

Neue Planungsmethodik für Anlagen mit Mensch-Roboter-Kollaboration

Johannes Kurth und
Marcel Wagner, Augsburg

Die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ist weiterhin in aller Munde. Es gibt erfolgreiche Anwendungen. Der große Durchbruch hat jedoch noch nicht stattgefunden. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass MRK in der Einführungsphase nur in bestehende Anlagen integriert wurde, die aber nicht für MRK vorbereitet oder geeignet sind [1]. Die ganzen Vorteile von MRK werden erst bei Neuanlagen nutzbar, aber auch nur dann, wenn neue Methoden zur Planung der Anlage genutzt werden. Dieser Beitrag zeigt auf, welche Änderungen notwendig sind, und stellt eine erweiterte Planungsmethodik sowie Planungsprinzipien für MRK vor.

Einleitung

Bei der Einführung neuer Technologien müssen diese üblicherweise ihre Eigenschaften und Nutzen erst in bestehenden Anlagen nachweisen. So kann aus Anwendersicht das Risiko klein gehalten und erste Erfahrungen mit der Technologie gewonnen werden. Dies galt auch für die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK). Seit der Vorstellung erster Roboter mit entsprechenden Sicherheitsfunktionen für den kollaborierenden Betrieb im Jahr 2014 werden MRK-Lösungen in bestehende Anlagen integriert, was aber nur in seltenen Fällen zu technisch und wirtschaftlich überzeugenden Lösungen führt. Woran liegt das?

MRK bei bestehenden Anlagen

Bestehende Anlagen (Brownfield) wurden planerisch nie für die Mensch-Roboter-Kollaboration vorbereitet. Ganz im Gegenteil. Die Arbeitsinhalte wurden konsequent entweder auf manuelle Arbeitsplätze oder auf vollautomatisierte Roboterstationen hinter einem Schutzzaun oder Lichtgitter bzw. Scanner aufgeteilt. Die manuellen Arbeitsplätze wurden so ausgetaktet, dass der Mensch bezüglich seiner Fähigkeiten und benötigten Zeit optimal eingesetzt wird. Zwei sehr wichtige Aspekte sind:

Menschliche Fähigkeiten und Nutzungsgrad

Würde man versuchen, einen Menschen technisch nachzubilden, so würde er in etwa aus den in Bild 1 dargestellten Komponenten bestehen.

Ein 7-Achs-Roboter wäre dabei nur eine von vielen optimal aufeinander abgestimmten Komponenten. Dies zeigt, wie unfair eigentlich der Wettbewerb von Mensch zu Roboter ist. Hat ein einzelner Roboter da wirklich eine Chance? Ja, und zwar immer dann, wenn die Fähigkeiten des Menschen gar nicht umfassend genutzt werden. Ein schönes Beispiel ist das Verschrauben, bei dem der Mensch mit einem Handschrauber mehrere Schrauben anzieht. Dies findet einarmig statt. Damit werden lediglich 50 Prozent seiner Kapazität genutzt. Während des Schraubvorgangs kann der Mensch ebenfalls nur warten. Die Fähigkeiten der

einzelnen Finger werden gar nicht benötigt. Könnte sich der Mensch Positionen im Raum besser merken, dann könnte er die Aufgabe auch problemlos blind durchführen. Grob geschätzt, haben wir hier einen Nutzungsgrad der menschlichen Fähigkeiten von rund 20 Prozent.

Ganz anders sieht das bei komplexeren Fügetätigkeiten, wie z. B. dem Einsetzen einer biegeschlaffen Dichtung in eine Nut, aus. Bereits bei der Entnahme der Dichtung aus einem Kleinladungsträger und einer Sichtprüfung der Dichtung werden alle Fähigkeiten des Menschen inkl. seiner zwei Arme benötigt. Gleiches gilt für das Einlegen der Dichtung in die



Bild 1. Wesentliche Komponenten eines technisch nachgebildeten Menschen

Nut und das Glattstreichen mit der Haptik der Finger. Tätigkeiten mit einem sehr hohen Nutzungsgrad der menschlichen Fähigkeiten sollten deshalb auch beim Menschen verbleiben.

Zeitliche Auslastung

In verketteten Montagearbeitsplätzen wird in der Regel der Arbeitsinhalt so ausgelegt, dass jede Person ihre Arbeitsinhalte innerhalb der Taktzeit gut bearbeiten kann, ohne dass größere Pausenzeiten entstehen. Ist eine bestehende Anlage in diesem Sinne gut geplant, dann wird auch deutlich, warum die Vorteile von MRK dort nicht vollständig zur Wirkung kommen. Durch die Integration eines MRK-Roboters wird der Mensch in der Regel nur anteilig entlastet. Die gewonnene Arbeitszeit der Person kann jedoch selten sinnvoll genutzt werden, da der vor- und nachgelagerte Arbeitsplatz ja optimal ausgetaktet ist. Die Personen benötigen keine Unterstützung. Andere Tätigkeit sind räumlich oft zu weit weg, was zu unproduktiven Laufwegen führen würde.

In seltenen Fällen gibt es Ausnahmen. So kann es zum Beispiel durch nachträglich hinzugefügte Arbeitsumfänge (z. B. Kleben wegen Festigkeit) zu einer Auslastung von mehr als 100 Prozent kommen. Durch den MRK-Roboter wird der Mensch in dem Maße entlastet, dass er die verbleibenden Tätigkeiten wieder gut im Takt ausführen kann.

Ein weiteres Beispiel ist ein Arbeitsplatz mit sehr geringem Nutzungsgrad der menschlichen Fähigkeiten. Hier kann es im Einzelfall möglich sein, dass ein MRK-Roboter mit minimaler Unterstützung der Person der vor- und/oder der nachgelagerten Arbeitsplätze die Aufgabe ganz übernehmen kann. Beide Fälle kommen aber so selten vor, dass diese nicht zum Durchbruch von MRK ausreichen.

Wenn man jedoch nicht nur einen Arbeitsplatz betrachtet, sondern bereit ist, gleich mehrere Arbeitsplätze umzugestalten, dann ergeben sich ganz neue Möglichkeiten, da man jetzt die Arbeitsinhalte nach neuen Kriterien verteilen kann. Dies rechnet sich aber bei Bestandsanlagen, in die bereits investiert wurde, in der Regel nicht. Bei ihnen müssen sich nachträgliche Investitionen je nach Endanwender innerhalb eines oder eineinhalb Jahren amortisieren, was kostenaufwändige Umbauten nicht zulässt.



Bild 2. Anlage zur Verschraubung der Pendelstütze (Quelle: Volkswagen AG ©)

MRK bei Neuanlagen

Bei MRK in Neuanlagen gelten ganz andere Rahmenbedingungen. Alle Planungsaspekte von MRK können von Beginn an berücksichtigt werden. Eine optimierte Aufteilung der Arbeitsinhalte auf Mensch und Roboter ist möglich. Damit kann das ganze Potential von MRK ausgeschöpft werden. Zudem stehen deutlich höhere Investitionsmittel als beim Umbau von Bestandsanlagen zur Verfügung.

Bevor auf die Planung einer Anlage mit MRK genauer eingegangen wird, werden im Folgenden die Vorteile von MRK noch mal kurz beschrieben:

- *Geringerer Flächenbedarf*
Mensch und Roboter können auf engstem Raum zusammenarbeiten. Eine Verdichtung von Arbeitstätigkeiten auf kleiner Fläche ist somit möglich (Bild 2 und Bild 3).
- *Verbesserung der Prozessqualität*
Der Roboter kann qualitätskritische Prozesse übernehmen. Er arbeitet wiederholgenau ohne Schwankungen im Prozess.
- *Verbesserung der Ergonomie am Arbeitsplatz*
Der Roboter kennt keine ergonomisch ungünstigen Posen, wie zum Beispiel Überkopparbeit oder gekrümmte Körperhaltung. Er kann



Bild 3. Werkerin und Roboter montieren gemeinsam ein Hinterachsgetriebe [2] (Quelle: KUKA Systems GmbH ©)

auch belastende Prozesse, wie zum Beispiel das Setzen von Clipsen, ohne Probleme übernehmen, wo hoher Druck auf kleiner Fläche aufgebracht werden muss.

- **Inline-Prozessüberwachung**
Der Roboter kann im laufenden Prozess qualitätsüberwachende Maßnahmen durchführen. Mit dem LBR iiwa kann man z. B. prüfen, ob ein Einrastvorgang vollständig und korrekt erfolgt ist, indem der Roboter nach dem Fügen in umgekehrter Richtung an dem Bauteil zieht. Bewegt sich der Roboter nicht, so wurde der Prozess korrekt durchgeführt.
- **Roboter ist „Datensammler“ für Industrie-4.0-Konzepte**
Dieser Vorteil gilt besonders bei bisher kaum oder gar nicht automatisierten Fertigungslinien. Hier sind oft nur wenige Daten vorhanden und die Mitarbeiter sollen nicht mit der Eingabe von Daten belastet werden. Das kann jetzt der Roboter übernehmen, indem er an ein Edge Gateway oder direkt an die Cloud angebunden ist.
- **Wandlungsfähigkeit**
Wird die Roboterlösung auf einem ortsveränderlichen Wagen realisiert (Bild 4), dann kann sie schnell von einem Einsatzort zu einem anderen verlagert werden. So können bestehende Fertigungslinien ohne großen Aufwand an sich ändernde Anforderungen angepasst werden. Die lange geforderte Wandlungsfähigkeit ist gegeben.
- **Schnelle Störungsbehebung**
Kommt es bei klassischen Roboterzellen mit Schutzzaun zu einer Störung im Ablauf, wie z. B. das Blockieren des Roboters beim Ablegen oder Fügen eines Bauteils, muss der Roboter ge-

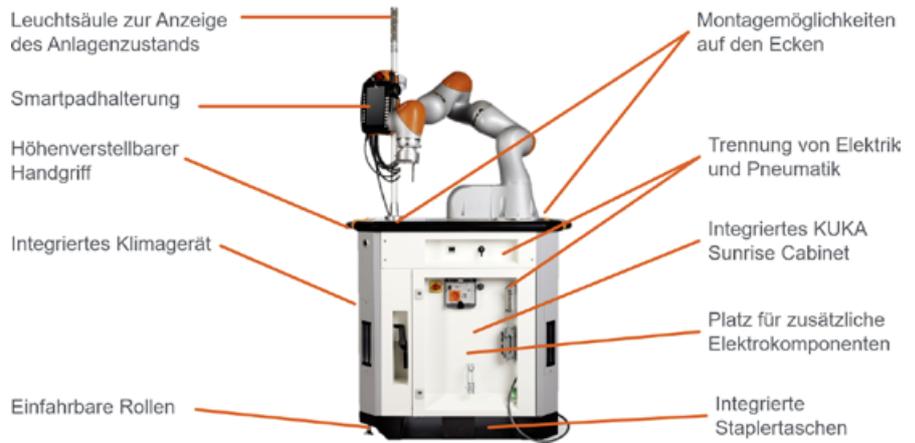


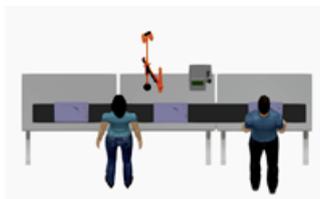
Bild 4. Eine ortsveränderliche Anlage (KUKA flexFELLOW)

stoppt, freiefahren und in den sicheren Halt gesetzt werden. Dann kann der/die Instandhalter/in die Schutztür öffnen, den Fehler beheben und nach Verlassen der Zelle den Roboter wieder starten. Dies kostet Zeit. Bei einer sicher ausgelegten und realisierten MRK-Anlage mit einem sensitiven Roboter kann der/die Anlagenbediener/in ohne spezielle Fachkenntnisse im laufenden Betrieb das Problem durch leichtes Schieben des Roboters schnell und einfach lösen.

- **Geringere Kosten für Back-up-Lösungen**
Bei automatisierten Anlagen ist immer auch das Szenario zu betrachten, dass eine Automatisierungskomponente ausfällt. Für diesen Fall braucht es eine schnelle Back-up-Lösung, um den Produktionsausfall gering zu halten. Auch hier kommt der Vorteil der wandlungsfähigen Anlage in Abbildung 4 zum Tragen. Sollte es zu einer Störung kommen, kann die ganze Einheit schnell aus der Fertigungslinie

genommen werden. Da es keine weiteren Einbauten gibt, kann ein Springer an gleicher Stelle durch manuelle Tätigkeit die Zeit überbrücken, die für die Reparatur benötigt wird. In der nächsten Pause kann die automatisierte Teilanlage wieder in die Fertigungslinie eingebracht werden.

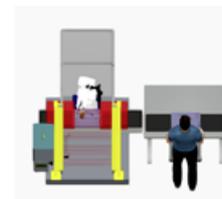
- **Anteilige Personaleinsparung**
Durch den Einsatz des Roboters können auch anteilig Personen eingespart werden. Dies ist gerade vor der demographischen Entwicklung und dem damit verbundenen Mangel an Arbeitskräften hilfreich, da so Produktion innerhalb der Industrieländer gehalten werden kann. Normalerweise wird dieser Punkt immer als Erster genannt, da er sich in Berechnungen zum Return-on-Invest (RoI) am einfachsten beziffern lässt. In Zukunft wird es aber immer wichtiger, auch den vorgenannten Vorteilen in der RoI-Berechnung einen Geldwert zuzuordnen, da man sie ansonsten nicht realisiert.



- a) **Manuelles Verschrauben**
- Manuelles vorstecken der Schrauben
 - Positionsüberwacher Handschrauber
 - Manuelle Montagetätigkeit in zweiter Arbeitsstation



- b) **MRK-Arbeitsplatz**
- Manuelles Vorstecken der Schrauben
 - Automatisiertes Verschrauben
 - Parallele manuelle Montagetätigkeit



- c) **Automatisiertes Verschrauben**
- Zugeschossene Schrauben
 - Automatikschrauber
 - Manuelle Montagetätigkeit in zweiter Arbeitsstation

Neu
Bedarf aber neuer Vorgehensweise in der Planungsphase

Bild 5. Exemplarische Erweiterung der Planungskonzepte für eine einfache Montage

Damit diese Vorteile umfänglich genutzt werden können, muss die bisherige Planungsmethodik von Anlagen erweitert und auf die neuen Möglichkeiten angepasst werden. An einem einfachen Beispiel soll dies verdeutlicht werden. Es soll eine Anlage geplant werden, in der ein paar schwer zu automatisierende Montageschritte und einige Verschraubungen durchzuführen sind. Bisher wurde zwischen manueller und automatisierter Montage unterschieden. Dies würde zu den beiden Varianten a) und c) in Bild 5 führen. Bei Variante c) ist der gesamte Schraubprozess inklusive der Schraubenvereinzelung und des Zuschießens der Schrauben automatisiert. Da ein klassischer Industrieroboter zum Einsatz kommt, ist er durch einen Schutzzaun und ein Lichtgitter abgesichert. Diese Art der Planung wird seit vielen Jahren beherrscht.

Neu ist Variante b), die bezüglich des Automatisierungsgrades dazwischen liegt. Hier übernimmt der Mensch das Vorstecken der Schrauben. Wegen der Genialität seiner Hände kann der Mensch diesen Vorgang sehr schnell ausführen. Während der Mensch nun die schlecht zu automatisierenden Aufgaben, wie z.B. das Einsetzen von biegeschlaffen Gummidichtungen, durchführt, übernimmt der Roboter die Verschraubung. Durch den Einsatz eines MRK-fähiger Roboters können beide gleichzeitig und platzsparend ihre Aufgaben durchführen. Durch den Wegfall der Schraubenvereinzelung werden zusätzlich Fläche, Energie und Kosten für die Wartung eingespart. Ein weiterer Vorteil der Variante b) ist die Wandlungsfähigkeit. Sollte sich bei einem Produktwechsel der Schraubenkopf und/oder die Länge ändern, bedarf es nur eines Bitwechsels und/oder einer Programmänderung in der Robotersteuerung.

Neue Planungsmethodik für MRK

Dieses oben beschriebene Beispiel war übersichtlich. Bei komplexeren Anlagen mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Arbeitsfolgen wird es am Ende auf eine Kombination aller drei Varianten (manuell, MRK, Vollautomation) hinauslaufen. Die bisherige Planungsmethodik muss erweitert werden.

Im Folgenden wird auf die Änderungen näher eingegangen. Bei einer Neuanlage sind zunächst alle Montageschritte zu

Bild 6. Stopfensetzen in der Fahrzeugmontage mit dem sensitiven Leichtbauroboter LBR iiwa



klassifizieren. Dabei sind immer zwei Fragen zu beantworten. Erstens ist der Prozessschritt auch unter wirtschaftlichen Bedingungen für die Automatisierung geeignet? Nicht alles was technisch machbar ist, ist auch wirtschaftlich. Aufgaben mit einem geringen Nutzungsgrad der menschlichen Fähigkeiten wie das Verschrauben sind in der Regel gut und wirtschaftlich automatisierbar. Zweitens kann ein automatisierbarer Prozessschritt auch in Kombination mit MRK realisiert werden? Ein Schweißprozess wäre zum Beispiel nicht MRK-geeignet.

Unter Berücksichtigung des Montagegraphen lassen sich nun Cluster gleicher oder ähnlicher Automatisierungstätigkeiten bilden. Dies ist sinnvoll, da es besonders wirtschaftlich ist, wenn ein Roboter möglichst wenige, am besten aber nur einen Prozess durchführt. Dann entfallen unproduktive Wechselzeiten des Endeffektors bzw. werden die Endeffektoren einfacher, da die Komplexität von Multitools vermieden wird. Jetzt müssen die Aufgaben so auf Mensch und Roboter verteilt werden, dass alle Ressourcen gut ausgelastet werden. Diese grobe Aufteilung wird jetzt in ein Anlagenkonzept mit Layout und Ressourcenzuordnung umgesetzt. Hierbei kann es zu einer Dysbalance auf Zellebene kommen. Im Zweifelsfall übernimmt der Mensch vom Roboter Aufgaben, auch wenn diese an sich gut automatisierbar wären, um längere Wartezeiten des Menschen zu vermeiden. Alternativ können auch Inhalte auf andere Stationen verteilt werden. Dieser Planungsschritt ist ein iteratives Vorgehen. Wenn das Konzept positiv bewertet wurde, beginnt die Anlagendetaillierung.

Bei der Gestaltung des Anlagenkonzeptes sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

■ Nachempfinden der manuellen Tätigkeit vermeiden

Gerade in bislang wenig automatisierten Umgebungen, lässt sich beobachten, dass in der Planung versucht wird, die manuelle Tätigkeit durch einen Roboter nachzuempfinden. Dies führt aber selten zur besten Lösung. Der manuelle Arbeitsplatz ist für den Menschen, seine Stärken und Einschränkungen gestaltet worden. Der Roboter kennt aber viele der menschlichen Einschränkungen nicht. Er muss nicht auf Ergonomie, Erschöpfung usw. Rücksicht nehmen. Damit ergeben sich ganz andere Gestaltungsmöglichkeiten. Der Roboter kann zum Beispiel eine Verschraubung durchführen, indem er das Bauteil unter einem stationären Schrauber bewegt. Dies würde man einem Menschen nie zumuten.

■ Revolution statt Evolution

Bisher erfolgte die Planung von Anlagen immer evolutionär. Bei der Folgeanlage wurde auf das Konzept der bisherigen Anlage zurückgegriffen und alle erkannten Schwächen im neuen Konzept behoben. Diese Vorgehensweise hat sich in der Vergangenheit bewährt und zu sehr ausgereiften Anlagen geführt. Bei MRK führt sie jedoch zu einem „geistigen Brownfield“ und ähnlich wie bei der Integration von MRK in Bestandsanlagen nicht zu den gewünschten Effekten. Deshalb ist jetzt Revolution notwendig. Bisherige Konzepte müssen zur Seite gelegt und Prozesse und Arbeitsinhalte neu gedacht werden.

■ Auslastung des Roboters

Die Automatisierung wird erschwert, wenn der Roboter wie der Mensch heutzutage viele unterschiedliche Tätigkeiten in einem Takt ausführen soll. Der

Mensch hat wegen der Flexibilität seiner Hände, der Zweiarmigkeit und der Tatsache, dass er alle Tätigkeiten im geschlossenen Regelkreis mit seinen Augen durchführt, wenig Probleme damit. Bei der Zuordnung der Arbeitsinhalte auf die Roboter in einer Anlage ist deshalb darauf zu achten, dass ein Roboter möglichst nur einen Prozess ausführt. Das kann jedoch zu einer Unterauslastung des Roboters führen, wenn er nur in einer Station arbeitet. Durch eine geschickte Anordnung der einzelnen Arbeitsstationen im Layout kann die Anlage so gestaltet werden, dass der Roboter Arbeitsinhalte in zwei oder mehr Stationen übernimmt und damit auch wieder ausgelastet ist.

■ *Aufgabenzentrierte Entscheidung für Takt- oder Fließbetrieb*

Bei sehr großen Anlagen wie der Endmontage in einem Automobilwerk ist noch festzulegen, in welchen Bereichen die Anlage im Taktbetrieb oder im Fließbetrieb laufen soll. Beides gibt es heute, wobei der Fließbetrieb bei dem zurzeit noch hohen manuellen Arbeitsanteil Vorteile bietet und deshalb überwiegend genutzt wird. Durch den Fließbetrieb können die Menschen je nach Ausstattungsvariante des Fahrzeugs und dem damit verbundenen Montageinhalt temporär in die nächste Arbeitsstation mitwandern. Da sich Roboter nicht so einfach mit dem Produkt mitbewegen können, steigt mit dem Fließbetrieb die Komplexität und der technische Aufwand. Der Taktbetrieb ist hier deutlich einfacher zu beherrschen. Vorteilhaft für die Automatisierung ist der Fließbetrieb nur für den Fall, dass die Reichweite des Roboters begrenzt ist. Hier bewegt sich wie beim Stopfensetzen (Bild 6) das Produkt zum Roboter und nicht umge-

kehrt. Damit können trotz kleiner Reichweite der MRK-fähigen Roboter zum Beispiel alle Stopfen am Längsträger eines Fahrzeugs gesetzt werden.

In diesem Zusammenhang sollte auch der Verbaupunkt bestimmter Komponenten überdacht werden. Wenn es der Vorranggraph zulässt, können so Montageinhalte in bevorzugte Zonen mit Takt- oder Fließbetrieb verschoben werden.

Diese neuen Aspekte einer MRK-gerechten Planung stellen die Planenden am Anfang vor eine gewisse Herausforderung. Als Lohn für diese Anstrengung winkt eine hoch produktive, wirtschaftliche Anlage mit ergonomisch optimierten Arbeitsplätzen. Zudem lassen sich nun auch Prozesse automatisieren, die bisher an den zu hohen Kosten für eine Automatisierungsgerechte Zu- und Abführung von Bauteilen gescheitert sind. Damit kann die Automatisierung in Bereiche vorstößen, die ihr bisher verschlossen waren.

Die Lernkurve bei der Planung von Anlagen kann durch MRK-erfahrene Experten/innen sehr erfolgreich unterstützt werden, vor allem dann, wenn diese bereits selbst Anlagen realisiert und dabei für eine Vielzahl von Herausforderungen Lösungen entwickelt haben.

■ **Literatur**

1. Kurth, J.: Mensch-Roboter-Kollaboration: Mehr als nur ein Hype! atp magazin (2019) 5, S. 46–50
2. https://www.youtube.com/watch?v=02TzqIvWiso&list=PLcmh-lxe_PW5Wu5kuWuTnog2DphB4keBR

Bibliography

DOI 10.3139/104.112419
ZWF 115 (2020) 10; page 698–702
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 0947–0085

■ **Die Autoren dieses Beitrags**

Dr.-Ing. Johannes Kurth studierte Maschinenbau an der RWTH Aachen und am Dartmouth College, USA, und promovierte 1994 am Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen. Seit 1995 ist er in verschiedenen leitenden Funktionen innerhalb der KUKA Gruppe tätig. Seit mehr als 13 Jahren beschäftigt er sich mit dem Thema Mensch Roboter Kollaboration (MRK), zunächst als Leiter Forschung & Vorentwicklung bei KUKA Robotics. Seit 2014 führt er den Bereich Engineering im Geschäftsfeld Advanced Technology Solutions bei KUKA Systems und hat dabei unter anderem neue Engineering- und Consulting Dienstleistungen im Bereich MRK aufgebaut.

Dr.-Ing. Marcel Wagner studierte Elektrotechnik/Robotik und Automatisierungstechnik an der TU Chemnitz und promovierte 2016 am Fraunhofer IWU sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der TU München in Produktionsplanung und -steuerung. Seit 2017 arbeitete er als Planer für MRK-Anlagen bei KUKA Systems und entwickelte mit Dr. Johannes Kurth den Bereich MRK-Consulting im Geschäftsfeld Advanced Technology Solutions. Seit 2020 leitet er den Bereich Engineering im Geschäftsfeld AGV Solutions in dem auch die mobilen MRK-Robotiklösungen von ihm verantwortet werden.

■ **Summary**

New Planning Methods for Systems with Human-robot Collaboration. Human-robot collaboration (HRC) remains a topic that everyone is talking about. There are successful applications. The major breakthrough has not yet occurred, however. One main reason for this is that in the introductory phase, HRC was only integrated into existing systems that were not prepared for HRC, nor suitable for it [1]. The full advantages of HRC can only be exploited in new systems, and, even then, only if new system planning methods are used. This article highlights what changes are necessary and presents an extended planning methodology and planning principles for HRC.