robotic devices – Collaborative robots

IEC 62061: Safety of machinery: Functional safety of electrical, electronic and programmable electronic control systems

Fraunhofer

Die Fraunhofer-Gesellschaft mit Sitz in Deutschland ist eine der führenden Organisationen für anwendungsorientierte Forschung. Im Innovationsprozess spielt sie eine zentrale Rolle – mit Forschungsschwerpunkten in zukunftsrelevanten Schlüsseltechnologien und dem Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zur Stärkung unseres Wirtschaftsstandorts und zum Wohle unserer Gesellschaft. Seit ihrer Gründung als gemeinnütziger Verein im Jahr 1949 nimmt sie eine einzigartige Position im Wissenschafts- und Innovationssystem ein.

Knapp 32 000 Mitarbeitende an 75 Instituten und selbstständigen Forschungseinrichtungen in Deutschland erarbeiten das jährliche Finanzvolumen von 3,6 Mrd. €. Davon entfallen 3,1 Mrd. € auf das zentrale Geschäftsmodell von Fraunhofer, die Vertragsforschung. Im Vergleich zu anderen öffentlichen Forschungseinrichtungen bildet die Grundfinanzierung durch Bund und Länder lediglich das Fundament des jährlichen Forschungshaushalts. Sie ist die Basis für wegweisende Vorlaufforschung, die in den kommenden Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft bedeutend wird. Das entscheidende Alleinstellungsmerkmal ist der hohe Anteil an Wirtschaftserträgen, der Garant ist für die enge Zusammenarbeit mit Wirtschaft und Industrie und die stetige Marktorientierung der Fraunhofer-Forschung: 2024 beliefen sich die Wirtschaftserträge auf 867 Mio. € des laufenden Haushalts. Ergänzt wird das Forschungsportfolio durch im Wettbewerb erworbene öffentliche Projektmittel, wobei eine ausgewogene Balance zwischen öffentlichen und wirtschaftlichen Erträgen angestrebt wird.

Wir produzieren Zukunft

Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, kurz Fraunhofer IPA, realisiert hoch innovative und nachhaltige Lösungen in der Produktionstechnik und Automatisierung für verschiedenste Zukunftsbranchen. Dies können Methoden, Komponenten und Geräte bis hin zu kompletten Maschinen und Anlagen sein. Die Lösungen stehen stets in Verbindung mit den strategischen Eckpfeilern des Instituts »Mass Sustainability« und »Mass Personalization«. Seine Hauptaufgabe sieht das Institut im Wissens-, Innovations- und Technologietransfer von Forschungsergebnissen in Applikationen, um die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen zu stärken. Dabei versteht es sich als unabhängiger Ansprechpartner, der neutral berät und Unternehmen mit genau auf deren Bedürfnisse zugeschnittenen Projektteams unterstützt.

Impressum

Kontaktadresse

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Aulon Bajrami

Telefon +49 711 970-3722
aulon.bajrami@ipa.fraunhofer.de

Titelbild

Rainer Bez, © Fraunhofer IPA

Gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit
und Tourismus Baden-Württemberg

CC-BY-NC-ND-Lizenz



Kontakt

KI-Fortschrittszentrum
Fraunhofer IAO und Fraunhofer IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.ki-fortschrittszentrum.de

Aulon Bajrami
Telefon +49 711 970-3722
aulon.bajrami@ipa.fraunhofer.de

Fraunhofer IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de



Gefördert durch



Partner

