

WGP-STANDPUNKT INDUSTRIEARBEITSPLATZ 2025



»WGP-Standpunkt Industriearbeitsplatz 2025«

Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. ist ein Zusammenschluss führender deutscher Professorinnen und Professoren der Produktionswissenschaft. Sie vertritt die Belange von Forschung und Lehre gegenüber Politik, Wirtschaft und Öffentlichkeit. Die WGP vereinigt 64 Professorinnen und Professoren aus knapp 40 Universitäts- und Fraunhofer-Instituten und steht für rund 2.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Produktionstechnik. Die Mitglieder genießen sowohl in der deutschen Wissenschaftslandschaft als auch international eine hohe Reputation und sind weltweit vernetzt.

Die Labore der Mitglieder sind auf einem hohen technischen Stand und erlauben den Professorinnen und Professoren der WGP, in ihren jeweiligen Themenfeldern sowohl Spitzenforschung als auch praxisorientierte Lehre zu betreiben.

Die WGP hat sich zum Ziel gesetzt, die Bedeutung der Produktion und der Produktionswissenschaft für die Gesellschaft und für den Standort Deutschland aufzuzeigen. Sie bezieht Stellung zu gesellschaftlich relevanten Themen von Industrie 4.0 über Energieeffizienz bis hin zu 3D-Druck.

Impressum

Herausgeber

WGP Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V.
vertreten durch den Präsidenten Berend Denkena , Leibniz Universität
Hannover

Verantwortliche Autoren

Bernd-Arno Behrens, Leibniz Universität Hannover
Peter Groche, Technische Universität Darmstadt
Jörg Krüger, Technische Universität Berlin
Jens P. Wulfsberg, Helmut-Schmidt-Universität

Titelbild © Fraunhofer IPK

Inhalt

Management Summary	3
1 Warum dieser WGP-Standpunkt?	4
2 Begriffsbestimmung: Automatisierung und Autonomie	5
3 Umfrage	5
4 Werkzeugmaschinen und Produktionsanlagen am Arbeitsplatz 2025	10
4.1 Exkurs: Stufenmodell des automatisierten Fahrens	10
4.2 Automatisierungsgrade in der Produktion	10
4.3 Offene Forschungsfragen / Handlungsbedarf	21
5 Auswirkungen auf die Ausbildung für den Arbeitsplatz 2025	22
6 Wettbewerbsvorteile für Hochlohnländer	24
6.1 Bedeutung hochautomatisierter Fertigungssysteme für den Standort Deutschland	24
6.2 Auswirkungen auf die Beschäftigungsverhältnisse in Deutschland	24
6.3 Vorhandene Stärken weiter voranbringen	25
7 Referenzen	26

Management Summary

Digitalisierung und Industrie 4.0 nutzen autonome (Teil-)Systeme für flexible Automatisierungslösungen. Durch eine Automatisierung auf diesem Niveau können sich Produktionsanlagen auf veränderliche Produktionsbedingungen selbsttätig einstellen. Da derartige Anpassungen bislang weitgehend menschlichem Handeln vorbehalten waren, bergen Digitalisierung und Industrie 4.0 die Chancen und Risiken einer neuen Aufgabenteilung zwischen menschlicher und maschineller Arbeit. Die gesellschaftlichen Auswirkungen dieser Änderungen werden derzeit intensiv diskutiert.

In ihren Untersuchungen zu den gesellschaftlichen Auswirkungen von flexibler Automatisierung hat die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) Produktionsaufgaben in drei Kategorien eingeteilt: Realisierung von Informations- und Materialfluss, Bereitstellung fähiger Produktionsanlagen und qualifizierte Durchführung der Produktionsprozesse. Für diese drei Kategorien wurden Stufenmodelle der Automatisierung erarbeitet. In diesen stellen die Fähigkeiten qualifizierter Facharbeiter/-innen im Umgang mit Störungen im Produktionsablauf die höchste Stufe dar. Im Ergebnis zeigte sich, dass Automatisierungen von Informations- und Materialflüssen bereits weitgehend, Bereitstellungen von fähigen Produktionsanlagen teilweise und die Durchführung von Produktionsprozessen erst ansatzweise durch verfügbare flexible Automatisierungslösungen technisch realisierbar sind.

Aus der Analyse wird der weiterhin bestehende Bedarf an Mitarbeitern/-innen in der Produktion deutlich. Zwar übernehmen flexibel automatisierte Systeme mit autonomen Teilsystemen zunehmend Aufgaben von Menschen. Zugleich kristallisieren sich aber die Überwachung autonomer Anlagen und die Beschleunigung der Lernprozesse von autonomen Produktionsmaschinen als neue Aufgaben für Menschen in der industriellen Wertschöpfung heraus. Maßgeblich für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und Volkswirtschaften wird die Optimierung der Aufgabenteilung zwischen Menschen und Maschinen sein.

Als entscheidender Wettbewerbsfaktor ist die Lerngeschwindigkeit der autonomen Systeme zu sehen. Hier können sich deutsche Unternehmen durch die umfassende Einbeziehung des Wissens und des Prozessverständnisses ihrer hervorragend ausgebildeten Mitarbeiter/-innen in Kombination mit der Nutzung qualifiziert aufgenommener Daten wichtige Wettbewerbsvorteile verschaffen. Insbesondere für das Erreichen hoher Automatisierungsstufen in der Durchführung von Produktionsprozessen erscheint ein tiefgehendes technisches Verständnis gerade zukünftig unabdingbar.

Die Ausbildung von Mitarbeiter/-innen für die Produktion muss der deutlich gestiegenen Dynamik der Technologieentwicklungen angepasst

werden. Grundlegende Ausbildungsinhalte werden mehrfach im Berufsleben zu erlernen sein, da das Verhältnis der Dauern von Technologiekzyklen zu der Dauer eines Arbeitslebens deutlich kleiner als 1 wird. Die WGP sieht hierbei die kontinuierliche Ausbildung der Ausbilder/-innen als besonders relevant an. Hier schlägt sie eine enge Kopplung von wissenschaftlicher Tätigkeit zum Erwerb aktuellen Wissens und Ausbilder-tätigkeit zur Wissensvermittlung vor.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und freuen uns auf Ihre Rückmeldung.

1 Warum dieser WGP-Standpunkt?

Digitalisierung und Industrie 4.0 ziehen in großen Schritten in den Industrielltag ein [1]. Die damit einhergehende Weiterentwicklung von Produktionsanlagen zu cyber-physischen Systemen und deren Vernetzung führen zu einer Automatisierung mit höherer Flexibilität als wesentliches Merkmal der geforderten gesteigerten Adaptivität. Aufgrund der damit erwarteten automatisierten Beherrschung veränderlicher Produktionsbedingungen werden Digitalisierung und Industrie 4.0 unterschiedlich eingeschätzt. Einerseits gelten sie als Schlüsseltechnologien im internationalen Wettbewerb um die höchste Produktivität und andererseits als gravierende Bedrohung für die etablierte Arbeitswelt in Produktionsbetrieben. Beide Einschätzungen basieren auf der gleichen Erwartung: Für die erfolgreiche Realisierung von Produktionsabläufen unter schwankenden Produktionsbedingungen werden anstelle qualifizierter Facharbeiter/-innen mehr und mehr flexible Automatisierungslösungen eingesetzt.

Bei allem Verständnis für die euphorische Begeisterung auf der einen Seite und die berechtigten Ängste auf der anderen Seite sehen es die Wissenschaftler/-innen der WGP als notwendig an, den dazu **vorhandenen und zu erwartenden technologischen Stand zu ordnen und zu bewerten**. Der vorliegende Standpunkt fasst diese Erkenntnisse zusammen. Er spiegelt sie ferner an den Erwartungen repräsentativer industrieller Stakeholder und leitet Handlungsbedarf für Gesellschaft, Ausbildungssysteme und Wissenschaft ab.

Der ambivalente Charakter tiefgreifender technologischer Umwälzungen ("industrieller Revolutionen") ist bereits in vorangegangenen Entwicklungsstufen deutlich zu Tage getreten. In allen industriellen Revolutionen wurden Arbeitsbedingungen und erforderliche Qualifikationsprofile der Beschäftigten gravierend verändert. Die maßgeblichen Stimuli für diese Entwicklungen bestanden nicht nur in dem Verlangen nach höherer Produktivität, sondern ebenso in der Kompensation von Arbeitskräftemangel und dem Wunsch nach der Beherrschung einer höheren Produkt- und Prozesskomplexität.

Durch die Mechanisierung der **ersten industriellen Revolution** konnten die bis dahin vorhandenen Beschränkungen durch natürliche Energiequellen aufgehoben werden. Viele nicht fachlich ausgebildete Menschen fanden Arbeit und konnten bis dahin nicht für sie verfügbare Produkte erwerben. Andererseits verloren gut ausgebildete, spezialisierte Handwerker ihre Existenzgrundlage.

Während der zweiten industriellen Revolution gewann die Anwendung wissenschaftlich fundierter Methoden erheblich an Bedeutung. Die Neuauslegung bis dahin auf Basis von Empirie gestalteter Prozesse mit Hilfe von systematischen Gestaltungsansätzen verhalf zu erheblichen Pro-

duktivitätssprüngen. Infolgedessen verlor das empirische Wissen von Maschinenbediener/-innen und Prozessplaner/-innen an Bedeutung, während gleichzeitig Beschäftigung für umfassender ausgebildete Menschen entstand.

Als große Errungenschaft der **dritten industriellen Revolution** gilt die Einführung Speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS). Sie ermöglicht die Automatisierung unterschiedlicher Abläufe. Sich ständig wiederholende Arbeitsschritte können so Automaten überlassen werden. Zwar werden Beschäftigte durch die Automatisierung monotoner Arbeiten entlastet, doch die damit ausgelöste Automatisierungswelle geht mit großen Ängsten vor dem Verlust von Arbeitsplätzen einher. Zugleich müssen neue Aufgaben gelöst werden: Programmierung von Steuerungen, Engineering von komplexeren, automatisierten Produktionsanlagen und deren Überwachung und Wartung.

Die Entwicklungen der **vierten industriellen Revolution** zielen auf eine deutlich umfassendere Automatisierung von Prozessen. Neben monotonen Abläufen sollen auch Prozesse mit veränderlichen Prozess- oder Systemeigenschaften automatisiert werden. Für eine Adaption von Produktionsprozessen an veränderte Bedingungen, wie sie bei Schwankungen von z.B. Vormaterialeigenschaften, Betriebszuständen der Produktionsanlagen oder Umgebungsbedingungen auftreten, ist ein Eingriff durch Maschinenbediener/-innen nicht mehr erforderlich. Als Schlüsselfähigkeit der dafür notwendigen Produktionsanlagen wird deren „Autonomie“ angesehen [2]. Bislang fehlt eine Klassifizierung der durch autonome Teilsysteme erreichbaren Automatisierungsgrade. Dies soll in dem vorliegenden Standpunkt erfolgen.

Sollte diese neue Form der Automatisierung umfassend gelingen, wären gravierende Auswirkungen auf die industriellen Arbeitsplätze zu erwarten. Daher nimmt der Standpunkt auch Stellung zu der Frage, **welche Veränderungen in der Ausbildung für Tätigkeiten in den Produktionsbetrieben notwendig sind**. Technologische Veränderungen der Produktionssysteme gingen in der Vergangenheit stets auch mit neuen Betätigungsfeldern für Beschäftigte einher. Daher werden in dem vorliegenden Standpunkt auch Perspektiven für Wettbewerbsvorteile aufgezeigt.

Die Mitglieder der WGP möchten mit ihren gemeinsam erarbeiteten Erkenntnissen ihrer Verantwortung für die gesellschaftliche Entwicklung in Zeiten technologischer Umbrüche nachkommen. Dies umfasst einerseits die Vermittlung eines realistischen Bildes der erreichten und erreichbaren Fähigkeiten von hoch automatisierten Produktionssystemen und andererseits die zu erwartenden Änderungen der Industriearbeitsplätze sowie die Chancen auf neue Beschäftigungsfelder.

2 Begriffsbestimmung: Automatisierung und Autonomie

Für die nachfolgende Klassifizierung und Diskussion von automatisierten Produktionssystemen ist eine klare Begriffsbestimmung nützlich. Dies betrifft insbesondere den Zusammenhang zwischen Automatisierung und Autonomie.

Der Unterschied zwischen Automatisierung und Autonomie wurde durch das Fachforum Autonome Systeme herausgearbeitet [2]. Demnach sind starr automatisierte Systeme in der Lage, einen vorgegebenen Handlungsablauf durchzuführen, können aber weder die Konsequenz ihrer Handlungen verstehen noch den Ablauf ändern. Autonome Systeme sind in der Lage, ohne menschliche Steuerung (Eingriffe) oder detaillierte Programmierung ein vorgegebenes Ziel selbstständig und an die Situation angepasst zu erreichen. Als weiteres zentrales Merkmal eines autonomen Systems wird die Fähigkeit gesehen, sich bei der Mensch-Maschine-Interaktion an das Verhalten des Menschen anzupassen [2]. Diese grundsätzlichen Unterscheidungen haben maßgebliche Auswirkungen auf die Rolle des Menschen in automatisierten Systemen.

Bei der Entwicklung von starr automatisierten zu vollautomatisierten Produktionssystemen **spielen demnach autonome (Teil-)Systeme eine herausragende Rolle**. Über deren Eigenschaften ist bekannt:

- Autonome Teilsysteme können prinzipiell auf allen Stufen der Automatisierung wirken. Je höher der Automatisierungsgrad ausgeprägt ist, desto bedeutsamer wird die Fähigkeit zur autonomen Anpassung.
- Der Unterschied zwischen autonomen Assistenzsystemen in der Mensch-Maschine-Interaktion und autonomen Steuer- und Regelsystemen liegt darin begründet, dass die Anpassung an das menschliche Verhalten eine besondere Form der Adaption darstellt, da sie Mechanismen wie Intentionserkennung und kognitionspsychologische Aspekte einschließt.
- Autonome Steuer- und Regelsysteme ermöglichen ebenso wie autonome Assistenzsysteme eine Erhöhung des Automatisierungsgrades bei komplexen Produktionsabläufen ohne Einbußen hinsichtlich der Flexibilität.

3 Umfrage

Den mit der Automatisierung verknüpften Erwartungen und Ängsten wird besonders in Hochlohnländern wie Deutschland eine erhebliche Bedeutung beigemessen. Einerseits können die damit verbundenen technologischen Fortschritte dazu beitragen, Hochlohnländer als Produktionsstandort zu sichern, da diese eine lohnunabhängigere Produktion ermöglichen. Andererseits birgt der Transfer von Aufgaben von qualifizierten Facharbeitern auf autonome (Teil-) Systeme nachhaltige Veränderungen des Arbeitsmarktes hinsichtlich der geforderten Qualifikationen und des Personalbedarfs. In diesem Kontext stellt sich zudem die Frage, ob noch eine technisch-fachliche Standortbindung für die Produktion besteht, wenn der Bedarf an Facharbeiter/-innen aus heutigen Ausbildungsgängen sinkt. Eine zentrale Fragestellung der Automatisierung im Zuge von Digitalisierung und Industrie 4.0, die sich hieraus ergibt, ist die nach der Rolle der Menschen in der Produktion der Zukunft. In diesem Zusammenhang sind die sich ergebenden **Qualifikationsanforderungen** und Berufsbilder und deren Auswirkung auf die Ausbildung von besonderem Interesse. Hinsichtlich der veränderten Arbeitsanforderungen und den damit korrespondierenden Qualifikationsstrukturen der Belegschaften postulieren Pfeiffer et al. drei Szenarien [3].

Das erste Szenario Growing Gap geht von qualifikatorischer Weiterentwicklung und Konzentration für eine kleine Elite von Facharbeiter/-innen sowie für akademisch ausgebildete Mitarbeiter/-innen aus. Zugleich wird mit einem abnehmenden Qualifikationsniveau für das heute operativ geprägte Facharbeitssegment gerechnet, in dem künftig nur eine verkürzte Grundqualifikation oder lediglich ein Anlernen direkt am Arbeitsplatz erforderlich ist.

Das zweite Szenario General Upgrade beschreibt ein allgemeines Erhöhen des Qualifikationsniveaus mit erweiterten Anforderungsprofilen auf allen Qualifikationsstufen.

Das dritte Szenario Central Link erwartet eine Erhöhung des Qualifikationsniveaus und Aufwertung von bestimmten Beschäftigungsgruppen, die Schnittstellenpositionen zwischen vertikal und/oder horizontal gegliederten Hierarchieebenen bzw. Funktionsbereichen einnehmen.

Als Ergänzung dieser drei Szenarien ist auch ein Szenario General Downgrade denkbar. Hierbei wird von einem allgemeinen Senken des Qualifikationsniveaus ausgegangen.

Von der Flexibilisierung der Automatisierung besonders betroffen ist die Gruppe der Anlagen- und Maschinenbediener/-innen. Um die qualitativen Entwicklungen und Auswirkungen der Automatisierung auf diese Belegschaftsgruppierung abzuschätzen und den Handlungsbedarf für Gesellschaft, Ausbildungssysteme und Wissenschaft abzuleiten, wurde

eine Umfrage unter repräsentativen industriellen Stakeholdern durchgeführt. Hierbei sollten zum einen die maschinenseitig geprägte Sichtweise durch die Befragung von Hersteller/-innen von Produktionsanlagen und Werkzeugmaschinen und zum anderen die produkt- und prozesseitig geprägte Sichtweise durch die Befragung von Maschinennutzer/-innen einbezogen werden. Gegenstand der Befragung waren die aktuellen und zukünftigen Anforderungen an Mensch und Maschine und die dazu korrespondierenden Aufgabenbereiche. Beide Adressatengruppen erhielten auf sie angepasste Fragebögen. Insgesamt beteiligten sich 120 Unternehmen an der Befragung, von denen 45 der Adressatengruppe der Anlagen- und Maschinenhersteller/-innen und 75 der Adressatengruppe der Maschinennutzer/-innen zuzuordnen sind.

Die Branchenzugehörigkeit der befragten Unternehmen ist in Abbildung 1 dargestellt.

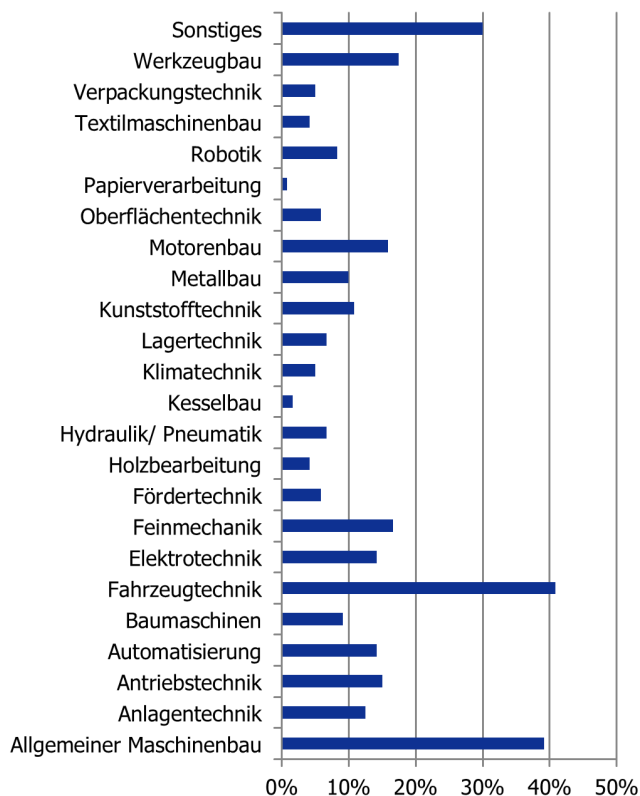


Abb. 1 Branchenzugehörigkeit der teilnehmenden Unternehmen

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Befragung vorgestellt und diskutiert.

Die Qualifikation der Gruppe der Maschinenbediener/-innen ist auf fachlich-technischer Ebene stark abhängig von den jeweiligen Fertigungsverfahren und der Branche. Eine differenzierte Betrachtung auf dieser Ebene ist daher erschwert. Aufgrund dessen wurde die Befragung der Unternehmen hinsichtlich der Anforderungen an die Maschinenbediener/-innen anhand allgemein gültiger Tätigkeitsfelder und Kompetenzen durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Befragungsergebnisse zu den Anforderungen an das maschinenbedienende Personal.

Bei beiden Adressatengruppen sind eindeutige Trends zu erkennen, die jedoch gegenläufig sind. Mit der Ausnahme der Adaption von Prozessparametern anhand von Maschinen- und Bauteildaten wird in der Adressatengruppe der Maschinennutzer/-innen von steigenden Anforderungen ausgegangen. Dies würde in Bezug auf die Gruppe der Maschinenbediener/-innen dem zuvor vorgestellten Szenario General Upgrade entsprechen. In der Adressatengruppe der Hersteller/-innen hingegen wird von einer allgemeinen Senkung der Anforderungen an die Maschinenbediener/-innen ausgegangen, was dem Szenario General Downgrade entsprechen würde.

Eine ähnlich gegenläufige Auffassung ergibt die Befragung hinsichtlich des notwendigen Schulungsaufwands (siehe Abbildung 3).

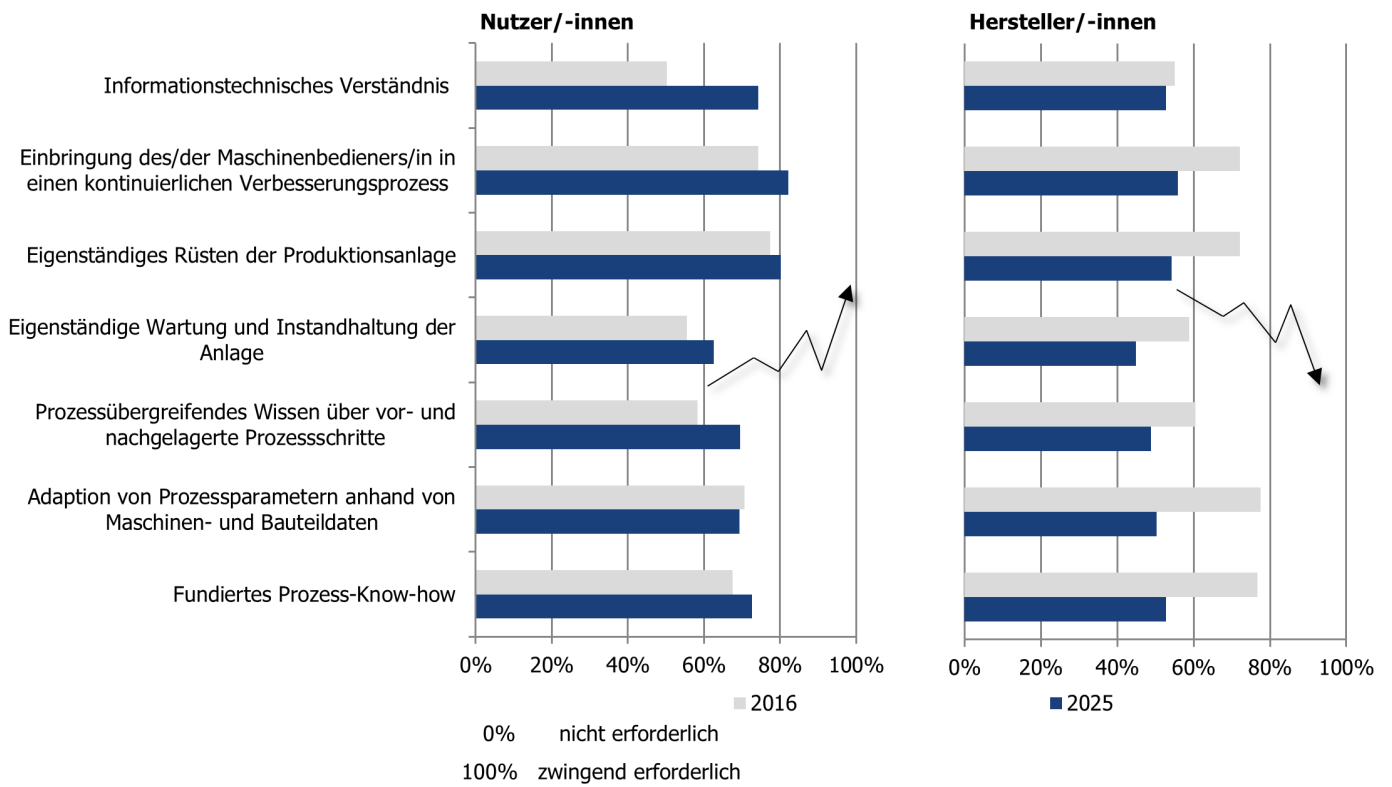


Abb. 2 Anforderung an Maschinenbediener/-innen

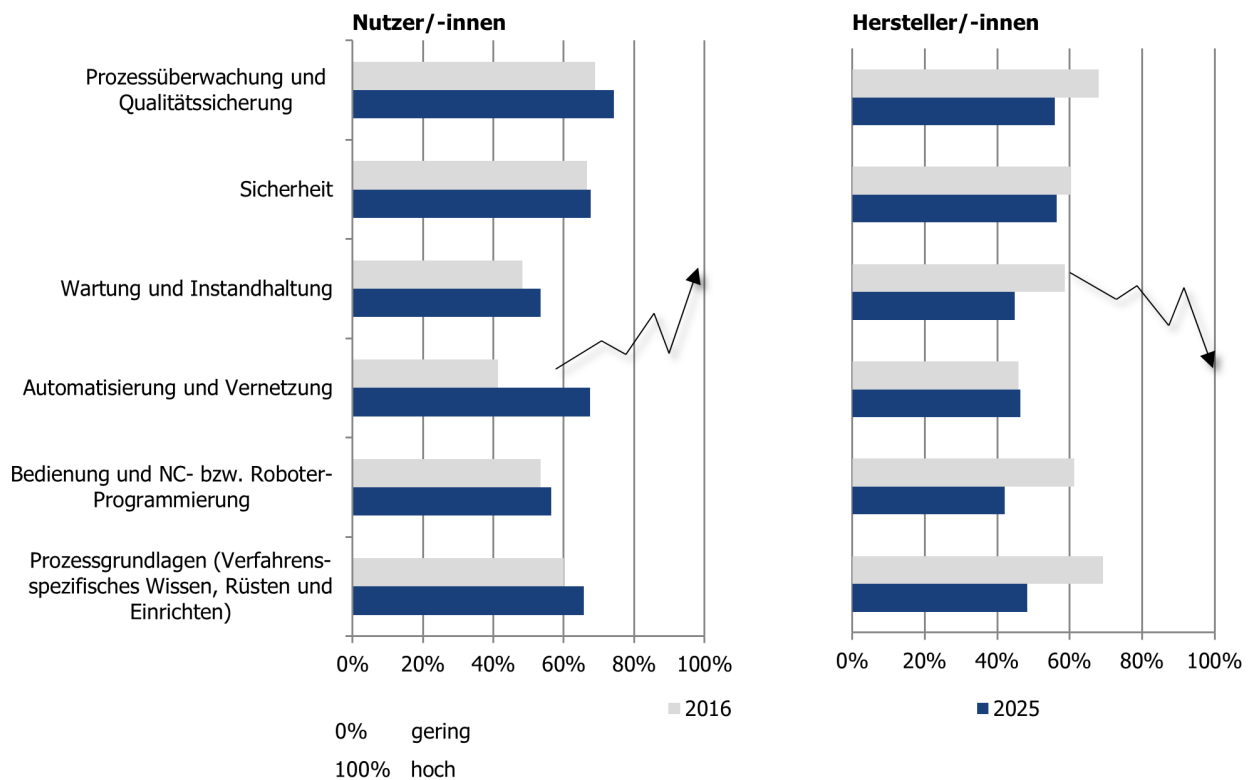


Abb. 3 Notwendiger Schulungsumfang für das Bedienen und Warten einer Produktionsanlage

Ein möglicher Grund für diese stark gegenläufigen Auffassungen kann die eingangs beschriebene unterschiedlich geprägte Sichtweise der Adressatengruppen sein. Die Automatisierung in der Produktion ist getrieben von einem Ausreizen der Prozessgrenzen bei gleichbleibender Prozessstabilität sowie Produktqualität und wird somit vorwiegend durch das jeweilige Produkt und die Prozesse geprägt. Maschinennutzer/-innen müssen auf Störeinflüsse vielfältiger Art reagieren können. Nur ein Teil davon hat einen direkten Bezug zur Produktionsanlage, weitere werden zum Beispiel durch Vormaterialeigenschaften oder Umgebungsbedingungen bestimmt. Vor allem die sensorische und aktorische Vernetzung von Produktionsprozessen und die Überwachung und Regelung von Produkteigenschaften machen stark individualisierte und komplexe Lösungen erforderlich. Zwar bieten Maschinenhersteller/-innen bereits fertig konfektionierte Maschinenlösungen an, jedoch wird die Entwicklung der beschriebenen individualisierten Lösungen in erheblichem Maße durch die Maschinennutzer/-innen angetrieben, was ein möglicher Grund für die steigenden Anforderungen aus Sicht der Nutzer/-innen ist. Des Weiteren bietet der aktuelle Stand der Technik auf der Prozessebene in weiten Teilen der Produktionstechnik noch nicht die Voraussetzungen für einen umfassenden Transfer der Aufgaben der Maschinenbediener/-

innen auf die Produktionsanlage. Vor allem die immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen und die zunehmende Produktdiversifikation tragen zu einer Steigerung der Komplexität und Variantenvielfalt von Prozessen bei, was eine Automatisierung zusätzlich erschwert und höhere Anforderungen an die Maschinenbediener/-innen mit sich bringt. Dies spiegelt sich auch an der Entwicklung der Belegschaft der befragten Maschinennutzer/-innen wieder, die einen deutlichen Trend zu höher qualifizierten Maschinenbediener/-innen aufzeigt (siehe Abbildung 4).

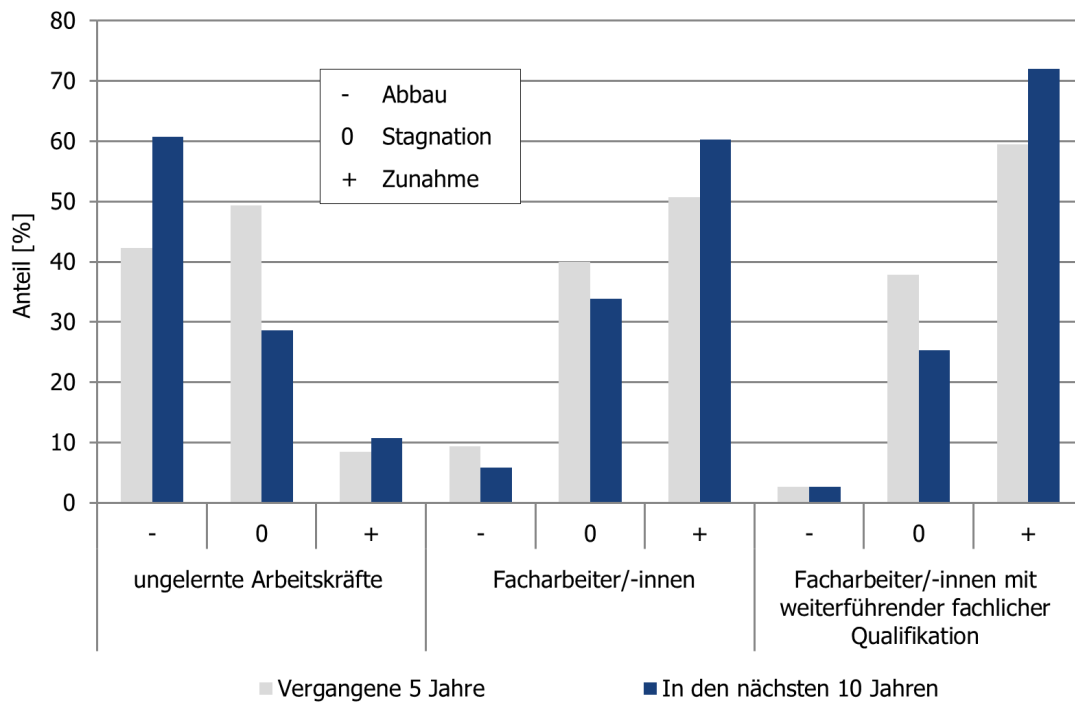


Abb. 4 Personalbedarf im Bereich der Anlagenbedienung

4 Werkzeugmaschinen und Produktionsanlagen am Arbeitsplatz 2025

Für eine Bewertung des aktuellen Entwicklungsstandes und einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungsschritte wird in diesem Kapitel ein Stufenmodell der Automatisierung in der industriellen Produktion vorgestellt.

Aus der Literatur sind eine Fülle von Stufenmodellen zur Bewertung von Mechanisierung und Automatisierung in der Produktion bekannt. Aufgrund unterschiedlich gewählter Gliederungsmerkmale war jedoch bereits zu Beginn der dritten Industriellen Revolution ein Vergleich der verschiedenen Stufensysteme schwierig [4]. Als Gliederungsmerkmale sind beispielsweise Informationsfluss, Materialfluss, Energiefluss, menschliche Tätigkeit sowie Steuer- und Regelmechanismen vorgeschlagen worden.

4.1 Exkurs: Stufenmodell des automatisierten Fahrens

In der thematisch fokussierten Domäne des automatisierten Fahrens wurden in jüngerer Zeit im Zusammenhang mit der schnell fortschreitenden Entwicklung in diesem Bereich Stufenkonzepte erarbeitet, die eine Grundlage für die systematische Fortentwicklung des automatisierten Fahrens bis zum fahrerlosen Betrieb darstellen (Abbildung 5) [5].

Auch in dieser Domäne werden in verschiedenen Quellen die Begriffe automatisiert und autonom synonym für die Beschreibung der höchsten Automatisierungsstufe verwendet. Als Gliederungsmerkmal dieses Stufenmodells ist die Automatisierung der Hauptfunktionen Vorwärts- und Seitwärtsfahren gewählt. Die unterschiedlichen Stufen der Automatisierung unterscheiden sich durch die Aufteilung der zugehörigen Aufgaben auf Fahrzeug und Fahrer/-in.

4.2 Automatisierungsgrade in der Produktion

Es stellt sich nunmehr die Frage, inwieweit eine analoge Struktur auch eine einheitliche Grundlage für die Beurteilung von Automatisierungsstufen in der Produktion im Hinblick auf zu erwartende Veränderungen des Industrie-/Produktionsarbeitsplatzes und unter Berücksichtigung autonomer Teilsysteme bilden kann.

Ältere Stufenmodelle der Automatisierung von Fertigungsprozessen nutzten die Art von Werkzeugen, Antrieben, Steuerungsarchitekturen oder Tätigkeitsprofilen von Maschinenbediener/-innen oder Maschinen als Gliederungsmerkmale [4]. Sie werden der Vielfalt der unterschiedlichen Tätigkeiten im Produktionsalltag nur begrenzt gerecht. Schon in

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Nur Fahrer/-in	Assistiert	Teilautomatisiert	Hochautomatisiert	Vollautomatisiert	Fahrerlos
Fahrer/-in führt dauerhaft Längs- und Querführung aus. Fahrer/-in Kein eingreifendes Fahrzeugsystem aktiv	Fahrer/-in führt dauerhaft Längs- oder Querführung aus. System übernimmt die jeweils andere Funktion	Fahrer/-in muss das System dauerhaft überwachen System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall	Fahrer/-in muss das System nicht mehr dauerhaft überwachen, muss potenziell in der Lage sein, zu übernehmen. System übernimmt Längs- und Querführung in einem spezifischen Anwendungsfall. Es erkennt Systemgrenzen und fordert den/die Fahrer/-in zur Übernahme mit ausreichender Zeitreserve auf	Kein(e) Fahrer/-in erforderlich im spezifischen Anwendungsfall. System kann im spezifischen Anwendungsfall alle Situationen automatisch bewältigen	Von „Start“ bis „Ziel“ ist kein(e) Fahrer/-in erforderlich. Das System übernimmt die Fahraufgabe vollumfänglich bei allen Straßentypen, Geschwindigkeitsbereichen und Umfeldbedingungen Fahrzeug

Abb. 5 Stufen des automatisierten Fahrens nach [5]

der Mitte des letzten Jahrhunderts schlug M. Begidshanow [4] vor, Produktionsaufgaben in drei Klassen einzuteilen: Materialfluss von und zu Maschinen, Wartung und Instandhaltung der Produktionsanlagen sowie die Produktionsprozesse an sich. Aus heutiger Sicht ist neben dem Material- auch der Informationsfluss von entscheidender Bedeutung. Damit ist für die Einteilung von Produktionssystemen nach Automatisierungsgraden eine Betrachtung von drei Aspekten sinnvoll: die Material- und Informationsflüsse (Vernetzung), die Sicherstellung der Anlagenfunktionalität (Betriebszustand) sowie der Produktionsprozess an sich (siehe Abbildung 6).

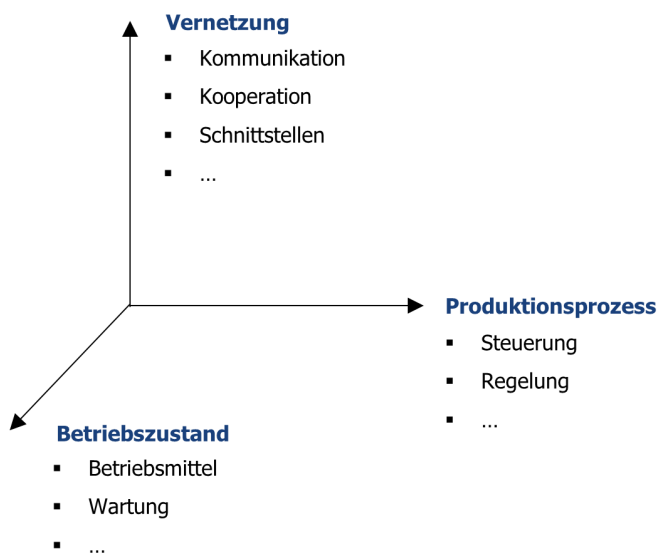


Abb. 6 Die drei Dimensionen von Produktionsaufgaben [6]

Nachfolgend werden die Automatisierungsgrade in jeder der drei Dimensionen von Produktionsaufgaben analysiert. Dafür erfolgt eine Aufteilung der Aufgaben auf Mensch und Produktionsanlage. Mit steigendem Umfang des Aufgabenbereichs der Produktionsanlage steigt deren Automatisierungsgrad.

Im **Aufgabenbereich Produktionsprozess** ist die Hauptaufgabe die Herstellung von spezifikationsgerechten Produkten. Dies schließt die Erkennung und Anpassung des Prozesses bis zum Erreichen der implizit und explizit vorgegebenen Produktmerkmale ebenso wie die Detektion auftretender Grenzen der Adaption ein. Während in den unteren Stufen der Automatisierung von der Produktionsanlage lediglich die notwendige Energie und die Prozessbedingungen bereitgestellt werden, übernimmt die Produktionsanlage ab Stufe 3 die Sicherstellung von Produktmerkmalen unter schwankenden Produktionsbedingungen (siehe Abbildung 7). Dafür wird eine Anpassungsfähigkeit benötigt, die durch autonome (Teil-)Systeme erreicht wird. Zugleich verfügt die automatisierte Anlage auf dieser Stufe über die Fähigkeit, Grenzen der Herstellung, die sich beispielsweise in der Unerreichbarkeit spezifizierter Produkteigenschaften zeigen können, eigenständig zu erkennen.

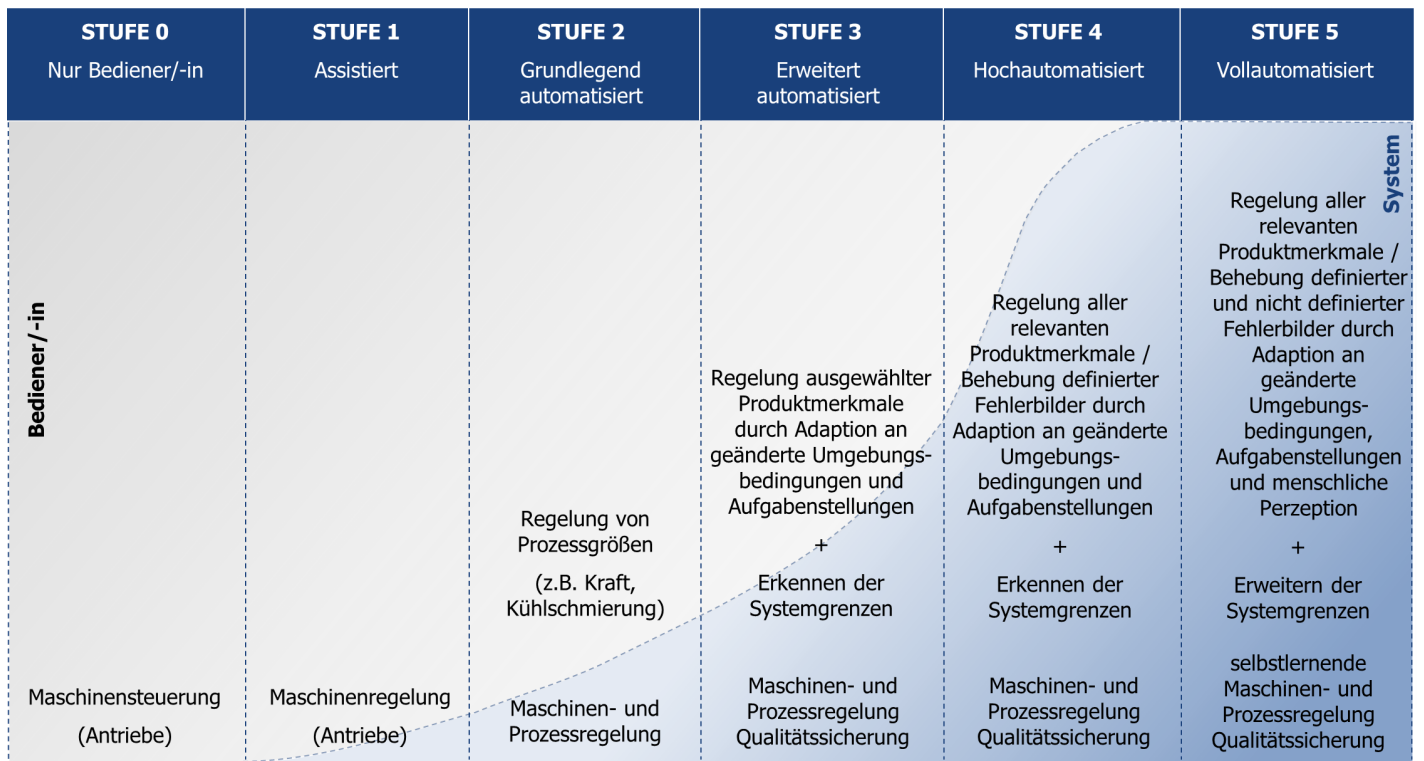


Abb. 7 Stufen der Automatisierung in der Dimension Produktionsprozess [6]

Der Übergang von menschlicher zu maschineller Aufgabenübernahme ist in insgesamt 6 Stufen gegliedert. Mit steigendem Automatisierungsgrad nehmen die von der Produktionsanlage übernommenen Anpassungen zur Kompensation von Störgrößen wie Maschinennachgiebigkeiten oder -ungenauigkeiten, Schwankungen der Eigenschaften von Vormaterialien, Maschinen- oder Werkzeugverschleiß zu. In gleichem Umfang schrumpfen die Aufgabenbereiche der Maschinenbediener/-innen. Nachfolgend werden die einzelnen Automatisierungsstufen kurz beschrieben und Beispiele aus der aktuellen Forschung vorgestellt:

Stufe 0: Das Bedienpersonal passt die Produktionsanlage an alle auftretenden Störeinflüsse an. Das Produktionssystem liefert die notwendige Leistung für die Prozesse.

Stufe 1: Ungenauigkeiten in dem Antriebsstrang der Produktionsanlagen werden durch geregelte Antriebe reduziert. Maschinenbediener/-innen passen die Produktionsparameter an die vorgegebenen Produktspezifikationen an.

Stufe 2: Die Produktionsanlage regelt ausgewählte Prozessparameter entsprechend den Vorgaben. Maschinenbediener/-innen passen die übrigen Produktionsparameter an die vorgegebenen Produktspezifikationen an.

Stufe 3: Die Produktionsanlage regelt ausgewählte Produkteigenschaften selbsttätig. Dafür erforderliche Anpassungen an geänderte Produktionsbedingungen erfolgen autonom. Die Maschinenbediener/-innen überwachen die übrigen Produkteigenschaften und greifen korrigierend ein, wenn Abweichungen oder Einstellungsgrenzen zulässige Wertebereiche überschreiten.

Die Möglichkeiten von Fertigungseinrichtungen auf dieser Stufe, die automatisch ausgewählte Produkteigenschaften realisieren können, zeigt ein Beispiel aus dem Smart Automation Lab des WZL der RWTH Aachen. In der dort realisierten „kognitiven Montagezelle“ erfolgt die automatische Umsetzung eines CAD Modells aus Lego-Duplo-ähnlichen Bauteilen unter Ausnutzung autonomer Fähigkeiten. Die Vorgehensweise ist in nachfolgender Abbildung visualisiert.

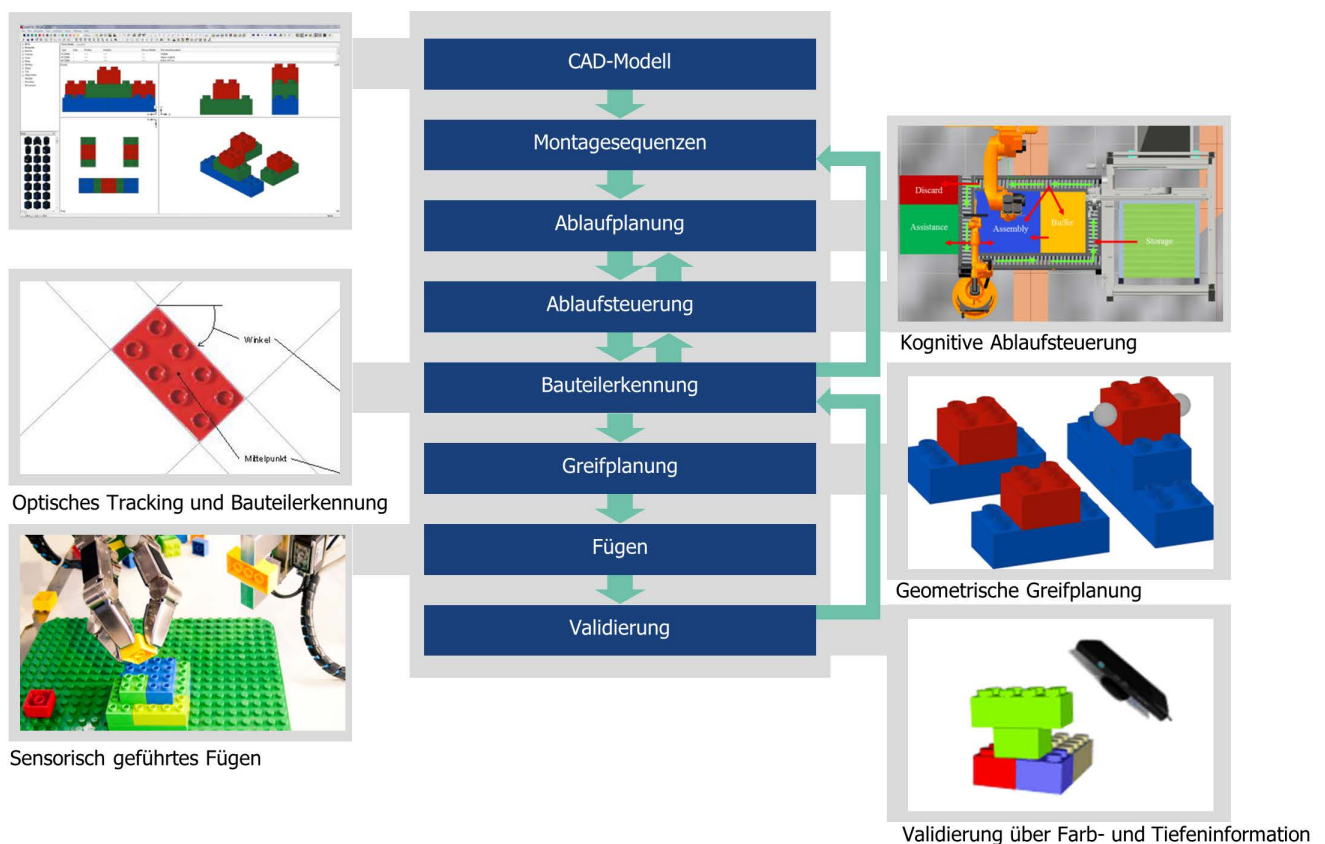


Abb. 8 Kognitive Montagezelle, © WZL Aachen

Auf Basis des CAD-Modells werden Abbausequenzen und aus diesen durch Umkehrung der Reihenfolge Aufbausequenzen festgelegt und in eine Ablaufsteuerung überführt. Hinsichtlich Farbe, Form, Relativlage, -orientierung und -geschwindigkeit zufällig zugeführte Bauteile werden erkannt, gegriffen, positioniert und gefügt. Anschließend werden Geometrie und Farbmuster mit der Produktvorgabe aus dem CAD-Modell verglichen.

Ein weiteres Beispiel für Fertigungseinrichtungen auf dieser Stufe zeigt eine am PtU der TU Darmstadt realisierte Stanz-Biege-Prozesskette zur Herstellung von Federelementen. In der Prozesskette werden die aus dem Stanzprozess gewonnenen Prozess- und Halbzeugdaten dazu genutzt, eine adaptive Vorsteuerung des Biegeprozesses zu realisieren. Des Weiteren wird der Biegewinkel des Bauteils über eine CCD-Kamera nach der Biegeoperation erfasst und der Regelung sowie der Datenbasis für die Vorsteuerung zugeführt (Abbildung 9).

Die Kombination aus Regelung und adaptiver Vorsteuerung des Biegeprozesses ermöglicht eine flexible Automatisierung der Prozesskette durch eine selbstständige Anpassung des Prozesses an veränderliche Produktionsbedingungen (Abbildung 10).

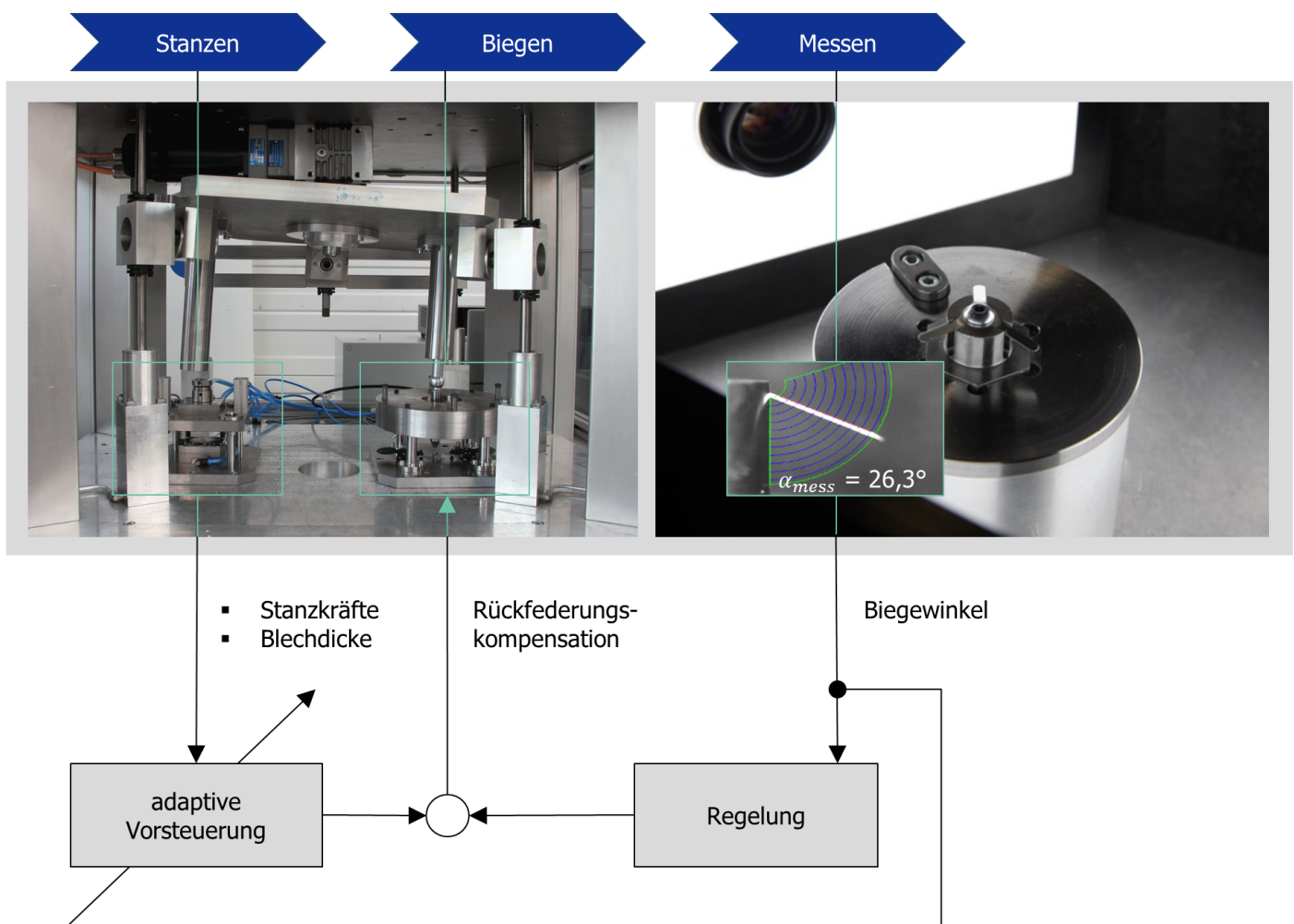


Abb. 9 Stanz-Biege-Prozesskette, © PtU Darmstadt

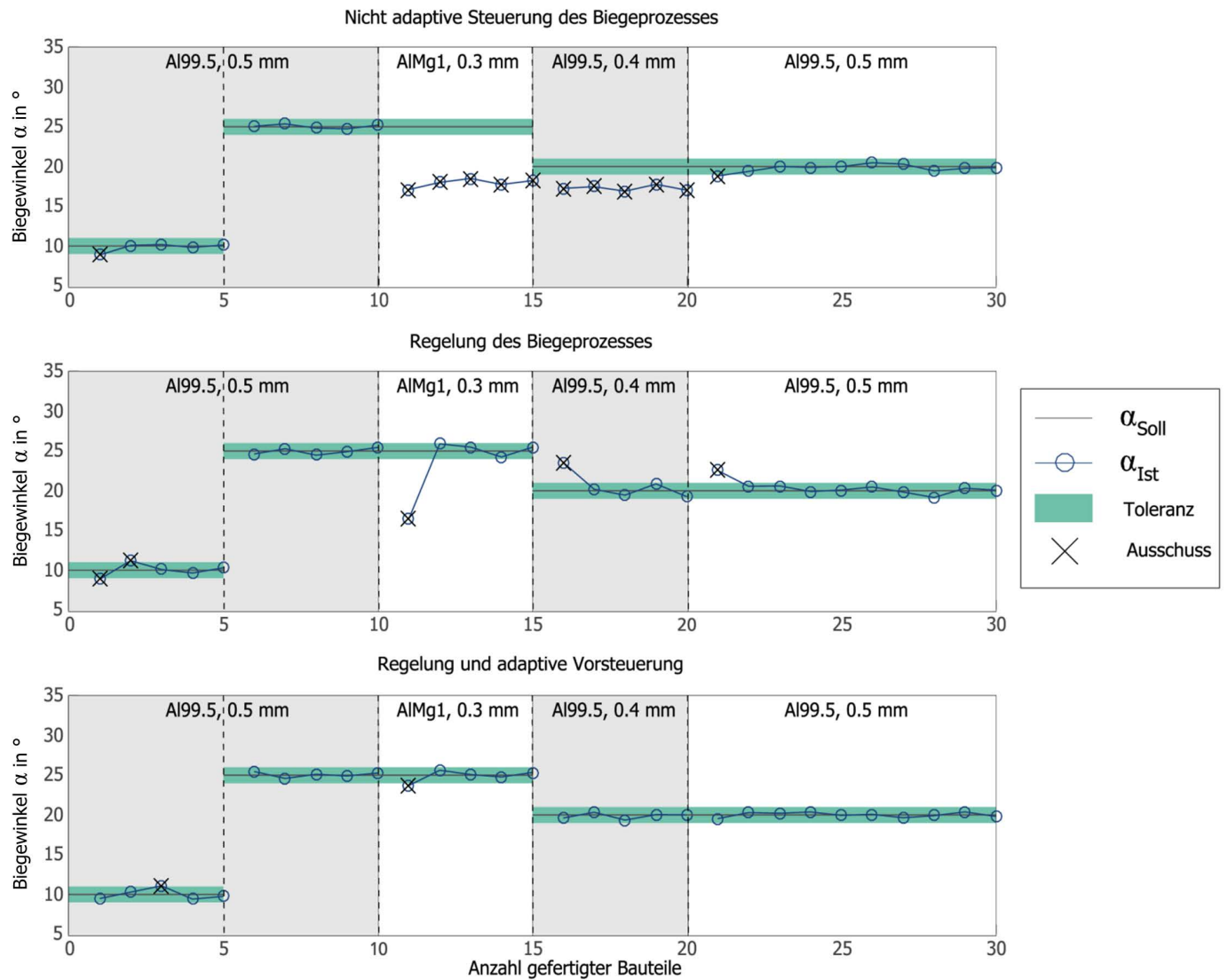


Abb. 10 Systemverhalten bei veränderlichen Prozessbedingungen [7]

Stufe 4: Die Produktionsanlage regelt alle relevanten Produkteigenschaften selbsttätig. Sie kann alle Abweichungen zu definierten Eigenschaften eliminieren und die eigenen Systemgrenzen überwachen. Bediener/-innen überwachen alle anderen Produkteigenschaften, adaptieren ggf. die Produktionsanlage und greifen bei Überschreitung von Systemfähigkeiten korrigierend ein.

Stufe 5: Die Produktionsanlage regelt alle relevanten Produkteigenschaften, erkennt und behebt explizit und implizit vorgegebene Fehlerbilder. Sie erkennt und erweitert ihre eigenen Grenzen.

Automatisierungslösungen entsprechend der Stufen 4 und 5 sind Gegenstände aktueller Forschung.

Im **Aufgabenbereich Material- und Informationsflüsse** sind ebenfalls 6 Stufen der Automatisierung sinnvoll. Sie sind in Abbildung 11 dargestellt.

Material- und Informationsflüsse umfassen alle digitalen und physischen Verbindungen und Schnittstellen zwischen den verschiedenen Produktionseinrichtungen. Die einzelnen Stufen unterscheiden sich wie folgt:

Stufe 0: Die Produktionsanlage besitzt keine Verbindung zu anderen Systemen. Die Bediener/-innen sind für den Material- und Informationsfluss von und zu dem Produktionssystem verantwortlich.

Stufe 1: Die Produktionsanlage erhält Informationen und/oder Material von einem übergeordneten System. Aufgabe der Bediener/-innen ist die Umsetzung der übrigen Material- und Informationsflüsse.

Stufe 2: Das Produktionssystem interagiert mit einem übergeordneten System für den Informations- und Materialfluss. Das Bedienpersonal übernimmt alle anderen Informations- und Materialflüsse.

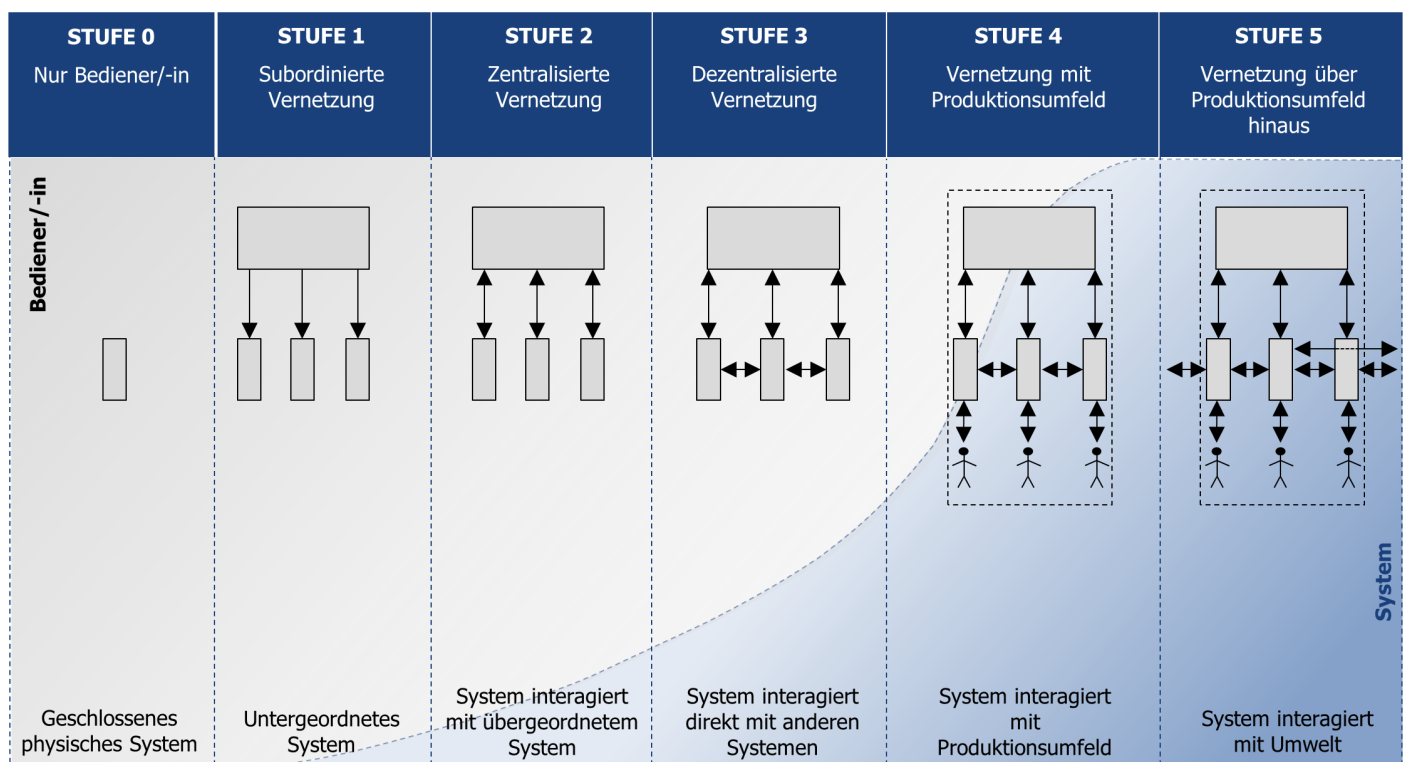
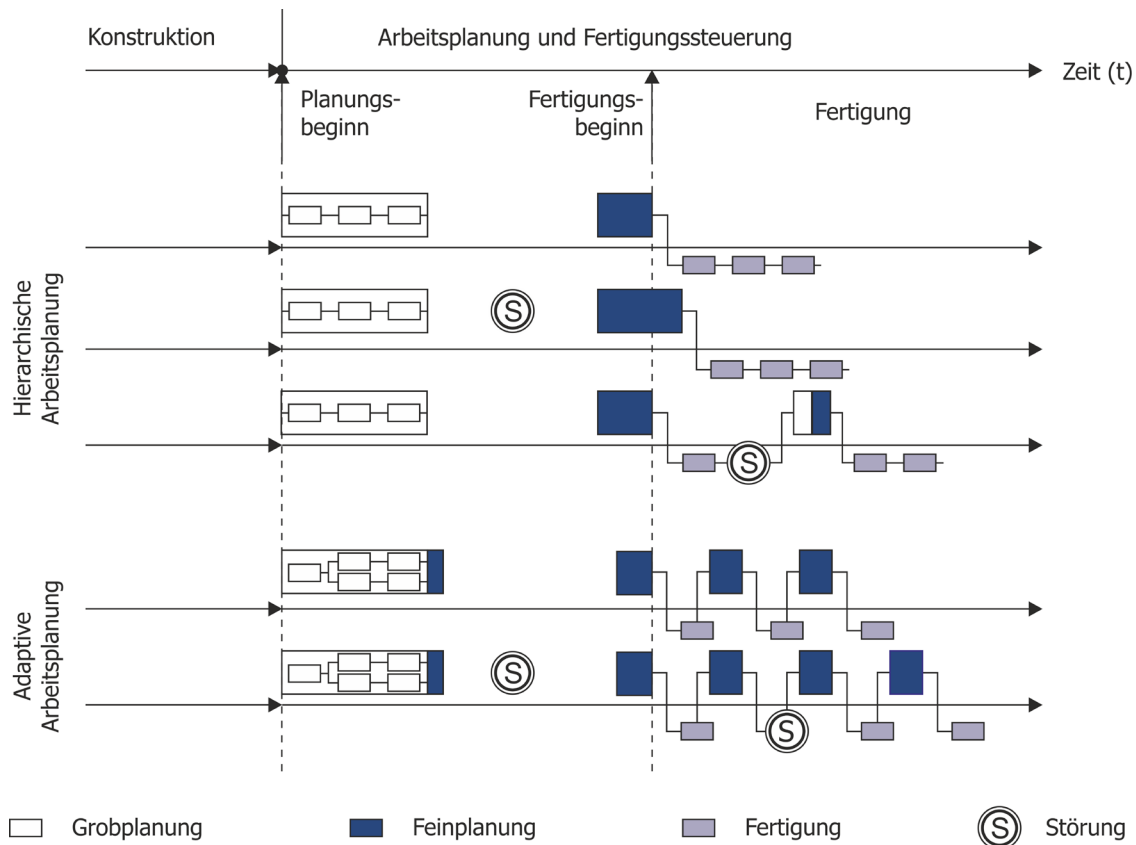


Abb. 11 Stufen der Automatisierung im Aufgabenbereich Material- und Informationsflüsse [6]

Stufe 3: Die Produktionsanlage interagiert direkt mit anderen Systemen.

Die am IFW der Universität Hannover erarbeitete adaptive Arbeitsplanung zeigt ein Beispiel für diese Stufe und ermöglicht die Reaktion auf Störungen im Materialfluss durch die Einbindung von Echtzeit-Daten aus der Fertigung in der Fertigungssteuerung. Den dazu vorgesehenen Ablauf veranschaulicht nachfolgendes Schaubild (Abbildung 12).



Wil/91117 © IFW

Abb. 12 Ansätze der integrierten Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung in Anlehnung an [8, 9, 10]

Zunächst werden alle Fertigungsrouten, die das zu produzierende Werkstück durchlaufen kann, in einem nichtlinearen Arbeitsplan festgehalten. Nach der Auftragsfreigabe werden die verfügbaren Routenoptionen erstmals bauteilindividuell bewertet. Dabei fließen Störeinflüsse wie Eilaufträge, Nichtverfügbarkeit von einzelnen Maschinen und Anlagen sowie Verzögerungen anderer Aufträge in die Planung der Fertigungsroute ein. Es ergibt sich ein Materialfluss, der durch Autonomie zu kürzeren Durchlaufzeiten führt.

Stufe 4: Die Produktionsanlage interagiert mit den Produktions- und Informationssystemen der Fabrik und dem Bedienpersonal.

Ein Beispiel für diese Stufe der Vernetzung und (teil-)autonome Interaktion mit anderen Produktionssystemen wie auch mit dem Bedienpersonal sind kollaborative Roboter. Die selbstständige Anpassung des Roboters an den Menschen im Sinne der Autonomie ist hierbei aufgrund der individuellen Fähigkeiten und Verhaltensweisen des Personals von besonderer Bedeutung. Sie stellt gleichzeitig eine besondere Heraus-

forderung dar, um eine hohe Akzeptanz seitens des Menschen, vor allem aber auch die Sicherheit des Menschen gewährleisten zu können. Grundlegend hierbei ist, durch geeignete Verfahren die technischen Regelkreise des Roboters an die auf sensomotorischen und kognitiven Fähigkeiten basierenden biokybernetischen Regelkreise des Menschen anzupassen. Die am Fraunhofer IPK entwickelten Roboter zur kollaborativen Handhabung von Bauteilen in der Automobilmontage nutzen neueste Verfahren der adaptiven Kraftregelung, um Handhabungsaufgaben flexibel und ohne explizite Programmierung des Roboters gemeinsam mit dem Werker auszuführen. Das Montagepersonal führt den Prozess flexibel angepasst an den Produktionsablauf, der kollaborative Roboter unterstützt durch seine Kraft- und Momentensensorik angepasst an den Menschen (Abbildung 13). Gleichzeitig erhöht der kollaborative Roboter den Grad der flexiblen Automatisierung durch Fähigkeiten zum eigenständigen Teiletransport über längere Distanzen und Steuerungsfunktionen zur Kollisionsvermeidung.

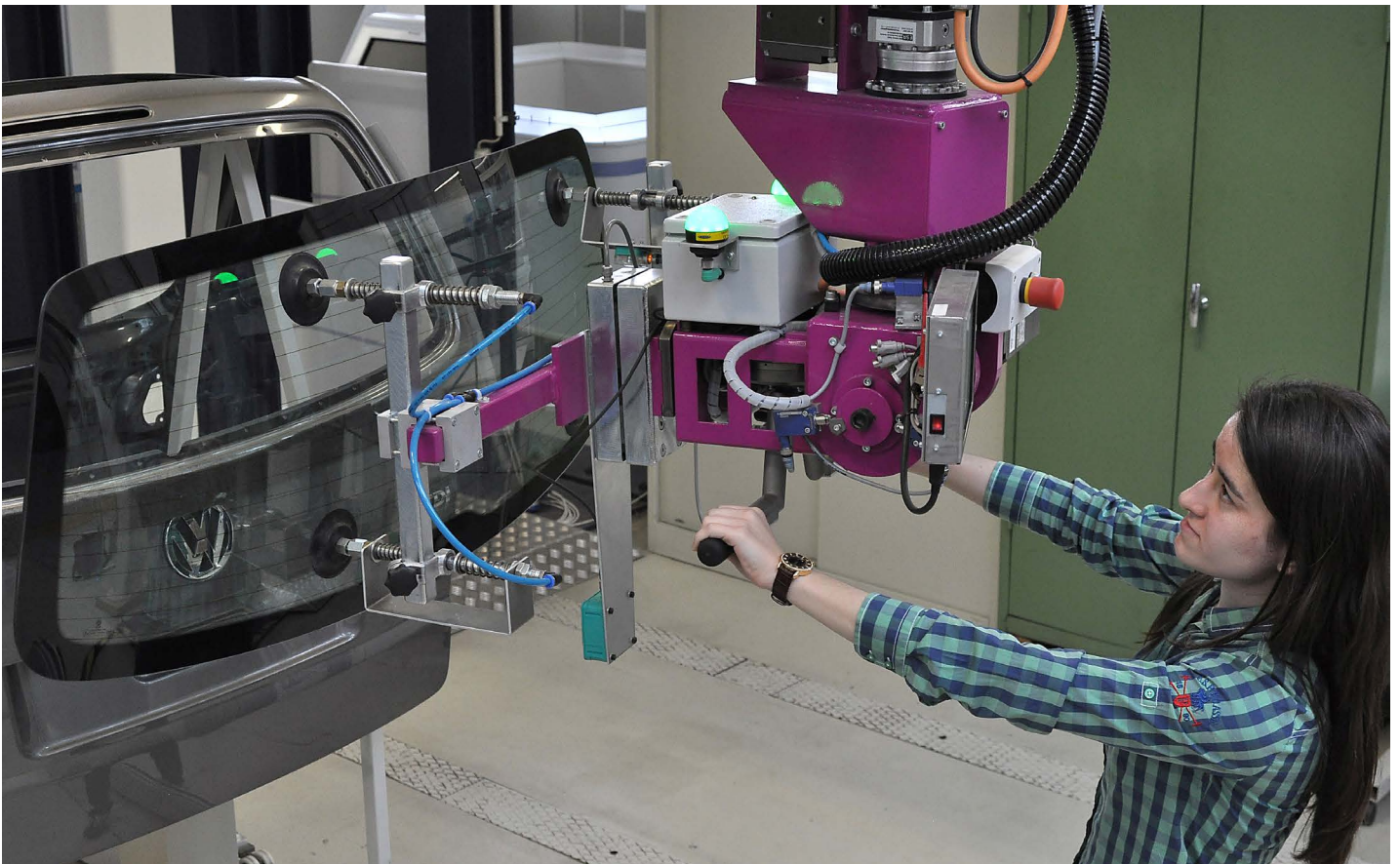


Abb. 13 Kollaborativer Montageroboter, © Fraunhofer IPK

Stufe 5: Die Produktionsanlage interagiert mit den Produktions- und Informationssystemen innerhalb und außerhalb der Fabrik sowie mit dem Bedienpersonal.

Anmerkung: In der klassischen Automatisierungspyramide gemäß IEC 62264 bilden sich Kriterien der informationstechnischen Vernetzung automatisierter Anlagen wie Telegrammkomplexität, Bandbreiten- und Echtzeitanforderungen sowie steuerungstechnische Hierarchien in unterschiedlichen Ebenen ab. Das von der Initiative „Plattform Industrie 4.0“ entwickelte „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) fügt dieser Ebenenstruktur noch zwei weitere Dimensionen hinzu, indem es Architekturebenen einführt und den Produktlebenszyklus gemäß IEC 62890 berücksichtigt. Das in Abbildung 11 beschriebene Stufenmodell fokussiert demgegenüber auf die automatisierungstechnische Dimension der Material- und Informationsflüsse, die durch die Interaktion der Systeme mit ihrem Umfeld, das auch den Menschen einschließt, bestimmt wird.

Der Aufgabenbereich Anlagenzustand umfasst alle Aufgaben, die zur Erreichung und Aufrechterhaltung des gewünschten Betriebszustands erforderlich sind. Dies schließt die Bewertung des Anlagenstatus, die Planung und Durchführung von Wartungs-, Instandhaltungs- und Anschaffungsmaßnahmen ein. Hier werden 5 Stufen der Automatisierung unterschieden (Abbildung 14).

Stufe 0: Alle Aufgaben zur Bewertung und Änderung des Anlagenzustandes werden von Maschinenbediener/-innen übernommen.

Stufe 1: Die Produktionsanlage zeigt den eigenen Zustand an und signalisiert das Überschreiten von Grenzen. Aufgaben der Maschinenbediener/-innen oder Instandhalter/-innen sind die Ableitung, Planung und Durchführung der als erforderlich angesehenen Arbeiten.

Stufe 2: Die Produktionsanlage bewertet den eigenen aktuellen Zustand und plant die notwendigen Maßnahmen. Aufgabe der Maschinenbediener/-innen oder Instandhalter/-innen ist die Durchführung der angezeigten Arbeiten.

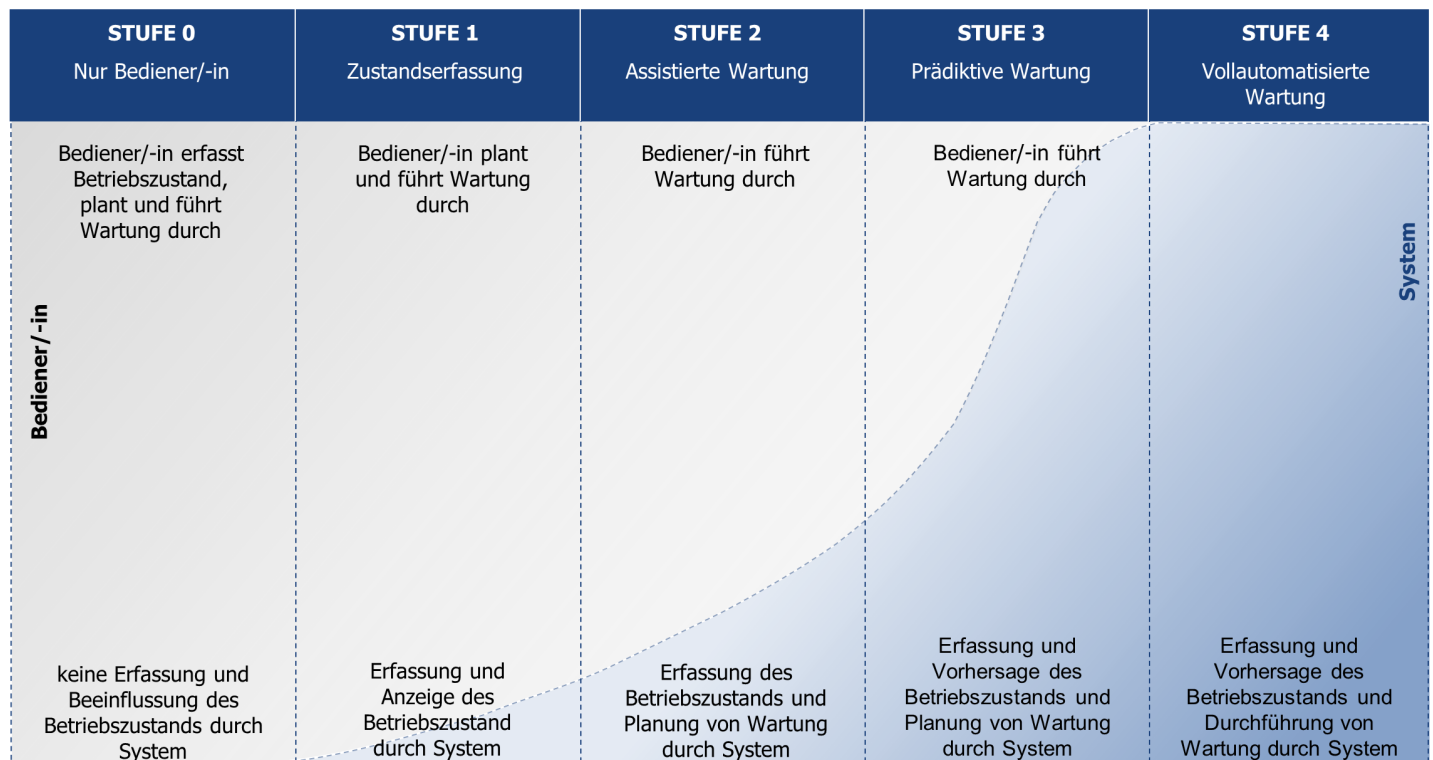


Abb. 14 Stufen der Automatisierung im Aufgabenbereich Anlagenzustand [6]

Stufe 3: Die Produktionsanlage bewertet den eigenen aktuellen und zukünftig zu erwartenden Zustand und plant notwendige Maßnahmen. Aufgabe der Maschinenbediener/-innen oder Instandhalter/-innen ist die Durchführung der angezeigten Arbeiten.

Stufe 4: Die Produktionsanlage bewertet den eigenen aktuellen und zukünftig zu erwartenden Zustand, plant notwendige Maßnahmen und setzt diese selbsttätig um.

Ein Beispiel für ein Teilsystem mit Automatisierungsgrad der Stufe 4 ist der am wbk Institut für Produktionstechnik entwickelte Ansatz zur adaptiven Schmierung von Kugelgewindtrieben. Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1551 „Ressourceneffiziente Konstruktionselemente“ wurde der ressourceneffiziente Betrieb von Vorschubachsen untersucht und ein Schmieralgorithmus zur bedarfsgerechten Schmierung entworfen, der Mangel- und Übersmierung verhindern soll. Anhand einer sensorischen Erfassung des aktuellen Zustands des Kugelgewindetriebs als Teil einer Linearachse wird entschieden, ob ein Schmierbedarf vorliegt und ggf. eine Nachschmierung eingeleitet. Die hierzu notwendige Selbstdiagnose der Komponente, wird durch eine eigens entwickelte Messdose (Abbildung 15) zur kombinierten Reibmoment- und Axialkraftmessung ermöglicht.

Sollbereiche für die verschleißoptimale Nachschmierung für Drehzahl- und Lastkombinationen werden mit Hilfe eines initial parametrisierten Reibungsmodells sowie mit einer Interpolation bekannter Wertebereiche ergänzt und zum rechtzeitigen Auslösen der Schmierung genutzt. Damit kann die Vorschubachse vorausschauend und ohne äußere manuelle Eingriffe in einem verschleißminimalen Schmierzustand ohne Mangel- oder Übersmierung betrieben werden. In Laborversuchen mit statischen Lasten konnten so Lebensdauersteigerungen von bis zu 70% gegenüber herkömmlicher Schmierung erreicht werden. Durch Implementierung von Modell und zugehörigem Algorithmus zur adaptiven Schmierung der Vorschubachse auf einem Mikrocontroller ist ein autonomer Betrieb möglich. Eine Schnittstelle zu OPC-UA ermöglicht weiterhin die Anbindung an andere IT-Systeme. [11]

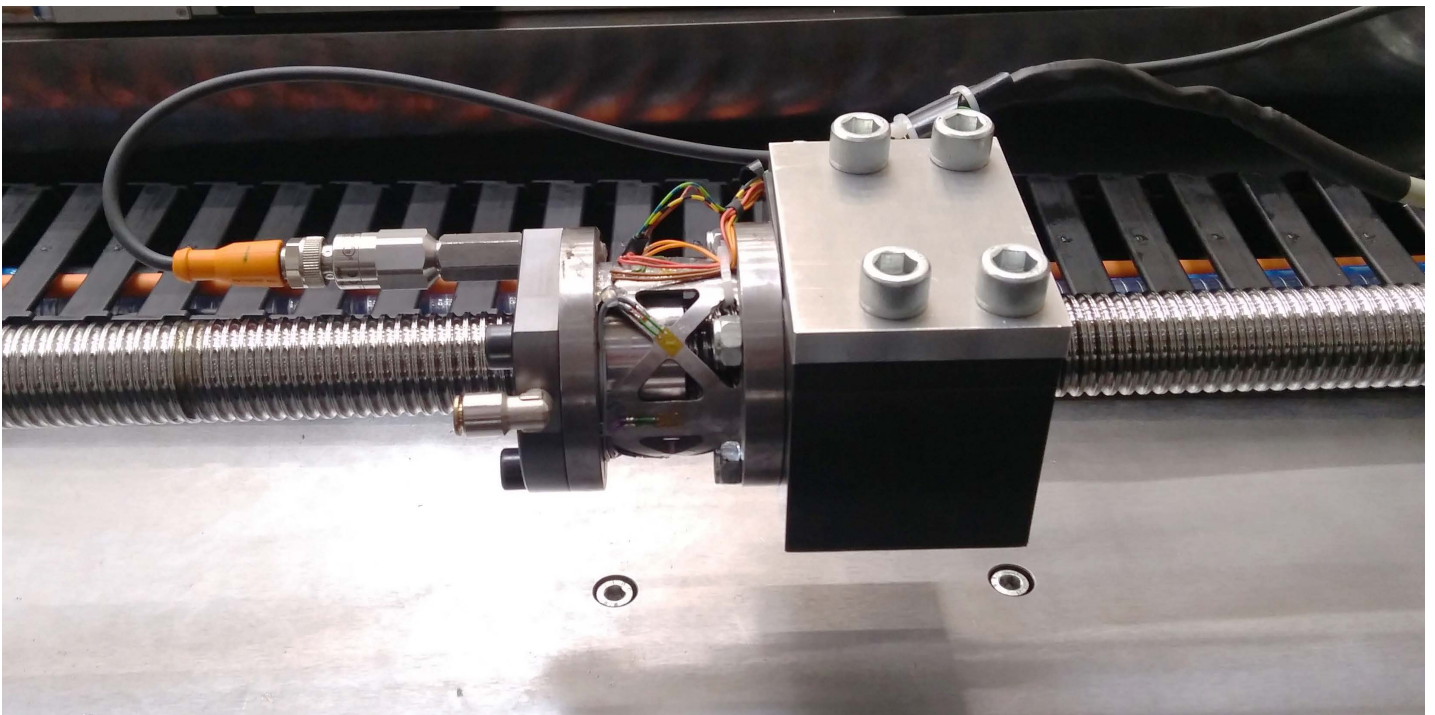


Abb. 15 Kugelgewindetrieb mit Reibmomentenmessdose zur adaptiven Schmierung, © wbk Karlsruhe

Anhand der vorgenommenen Stufenmodelle können nun existierende oder zukünftige Produktionssysteme eingeordnet werden. Die Visualisierung kann anhand der in Abbildung 16 gezeigten Form erfolgen.

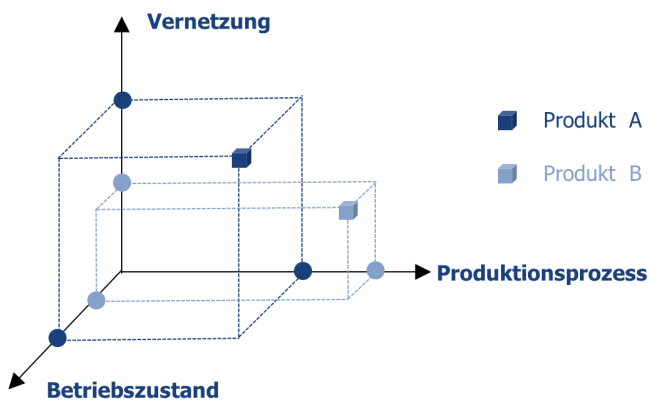


Abb. 16 3D Modell mit quantifizierten Automatisierungsstufen für unterschiedliche Produktionsprozesse [6]

4.3 Offene Forschungsfragen / Handlungsbedarf

Die vorangegangenen Ausführungen und Beispiele aus der Forschung zeigen den in absehbarer Zukunft erreichbaren Automatisierungsgrad in den verschiedenen Dimensionen. Zugleich ist zu erkennen, dass zum Erreichen vollautomatisierter Produktionsprozesse noch erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Technologisch stehen hier insbesondere schnelle und verlässliche Lernprozesse für autonome (Teil-)Systeme im Vordergrund. Dabei kann auf bestehenden Ansätzen der Prozessregelung aufgebaut werden, wenn es gelingt, verbesserte werkstücknahe Sensorik und leistungsfähige Modelle für die zuverlässige Erfassung von Produkteigenschaften zu entwickeln.

Wenngleich die notwendigen Technologien sicher noch einige Jahre Entwicklungszeit erfordern, sind bereits jetzt Bildungsmaßnahmen für die veränderte Industriearbeit zu konzipieren. Dabei ist davon auszugehen, dass Anpassungen von Produktionsanlagen und -prozessen nicht mehr ausschließlich von Menschen vorgenommen werden, sondern zunehmend Produktionsanlagen selber diese Aufgabe übernehmen. Für die Qualifikation der vollautomatisierten Produktionssysteme sind Facharbeiter/-innen erforderlich, die die autonomen Systeme zum Lernen anleiten. Ebenso werden Facharbeiter/-innen benötigt, die autonome (Teil-)Systeme der Produktionsanlagen überwachen, warten und instand halten.

5 Auswirkungen auf die Ausbildung für den Arbeitsplatz 2025

Nach Auffassung der WGP wird menschliche Arbeit in der Produktion auch weiterhin zu einem gesellschaftlichen Selbstverständnis gehören. Dies gilt erst Recht in der in diesem Standpunkt eingenommenen Perspektive bis 2025. Sollte die Notwendigkeit menschlicher Produktionsarbeit in wertschöpfenden Prozessen irgendwann tatsächlich dramatisch abnehmen, ist nicht nur das hier adressierte Thema der Aus- und Weiterbildung – sprich die Qualifikation – der Akteure von geringerer Bedeutung. Vielmehr ist unser gesamtes gesellschaftliches, wirtschaftliches, politisches und soziales Umfeld im Fokus der Weiterentwicklung. Stichworte dieser Diskussionen wären dann etwa eine „Maschinen-/Produktivitätssteuer“ und das „bedingungslose Grundeinkommen“. Diesen Betrachtungshorizont schließt dieser Standpunkt ausdrücklich aus.

Es werden also weiterhin sowohl der Mensch als auch die Produktionstechnik, in Form von weiter automatisierten Systemen, gemeinsam gefordert sein. Es gilt, ein optimales Verhältnis zwischen menschlicher Arbeit und automatisierter Produktionstechnik zu entwickeln. Dabei wird es gewiss nicht um nur 100% Mensch oder nur 100% Technik gehen. Die Entwicklungen der Digitalisierung und die sich dadurch verändernden Automatisierungs- und Autonomiegrade von Produktionssystemen stellen neue Anforderungen an die Fähigkeiten und Fertigkeiten der in der Produktion arbeitenden Menschen. Neben den steigenden Anforderungen an die Produktionsmitarbeiter/-innen wird in Zukunft aber auch die Verfügbarkeit qualifizierter, stets den Anforderungen entsprechend ausgebildeter Mitarbeiter/-innen eine wesentliche Rolle spielen. Dies wird durch die Demografie oder die zunehmende Heterogenität der Eingangsqualifikationen der Menschen in der Ausbildung beeinflusst. Beide Faktoren hängen eng zusammen. Das Statistische Bundesamt sagt in [12] folgende generelle Entwicklung der Bevölkerung im Erwerbsalter voraus:

„Die Bevölkerung im Erwerbsalter wird von Schrumpfung und Alterung stark betroffen sein. Als Erwerbsalter wird hier die Spanne von 20 bis 64 Jahren betrachtet. Im Jahr 2013 gehörten 49,2 Millionen Menschen dieser Altersgruppe an. Ihre Zahl wird erst nach 2020 deutlich zurückgehen und 2030 etwa 44 bis 45 Millionen betragen (...). 2060 werden dann etwa 38 Millionen Menschen im Erwerbsalter sein (– 23 %), falls der Wanderungssaldo von rund 500 000 im Jahr 2014 stufenweise bis 2021 auf 200 000 sinkt und danach konstant bleibt (...). Geht die Zuwanderung bis 2021 auf 100 000 Personen zurück und bleibt anschließend konstant (...), gibt es 2060 ein noch kleineres Erwerbspersonenpotenzial: 34 Millionen oder – 30% gegenüber 2013.“

Dies wird dazu führen, dass in Zukunft Menschen in die Qualifizierung und Ausbildung zur Arbeit in der industriellen Produktion eintreten werden, die diesen Weg früher und auch heute nicht gegangen wären.

Für die Optimierung des gemeinsamen Einsatzes von Mensch und autonomer Produktionstechnik sind mehrere Bedingungen zu erfüllen. So sind für die Produktionsplanungs- und Simulationssysteme **geeignete Modelle menschlicher Kognition und Handlung zu entwickeln und zu integrieren**, um das Zusammenwirken von Mensch und autonomer Technik berechenbar, planbar und vorhersagbar machen zu können. Nur so kann ein gewisser „Produktionsdeterminismus“ aufrechterhalten und die Rolle des Menschen als Resilienzfaktor in der Produktion gewährleistet werden. Um die Rolle des Resilienzfaktors in der Produktion übernehmen zu können, muss der Mensch alle Abläufe, auch die autonomen, stets zumindest verstehen und beurteilen können. Hierzu ist ein ständiger Aus- und Weiterbildungsbedarf, der mit der sich beschleunigenden technischen Entwicklung auf diesem Gebiet Schritt hält, zu erfüllen.

Als weiteres Handlungsfeld wird zudem die **autonomiegerechte Gestaltung von Aufbau- und Ablauforganisationen sowie Führungssystemen** für die Mitarbeiter erkannt. Hierzu gehört auch die Neuordnung der Aufteilung von direkten, wertschöpfenden Arbeitsinhalten einerseits und indirekten, planenden/steuernden Tätigkeiten andererseits. Generell ist davon auszugehen, dass die direkten Tätigkeiten abnehmen und indirekte Tätigkeiten der Mitarbeiter/-innen in der Produktion zunehmen. Eine besondere Rolle spielt dabei, dass durch höhere Variantenvielfalt, kleinere Losgrößen, kundenindividuelle Produkte und kürzere Produktlebenszyklen Vergangenheitsdaten zur Planung, Steuerung und Durchführung von Prozessen immer häufiger fehlen. Neue Methoden der Modellierung von Wissen, Prozessen und Systemverhalten sind deshalb zu entwickeln, um die Beherrschbarkeit der Produktion unabhängig vom Vorhandensein von Vergangenheitsdaten zu gewährleisten.

Auf der Metaebene ist sowohl eine **Dynamisierung der Modellierung als auch die Umsetzung von Maßnahmen zur Qualifizierung von Mitarbeiter/-innen durchzuführen**, da Digitalisierung und Automatisierung keinen in sich geschlossenen Prozess bilden, sondern im Gegenteil einer weiteren exponentiellen Beschleunigung unterliegen. Hieraus entsteht ebenso eine Beschleunigung des Bedarfes an korrespondierender Qualifikation durch ständige Weiterbildung der Mitarbeiter/-innen. Ein wesentlicher Parameter zur Ableitung der geeigneten Maßnahmen zur Ertüchtigung der in der Produktion arbeitenden Menschen durch Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen ist also die durch die Digitalisierung hervorgerufene Wandlungsgeschwindigkeit des Automatisierungsgrades in den verschiedenen Bereichen der Produktion.

Es müssen nach Meinung der WGP **Modellierungsverfahren und geeignete Prognoseverfahren entwickelt und eingesetzt** werden,

um die Geschwindigkeiten dieser teils evolutionären und teils revolutionären technischen Teilprozesse zu erfassen und entsprechende Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen abzuleiten.

Fest steht, dass sich die Anzahl wesentlicher Technologien, die der in der Produktion arbeitende Mensch während seines Arbeitslebens beherrschen muss, wesentlich erhöht hat. Beispielhaft seien hier die Informationstechnik und Programmierung genannt. In der Vergangenheit waren die Technologiezyklen länger als ein Arbeitsleben, heute ist dies zunehmend umgekehrt. Dies erfordert nicht nur eine höhere Grundqualifikation durch eine primäre Ausbildung, sondern insbesondere einen stark steigenden Bedarf an einer lebenslangen Kompetenzerweiterung der an Wertschöpfungsprozessen beteiligten Menschen, also lebenslanges Lernen und ständiges Kompensieren der kritischen Halbwertszeit des „Produktionswissens“. Hierfür sind **hybride bildungswissenschaftliche und produktionstechnische Methoden und Modelle zu implementieren**, die Fähigkeits- und Fertigkeitsdefizite der Mitarbeiter/-innen ermitteln und zeitabhängig darstellen, um daraus proaktiv den Aus- und Weiterbildungsbedarf zu bestimmen. Die Beschreibung der geforderten Curricula bzw. Ausbildungsinhalte ist ein elementarer Bestandteil.

Die Institute der WGP, die sowohl in der produktionswissenschaftlichen Forschung als auch in der produktionstechnischen universitären Lehre stark verankert sind, sehen sich in der Verantwortung, ihre Rollen in den beschriebenen Veränderungsprozessen zu schärfen und anzupassen. Nach wie vor liegt dabei der Schwerpunkt in der grundlegenden Erforschung neuer Produktionstechnologien und deren wirkungsvollem Transfer in die industrielle Produktion. Eine Schlüsselrolle sowohl für die wissenschaftliche Arbeit als auch für den Erkenntnistransfer nehmen dabei die wissenschaftlichen Mitarbeiter/-innen ein. Sie treiben bis zu ihrer Promotion die Themen inhaltlich voran und sind gleichzeitig Teil des Transferprozesses, da sie anschließend mit ihrem Know-how in Industrieunternehmen wechseln. Basis für die ingenieurtechnischen Fähigkeiten der Unternehmen bilden zudem selbstverständlich die Absolvent/-innen der Ingenieurstudiengänge, für deren produktionstechnischen Anteil die WGP-Institute verantwortlich zeichnen.

Darüber hinaus ist jedoch ein **neues Kooperationsmodell für alle an der Ausbildung beteiligten Akteure zu implementieren**. Das für die produktionstechnischen Institute der WGP weiterhin typische „Domänenwissen“ ist z.B. mit den Domänen der Industrie- und Handelskammern, Akteuren und Regelwerken der Facharbeiter/-innen-Ausbildung, Fachhochschulen, anderen Bildungseinrichtungen, Industrie- und Unternehmensverbänden und der Politik abzugleichen sowie zu harmonisieren und zu synchronisieren. Grundlage eines derartigen

neuen Kooperationsmodells sind verschiedene Sub- oder Teilmodelle. Diese sind das Tätigkeitsmodell, das Ausbildermodell, das Strukturmodell sowie das Gesellschaftsmodell.

Im Kern der akademischen Ausbildung der zukünftigen Akteure der industriellen Produktion steht für die WGP dabei das Tätigkeitsmodell. Dies gewährleistet, dass im Rahmen der Forschung und der Ausbildung stets die Inhalte vermittelt werden, die für die Entwicklung und den Betrieb automatisierter Produktionssysteme notwendig sind. Dies beinhaltet auch die Entscheidung, welche obsoleten Inhalte nicht mehr vermittelt werden müssen.

Zukünftig sind die **produktionstechnischen Forschungsinstitute außerdem viel stärker als bisher in das Ausbildermodell einzubinden**. Hierdurch sollen die Forschungsergebnisse schneller als bisher in die Ausbildung von Facharbeiter/-innen und Techniker/-innen einfließen. Forschungsergebnisse werden so aufbereitet, dass sie besser an die Bedürfnisse der industriellen Ausbildung angepasst sind und schneller in diese einfließen können. Dies wird beispielsweise dadurch erreicht, dass das Domänenwissen der Institute schneller in die Ausbildung der Ausbilder einfließt.

Das Strukturmodell liefert die Aufbau- und Ablauforganisation der ausbildungsrelevanten Prozesse zwischen den genannten Akteuren. **Dieses Strukturmodell ist neu zu entwickeln**. Exemplarisch sei hier die mögliche inhaltliche und organisatorische Zusammenarbeit zwischen den Instituten der WGP und der Nachwuchsstiftung Maschinenbau des VDMA genannt. Vorgespräche haben gezeigt, dass hierdurch eine schnelle und effektive Übertragung der für den Betrieb autonomer Produktionssysteme relevanten Ausbildungsinhalte, darauf aufbauender Kompetenzen und Handlungsfähigkeiten in die Facharbeiterausbildung erfolgen könnte. Hierzu sind gemeinsame Lehr-/Lernplattformen zu nutzen, um Konzepte des Präsenzlernens, Blended Learning und des reinen E-Learning weiter zu entwickeln.

Letztendlich ist **ein tragfähiges Gesellschaftsmodell für die Gestaltung der Industriearbeit 2025 zu entwickeln**. Ergebnis eines solchen Gesellschaftsmodells ist die Evaluation, ob die richtigen Zielgruppen ausgebildet werden und welche weiteren Zielgruppen in die akademische und industrielle Ausbildung einbezogen werden sollten. Verschiedene Studien [13] zur Abschätzung der zukünftigen Anzahl der Arbeitsplätze in der digitalisierten Produktion gehen davon aus, dass Arbeitsplätze wegfallen werden. Die Studien gehen von einer Reduktion der Arbeitsplatzanzahl von ca. 15% bis 50% aus. Erfahrungen aus anderen, nicht-technischen Branchen zeigen jedoch, dass mindestens ebenso viele Arbeitsplätze mit neuem Qualifikationsprofil entstehen können.

Im Ergebnis kann festgestellt werden, dass die Bilanz der Anzahl der Arbeitsplätze in etwa ausgeglichen ist, der Qualifikationsbedarf jedoch steigt und letztendlich Effektivität und Effizienz in digitalisierten Arbeitssystemen deutlich steigen.

Das Fazit für den Kompetenzerwerb und -erhalt der Mitarbeiter/-innen in zunehmend autonomen Produktionssystemen lautet also:

Alle an der Ausbildung von Menschen in der Produktion beteiligten Akteure müssen die Ausbildungsinhalte dynamisieren, um die voranschreitende Entwicklung der Digitalisierung beherrschbar zu machen. Das bedeutet, dass die Ausbildung sich von singulären „Abschlüssen“ hin zu einem lebenslangen Ausbildungskontinuum wandelt.

Inhaltlich kommt es zu einer starken Durchmischung von Ausbildungsinhalten, die **einen** Mitarbeiter oder **eine** Mitarbeiterin für sowohl direkte wertschöpfende als auch indirekte planende, steuernde und überwachende Tätigkeiten qualifiziert. Bisherige Grenzen (Entlohnung bis Arbeitsumgebung) zwischen direkten und indirekten Tätigkeitsprofilen verschwimmen also.

Flexibel automatisierte Produktionssysteme basieren wesentlich auf einer maschinellen Lernfähigkeit. Die Muster, die maschinell erlernt werden müssen, sind immer noch zu komplex und entziehen sich einer determinierten Modellierung. Gut ausgebildete Mitarbeiter/-innen erkennen die zugrunde liegenden technischen, technologischen, logistischen, organisatorischen oder sozialen Muster jedoch häufig besser. Mitarbeiter/-innen können damit eine Wissensquelle für autonome Systeme sein und dadurch menschliche und maschinelle Entscheidungsfähigkeit kombiniert werden. Sie bilden damit den entscheidenden Resilienzfaktor in der autonomen Produktion.

Schließlich ist festzustellen, dass die Digitalisierung in der Produktion ganz wesentlich als Assistenzsystem für die Mitarbeiter/-innen fungieren wird. Ähnlich wie es CAD-Systeme für die Arbeit des Konstrukteurs bewirkt haben, wird die Digitalisierung in der Produktion die Belegschaft von Routinetätigkeiten entlasten und damit Freiräume für kreative Prozesse, Optimierungspotentiale und Wirkungsgradverbesserungen schaffen.

6 Wettbewerbsvorteile für Hochlohnländer

Unternehmen aus Deutschland zeichnen sich durch ihr gutes Prozessverständnis, ihre Vernetzung, hohe Systemkompetenzen und weltweite Produktionsnetzwerke aus. Der Automatisierungsgrad und dessen Beherrschung variieren jedoch je nach Standort stark. Ein weltweites Produktionsnetzwerk kann wirtschaftliche Vorteile bieten, wenn einfachere Tätigkeiten in Niedriglohnländer verlagert werden und Tätigkeiten mit hoher Wertschöpfung am Hochlohnstandort erfolgen. Jedoch besteht durch hochautomatisierte Prozesse auf Basis autonomer (Teil-)Systeme verstärkt die Möglichkeit, auch einfache Tätigkeiten wieder in Hochlohnländer zurückzuholen, wenn dies auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vertretbar ist. Damit läge die Produktionsverantwortung und somit die Beherrschung der gesamten Prozesskette unter Umständen an einem Hochlohnstandort. Dies kann im Sinne einer Qualitätsführerschaft bei bestimmten Produkten Vorteile bieten.

6.1 Bedeutung hochautomatisierter Fertigungssysteme für den Standort Deutschland

Bei qualifizierter Bedienung sind automatisierte Produktionsanlagen mit hoher Anpassungsfähigkeit auf Basis autonomer (Teil-)Systeme ein Element zur Verbesserung der Wettbewerbsbedingungen des Standorts Deutschland. Zu den weiteren Rahmenbedingungen zählen unter anderem die sehr gute Infrastruktur, die Unternehmensnetzwerke und die leistungsfähigen Ausbildungssysteme. Voraussetzung zur Verbesserung der Wettbewerbsbedingungen ist eine hohe technologische Verständnistiefe über alle Unternehmen im Netzwerk hinweg. Dies ermöglicht eine anwendungsorientierte Entwicklung digitaler Lösungen für die Produktion. Die Produktion in Deutschland wird vorangetrieben durch ein sehr hohes Prozessverständnis. Damit sind die Mitarbeiter/-innen selbst bei zunehmender Automatisierung in der Lage, den Prozess nachzuvollziehen und wo nötig entsprechend einzugreifen. Dieses Prozessverständnis in Verbindung mit der hohen und breiten Qualifikation der Mitarbeiter/-innen ist eine entscheidende Basis für den derzeit noch vorhandenen Wettbewerbsvorsprung Deutschlands gegenüber weniger weit entwickelten Ländern. Nur wenn nachhaltig hieran weiter gearbeitet wird, kann dieser Vorsprung auch in näherer Zukunft gehalten werden.

6.2 Auswirkungen auf die Beschäftigungsverhältnisse in Deutschland

Die Gestaltung des wirtschaftlichen Wertschöpfungsprozesses soll unter Ausnutzung aller technischen Möglichkeiten erfolgen. Das bedeutet, dass nicht immer der höchste Grad an Automatisierung notwendig oder sinnvoll sein wird. Die zunehmende Automatisierung der Produktion in Ländern wie China oder Südkorea kann den Vorsprung, den Hochlohn-

länder wie Deutschland durch ihre gut ausgebildeten und international gefragten Fachkräfte heute noch haben, jedoch künftig schrumpfen lassen. Weitgehend autonom arbeitende Systeme können dazu führen, dass Produktionen in Hochlohnländern wieder zunehmend attraktiv werden. Inwiefern dies zu einer Steigerung der Beschäftigung führt, ist jedoch schwer abzuschätzen. Hier ist eher davon auszugehen, dass einfachere Tätigkeiten durch zunehmend autonom arbeitende Produktionseinheiten ersetzt werden. Hingegen wird es für den Aufbau derartiger Systeme einen hohen Bedarf an Spezialist/-innen mit entsprechend guter Ausbildung geben, die auf dem Arbeitsmarkt schwer zu bekommen sind. Auch für die Wartung und Instandhaltung komplexer Produktionssysteme werden aufgrund neuartiger digitaler Hilfsmittel (Stichwort Predictive Maintenance) künftig weniger Mitarbeiter/-innen benötigt. Die Chancen zur Nutzung digitaler Hilfsmittel stehen dabei in Wechselwirkung mit einer Neugestaltung der Arbeitsteilung. So werden Instandhaltungsmitarbeiter/-innen oder Maschinenbediener/-innen bei der Ausübung ihrer Tätigkeit in Zukunft noch umfangreicher durch den Einsatz mobiler Endgeräte unterstützt werden. Die digitale Vernetzung ermöglicht eine Veränderung der klassischen Arbeitsteilung hin zu einer besseren Performance. Voraussetzungen dafür sind Selbstständigkeit und Teamfähigkeit der Mitarbeiter/-innen, besonders bei der Arbeit in häufig wechselnden Teams.

6.3 Vorhandene Stärken weiter voranbringen

Der Produktionsstandort Deutschland ist für die Einführung neuer Technologien grundsätzlich gut aufgestellt durch

- leistungsfähige, international vernetzte Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Werkzeugmaschinen, kognitiven Robotik, künstlichen Intelligenz und autonomen Systemen,
- eine Industrie, die auf Basis der Entwicklungen im Bereich I4.0 in den vergangenen Jahren offen für Einführung neuer Technologien ist,
- starke, anwendungsorientierte Forschungseinrichtungen mit Kompetenzen sowohl im Bereich der Produktionstechnik und -automatisierung als auch der künstlichen Intelligenz.

Es bedarf nun einer Strategie, wie Schlüsseltechnologien für eine anpassungsfähige und damit flexible Automatisierung auf Basis autonomer (Teil-)Systeme von der Grundlagenforschung systematisch in die Anwendung der industriellen Produktion überführt werden. Schlüsselfaktoren für die erfolgreiche produktionstechnische Nutzung autonomer Systeme werden sein:

- die Fähigkeit zur Gewinnung der für das Lernen relevanten Daten im produktionstechnischen Umfeld,

- die Geschwindigkeit des Lernens,
- die systematische kontinuierliche Anpassung eigenständig gelernter Daten,
- die effiziente qualitative Absicherung gelernter Daten,
- die Qualifikation der Mitarbeiter/-innen zu Integration, Betrieb und Überwachung eigenständig lern- und anpassungsfähiger Produktionsanlagen.

Für die Wettbewerbsfähigkeit eines Hochlohnlandes wie Deutschland ist nun wichtig, die vorgenannten Schlüsselfaktoren schnell und systematisch in enger Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen und industriellen Anwendern mit geeigneter Unterstützung durch Instrumente der Innovations- und Forschungsförderung weiterzuentwickeln.

7 Referenzen

- [1] WGP e. V.: WGP-Standpunkt Industrie 4.0, Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V., https://wgp.de/wp-content/uploads/WGP-Standpunkt_Industrie_4-0.pdf, 2016
- [2] Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum: Autonome Systeme – Chancen und Risiken für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft, Kurzversion, Abschlussbericht, Berlin, 2017
- [3] Pfeiffer S.; Lee H.; Zirnis C.; Suphan A.: Industrie 4.0 – Qualifizierung 2025, VDMA-Studie, VDMA, 2016
- [4] Ulrich E.: Stufung und Messung der Mechanisierung und Automatisierung, Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung (Sonderdruck), W. Kohlhammer GmbH, 1968
- [5] Verband der Automobilindustrie e. V.: Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren, VDA-Magazin, 2015
- [6] Groche P.; Hoppe F.; Kessler T.; Kleemann A.: Industrial Working Environment 2025, In: Conference Proceedings of the International Conference on New Developments in Sheet Metal Forming, 2018
- [7] Groche P.; Hoppe F.; Hesse D.; Calmano S.: Blanking-bending process chain with disturbance feed-forward and closed-loop control, In: Journal of Manufacturing Processes 24 (2016) 62–70, 2016
- [8] Denkena B.; Lorenzen L.-E.; Battino A.: Increased Production Flexibility and Efficiency through Integration of Process Planning and Production Control, In: Proceedings of the 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, S. 157–162, 2006
- [9] Denkena B.; Battino A.: A novel adaptive process planning framework, In: Proceedings of the 2nd I²PROMS Virtual International Conference, S. 487–492, 2006
- [10] Denkena B.; Dittich M.-A.; Winter F.: Adaptive process planning and control, In: Denkena B.; Mörke T.: Cyber-Physical and Intelligent Systems in Manufacturing and Life Cycle – Genetics and Intelligence: Keys to Industry 4.0, S. 281–293, Elsevier, London, 2017
- [11] Spohrer A.; Leitold L.; Straub F.; Hillenbrand J.; Fleischer J.: Ressourceneffizienter Kugelgewindetrieb durch adaptive Schmierung In: Reibung, Schmierung und Verschleiß – Forschung und praktische Anwendungen, Hrsg. Gesellschaft für Tribologie e. V., GfT, Aachen, S. 39–49, ISBN/ISSN: 978-3-9817451-2-2, 2017
- [12] Plötzsch O.; Rößger F.: Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015
- [13] Wissenschaftliche Dienste Deutscher Bundestag: Industrie 4.0 und Arbeitsmarktprognosen bis 2030, Dokumentation, AZ: Dokumentation WD 6-3000-35/16/, 2016

