

MANUFUTURE[®]DE

ERMITTLUNG PRIORITÄRER FORSCHUNGSTHEMEN FÜR DIE
NACHHALTIGE AUSGESTALTUNG VON EUROPÄISCHEN
FORSCHUNGSPROGRAMMEN FÜR DIE PRODUZIERENDE
INDUSTRIE BIS 2030

KURZFASSUNG



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

**Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA**

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart | www.ipa.fraunhofer.de

Herausgeber: Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Autoren

Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Dr. Günter Hörcher

Markus Bressner

Maren Röhm



FESTO

Fraunhofer
IPA

if



Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Leiter des Instituts für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

VORWORT

Der rasche Wandel der industriellen Strukturen, getrieben durch die Digitalisierung und die Intensivierung des globalen Wettbewerbs, hat im vergangenen Jahrzehnt zahlreiche Initiativen zur Stärkung und Orientierung der Produktion in Europa und insbesondere in Deutschland hervorgebracht. Hierzu zählen beispielsweise die Plattform Industrie 4.0 oder, auf europäischer Ebene, die European Factories of the Future Research Association (EFFRA).

Im europäischen Rahmen entstanden bereits 2006 eine erste Vision sowie eine »Strategic Research Agenda« zur Zukunft der Produktion, mit einem Betrachtungshorizont bis 2020. Diese wurden erstellt durch die Initiative »European Technology Platform for Manufacturing« (MANUFUTURE), die durch nationale Ergänzung in vielen europäischen Ländern flankiert wurde – auch in Deutschland.

Die Strategische Forschungsagenda der deutschen Initiative MANUFUTURE-DE formuliert und priorisiert aktuelle und zukünftig relevante Forschungsbedarfe deutscher Industrieunternehmen aus dem Bereich der Produktionstechnik. Die Agenda konsolidiert die Interessen unterschiedlicher Industrie-segmente und setzt inhaltliche Schwerpunkte für die Forschungsförderung mit einem Zeithorizont bis zum Jahr 2030. Weiter zielt sie auf die Verbesserung der Wettbewerbsposition der verarbeitenden Industrie insgesamt ab.

Zusammen mit Vertretern aus Wirtschaft und Forschung wurde konstruktiv diskutiert, um eine gemeinsame strategische Perspektive auf die Produktion 2030 zu entwickeln und Handlungsfelder mit Prioritäten zu definieren sowie zu konkretisieren. Die Ergebnisse sollen zum einen die Industrie dabei unterstützen, ihre Forschungsstrategien und Schwerpunkte zielgerichtet auszulegen. Zum anderen werden sie der Politik als Anhaltspunkt zur fokussierten Ausgestaltung von Forschungsförderprogrammen dienen und Vorschläge zur Verbesserung des Innovationssystems bieten.

Der gemeinsame Wille von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zur Reflektion und Gestaltung im Rahmen der Plattform MANUFUTURE-DE ermöglichte es, zu umfassenden Ergebnissen zu gelangen. Es wurde die Grundlage geschaffen, prioritäre Forschungsbedarfe deutscher Industrieunternehmen in nationale wie auch europäische Forschungsförderprogramme zu integrieren

Mein Dank gilt allen Beteiligten der MANUFUTURE-Initiative für ihre Unterstützung, ebenso danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und dem Projektträger Karlsruhe PTKA für die Förderung und Begleitung des Vorhabens.



Dietmar Goericke
VDMA Forschung und Entwicklung

Der mittelständisch geprägte deutsche Maschinen- und Anlagenbau ist das Rückgrat der deutschen Industrie. Er ist größter industrieller Arbeitgeber und in fast allen Teilbranchen weltweiter Innovationsführer. Mit seinen Produkten und Dienstleistungen sichert der Maschinen- und Anlagenbau die Wettbewerbsfähigkeit seiner Kundenindustrien und bietet hochinnovative Lösungen für die drängenden umwelt- und energiepolitischen Herausforderungen unserer Zeit. Neueste Technologien werden integriert und zur Anwendung gebracht. Ein moderner und innovativer Maschinen- und Anlagenbau spielt eine Schlüsselrolle für das Gelingen von Industrie 4.0, der Mobilität von morgen und der Erreichung der Klimaziele.

Die deutsche verarbeitende Industrie steht vor großen Herausforderungen. Unter den Randbedingungen des harten globalen Wettbewerbs gilt es, ein nachhaltiges Wachstum durch ständige Innovation und deren Umsetzung in eine marktfähige Wertschöpfung zu generieren. Die Zukunftsvision ist der Wandel von einer industriell geprägten Gesellschaft hin zu einer wissensbasierten Ökonomie mit einer forschungs- und innovationsgetriebenen Industrie. Dazu braucht der Maschinenbau die enge Verknüpfung mit den Wertschöpfungspartnern und vor allem auch mit den besten Köpfen aus der Wissenschaft sowie den Schulterschluss mit dem deutschen Innovationssystem.

Bereits im Jahr 2007 konnte die von Industrie und Wissenschaft gemeinsam entwickelte Roadmap MANUFUTURE-Deutschland entscheidende Impulse für die Produktionsforschung geben. Die Umsetzung in konkrete Projekte ermöglichte das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und nicht zuletzt konnten große Teile der Roadmap als deutscher Beitrag in die Konzepte der europäischen Technologieplattform MANUFUTURE-EU einfließen. Dadurch wurden weitere Ressourcen im Programm Factories-of-the-Future im EU-Rahmenprogramm Horizon 2020 erschlossen.

Diese Erfolgsgeschichte soll die nun neu erarbeitete Roadmap MANUFUTURE-2030 fortschreiben. Wiederum wurden in enger Zusammenarbeit von Wissenschaft und Industrie und mit Unterstützung der führenden Industrieverbände die Herausforderungen für die Zukunft der Produktion zusammengetragen. Gelingt nun wiederum die konsequente Umsetzung der Roadmap in eine zukunftsgerichtete Forschung und deren anschließende Umsetzung in attraktive Produkte, wird die Erfolgsgeschichte des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus weitergehen.

Der Dank des VDMA für dieses hervorragende Ergebnis gilt Herrn Prof. Bauernhansl und seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie allen am Roadmapprozess Beteiligten aus Industrie und Wissenschaft. Nicht zuletzt gilt der Dank dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und dem Projektträger Karlsruhe PTKA für die finanzielle und organisatorische Unterstützung des Projektes MANUFUTURE-2030.



INHALTSVERZEICHNIS

Abbildungsverzeichnis	7
1. Einleitung	8
2. Ausgangssituation	9
2.1 Industrie und Produktionsforschung sichern unseren Wohlstand	9
2.2 Die Bedeutung der Produktionsforschung muss weiter gestärkt werden!	10
2.3 Wir stehen vor alten und neuen Herausforderungen	10
3. Vision »Produktion 2030«	14
3.1 Produktionstechnik als Integrator multidisziplinärer Ansätze	14
3.2 Wie produzieren wir in Zukunft?	15
3.2.1 Digitale und biologische Transformation befähigen zu Spitzenleistungen	15
3.2.2 Der Mensch bestimmt weiterhin die Wertschöpfung	16
3.2.3 Strukturmodelle zukünftiger Wertschöpfungssysteme	16
4. Zielbilder für die Produktion 2030	18
4.1 Zielbild der Nutzenzentrierung	19
4.2 Zielbild der Wertschöpfungssystemintelligenz	20
4.3 Zielbild der Produktionsfaktoreallokation	22
5. Empfehlungen zur Gestaltung zukünftiger Forschungsschwerpunkte	23
5.1 Prioritäre Forschungsfelder zur Entwicklung lebendiger Produkte	23
5.2 Prioritäre Forschungsfelder zur Entwicklung biointelligenter Wertschöpfungssysteme	25
5.3 Prioritäre Forschungsfelder zur Erreichung einer ultraeffizienten Ressourcenbewirtschaftung	30
6. Empfehlungen zur Verbesserung des Innovationssystems	32
7. Ausblick	34
Literaturverzeichnis	35
Mitwirkende	38
Impressum	43

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1 Struktur der Ergebnisse	8
Abbildung 2 Prioritäre Forschungsfelder	9
Abbildung 3 Herausforderungen für die Produktion	11
Abbildung 4 Bedeutende Technologiefelder der Produktionsforschung.....	14
Abbildung 5 Vier prototypische Strukturmodelle zukünftiger Wertschöpfungs-systeme	16
Abbildung 6 Drei strategische Säulen entlang des Transformationsprozesses	18
Abbildung 7 Nutzenzentrierung – Anforderungen an die Produkte der Zukunft.....	20
Abbildung 8 Wertschöpfungssystemintelligenz – Anforderungen an die Wertschöpfung der Zukunft	21
Abbildung 9 Produktionsfaktorenallokation – Anforderungen an die Ressourcenbewirtschaftung.....	22
Abbildung 10 Wandlungsfähige Gestaltung von Produkten.....	23
Abbildung 11 Funktionale Materialien und Oberflächen.....	24
Abbildung 12 Gestaltung und Implementierung von Business Ecosystemen.....	24
Abbildung 13 Plattformbasierte Wertschöpfung.....	25
Abbildung 14 Transformierende cyber-physische Produktionssysteme CPPS	26
Abbildung 15 Künstliche, kognitive Intelligenz	27
Abbildung 16 Applikation biobasierter Vorgänge und Intelligenz.....	28
Abbildung 17 Kognitive Interaktion soziotechnischer Produktionssysteme	29
Abbildung 18 Neue Lern- und Weiterbildungskonzepte	30
Abbildung 19 Anwendungsoptimiertes Werkstoffengineering.....	31

1. EINLEITUNG

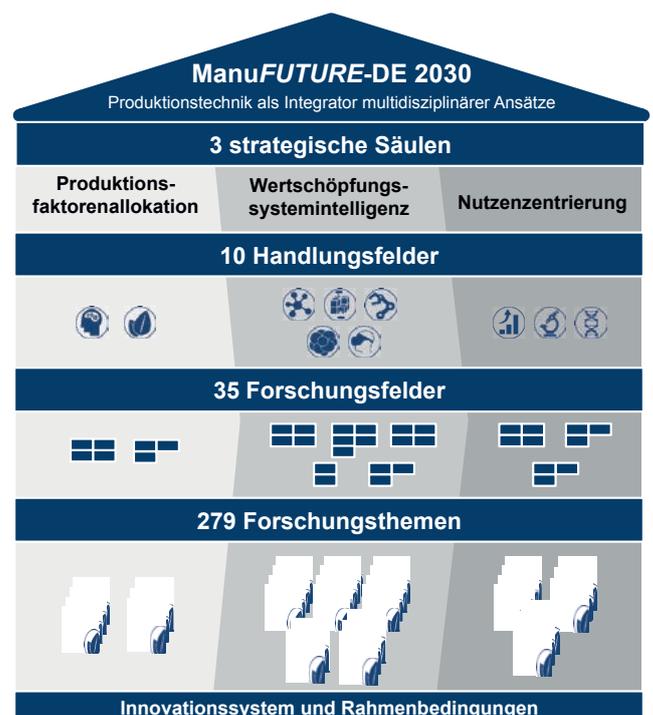
»Um die deutsche Industrie langfristig am Standort Deutschland zu erhalten, müssen wir entschlossen handeln!« kann als Leitspruch dieser Untersuchung gelten. Damit ist nicht gemeint, dass die Industrie von Grund auf umstrukturiert werden muss. Vielmehr müssen wir die herausragende Position unserer breit aufgestellten innovativen Industrie sichern und weiter ausbauen. Hierzu gilt es, rechtzeitig die Weichen zu stellen. Handlungsbedarf besteht insbesondere in zwei Bereichen. Zum einem müssen die notwendigen politischen, rechtlichen und infrastrukturellen Voraussetzungen geschaffen werden, um unsere Innovationskraft zu stärken. Zum anderen gilt es, das deutsche Innovationssystem auf zukunftsrelevante Technologien und Forschungsthemen strategisch auszurichten.

Unter der Federführung des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau VDMA beschäftigten sich mehr als 140 Vertreter aus Industrie und Wissenschaft sowie der relevanten Branchenverbände mit der Identifikation prioritärer Forschungsthemen und Maßnahmen zur nachhaltigen und praxisorientierten Innovationsunterstützung. In insgesamt sieben Branchenworkshops, Onlineumfragen und rund 50 Experteninterviews konnten Herausforderungen und Forschungsbedarfe herausgearbeitet, bewertet und priorisiert werden. Entstanden ist eine strategische Forschungsagenda für die produzierende Industrie bis 2030. Gegliedert in drei strategische Säulen umfasst diese Agenda zehn Handlungsfelder, welche in untergeordnete Forschungsfelder strukturiert sind (Abbildung 1). Diese werden jeweils durch weitere Thesen und Zielzustände detailliert. In Summe konnten 279 Forschungsthemen identifiziert und bezüglich ihres technologischen Reifegrads sowie ihrer strategischen Relevanz bewertet und zeitlich eingeordnet werden. Letztlich erlaubte der iterative Diskussions- und Priorisierungsprozess eine Herausstellung konkreter Handlungsempfehlungen für Politik und Industrie.

Diese Kurzfassung stellt die Kernergebnisse und wichtigsten Forschungsbedarfe der Untersuchung heraus. Zu jedem der 10 Handlungsfelder wird ein prioritäres Forschungsfeld benannt (Abbildung 2). Gleichermäßen unterstützen aufgezeigte priorisierte Forschungsfelder bei der Ausgestaltung politischer Forschungsförderungsprogramme sowie bei der strategischen Ausrichtung und Schwerpunktsetzung in der industriellen Forschung. Darüber hinaus wird in Kap. 6 die Verbesserung des Innovationssystems thematisiert und entsprechende Empfehlungen ausgesprochen.

Die Gesamtergebnisse inklusive detaillierter Erläuterungen können der Langfassung entnommen werden unter www.ipa.fraunhofer.de/studien.

Abbildung 1: Struktur der Ergebnisse



2. AUSGANGSSITUATION

2.1 Industrie und Produktionsforschung sichern unseren Wohlstand

Die Industrie ist der Grundpfeiler unseres Wohlstands

Die verarbeitende Industrie ist nach wie vor einer der Grundpfeiler des Wohlstands und Beschäftigungsmotor in Deutschland und Europa. Mit Bezug zu Beschäftigung und Wertschöpfung erbringt das verarbeitende Gewerbe den größten Anteil der Realwirtschaft der EU-28 Staaten. Etwa zwei Millionen Industrieunternehmen beschäftigen rund 30 Millionen Arbeitnehmer und liefern einen Beitrag von 1630 Mrd. € zur Bruttowertschöpfung. Dies entspricht innerhalb der Realwirtschaft fast 23 % der Beschäftigung und mehr als einem Viertel der Wertschöpfungsleistung.¹ Darüber hinaus führt jeder neue Industriearbeitsplatz, aufgrund gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Verflechtungen, zur Schaffung und dem Erhalt von bis zu zwei Arbeitsplätzen in anderen Sektoren.² Das macht die Industrie zum Grundpfeiler unseres Wohlstands.

¹ Eurostat 2017

² Europäische Kommission 2016

Wir sind Fabrikaurüster der Welt

Das Fundament unserer Wirtschaftskraft ist eine breit aufgestellte mittelständisch geprägte Industrie, die auf eine jahrzehntelange erfolgreiche Tradition zurückblickt. Gemessen am Umsatz und den Exporten bilden die Automobilindustrie, der Maschinen- und Anlagenbau, die Prozessindustrie sowie die Elektroindustrie die bedeutendsten Branchen. Hinter diesen Schlüsselindustrien stehen die Fabrikaurüster, welche durch ihre Innovationen die Industrie zu Spitzenleistungen befähigen. Ihre Erzeugnisse haben weltweit eine Exzellenzposition inne und reichen von Messtechnik, Bildverarbeitungstechnik, Automatisierungstechnik, Prozesstechnologien, Biotechnologien, Verpackungstechnik, Informations- und Kommunikationstechnik, Gebäudetechnik, bis hin zu Systemlösungen für komplette Produktionssysteme und Fabriken. Diese hochspezialisierte und dennoch breit aufgestellte Struktur sichert uns die führende Position als Fabrikaurüster der Welt.

Unser Erfolgsmodell: Innovationsexporteur

Deutschland ist eine Exportnation. Nur China und die USA exportieren mehr Waren. Der deutsche Außenhandel konzentriert sich dabei stark auf Mid- und Hightech-Produkte von hoher Qualität. Lässt man die EU als Wirtschaftsraum außen vor, ist Deutschland nach China die führende Exportnation im Bereich Hightech-Produkte. Dies sind eindrucksvolle Belege

Abbildung 2: Prioritäre Forschungsfelder

Wandlungsfähige Produkte	Funktionale Materialien	Business Ecosysteme	Anwendungsoptimiertes Werkstoffengineering
Lern- und Weiterbildungskonzepte	Plattformbasierte Wertschöpfung	Künstliche, kognitive Intelligenz	Applikation biobasierter Intelligenz
	Transformierbare cyber-physische Produktionssysteme	soziotechnischer Produktionssysteme	Interaktion

für die Exportstärke unserer Industrie und die globale Wettbewerbsfähigkeit der Produkte »Made in Germany«. Trotz einer relativen Ressourcenarmut schafft es die deutsche Industrie, weltweit führend zu sein und kontinuierlich neue Maßstäbe zu setzen. Diese Vorreiterrolle verdanken wir der engen Verzahnung eines hervorragenden Ausbildungssystems, öffentlicher Spitzenforschung sowie innovationsstarker Unternehmen. Hierdurch sind wir in der Lage, unser Wissen stetig weiterzuentwickeln und unsere Innovationen weltweit zu exportieren.

2.2 Die Bedeutung der Produktionsforschung muss weiter gestärkt werden!

Die Reindustrialisierung in Europa geht nur langsam voran

Sollte es nicht gelingen, die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie nachhaltig zu gestalten, sind massive Auswirkungen auf den Wohlstand und die Gesellschaft eine unvermeidbare Folge. Mit diesem Weckruf startete MANUFUTURE bereits vor zwölf Jahren. Eine angemessene Wertschätzung in der politischen Diskussion und öffentlichen Wahrnehmung erfuhr die Industrie erst im Zuge der Finanz- und Wirtschaftskrise. Resultierend hieraus rief die EU-Kommission im Jahr 2012 das Ziel aus, den Industrieanteil an der Bruttowertschöpfung in Europa von 16 %, bis 2020, auf 20 % zu steigern.³ Eine Reindustrialisierung Europas ist bislang aber nicht in Sicht. Bei

der Betrachtung der einzelnen Mitgliedstaaten zeigt sich eine enorme Heterogenität. Länder wie Tschechien, Ungarn oder Deutschland verfügen über eine gesunde industrielle Basis und erfüllen schon heute das EU-Ziel. Demgegenüber stehen Länder wie zum Beispiel Griechenland oder Frankreich, deren Industrieanteil nur noch bei etwa 10 % liegt.

Andere Industrienationen haben den Trend bereits erkannt

Auch andere Industrienationen haben die Bedeutung der Reindustrialisierung erkannt. Dabei versuchen sie, ihre Stärken auszubauen und setzen auf unterschiedliche Schwerpunkte. Im Gegensatz zu Europa konzentrieren sich die USA auf die Softwarekomponente der Produkte und den Kundennutzen. Neue digitale Geschäftsmodelle und softwarebasierte Produkttechnologien werden schnell im Markt etabliert. Im Fokus stehen dabei die Interoperabilität und anwenderfreundliche Standards. China steht vor der Herausforderung, den Schritt aus der zweiten direkt in die vierte Phase der Industrialisierung zu vollziehen. Dabei verfolgt die chinesische Regierung, im Gegensatz zu anderen Industrienationen, eine langfristige, bis zum Jahr 2049 angelegte Gesamtstrategie. Die »Made in China 2025«-Strategie formuliert in einer ersten Etappe ehrgeizige Ziele zur Modernisierung der chinesischen Industrie. So ist in den letzten Jahren ein starkes Netzwerk von Zulieferern und Kompetenzclustern aufgebaut worden, welches sich dynamisch mit großer staatlicher Unterstützung an neue Produkte anpasst und mehr und mehr eigene Innovationen hervorbringt.⁴

2.3 Wir stehen vor alten und neuen Herausforderungen

Die zukünftigen Herausforderungen der deutschen Industrie ergeben sich aus dem komplexen Zusammenspiel von ökologischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Veränderungen. Vereinfacht dargestellt entscheiden

³ Europäische Kommission 2014

⁴ HNI & WZL 2016

diese Entwicklungen darüber, mit welchen Ressourcen wir welche Produkte für welche Kunden und Märkte unter Einsatz welcher Technologien zukünftig produzieren (Abbildung 3).

Entkopplung von Wachstum und Ressourcenverbrauch

Bedingt durch die Endlichkeit von fossilen Energieträgern und strategischen Ressourcen entstehen kritische Versorgungsrisiken für die Industrie. Verschärfend kommen zunehmende politisch und ökonomisch instabile Förder- und Transitländer und lokale sowie globale Krisen hinzu. Auf die Industrie hat dies massive Auswirkungen in Form steigender Rohstoffpreisen sowie einem erschwerten Zugang zu Produktionsfaktoren. Weiter erfordern gesetzliche Vorgaben und internationale Abkommen eine Reduktion der Emissionen und Abfälle.

Was eine verstärkte Internalisierung externer Effekte zur Folge hat. Um die Umwelt- und Klimaziele zu erreichen und gleichzeitig die Industrie wettbewerbsfähig zu halten, müssen Ressourcenverbrauch und Wachstum entkoppelt werden. Die Ressourcenverknappung darf nicht zur Wachstumsbremse werden. Vielmehr gilt es, das enorme wirtschaftliche Potenzial zu erkennen und zu nutzen, welches hinter dieser Herausforderung steht.

Produktivitätssteigerung und Fachkräftesicherung

Der zukünftige Wohlstand unserer Gesellschaft ist maßgeblich von der Steigerung des Leistungsbeitrags pro Erwerbstätigem abhängig. Jedoch weist die Arbeitsproduktivität seit den 1970er Jahren einen negativen Wachstumstrend auf. Durch

Abbildung 3: Herausforderungen für die Produktion



die Digitalisierung wird zwar eine signifikante Erhöhung der Produktivität erwartet, diese drückt sich allerdings bislang nicht in einer positiven Produktivitätsentwicklung aus. Verschärfend kommen steigende administrative Arbeitsaufwände innerhalb der Unternehmen hinzu. Weiter beeinträchtigt der Fachkräftemangel die Leistungsfähigkeit unserer Industrie. Aktuelle Studien belegen zwar einen kurzfristigen Anstieg der Bevölkerung, langfristig jedoch sehen die Prognosen voraus, dass die Bevölkerungszahl in Deutschland signifikant sinkt.⁵ In Verbindung mit der Abwanderung von hochqualifiziertem Fach- und Forschungspersonal wirkt sich dies dramatisch auf die Verfügbarkeit von Fachkräften in Deutschland aus. Dies ist schon heute in nahezu allen Wirtschaftsbereichen zu spüren. Mit am stärksten betroffen ist das verarbeitende Gewerbe.⁶ Bereits heute hat ein Drittel der Industrieunternehmen Probleme, offene Stellen zu besetzen. Bis 2030 wird der drohende Verlust an Wirtschaftswachstum auf 4.600 Mrd. Euro geschätzt.⁷

⁵ Destatis 2015; Europäische Kommission 2015; Deschermeier 2017

⁶ Prognos 2015

⁷ Prognos 2019

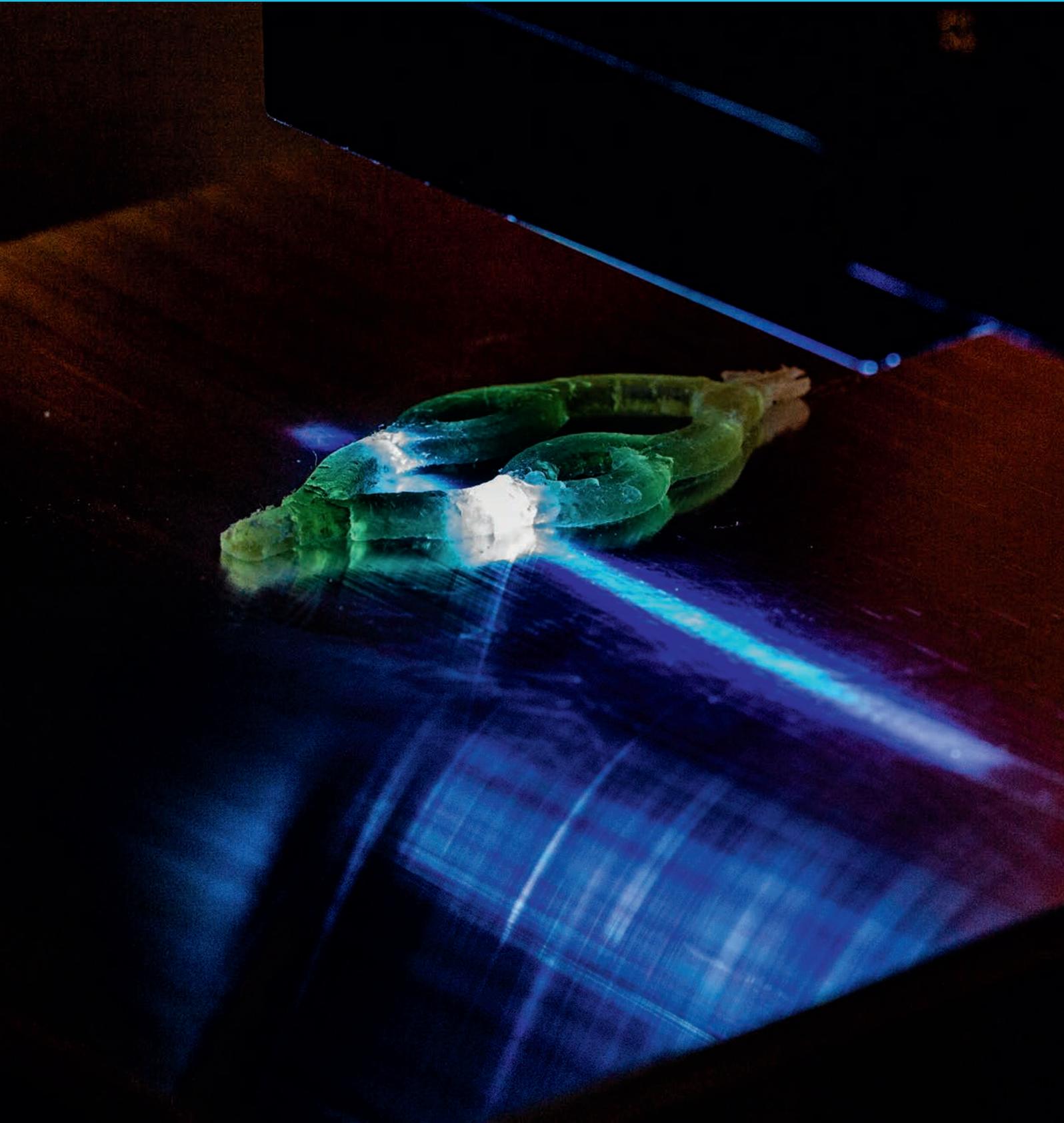
Globaler Wettbewerb um dynamische Märkte

Der wirtschaftliche Wandel drückt sich in einer Nachfrageverschiebung von West nach Ost aus. Wachsende Bevölkerungszahlen und steigender Wohlstand in aufstrebenden Entwicklungs- und Schwellenländer sind hierfür ursächlich. Unternehmen aus China und Indien etablieren sich als gleichwertige Konkurrenten und führen eine Verschiebung der wirtschaftlichen Kraftzentren herbei. Einhergehend mit dem Trend zu vermehrtem nationalem Protektionismus und dem Abbau freier Handelszonen wird der Zugang zu neuen und bestehenden Märkten erschwert. Gleichzeitig wandeln sich die Kundenanforderungen und werden individueller und serviceorientierter. Dies stellt neue Herausforderungen an die Produktgestaltung und Innovationsgeschwindigkeit. Vor dem Hintergrund der starken Exportabhängigkeit unserer Industrie ist dies eine Entwicklung, die wir adressieren müssen.

Disruptive Technologien und Geschäftsmodelle

Die Digitalisierung wirkt als Innovationsmotor und Wettbewerbstreiber auf die gesamte Weltwirtschaft. Zur Lösung immer komplexer werdenden Aufgaben sind Informations- und Kommunikationstechnologien bereits heute essenzielle Bestandteile von Wertschöpfungssystemen. Sie ermöglichen die Koordination und Synchronisation der Geschäfts-, Logistik- und Produktionsprozesse im eigenen Unternehmen und mit externen Partnern, wie auch die Einbindung und Kommunikation mit Kunden. Jedoch führen diese technischen Möglichkeiten zu neuen Gefahren für etablierte Unternehmen. So kommt es zu elementaren Umbrüchen in bestehenden Geschäftsmodellen und Kundenbeziehungen. Resultierend hieraus werden bestehende Marktbarrieren aufgelöst oder aufgeweicht. Auch zukünftig wird die Weiterentwicklung von Hardwarekomponenten – z.B. leistungsfähiger, hochpräziser Fertigungsverfahren – ein wichtiger Bestandteil für den Erfolg der deutschen Industrie sein. Von noch größerer Bedeutung wird die Integration der Softwarekomponente sein.

2. AUSGANGSSITUATION



3. VISION »PRODUKTION 2030«

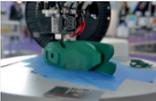
3.1 Produktionstechnik als Integrator multidisziplinärer Ansätze

Traditionell vereint die Produktionsforschung die Entwicklungen neuer Produktionstechnologien und -techniken mit der ökonomischen und soziokulturellen Gestaltung des Gesamtsystems Produktion. Die Komplexitätssteigerung und die immer engere Verzahnung von Technologien unterschiedlichen Forschungsdisziplinen führen dazu, dass die Schnittstellen zu anderen

Forschungsbereichen immer wichtiger werden. Heute vereint die Produktionsforschung Technologien aus einer Vielzahl an Forschungsbereichen. Diese finden sich in den Schlüsseltechnologien (Key Enabling Technologies, KET), auf die sich die Europäische Kommission und unterschiedliche Technologie-Foresights der Bundesregierung in ihrer Innovationspolitik fokussieren.⁸ Hierzu zählen u.a. die Biotechnologie, Photonik, Materialtechnologie, Mikro- und Nanoelektronik, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie die Weiterentwicklung mathematischer Verfahren (Abbildung 4). Bei der Entwicklung dieser Technologien nimmt die Produktionstechnik eine Schlüsselrolle als systemischer Integrator der multidisziplinären Ansätze ein, indem sie die einzelnen Bereiche miteinander verknüpft.

⁸ Europäische Kommission 2018

Abbildung 4: Bedeutende Technologiefelder der Produktionsforschung

<p>Bio-technologien</p>  <p>Beispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Saubere und nachhaltige Prozessalternativen ■ Bioraffinerien 	<p>Photonik</p>  <p>Beispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Laserbearbeitung ■ Additive Verfahren 	<p>Material-technologien</p>  <p>Beispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Programmierbare Materialien ■ Substitution kritischer Rohstoffe
<p>Mikro- und Nanoelektronik</p>  <p>Beispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Funktionsintegration ■ Physikalische Alternativen für elektronische Bauelemente 	<p>I&K-Technologien</p>  <p>Beispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Cyber-physische Systeme ■ Schnittstellen 	<p>mathematische Verfahren</p>  <p>Beispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Big Data / Smart Data ■ Künstliche Intelligenz ■ Maschinelles Lernen
<p>Weiterentwicklung klassischer Fertigungstechnologien über heutige Grenzen hinweg</p>  <p>Beispiele:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Resiliente Fertigungsverfahren ■ Ultrapräzision bis in den Nanobereich 		

Zukünftig werden diese Technologien aufgrund ihres Querschnittscharakters einen immensen Einfluss auf die Produktionstechnik sowie auf das gesellschaftliche Leben haben. Eine ausschließliche Fokussierung auf die Schlüsseltechnologien ist jedoch der falsche Weg, denn die Weiterentwicklung von Basistechnologien und klassischen Produktionsverfahren über heutige Grenzen hinweg wird nicht minder relevant für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie sein.

3.2 Wie produzieren wir in Zukunft?

3.2.1 Digitale und biologische Transformation befähigen zu Spitzenleistungen

Die digitale Transformation bleibt das bestimmende Thema des nächsten Jahrzehnts ...

Die Digitalisierung ist eines der bestimmenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Themen. Im Kontext der produzierenden Industrie wird die digitale Transformation unter dem Begriff Industrie 4.0 diskutiert und beforscht. Sie wird als die aktuell bedeutendste Entwicklung zum Erhalt und zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie angesehen. Ihre Umsetzung vollzieht sich in mehreren aufeinander aufbauenden Stufen. Diese führen von der Digitalisierung – dem digitalen Abbilden analoger Prozesse – über die Virtualisierung – der digitalen Modellierung von Prozessen – zur Vernetzung aller Bestandteile des Wertschöpfungssystems durch das Internet of Everything. Die bislang letzte Stufe wird in der Autonomisierung von Wertschöpfungssystemen – also sich selbst steuernden und regelnden Systemen – gesehen. In den letzten Jahren konnten hier bereits große Fortschritte erzielt werden. Vor allem aufgrund deutscher Initiativen ist die Forschungs- und Entwicklungslandschaft inzwischen weitgehend strukturiert, bis hinein in Normungs- und Standardisierungsprozesse, die den Markt auf die Aufnahme relevanter Technologien vorbereiten. Dennoch ist vieles noch nicht voll-

ständig erforscht. In Bereichen wie der künstlichen Intelligenz oder smarterer Materialien steht die Produktionsforschung erst am Anfang. Zur vollständigen technischen, organisatorischen und rechtlichen Umsetzung werden noch über Jahre hinweg große Anstrengungen seitens der Forschung, der Industrie und der Politik aufzubringen sein.

... und wird ergänzt durch eine biologische Transformation des Wertschöpfungssystems

Mit Blick auf zukünftige Herausforderungen zeigte sich in der Diskussion, dass die digitale Transformation industrieller Wertschöpfungssysteme alleine nicht ausreichend ist, um essenziellen Herausforderungen der Zukunft wie dem Klimawandel, der Ressourcenverknappung oder der steigenden Komplexität in unternehmerischen Prozessen adäquat zu begegnen. So wurde durch Analysen der Markt-, Technologie- sowie Wissenschafts- und Industrieentwicklungen, neben der digitalen, eine weitere Transformation der Wertschöpfungssysteme identifiziert. Diese manifestiert sich in der Vision einer parallel zur digitalen Transformation ablaufenden biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung. Der Kerngedanke dieser biologischen Transformation ist eine Effektivitäts- und Effizienzsteigerung der industriellen Wertschöpfung, durch die Anwendung von Wissen über und aus der Natur und die Integration von sogenannter Bioware (z.B. Proteine, Zellen, Mikroorganismen) in Produktionsprozessen. Grundlage hierfür bilden die biointelligenten Systeme. Diese entstehen durch die Integration von Informationstechnologie, Biotechnologie und traditionellen Produktionstechnologien. Ziel dieser Vision sind autonom agierende, ressourcenerhaltende oder sogar ressourcenschaffende Wertschöpfungssysteme, welche aufgrund ihrer ad-hoc adaptierbaren Architektur resilient gegenüber sich verändernden Umwelteinflüssen sind.

In der konsequenten Ergänzung und Weiterführung der digitalen Transformationen durch die biologische Transformation

der industriellen Wertschöpfung werden zukünftig große wirtschaftliche und gesellschaftliche Potenziale vermutet. Im Rahmen dieser Untersuchung konnten erste Ansätze und wichtige Forschungsthemen identifiziert werden.

3.2.2 Der Mensch bestimmt weiterhin die Wertschöpfung

Der technologische Wandel wird die Rolle des Menschen in der Produktion radikal verändern. Dies führt zukünftig allerdings nicht etwa zu einer menschenleeren Fabrik. Automatisierungstechnik, künstliche Intelligenz und Assistenzsysteme bedingen jedoch tiefgreifende Veränderungen in Bezug auf klassische Tätigkeitsprofile. Mitarbeiter werden von Routineaufgaben entlastet und so Kapazitäten für kreative, kognitiv anspruchsvolle und gestaltende Aufgaben freigesetzt. Neue Kollaborations- und Kompetenzpartnerschaften führen zu einer symbiotischen Beziehung zwischen Mensch und Maschine, in der die Potenziale der Diversität des Menschen und der Effizienz der Maschine maximal ausgeschöpft werden können. Die motorischen, intellektuellen, assoziativen und sensorischen sowie emotionalen Fähigkeiten des Menschen, seine Flexibilität und Kompetenzvielfalt werden durch die

Fähigkeiten der Maschinen ergänzt, definierte Aufgaben effizient und präzise zu erledigen. Diese beiden Welten gilt es, durch einen inter- und transdisziplinären Diskurs gesellschaftlich akzeptiert zu vereinen. Das Rollenverständnis des Menschen wird sich dabei weg vom Kostenverursacher hin zum Werterzeuger und Flexibilitätsgaranten verändern.

3.2.3 Strukturmodelle zukünftiger Wertschöpfungssysteme

Je nach Marktsegment und Rahmenbedingungen resultieren unterschiedliche Strukturmodelle für zukünftige Wertschöpfungssysteme. Im Rahmen der Erarbeitung einer Vision 2030 wurden von den europäischen Experten von MANUFUTURE-EU vier Kernmodelle identifiziert und beschrieben (Abbildung 5).

Die vier Kernmodelle können in ein Portfolio eingeordnet werden, das über die räumliche Ausdehnung des Wertschöpfungsnetzes (von regional zu global) und die Regulierung (ebenfalls von regional zu global) aufgespannt wird. Bei Virtuellen Wertschöpfungsnetzwerken unterliegen die Wertschöpfungspartner regionaler Regulierung. Da diese Netzwerke stark fluktuieren, oft nur auftragsgebunden zusammengestellt

Abbildung 5: Vier prototypische Strukturmodelle zukünftiger Wertschöpfungssysteme



werden, wird die globale Regulierung sie nur schwach greifen. Diese vier generellen Wertschöpfungsstrukturen werden zusammen mit vielen Zwischenstufen koexistieren und je nach Markt, Kundennutzen, Lebenszyklen der Produktmodule, Stückzahlen und vielen anderen Aspekten unterschiedlichste Ausprägungen haben.

Global integrierte Wertschöpfungsnetze

Dieses Wertschöpfungsmodell ist eine Weiterentwicklung der heutigen global verteilten Wertschöpfungsnetze. Repräsentanten hierfür sind global agierende Unternehmen mit einem großen Zulieferernetzwerk, wie etwa die Automobilindustrie. Zukünftig werden diese Modelle eine ausgeprägte Echtzeitintegration von physischer und virtueller Welt aufweisen. Sie werden überwacht und geschützt durch global harmonisierte Regelwerke. Unterstützt werden diese Wertschöpfungsnetze durch KI-Systeme (Künstliche Intelligenz) die potenziellen Kunden in ihrem Verhalten beobachten, Bedarfe und Wünsche identifizieren und sie in Produktdesigns, Konstruktionsdaten und Wirtschaftlichkeitskalkulationen als Entscheidungsgrundlage für das Management umsetzen.

Regionale Produktion für globale Märkte – Kompetenzregionen

Dieses Modell bezieht sich, wie das oben genannte, auf globale Märkte. Auf der Herstellerseite dominieren allerdings regionale Netzwerke produzierender, oft mittelständischer, Unternehmen. Beispielhaft sind hier hochspezialisierte Fabrik-ausrüster zu nennen, die mit einem hohen Eigenfertigungsanteil kundenspezifisch ganze Prozessketten beherrschen. Die Produktionsanlagen sind nach frugalen Prinzipien kosten- und aufwandsoptimiert hergestellt. Professionelle Plattformen unterstützen die Produktentwicklung mit den Kunden. Dabei werden vorgegebene Normen und Standards sowie die verfügbaren Produktionsmöglichkeiten und produktbezogenen Dienste berücksichtigt. Entsprechend dem Prinzip der regiona-

len intelligenten Spezialisierung (Regional Smart Specialisation Strategy RIS3) sind die Regionen auf spezifische erfolgreiche Produkte und Produktgruppen spezialisiert und liefern diese in die ganze Welt.

Städtische Produktion – Urban Manufacturing

Das prototypische Modell der städtischen oder kundennahen Produktion hat einen noch stärkeren Regionalbezug wie das zuvor beschriebene Modell. Es wird regional für regionale Kunden produziert. Aufgrund des urbanen Wachstums wird dies oft in den Städten erfolgen und wird deshalb als Urban Manufacturing bezeichnet, obwohl auch Produktion im ländlichen Raum darunter gefasst wird. Elemente oder Komponenten können dabei weltweit bezogen werden. Die Endfertigung findet jedoch nahe oder sogar direkt beim Kunden vor Ort statt. Ein Beispiel hierfür ist das personalisierte Herstellen hochwertiger Konsumgüter in Regionen für Regionen wie es in der Sportartikelindustrie zurzeit zu beobachten ist.

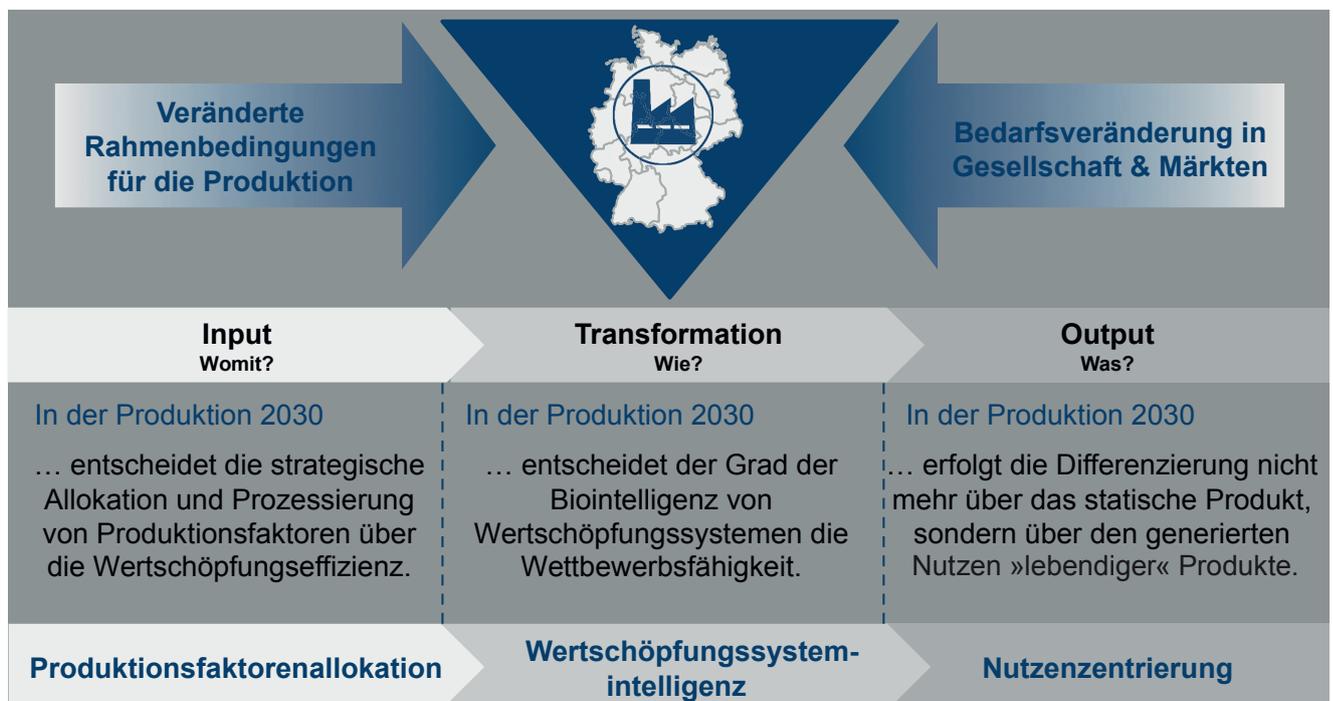
Virtuelle Wertschöpfungsnetze

Im Gegensatz zu den zentral gesteuerten Wertschöpfungsnetzen der global integrierten Wertschöpfungsnetze sind virtuelle Wertschöpfungsnetzwerke vollständig dezentralisiert. Plattformbasierte ad-hoc-Wertschöpfungsnetze bilden sich spontan, um einen zeitlich und räumlich beschränkten Bedarf zu befriedigen. Produzierende Unternehmen und Dienstleister unterschiedlichster Größe bieten ihre Kompetenzen und Kapazitäten über die Plattformen an. Professionelle Plattformen, von Brokern angeboten oder via Open-Source bereitgestellt, unterstützen die Bildung und das Management dieser ad-hoc-Wertschöpfungsnetze inklusive deren rechtlichen und finanziellen Abwicklung. Zahlreiche erfolgreiche Beispiele hierfür können bereits heute in unterschiedlichen Anwendungssegmenten als Plattformen im Internet gefunden werden.

4. ZIELBILDER FÜR DIE PRODUKTION 2030

Die Identifikation der Forschungsbedarfe basiert auf dem Grundgerüst des klassischen Wertschöpfungsprozesses (Input, Transformation, Output). In dieser Struktur können die grundlegenden Fragen der industriellen Produktion diskutiert werden. Ausgehend von einer Kundenperspektive wurden drei strategische Säulen – Nutzenzentrierung (Output – Anforderungen an die Produkte der Zukunft), Wertschöpfungssystemintelligenz (Transformation – Anforderungen an die Wertschöpfung der Zukunft) und Produktionsfaktorenallokation (Input – Anforderungen an die Ressourcenbewirtschaftung) – identifiziert. Diese sind jeweils durch eine These und strategische Zielbilder für die Produktion 2030 pointiert (Abbildung 6).

Abbildung 6: Drei strategische Säulen entlang des Transformationsprozesses



4.1 Zielbild der Nutzenzentrierung

Anforderungen an die Produkte der Zukunft

Veränderungen in den Bedürfnissen und Nutzeransprüchen rücken das Beziehungsmodell des Business to User (B2U) in den Fokus der Produkt- und Dienstleistungsauslegung. Adressiert wird der tatsächliche Nutzer und sein Nutzungsverhalten und nicht der potenzielle Käufer. Somit geht dieses Konzept über den Management-Ansatz der Kundenorientierung hinaus. Die professionelle Vermarktung preiswerter Produkte und Dienstleistungen alleine wird zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit nicht mehr ausreichen, vielmehr muss ein personalisierter Nutzen geboten sein. Es kommt zu einer Ablösung der traditionellen generischen Strategien, Differenzierung und Kostenführerschaft durch die Strategie der Nutzenführerschaft. Das reale Kundenbedürfnis muss durch Synchronisation vorhandener Technologiepotenziale in die Funktionsgestaltung neuer Produkte überführt werden. Folgenden Anforderungen an Produkte und Dienstleistungen sind hier entscheidend:

- **Personalisierung** Personalisierte – individuell auf den Nutzer abgestimmte – Bereitstellung des Leistungsangebots.
- **Serviceorientierung (Everything as a Service – XaaS)** Produkte sind durch ein vielfältiges Dienstleistungsangebot erweiterbar. Leistungen sind nur bei Inanspruchnahme zahlungspflichtig.

- **Zugriff und Verfügbarkeit** Der Zugriff auf Produkte und Dienstleistungen ist jederzeit und von überall bei sofortiger Verfügbarkeit gewährleistet.
- **Transparenz und Einfachheit** Die Informationsdichte ist auf den Nutzer zugeschnitten und für ihn einfach mit anderen Angeboten zu vergleichen. Bedienbarkeit und Interaktion sind intuitiv gestaltet.
- **Kontrolle und Sicherheit** Datensicherheit ist zu jeder Zeit gewährleistet und der Nutzer hat die Kontrolle über die eigenen Daten.
- **Nachhaltigkeit** Die unternehmerische Verantwortung, im Sinne einer umweltbewussten material- und energieeffizienten Produkt- und Dienstleistungsgestaltung, ist über den gesamten Produktlebenszyklus gewährleistet.
- **Wahlfreiheit und Flexibilität** Es gibt keine unwillentlichen Lock-In-Effekte. Der Nutzer kann jederzeit zwischen Produkten wechseln, ohne einen persönlichen Nachteil zu erleiden.

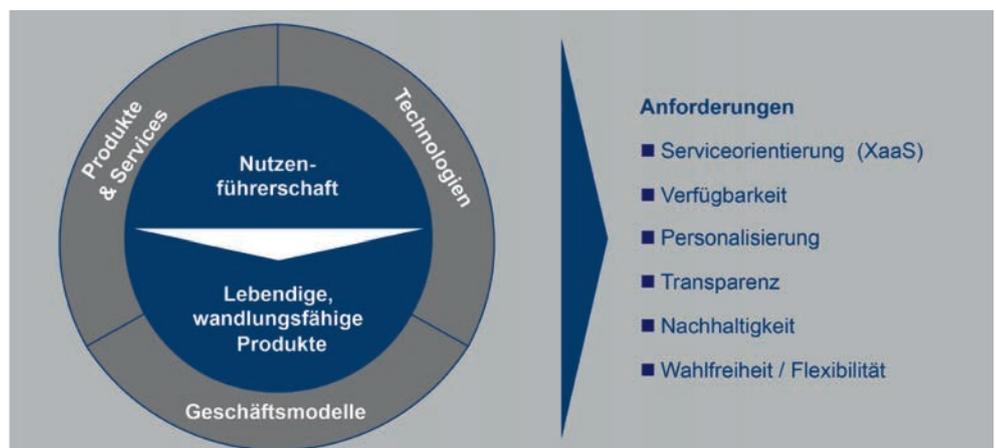
Dies erfordert die Identifikation der konkreten Ausgestaltung dieser Anforderungen. Neue Produktentwicklungsmethoden, Gestaltungsrichtlinien für die Entwicklung, Implementierung von Geschäftsmodellen und Miniaturisierungslösung für die Funktionsintegration in Produkte stellen uns zukünftig vor große Herausforderungen.

Zielbild: »Lebendige« Produkte – Anpassungsfähigkeit an die funktionalen Bedürfnisse des Nutzers

Als Zielbild ergeben sich »lebendige« Produkte. Hierfür ist das Zusammenspiel von Hardware, Software und Dienstleistungen sowie in vielen Fällen Bioware konstitutiv. Produktfunktionen müssen sich künftig dynamisch und zunehmend eigenständig über den Produktlebenszyklus an sich ändernde Anforderungen

anpassen. Produkte sind über ihre Komponenten transformierbar zu gestalten. Aufgrund ihrer Innovationsoffenheit, Transformierbarkeit und kognitiv-intelligenten Anpassungsfähigkeit hinsichtlich der funktionalen Bedürfnisse des Nutzers kann man die Produkte der Zukunft »lebendig« nennen. Diese Bezeichnung kann weiter als treffend angesehen werden, da die Produkte der Zukunft tatsächlich »Leben« in sich tragen können. Beispielsweise über die Integration von Bioware, also lebende Bioorganismen.

Abbildung 7: Nutzenzentrierung – Anforderungen an die Produkte der Zukunft



Wertschöpfungssystemintelligenz

In der Produktion 2030 entscheidet der Grad der Biointelligenz von Wertschöpfungssystemen die Wettbewerbsfähigkeit

4.2 Zielbild der Wertschöpfungssystemintelligenz

Anforderungen an die Wertschöpfung der Zukunft

Eine nachhaltige und effiziente Prozessierung von knappen Ressourcen unter den Anforderungen der Nutzenzentrierung ist nur über ein intelligentes Wertschöpfungssystem zu er-

reichen. Dabei zeigt sich die Intelligenz in der Orchestrierung der zur Verfügung stehenden Mittel. Bislang determinieren Wertschöpfungsambivalenzen die Wertschöpfungsarchitektur, beispielsweise die gegenläufigen Abhängigkeiten zwischen dem Grad der Flexibilität und der Effizienz oder dem Streben nach maximaler Auslastung von Anlagen bei gleichzeitiger Erhaltung einer ständigen Anlagenverfügbarkeit. Diese tradi-

tionellen Konflikte der Wertschöpfung werden zukünftig durch eine bedarfsgerechte Anpassung der Gestalt und Zusammensetzung der Wertschöpfungsarchitektur aufgelöst. Flankiert und unterstützt wird dies durch die digitale und biologische Transformation. Dabei wird die Auflösung starrer Wertschöpfungsketten durch ein intelligentes, vernetztes Gesamtsystem – von der Maschine bis zur Marktstruktur – angestrebt. Erforderlich hierfür sind anpassungsfähige und agile Strukturen, welche einen hohen Autonomiegrad aufweisen und eigenständig Entscheidungen und Optimierungen vornehmen können. Durch die Biointegration können neue Effizienzpotentiale z.B. durch das massive Verkürzen von Wertschöpfungsketten in technischen Systemen erzeugt werden. Im Zusammenspiel mit der optimalen Einbindung des Menschen und seiner Fähigkeiten wird das Gesamtsystem zu neuen Höchstleistungen befähigt (Abbildung 8).

Zielbild: Biointelligente Wertschöpfungssysteme – Ad-hoc und autonome Adaption der Wertschöpfungsarchitektur zur optimalen Lösung der Wertschöpfungsaufgabe

In biointelligenten Wertschöpfungssystemen werden die vorhandenen Gestaltungsräume der digitalen Transformation genutzt und durch die Anwendung biologischer Prinzipien und Verfahren auf ein neues Niveau gehoben. Das Zukunftsbild adressiert weiter eine grundlegende, wie nachhaltige Weiterentwicklung des soziotechnischen Systems. Neben den technologischen werden auch soziale Herausforderungen (z.B. die zukünftige Einbindung des Menschen, ethische Herausforderung der Maschinenautonomie oder der Biotechnologie) eine große Rolle spielen.

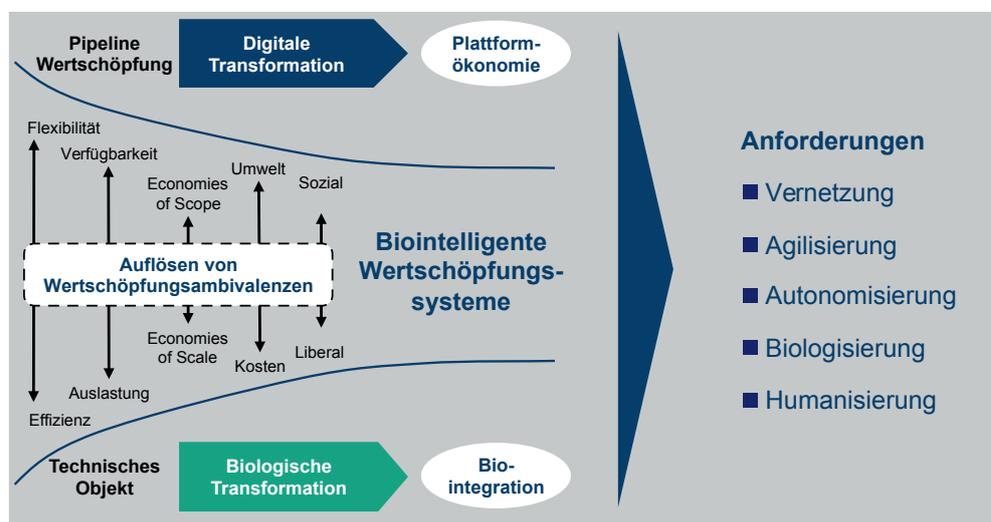


Abbildung 8: Wertschöpfungssystemintelligenz – Anforderungen an die Wertschöpfung der Zukunft

4.3 Zielbild der Produktionsfaktorenallokation

Anforderungen an die Ressourcenbewirtschaftung

Der Wettbewerb um energetische, materielle, personelle und monetäre Ressourcen wird immer intensiver. Weiter entsteht ein neuer Konkurrenzkampf um wissensrelevante Ressourcen, wie Daten, Informationen, Ideen oder Kreativität, als Grundlage für Innovationsfähigkeit. Gleichzeitig stehen die kreative Wissensarbeit bzw. empathiebasierte Dienstleistungen zukünftig im Wettbewerb mit künstlicher Intelligenz. Hieraus resultiert die Notwendigkeit der Erweiterung des Ressourcenbegriffes. Neben den klassischen Produktionsfaktoren muss Komplexität als Ressource ergänzt werden. Diese ergibt sich aus der Vielfalt, Vielschichtigkeit und Dynamik, der einzelnen, z.T. eng verzahnten Produktionsfaktoren sowie des Umfelds. Im Zusammenspiel mit dem technologischen Fortschritt in den Schlüsseltechnologien gilt es, neue Konzepte und Technologien zur effizienten Prozessierung von Ressourcen zu entwickeln. Hierzu muss ein Perspektivenwechsel vom Ressourcenverbrauch hin zur Ressourcennutzung bzw. -generierung vollzogen werden, mit dem Ziel einer ultraeffizienten Ressourcenbewirtschaftung.

Zielbild: Ultraeffiziente Ressourcenbewirtschaftung – Nachhaltige und ressourcenoptimale Leistungserstellung

Bei der ultraeffizienten Ressourcenbewirtschaftung stehen die Allokation und maximale Ausschöpfung von Nutzungspotenzialen der Inputfaktoren gleichermaßen im Mittelpunkt wie die Erarbeitung neuer Organisations- und Ausbildungskonzepte (Abbildung 9).

Die steigende Komplexität sollte bewirtschaftet also als Wettbewerbsvorteil genutzt werden und nicht zwingend reduziert werden. Neue agile Führungs- und Organisationsmodelle müssen etabliert werden, um die Trägheit bestehender Hierarchien aufzulösen. Es werden adäquate Methoden benötigt, um Talente zu identifizieren und langfristig zu halten sowie die Kompetenzen der Mitarbeiter stetig weiterzuentwickeln. Die effektive und effiziente Nutzung vorhandener Ressourcen muss verstärkt in den Fokus der Unternehmen und der Forschung gerückt werden. Neue nachhaltige Energie- und Materialkonzepte müssen entwickelt werden. In diesem Zuge gilt es, neue Materialien mit neuen Eigenschaften, nachhaltige Substitute für kritische Rohstoffe sowie zugehörige Produktionstechnologien und Verfahren zu entwickeln und zu erforschen.

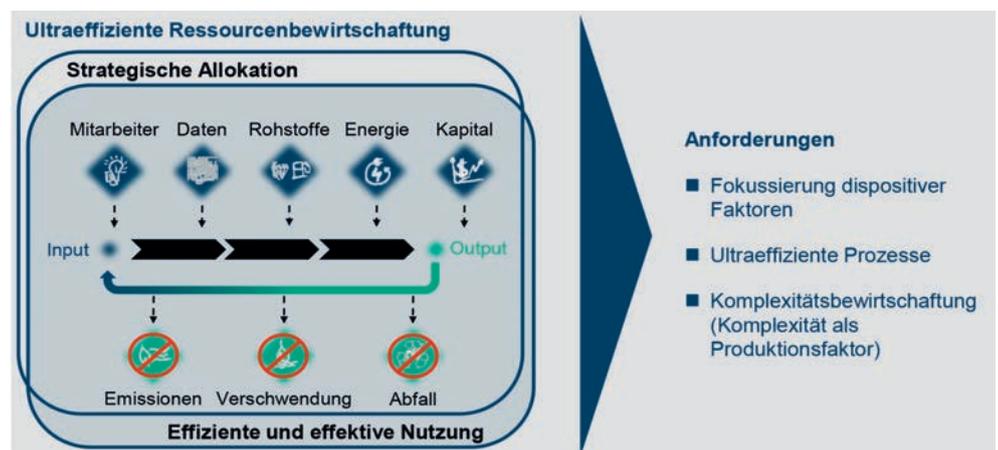


Abbildung 9: Produktionsfaktorenallokation – Anforderungen an die Ressourcenbewirtschaftung

5. EMPFEHLUNGEN ZUR GESTALTUNG ZUKÜNFTIGER FORSCHUNGSSCHWERPUNKTE

Gemäß der Vision der »Produktionstechnik als Integrator multidisziplinärer und systemischer Ansätze«, ist die Orchestrierung der identifizierten Einzelthemen entscheidend für den Erfolg der deutschen Industrie. Dennoch haben einzelne Themenfelder eine besondere Schlüsselrolle zur Erreichung der Zielzustände der drei strategischen Säulen. Nachfolgend werden diese Forschungsfelder mit besonderer Relevanz, welche sich aus dem iterativen Priorisierungs- und Diskussionsprozess ergeben haben, hervorgehoben.

Weiterführende Erläuterungen zu den Forschungsfeldern, inkl. der ermittelten und eingeordneten Forschungsthemen, können der Langfassung entnommen werden unter www.ipa.fraunhofer.de/studien.

5.1 Prioritäre Forschungsfelder zur Entwicklung lebendiger Produkte

Gestaltung von Produkten, Funktionale Materialien und Oberflächen und Business Ecosystem Engineering hervorzuheben.

Zur Erreichung des Zielbildes der lebendigen Produkte sind insbesondere die drei Forschungsfelder Wandlungsfähige

Wandlungsfähige Gestaltung von Produkten Transformability by Design



Die wandlungsfähige Gestaltung von Produkten ermöglicht eine Produktauslegung zur Anpassung an zukünftige Anforderungen. Um sich im Sinne eines lebendigen Produkts über den gesamten Lebenszyklus an veränderte Rahmenbedingungen anpassen zu können, müssen Produkte bereits in der Entwicklung für künftige Anforderungen konzipiert werden, damit sie als Bestandstechnologien jederzeit zu biointelligenten

Systemen aufgewertet werden können. Die innerhalb des Forschungsfeldes identifizierten Forschungsthemen unterstützen dabei, Bestandssysteme bzw. -technologien (sog. Legacy Systeme) zu biointelligenten Systemen aufzuarbeiten. Anpassungen können dadurch dezentral im laufenden Betrieb vorgenommen werden (Langfassung Kap. 4.1.1, Forschungsfeld 3).

Wandlungsfähige Gestaltung von Produkten

Bestandssysteme lassen sich zu (bio) intelligenten Systemen aufarbeiten. Hardware, Software und Bioware sind auch für künftige Anforderungen konzipiert. Anpassungen können dezentral im laufenden Betrieb vorgenommen werden.

Beispiele für wichtige Forschungsthemen:

- Entwicklung neuer Automationsarchitekturen – offenes und echtzeitfähiges Betriebssystem
 - Offenheit (Open X)
 - Anpassbarkeit in Echtzeit und während der Laufzeit
 - Funktionale Sicherheit in offenen Systemen
- Migrationskonzepte für Bestandssysteme



Abbildung 10: Wandlungsfähige Gestaltung von Produkten

Funktionale Materialien und Oberflächen



Funktionale Materialien und Oberflächen ermöglichen dank nanomodifizierter Strukturen die Gestaltung robuster, leichter und energieeffizienter (auch energieautarker) Produkte und bieten enorme Potenziale zur räumlichen Verdichtung von Funktionen und Fähigkeiten. Die Forschungsthemen unter-

stützen dabei, integrierte und hochverdichtete Funktionalitäten in Materialien und Oberflächen zu ermöglichen und damit die Realisierung smarter Miniaturisierungslösungen (Langfassung Kap. 4.1.2, Forschungsfeld 7).

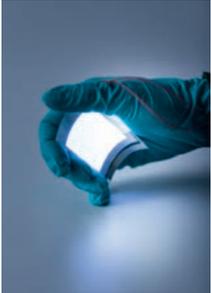
Funktionale Materialien und Oberflächen	Integrierte Funktionalität in Materialien und Oberflächen als Enabler smarter Miniaturisierungslösungen.
<p>Beispiele für wichtige Forschungsthemen: Entwicklung smarter, funktionaler Materialien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identifikation und Einsatzmöglichkeiten intelligenter Werkstoffeigenschaften (z.B. magnetostruktive Materialien) • Entwicklung von <ul style="list-style-type: none"> • programmierbaren Materialien • selbstheilenden Oberflächen • innovativen Funktionsstoffen und Materialkombinationen <p>Entwicklung von Verfahren zur direkten Funktionalisierung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fertigungs- und Montageprozessen zur Funktionsintegration in Werkstoffen und Oberflächen • Beschichtungstechniken mit höherer Auflösung und Genauigkeit zur Funktionalisierung von Strukturelementen 	

Abbildung 11: Funktionale Materialien und Oberflächen

Gestaltung und Implementierung von Business Ecosystemen Business Ecosystem Engineering



In Bezug auf die zielgerichtete Erfüllung von Kundenbedürfnissen ist eine Intensivierung von horizontalen Kooperationen maßgebend. So gilt es beispielsweise, die technische, rechtliche und organisatorische Ausgestaltung von Business Ecosystems BES zu beforschen sowie eine Beschreibungs- und Gestaltungssystematik zu entwickeln. In der Produktion 2030

arbeiten alle produzierenden Unternehmen entweder in volatilen Business Ecosystems (ohne unwillentlicher Lock-In-Effekt) oder in stabilen Business Ecosystems (BES), die sie nicht unabsichtlich von ihrem Kundenzugang entkoppeln (Langfassung Kap. 4.1.3, Forschungsfeld 10).

Business Ecosystems Engineering	Alle produzierenden Unternehmen arbeiten entweder in volatilen Business Ecosystems (kein unwillentlicher Lock-In-Effekt) oder in stabilen Business Ecosystems (BES), die sie nicht unabsichtlich von ihrem Kundenzugang entkoppeln.
<p>Beispiele für wichtige Forschungsthemen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Methodiken zur strategischen Gestaltung von BES (z.B. segmentbezogen oder branchenübergreifend) • Empirische Untersuchung der langfristigen, volks- und betriebswirtschaftlichen Wirkung von BES • Methodiken zur Planung, zum Betrieb und zur Optimierung von BES • Bewertung neuer Modi der Zusammenarbeit (Open Source, Open Community oder Genossenschaftsmodelle) 	

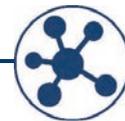
Abbildung 12: Gestaltung und Implementierung von Business Ecosystemen

5.2 Prioritäre Forschungsfelder zur Entwicklung biointelligenter Wertschöpfungssysteme

Bis ein Standard von sich ad-hoc veränderbaren, autonomen und dezentral agierenden Systemen in der Produktion erreicht wird, müssen Anforderungen in den Bereichen Vernetzung, Agilisierung, Autonomisierung, Biologisierung und Humani-

sierung umgesetzt werden. Viele Technologien und Konzepte auf dem Weg zur Plattformökonomie (plattformbasierten Wertschöpfung) und Biointegration sind noch nicht oder nicht vollständig erforscht und bedürfen eines erheblichen Ressourceneinsatzes von Seiten der Industrie, Forschung und Politik. Die folgenden Forschungsfelder werden maßgebend zur Erreichung des Zielbildes sein.

Plattformbasierte Wertschöpfung



Digitale Plattformen schaffen effizientere und transparentere Märkte. Sie bieten Unternehmen neue Wege, um mit Kunden und Industriepartnern zu kooperieren. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen KMU profitieren durch eine bessere globale Sichtbarkeit des eigenen Unternehmens sowie möglicher Kooperationspartner am Markt. Weiter bieten ihnen die auf der Plattform angebotene Services, wie etwa Zahlungs- oder Logistikinfrastrukturen, einen Mehrwert. Forschung und

Industrie müssen gemeinsam neue Plattform-, Betreiber- und Partizipationskonzepte entwickeln, um das Potenzial dieser Technologie zielgerichtet nutzen zu können. Darüber hinaus müssen im Hinblick auf die Realisierung der Interoperabilität Fragen zur Ausgestaltung von Kooperationssystemen oder zur Ausgestaltung von Systemen zur Verbesserung von Anreizen und zur Akzeptanz beantwortet werden (Langfassung Kap. 4.2.1, Forschungsfeld 14).

Plattformbasierte Wertschöpfung

Neue Geschäftsmodelle, Kooperationsmöglichkeiten, Effizienzpotenziale sowie Erhöhung der Innovationsgeschwindigkeit durch Vernetzung über Plattformen.

Beispiele für wichtige Forschungsthemen:

Schaffung der Infrastruktur (Plattformen, Betreiber- Partizipationskonzepte)

- Konzepte zum idealen Plattformdesign (groß, zentral vs. klein, dezentral; offen vs. geschlossen, Anonymität vs. Transparenz)
- Entwicklung von Sicherheits- und Prozesskonzepten
- Evaluation von Chancen und Risiken neuer Plattformen und gemeinschaftlicher Datenpools

Realisierung der Interoperabilität

- Entwicklung plattformbasierter Innovations- und Kooperationssysteme
- Methoden zur automatischen Verhandlung von Liefer-, Teilnahme- und Bezahlbedingungen
- Modellierung und Formalisierung von Kompetenzen

Voraussetzung

- Juristische Sicherheit und Klärung der Datensouveränität
- Resilience by Design über den gesamten Lebenszyklus
- Vertrauenswürdige und stabile Infrastruktur



Abbildung 13: Plattformbasierte Wertschöpfung

Transformierende cyber-physische Produktionssysteme CPPS



Die Herstellung personalisierter Produkte und kürzere Produktlebenszyklen erfordern eine hohe Anpassungsfähigkeit und -geschwindigkeit, bei höchster Verfügbarkeit aller Komponenten und niedrigsten Beständen. In Folge dessen unterliegen Wertschöpfungssysteme ständigen Veränderungen der Eingangs- und Zielgrößen sowie der Rahmenbedingungen. Dies erfordert eine permanente Anpassung des gesamten Produktionssystems. Um beispielsweise Umrüst- bzw. Wiederverwendungskosten (Re-Use-Kosten) von Fertigungssystemen wirtschaftlich zu gestalten und gleichzeitig Systemanpassung

mit marktgerechter Geschwindigkeit vornehmen zu können, müssen Fabrikelemente modular gestaltbar sein. Durch die sich hieraus ergebenden flexiblen Architekturen, z.B. basierend auf Plug-and-Produce-Konzepten, wird eine wirtschaftliche Konfigurierbarkeit und Skalierbarkeit von Systemen möglich. Dies bildet die Grundlage für Produktionssystemen sich ad-hoc, selbständig und permanent an wandelnde Aufgaben und Umgebungen sowie Ressourcen- und Materialmärkte anzupassen (Langfassung Kap. 4.2.2, Forschungsfeld 15).

Transformierende CPPS

Sich ad hoc, selbständig und permanent an wandelnde Aufgaben und Umgebungen sowie Ressourcen- und Materialmärkte anpassende Produktionssysteme.

Beispiele für wichtige Forschungsthemen:

Entwicklung transformierender Produktionsmittel

- Identifikation und Gestaltung flexibler Architekturen
- Plug & Produce Konzepte

Gestaltung wandelbarer Produktionssysteme

- Gestaltungsansätze und Migrationsstrategien für
 - Multi-Use-Fabriken
 - Re-Use von Fertigungssystemen
 - Skalierbare Produktionssysteme

Konzepte für Null-Fehler-Produktion und dynamische Qualitätssicherung

- Null-Fehler-Konzepte für Stückzahl eins
- Qualitätsmanagementkonzepte für wandelbare Systeme

Konzepte und Umsetzung fluider Logistiksysteme

- Freie Navigation im Raum
- Echtzeitnavigation - Lokalisierung und Steuerung



Abbildung 14: Transformierende cyber-physische Produktionssysteme CPPS

Künstliche, kognitive Intelligenz



Künstliche, kognitive Intelligenz ist die technologische und elementare Grundlage zur Steigerung der Produktivität. Als akademisches Fachgebiet existiert das Thema Künstliche Intelligenz bereits seit Mitte der 1950er Jahre. Aber erst aufgrund der Technologiesprünge der letzten Jahrzehnte werden selbstlernende Bildverarbeitungssysteme, intelligente Roboter oder eigenständige Produktionsplanungswerkzeuge immer mehr zur Realität. Dennoch stehen die Produktionsforschung und die Industrie in diesem Forschungsfeld noch am Anfang. Anzustreben ist ein Zielzustand, in dem cyber-physische Sys-

teme lernen, welche Verhaltensweisen und Pläne zum Erfolg führen und diese autonom umsetzen (Langfassung Kap. 4.2.3, Forschungsfeld 21).

Künstliche kognitive Intelligenz

Cyber-physische Systeme lernen, welche Verhaltensweisen und Pläne zum Erfolg führen und setzen diese autonom um.

Beispiele für wichtige Forschungsthemen:

Übertragung und Weiterentwicklung von Produktionswissen in analytische mathematische Regeln

- Künstliche Neuronale Netze (KNN), Deep Learning für die Produktionsanwendungen
- Software- und Multiagentensysteme
- Selbstoptimierende und selbstlernende Systeme (z.B. Vermeidung von unerwünschten Lernen)
- Automatisiertes Data Cleansing

Entwicklung von Demonstratoren und Anwendungsbeispielen für die Industrie

- Digitale Assistenten
- Augmented Reality und Virtual Reality

Voraussetzungen

- Schaffung rechtlicher Rahmenbedingungen
- Zugänglichkeit realer Datengrundlagen für die Forschung
- Big Data, Analytics, Simulationsgrundlagen
- Leistungsfähige Hardware bzw. hohe Rechenleistung



Abbildung 15: Künstliche, kognitive Intelligenz

Applikation biobasierter Vorgänge und Intelligenz



Erkenntnisse zur dynamischen Interaktionen zwischen Entitäten eines biologischen Systems und zum Verhalten des Systems als Ganzem werden auf die Produktionsforschung übertragen. Ansätze aus der biologischen Kybernetik, also Steuerungs- und Regelungsvorgänge in Organismen und Ökosystemen, können zur Gestaltung agiler, autonomer und vernetzter Wertschöpfungssysteme genutzt werden. Die Übertragung von Naturphänomenen auf die Technik ist per se nichts Neues. Selbstreplizierende zelluläre Maschinen wurden bereits in den sechziger Jahren konzipiert, aber

bislang noch nicht verwirklicht. Der Einsatz biotechnologischer Verfahren in der Industrie bietet ein erhebliches Potenzial zur Ressourcenschonung und Effizienzsteigerung. Die Anwendungsmöglichkeiten von Biotechnik und Systembiologie in der Produktionstechnik und -organisation sind vielfältig und reichen von der biobasierten Netzwerkgestaltung über bionische Konstruktionsverfahren, ökoeffektiver Kreislaufsysteme bis hin zur autonomen Logistik durch die Nutzung des Prinzips der Schwarmintelligenz (Langfassung Kap. 4.2.4, Forschungsfeld 24).

Applikation biobasierter Vorgänge und Intelligenz

Die biointelligente Produktion beruht auf dem Verstehen und Applizieren der Prinzipien und Systeme der Natur.

Beispiele für wichtige Forschungsthemen:

Übertragung biologischer Organisations- und Steuerungsmechanismen auf die Produktion

- Übertragung der Steuerungs- und Regelungsvorgänge von Organismen und Ökosystemen auf Wertschöpfungssysteme (biointelligente Kybernetik)
- Bionische Prinzipien zur Gestaltung von Hardware (Architekturen, Strukturen, Funktionen, Oberflächen)
- Entwicklung von Methodiken zur Organisation von Wertschöpfungssystemen über kollektive Intelligenz

Entwicklung biotechnischer Intelligenz

- Biointelligenter, evolutionäre Algorithmen
- Biointelligentes Machine Learning

Voraussetzungen

- Neue Entwicklungs- und Forschungsformate (Institute; Start-ups; internationale, bilaterale Forschungsk Kooperationen; Etablierung interdisziplinärer Fachgruppen bei der DFG)

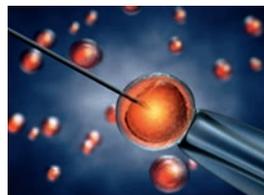


Abbildung 16: Applikation biobasierter Vorgänge und Intelligenz

Kognitive Interaktion soziotechnischer Produktionssysteme



Neben der physischen Interaktion muss die kognitive Interaktion zwischen Mensch und Maschine weiterentwickelt werden. Anspruchsvolle Analyseprozesse, wie auch zeitintensive Routineaufgaben werden zukünftig von Maschinen übernommen und setzen Kapazitäten bei den Menschen frei. Die Rolle des Menschen wird darin liegen, Informationen mit seiner Erfahrung, Transferfähigkeit und Kreativität zu bewerten und Entscheidungen zu treffen. Hierfür müssen beispielsweise Anwendungsfelder wie auch Interaktionsmodi für Augmented- und Virtual-Reality-Werkzeuge und die

Usability, also die intuitive Interaktion zwischen Menschen und Maschinen, weiterentwickelt und praxistaugliche Lösungen für die Produktionsarbeit erarbeitet werden. Der Mensch muss in allen Geschäftsprozessen durch intelligente Systeme in seinen Entscheidungen und seiner Arbeit unterstützt werden. Über digitale Technologien werden ihm alle entscheidungsrelevanten Informationen personalisiert bereitgestellt und somit seine wahrgenommene Realität erweitert und seine kognitiven Fähigkeiten gesteigert (Langfassung Kap. 4.2.5, Forschungsfeld 27).

Kognitive Interaktion

Der Mensch wird in allen Geschäftsprozessen durch intelligente Systeme in seinen Entscheidungen und seiner Arbeit unterstützt. Über digitale Technologien werden ihm alle entscheidungsrelevanten Informationen personalisiert bereitgestellt und somit seine wahrgenommene Realität erweitert und seinen kognitiven Fähigkeiten gesteigert.

Beispiele für wichtige Forschungsthemen:

- Entwicklung von Consumerization- und Gamification-Ansätzen für die Produktion
- Interaktionsmodalitäten für Augmented-Reality-Werkzeuge
- Weiterentwicklung der Usability: Intuitive Bedienoberflächen, intuitive Programmierung und Konfiguration
- Methoden zur Interpretation nichtstandardisierter Nutzungsmuster
- Entwicklung robuster Verfahren zur Erfassung und Verarbeitung natürlicher Interaktion: Blicke, Gesten, Sprache
- Entwicklung von Methoden zur kontextbezogene Entscheidungsunterstützung und Informationsbereitstellung (Personalized Augmented Operator)

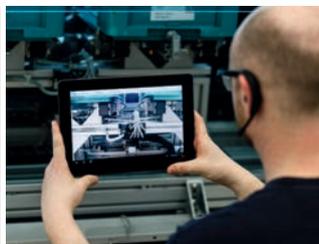


Abbildung 17: Kognitive
Interaktion soziotechnischer
Produktionssysteme

5.3 Prioritäre Forschungsfelder zur Erreichung einer ultraeffizienten Ressourcenbewirtschaftung

Für eine ultraeffiziente Ressourcenbewirtschaftung stehen die Allokation und maximale Ausschöpfung von Nutzungspotenzi-

alen von Material und Energie ebenso im Mittelpunkt wie die Erarbeitung neuer Organisations- und Ausbildungskonzepte sowie Tätigkeitsprofile für die Produktion der Zukunft. Im Rahmen der Priorisierung wurden zwei, im Folgenden dargelegte, Forschungsfelder mit besonderer Relevanz identifiziert.

Neue Lern- und Weiterbildungskonzepte



Die künftigen Aufgaben bei planerischen und ausführenden Tätigkeiten stellen neue Anforderungen an Fähigkeiten und Fertigkeiten. Komplexitäts-, Abstraktions- und Problemlösungsanforderungen sind die Schlüsselkompetenzen der Zukunft. Lebenslanges Lernen wird eine Voraussetzung für die Beherrschung der sich ständig verändernden intelligenten Systeme. Virtual und Augmented Reality eröffnen neue Möglichkeiten der Integration von Anlern- und Qualifizie-

rungswerkzeugen am Arbeitsplatz (Training-on-the-Job / Training-near-the-Job). Neue Methoden und (mobile) Lerntechnologien ermöglichen eine arbeitsintegrierte, bedarfsgerechte und personalisierte Weiterbildung. Hierdurch werden Arbeitnehmer im lebenslangen Lernen und bei der kontinuierlichen Weiterentwicklung ihrer Fähigkeiten unterstützt (Langfassung Kap. 4.3.1, Forschungsfeld 32).

Neue Lern- und Weiterbildungskonzepte

Neue Methoden und (mobile) Lerntechnologien ermöglichen eine arbeitsintegrierte, bedarfsgerechte und personalisierte Weiterbildung und unterstützen die Arbeitnehmer im lebenslangen Lernen und der kontinuierlichen Weiterentwicklung ihrer Fähigkeiten.

Beispiele für wichtige Forschungsthemen:

- Weiterentwicklung und Übertragung bestehender e-Learning-Ansätze auf das Produktionsumfeld
- Entwicklung intergenerationaler Tätigkeits- und Lernkonzepte
- Lernfabriken für alle Themen der Produktion der Zukunft (VR/AR; Ressourceneffizienz, Biologisierung, etc.) zur Entwicklung von Standards
- Integration virtueller Weiterbildungs-/Anlern-Werkzeuge in Qualifizierungsmaßnahmen und Arbeitsalltag
- Lernen unter Einbindung cyber-physischer Systeme (CPS als Lernsystem)

Voraussetzungen

- Interdisziplinäre Forschung von Ingenieurs-, IT- und Sozialwissenschaften



Abbildung 18: Neue Lern- und Weiterbildungskonzepte

Anwendungsoptimiertes Werkstoffengineering



Neue Verfahren zur Werkstoffprüfung, -herstellung und Wiederverwertung müssen noch stärker anwendungsorientiert entwickelt werden. Dies erfordert ein noch besseres Verständnis der Anforderungen an Prozesse, Materialien sowie Materialeigenschaften. Dabei sind die zu beforschenden Themen stark vom jeweiligen Material abhängig. Neben der stetigen Optimierung bestehender Werkzeuge, beispielsweise zum Ausbau des Korrelationsverständnisses von Produkt-

eigenschaften und Prozesstechnologien, gilt es, von der Natur zu lernen und neue Konstruktionsweisen zu entwickeln oder die automatisierte Großserienfertigung von Kompositen voranzutreiben, um eine ultraeffiziente Ressourcenbewirtschaftung zu erreichen (Langfassung Kap. 4.3.2, Forschungsfeld 35).

Anwendungs- optimiertes Werkstoffengineering	Werkstoffe werden anwendungsoptimiert über die gesamte Wertschöpfungskette entwickelt.
	<p>Beispiele für wichtige Forschungsthemen:</p> <p>Weiterentwicklung des Werkstoffengineering</p> <ul style="list-style-type: none">• Optimierung bestehender Tools zum Ausbau des Korrelationsverständnisses von Produkteigenschaften und Prozesstechnologien• Weiterentwicklung bionischer Konstruktionsweisen <p>Weiterentwicklung der Werkstoffherstellung</p> <ul style="list-style-type: none">• Weiterentwicklung von verschleißfesten Multi-Materialsystemen• Entwicklung großserientauglicher, automatisierter Herstellung von Kompositen<ul style="list-style-type: none">• Fügetechniken, Verfahren zur Qualitätssicherung• Textile Fertigungsverfahren für die Herstellung von Verbundwerkstoffen <p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none">• Methoden zur Simulation und Modellierung von Materialeigenschaften und -verhalten• Innovationscluster und Entwicklungskooperationen zur Werkstoffentwicklung und zur Verfahrens- und Prozesstechnik

Abbildung 19:
Anwendungsoptimiertes
Werkstoffengineering

6. EMPFEHLUNGEN ZUR VERBESSERUNG DES INNOVATIONSSYSTEMS

Die Bedeutung von Produktionsforschung und Technologieentwicklung für und in der deutschen Industrie ist unumstritten. Sie liefert Lösungen für gesellschaftliche Herausforderungen wie Gesundheit, Umweltschutz, Mobilität, Sicherheit und trägt somit zur Wohlstandssicherung erheblich bei. Hierfür sind unsere Industrie und die wissenschaftliche Forschung auf ein stabiles und gut funktionierendes Innovationssystem angewiesen, welches einen schnellen Transfer neuer Erkenntnisse und Erfindungen in die Märkte unterstützt. Im Rahmen der Workshops dieses Projekts wurden Vorschläge gesammelt, um die Forschungsinfrastrukturen weiter zu stärken und aus Sicht der Wissenschaft und der Industrie intensiv diskutiert. Nachfolgend werden die prioritären Empfehlungen zum Innovationssystem vorgestellt. Die Gesamtergebnisse sind in der Langfassung dieses Dokuments ausführlich dargelegt (Langfassung Kap. 5)

Multi- und transdisziplinäre Forschung etablieren und stärken

Gemäß der Vision »Produktionstechnik als Integrator multidisziplinärer Ansätze« ist die Vielzahl an verschiedenen technischen Disziplinen über multidisziplinäre Forschungscluster und -programme zu verknüpfen. Dies erfordert die Implementierung einer neuen Denkschule, welche die unterschiedlichen Forschungsmethoden, Denkmodelle (Paradigmen) und Begriffsmodi (Vokabular) auf eine für die Disziplinen einheitliche

Metaebene überführt, als Voraussetzung für ein gemeinsames Arbeiten. Die steigende Komplexität bringt zusammen mit der in allen Bereichen zunehmenden Innovationsgeschwindigkeit gesellschaftspolitische Unsicherheiten mit sich, beispielsweise in Bezug auf die zunehmende Digitalisierung und Autonomisierung. Ängste und Kritiken müssen in den Diskurs technologischer Entwicklungen eingebunden werden. Andererseits muss in die Allgemeinbildung wieder ein verbessertes Technikverständnis einziehen, um irrationale Ängste zu verringern und die Attraktivität technischer Berufe zu verbessern. Es gilt, transdisziplinäre Forschungsprinzipien zu integrieren, die wissenschaftliches Wissen mit praktischem Erfahrungswissen verbinden, und Kritiken und Reflexionen zulassen.

»Forschen am lebenden Objekt« – Die Produktionsforschung in der Fabrik

Kooperationspotenziale im Forschungs- und Entwicklungsbereich sind nicht ausgeschöpft. Die von Industrieteilnehmern genannten Hemmnisse bei der Kooperation mit Forschungsinstituten beziehen sich insbesondere auf fehlende Track-Records – Referenzlisten über Erfolge von Investitionen bzw. mehrere testierte Jahresabschlüsse – in Leuchtturm-Ideen, die technokratische Kultur, das teilweise inaktive Netzwerk mit der Industrie und die sehr komplexe und unbeständige Wirtschaftspolitik. Darüber hinaus benötigen politische und vertragliche Entscheidungen häufig zu viel Zeit. Neben dem

Abbau dieser Hemmnisse würden gemeinsam finanzierte Professuren und befristeter Personalaustausch Kooperationen begünstigen. Unternehmen könnten, in Ergänzung zur Assistenzpromotion, Promotionen in Unternehmenskooperationen anbieten, die die Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft fördern. Hochschulen und Forschungseinrichtungen könnten insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen die Infrastruktur zur Nutzung als Testumgebungen bereitstellen und die Entwicklung und Implementierung neuester Methoden in kooperativen »Produktionskliniken« durchführen. Um unter realen Bedingungen anwendungsorientiert zu forschen, sollte die Produktionsforschung näher an die Produktionsstätten heran und in sie hinein rücken. Denn Forschungseinrichtungen können häufig nicht die personellen und technischen Ressourcen bereitstellen, um eine Forschung unter realen Bedingungen, insbesondere im Bereich der digitalen Transformation, zu ermöglichen.

Steuerliche Innovationsförderung

Steuerliche Förderung von Forschung und Entwicklung in Unternehmen wird zwar aktuell politisch diskutiert, ist in Deutschland bisher jedoch nicht umgesetzt. Zwei Drittel der OECD- und die Hälfte der EU-Länder machen von der Möglichkeit Gebrauch, Forschung und Entwicklung steuerlich zu fördern und die Vorteile zu nutzen, die sich durch die steuerliche Förderung ergeben:⁹ So liegt die gesamtwirtschaft-

liche Rendite von Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erheblich über der privaten Ertragsrate, wodurch sich gesamtwirtschaftliche Wohlfahrtsgewinne erzielen lassen. Deutschland setzt bislang ausschließlich auf direkte Projektförderung. Doch vor allem für kleinere und mittlere Unternehmen ist die Beantragung von Fördermitteln für Forschungs- und Entwicklungs-Projekte mit hohem administrativen Aufwand und ungewissem Ausgang verbunden. Darüber hinaus bestehen durch kurzfristige Änderungen von politischen Förderprioritäten und Fördervolumina hohe Planungsunsicherheiten. Diese Einwände sprechen nicht gegen eine direkte programmatische Projektförderung, sondern für eine ergänzende, breit angelegte und technologieoffene indirekte Innovations-Förderung. Alle Evaluierungsstudien bescheinigen der steuerlichen Forschungsförderung eine Ausweitung der privaten Forschungs- und Entwicklungsausgaben und damit einen volkswirtschaftlichen Nutzen. Frankreich, Niederlande, Österreich, Großbritannien und die USA bauen nach positiver Evaluierung ihre steuerliche Förderung von Forschungs- und Entwicklung-Projekten weiter aus.¹⁰

⁹ *EFI 2015*

¹⁰ *EFI 2015*

AUSBLICK

Wir stehen vor großen Herausforderungen, um international wettbewerbsfähig zu bleiben und gleichzeitig unsere sozialen und gesellschaftlichen Standards zu erhalten und unsere Klima- und Umweltziele zu erreichen. Zugleich bieten uns der technologische Fortschritt und unsere derzeitige Positionierung hervorragende Chancen diese Herausforderungen zu meistern.

Gemeinsam müssen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft Nachhaltigkeitsstrategien entwickeln, die diesen Namen verdienen und diese konsequent umsetzen. Hierfür gilt es unsere Kooperationsanstrengungen in allen Bereichen zu intensivieren und nationale sowie europäische Forschungs- und Innovationsstrategien gezielt auf zukünftige Problemstellungen auszurichten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bieten hierfür einen Grundstein zur erfolgreichen Gestaltung von Wirtschafts-, Forschungs- und Innovationspolitik und zur langfristigen Sicherung unserer Wettbewerbsfähigkeit und somit unseres Wohlstands.

LITERATURVERZEICHNIS

- BMBF 2017** Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). 2017. Fortschritt durch Forschung und Innovation: Bericht zur Umsetzung der Hightech-Strategie. Berlin, zuletzt geprüft am 20. September 2017. Verfügbar: https://www.bmbf.de/pub/Fortschritt_durch_Forschung_und_Innovation.pdf
- Deschermeier 2017** Deschermeier, Philipp 2017. *Bevölkerungsentwicklung in den deutschen Bundesländern bis 2035*. IW-Trends 3.2017, Vierteljahresschrift zur empirischen Wirtschaftsforschung Jg. 44: Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH, zuletzt geprüft am 10. November 2017. Verfügbar: https://www.iwkoeln.de/_storage/asset/360821/storage/master/file/13779804/download/IW-Trends_2017-03-04_Deschermeier.pdf
- Destatis 2015** Statistisches Bundesamt (Destatis). 2015. *13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung für Deutschland*, zuletzt geprüft am 20. September 2017. Verfügbar: <https://www.destatis.de/bevoelkerungspyramide/>
- EFI 2015** Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI). 2015. *Gutachten 2015*. Berlin : Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI). Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands; 2015. ISBN 978-3-00-048335-6, zuletzt geprüft am 21. September 2017. Verfügbar: http://www.e-fi.de/fileadmin/Gutachten_2015/EFI_Gutachten_2015.pdf
- Europäische Kommission 2018** Europäische Kommission. *European strategy for KETs*, zuletzt geprüft am 23. März 2018. Verfügbar: https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/key-enabling-technologies/european-strategy_en

Europäische
Kommission 2017

Europäische Kommission.
Growth: Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, Key Enabling Technologies, zuletzt geprüft am 20. September 2017.
Verfügbar: https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/key-enabling-technologies_en

Europäische
Kommission 2016

Europäische Kommission. 2016.
Research & Innovation: Key Enabling Technologies, Innovation in Manufacturing, zuletzt geprüft am 7. September 2017.
Verfügbar:
http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/innovation-in-manufacturing_en.html

Europäische
Kommission 2015

Europäische Kommission. 2015.
The 2015 ageing report: Economic and budgetary projections for the 28 EU Member States (2013-2060). Luxembourg: Publications Office. European economy; 3/2015. ISBN 978-92-79-44746-4, zuletzt geprüft am 22. September 2017.
Verfügbar:
http://ec.europa.eu/economy_finance/publications/european_economy/2015/pdf/ee3_en.pdf

Europäische
Kommission 2014

Europäische Kommission. 2014.
Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Für ein Wiedererstarken der europäischen Industrie. Brüssel, zuletzt geprüft am 20. September 2017. Verfügbar:
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0014&from=DE>

Europäische
Kommission 2009

Europäische Kommission. 2009.
Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions: »Preparing

for our future: Developing a common strategy for key enabling technologies in the EU«, {SEC(2009) 1257}.
Brüssel, zuletzt geprüft am 20. September 2017.
Verfügbar:
<https://www.kowi.de/Portaldata/2/Resources/fp/com-2009-key-enabling-technologies.pdf>

Eurostat 2017

Eurostat. 2017.
Überblick über die strukturelle Unternehmensstatistik,
zuletzt geprüft am 7. September 2017.
Verfügbar:
http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explai-ned/index.php/Structural_business_statistics_overview/de#Sektorbezogene_Analyse

HNI & WZL 2016

Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn & Werkzeugmaschinenlabor WZL der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. 2016. *Industrie 4.0: Internationaler Benchmark, Zukunftsoptionen und Handlungsempfehlungen für die Produktionsforschung*. Paderborn, Aachen, zuletzt geprüft am 20. September 2017. Verfügbar:
https://www.hni.uni-pader-born.de/fileadmin/Fachgruppen/Seniorprofessur_Gausemeier/InBenzhap/QR00_Broschuere.pdf

Prognos 2015

Prognos AG 2015
Arbeitslandschaft 2040, zuletzt geprüft am 18. Dezember 2017. Verfügbar:
https://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/20150521_Prognos_Arbeitslandschaft2040-final.pdf

Prognos 2009

Prognos AG 2009
Arbeitslandschaft 2030 – Auswirkungen der Wirtschafts- und Finanzkrise zuletzt geprüft am 13. August 2017. Verfügbar:
https://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/091217_Arbeitslandschaft2030_Wirtschaftskrise_Kurzfassung.pdf

MITWIRKENDE

Prof. Dr. Eberhard Abele, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität Darmstadt

Christoph Acker, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Dr. Thorsten Adams, Sartorius AG

Dr. Lars Aldinger, Wittenstein AG

Thomas Altenmüller, Infineon Technologies AG

Tom Assmann, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)

Henryk Badack, Vetter Pharma-Fertigung GmbH & Co. KG

Werner Balandat, ZF Friedrichshafen AG

Prof. Dr. Sebastian Bauer, BAUER Maschinen GmbH

Prof. Dr. Thomas Bauernhansl, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA / Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart

Prof. Dr. Thomas Bayer, Provis School of International Management and Technology

Thomas Bechtel, Fujitsu Technology Solutions GmbH

Dr. Bernd-Dietmar Becker, FARO EUROPE GmbH & Co. KG

Dr. Fabian Behrendt, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF)

Dr. Eberhard Bessey, Daimler AG

Dr. Christof Bönsch, KOMET GROUP GmbH

Dr. Helmut Bossy, Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Markus Bressner, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Ralf Bucksch, IBM Deutschland GmbH

Dr. Bernhard Budaker, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Dr. Michelangelo Canzoneri, Sanofi-Aventis Deutschland GmbH

Axel Demmer, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT)

Dr. Bernhard Diegner, Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI)

Matthias Dietel, IBM Deutschland GmbH

Thomas Dietz, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA / ARENA2036 e.V.

Dr. Marc-André Dittrich, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), Leibniz Universität Hannover

Wolfgang Dorst, Bitkom e.V.

Prof. Dr. Roman Dumitrescu, Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM

Christian Dütsch, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin

Daniel Eimer, Projektträger Karlsruhe (PTKA),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr. Jörg Elser, SCHUNK GmbH & Co. KG

Dr. David Estape, M + W Group

Dr. Norbert Ettner, Lonza Group AG

Dr. Alexander Felde, Institut für Umformtechnik (IFU),
Universität Stuttgart

Hendrik Flosky, Bremer Institut für angewandte Strahltechnik

Peter Froeschle, ARENA2036 e.V.

Prof. Dr. Jürgen Gausemeier, Heinz Nixdorf Institut,
Universität Paderborn

Carsten Glanz, Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA

Dr. Martin Goede, Volkswagen AG

Dietmar Goericke, Forschungskuratorium Maschinenbau e.V. (FKM)

Martin Gutmacher, Gühring KG

Sebastian Haag, Institut für Produktionstechnik, Karlsruher
Institut für Technologie (KIT)

Dr. Friedrich Haefele, Boehringer Ingelheim

Dr. Christopf Hanisch, Festo AG & Co. KG

Andreas Harner, Deutsche Kommission Elektrotechnik,
Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE)

Roland Heidel, Kommunikationslösungen e.K.

Prof. Dr. Michael Heine, Institut für Materials Resource
Management, Universität Augsburg

Peter Heinke, TTI - Technologie-Transfer-Initiative GmbH

Dr. Jörg-Oliver Hestermann, Schaeffler AG

Dr. Michael Hilt, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Prof. Dr. Tim Hosenfeldt, Schaeffler AG

Dr. Max Hoßfeld, ARENA2036 e.V.

Dr. Günter Hörcher, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Prof. Dr. Henning Kagermann, acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften

Johannes Kalhoff, Phoenix Contact GmbH & Co. KG

Dr. Winfried Keiper, Robert Bosch GmbH

Dr. Oliver Kelkar, MHP – A Porsche Company

Dr. Christian Kellermann-Langhagen, Zentralverband
Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI)

Dr. Benjamin Kirsch, Lehrstuhl für Fertigungstechnik
und Betriebsorganisation (FBK), Technische Universität
Kaiserslautern

Peter Kitzler, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Markus Knobel, Unity AG

Ralf Knobloch, T-Systems Multimedia Solutions GmbH

Günter Korder, Spitzencluster it's OWL

Dr. Bernd Kosch, Fujitsu Technology Solutions GmbH

Christian Köbke, CLAAS KGaA mbH

Dr. Sven Kuehl, Siemens AG

Dr. Marc Lakner, A.T. Kearney GmbH

Prof. Dr. Dirk Landgrebe, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

Dr. Heiner Lang, Bosch Rexroth AG

Jörg Lenz, EOS GmbH Electro Optical Systems

Michael Lickefett, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Prof. Dr. Mathias Liewald, Institut für Umformtechnik (IFU), Universität Stuttgart

Dr. Eric Maiser, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA)

Dr. Martin Meister, BASF SE

Erik Mertens, Projektträger Karlsruhe (PTKA), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr. Martin Metzner, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Dr. Christoffer Meyer, Volkswagen AG

Robert Miehe, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Frederik Moch, Deutscher Gewerkschaftsbund (DGB)

Sven Müller, Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e.V. (VDE)

Andreas Nettsträter, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Dr. Wenzel Novak, Optima Pharma

Kirsten Oberschelp, Audi AG

Dr. Elina Oks, Altana AG

Dr. Jochen Ohrem, KHS GmbH

Dr. Andreas Padberg, PadberX GmbH

Kai Peters, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA)

Prof. Dr. Alexander Pflaum, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Helena Piastowski, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Christoph Plass, Unity AG

Stefan Pollmeier, ESR Pollmeier GmbH

Prof. Dr. Reinhart Poprawe, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

Prof. Dr. Peter Post, Festo AG & Co. KG

Günther Probst, Schmachtl GmbH

Christian Redak, Informatik Consulting Systems AG

Dr. Thomas Rettich, TRUMPF GmbH + Co. KG

Prof. Dr. Oliver Riedel, Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Georg Roessling, PDA Europe

Maren Röhm, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Dr. Jens Rupprecht, Sartorius Stedim Biotech

Prof. Dr. Alexander Sauer, Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Dr. Björn Sautter, Festo AG & Co. KG

Dirk Schlenker, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Dr. Bernd Schimpf, Wittenstein SE

Philipp Schmid, Institut für Umformtechnik (IFU),
Universität Stuttgart

Dr. Marco Schneider, Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA

Volker Schiek, Landesnetzwerk Mechatronik BW GmbH
Marten Schirge, Device Insight GmbH

Michael Scholz, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und
Produktionssystematik (FAPS), Friedrich-Alexander Universität
Erlangen-Nürnberg

Thomas Schrodi, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Harald Schöning, Software AG

Prof. Dr. Günther Schuh, Lehrstuhl für Produktionssystematik,
RWTH Aachen

Dr. Gabriela Schumann, Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft ZV

Christian Seidel, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik IWU

Johann Soder, SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG

Dr. Stephanie Sommer, KulturBroker

Dr. Bernd Spiegelberg, ITQ GmbH

Dr. Beate Stahl, Verband Deutscher Maschinen- und
Anlagenbau e.V. (VDMA)

Dr. Peter Stelter, KHS GmbH

Dr. Thomas Stiedl, Robert Bosch GmbH

Dr. Nicole Stricker, Institut für Produktionstechnik,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr. Michael ten Hompel, Fraunhofer-Institut für
Materialfluss und Logistik IML

Dr. Andrea Traube, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Tilman Traub, Institut für Produktionstechnik und Umform-
maschinen (PTU), Technische Universität Darmstadt

Hansjörg Tutsch, flexis AG

Dr. Ulrich Uhlmann, Lenze SE

MITWIRKENDE

Roman Ungern-Sternberg, Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nikolas Zimmermann, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO

Prof. Dr. Hannes Utikal, Provadis School of International
Management and Technology AG

Thilo Zimmermann, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Karsten Vollmer, KHS GmbH

Dr. Olaf Wachsen, Clariant Produkte GmbH

Dr. Moritz Warnecke, Bundesministerium für
Bildung und Forschung (BMBF)

Bernd Waser, Murrelektronik GmbH

Dr. Katharina Weber, Fraunhofer-Institut für Produktions-
technik und Automatisierung IPA

Dr. Peter Weber, BMW Group

Dr. Markus Westermeier, Institut für Werkzeugmaschinen und
Betriebswissenschaften (IWB), Technische Universität München

Prof. Dr. Engelbert Westkämper, Institut für Industrielle
Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart

Prof. Dr. Michael Weyrich, Institut für Automatisierungstechnik
und Softwaresysteme (IAS), Universität Stuttgart

Andrew Whytock, Siemens AG

Dr. Johannes Winter, acatech - Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften

Linda Wings, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Dr. Patricia Wolny, Projektträger Karlsruhe (PTKA),
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Impressum

Der VDMA und das Fraunhofer IPA danken allen Beteiligten, die an dieser Untersuchung Mitgewirkt haben sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und dem Projektträger Karlsruhe PTKA für die Förderung und Begleitung des Vorhabens.

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Herausgeber:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Autoren:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Dr. Günther Hörcher
Markus Bressner
Maren Röhm

Ihre Ansprechpartner:

Günther Hörcher
guenter.hoercher@ipa.fraunhofer.de
Telefon: +49 711 970-3700

Markus Bressner
markus.bressner@ipa.fraunhofer.de
Telefon: +49 711 970-1808

Gestaltung und Reproduktion:

Studioo GmbH, Aalen

Umschlaggestaltung:

kom|werb Agentur, Stuttgart

Druck:

Wahl-Druck GmbH

Quellenangaben für Bilder

Foto, Seite 3: Universität Stuttgart IFF / Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez; **Foto**, Seite 6: ARENA2036; **Abb. 3**, Seite 11: Beboy, Fotolia, Jose AS Reyes, shutterstock, ESB Professional, shutterstock, bluebay2014, Fotolia; **Foto**, Seite 13: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez; **Abb. 4**, Seite 14: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez, Universität Stuttgart IFF / Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez, Eisenhans, Fotolia; **Abb. 5**, Seite 16: Eisenhans, Fotolia, ArchMan, shutterstock, Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez, agsandrew, Fotolia; **Abb. 10**, Seite 23: Universität Stuttgart IFF / Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez; **Abb. 11**, Seite 24: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez; **Abb. 12**, Seite 24: lassedesignen, Fotolia; **Abb. 13**, Seite 25: bluebay2014, Fotolia; **Abb. 14**, Seite 26: ARENA2036; **Abb. 15**, Seite 27: agsandrew, Fotolia; **Abb. 16**, Seite 28: nobeastsofierce, Fotolia; **Abb. 17**, Seite 29: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez, Clemens Hess; **Abb. 18**, Seite 30: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez; **Abb. 19**, Seite 31: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez, Clemens Hess; Icons: Fotolia; **Foto**, Seite 43: Fraunhofer IPA, Foto: Rainer Bez

Erscheinungsjahr 2018

KONTAKT

**Fraunhofer-Institut
für Produktionstechnik und Automatisierung IPA**

Nobelstraße 12 | 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

Herausgeber

Univ. Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Ihre Ansprechpartner

Günter Hörcher
guenter.hoercher@ipa.fraunhofer.de
Telefon +49 711 970-3700

Markus Bressner
markus.bressner@ipa.fraunhofer.de
Telefon +49 711 970-1808

Der vorliegende Bericht kann in Kurz-
und Langfassung gedownloadet werden
unter:

www.ipa.fraunhofer.de/studien