SSOAR

Open Access Repository

www.ssoar.info

QuaTOQ - Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation - Branchenbericht: Maschinen- und Anlagenbau

Peters, Robert; Bovenschulte, Marc; Glock, Gina; Wehrmann, Christian; Goluchowicz, Kerstin; Strach, Heike; Apt, Wenke

Veröffentlichungsversion / Published Version
Forschungsbericht / research report

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:
Bundesministerium für Arbeit und Soziales

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:
Peters, R., Bovenschulte, M., Glock, G., Wehrmann, C., Goluchowicz, K., Strach, H., Apt, W. (2020). *QuaTOQ - Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation - Branchenbericht: Maschinen- und Anlagenbau.* (Forschungsbericht / Bundesministerium für Arbeit und Soziales, FB522/8). Berlin: Bundesministerium für Arbeit und Soziales; Institut für Innovation und Technik -iit-. https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-71133-9

Nutzungsbedingungen:
Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.
Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

Terms of use:
This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.
By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.

gesis Leibniz-Institut für Sozialwissenschaften

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Bundesministerium
für Arbeit und Soziales

FORSCHUNGSBERICHT

522/8

QuaTOQ – Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation

– Branchenbericht: Maschinen- und Anlagenbau –

Oktober 2020

ISSN 0174-4992

INSTITUT FÜR INNOVATION UND TECHNIK

Gefördert durch:

Bundesministerium für Arbeit und Soziales

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Branchenbericht: Maschinen- und Anlagenbau

QuaTOQ – Qualität der Arbeit, Beschäftigung und Beschäftigungsfähigkeit im Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation

Robert Peters, Marc Bovenschulte, Gina Glock, Christian Wehrmann, Kerstin Goluchowicz, Heike Strach, Wenke Apt

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **3**

Tabellenverzeichnis **4**

1 Zusammenfassung **5**

2 Zielsetzung und Vorgehen **7**

2.1 Zielsetzung 7
2.2 Projektdesign 7
2.3 Methodische Ansätze 8
2.3.1 Branchendefinition 8
2.3.2 Empirische Analysen 8
2.3.3 Delphi-Verfahren 9
2.3.4 Fallstudien 10
2.3.5 Synthetisierte Roadmap 10

3 Branchenübersicht **12**

3.1 Branchenstruktur und -entwicklung 12
3.2 Beschäftigungsentwicklung 18

4 Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation **21**

4.1 Übersicht 21
4.2 Technologie 28
4.2.1 Branchenspezifische Digitalisierungstrends 28
4.2.2 Anwendung digitaler Technologien 30
4.2.2.1 Technologietrends im Bereich „FuE und Konstruktion“ 30
4.2.2.2 Technologietrends im Bereich „Produktion und Montage“ 32
4.2.2.3 Technologietrends im Bereich „Service und Support“ 35
4.2.2.4 Übergreifende Technologietrends 36
4.2.3 Gestaltungsoptionen 38
4.3 Organisation 39
4.3.1 Digitalisierung und Qualität der Arbeit 39
4.3.2 Flexibilisierungspotenziale in der Arbeitsorganisation 46
4.3.3 Lernförderliche Arbeitsorganisation und Handlungsspielräume 48
4.3.4 Gestaltungsoptionen 54
4.4 Qualifikation 55
4.4.1 Qualifikations- und Berufsstruktur im Kontext neuer Anforderungen 55
4.4.2 Kernkompetenzen und Berufsbilder der Zukunft 58
4.4.3 Ausrichtung der beruflichen Aus- und Weiterbildung 62
4.4.4 Gestaltungsoptionen 65

5 Fallstudien **66**

5.1 Global Player im Umbruch – Neue Vertriebsmodelle als Schlüssel zur Geschäftsmodellinnovation 66
5.2 Digitalisierung schafft neue Perspektiven für KMU und Beschäftigte 68

6 Szenario: Maschinen- und Anlagenbau 2030 ..... **70**

Anhang **71**

Literaturverzeichnis **73**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: QuaTOQ-Projektdesign 7
Abbildung 2: Branchendefinition nach WZ 2008 8
Abbildung 3: Teilnehmendenübersicht der Delphi-Befragung 10
Abbildung 4: Umsatzentwicklung im deutschen Maschinenbau (in Mrd. Euro), 1991 – 2018 12
Abbildung 5: Umsatzanteile der vier größten Industriezweige am verarbeitenden Gewerbe, 2018 13
Abbildung 6: Umsatz im Maschinenbau nach ausgewählten Sektoren (in Mrd. Euro), 2019 13
Abbildung 7: Export- und Importwert von Maschinenbauerzeugnissen (in Mrd. Euro), 1999 – 2018 14
Abbildung 8: Branchenstruktur des Maschinenbaus nach Beschäftigten, 2018 14
Abbildung 9: Größte deutsche Maschinen- und Anlagenbauunternehmen nach Umsatz (in Mrd. Euro), 2018 15
Abbildung 10: Innovatorenquote, Umsatzanteil von Produktinnovationen, Beschäftigungsanteil von Unternehmen mit kontinuierlicher FuE im deutschen Maschinenbau, 2018 16
Abbildung 11: Anzahl der Beschäftigten im deutschen Maschinenbau (in 1.000), 1991 – 2018 18
Abbildung 12: Beschäftigungsanteile im Maschinenbau nach Sektoren, 2019 18
Abbildung 13: Zukünftige Beschäftigungsentwicklung 20
Abbildung 14: Gründe für den Strukturwandel 21
Abbildung 15: Vorbereitung auf zukünftige Herausforderungen 22
Abbildung 16: Synthetisierte Roadmap 24
Abbildung 17 : Betroffenheit durch Digitalisierung, 2016 28
Abbildung 18 : Verbreitung und Formen der Arbeit mit digitalen Mitteln, 2016 29
Abbildung 19: Gestaltung der Arbeit mit digitalen Mitteln aus Sicht der Beschäftigten, 2016 29
Abbildung 20: Zukünftiger Einsatz von Technologien „FuE und Konstruktion“ 31
Abbildung 21: Zukünftiger Einsatz von Technologien „Produktion und Montage" 33
Abbildung 22: Zukünftiger Einsatz von Technologien „Service und Support" 36
Abbildung 23: Zukünftiger Technologieeinsatz „Übergreifende Technologietrends" 37
Abbildung 24: Stufen der Arbeitsqualität des DGB-Index Gute Arbeit, 2018 39
Abbildung 25: DGB-Index Gute Arbeit und Kriterien der Guten Arbeit, 2018 40
Abbildung 26: Folgen der Arbeit mit digitalen Mitteln aus Sicht der Beschäftigten, 2016 41
Abbildung 27: Zukünftige physische Belastung 42
Abbildung 28: Zukünftige psychische Belastung 43
Abbildung 29: Einflussfaktoren auf psychische Belastung 44
Abbildung 30: Zukünftige arbeitsörtliche Flexibilität 46
Abbildung 31: Zukünftige arbeitszeitliche Flexibilität 47
Abbildung 32: Zukünftige betriebsstrukturelle Flexibilität 47
Abbildung 33: Formen des Lernens im Prozess der Arbeit 48
Abbildung 34: Branchentypen nach indexbasiertem Ansatz, 2012 50
Abbildung 35: Lernförderlichkeit des Arbeitsumfelds, 2012 51
Abbildung 36: Zukünftige Bedeutung der Lernförderlichkeit des Arbeitsumfelds 51
Abbildung 37: Kriterien zur Schaffung von Lernförderlichkeit 52
Abbildung 38: Zukünftiger Wandel der Handlungs- und Entscheidungsspielräume 53
Abbildung 39: Zukünftige Entwicklung der Qualifikationsstruktur 56
Abbildung 40: Zukünftige Entwicklung der (Qualifikations-)Anforderungen 56
Abbildung 41: Heutige und zukünftige Bedeutung ausgewählter Kompetenzen 58
Abbildung 42: Berufe mit hoher Veränderung des beruflichen Tätigkeitsprofils 60
Abbildung 43: Treiber für Umschulungsbedarf innerhalb von Unternehmen 62
Abbildung 44: Formen betrieblicher Weiterbildung 63
Abbildung 45: Zukünftige Bedeutung der Weiterbildung nach Lernform 63

Bildnachweis Titelblatt: Gorodenkoff/AdobeStock

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Teilnehmendenübersicht der Delphi-Befragung 10
Tabelle 2: Beschäftige nach Art, 2013 – 2019 19
Tabelle 3: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Berufsuntergruppen, 2013 – 2019 19
Tabelle 4: Gestaltungfelder einer lernförderlichen Arbeitsumgebung 48
Tabelle 5: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Qualifikation, 2013 – 2019 55
Tabelle 6: Branchenübersicht nach WZ 2008 und Beobachtungen nach Datenbasis 71
Tabelle 7: Indikatorenauswahl und -gewichtung für Branchentypisierung 72
Tabelle 8: Typen der Lernförderlichkeit 72

1 Zusammenfassung

Der Maschinen- und Anlagenbau nimmt im produzierenden Gewerbe in Deutschland eine Schlüsselrolle ein. Als Anbieter innovativer Produktionstechnik ist er Leitsektor für die digitale Transformation der Industrie. Als produzierende Branche ist er gleichsam Anwender neuster Produktionstechnologien und damit vielfach Vorreiter, wenn es um die Einführung digitaler Arbeitsmittel geht. Daher wird der Maschinenbau auch als Rückgrat der deutschen Industrie beschrieben.

Der „Branchenbericht: Maschinen- und Anlagenbau“ analysiert den strukturellen Wandel der Branche in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses der Digitalisierung auf die Anwendung digitaler Technologien, arbeitsorganisatorische Veränderungen sowie neue Qualifikations- und Kompetenzbedarfe. Der zugrunde liegende Methodenmix ermöglicht einen Brückenschlag zwischen dem Status quo und der zukünftigen Entwicklung des Maschinenbaus bis zum Jahr 2030. Diese Vorausschau dient als Basis für die Formulierung von Gestaltungsoptionen für Branchen- und Politikakteure. Die **Zielsetzung und das Vorgehen** des Branchenberichts werden in Kapitel 2 eingeführt. Hier wird das Forschungsdesign des Projektes „QuaTOQ“ vorgestellt, die diesem Bericht zugrunde liegenden methodischen Ansätze werden erläutert und eine Branchendefinition gegeben.

In Kapitel 3 leitet eine deskriptive **Branchenübersicht** die Analyse der Maschinenbaubranche ein. Charakteristisch für die **Branchenstruktur und -entwicklung** (Kapitel 3.1) ist der hohe Exportanteil an den Branchenumsätzen und eine überdurchschnittliche Innovationstätigkeit. Trotz einer längeren Zeit mit nur geringen Wachstumsraten in den 1990er Jahren und zu Beginn der 2000er Jahre sowie eines starken Einbruchs in den Krisenjahren 2009 und 2010 haben sich die Umsätze der Branche seit 1993 mehr als verdoppelt. Entsprechend positiv entwickelte sich der Beschäftigungsstand. Die **Beschäftigungsentwicklung** im Maschinenbau (Kapitel 3.2) ist über die vergangenen zehn Jahre von einem Anstieg geprägt. Aufgrund des gegenwärtigen Strukturwandels zeichnen sich jedoch Verschiebungen in der Arbeitskräftenachfrage ab. Während es seit 2013 in Berufen der Metallbearbeitung trotz wachsender Branchenumsätze zu einer Reduzierung der Beschäftigtenzahlen von bis zu 10 % kam, steigen insbesondere die Beschäftigtenzahlen im Bereich von Mechatronik und Automatisierungstechnik um teilweise mehr als 50 %.

Die Analyse des **Wechselspiels von Technologie, Organisation und Qualifikation** in Kapitel 4 lässt tiefergehende Rückschlüsse auf die Treiber des strukturellen Wandels im Maschinenbau zu und beschreibt deren Auswirkungen auf Arbeitsorganisation, Qualifikations- und Kompetenzbedarfe. Eine **Übersicht** zu zentralen Herausforderungen, Spannungsfeldern und Rahmenbedingungen liefert Kapitel 4.1. Eine synthetisierte Roadmap visualisiert mögliche Entwicklungspfade der Branche und setzt drei Ebenen in Beziehung: Technologie, Organisation und Qualifikation.

Die Ebene der **Technologie** wird in Kapitel 4.2 mit der Analyse **branchenspezifischer Digitalisierungstrends** eingeleitet (Kapitel 4.2.1). Sowohl im Vergleich zum produzierenden Gewerbe insgesamt als auch zum Dienstleistungssektor sind digitale Arbeitsmittel im Maschinenbau stärker verbreitet. Beschäftigte können zudem einen größeren Einfluss auf die Gestaltung der Arbeit mit digitalen Mitteln ausüben, als dies in anderen Branchen der Fall ist. Mit Blick auf die **Anwendung digitaler Technologien** (Kapitel 4.2.2) ist in den kommenden Jahren in allen Funktionsbereichen der Unternehmen, **FuE und Konstruktion** (Kapitel 4.2.2.1), **Produktion und Montage** (Kapitel 4.2.2.2) sowie **Service und Support** (Kapitel 4.2.2.3) mit einer großen Dynamik bei der Verbreitung von Schlüsseltechnologien für die digitale Transformation zu rechnen. Dabei stehen insbesondere in der Produktion und Montage assistive Systeme im Fokus, die Beschäftigte zunehmend bei ihrer Arbeit sowohl kognitiv als auch motorisch unterstützen. Gerade im Zusammenhang mit einem steigenden Serviceanteil der Wertschöpfung ist mit einer verstärkten Nutzung Künstlicher Intelligenz (KI), (Big) Data Analytics und Cloudcomputing zu rechnen (Kapitel 4.2.2.4).

Die Auswirkungen des strukturellen Wandels der Branche auf Ebene der **Organisation** werden in Kapitel 4.3 untersucht. Das Zusammenspiel von **Digitalisierung und Qualität der Arbeit** (Kapitel 4.3.1) äußert sich für Beschäftigte durch eine Verschiebung weg von physischen hin zu steigenden psychischen Belastungen. Erkennbar wird, dass die Digitalisierung in diesem Zusammenhang jedoch nur ein Faktor von mehreren ist. Ein Schlüssel, um der von den Beschäftigten empfundenen Überbelastung entgegenzuwirken, ist die Gestaltung von Führung und einer offenen, auf Partizipation setzenden Führungs- und Betriebskultur. **Flexibilisierungspotenziale in der Arbeitsorganisation** (Kapitel 4.3.2) sind speziell im Bereich der Fertigung bislang nur bedingt umzusetzen, wobei es dafür prozessbedingte und betriebskulturelle Grenzen gibt. Nach wie vor sind Unternehmen des Maschinenbaus durch eine hohe Präsenzkultur geprägt. Der Gestaltung einer **lernförderlichen Arbeitsorganisation und entsprechender Handlungsspielräume** (Kapitel 4.3.3) wird perspektivisch eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Als entscheidend für die Schaffung lernförderlicher Arbeitsorganisation betrachten die Branchenexpertinnen und -experten neben der Unternehmenskultur die Aufgabenvielfalt und -komplexität. Problematisch erscheint dabei, dass es – nicht zuletzt im Zusammenhang mit einer verstärkten Modularisierung und Standardisierung – zur Reduktion von Handlungs- und Entscheidungsspielräumen kommen könnte, insbesondere in der Produktionsplanung und -steuerung sowie in der Fertigung.

Technologie- und organisationsbedingte Transformationsaktivitäten wirken sich spürbar auf die Ebene der **Qualifikation** aus (Kapitel 4.4). Ausgehend von der branchenspezifischen **Qualifikations- und Berufsstruktur im Kontext neuer Anforderungen** in Kapitel 4.4.1 verfügt der Maschinenbau bereits heute über eine überdurchschnittlich hohe Qualifikationsstruktur: ein Trend, der sich fortsetzen und eine weitere Zunahme des Anteils von Beschäftigten mit beruflicher Ausbildung und in noch stärkerem Maße von Beschäftigten mit Hochschulabschluss bedingen dürfte. Diese Entwicklung resultiert im Wesentlichen aus steigenden (Qualifikations-)Anforderungen. Hinsichtlich der **Kompetenzen und Berufsbilder der Zukunft** (Kapitel 4.4.2) gewinnen digitale Anwenderkompetenzen, Problemlösungs- und Innovationsfähigkeit sowie die Fähigkeit zur Kollaboration und Interaktion wesentlich an Bedeutung. Dabei sind Berufsbilder in der Produktion besonders stark durch die Zunahme von Mensch-Technik-Interaktion geprägt. Steigende Interaktions- und Problemlösungsanforderungen dürften sich neben dem Bereich FuE und Konstruktion insbesondere in der Montage, Inbetriebnahme und Wartung zeigen. Diese Unternehmensbereiche erfahren im Zusammenhang mit einem verstärkten Serviceanteil an der Wertschöpfung einen intensiveren Kundenkontakt. Entsprechend untersteht auch die **Ausrichtung der beruflichen Aus- und Weiterbildung** (Kapitel 4.4.3) einem Wandlungs- und Handlungsbedarf. Umschulungen werden notwendig sowohl durch Automatisierungsprozesse als auch wegen der Etablierung neuer Geschäftsfelder. Hier gewinnen informelle und non-formale Lernformen künftig verstärkt an Bedeutung.

In den Kapiteln 4.2.3, 4.3.4 und 4.4.4 werden ebenenbezogene **Gestaltungsoptionen** vorgestellt und in Kapitel 5 um zwei **Fallstudien** ergänzt. Die erste Fallstudie thematisiert den Transformationsprozess eines Großunternehmens von einem klassischen Vertriebsmodell hin zum Pay-per-Use-Prinzip (Kapitel 5.1). Die zweite Fallstudie zeigt am Beispiel eines mittelständischen Betriebes, wie über eine IoT-Plattform und den Einsatz von 3D-Druck in der Fertigung sowohl für das Unternehmen als auch für die Beschäftigten neue Perspektiven entstehen (Kapitel 5.2).

Eine **Szenariobeschreibung** in Kapitel 6 zeigt abschließend mögliche Entwicklungspfade des Maschinenbaus bis zum Jahr 2030 auf.

2 Zielsetzung und Vorgehen

2.1 Zielsetzung

Der allgemeine Wandel von Tätigkeiten, Arbeitsinhalten und -abläufen unter dem Einfluss der Digitalisierung und unterschiedlicher Modelle der Arbeitsorganisation wie auch die damit verbundenen Qualifikations- und Kompetenzbedarfe wurden in Fachveröffentlichungen in der jüngeren Vergangenheit zwar behandelt, doch kaum aufeinander bezogen. Deshalb zielt das Forschungsvorhaben QuaTOQ auf Folgendes ab: zukünftige Arbeitsformen und -inhalte vor dem Hintergrund einer weiterhin zunehmenden Technisierung, vor allem aber Digitalisierung der Leistungserbringung und Wertschöpfung, branchenbezogen zu betrachten und mit Fragen der Beschäftigungs- und Innovationsfähigkeit quantitativ wie qualitativ zu verbinden.

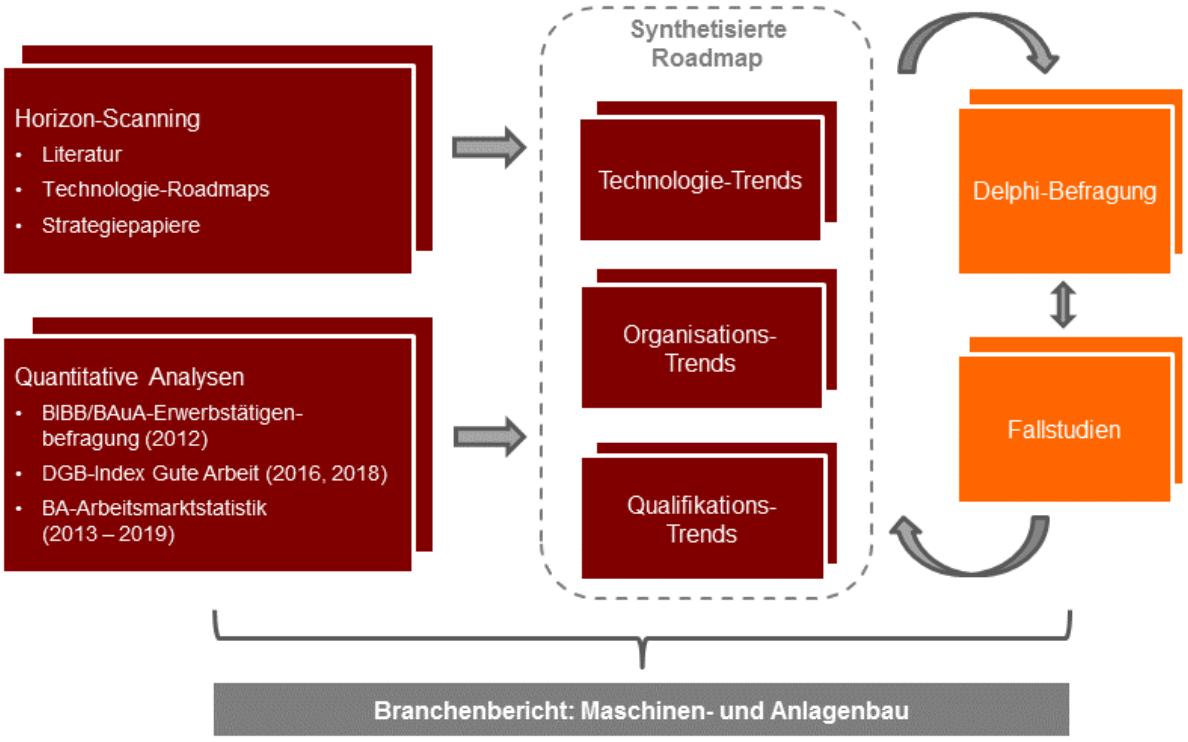
Mit dem Forschungsprojekt QuaTOQ sollen das komplexe Zusammenspiel und die wechselseitigen Abhängigkeiten von Technologie, Organisation und Qualifikation betrachtet werden. Die Untersuchungen beziehen sich einerseits auf die Arbeitswelt und somit die Arbeitsbedingungen der Beschäftigten im weitesten Sinne. Andererseits werden Fragen des Arbeitsmarktes thematisiert – und damit Aspekte der aktuellen Beschäftigungsverhältnisse und relevanter Trends im Hinblick auf Branchen oder entsprechende Digitalisierungsgrade von Tätigkeiten.

Der vorliegende Bericht zum Maschinen- und Anlagenbau ist Teil einer Serie von Branchenberichten, die im Rahmen des Forschungsprojektes QuaTOQ erstellt werden.

2.2 Projektdesign

Um ein umfassendes Bild der vergangenen Entwicklungen und zukünftigen Trends beim komplexen Zusammenspiel zwischen den Ebenen Technologie, Organisation und Qualifikation in der Maschinenbaubranche zu erhalten, integriert das Projektdesign qualitative und quantitative Methoden in einem iterativen Prozess (Abbildung 1).

Abbildung 1: QuaTOQ-Projektdesign



Quelle: Eigene Darstellung.

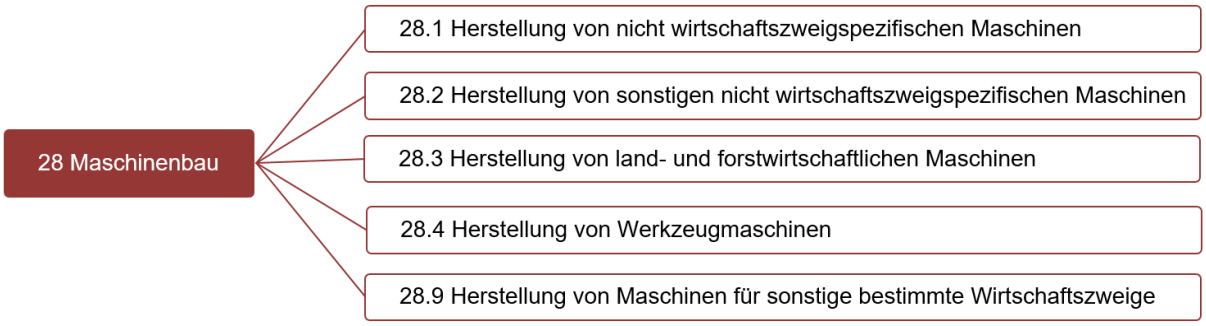
In einem ersten Schritt werden auf Grundlage eines Horizon-Scannings und empirischer Analysen (Kapitel 2.3.2) branchenspezifische Trends und Szenarien abgeleitet. Im zweiten Schritt werden diese Szenarien mithilfe einer Delphi-Befragung validiert und angepasst (Kapitel 2.3.3) und in praxisbezogenen Fallstudien weiter vertieft (Kapitel 2.3.4). Die Kernszenarien und Themen werden schließlich in einer synthetisierten Roadmap visualisiert und vertiefend diskutiert (Kapitel 2.3.5). Dieser mehrstufige Ansatz verbindet somit das Wissen aus Literatur und datenbasierten Analysen mit Wissen aus der Praxis.

2.3 Methodische Ansätze

2.3.1 Branchendefinition

Der Maschinen- und Anlagenbau[1] ist im Rahmen der vorliegenden Branchenanalyse entsprechend der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ 2008) (Statistisches Bundesamt [Destatis], 2008) durch die Beschäftigung in Kernberufen der Abteilung 28 „Maschinenbau“ definiert. Abteilung 28 ist in die fünf Gruppen „Herstellung von nicht wirtschaftszweigspezifischen Maschinen“ (WZ 2008: 28.1), „Herstellung von sonstigen nicht wirtschaftszweigspezifischen Maschinen“ (WZ 2008: 28.2) und „Herstellung von land- und forstwirtschaftlichen Maschinen“ (WZ 2008: 28.3), „Herstellung von Werkzeugmaschinen“ (WZ 2008: 28.4) sowie „Herstellung von Maschinen für sonstige bestimmte Wirtschaftszweige“ (WZ 2008: 28.9) gegliedert. Abbildung 2 bietet einen Überblick über die gewählte Abteilung 28 sowie die dazugehörigen Gruppen. Diese Branchendefinition dient primär als Grundlage für die folgenden empirischen Auswertungen ausgewählter Datenbasen (Kapitel 2.3.2). Qualitative Analysen, z. B. die Delphi-Befragung (Kapitel 2.3.3), können von dieser Definition abweichen.

Abbildung 2: Branchendefinition nach WZ 2008



Quelle: Eigene Darstellung. Destatis (2008).

2.3.2 Empirische Analysen

Eine Datengrundlage der statistischen Analysen bildet die **BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung (ETB) 2012**, eine repräsentative Erhebung von Kernerwerbstätigen in Deutschland (Rohrbach-Schmidt, 2009; Rohrbach-Schmidt & Hall, 2013).[2] Die Befragung umfasst pro Welle ca. 20.000 Erwerbstätige und adressiert die Kernthemen „Arbeit und Beruf im Wandel“ sowie „Erwerb und Verwertung von beruflichen Qualifikation“. Die analysierte Stichprobe enthält alle befragten Erwerbspersonen im Alter von 18 bis 64 Jahren, die mindestens zehn Stunden wöchentlich arbeiten und nicht in Ausbildung sind. Zur Wahrung der Bevölkerungsrepräsentativität wird die Stichprobe unter Berücksichtigung der Stichprobendesign- und -ausfallgewichtung ausgewertet (Gensicke, Tschersich & Hartmann, 2012). Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Antworten die subjektiven Einschätzungen der Befragten abbilden.

Für eine branchenbezogene Datenanalyse wurden 34 Branchen als Kombinationen von (aggregierten) Wirtschaftszweigen (WZ 2008) und Berufen (Klassifikation der Berufe [KldB] 2010) definiert (vgl. Tabelle

[1] Im Folgenden auch „Maschinenbau“.

[2] Aktuell erfolgt die Neuauflage der Erwerbstätigenbefragung (BIBB/BAuA-ETB 2018). Diese steht jedoch erst ab dem ersten Quartal 2020 für die allgemeine Forschung zur Verfügung und kann daher in diesem Bericht nicht verwendet werden, vgl. https://www.bibb.de/de/65740.php, zuletzt aufgerufen am 24.04.2020.

6 im Anhang).[3,4,5] Branchen werden weitergehend als „wertschöpfender Kern“ definiert, indem Erwerbstätige aus nachgeordneten Service-Berufen aus der Stichprobe entfernt werden (vgl. Anmerkungen zu Tabelle 6). Die Unterscheidung der Vergleichsgruppen „produzierendes Gewerbe“ und „Dienstleistungen“ erfolgt nach Wirtschaftszweigen auf Basis der Definition des Statistischen Bundeamtes (2017).[6]

Als ergänzende Datenbasis wird der **DGB-Index Gute Arbeit 2016 und 2018** herangezogen. Dieser Index ist eine seit 2007 jährlich durchgeführte repräsentative Erwerbstätigenbefragung zu Arbeitsbedingungen sowie physischer und psychischer Belastung von Beschäftigten in Deutschland. Mit dem DGB-Index Gute Arbeit wird, basierend auf elf Kriterien, eine Messung der Arbeitsqualität angestrebt. Bei der Auswertung des Index werden regelmäßig vier Stufen der Arbeitsqualität unterschieden. Seit der Weiterentwicklung des DGB-Index in der Erhebungsperiode 2011/2012 (Holler, 2013) umfasst die Befragung insgesamt mehr als 40.000 Erwerbstätige. Die Befragungswelle von 2016 mit 9.737 abhängig Beschäftigten beinhaltet eine Sonderauswertung zum Thema „Die Digitalisierung der Arbeitswelt“ (Holler, 2017). Die Welle des Jahres 2018 umfasst 8.011 abhängig Beschäftigte und eine Sonderauswertung zum Thema „Interaktionsarbeit“ (Institut DGB-Index Gute Arbeit, 2018). In Anlehnung an die BIBB/BAuA-ETB 2012-Analyse umfasst die Stichprobe alle befragten Erwerbspersonen bis zum Alter von 65 Jahren, die nicht in Ausbildung stehen. Die Auswertung erfolgt unter Berücksichtigung der verfügbaren Gewichtungsfaktoren. Wie bei der BIBB/BAuA-ETB 2012 ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten, dass die Antworten die subjektiven Einschätzungen der Befragten abbilden. Darüber hinaus erfolgt die Branchendefinition in den Daten des DGB-Index Gute Arbeit ausschließlich über Wirtschaftszweige.

2.3.3 Delphi-Verfahren

Mit der Delphi-Befragung werden branchenspezifische Trends zu Technologie, Organisation und Qualifikation durch Expertinnen und Experten des Maschinenbaus konkretisiert und validiert.[7] Die Befragung erfolgte anonym als softwaregestützte Online-Befragung in zwei Zyklen von Januar bis Februar 2020. Den Fragebogen der ersten Befragungsrunde zur Maschinenbaubranche schlossen insgesamt 51 Personen ab (Tabelle 1). Die Teilnehmenden sind mit 80 % überwiegend Vertreterinnen und Vertreter von Unternehmen der Branche.

In der zweiten Runde der Delphi-Befragung hatten die Fachleute die Möglichkeit, auf Grundlage der Kollektivmeinung aus der ersten Runde ihre Aussagen mit den Meinungen der anderen Befragten zu ausgewählten Thesen zu reflektieren, vertiefende Thesen zu bewerten und in offenen Fragen weitere Beispiele zu nennen. Im zweiten Delphi-Zyklus schlossen 15 Personen den Fragebogen ab. Aufgrund der begrenzten Teilnehmendenzahl in der zweiten Runde basieren die im Bericht dargestellten Ergebnisse im Wesentlichen auf den Ergebnissen der ersten Befragungsrunde. Diese werden jedoch um qualitative Aussagen aus den Fragen der zweiten Delphi-Runde ergänzt. Darüber hinaus diente eine interne Auswertung der geschlossenen Fragen aus der zweiten Runde als Plausibilitätscheck.

[3] Vgl. https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftklassifikationen/Content75/KlassifikationWZ08.html, zuletzt aufgerufen am 24.04.2020.

[4] Vgl. https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Berufe/KlassifikationKldb2010.html, zuletzt aufgerufen am 24.04.2020.

[5] Die Definition der Branche „Pflege und Versorgung“ stellt einen Sonderfall dar. Sie setzt sich ausschließlich aus Gesundheits-, Kranken- und Altenpflegerinnen und -pflegern zusammen, die in Wirtschaftszweigen des Gesundheits- und Sozialwesens tätig sind.

[6] Eine Ausnahme bildet die Branche „Pflege und Versorgung“, die in Anlehnung an Roth (2017) der Vergleichsgruppe „Dienstleistungen“ zugeordnet wird.

[7] Für Details zur Delphi-Methode siehe Vorgrimler und Wübben (2003).

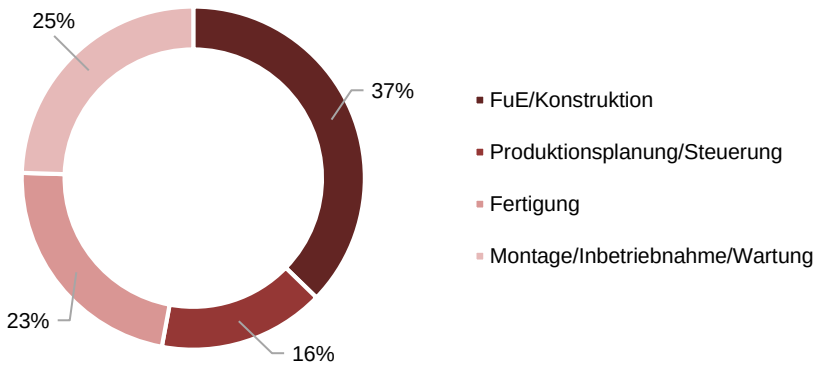
Tabelle 1: Teilnehmendenübersicht der Delphi-Befragung

1. Befragungszyklus		
Kriterium	**Häufigkeit**	**Anteil**
Akteur		
Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus	41	80 %
Beratungsunternehmen	2	4 %
Wissenschaft und Forschung	3	6 %
Öffentliche Verwaltung, Gewerkschaft, Verband, Netzwerk oder Politik	5	10 %
Insgesamt	**51**	**100 %**
Unternehmensgröße		
Kleine Unternehmen (bis 49 Beschäftigte)	4	10 %
KMU (bis 249 Beschäftigte)	8	20 %
Großunternehmen (mehr als 249 Beschäftigte)	29	71 %
Insgesamt	**41**	**100 %**
2. Befragungszyklus		
Rücklaufquote	**15**	**30 %**

Quelle: Delphi-Befragung (1. und 2. Zyklus).

Die Teilnehmenden der Delphi-Befragung schätzen ihre Expertise hinsichtlich der vier Branchenbereiche FuE/Konstruktion, Produktionsplanung/Steuerung, Fertigung und Montage/Inbetriebnahme/Wartung wie folgt ein (Abbildung 3):

Abbildung 3: Teilnehmendenübersicht der Delphi-Befragung



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

2.3.4 Fallstudien

Ausgangspunkt der Fallstudien sind leitfadengestützte Einzelinterviews mit Expertinnen und Experten der Maschinenbaubranche. Die Fallstudien sollen insbesondere identifizierte Trends der vorhergehenden Untersuchungen validieren und konkretisieren. Die Interviews wurden zunächst transkribiert und in Texte überführt sowie – nach schriftlicher Klärung offener Fragen – abschließend von der Gesprächspartnerin bzw. dem Gesprächspartner freigegeben. Die Interviews sind anonymisiert und in Form von Fallstudien in den vorliegenden Branchenbericht eingebunden.

2.3.5 Synthetisierte Roadmap

In Anlehnung an die Visual-Roadmapping-Methodik von Kind, Hartmann und Bovenschulte (2011) erfolgt eine Trendanalyse zur Identifizierung von Zeithorizonten neuartiger technologischer Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Arbeitsorganisation sowie Qualifikations- und Kompetenzanforderungen als synthetisierte Roadmap. Diese Vorgehensweise eignet sich besonders für die Vorausschau und Bestimmung von Meilensteinen auf dem Weg vom „Jetzt“ zu möglichen Zukunftsszenarien in der Arbeitswelt.

Die synthetisierte Roadmap ist das Ergebnis eines iterativen Auswertungsprozesses: Ausgehend von einer Analyse bestehender Technologie-Roadmaps und Strategiepapiere in Kombination mit einer umfassenden Literaturauswertung wurde eine *vorläufige* Version der synthetisierten Roadmap erstellt. Von dieser Roadmap wurden Kernthesen abgeleitet und im Rahmen einer Delphi-Befragung verifiziert und ergänzt. Abschließend wurden die Ergebnisse der Delphi-Befragung in eine *finale* Version der synthetisierten Roadmap eingearbeitet.

Die Visualisierung der synthetisierten Roadmap spiegelt die drei zentralen Betrachtungsebenen von QuaTOQ wider: Technologie, Organisation und Qualifikation. Diese Analyse wird sowohl von branchenspezifischen als auch branchenübergreifenden „Kontextfaktoren" flankiert, die potenzielle Einflussfaktoren auf zukünftige Entwicklungen in den drei Ebenen darstellen; in Anlehnung an eine PEST-Analyse können sie den vier thematischen Gruppen „gesellschaftlich", „politisch/ökonomisch", „technologisch" und „ökologisch" zugeordnet werden (Paul & Wollny, 2014). Mittels eines Horizon-Scannings werden zudem Trendhypothesen für die Zeiträume bis 2020, 2025, 2030 und darüber hinaus ermittelt. Das Horizon-Scanning umfasst, in Anlehnung an die Methodik von Bovenschulte, Ehrenberg-Silies und Compagna (2014), die umfangreiche Auswertung verschiedener Quellen, wie renommierte Fachzeitschriften, Strategiepapiere relevanter Akteure aus Wirtschaft, Verbänden und Wissenschaft, Forschungsnachrichten großer Förderorganisationen, etablierte Tagespresse, populärwissenschaftliche Zeitschriften und Abfragen von Fachleuten.

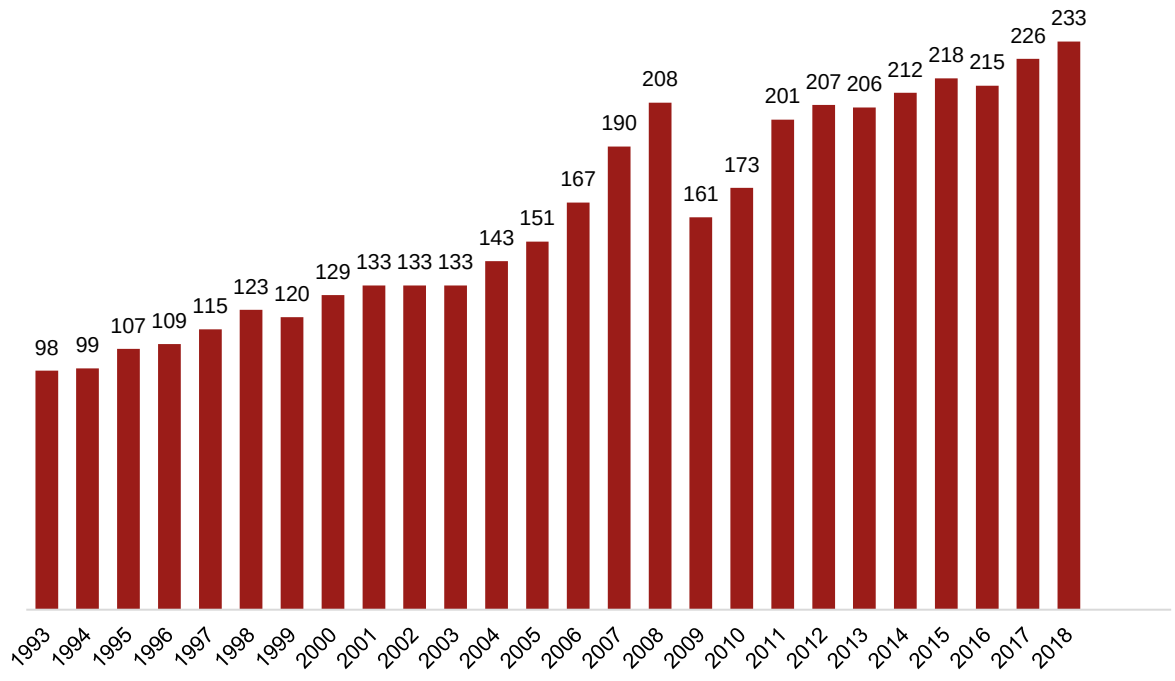
Ausgangspunkt dieser Untersuchung ist die Ebene Technologie, die durch eine Auswertung bestehender Technologie-Roadmaps und Strategiepapiere umfassend dargestellt wird. Insbesondere wird Technologie als Initiator des Wandlungsprozesses von Organisationsstrukturen und Qualifikations- wie Kompetenzanforderungen verstanden. Die synthetisierte Roadmap hat nicht das Ziel, alle denkbaren Szenarien zukünftiger Entwicklungen in den drei Dimensionen Technologie, Organisation und Qualifikation aufzuzeigen; vielmehr soll sie wichtige Herausforderungen hervorheben und potenzielle Entwicklungspfade darstellen.

3 Branchenübersicht

3.1 Branchenstruktur und -entwicklung

Der Maschinenbau ist das Rückgrat der deutschen Wirtschaft. Er prägt als mittelständisch dominierte, exportorientierte Branche zu wesentlichen Teilen das Image des Industriestandorts Deutschland („German Engineering“). Der Maschinenbau ist umsatz- und innovationsstark. Im Jahre 2018 betrug der Umsatz der Branche 233 Mrd. Euro, womit er sich seit 1991 mehr als verdoppelt hat (Abbildung 4). Von kleineren Schwankungen und dem drastischen Einbruch infolge der Finanzkrise 2008 abgesehen, hat der Maschinenbau seine Umsätze über die Jahre nachhaltig steigern können. Aktuelle Erhebungen zeigen allerdings, dass die Branchenakteure die globale und nationale Konjunkturentwicklung und ihre Umsatzerwartungen schon vor dem Einsetzen der Corona-Krise pessimistisch beurteilten (Commerzbank AG, 2019). Da die Branche wesentlich von der Investitionsneigung produzierender Unternehmen, etwa der Automobilhersteller, abhängig ist, schlagen negative Zukunftserwartungen und abgeschwächtes Wachstum in Anwenderbranchen direkt auf die Maschinenbauer durch (Commerzbank AG, 2019). Von einer abermaligen Verschlechterung der Zukunftserwartungen ist im Zuge der andauernden Corona-Pandemie auszugehen (PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft [PwC], 2020).

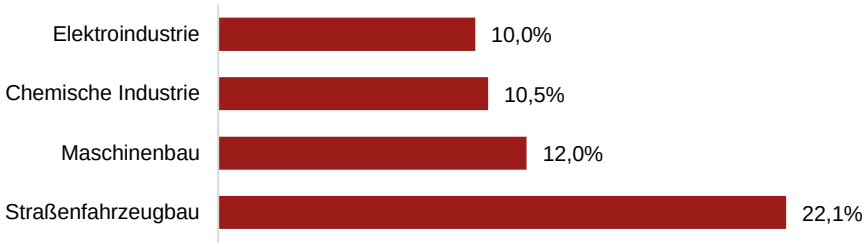
Abbildung 4: Umsatzentwicklung im deutschen Maschinenbau (in Mrd. Euro), 1991 – 2018



Quelle: Eigene Darstellung. Statista GmbH (2019b).

Dies wiegt umso schwerer, als der Maschinenbau mit 12 % Umsatzanteil am gesamten verarbeitenden Gewerbe in Deutschland der zweitgrößte nationale Industriezweig ist, noch vor der chemischen Industrie (10,5 %) und der Elektroindustrie (10 %), übertroffen nur von der Automobilbranche mit 22,1 % Umsatzanteil (Abbildung 5). Der Anteil des Maschinenbaus an der gesamtwirtschaftlichen Bruttowertschöpfung in Deutschland lag im vergangenen Jahrzehnt durchgehend bei rund 3,5 %, mit leichten Schwankungen (Statista GmbH, 2019b).

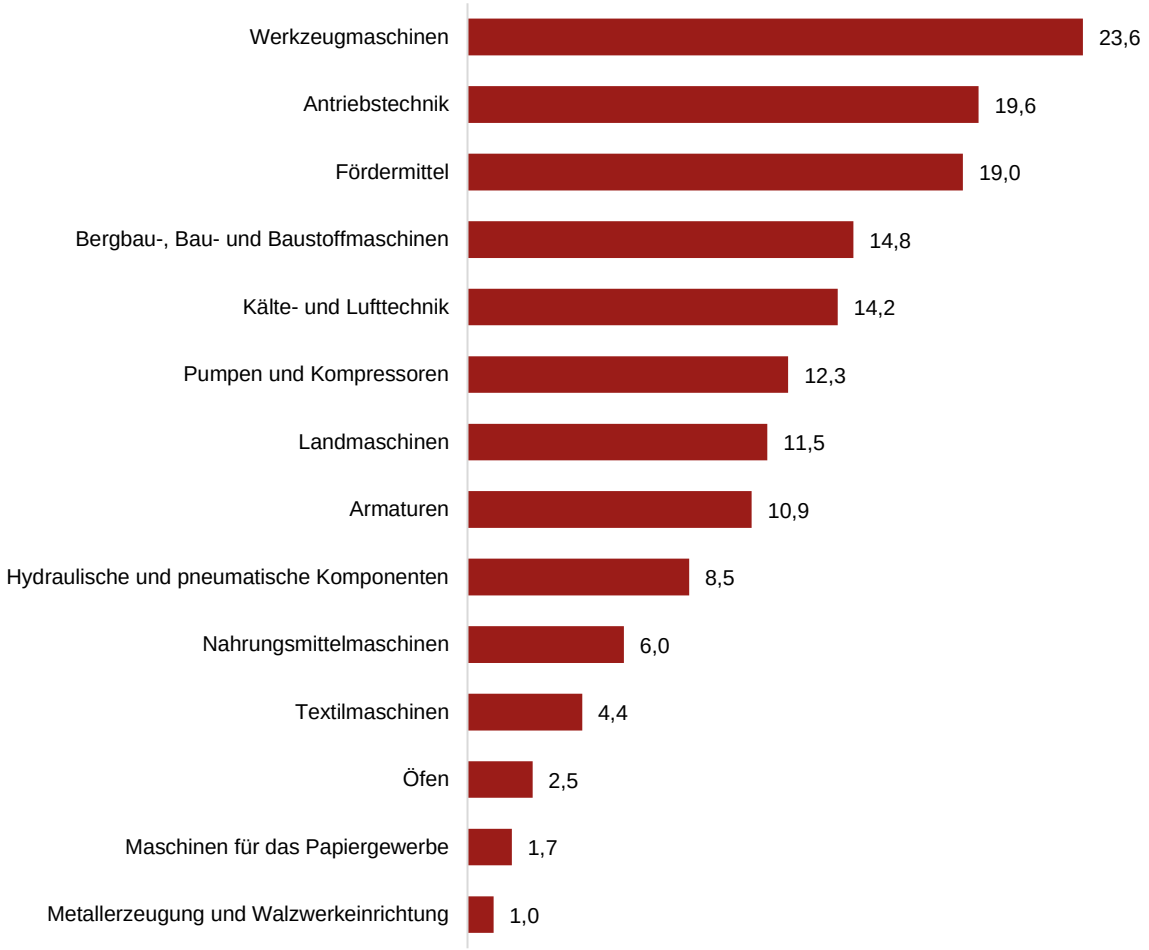
Abbildung 5: Umsatzanteile der vier größten Industriezweige am verarbeitenden Gewerbe, 2018



Quelle: Eigene Darstellung. Statista GmbH (2019c).

Der Maschinenbau selbst besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Anwendungs- und Technologiesegmente. Die drei umsatzstärksten Segmente des deutschen Maschinenbaus sind gegenwärtig der Werkzeugmaschinenbau (23,6 Mrd. Euro), die Antriebstechnik (19,6 Mrd. Euro) sowie der Fördermittelbereich (19 Mrd. Euro, Abbildung 6).

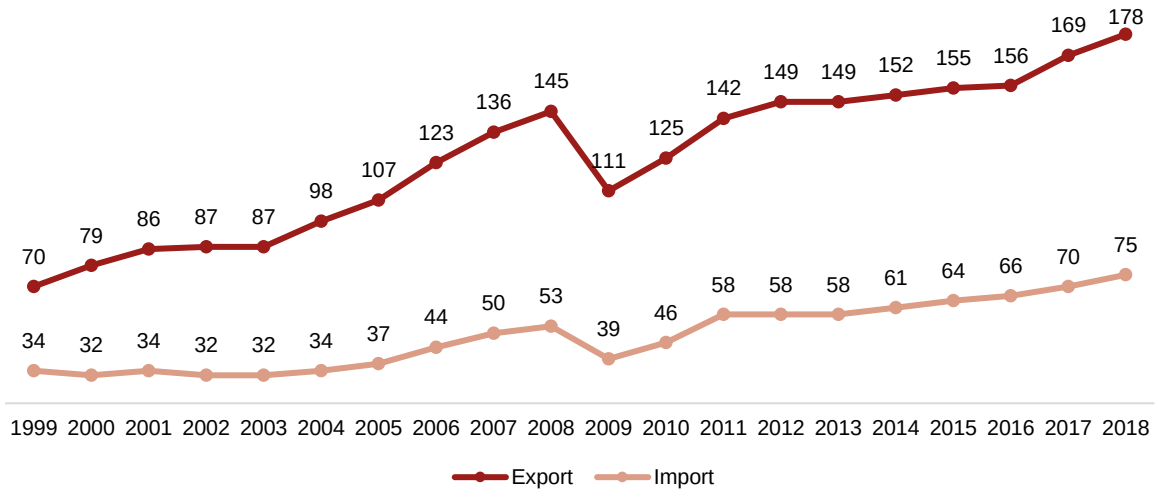
Abbildung 6: Umsatz im Maschinenbau nach ausgewählten Sektoren (in Mrd. Euro), 2019



Quelle: Eigene Darstellung. Statista GmbH (2019b).

Der traditionell exportstarke deutsche Maschinenbau konnte in den vergangenen Jahrzehnten seine Ausfuhren kontinuierlich steigern; auch hier mit Ausnahme der Krisenjahre 2009/2010. Im Jahr 2018 wurden Maschinen im Wert von 178 Mrd. Euro aus Deutschland exportiert, importiert wurden im selben Jahr Maschinen im Wert von 75 Mrd. Euro (vgl. Abbildung 7).

Abbildung 7: Export- und Importwert von Maschinenbauerzeugnissen (in Mrd. Euro), 1999 – 2018



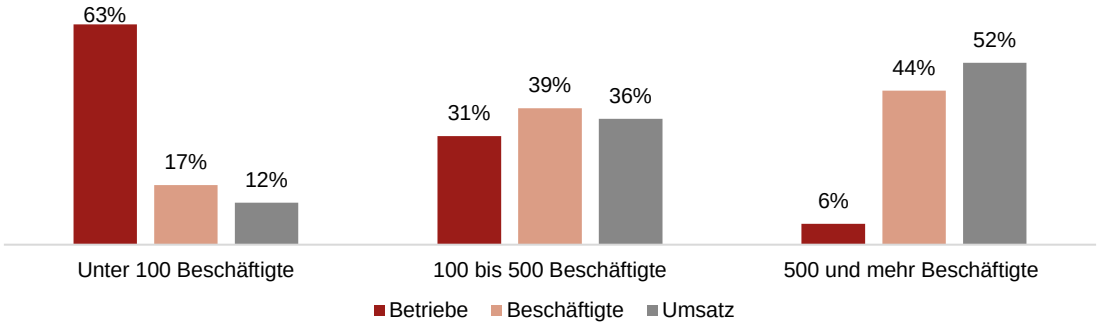
Quelle: Eigene Darstellung. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau [VDMA] (2019).

Die wichtigsten Absatzländer für die deutschen Maschinenbauer waren 2018 die USA mit 19,2 Mrd. Euro, China mit 19,1 Mrd. Euro und Frankreich (11,9 Mrd. Euro). Regional betrachtet ist die Europäische Union der wichtigste Absatzmarkt mit 101,6 Mrd. Euro, gefolgt von Asien (41,9 Mrd. Euro) und Nordamerika mit 20,9 Mrd. Euro (VDMA, 2019). Der Anteil Deutschlands am weltweiten Gesamtumsatz im Maschinenbau belief sich 2018 auf 11 %. Damit liegt Deutschland an dritter Stelle auf dem Weltmarkt, übertroffen nur von China mit 33 % und den USA mit 14 % (VDMA, 2019).

Im Jahr 2017 wurden in Deutschland 6.523 Betriebe des Maschinenbaus gezählt, in denen insgesamt mehr als eine Million Menschen arbeiteten (VDMA, 2019). Der deutsche Maschinenbau gilt traditionell als Domäne des Mittelstandes. Eine nähere Betrachtung zeigt allerdings, dass die Branche von drei Unternehmenstypen geprägt ist, die sehr unterschiedliche Charakteristika aufweisen (Abbildung 8):

- 63 % aller Betriebe sind kleinere Betriebe mit unter 100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Sie beschäftigen 17 % des Branchenpersonals und erwirtschaften 12 % des Branchenumsatzes.
- 31 % der Betriebe beschäftigen zwischen 100 bis unter 500 Menschen, also 39 % aller Branchenbeschäftigten. Damit tragen diese Unternehmen 36 % zum Gesamtumsatz der Branche bei.
- Großbetriebe mit 500 oder mehr Beschäftigten sind 6 % der Maschinenbau-Unternehmen. Ihr Personalbestand entspricht 44 % der Branchenbeschäftigten und sie erbringen 52 % des Branchenumsatzes.

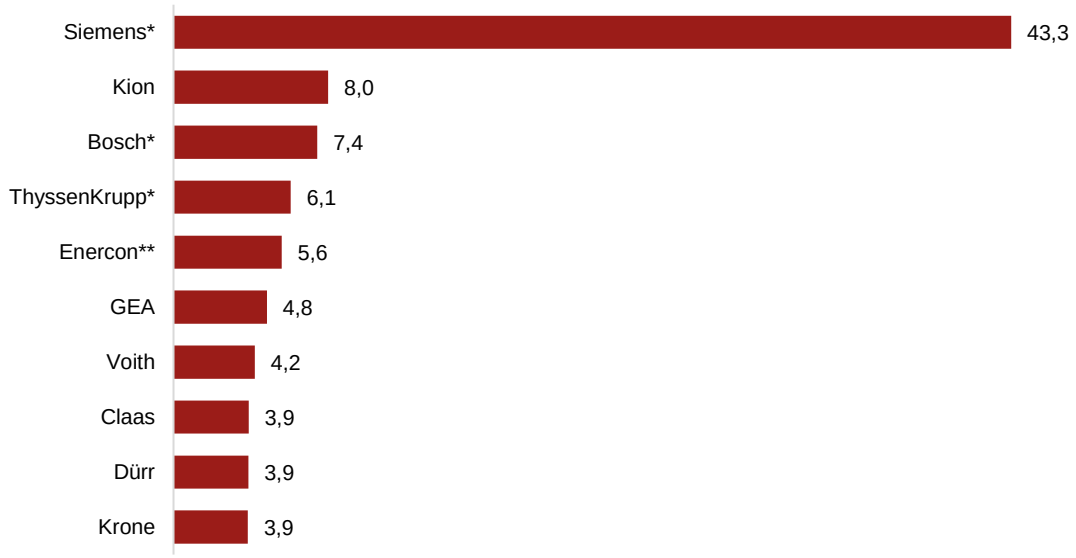
Abbildung 8: Branchenstruktur des Maschinenbaus nach Beschäftigten, 2018



Quelle: Eigene Darstellung. Statistisches Bundesamt, Berechnung vgl. Quest Trend Magazin (2019).

Die Branche ist damit charakterisiert durch ein Nebeneinander zahlreicher kleiner Betriebe, gut eines Drittels mittelständischer Unternehmen sowie einiger Großunternehmen, die gleichwohl für über 50 % des Umsatzes stehen. Unter den Großunternehmen ragt die Siemens AG hervor, die mit einem Umsatz von 43,4 Mrd. Euro in ihren Maschinen-Divisionen klar an der Spitze liegt. Es folgen mit einigem Abstand der Gabelstapler- und Lagertechnik-Hersteller Kion aus Frankfurt am Main (8 Mrd. Euro) sowie die Robert Bosch GmbH, die mit ihrem Maschinenbaubereich einen Umsatz von 7,4 Mrd. Euro erreichte (Abbildung 9). Auf den weiteren Plätzen folgen der Maschinenbau der Thyssenkrupp AG, die GEA Group aus Düsseldorf, die v. a. im Nahrungsmittelsektor tätig ist, der Windanlagenhersteller Enercon sowie der Voith-Konzern, dessen Schwerpunkt in den Bereichen Papier und Wasserkraft liegt. Die Ränge acht bis zehn werden vom Landmaschinenhersteller Claas, der Dürr AG, die u. a. Automobilhersteller und -zulieferer zu ihren Kunden zählt, und der Krone AG belegt, die Anlagen und Maschinen für die Herstellung, Abfüllung und Verpackung von Getränken produziert (Jerzy, 2019).

Abbildung 9: Größte deutsche Maschinen- und Anlagenbauunternehmen nach Umsatz (in Mrd. Euro), 2018

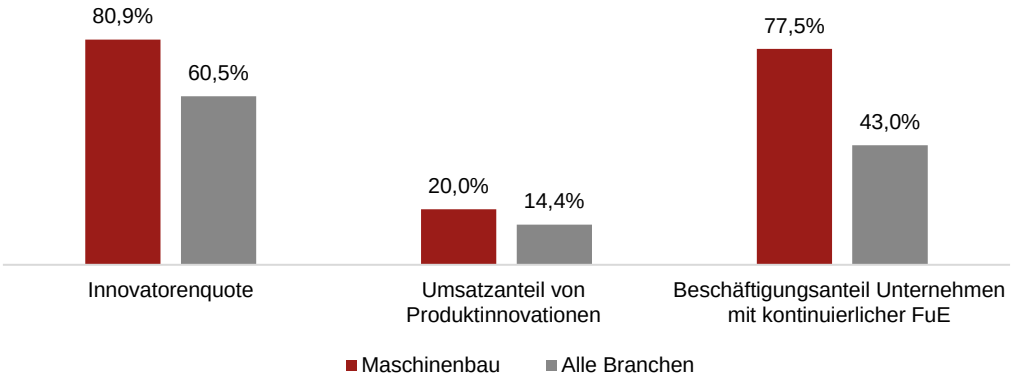


*Anmerkungen: * Ausgewählte Divisionen. ** Zahlen aus vergangenen Geschäftsjahren aufgrund verspäteter Reportings bzw. anderer Enden des Geschäftsjahres.*
Quelle: Statista GmbH (2019)

Der Maschinenbau ist eine innovationsstarke Branche, deren FuE-Aufwendungen und Fähigkeit zu Produkt- und Prozessinnovationen erheblich über dem Durchschnitt der deutschen Gesamtwirtschaft liegt (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH [ZEW], 2020). Im Jahr 2019 hat die Branche nach Schätzungen des ZEW Innovationsausgaben für die Entwicklung und Einführung von Produkt- oder Prozessinnovationen von rund 17 Mrd. Euro getätigt. Dies entspricht einer Steigerung von 2 % gegenüber dem Vorjahr.

Im Vergleich zur Gesamtwirtschaft schneidet der Maschinenbau bei einer Reihe von Kenngrößen stärker ab: so etwa in der Innovatorenquote, d. h. beim Anteil derjenigen Unternehmen an der Gesamtzahl aller Unternehmen, die in letzten drei Jahren eine Produkt- oder Prozessinnovation eingeführt haben. Hier liegt der Maschinenbau mit 80,9 % deutlich über dem Durchschnitt der deutschen Wirtschaft (60,5 %). Mit Produktinnovationen werden 20 % des Maschinenbauumsatzes erzielt; für die Gesamtwirtschaft liegt dieser Wert bei 14 %. 77,5 % aller Beschäftigten des Maschinenbaus arbeiten in Unternehmen mit kontinuierlicher FuE-Aktivität, für die deutsche Wirtschaft insgesamt gilt dies nur für 43 % aller Beschäftigten. Im Branchenvergleich ist der Maschinenbau – neben der Automobil- und Elektroindustrie – eine der innovativsten Branchen in Deutschland.

Abbildung 10: Innovatorenquote, Umsatzanteil von Produktinnovationen, Beschäftigungsanteil von Unternehmen mit kontinuierlicher FuE im deutschen Maschinenbau, 2018



*Anmerkungen: * Alle Angaben beziehen sich auf Unternehmen mit fünf oder mehr Beschäftigten.*
Quelle: Eigene Darstellung. ZEW (2020).

Für die Zukunft ist absehbar, dass insbesondere die digitale Transformation im Maschinenbau an Intensität gewinnen wird. Die erfolgreiche Bewältigung dieses Anpassungsprozesses ist dabei die wesentliche Voraussetzung, um in einem wettbewerbsintensiven globalen Marktumfeld bestehen zu können. Dies betrifft nicht nur die weitere Digitalisierung interner Prozesse und der eigenen Produktion. Vielmehr gilt das für den Maschinenbau als Leitanbieter industrieller Digitalisierungslösungen (Kapitel 4.2), speziell für die Entwicklung digitaler Produkte und Services. Technologisch anspruchsvolle, vernetzte Systemlösungen gelten deutschen Produzenten als der Weg, auf dem sie im harten Wettbewerb gegenüber kostengünstigen Anbietern aus dem asiatischen Raum bestehen können. Der Ausbau des Servicegeschäfts, ebenfalls basierend auf digitalen Technologien, bildet einen weiteren Baustein, der dem deutschen Maschinenbau seine Marktführerschaft in vielen Bereichen weiter sichern kann (Commerzbank AG, 2019).

Mit Blick auf strukturelle Veränderungen innerhalb der Betriebe dürfte die Entwicklung der Branche auch künftig stark variieren, abhängig von der Unternehmensgröße sowie vom Anwendungs- und Technologiesegment. Im Maschinenbau – insbesondere im Bereich der Spezialmaschinen – ist die Werkstattfertigung eine weiterhin übliche Arbeitsorganisation, wenngleich auch hier zunehmend Lean-Strukturen etabliert werden (Kuhlmann & Voskamp, 2019). Die Werkstattfertigung ist einerseits gekennzeichnet durch eine nur geringe Standardisierung sowie den damit verbundenen Mangel an Rationalisierungsmöglichkeiten und somit von geringen Skaleneffekten. Zum anderen ist eine solchermaßen spezialisierte Fertigungsweise geprägt von einem nur gering entwickelten Outsourcing von Fertigungsschritten, da hierfür abermals nicht die entsprechenden Stückzahlen erreicht werden: Die Unternehmen beherrschen in ihrer Nische somit eine hohe technologische und organisatorische Komplexität.[8]

Dabei ist, bei aller Veränderungsdynamik, die strukturelle Charakteristik der Organisationsprinzipien in der Branche relativ stabil. Bereits vor zwanzig Jahren kamen umfassende empirische Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass sich „der hohe Eigenfertigungsanteil nicht nur als ein Faktor [erweist], der die hohe Spezifität der Produktionsprozesse durch Kundenanforderungen im Maschinenbau widerspiegelt und dadurch die Chance des ‚Outsourcing' über den Markt reduziert, sondern geradezu unter diesen Bedingungen als ein Erfolgsfaktor. Offensichtlich ist man in dieser Branche über alle Betriebsgrößen hinweg besonders erfolgreich, wenn man die Prozesse unmittelbar betriebsintern kontrollieren kann" (Ruhr-Universität Bochum, 2000, S. 178).

[8] Nach dem Konzept der ökonomischen Komplexität von Hidalgo und Hausmann (2009) belegt Deutschland im internationalen Vergleich Platz 4 nach Japan, der Schweiz und Südkorea (vgl. https://atlas.cid.harvard.edu/). Es zeichnet sich somit durch eine hohe Vielfalt nützlichen Wissens und damit gleichbedeutend durch die Wettbewerbsfähigkeit seiner Produktion/Produkte aus. Dies gilt auch und insbesondere für den Maschinenbau, der in der Branchenaufschlüsselung der Exportkomplexität (Stand: 2017) im „Atlas of Complexity" von Hausmann et al. (2011) einen mehr als doppelt so hohen Wert erreicht als die Automobilindustrie.

Die vergleichsweise geringe Ausprägung des Outsourcings trifft dabei noch heute auf den Maschinebau zu (Dispan, 2019). Die beschriebene Form der Wertschöpfung wird sich in den betreffenden Unternehmen auch absehbar nicht grundlegend ändern. Somit wird der Standardisierungs- und Stabilitätsgrad der Herstellungsprozesse im Maschinenbau vorerst nicht das in anderen Industriebranchen übliche Niveau erreichen: „Die Vielfalt und Veränderungsdynamik von Kundenanforderungen sowie die Notwendigkeit ständiger, kleinschrittiger Innovationen bleiben für die Branche auf Dauer prägend und in wirtschaftlicher Hinsicht entscheidend“ (Kuhlmann & Voskamp, 2019, S. 17). Die derartige Beschaffenheit der Wertschöpfung (oftmals hochspezialisierte Nischenmärkte ohne Ausweichmöglichkeit bei konjunkturellen Schwankungen) und der grundlegenden Arbeitsorganisation (projektorientiertes Arbeiten) dürfte aufgrund des branchenweit sehr hohen Komplexitätsgrades der Produkte und der vorherrschenden Einzel- und Kleinserienproduktion (Pfeiffer, Lee, Zirnig & Suphan, 2016) im Querschnitt und speziell bei KMU in gewisser Weise stilbildend sein.

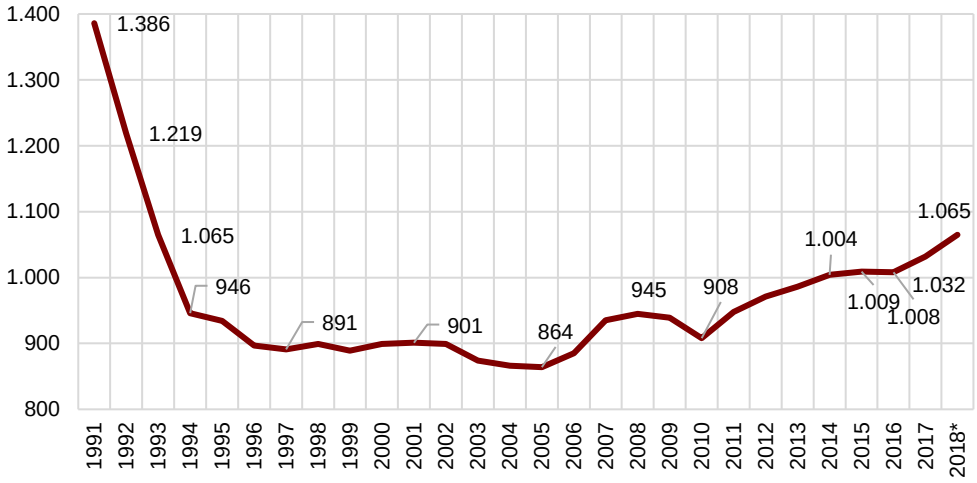
Bei Betrieben mit mehr als 500 Beschäftigten dürften hingegen bereits heute stärker Skaleneffekte und somit in weit größerem Umfang standardisierte, taktgebundene und rationalisierte Formen zur Leistungserbringung zum Tragen kommen. Denn Großunternehmen machen nur 6 % aller Maschinenbaufirmen in Deutschland aus, realisieren aber über 50 % des Umsatzes der Branche (vgl. Abbildung 8): „Ein Vorreiter für Lean Production war der Werkzeugmaschinenbauer Trumpf mit Einführung des Ganzheitlichen Produktionssystems ‚Synchro‘ Ende der 1990er Jahre – seither wurden die Fließmontage mit langen Taktzeiten und weitere Elemente von Lean bei vielen Maschinenbauern eingeführt. In den letzten Jahren wurden dann auch bei Bürotätigkeiten Lean-Office-Konzepte implementiert“ (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 40). Perspektivisch ist zu erwarten, dass sich verstärkt modulare Konzepte etablieren werden – und zwar sowohl bei den Produkten selbst als auch bei den Fertigungsprozessen (Dispan, 2016, 2019).

3.2 Beschäftigungsentwicklung

Gerade zu Beginn der 1990er Jahre erfuhr der deutsche Maschinenbau einen starken Beschäftigungsrückgang. Bis zur Jahrtausendwende betraf dieser Rückgang knapp eine halbe Million Arbeitsplätze. Die Gründe für diese Entwicklung sind vielfältig: Automatisierungstendenzen, die Verlagerungen von Produktion ins Ausland sowie die Bedeutungszunahme des Dienstleistungssektors müssen als wesentliche Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Nach der weltweiten Finanz- und Wirtschaftskrise ab 2008 erholte sich die Beschäftigungssituation im Maschinenbau stetig (Abbildung 11): 2014 wurde die Schwelle von einer Million Beschäftigter erstmals seit Mitte der 1990er Jahre wieder überschritten – Tendenz steigend.

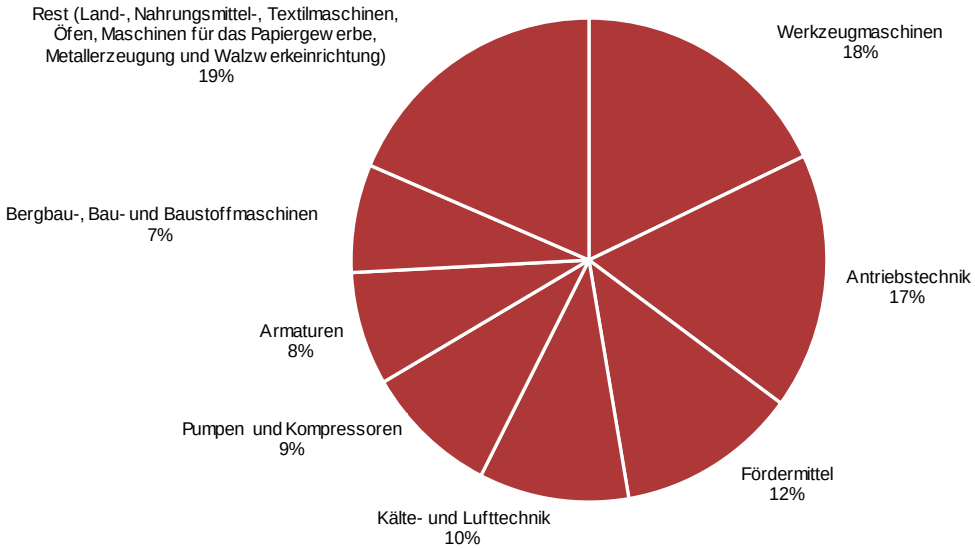
Abbildung 11: Anzahl der Beschäftigten im deutschen Maschinenbau (in 1.000), 1991 – 2018



*Anmerkungen: * Werte für 2018 geschätzt.*
Quelle: Eigene Darstellung. Statista GmbH (2019a).

Innerhalb der Maschinenbaubranche stellen die Sektoren Werkzeugmaschinenbau (18 %), Antriebstechnik (17 %), Fördermittel (12 %) sowie Kälte- und Lufttechnik (10 %) die größten Beschäftigungsanteile (Abbildung 12). Die hohe Zahl an Sektoren mit kleineren Beschäftigungsanteilen verdeutlicht die brancheninterne Vielfalt der tätigen Unternehmen.

Abbildung 12: Beschäftigungsanteile im Maschinenbau nach Sektoren, 2019



Quelle: Eigene Darstellung. Statista GmbH (2020).

Im Jahr 2019 betrug die abhängige Beschäftigung im Maschinenbau rund 1,3 Millionen Personen (Tabelle 2). Zwischen 2013 und 2019 ist damit ein Beschäftigungsanstieg von 7,1 % zu verzeichnen. Die Gesamtbeschäftigung speist sich im Wesentlichen aus sozialversicherungspflichtig Beschäftigten (96,1 %). Geringfügig Beschäftigte bilden mit einem Anteil von 3,9 % eher eine Ausnahme.

Tabelle 2: Beschäftige nach Art, 2013 – 2019

	2013			2019		
WZ 2008	**Insgesamt**	SvB	GB	**Insgesamt**	SvB	GB
28 Maschinenbau	**1.054.263**	**1.006.402**	**47.861**	**1.129.497**	**1.085.581**	**43.916**
Δ 2013 – 2019				7,1%	7,9%	-8,2%
Anteil	100,0%	95,5%	4,5%	100,0%	96,1%	3,9%

Anmerkungen: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (SvB), Geringfügig Beschäftigte (GB).
Quelle: Eigene Darstellung. Stichtage 31.03.2013 und 31.03.2019. Statistik der Bundesagentur für Arbeit: Sonderauswertung.

Wenngleich die Beschäftigungsstatistik der Bundesagentur für Arbeit für die gesamte Maschinenbaubranche eine positive Entwicklung innerhalb des Betrachtungszeitraums widerspiegelt, zeigt die tiefergehende Betrachtung der Beschäftigungsentwicklungen ausgewählter Berufsuntergruppen durchaus auch rückläufige Tendenzen (Tabelle 3): Zwischen 2013 und 2019 gibt es Beschäftigungsrückgänge insbesondere bei Berufen in der spanenden Metallbearbeitung (-4,5 %), dem Metallbau (-6,5 %) sowie der Werkzeugtechnik (-10,7 %). Diese drei genannten Berufsuntergruppen stehen in absoluten Zahlen für rund 7.500 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter.

Deutlich positive Entwicklungen sind demgegenüber in Berufen der Maschinen- und Anlagenführung (+22,9 %) sowie Instandhaltung und Wartung (+18,8 %) zu verzeichnen. Gleiches gilt für Beschäftigte in der Berufsgruppe Mechatronik und Automatisierungstechnik (+49,4 %). Weitere Beschäftigungszunahmen in der Größenordnung von rund 5.000 bis 7.000 Personen sind z. B. für Berufe in der technischen Forschung und Entwicklung mit 19,0 %, im Bereich des technischen Zeichnens, Konstruktion und Modellbau mit 10,2 % sowie in der technischen Produktionsplanung und -steuerung (8,3 %) zu verorten. Ergänzend wuchs die Zahl der Beschäftigten in der Gruppe der Informatik-, Informations- und Kommunikationstechnologieberufe um rund 19.000 auf 25.000 Personen an, also ein Plus von 33,4 %.

Tabelle 3: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Berufsuntergruppen, 2013 – 2019

Berufe mach KldB 2010	2013	2019	Δ 2013 – 2019
242 Metallbearbeitung	**136.944**	**134.240**	-2,0%
2423 Berufe in der spanenden Metallbearbeitung	79.296	75.747	-4,5%
244 Metallbau und Schweißtechnik	**53.250**	**51.683**	-2,9%
2441 Berufe im Metallbau	35.203	32.903	-6,5%
245 Feinwerk- und Werkzeugtechnik	**26.013**	**24.115**	-7,3%
2452 Berufe in der Werkzeugtechnik	16.177	14.438	-10,7%
251 Maschinenbau- und Betriebstechnik	**227.424**	**248.288**	9,2%
2510 Berufe in der Maschinenbau- und Betriebstechnik (o. S.)	146.544	154.698	5,6%
2512 Maschinen- und Anlagenführer/innen	14.329	17.604	22,9%
2513 Technische Servicekräfte in Wartung und Instandhaltung	28.672	34.062	18,8%
261 Mechatronik und Automatisierungstechnik	**15.491**	**23.138**	49,4%
2611 Berufe in der Mechatronik	11.004	16.685	51,6%
2612 Berufe in der Automatisierungstechnik	4.415	6.351	43,9%
262 Energietechnik	**28.261**	**30.317**	7,3%
2625 Berufe in der elektrischen Betriebstechnik	11.139	13.571	21,8%
263 Elektrotechnik	**22.716**	**25.689**	13,1%
2630 Berufe in der Elektrotechnik (o. S.)	14.707	18.139	23,3%
271 Technische Forschung und Entwicklung	**24.802**	**29.515**	19,0%
2710 Berufe in der technischen Forschung und Entwicklung (o. S.)	22.691	27.320	20,4%
272 Technisches Zeichnen, Konstruktion und Modellbau	**53.756**	**59.255**	10,2%
2722 Berufe in der Konstruktion und im Gerätebau	33.389	38.847	16,3%
273 Technische Produktionsplanung und -steuerung	**56.926**	**61.626**	8,3%
2730 Berufe in der technischen Produktionsplanung und -steuerung	24.586	28.665	16,6%
43 Informatik-, Informations- und Kommunikationstechnologieberufe	**18.961**	**25.287**	33,4%
4341 Berufe in der Softwareentwicklung	5.192	8.383	61,5%

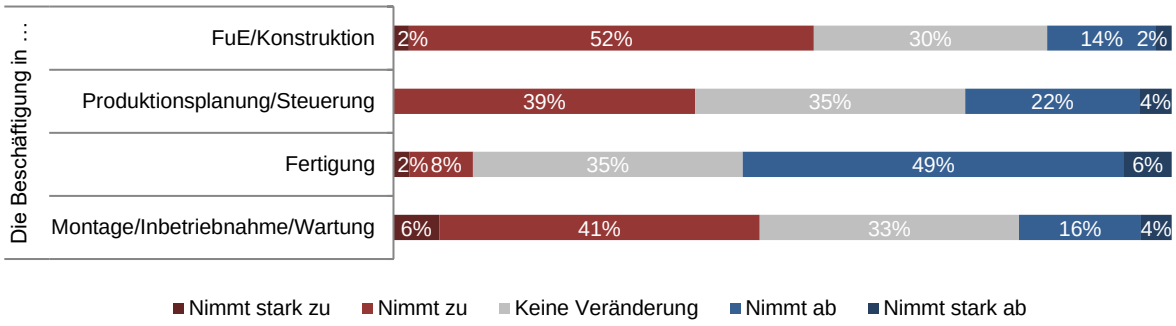
Anmerkungen: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte (SvB), Geringfügig Beschäftigte (GB).
Quelle: Eigene Darstellung. Stichtage 31.03.2013 und 31.09.2019. Statistik der Bundesagentur für Arbeit: Sonderauswertung.

Diese Erkenntnisse deuten insgesamt auf einen Beschäftigungsrückgang in Fertigungsberufen hin (Metallbau/-bearbeitung, Werkzeugtechnik) und auf teils deutliche Zuwächse in forschenden, planenden und steuernden sowie Wartungs- und Instandhaltungsberufen. In Anlehnung an die Unterscheidung nach Berufs(unter)gruppen gemäß KldB 2010 wird in der folgenden Präsentation der Erkenntnisse aus der Delphi-Befragung nach folgenden Branchenbereichen des Maschinenbaus differenziert: FuE/Konstruktion, Produktionsplanung/Steuerung, Fertigung, Montage/Inbetriebnahme/Wartung.

Entsprechend dieser Differenzierung schätzen die Expertinnen und Experten der Delphi-Befragung die Beschäftigungsentwicklung im Maschinenbau bis zum Jahr 2030 insgesamt positiv ein (Abbildung 13): Jeweils 54 %, 39 % bzw. 47 % der Befragten schätzen, dass die Beschäftigung in den Bereichen FuE/Konstruktion, Produktionsplanung/Steuerung bzw. Montage/Inbetriebnahme/Wartung zunehmen oder stark zunehmen wird. Demgegenüber rechnen 55 % der Expertinnen und Experten mit einer Abnahme (49 %) bzw. starken Abnahme (6 %) der Beschäftigung im Fertigungsbereich. Somit scheinen sich die Tendenzen der vergangenen Jahre – vgl. Tabelle 3 – zu verstetigen.

Ergänzend führen die Fachleute innerhalb der zweiten Befragungsrunde aus, dass die Beschäftigung von beruflich Qualifizierten in den Bereichen Produktionsplanung/Steuerung sowie Montage/Inbetriebnahme/Wartung bis 2030 tendenziell konstant bleiben wird. Zunehmende Beschäftigungsperspektiven für beruflich Qualifizierte werden im Bereich FuE/Konstruktion gesehen. Mit Blick auf Fertigungsberufe fällt die Einschätzung der Delphi-Befragten nicht eindeutig aus: Für beruflich Qualifizierte scheinen sowohl konstante als auch rückläufige Beschäftigungszahlen möglich.

Abbildung 13: Zukünftige Beschäftigungsentwicklung



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Konkrete Beschäftigungseffekte im Zuge und als Folge der Digitalisierung fallen nach aktuellen Berechnungen innerhalb des QuBe-Projektes bis zum Jahr 2035 moderat aus: Zika, Helmrich, Maier, Weber und Wolter (2018) gehen für die Maschinenbaubranche von einem Rückgang um rund 11.000 Personen aus, also -1,1 % im Vergleich zu 2015. Deutlicher gestalten sich Beschäftigungseffekte mit Blick auf spezifische Berufsgruppen („Berufshauptfelder" nach Zika et al., 2018):

- Metall-, Anlagenbau, Blechkonstruktion, Installation, Montierer, Elektroberufe: -195.000/-14,5 %
- Maschinen und Anlagen steuernde und wartende Berufe: -278.000/-15,1 %

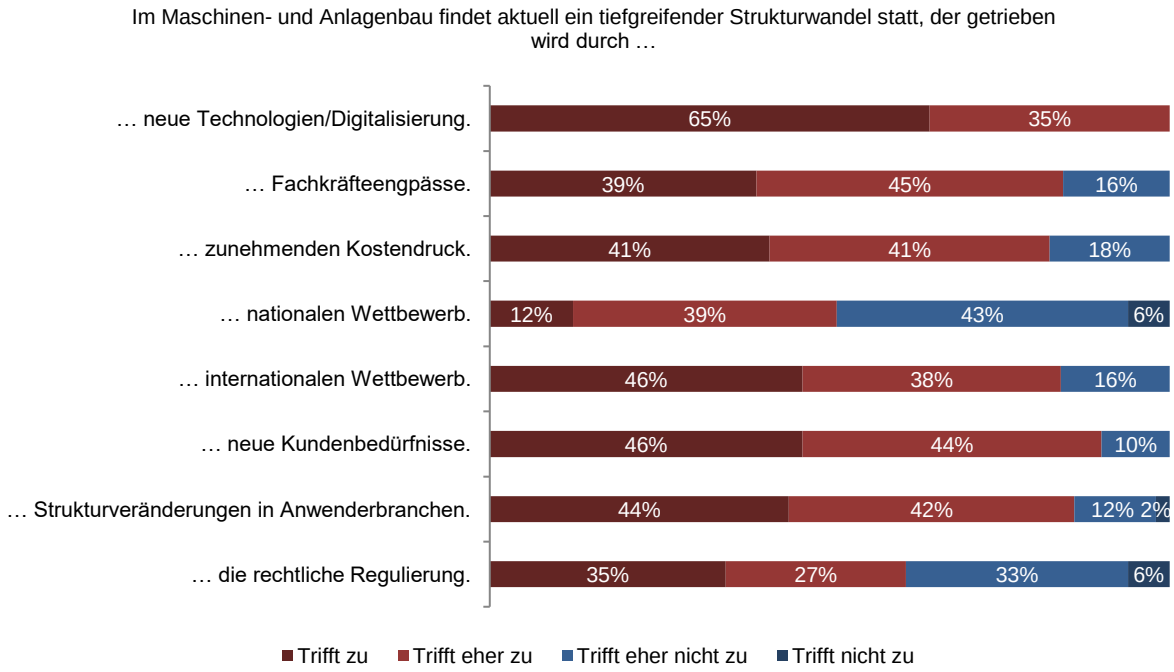
Ergänzend zu diesen quantitativen Erkenntnissen bringen Dispan und Schwarz-Kocher (2018) im Rahmen einer qualitativen Studie folgendes an: „Im Maschinenbau selbst sind […] – aufgrund der Kompensationseffekte aus Wachstum und demografischem Wandel – in den nächsten Jahren kaum Beschäftigungsrisiken durch die digitale Transformation zu erwarten. […] Im Gegenteil gibt es bereits heute für bestimmte Funktionen große Fachkräftebedarfe, die Maschinenbauunternehmen in vielen Regionen vor Herausforderungen stellen. Gesucht werden insbesondere Inbetriebnehmer und Monteure für weltweite Auswärtstätigkeiten […], aber auch Techniker, Ingenieure und Software-Entwickler in allen Teilbranchen." Die Einflussnahme von (unerwarteten) konjunkturellen Schwankungen, z. B. die aktuelle Corona-Pandemie, sind bei der Bewertung der weiteren Gültigkeit dieser Erkenntnisse jedoch zu berücksichtigen.

4 Wechselspiel von Technologie, Organisation und Qualifikation

4.1 Übersicht

Um abzuschätzen, wie es der Maschinenbaubranche in Deutschland gelingen kann, den vieldiskutierten Strukturwandel zu bewältigen, welche arbeitsorganisatorischen Konsequenzen sich daraus ergeben und was dies für die Entwicklung von Qualifikationsanforderungen bedeutet, gilt es, wesentliche Treiber für den Transformationsprozess zu identifizieren. Die Expertinnen und Experten der Delphi-Befragung wurden gebeten, unterschiedliche Treiber des Wandels nach ihrer Relevanz für den Maschinenbau zu bewerten (Abbildung 14). Eine große Übereinstimmung für diese Einschätzung besteht bei der Bewertung des Faktors neue Technologien. Der Aussage, dass der gegenwärtige Strukturwandel in der Branche durch neue Technologien respektive Digitalisierung getrieben sei, stimmen 65 % der Befragten zu, 35 % stimmen eher zu. Dieses eindeutige Ergebnis dürfte durch die Charakteristik des Maschinenbaus begründet sein: Er ist als Schlüsselsektor der digitalen Transformation „Leitanbieter" digitaler Lösungen für die industrielle Wertschöpfung und als produzierendes Gewerbe selbst von Digitalisierung betroffen (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 15).

Abbildung 14: Gründe für den Strukturwandel



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

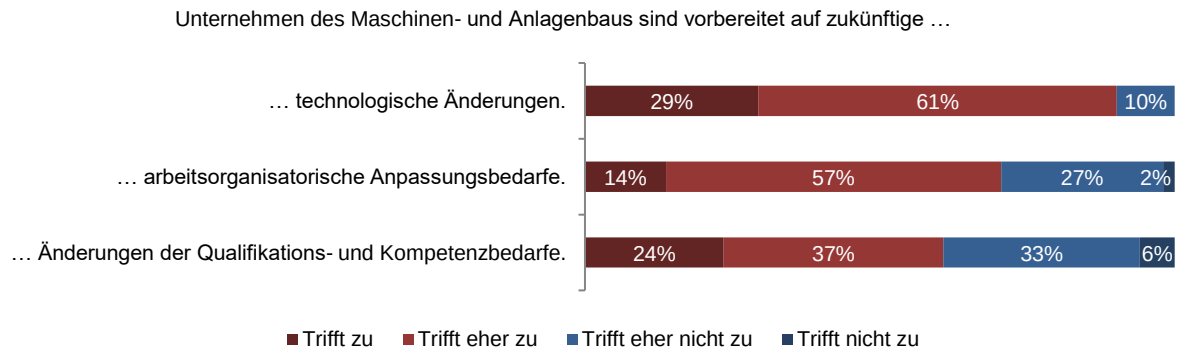
Ebenfalls eine eindeutige Mehrheit der Befragten gab an, dass Fachkräfteengpässe Treiber für den Strukturwandel seien. Dieser These stimmen 39 % zu, 45 % stimmen eher zu. Nur 16 % lehnen sie ab. Fachkräfteengpässe, insbesondere im Bereich digitaler Kompetenzen (Commerzbank AG, 2019, S. 5), stellen den Maschinenbau insofern vor erhebliche Herausforderungen, als dieser Mangel sich zu einem erheblichen Wachstumshindernis einer auf qualifizierte Beschäftigte angewiesenen Branche ausgeweitet hat (PwC, 2019, S. 4). Nahezu identisch zum Fachkräftemangel fällt die Einschätzung der Delphi-Befragten zur Rolle des Kostendrucks als Treiber des Strukturwandels aus. Er speist sich nicht zuletzt aus dem internationalen Wettbewerb. Dieser Kostendruck wird von 84 % der Befragten als relevanter Treiber des Strukturwandels im Maschinenbau identifiziert.

Damit zeigt sich, dass trotz des hohen Spezialisierungsgrades der Unternehmen (Commerzbank AG, 2019, S. 5) das Marktumfeld auf diese einen großen Druck in Richtung zusätzlicher Rationalisierung ausübt. In diesem internationalen Marktumfeld wirken sich auch zunehmende geopolitische Spannungen und eine zumindest zeitweilige Renaissance protektionistischer Wirtschaftspolitik erkennbar negativ auf die Wachstumsaussichten der stark exportorientierten Branchen aus (PwC, 2019, S. 20).

Die Expertinnen und Experten der Delphi-Befragung identifizieren darüber hinaus wandelnde Anforderungen der Kundschaft als Treiber des Strukturwandels im Maschinenbau. Dem stimmen 46 % der Befragten zu, 38% stimmen eher zu. Nur 16 % verneinen diese These. Die Eigenschaft des Maschinenbaus als Anbieter von Digitalisierungslösungen für das produzierende Gewerbe trägt dazu bei, dass die Branche der Veränderungsdynamik in Anwenderbranchen unmittelbar ausgesetzt ist (Kuhlmann & Voskamp, 2019, S. 17). Neben konkreten Kundenanforderungen an neue Maschinen und Anlagen haben auch grundlegende Transformationsprozesse in Anwenderbranchen einen unmittelbaren Spill-over-Effekt. So stimmen 44 % der Befragten zu, dass der Strukturwandel im Maschinenbau getrieben wird von Strukturveränderung in den Anwenderbranchen. 42 % stimmen eher zu, 12 % eher nicht; lediglich 2 % verneinen. Damit dürften insbesondere solche Bereiche wie der Werkzeugmaschinenbau mit einem besonders hohen Anteil an Zulieferleistungen für den sich derzeit dramatisch wandelnden Automobilsektor besonders stark von Anpassungsbedarfen betroffen sein.

Damit ist der Maschinenbau ausweislich der Ergebnisse der Delphi-Befragung einem multiplen Anpassungsdruck ausgesetzt. Daraus ergibt sich die Frage, inwieweit die Unternehmen auf künftige Herausforderungen vorbereitet sind (Abbildung 15). Dabei gehen die Expertinnen und Experten der Delphi-Befragung davon aus, dass die Unternehmen vor allem auf erforderliche Technologieveränderungen vorbereitet sind. Dem stimmen 29 % der Befragten zu, 61 % stimmen eher zu. Lediglich 10 % stimmen eher nicht zu. Weniger eindeutig fällt die Experteneinschätzung bei der Frage arbeitsorganisatorischer Anpassungsbedarfe aus. Dennoch stimmen 71 % der Befragten der These zu oder eher zu, dass Unternehmen des Maschinenbaus auf arbeitsorganisatorische Anpassungsbedarfe vorbereitet seien.

Abbildung 15: Vorbereitung auf zukünftige Herausforderungen



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Die größte Unsicherheit besteht seitens der Expertinnen und Experten bei der Frage, ob die Unternehmen auf künftige Änderungen der Qualifikations- und Kompetenzanforderungen vorbereitet sind. Nach Einschätzung von 24 % der Befragten trifft dies zu, 37 % geben an, dies treffe eher zu. Mehr als ein Drittel antwortete hingegen, dies treffe nicht zu oder eher nicht zu.

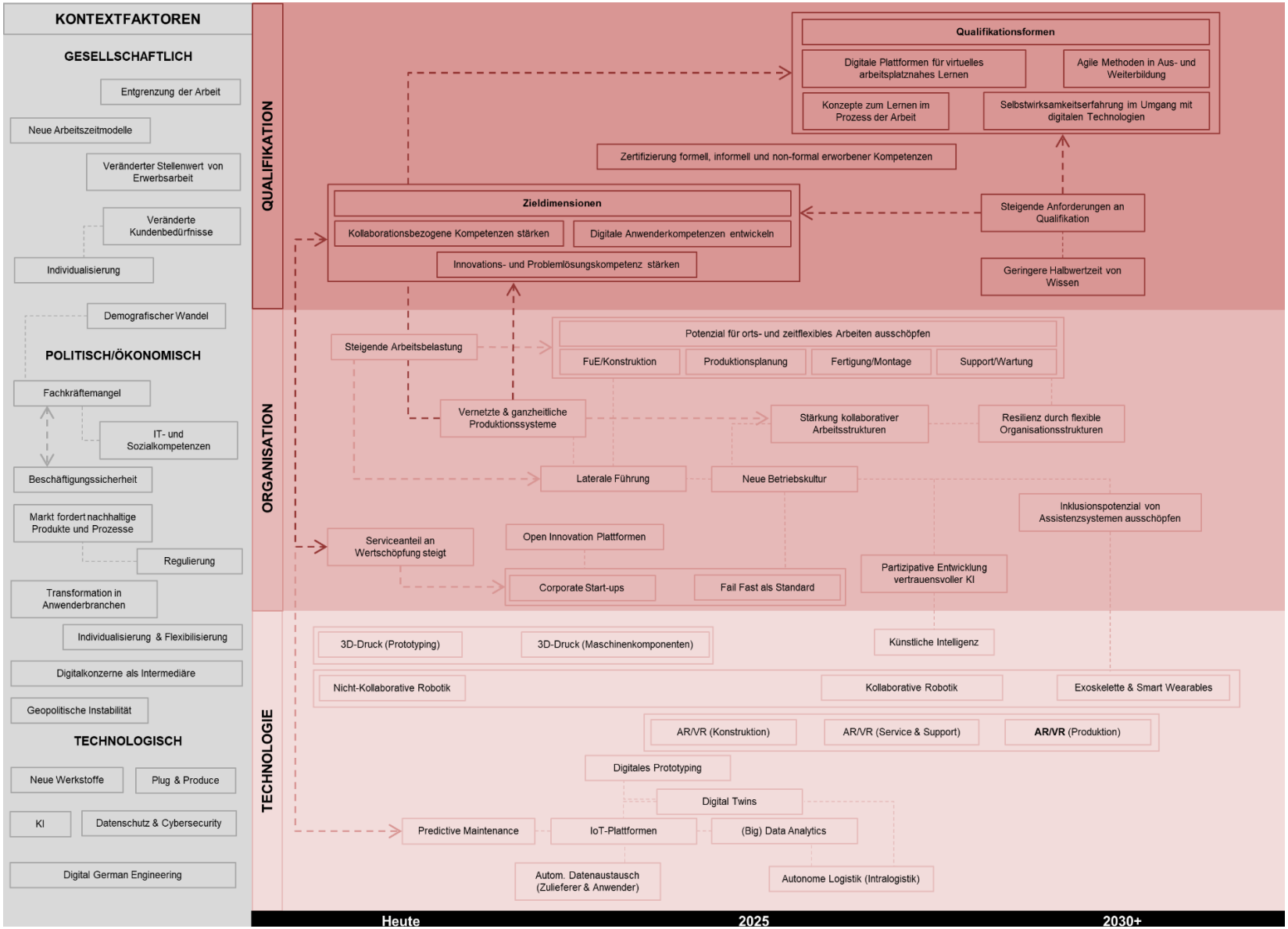
In der zweiten Runde der Delphi-Befragung wurde daher noch einmal vertieft auf die Frage sich ändernder Qualifikations- und Kompetenzbedarfe eingegangen. Diejenigen, die den Maschinenbau noch nicht als vorbereitet ansehen, wurden gefragt, worin sie die größten Anpassungsbedarfe sehen. Die Teilmenge der Fachleute, die die Unternehmen der Branche als vorbereitet betrachtet, wurde befragt, welche Maßnahmen bereits ergriffen wurden, um Unternehmen auf Veränderungen bei Qualifikations- und Kompetenzbedarfen vorzubereiten.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass vor allem die Digitalisierung bei einigen Experten zu Verunsicherungen führt. Während vor allem die Digitalisierung zur Entwicklung neuer Qualifikations- und Kompetenzanforderungen führt, besteht offenbar in Teilen der Branche Unklarheit, ob neue technische Anforderungen für alle Beschäftigten einen Anstieg der Anforderungen mit Blick auf digitale Kompetenzen bedeuten oder ob es zu einer stärkeren Polarisierung kommt. Bei dieser Polarisierung gibt es einerseits eine Gruppe hochqualifizierter Digitalisierungsexperten in den Unternehmen, andererseits eine verhältnismäßig große Gruppe an Beschäftigten, an die keine höheren, möglicherweise sogar geringeren Anforderungen gestellt werden, weil letztere durch neue Technologien entlastet werden. Dort, wo die Expertinnen und Experten Unternehmen bereits jenseits dieser Verunsicherung wähnen, ist es offenbar erfolgreich gelungen, künftige Kompetenzbedarfe zu konkretisieren und die Personalentwicklung zu stärken – sowohl budgetär als auch bezüglich der eigenen Kapazitäten.

In der zweiten Runde der Delphi-Befragung wurde darüber hinaus gezielt nach der Situation kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) gefragt. Tendenziell sind KMU demnach vor allem auf sich wandelnde Technologieanforderungen eingestellt, wenngleich sie gerade bei der strategischen Analyse übergreifender Trends und ihrer Konsequenzen für die eigenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten über enge kapazitive Grenzen verfügen (Commerzbank AG, 2019, S. 33). Bei arbeitsorganisatorischen Veränderungen und vor allem im Bereich von Qualifikations- und Kompetenzbedarfen stellt sich die Situation in KMU offenbar strukturell anders dar als in der Maschinenbaubranche insgesamt. Ein Grund für die Herausforderungen von KMU bei der Anpassung arbeitsorganisatorischer Strukturen könnte dabei der Mangel an Digitalisierungsstrategien der Unternehmen sein (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 18). Im Bereich der Personalentwicklung kommt hinzu, dass sowohl budgetäre als auch kapazitive Engpässe speziell bei der Personalentwicklung bestehen: „So sind die Personalbereiche in kleineren und mittleren Maschinenbaubetrieben häufig wenig ausdifferenziert und damit entsprechend wenig professionalisiert. Daher verfügen sie schon allein in fachlicher Hinsicht sowie aufgrund begrenzter Ressourcen über geringe Einflussmöglichkeiten, um den arbeits- und organisationsbezogenen Fragen der Digitalisierung ausreichend Gewicht zu verleihen“ (Kuhlmann & Voskamp, 2019, S. 64).

Wenngleich die Beurteilung der Maschinenbaubranche im Rahmen der Delphi-Befragung nur eine persönliche Situationseinschätzung der Expertinnen und Experten zur aktuellen und perspektivischen Lage der Branche gibt, so wird dennoch deutlich: Die zentralen Aufgaben sind nicht rein technologischer Natur, sondern liegen in der Begegnung von arbeitsorganisatorischen mit qualifikatorischen Herausforderungen. Das Zusammenspiel der drei Dimensionen Technologie, Organisation und Qualifikation und ihre wechselseitigen Implikationen für Beschäftigte und Unternehmen werden im Folgenden näher beleuchtet. Die wesentlichen Aspekte einer digitalen Arbeitswelt werden im Zusammenhang erfasst und in einer zukunftsgerichteten Perspektive betrachtet (Wischmann & Hartmann, 2018). Dazu werden mögliche Szenarien für zukünftige Gestaltungspfade und wechselseitige Abhängigkeiten in einer synthetisierten Roadmap visualisiert (Abbildung 16).

Abbildung 16: Synthetisierte Roadmap



Quelle: Eigene Darstellung

TECHNOLOGIE: Wesentliche Technologiepfade werden bereits beschritten

Der Maschinenbau nimmt innerhalb der produzierenden Gewerbe eine Sonderrolle als Schlüsselanbieter und Anwender von Digitalisierungslösungen für die Industrieproduktion ein. Beschäftigte setzen daher bereits heute digitale Arbeitsmittel häufiger ein, auch im Vergleich zu anderen Industriebranchen und dem Dienstleistungssektor. Wesentliche Technologietrends werden im Maschinenbau früh erprobt und adaptiert, wobei diese Aussage oft nur mit Einschränkungen für kleinere Unternehmen gilt. Dabei zeichnen sich für die kommenden zehn Jahre erkennbare Adaptionspfade ab, die – etwa bei additiven Fertigungsverfahren – eine schrittweise Durchdringung von Unternehmensbereichen und der Gesamtbranchen erwarten lassen.

Beschäftigte des Maschinenbaus werden in den kommenden zehn Jahren daher ihre Tätigkeiten in einem komplexer werdenden, zunehmend technisierten und digitalisierten Arbeitsumfeld verrichten. Dabei drängt die Interaktion mit Technologien in den Mittelpunkt, die Beschäftigte physisch wie kognitiv unterstützen. Im Hinblick auf physische Assistenz im Arbeitsprozess stehen zunächst kollaborative Robotiksysteme im Fokus der Entwicklung, die zu einer höheren Produktivität und Leistungsfähigkeit (Effizienz und Effektivität) des Mensch-Technik-Systems beitragen. Perspektivisch ergeben sich aus dieser Entwicklung neue Möglichkeiten, Beschäftigte mit körperlichen Beeinträchtigungen im Arbeitsprozess unmittelbar zu unterstützen, indem Exoskelette und Smart Wearables durch sensorische und aktorische Funktionen Leistungsminderungen ausgleichen und damit zusätzliches Inklusionspotenzial schaffen.

Während teilweise die Grenzen technischer Optimierung bei Maschinen und Anlagen erreicht werden, ergeben sich durch digitale Repräsentanz physischer Produktions- und Logistikprozesse sowie die Vernetzung auf Basis von Echtzeitdaten neue Wertschöpfungspotenziale. Der zunehmende Softwareanteil an Produktionssystemen verändert das Arbeitsumfeld und die Anforderungen an Beschäftigte in sämtlichen Funktionsbereichen der Branche. Dabei spielt perspektivisch insbesondere der Einsatz von KI eine wichtige Rolle. Hier besteht für den deutschen Maschinenbau dank der hohen Glaubwürdigkeit nationaler/europäischer Schutzrechte erhebliches Wettbewerbspotenzial, speziell im Spannungsfeld plattformkapitalistischer Konkurrenz aus den USA und staatskapitalistischer Konkurrenz aus China. Dieses Potenzial werden Unternehmen des Maschinenbaus durch die Adaption von Qualitätsstandards für den Einsatz vertrauenswürdiger und nachvollziehbarer „KI made in Germany“ umsetzen und skalieren.

ORGANISATION: Ganzheitliche Produktionssysteme erfordern flexible Strukturen und neue Betriebskultur

Beeinflusst durch neue technische Möglichkeiten, sich wandelnde Kundenanforderungen und einen zunehmenden Wettbewerb um Fachkräfte, ergeben sich für Unternehmen des Maschinenbaus verstärkt betriebs- und arbeitsorganisatorische Anpassungsbedarfe. Künftig werden sich auch kleinere Unternehmen stärker in Richtung integrierter, ganzheitlicher Produktionssysteme entwickeln. Die daraus resultierende Standardisierung von Prozessen, flankiert durch eine Modularisierung von Produkten, führt zu neuen Anforderungen an Führungskräfte wie Beschäftigte. Angesichts zunehmend agiler und projektbezogener kollaborativer Arbeitsstrukturen ist mit einer Zunahme der psychischen Arbeitsbelastung zu rechnen. Dabei weisen die verschiedenen Funktionsbereiche in Maschinenbauunternehmen neben der Digitalisierung unterschiedliche Stressfaktoren auf: Während in der Produktion vielfach Geräuschemissionen eine Belastung darstellen, ist es im Bereich der Montage, Inbetriebnahme und Wartung die Abweichung von Normalarbeitszeiten. In allen Unternehmensbereichen spielt bei der Bewältigung psychischer Belastung die Schaffung einer neuen Führungs- und Betriebskultur eine wesentliche Rolle.

Offen bleibt, ob es dem Gros der Unternehmen gelingen wird, ihre Beschäftigten – aufbauend auf den Erfahrungen in der Mitarbeiterbeteiligung bei der Technologiegestaltung – noch stärker zu Mitgestaltenden zu machen, um den Auswirkungen eines drohenden Komplexitätsverlustes in Folge zunehmender Standardisierung entgegenzuwirken. Jene Unternehmen, denen es gelingt, Beschäftigte z. B. bei der Gestaltung vertrauenswürdiger und nachvollziehbarer KI zu beteiligen, schaffen damit neue Entfaltungsmöglichkeiten und neue Motive sinnstiftender wie qualitätsvoller Arbeit. Hier ist die Branche bislang, im Vergleich zum produzierenden Gewerbe, insgesamt schwach aufgestellt.

Ein weiteres Anwendungsfeld für partizipative Führung liegt absehbar in der Entwicklung von Modellen flexibler Arbeitszeit- und Arbeitsortsgestaltung. Gerade im Bereich der Produktion liegen hier, neben prozess- und technologiebedingten, gleichsam absoluten Grenzen, auch betriebskulturelle Barrieren. Besonders im Wettbewerb um Fachkräfte werden Unternehmen ihre Anstrengungen verstärken, um innovative Organisationsformen zu entwickeln, die auch bei der Fertigung bislang nicht ausgeschöpfte Flexibilisierungspotenziale heben. Derartige Ansätze werden perspektivisch zunächst in anderen, leichter zu flexibilisierenden Funktionsbereichen der Betriebe erprobt werden, um sie dann soweit wie möglich auf die Fertigung zu übertragen. Die Corona-Krise führt dabei sinnbildlich vor Augen, dass flexible Strukturen bei der Arbeitszeit- und Arbeitsortgestaltung einen erheblichen Beitrag zur Resilienz von Unternehmen leisten, weil sie die (teilweise) Aufrechterhaltung des Betriebs überhaupt erst möglich machen.

Bei der Entwicklung neuer Perspektiven industrieller Wertschöpfung schafft ein steigender Serviceanteil an der Wertschöpfung des Maschinenbaus betriebs- und arbeitsorganisatorische Anpassungsbedarfe. Im Fokus der Transformation steht die Frage, wie es Unternehmen, die seit Jahrzehnten auf den Verkauf von Maschinen mit hohem technologischen Reifegrad ausgerichtet sind, gelingen kann, ihre Strukturen agiler und in Richtung neuer Pay-per-Use-Abrechnungsmodelle zu entwickeln. Dazu werden Corporate Start-ups als Organisationsform und Experimentierräume einen wichtigen Beitrag leisten, um sukzessive ein verändertes Selbstverständnis auch hinsichtlich der Entwicklungsziele von FuE- und Konstruktionsabteilungen zu schaffen. Dabei geht die Etablierung agiler Entwicklungsstrategien, die entsprechend des Fail-Fast-Prinzips zur Beschleunigung von Entwicklungszyklen und zu frühzeitiger Markteinführung beitragen, mit einer insgesamt kollaborativeren Betriebskultur einher. KMU, die selbst nicht über die Ressourcen oder das Kompetenzspektrum für den Aufbau von Corporate Start-ups verfügen, schaffen durch unternehmens- und sektorübergreifende Kooperationen mit Maschinenanwendern und IT-Dienstleistenden entsprechende Experimentierräume für neue Geschäftsmodelle.

QUALIFIKATION: Zieldimensionen und Qualifikationsformen im Wandel

Der Umgang mit einem komplexer werdenden Technologieumfeld sowie die Arbeit in agilen und kollaborativen Organisationsstrukturen schaffen veränderte Qualifikationsanforderungen an Beschäftigte im Maschinenbau. Die Geschwindigkeit von Technologieentwicklung und -adaption erfordert von Mitarbeitenden ein kontinuierliches Lernen im Prozess der Arbeit. Die Entwicklung ganzheitlicher und vernetzter Produktionssysteme und der steigende Serviceanteil der Wertschöpfung verändern dabei sowohl die Zieldimensionen als auch die Formen von Aus- und Weiterbildung in grundständigen wie akademischen Berufen. Beschäftigte sind vor allem als Anwendende digitaler Arbeitsmittel gefragt, wobei sie verstärkt sowohl im Team als auch mit Maschinenanwendern kollaborieren. Dabei müssen sie in der Lage sein, komplexe Probleme im Kontext des gesamten Produktionssystems zu analysieren, Lösungen zu entwickeln und Innovationen sowohl in Form neuer Produkte und Leistungen als auch in ihrem eigenen Arbeitsprozess mitzugestalten.

Damit Mitarbeitende neuen Anforderungen gerecht werden können, bedarf es eines neuen Verständnisses in der Aus- und Weiterbildung, das die Grenzen von Arbeits- und Lernsystemen überwindet und Lernen im Prozess der Arbeit als Standard etabliert. Konkret ist mit einer Stärkung informeller und nonformaler Lernformen in der Aus- und Weiterbildung zu rechnen.

Dabei wird es zu einer verstärkten Nutzung von Simulationsansätzen, AR- und VR-Anwendungen zur Schaffung arbeitsplatznaher Lernarrangements kommen, z. B. in Form virtueller Lernfabriken. Im Sinne eines integrierten Arbeits- und Lernsystems führt zunehmend agiles Arbeiten dazu, dass agile Methoden zum Gegenstand und zum Prinzip beruflicher Aus- und Weiterbildung werden.

Da das Gros der Beschäftigten für den Umgang mit digitalen Technologien vor allem Anwenderkenntnisse benötigt, speziell beim Umgang mit Kommunikationsmedien und Medien zur Informationsrecherche, wird es notwendig, in der beruflichen Aus- und Weiterbildung auch auf privaten Erfahrungen in der Technologieadaption aufzubauen. So ergeben sich in Bezug auf IKT-Anwendungen erhebliche Schnittmengen hinsichtlich des Mehrwerts und der Bedienprinzipien privat und beruflich genutzter IKT-Lösungen, worauf mit Blick auf die digitale Selbstwirksamkeitserfahrung von Beschäftigten verstärkt aufgebaut wird.

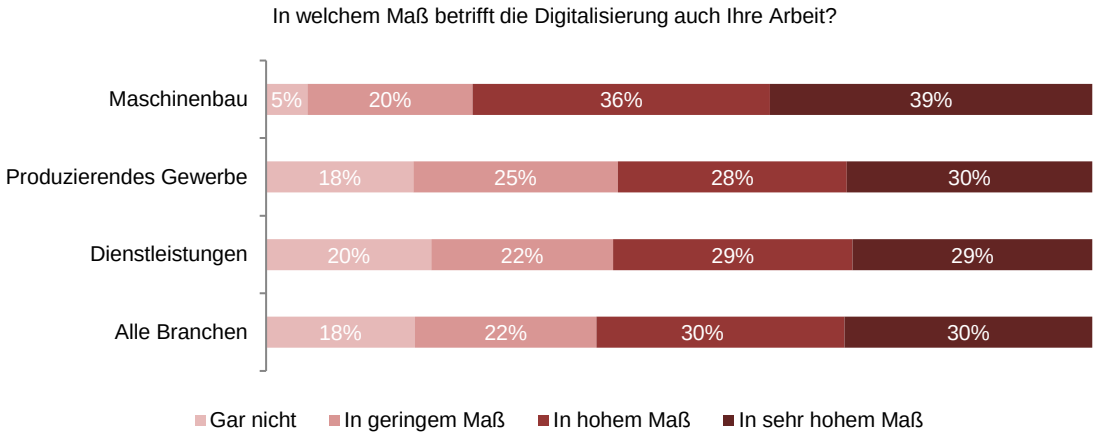
Gerade als Folge einer verstärkten Etablierung informeller und non-formaler Lernformen und ganzheitlicher Lernziele wird es notwendig, die individuell erworbenen Kompetenzen nachvollziehbar zu machen und durch Zertifizierung zu dokumentieren. Dabei wird es darum gehen, eine solche Zertifizierung an einheitlichen Standards auszurichten und eine entsprechende Anschlussfähigkeit an das berufliche wie akademische Ausbildungssystem sicherzustellen.

4.2 Technologie

4.2.1 Branchenspezifische Digitalisierungstrends

Die Digitalisierung stellt den Maschinenbau gleich in mehrfacher Hinsicht vor erhebliche Herausforderungen: „Die Branche wird in ihrer Doppelfunktion als Leitanbieter und als Anwender besonders stark mit den neuen Technologien konfrontiert“ (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 15). Die Ergebnisse des DGB-Index Gute Arbeit 2016 mit dem Schwerpunkt „Digitalisierung der Arbeitswelt“ (Institut DGB-Index Gute Arbeit, 2016) zeigen, dass sich diese strukturelle Charakteristik der Branche unmittelbar auf die Arbeit von Beschäftigten auswirkt. So geben 75 % der Befragten an, die Digitalisierung betreffe ihre Arbeit in hohem oder sehr hohem Maße. Damit liegt der Wert 17 Prozentpunkte höher als im Durchschnitt des produzierenden Gewerbes (Abbildung 17).

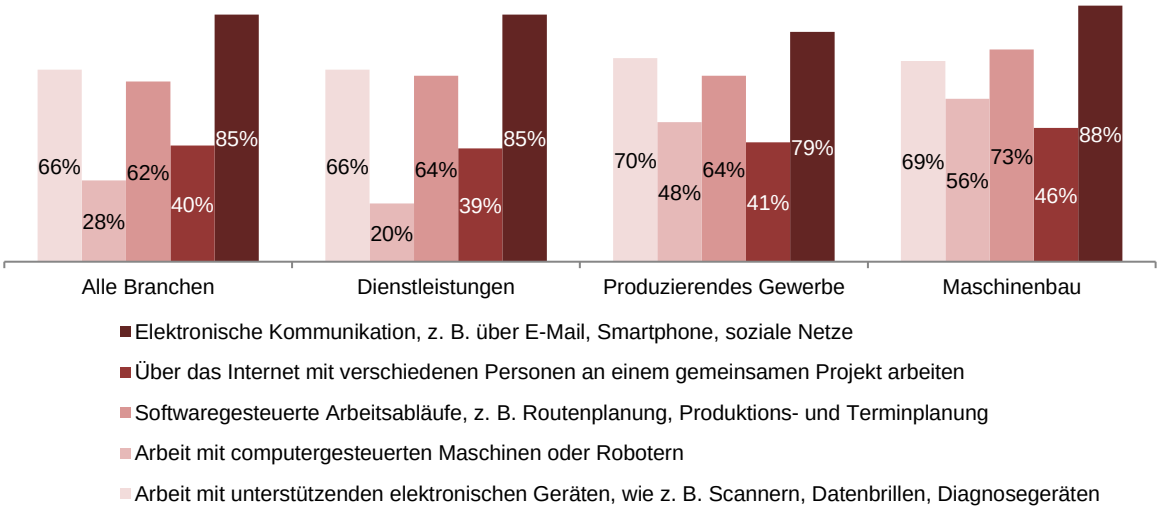
Abbildung 17 : Betroffenheit durch Digitalisierung, 2016



Quelle: Eigene Berechnung. DGB-Index Gute Arbeit 2016.

Bei genauerer Betrachtung von Verbreitung und Form der Arbeit mit digitalen Mitteln offenbart der DGB-Index, dass in beinahe sämtlichen Anwendungsformen der Einfluss von Technologie auf die Arbeit von Beschäftigten im Maschinenbau stärker ausgeprägt ist als im Durchschnitt der produzierenden Gewerbe (Abbildung 18). So sind elektronische Kommunikationsmittel im Maschinenbau mit 88 % deutlich stärker verbreitet als im Schnitt der produzierenden Gewerbe (79 %) und sogar stärker als im Dienstleistungssektor (85 %). Kollaborative Arbeit an gemeinsamen Projekten, z. B. über Internetplattformen oder über Clouddienste, ist mit 46 % ebenfalls stärker verbreitet als im Durchschnitt der produzierenden Gewerbe (41 %). Deutlich ist auch der Vorsprung des Maschinenbaus – 73 % gegenüber 64 % im Durchschnitt der produzierenden Gewerbe – bei der Arbeit mit softwaregestützten Abläufen, z. B. mittels digitaler Prozess- und Terminplanung. Mit 56 % ist ebenfalls die Verbreitung der Arbeit mit computergesteuerten Maschinen und Robotern stärker ausgeprägt als im produzierenden Gewerbe mit durchschnittlich 48 %. Lediglich bei der Arbeit mit digitalen Assistenzsystemen, etwa Scanner oder Datenbrillen, liegt der Maschinenbau mit 69 % knapp hinter dem Durchschnitt der produzierenden Gewerbe (70 %).

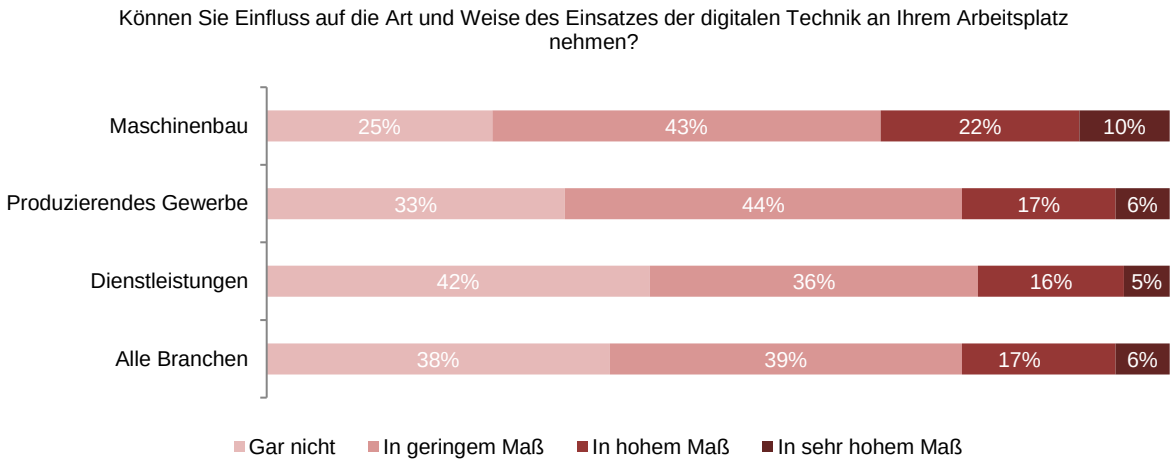
Abbildung 18 : Verbreitung und Formen der Arbeit mit digitalen Mitteln, 2016



Quelle: Eigene Berechnung. DGB-Index Gute Arbeit 2016.

Trotz der hohen Verbreitung digitaler Arbeitsmittel sind offenbar die Möglichkeiten der Beschäftigten begrenzt, auf die Art und Weise des Einsatzes digitaler Technik am Arbeitsplatz Einfluss zu nehmen (Abbildung 19). Zwar wird im DGB-Index Gute Arbeit ihr Einfluss von immerhin 32 % der Befragten als hoch oder sehr hoch bewertet, was eine erkennbar höhere Partizipation bei der Technikgestaltung als im Durchschnitt der produzierenden Gewerbe (23 %) ist. Dennoch sehen mehr als zwei Drittel (68 %) der Befragten geringe oder gar keine Möglichkeiten, den Einsatz digitaler Technik am Arbeitsplatz mitzugestalten.

Abbildung 19: Gestaltung der Arbeit mit digitalen Mitteln aus Sicht der Beschäftigten, 2016



Quelle: Eigene Berechnung. DGB-Index Gute Arbeit 2016.

4.2.2 Anwendung digitaler Technologien

Um die technologieinduzierten Veränderungen von Arbeitsorganisation und Qualifikationsstrukturen im Maschinenbau abschätzen zu können, gilt es zu ermitteln, welche Technologien bereits heute die Arbeit in der Branche bestimmen und welche Trends sich für die technische Entwicklung in der Branche bis zum Jahr 2030 ergeben werden. Dazu wurden die Expertinnen und Experten der Delphi-Befragung um eine Einschätzung gebeten, welche Technologien sich bei der Veränderung von Arbeitsprozessen flächendeckend verbreiten werden und in welchem Zeitraum mit der Diffusion dieser Technologien zu rechnen ist. Hierfür wurden mittels Desk Research auf Basis einer breiten Quellenbasis[9] relevante Technologietrends für die Branche identifiziert. Betrachtet wurden solche Trends, die einen starken Einfluss auf die Prozessentwicklung, die Entwicklung von Maschinenkonzepten und die Veränderung von Wertschöpfungsstrukturen[10] haben. Hierzu zählen etwa die steigende Relevanz von Service- und Dienstleistungsaufträgen auch rund um digitale Geschäftsmodelle; Internet der Dinge (IoT)/Smart Data und Smart Factory; Fernwartung und der Einsatz virtueller Prozesse; die steigende Nachfrage nach kundenindividuellen, modularen Baukastenkonzepten für eine Flexibilisierung der Produktion mithilfe von „Plug & Produce"-Konzepten[11]; die Integration von Ressourceneffizienz, Energie- und Umwelttechnik im Kontext von Greentech; die Verschmelzung des klassischen Maschinenbaus mit Informationstechnologien, etwa durch verstärkten Einsatz von Sensorik und digitaler Datenverarbeitung sowie neue Fertigungsverfahren und Robotikintegrationen. Dabei wurden die Technologien nach Anwendung in die Funktionsbereiche „FuE und Konstruktion", „Produktion und Montage", „Service und Support" sowie „Übergreifende Technologietrends" differenziert abgefragt (Abbildung 20, Abbildung 21, Abbildung 22, Abbildung 23).

4.2.2.1 Technologietrends im Bereich „FuE und Konstruktion"

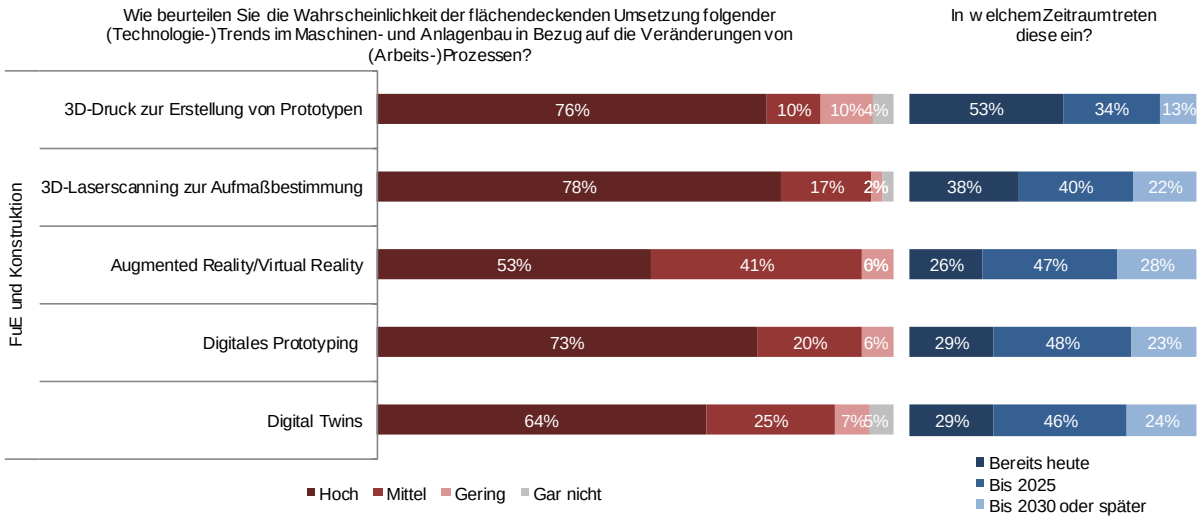
Im Funktionsbereich „FuE und Konstruktion" erwarten die Experten der Delphi-Befragung für die kommenden zehn Jahre eine hohe Dynamik bei der flächendeckenden Einführung neuer Technologien. Einige der abgefragten Technologien sind bereits heute in Teilen der Branche verbreitet. Dies gilt insbesondere für den 3D-Druck zur Erstellung von Prototypen (Abbildung 20). 76 % der Befragten gehen mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer flächendeckenden Einführung des 3D-Drucks zur Erstellung von Prototypen aus, wobei 53 % angeben, dass diese Technologie bereits heute flächendeckend verbreitet sei; weitere 34 % gehen von einer Marktdurchdringung bis 2025 aus. Damit bestätigt sich der Befund von Dispan und Schwarz-Kocher, wonach 3D-Druck „bisher vor allem in Entwicklungsbereichen für Tests erprobt und auch beim Prototypen- und Musterbau eingesetzt" wird (2018, S. 35). Die Vorzüge additiver Verfahren in der Entwicklung liegen dabei vor allem in der ausgeprägten Freiheit und Flexibilität beim Design der Bauteilgeometrie. So lassen sich ohne den Einsatz von Werkzeugen beliebige Bauteilformen und Strukturen realisieren (Commerzbank AG, 2019, S. 8; Working Group Additive Manufacturing, 2018, S. 18–20).

[9] Auswahl der für die Ermittlung relevanter Technologietrends herangezogenen Quellen:
Allespach und Ziegler (2012); Apt, Bovenschulte, Hartmann und Wischmann (2016); Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. [BITKOM] und Fraunhofer IAO (2014); Commerzbank AG (2014), (2019); Dispan (2012), (2017); Dispan und Schwarz-Kocher (2018); Glatz (2018); Kuhlmann und Voskamp (2019); Matthias Opfinger (2018); Rörig und Döble (2018); Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau [VDMA] (2017), (2019).

[10] Aktuelle Entwicklungen deuten auf eine Verlagerung zu hybriden Geschäftsmodellen hin, hierunter fallen auch Finanzierungsmodelle wie Pay-per-Use-Konzepte als Alternative zur Beschaffung von Anlagen. Diese haben – unabhängig vom technologischen Einsatz, auf den in der Delphi-Befragung fokussiert wurde – weitreichenden Einfluss auf die Entwicklung der Branche.

[11] „Plug & Produce"-Konzepte ermöglichen eine kundenindividualisierte Massenfertigung von Produktionssystemen. Darunter versteht man ein adaptives Produktionssystem mit standardisierten Teilsystemen und Softwarearchitektur, das sich schnell an neue Bedarfe anpassen lässt, indem das System eine schnelle Kombination unterschiedlicher Komponenten ermöglicht.

Abbildung 20: Zukünftiger Einsatz von Technologien „FuE und Konstruktion“



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Dabei werden die neuen Vorteile des 3D-Drucks für die Entwicklung dann wirksam, wenn das additive Herstellungsverfahren mittels entsprechender Simulationen abgesichert wird: „Nur so können Entwickler beim Auslegen von Wandstärken, bei der Verstärkung stark belasteter Strukturen oder bei der Integration von Funktionen und deren Auslegung in Grenzbereiche vorstoßen“ (Working Group Additive Manufacturing, 2018, S. 20). Dabei geht es darum, anhand einer digitalen Repräsentanz eines materiellen Bauteils oder eines Prozesses (Digital Twin) einen digitalen Prototypen zu Simulationszwecken zu modellieren (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 37).

Während der 3D-Druck bereits heute relativ häufig im Arbeitsprozess von Beschäftigten im Maschinenbau zum Einsatz kommt, gehen 73 % der Delphi-Befragten davon aus, dass die softwaregestützte Entwicklung mittels 3D-CAD-Modellen (Digital Prototyping) mit hoher Wahrscheinlichkeit flächendeckend eingeführt wird. Dabei dürfte dieser Technologietrend die Maschinenbaubranche bis 2025 durchdrungen haben. So gaben 38 % der Befragten an, dass Digital Prototyping bereits heute verbreitet sei; 34 % gehen von einer Verbreitung bis 2025 aus. Ähnlich fallen die Aussagen zur Verbreitung des Digital Twins aus: 64 % halten die Wahrscheinlichkeit einer Einführung für hoch, 25 % für mittel. Sowohl für das Digital Prototyping als auch für den Digital Twin erwarten zwei Drittel der Befragten, dass diese Technologietrends entweder bereits jetzt verbreitet sind oder dies in der Branche bis 2025 sein werden. Damit dürfte der bereits eingeleitete Transformationsprozess der Prototypenentwicklung im Maschinenbau bis zur Mitte der 2020er Jahre weite Teile der Branche erfasst haben und so zu entsprechenden Veränderungen der Arbeit von Beschäftigten in den Bereichen FuE und Konstruktion beitragen. Dabei führen die vorgenannten technologischen Veränderungen in ihrer Kombination nicht nur zu einer größeren Gestaltungsfreiheit bei der Entwicklung von Prototypen, sondern auch zur erheblichen Beschleunigung von Entwicklungszyklen (Working Group Additive Manufacturing, 2018, S. 24).

Weniger eindeutig fallen die Ergebnisse der Delphi-Befragung hinsichtlich der Verbreitung von Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) im Bereich von FuE und Konstruktion aus. AR- und VR-Technologie wird erhebliches Potenzial beigemessen für die Visualisierung digitaler Prototypen, die erweiterte Möglichkeiten auch der Kollaboration in der Entwicklungsarbeit schaffen (Cohen et al., 2018, S. 5). Eine flächendeckende Durchdringung halten 53 % der Befragten für sehr wahrscheinlich, 41 % schätzen die Wahrscheinlichkeit der Verbreitung immerhin als mittelhoch ein. Unklar bleibt im Ergebnis der Expertenbefragung, wann mit der Marktdurchdringung von AR- und VR-Technologie im Bereich FuE und Konstruktion zu rechnen ist.

Höchste Wahrscheinlichkeit für eine flächendeckende Umsetzung messen die Befragten für den Funktionsbereich „FuE und Konstruktion“ dem 3D-Laserscanning zur Aufmaßbestimmung bei: 78 % gehen von einer hohen Wahrscheinlichkeit, 17 % immerhin von einer mittleren Wahrscheinlichkeit aus. Mittels 3D-Laserscanning lassen sich komplexe Umgebungen z. B. in einer Werkshalle effizient und präzise erfassen. Die daraus resultierenden Daten über bauliche Strukturen etwa einer Fabrikhalle sowie über Anordnung und Ausmaß bestehender Maschinen und Anlagen ermöglichen eine digitale Fabrikplanung, die Entwicklung von 3D-Modellen und CAD-Plänen und bilden damit die Planungsgrundlage für die Konstruktion kundenindividueller Maschinen (Laserscanning Europe GmbH, 2020; rechenbach architecture, 2020). Die flächendeckende Einführung dürfte im Maschinenbau bis Mitte der 2020er Jahre erfolgen. Während 38 % der Expertinnen und Experten der Delphi-Befragung angeben, 3D-Laserscanning sei bereits heute verbreitet, rechnen 40 % bis 2025 damit. Nur 22 % der Befragten erwarten eine branchenweite Durchdringung erst bis 2030 oder danach.

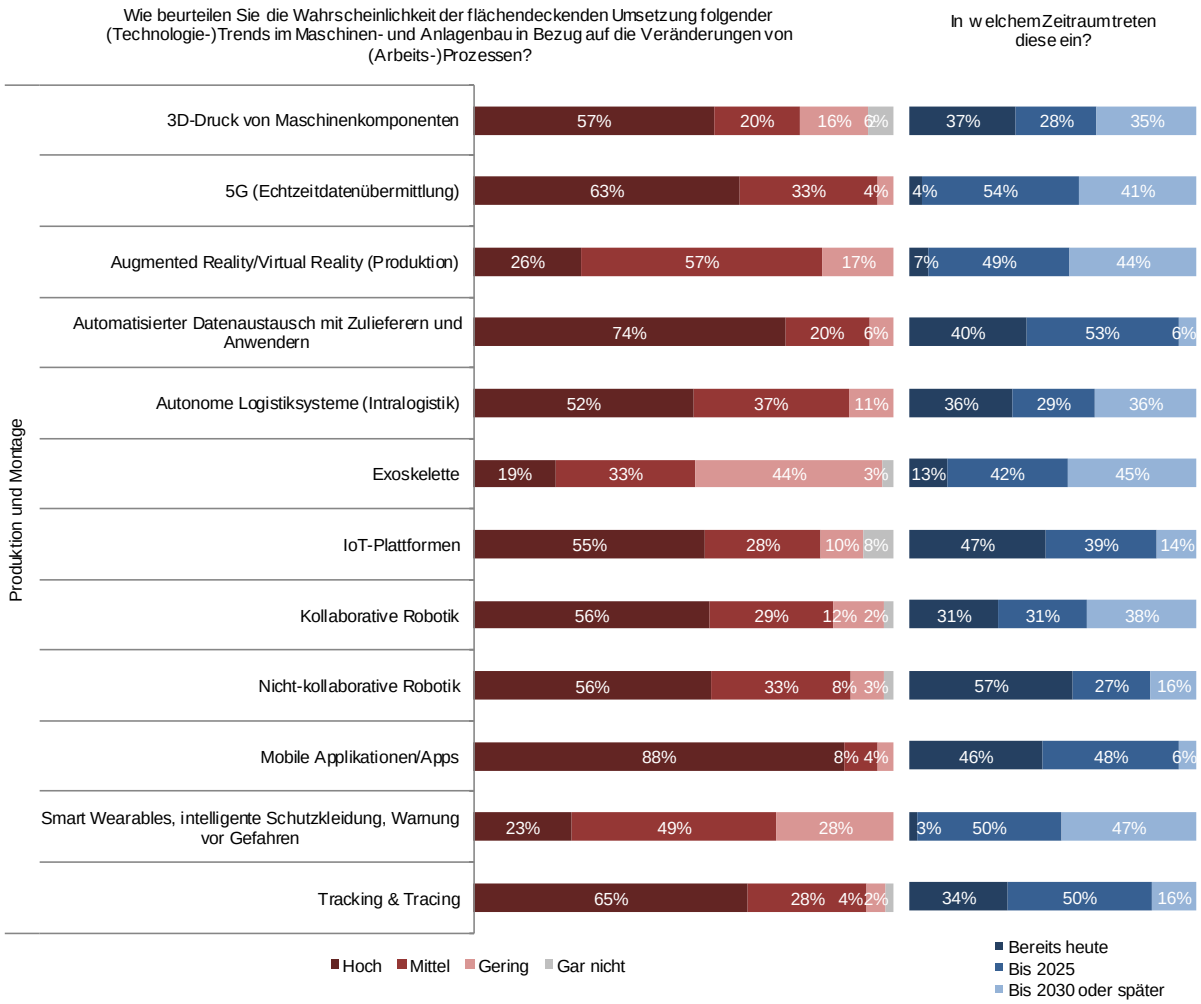
4.2.2.2 Technologietrends im Bereich „Produktion und Montage“

Im Funktionsbereich „Produktion und Montage“ erwarten die Teilnehmenden der Delphi-Befragung ebenfalls eine hohe Dynamik bei der flächendeckenden Einführung neuer Technologien. Gleichwohl fallen die Befunde für die in der Befragung thematisierten Trends höchst differenziert aus. So erwarten die Expertinnen und Experten vor allem bei der Vernetzung und der digitalen Produktion eine schnelle Verbreitung zentraler Technologien, die teilweise bereits weit vorangeschritten ist (Abbildung 21): 74 % der Befragten halten die Wahrscheinlichkeit der flächendeckenden Einführung eines automatisierten Datenaustauschs mit Zuliefernden und Anwendern für hoch. 40 % geben an, automatisierter Datenaustausch sei bereits heute verbreitet, weitere 53 % rechnen mit einer branchenweiten Durchdringung bis 2025. Dabei wird offenbar der Echtzeitübertragung (5G-Technologie) ebenfalls eine hohe Wahrscheinlichkeit der Durchdringung beigemessen: 63 % der Befragten halten die Verbreitung der Echtzeitübertragung für sehr wahrscheinlich, 33 % immerhin noch für mittelwahrscheinlich; mit einer flächendeckenden Einführung wird jedoch erst ab Mitte der 2020er Jahre gerechnet. Ebenfalls dürften sich nach Einschätzung der Befragten „Tracking & Tracing“-Systeme flächendeckend verbreiten und zur Arbeitsrealität in Unternehmen des Maschinenbaus werden. Mit Tracking & Tracing werden IT-gestützte Systeme bezeichnet, die zur Ermittlung des Bearbeitungs- bzw. Lieferzustandes eines Objektes innerhalb einer physischen Lieferkette von Produktions- und Logistikprozessen verwendet werden. Tracking meint dabei Bestimmung des aktuellen Aufenthaltsortes, Tracing die Rückverfolgung von Komponenten und Waren im Produktionsprozess. Die flächendeckende Einführung von Tracking & Tracing halten 65 % der Befragten für höchst wahrscheinlich, 28 % gehen von einer mittleren Wahrscheinlichkeit aus. Dabei rechnen die Expertinnen und Experten ganz überwiegend damit, dass derartige Systeme spätestens bis 2025 branchenweit verbreitet sein dürften (84%); lediglich 16 % der Befragten gehen davon aus, dass dies erst 2030 oder später der Fall sein wird.

Auf Basis automatisierten Datenaustauschs und Track & Trace lassen sich physische und digitale Infrastrukturen mittels sogenannter IoT-Plattformen integrieren: „Allgemein wird unter einer IoT-Plattform eine Plattform verstanden, die unterschiedliche Geräte und Applikationen auf Grundlage einer gemeinsamen Systemarchitektur[12] miteinander verknüpft. Ziel ist es, dass verschiedenartige Gerätetypen und Anwendungen sich über ihre jeweils eigenen Kommunikationswege hinweg austauschen können und sich in der Form verstehen, dass sie aufeinander automatisiert reagieren. Im Idealfall lässt sich über eine IoT-Plattform jede Art von Gerät über jede verfügbare Schnittstelle anbinden. Um dann im nächsten Schritt diverse Arten von Daten zu sammeln und auszuwerten. Tatsächlich sind IoT-Plattformen jedoch noch technische Grenzen gesetzt.“ (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. [BITKOM], 2018, S. 8).

[12] Anmerkung der Autoren: Im Jahr 2015 wurde beispielsweise die deutsche Referenzarchitektur für Industrie 4.0 (RAMI 4.0) vorgestellt.

Abbildung 21: Zukünftiger Einsatz von Technologien „Produktion und Montage"



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Aus Anwenderperspektive ermöglichen es IoT-Plattformen, die Produktion zu vernetzen. Aus Perspektive des Systemanbieters erlauben sie zudem die Entwicklung neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle (Commerzbank AG, 2019, S. 25). Wer sich als Anbieter von IoT-Plattformen etabliert, kann sich auf diese Weise zum „zentralen Knowhow-Träger zukünftiger digitaler Automatisierungskonzepte" entwickeln (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 28). In der Delphi-Befragung geben 55 % der Teilnehmenden an, die Wahrscheinlichkeit einer flächendeckenden Nutzung von IoT-Plattformen sei hoch, 28 % schätzen sie als mittel ein. Nur 10 % halten die flächendeckende Nutzung für weniger, 8 % für unwahrscheinlich. Dabei sind IoT-Plattformen nach Einschätzung der Befragten (47%) bereits heute weit verbreitet; 39 % der Befragten gehen davon aus, dieser Technologietrend werde bis 2025 branchenweit Verbreitung finden.

Auf dem Weg zu einer vollständigen digitalen Vernetzung und Steuerung der Produktion können auch autonome Intralogistik-Systeme einen wichtigen Beitrag leisten. Diese Systeme verbreiten sich zunehmend im produzierenden Gewerbe, z. B. in Form von fahrerlosen Transportsystemen, und gewährleisten „eine bedarfsgerechte und effiziente Bereitstellung" von Material- und Vorprodukten innerhalb des Produktionsprozesses (Dumitrescu et al., 2018, S. 22). Eine Mehrheit der Delphi-Befragten schätzt die Wahrscheinlichkeit der flächendeckenden Verbreitung autonomer Intralogistiksysteme im Maschinenbau als hoch ein, 37 % als mittel. Offenbar spielen solche Systeme in Teilen der Branche bereits heute eine Rolle. 36 % der Experten geben an, derartige Systeme seien bereits weitgehend verbreitet; 29 % gehen hingegen erst bis 2025 von einer weitreichenden Diffusion aus, weitere 36 % sogar erst bis 2030 oder später.

Neben der Vernetzung von Wertschöpfungsketten innerhalb von Unternehmen und über Unternehmens- wie Branchengrenzen hinaus entwickeln sich auch Fertigungstechnologien weiter. Ein wichtiger Trend dabei ist die additive Fertigung. Bereits 2018 konstatierte die „Arbeitsgruppe Additive Manufacturing“ (AM) des VDMA mit Blick auf eine Befragung des Verbandes, „dass Additive Manufacturing im deutschen Maschinen- und Anlagenbau angekommen ist. Knapp die Hälfte der befragten Mitgliedsfirmen nutzt additiv gefertigte Bauteile. Ein weiteres Drittel orientiert sich. Nur noch ein Fünftel der Unternehmen verzichtet auf AM.“ (Working Group Additive Manufacturing, 2018, S. 12).

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte Delphi-Befragung deutet darauf hin, dass die Verbreitung von 3D-Druck-Technologie vor allem für den Bereich der Prototypen-Herstellung als höchst relevant eingeschätzt wird (Kapitel 4.2.2.1). Während die Fachleute hier von einer flächendeckenden Einführung bis spätestens 2025 ausgehen, sind die Ergebnisse für den Einsatz von 3D-Druck zur Herstellung von Maschinenkomponenten weniger eindeutig. Knapp zwei Drittel der Befragten gehen davon aus, dass sich 3D-Druck in der Produktion bis spätestens 2025 flächendeckend verbreiten wird. Immerhin 35 % rechnen damit erst bis 2030 oder später. Unabhängig von der exakten Verortung einer branchenweiten Diffusion dieser Technologie auf der Zeitachse bestätigen die Ergebnisse, dass 3D-Druck bereits kurz- und mittelfristig stark an Bedeutung für die Produktion im Maschinenbau gewinnen wird.

Zwei weitere, im Rahmen der Delphi-Befragung untersuchte Technologietrends sind kollaborative und nicht-kollaborative Robotiksysteme. Roboter können im Fertigungsprozess zur Entlastung von Beschäftigten beitragen, insbesondere bei körperlich anstrengenden und monotonen Aufgaben mit hohem Standardisierungspotenzial (Commerzbank AG, 2019, S. 32). Kollaborative Roboter („Cobots“) stellen insofern eine Besonderheit dar, als sie nicht unabhängig von Beschäftigten agieren, sondern gemeinsam mit ihnen. So können kollaborative Roboter Beschäftigte bei der Verrichtung ihrer Arbeit z. B. durch das Handling schwerer Werkstücke oder solcher Werkstücke unterstützen, die sich für Menschen aufgrund ihrer Ausmaße nur schwer bewegen lassen: „Chancen der Mensch-Roboter-Kollaboration liegen in ergonomischen Verbesserungen durch Entlastung bei schwierigen Tätigkeiten und bei möglichen Kompensationen für Leistungsgeminderte.“ (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 34). Für beide Technologien rechnen die Expertinnen und Experten der Delphi-Befragung damit, dass diese wahrscheinlich flächendeckend im Maschinenbau Verbreitung finden werden. Sowohl für kollaborative als auch für nicht-kollaborative Robotik gaben 56 % der Befragten eine hohe Wahrscheinlichkeit an; bei nicht-kollaborativen Robotern nehmen 33 %, bei kollaborativen Robotern 29 % eine mittlere Wahrscheinlichkeit an.

Während damit für beide Technologieausprägungen eine ähnliche Wahrscheinlichkeit für ihre branchenweite Anwendung angegeben wurde, deuten die Ergebnisse zum Eintrittszeitpunkt auf eine zeitversetzte Verbreitung hin. So geben 57 % der Befragten an, nicht-kollaborative Robotik sei bereits heute branchenweit verbreitet, 27 % gehen davon aus, diese Verbreitung werde bis 2025 erfolgen; 16 % rechnen mit einer branchenweiten Verbreitung bis 2030 oder später mit der branchenweiten Verbreitung. Für nicht-kollaborative Robotik geben hingegen nur 31 % der Befragten an, dass sie bereits heute branchenweite Anwendung findet. 31 % gehen davon aus, dies werde erst bis 2025 der Fall sein, und sogar 38 % rechnen erst für 2030 oder später damit. Also lässt sich auf Grundlage der Delphi-Befragung keine Aussage über den Diffusionsverlauf kollaborativer Robotik im Maschinenbau treffen. Es überrascht jedoch nicht, dass nicht-kollaborative Robotik offenbar sehr viel früher verbreitet sein dürfte. Ein Grund dafür ist vermutlich die ungleich höhere technische Komplexität kollaborativer Systeme, insbesondere infolge höherer Sicherheitsanforderungen bei der Zusammenarbeit von Beschäftigten mit Robotern (Fraunhofer Austria, TÜV Austria Gruppe, 2016).

Während kollaborative Roboter vor allem im unmittelbaren Zusammenhang der Arbeitsverrichtung mit Menschen interagieren und diese entlasten können, erfahren Beschäftigte in der Produktion und Montage auch durch andere Technologien Unterstützung bei ihrer Arbeit. Eine hohe Relevanz haben offenbar Applikationen auf mobilen Endgeräten.

Während 88 % der Befragten mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer flächendeckenden Einführung für Produktion und Montage ausgehen, geben 46 % an, die branchenweite Verbreitung sei bereits heute gegeben und 48 % rechnen damit, dies werde bis 2025 der Fall sein. Eine ebenfalls über mobile Endgeräte anwendbare Technologie sind AR- und VR-Systeme. Diesen wird eine steigende Bedeutung gerade in der Fertigung und der Montage zugesprochen (Klapper, Gelec, Pokorni, Hämmler & Rothenberger, 2019, S. 4). 65 % der Teilnehmenden der Delphi-Befragung halten eine flächendeckende Verbreitung für höchst wahrscheinlich, 29 % geben eine mittlere Wahrscheinlichkeit an. 82 % rechnen dabei mit einer branchenweiten Diffusion bis spätestens 2025. Damit halten die Experten AR und VR in der Produktion und Montage offenbar für deutlich relevanter und gehen von einer schnelleren Verbreitung als beim Einsatz in FuE und Konstruktion aus (Kapitel 4.2.2.1.).

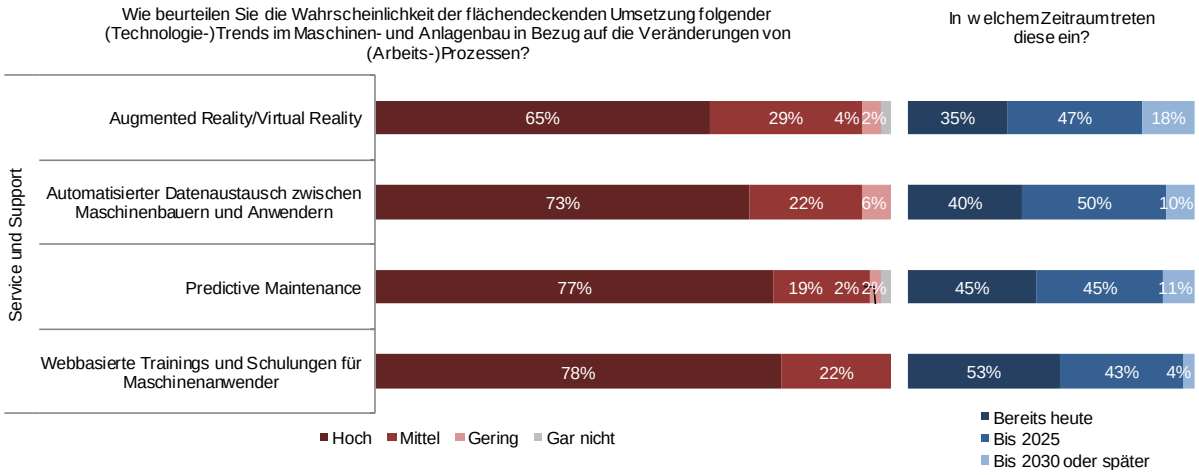
Auffällig ist, dass zwei der abgefragten Technologietrends mit potenzieller Entlastungswirkung für Beschäftigte von den Expertinnen und Experten eine deutlich geringere Wahrscheinlichkeit für flächendeckende Einführung zugewiesen wird. Dabei handelt es sich um Exoskelette sowie Smart Wearables und intelligente Schutzkleidung, z. B. zur Warnung vor Gefahren. Eine branchenweite Verbreitung von Exoskeletten halten 19 % der Befragten für wahrscheinlich, 33 % gehen von einer mittleren Wahrscheinlichkeit aus. Damit bleibt unklar, ob Exoskelette überhaupt große Bedeutung für die Arbeit im Maschinenbau haben werden. Gegenwärtig scheinen sie nur selten zum Einsatz zu kommen. Einer branchenweiten Verbreitung von Smart Wearables messen zwar immerhin 23 % der Befragten eine hohe und 49 % eine mittlere Wahrscheinlichkeit bei. Sie werden jedoch voraussichtlich frühestens zur Mitte der 2020er Jahre eine größere Verbreitung erfahren. Knapp die Hälfte der Befragten geht sogar davon aus, dass Smart Wearables erst bis 2030 oder später branchenweit verbreitet sein werden. Damit bestätigen die Ergebnisse der Delphi-Befragung frühere Befunde, wonach Smart Wearables derzeit im Maschinenbau kaum eine Bedeutung haben (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 13).

4.2.2.3 Technologietrends im Bereich „Service und Support“

Im Funktionsbereich „Service und Support“ wurden im Rahmen der Delphi-Befragung vier Technologietrends hinsichtlich ihrer potenziellen branchenweiten Verbreitung untersucht. Nach Produktion und Montage von Maschinen und Anlagen kann durch neue digitale Technologien ganz erheblicher Mehrwert für Maschinenhersteller und Anwender geschaffen werden, etwa durch die Etablierung neuer Services. Diese hohe Relevanz spiegeln auch die Ergebnisse der Delphi-Befragung (Abbildung 22).

Webbasierte Trainings und Schulungen für Maschinenanwender werden sich nach Einschätzung von 78 % der Befragten mit hoher, nach Auffassung der übrigen 22 % mit mittlerer Wahrscheinlichkeit flächendeckend verbreiten. Die Angaben zum Eintrittszeitraum zeigen deutlich, dass die flächendeckende Verbreitung den Befragten zufolge bereits heute besteht (53 %) oder spätestens bis 2025 eintreten wird (43 %). Dabei dürften sowohl für Trainings als auch für den Remote-Support auch AR- und VR-Anwendungen genutzt werden (Cohen et al., 2018, S. 5). Die konkreten Anwendungen für den Bereich Service und Support sind dabei vielfältig: Über AR- und VR-Lösungen lassen sich Anleitungen und digitale Handbücher nutzungsfreundlich und anwendungsnah abrufen. Mittels AR können über mobile Endgeräte genaue Anleitungen zur Bedienung einer Maschine überlagernd z. B. in das Live-Bild von Bedienelementen eingefügt werden. Bei komplexeren Fragestellungen können Remote-Assistenten des Maschinenherstellers den Maschinenanwender unmittelbar bei der Problemlösung unterstützen. Um Anwenderinnen und Anwendern dabei ein besseres Verständnis der Funktionsweise zu ermöglichen, können einzelne Komponenten einer Maschine und deren hinter physikalischen Barrieren verborgene Funktionen visualisiert werden (Cohen et al., 2018, S. 10). Die Ergebnisse der Delphi-Befragung zeigen, dass dieses erhebliche Potenzial bereits kurzfristig von weiten Teilen der Branche genutzt werden dürfte. Für sehr wahrscheinlich halten es 65 % der Befragten, für wahrscheinlich 29 %, dass sich AR und VR flächendeckend im Bereich Service und Support etablieren werden. Während nur 35 % angeben, sie bestehe bereits heute, gehen 47 % eher von einer Verbreitung dieser Anwendung bis 2025 aus.

Abbildung 22: Zukünftiger Einsatz von Technologien „Service und Support"



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

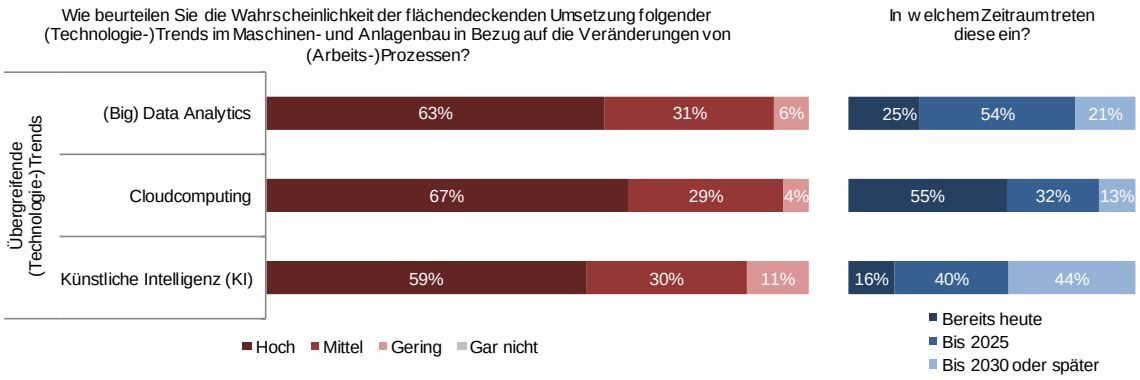
Während AR und VR vor allem dazu dienen, Menschen bei der Interaktion mit Maschinen und Anlagen zu unterstützen, spielt auch im Service und Support der bereits für Produktion und Montage betrachtete Aspekt des automatisierten Datenaustauschs zwischen Maschinenbauern und Anwendern künftig eine wesentliche Rolle. 73 % der Teilnehmenden der Delphi-Befragung gehen mit hoher, 22 % mit mittlerer Wahrscheinlichkeit davon aus, dass ein automatisierter Datenaustausch flächendeckend für Support und Service etabliert werden wird. 40 % geben an, dies sei bereits heute der Fall, 50 % sehen diese Entwicklung bis 2025. Der automatisierte Datenaustausch würde damit auch die Grundlage für die Realisation von Predictive-Maintenance-Services legen. 77 % der befragten Expertinnen und Experten gehen mit hoher, 19 % mit einer mittleren Wahrscheinlichkeit von der branchenweiten Anwendung von Predictive Maintenance aus; 90 % nehmen an, dieser Service werde bereits heute oder bis spätestens 2025 für weite Teile des Maschinenbaus zur Anwendung kommen.

4.2.2.4 Übergreifende Technologietrends

Viele der für die Funktionsbereiche FuE und Konstruktion, Produktion und Montage sowie Service und Support betrachteten Technologien erzeugen bei ihrer Anwendung hohe Datenmengen. Aus der Speicherung und Bereitstellung sowie der weitergehenden Verarbeitung dieser Daten resultieren weitreichende Möglichkeiten zur Erweiterung bisheriger Wertschöpfungsstrukturen im Maschinenbau. Daher wurden die Experten im Rahmen der Delphi-Befragung auch um ihre Einschätzung zur Entwicklung übergreifender Technologietrends gebeten (Abbildung 23). Konkret wurde dabei nach der vermuteten Relevanz und der Zeitachse der Verbreitung von (Big) Data Analytics, Cloudcomputing und Künstlicher Intelligenz (KI) gefragt. Diese Technologietrends gelten seit Jahren im Maschinenbau als vielversprechende Zukunftstrends, mit denen sich Unternehmen verstärkt beschäftigen (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 23).

Die Ergebnisse der Delphi-Befragung bestätigen diesen bisherigen Befund. Für alle drei Technologien geben mindestens 89 % an, dass sie mit hoher oder mittlerer Wahrscheinlichkeit flächendeckend Anwendung im Maschinenbau finden werden.

Abbildung 23: Zukünftiger Technologieeinsatz „Übergreifende Technologietrends"



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

In Bezug auf die Zeitachse zeigt die Befragung hingegen Unterschiede. So geben 55 % der Befragten an, Cloudcomputing sei bereits heute in der Branche flächendeckend verbreitet, weitere 43 % rechnen damit bis spätestens 2025. Offenbar sind Cloudlösungen bereits heute weit verbreitet. Anders stellt sich die Situation bei der Anwendung von (Big) Data Analytics und KI dar. Während die Mehrheit der Befragten (54 %) davon ausgeht, dass (Big) Data Analytics erst zur Mitte der 2020er Jahre flächendeckend in der Branche genutzt werden, deuten die Ergebnisse in Bezug auf KI-Systeme an, dass diese branchenweit eher Ende der 2020er Jahre eine weitreichende Marktdurchdringung erreichen werden: 40 % der Befragten rechnen mit einer Verbreitung bis 2025, 44 % hingegen erst bis 2030 oder später. Eine Erklärung könnte die Herausforderung beim Aufbau entsprechender Kompetenzen zur Entwicklung und Handhabung von Data-Analytics- und KI-Anwendungen sein, vgl. Kapitel 4.4.1.

4.2.3 Gestaltungsoptionen

- **Inklusion durch physische Assistenz und Smart Wearables stärken:** Bereits mittelfristig ist mit einer branchenweiten Verbreitung kollaborativer Robotik-Systeme und kognitiver Assistenzsysteme zu rechnen. Während dadurch Effizienz und Qualität von Prozessen optimiert werden und Beschäftigte insbesondere eine physische Entlastung bei solchen Verrichtungen erfahren, bei denen sie durch Roboter unterstützt werden, zeigen die Ergebnisse der Delphi-Befragung, dass die Entwicklung von Exoskeletten und Smart Wearables erst längerfristig in eine flächendeckende Adaption mündet. Dabei sind insbesondere physische Assistenzsysteme für die Inklusion von besonderer Bedeutung, die nicht an eine bestimmte Tätigkeit gebunden sind, sondern Funktionseinschränkungen z. B. bei älteren Menschen oder solchen mit Behinderungen ausgleichen (Apt, Bovenschulte, Hartmann & Wischmann, 2016, S. 43–44).
  Aufgrund des erheblichen Mehrwerts, den derartige Systeme für die Inklusion von älteren Beschäftigten und Menschen mit Behinderungen im Maschinenbau schaffen, könnten förderpolitische Anreize gesetzt werden. So ließe sich die Entwicklung und Anschaffung von Systemen fördern, die unmittelbar Funktionseinschränkungen bei Menschen in ihrem Arbeitsumfeld ausgleichen und Beschäftigte bei körperlicher Arbeit entlasten – auch unabhängig von einer bestimmten Verrichtung. Analog dazu könnte im Bereich des Arbeitsschutzes die Anschaffung smarter Lösungen für Persönliche Schutzausrüstung (PSA) gezielt gefördert werden, wenn diese einen relevanten Mehrwert für die Beschäftigten bieten, sich jedoch – aufgrund bestehender nicht smarter, aber zulässiger Alternativen – aufgrund ihres höheren Preises am Markt (noch) nicht durchsetzen.

- **Beschäftigte im Maschinenbau und Maschinenkunden zu Mitgestaltenden vertrauensvoller KI machen:** Maschinenbauunternehmen verfügen im Vergleich zu anderen Branchen bereits über ein höheres Maß an Erfahrung bei der Einbindung von Beschäftigten in die Gestaltung des Technologieeinsatzes (Abbildung 19). Gleichzeitig gehört die enge Zusammenarbeit mit Maschinenanwendenden zum täglichen Geschäft der Firmen. Diesen Vorteil können Maschinenbauunternehmen nutzen und die Branche zum Vorreiter bei partizipativer Technikentwicklung machen.
  Deutschland mit seiner auf Parität ausgerichteten sozialen Marktwirtschaft und hohen Datenschutzstandards könnte einen erheblichen Wettbewerbsvorteil erzielen (Heesen, Müller-Quade & Wrobel, 2020, S. 5) und zum Leitanbieter vertrauenswürdiger wie nachvollziehbarer KI in der industriellen Anwendung werden. Die Glaubwürdigkeit von Standards für KI-Systeme nach innen und außen könnte dabei durch eine partizipative Entwicklung und Umsetzung dieser Standards gestärkt werden. Auch im Wettbewerb um qualifizierte Fachkräfte kann der Maschinenbau davon profitieren, Beschäftigte zu Mitgestaltenden von KI-Standards und deren Anwendung zu machen, weil so dem drohenden Verlust von Aufgabenkomplexität und Vielfalt infolge zunehmender Standardisierung (Kapitel 4.3.3) entgegengewirkt würde. Darüber hinaus können Beschäftigten dadurch neue Entwicklungsmöglichkeiten und sinnstiftende Aufgaben geboten werden, wodurch die Branche bestehende Defizite im Bereich guter Arbeit ausgleichen könnte (Kapitel 4.3.1). Um den beschrieben Zielen näher zu kommen, könnte eine Plattform – z. B. im Rahmen des KI-Observatoriums – für partizipative KI-Entwicklung im Maschinenbau geschaffen werden. In deren Rahmen könnten die Sozialpartner gemeinsam mit Forschenden und zivilgesellschaftlichen Akteuren Regeln für vertrauenswürdige und nachvollziehbare KI-Anwendungen entwickeln und konkrete Konzepte erarbeiten, wie Unternehmen diese Regeln in einem Prozess partizipativer Technologienentwicklung in der Praxis gemeinsam mit Beschäftigten und Maschinenanwendenden umsetzen könnten.

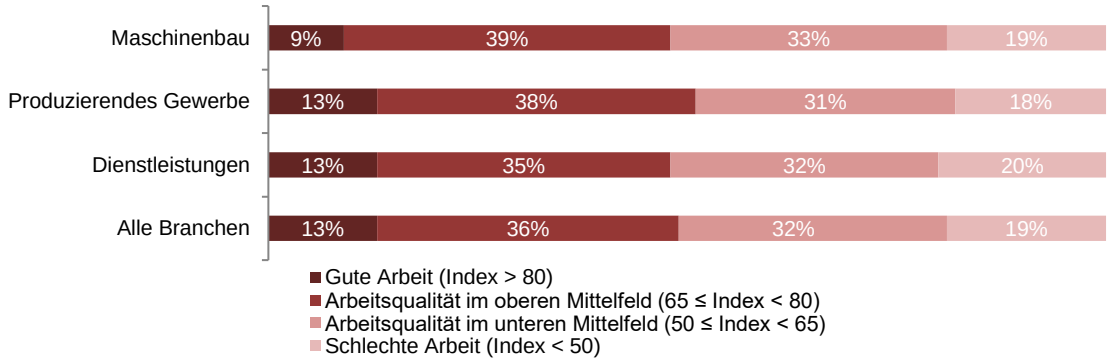
4.3 Organisation

4.3.1 Digitalisierung und Qualität der Arbeit

Die Maschinenbaubranche ist grundsätzlich und seit Jahren von einer schrittweisen Digitalisierung geprägt (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018). Dieser Trend ist ungebrochen und setzt sich unter dem Eindruck einer Industrie 4.0 verstärkt fort; eine Entwicklung, die nicht abstrakt erfolgt, sondern den Arbeitsalltag der Beschäftigten betrifft. So ergab eine Untersuchung im Auftrag des VDMA aus dem Jahr 2016, dass sich 52 % der Beschäftigten in den letzten zwei Jahren vor der Befragung mit neuen Computerprogrammen konfrontiert sahen (Pfeiffer et al., 2016). Die fortschreitenden Digitalisierungsprozesse des Maschinenbaus stehen in einem engen Zusammenhang mit der skizzierten unternehmerischen Arbeitsorganisation und der individuellen Arbeitsqualität. Dabei gehen Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftlicher Erfolg im Regelfall mit guten Arbeitsbedingungen einher. Im DGB-Index Gute Arbeit werden in den Bereichen „Ressourcen“, „Belastung“ und „Einkommen und Sicherheit“ insgesamt elf Kriterien zur Bewertung/Erfüllung von guter Arbeit erfasst (Fuchs, 2006). Mithilfe der Daten des DGB-Index Gute Arbeit und der Sonderbefragung zur Digitalisierung in Kombination mit der im Rahmen dieser Studie durchgeführten Delphi-Befragung lassen sich die Qualität der Arbeit sowie der Zusammenhang zur Digitalisierung im Maschinenbau quantitativ und qualitativ darstellen sowie mögliche Stärken und Schwächen der Branche ableiten.[13]

Insgesamt zeichnet sich der Maschinenbau durch eine leicht unterdurchschnittliche Arbeitsqualität im Sinne des DGB-Index Gute Arbeit aus (Abbildung 24). So erfüllt nur knapp jeder zehnte Arbeitsplatz im Maschinenbau die Kriterien für „Gute Arbeit“; ein Anteil, der 4 Prozentpunkte unter dem Durchschnitt des produzierenden Gewerbes und dem gesamtwirtschaftlichen Durchschnitt liegt. Allerdings ist der Anteil der Beschäftigten in „schlechter Arbeit“ mit 19 % knapp unter dem Wert für das produzierende Gewerbe und identisch mit dem gesamtwirtschaftlichen Durchschnitt. In der zweithöchsten Kategorie „Arbeitsqualität im oberen Mittelfeld“ liegt der Maschinenbau knapp über dem produzierenden Gewerbe und 3 Prozentpunkte über dem Branchendurchschnitt.

Abbildung 24: Stufen der Arbeitsqualität des DGB-Index Gute Arbeit, 2018

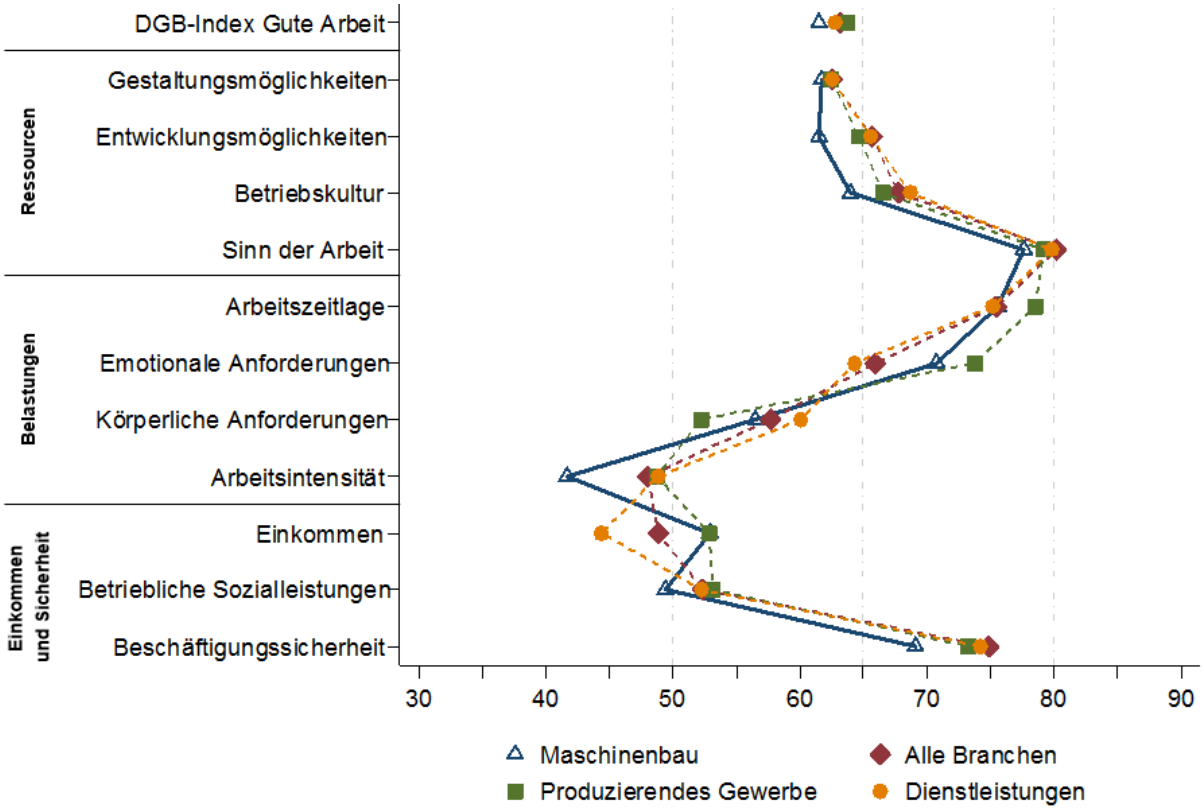


Quelle: Eigene Berechnung. DGB-Index Gute Arbeit 2018.

Um die im Vergleich zu anderen Branchen und insbesondere zum sonstigen produzierenden Gewerbe zurückfallenden Werte zu verstehen, bedarf es einer detaillierteren Betrachtung. Bei branchenübergreifendem Vergleich der elf Kriterien der „Guten Arbeit“ fällt auf, dass sich die in Abbildung 24 ergebende Gesamtbewertung aus unterdurchschnittlichen Werten in sieben Kriterien zusammensetzt (Abbildung 25).

[13] Nach der Definition von Fuchs (2006) bedeutet „Gute Arbeit“ für die Arbeitnehmerin und den Arbeitnehmer, „ein festes, verlässliches Einkommen zu erhalten, unbefristet beschäftigt zu sein, die fachlichen und kreativen Fähigkeiten in die Arbeit einbringen und entwickeln zu können, Anerkennung zu erhalten und soziale Beziehungen zu entwickeln.“
Der DGB-Index „Gute Arbeit“ ist ein Instrument zur Bewertung der Arbeitsqualität aus Sicht der Beschäftigten. Die Berechnung des Index erfolgt auf Grundlage von 42 Einzelfragen, die in elf Kriterien strukturiert sind. Bei der Auswertung des Index werden regelmäßig vier Stufen der Arbeitsqualität unterschieden. Für weitere Details vgl. Kapitel 2.3.2.

Abbildung 25: DGB-Index Gute Arbeit und Kriterien der Guten Arbeit, 2018



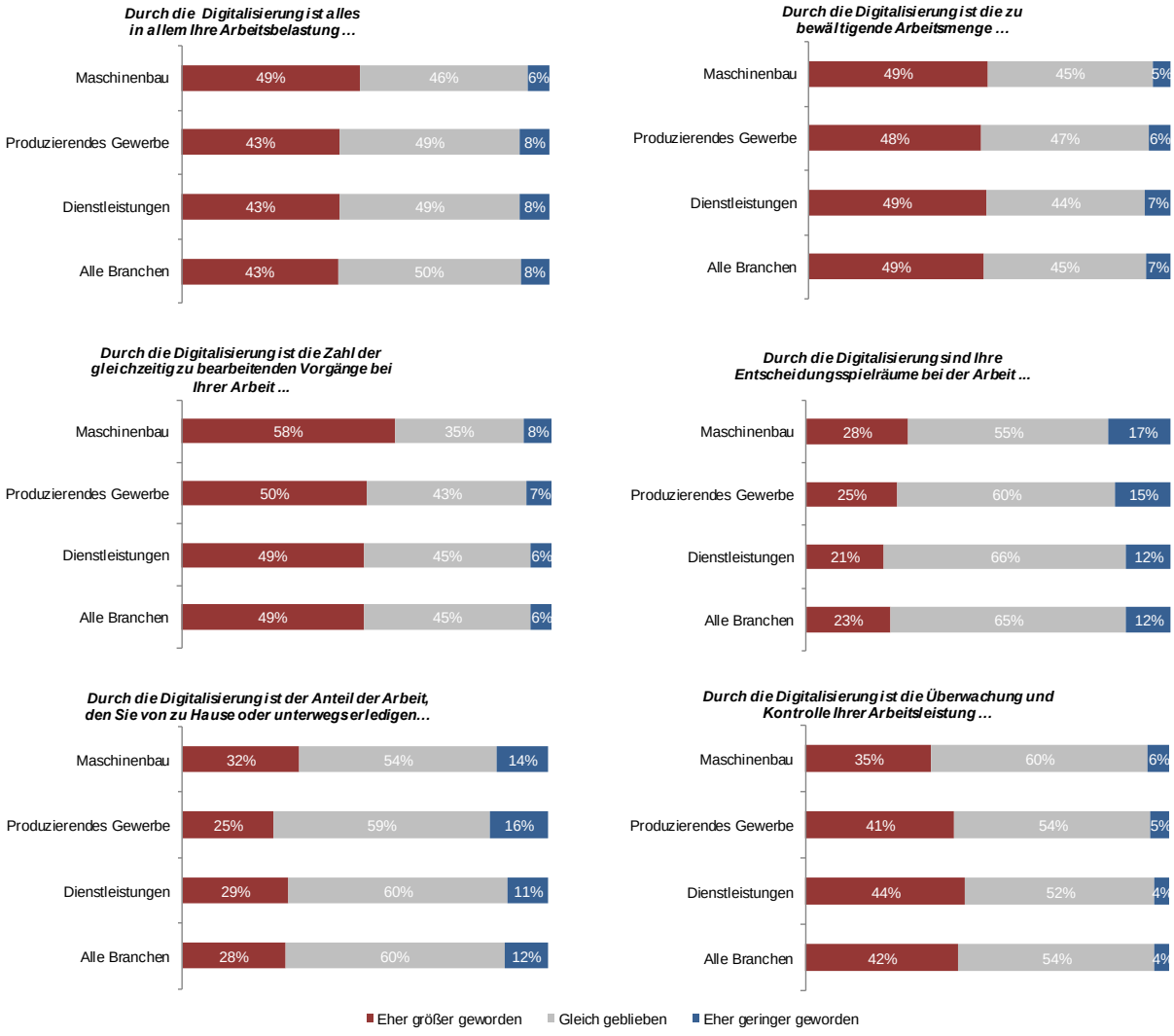
Quelle: Eigene Berechnung. DGB-Index Gute Arbeit 2018.

Als Begründung für die negative Bewertung von Entwicklungsmöglichkeiten und Betriebskultur ist denkbar, dass hierfür die im Durchschnitt geringen Betriebsgrößen und die damit einhergehende, ggf. noch defizitäre Strukturierung/Professionalisierung ausschlaggebend ist – inklusive der erkennbar hierarchischen und wenig auf Beteiligung setzenden Führungsstruktur (s. u.). Die auffallend negative Beurteilung der Arbeitsintensität hingegen dürfte eine unmittelbare Folge des überwiegenden Geschäftsmodells hoch spezialisierter und kundenorientierter Produkte und Leistungen in Kombination mit der projektartigen Arbeitsorganisation sein: Die hochkomplexen Produkte in Kleinserienfertigung bedeuten ein hohes Maß an Koordination, Zeitdruck sowie fallweisen Handlungen und Problemlösungen. Dies spiegelt sich auch in den Ergebnissen der Delphi-Befragungen zur Bewertung relevanter Kompetenzen wider: Die Fähigkeit zur Problemlösung ist die von den Expertinnen und Experten meistgenannte Kompetenz, die für Beschäftigte im Maschinenbau von Bedeutung ist (Abbildung 41). Der Zusammenhang wird gestützt von der Tatsache, dass im Maschinenbau die Arbeitsbelastung und die Gleichzeitigkeit der Aufgaben – als Synonyme für Arbeitsintensität – durch die Digitalisierung im Vergleich zu anderen Branchen am stärksten zugenommen haben (Abbildung 26) und mit den grundsätzlichen Zielsetzungen der Digitalisierung im Maschinenbau einhergehen, nämlich größere Effizienz, höhere Flexibilität, bessere Qualität, kürzere Produkteinführungszeit bzw. Inbetriebnahmen, vgl. Abbildung 29 (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018) .

Ambivalent fallen hingegen die digitalisierungsbedingten Veränderungen bei den Entscheidungsspielräumen und dem Anteil an den von zuhause ausführbaren Tätigkeiten aus (Abbildung 26). Im Vergleich mit anderen Branchen kommt es insbesondere bei den Gestaltungsspielräumen zur am stärksten ausgeprägten „Polarität“: 17 % der Beschäftigten meinen, dass die Handlungsspielräume durch die Digitalisierung abgenommen haben, während 28 % angeben, dass sie größer geworden sind. Dies ist ein Hinweis darauf, dass es innerhalb der Belegschaft je nach Aufgabenbereich (FuE/Konstruktion, Produktionsplanung/Steuerung, Fertigung, Montage/Inbetriebnahme/Wartung) unterschiedliche Freiheitsgrade gibt; dieser Befund wird im Folgenden durch die Delphi-Befragung bestätigt (vgl. Abbildung 29).

Während der Maschinenbau im weiteren Vergleich mit anderen Branchen keine nennenswerten Auffälligkeiten mit Blick auf die Veränderung der Arbeitsmenge zeigt, ergibt sich für die Leistungskontrolle durch den Einsatz digitaler Technologien, dass der Anstieg in den Vergleichsbranchen merklich höher ist (Abbildung 26). Dies ist insofern ein interessanter Befund, als etwa Systeme zur Werkerführung, mit denen auch eine umfassende Leistungskontrolle („gläserne Beschäftigte“) möglich wird, prinzipiell ebenso in der variantenreichen Fertigung/Montage im Maschinenbau Anwendung finden können (Apt, Bovenschulte, Priesack, Weiß & Hartmann, 2018; Kuhlmann, Splett & Wiegrefe, 2018).

Abbildung 26: Folgen der Arbeit mit digitalen Mitteln aus Sicht der Beschäftigten, 2016

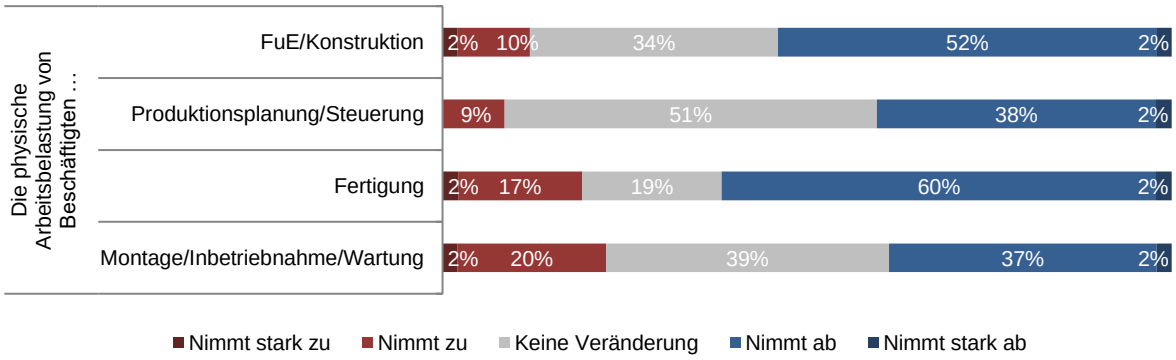


Quelle: Eigene Berechnung. DGB-Index Gute Arbeit 2016.

Die Frage der Arbeitsintensität und die damit verbundenen Belastungen wurden in der Delphi-Befragung vertieft. Dabei stand gerade die Antizipation zukünftiger Belastungsniveaus in den unterschiedlichen Aufgabenbereichen im Fokus: FuE/Konstruktion, Produktionsplanung/Steuerung, Fertigung und Montage/Inbetriebnahme/Wartung. Gefragt wurde nach den physischen und psychischen Belastungen. Insbesondere für die Bereiche FuE/Konstruktion und Fertigung werden abnehmende körperliche Belastungen erwartet (Abbildung 27). Ein Grund könnte sein, dass in (mittlerer) Zukunft vermehrt mit dem Einsatz kollaborativer Roboter gerechnet wird (vgl. auch Kapitel 4.2.2.2). Potenziale der Mensch-Roboter-Kollaboration werden in ergonomischen Verbesserungen durch Entlastungen bei schwierigen Tätigkeiten und in der möglichen Kompensation physischer Tätigkeiten für Leistungsgeminderte gesehen. Allerdings scheint der Einsatz angesichts der geringen Losgröße eine technische wie organisatorische Her-

ausforderung zu sein. Hinzu kommt als Limitierung bei kollaborativen Leichtbaurobotern die vergleichsweise geringe Hebekraft von max. 15 kg (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 34). Bemerkenswert ist, dass einige Experten davon ausgehen, mit Ausnahme der Produktionsplanung/Steuerung werde in allen Bereichen die physische Belastung mindestens in geringem Umfang – in bestimmten Tätigkeitsbereichen stark –zunehmen wird; ein Hinweis darauf, dass es im Maschinenbau auch in Zukunft noch „Knochenjobs“ geben wird (Urban, 2019). Dies scheint insbesondere für die Montage/Inbetriebnahme/Wartung zu gelten, aber auch für die Fertigung.

Abbildung 27: Zukünftige physische Belastung



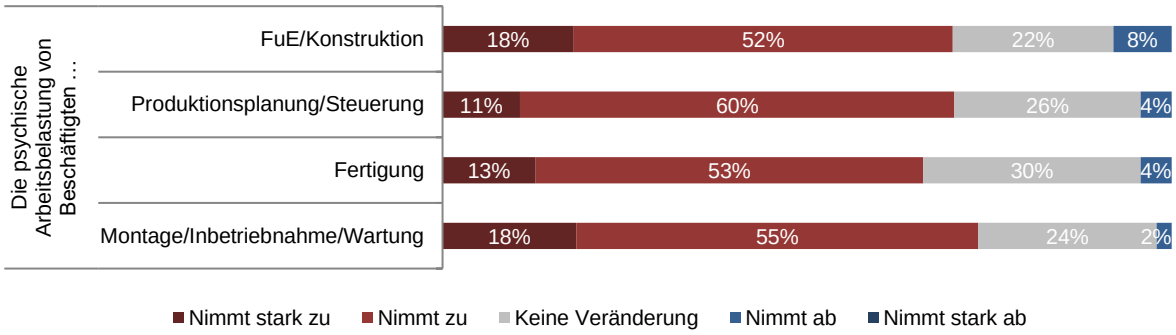
Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Während für die körperlichen Tätigkeiten trotz aller Binnendifferenzierung insgesamt eine Belastungsabnahme prognostiziert wird, ergibt sich für die Veränderung der psychischen Belastungen ein gänzlich anderes Bild, das mit dem Wandel der Aufgaben und Tätigkeiten in der digitalen Transformation einhergeht: „Die Flexibilisierung der Arbeit im Maschinenbau wird sich durch die Möglichkeiten der Digitalisierung weiter forcieren. Bislang wird die Flexibilisierung der Arbeitszeit und des Arbeitsorts vor allem bei Beschäftigtengruppen aus Angestelltenbereichen umgesetzt. Digitale Technologien ermöglichen eine Ausweitung dieser Formen der Flexibilisierung auf Beschäftigte im direkten Bereich in unterschiedlicher Intensität und Reichweite, z. B. auf Instandhalter, aber auch auf Maschinenbediener und auf Montagefachkräfte (Abbildung 30). Insgesamt wird für Produktionstätigkeiten ein Wandel von stärker mechanischer Arbeit hin zu mehr Steuerungs-, Kontroll- und Überwachungsfunktionen erwartet“ (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 55–56). Damit verlagern sich tendenziell auch die Belastungen: weniger körperliche und mehr psychische Belastungen.

Dieser Eindruck wird durch die Ergebnisse der Delphi-Befragung (Abbildung 28) bestätigt, da in allen Aufgabenbereichen eine (starke) Zunahme psychischer Belastungen erwartet wird. Am geringsten ist diese Zunahme in der Fertigung; ggf. kann hier zukünftig ein durchgängig digital gestützter Workflow zu einer gewissen Eingrenzung der Belastungen beitragen, indem alle für die Fertigung benötigten Informationen im jeweiligen Arbeitskontext bereitgestellt werden. In einer Industrie 4.0 mit ihren Cyberphysischen Systemen verschmilzt dabei das Informations- mit dem Produktionssystem, sodass die technische Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems genutzt wird, um die Unterstützung des Menschen als einen Aspekt der Gesamtfunktionalität zu realisieren (Apt, Bovenschulte et al., 2018, S. 96). Allerdings kann die Informationsmenge und -vielfalt im Umkehrschluss auch wieder zu einer Mehrbelastung führen. Auffällig ist die erwartete starke Zunahme psychischer Belastungen um 18 % in den Aufgabenbereichen FuE/Konstruktion und Montage/Inbetriebnahme/Wartung. Im Bereich FuE/Konstruktion resultiert diese mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Notwendigkeit, im internationalen Wettbewerb weiterhin führend zu sein – bei gleichzeitigem Zwang, die wettbewerbssichernden Innovationen möglichst kosteneffizient umzusetzen und ein Over-Engineering zu vermeiden. Somit zeichnet sich hier indirekt ein Hinweis auf die bereits zur Jahrtausendwende im NIFA-Panel diagnostizierte „Ineffizienzfalle“ ab (Ruhr-Universität Bochum, 2000, S. 166).

Aufgrund des wachsenden Softwareanteils an der Wertschöpfung (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018) bietet sich dabei jedoch unter Umständen auch eine Lösungsstrategie, da die kosten- und zeitbedingten Mängel, anders als bei physischen Maschinen/Komponenten, ebenso zu einem späteren Zeitpunkt noch durch ein Update behoben werden können. Für die Konstruktion ergibt sich damit ggf. ein Wechsel im Innovationsparadigma: Weg vom „German Engineering“, hin zum „Permanently Beta“ – dies wurde in der Fallstudie zu einem marktdominanten Spezialmaschinenbauer im Kapitel 2.3.4 mit Blick auf die wachsende Bedeutung des digitalen Anteils an der Wertschöpfung bestätigt. Dabei zeigt der Maschinenbau beim Stand der Digitalisierung und bei Digitalisierungsstrategien allerdings noch ein sehr breites Spektrum. Viele KMU stehen demnach noch am Anfang der digitalen Transformation und verfügen oftmals auch nicht über entsprechende Strategien (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018, S. 18).

Abbildung 28: Zukünftige psychische Belastung

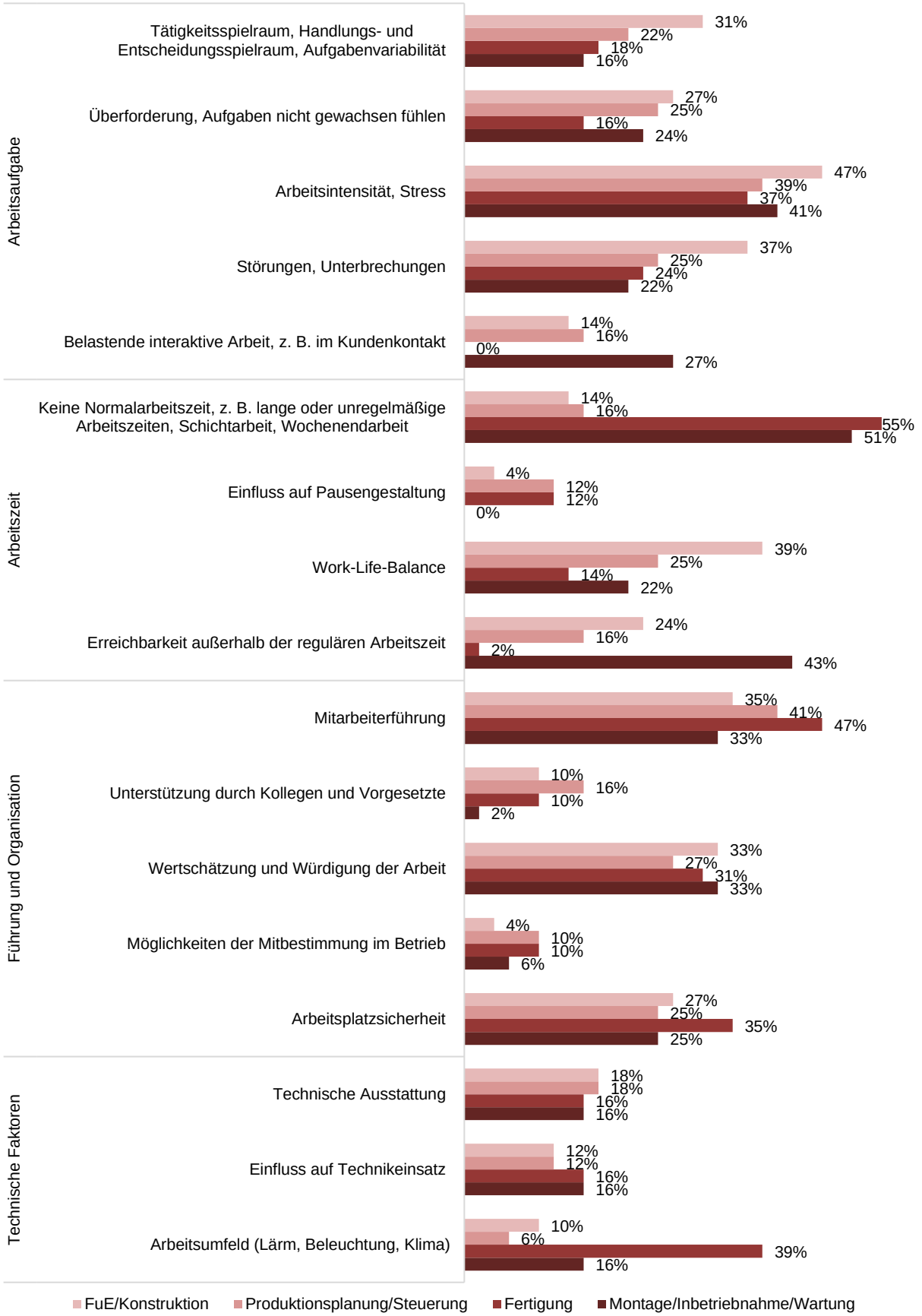


Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Eine detaillierte Betrachtung der Einflussfaktoren der psychischen Belastung bietet Abbildung 29. Dort sind die entsprechenden Ergebnisse der Delphi-Befragung visualisiert. Bei den technischen Faktoren wirken sich Lärm, unzureichende Beleuchtung und Klima (Wärme) und somit Themen des traditionellen betrieblichen Gesundheitsschutzes negativ auf das Stressempfinden in der Fertigung aus (39 %), während alle anderen Aufgabenbereiche im Maschinenbau davon nur in geringem Maße betroffen sind. Ebenso fällt auf, dass in der Fertigung die (mangelnde) Arbeitsplatzsicherheit als deutlich größerer Stressfaktor eingeschätzt wird als in den anderen Aufgabenbereichen. Dieser Befund korreliert mit dem vergleichsweise negativen Wert für das Kriterium „Beschäftigungssicherheit“ in Abbildung 25.

Über alle Aufgabenbereiche hinweg wird hingegen den beiden Faktoren (unzureichende) Mitarbeiterführung und (defizitäre) Wertschätzung eine große Bedeutung für physische Belastung im Maschinenbau attestiert. In den Freitextnennungen wurden im Rahmen der Delphi-Befragung deutliche Hinweise auf die unzureichenden Führungsstrukturen und -stile gegeben. Demnach seien hierarchische Führungsstrukturen noch vergleichsweise weit verbreitet. Ebenso erzeugen Führungskräfte, die ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nicht ausreichend in Entscheidungen einbeziehen, psychische Belastungen. Fehlende Beteiligung und rigide Führungsansätze könnten somit dazu führen, dass die wahrgenommene Arbeitsbelastung steigt, was in der Konsequenz bedeuten muss, dass „das Unternehmensmanagement zu einem veränderten Statusbewusstsein gelangen und bereit sein [muss], die funktionalen und sozialen Grenzen zwischen Management und Mitarbeitern aufzubrechen, unter Umständen sogar auf den Kopf zu stellen – so wie es die Digitalisierung und die neuen beteiligungsorientierten Arbeitsformen nahelegen“ (Hirsch-Kreinsen, 2017, S. 17), vgl. Abbildung 32. Wenngleich somit ein bedeutender Einfluss im Führungsverhalten der Vorgesetzten selbst zu sehen sei, könne sich die Stressbelastung nach Meinung der im Delphi um weitergehende Einschätzungen gebetenen Fachleute auch in beide Richtungen ausprägen. Die Führungskraft gerate unter Druck, wenn die Motivations- und Führungstools ohne Wirkung blieben, da es darüber hinaus kaum Handhabungen gebe, falls die Mitarbeitenden die Vorgaben nicht annähmen. Diese Hilflosigkeit erzeuge Stress. Die Mitarbeitenden hingegen leiden zusätzlich zur geringen Beteiligung auch unter dem Fehlen klarer Vorgaben (Orientierung/Sicherheit) sowie unter Spannungen in nicht gut geführten Teams.

Abbildung 29: Einflussfaktoren auf psychische Belastung



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Die Art und Ausprägung der (strukturellen) Führung steht somit auch mit Fragen der persönlichen Freiheitsgrade und Handlungs- sowie Gestaltungsfreiräumen in Verbindung, da Eigenständigkeit gleichzeitig (Eigen-)Verantwortung bedeutet. Oder mit anderen Worten: Die Freiheiten müssen auch ausgefüllt werden, was im Nichterfüllungsfall zwangsläufig zu einer Überforderung führt. Dies ist über die Typfragen hinaus eine Frage der Kompetenzentwicklung. So zeigen die Ergebnisse der Delphi-Befragung, dass Organisationsfähigkeit und Selbstmanagement gegenwärtig wie künftig für Beschäftigte der Branche von Bedeutung sein dürften (Abbildung 41). Zudem steht die Frage von Freiräumen und Gestaltungsmöglichkeiten in engem Zusammenhang mit lernförderlichen und die Innovationsfähigkeit stärkenden Arbeitsbedingungen (Kapitel 4.3.3).

Ein maßgeblicher Faktor für psychische Belastung ist die Lage und Dauer der Arbeitszeit. So sind die negativen Folgen der Schichtarbeit – neben psychischen Belastungen und Erschöpfungszuständen auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen – hinlänglich bekannt (Amlinger-Chatterjee, 2016). Wenngleich der DGB-Index „Gute Arbeit“ für den Maschinenbau im aggregierten Vergleich mit anderen Branchen keine Besonderheit aufweist (Abbildung 25), ergibt die Einschätzung der im Delphi Befragten ein differenzierteres Bild. Demnach bestehen bei Beschäftigten in den Aufgabenbereichen Fertigung sowie Montage/Inbetriebnahme/Wartung besondere Herausforderungen hinsichtlich der psychischen Belastungssituation: Während der Einfluss von „Keine Normalarbeitszeit“ sowie „Erreichbarkeit außerhalb der regulären Arbeitszeit“ vergleichsweise schwer wiegt, fällt der Faktor „Work-Life-Balance“ weniger ins Gewicht (Abbildung 29).

Im zweiten Zyklus der Delphi-Befragung wurden die Expertinnen und Experten nach möglichen Gründen für a.) die starke Ausprägung der Belastung durch mangelnde Normarbeitszeit und b.) die vergleichsweise geringe Bedeutung der (unzureichenden) Work-Life-Balance gefragt. Allgemein scheint es demnach der Fall zu sein, dass die Arbeitszeitorganisation in KMU häufig sehr flexibel ist. Bei Bedarf, etwa in Zeiten hoher Produktnachfrage, werde in Fertigungs- und Montagebereichen oft über den normalen Arbeitszeitrahmen hinaus gearbeitet, z. B. Mehrarbeit an regulären Arbeitstagen und/oder zusätzlich an Samstagen. Derartige Anforderungen (zusätzliche und Wochenendarbeit, Schichtarbeit) seien den Beschäftigten insbesondere in den Aufgabenbereichen Fertigung und Montage/Inbetriebnahme/Wartung jedoch bekannt, da diese vom Unternehmen in der Regel längerfristig geplant und kommuniziert würden. Dennoch führe eine über lange Zeit dauernde Arbeitszeitausdehnung nach dieser Einschätzung mehr und mehr zu einer psychischen Belastung.

Die Work-Life-Balance hingegen stelle demnach keinen gravierenden Einflussfaktor auf die psychischen Belastungen dar. Im Gegenteil, diese erreiche vielmehr eine Reduzierung von psychischen Belastungen und werde positiv bewertet, da durch flexible Arbeitszeiten für die Beschäftigten vermehrt (individuelle) Freiräume geschaffen würden. Nach der Expertenmeinung führe dies aber auch dazu, dass die Beschäftigten ihren Alltag, also Familie, Freizeitaktivitäten etc., an die Rahmenbedingungen der Arbeit anpassen. Eine Ausnahme stellen die Beschäftigten in FuE und Konstruktion dar: Hier sei davon auszugehen, dass sie ihre Arbeit „mit nach Hause“ nähmen, sodass die Balance nicht immer gegeben sei.

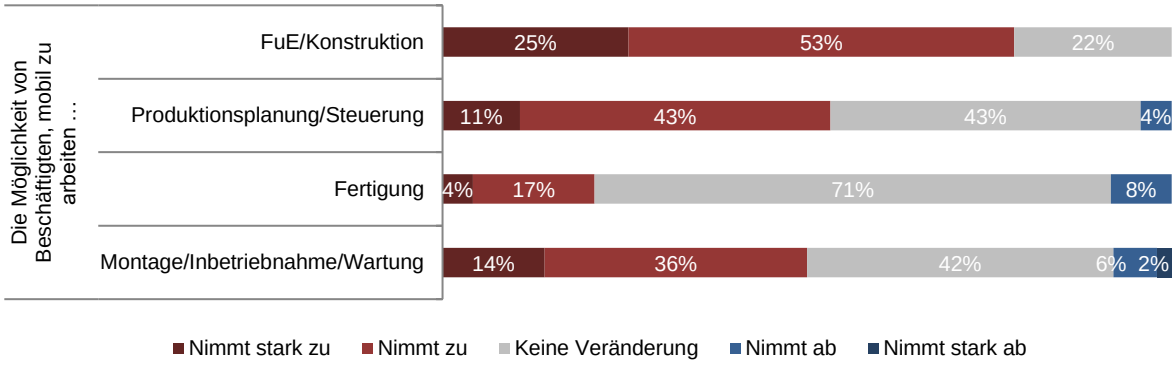
Bei den Beschäftigten im Aufgabenbereich Montage/Inbetriebnahme/Wartung steht die fehlende Normarbeitszeit – wenngleich nach Experteneinschätzung etwas geringer ausgeprägt als im Aufgabenbereich der Fertigung – mit hoher Wahrscheinlichkeit im Zusammenhang mit der stark ausgeprägten und belastenden Erreichbarkeit außerhalb der regulären Arbeitszeit (Ausführen der Tätigkeiten, wenn die Produktion ohnehin stillsteht, also an Wochenenden oder nachts); außerdem kommt hier noch die Belastung durch den Kundenkontakt mit entsprechender Erreichbarkeit/Rufbereitschaft hinzu. All diese Faktoren treten auch fallweise auf, was die Zeitautonomie der hier Beschäftigten stark einschränkt. Interessanterweise spiegelt sich dies nicht übermäßig im Einfluss der aus dem Gleichgewicht gebrachten Work-Life-Balance wider.

4.3.2 Flexibilisierungspotenziale in der Arbeitsorganisation

Die digitale Transformation wird die Art und Weise, wie Arbeit verrichtet wird, in mehreren Dimensionen betreffen und mitunter grundlegend ändern. Wie bereits in Abbildung 29 deutlich wurde, sind die einzelnen hier betrachteten Aufgabenbereiche innerhalb von Maschinenbauunternehmen unterschiedlich stark betroffen – dies gilt etwa für die Erreichbarkeit außerhalb der regulären Arbeitszeit. Damit korreliert auch die Frage, inwieweit die Digitalisierung dazu führt, dass Tätigkeiten nicht mehr ortsgebunden, sondern von zuhause und unterwegs durchgeführt werden können (zeitliche und räumliche Entgrenzung). Werden die in Abbildung 29 – hier: „Erreichbarkeit außerhalb der regulären Arbeitszeit“ – dargestellten Ergebnisse aus dem Experten-Delphi und die in Abbildung 26 ausgewiesenen Ergebnisse aus dem DGB-Index „Gute Arbeit“ gemeinsam betrachtet, so lässt sich ableiten, dass besonders die Beschäftigten in FuE/Konstruktion sowie Montage/Inbetriebnahme/Wartung ihre Tätigkeiten in zunehmendem Maß „mobil“ erledigen können.

Dies geht mit dem Umstand einher, dass sich vielfältige Aufgaben von physisch ausgeführten Tätigkeiten mehr und mehr zu planerischen und steuernden entwickeln, die durch telematische Dienste auch ortsungebunden ausgeführt werden können. Das bekannteste Beispiel ist hier sicherlich die Fernwartung von Maschinen (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018). Die Fertigung ist im Einklang mit den vorliegenden Ergebnissen von dieser Transition zwar relativ am geringsten betroffen, aber eben auch nicht ausgeschlossen (Abbildung 30).

Abbildung 30: Zukünftige arbeitsörtliche Flexibilität

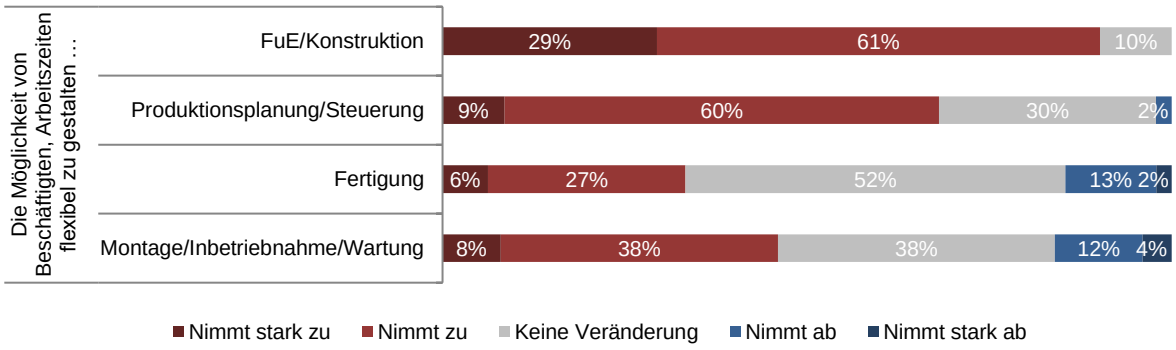


Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Korrespondierend zur örtlichen Ungebundenheit steigt nach Einschätzung der im Delphi befragten Expertinnen und Experten auch die arbeitszeitliche Flexibilisierung (Abbildung 31).

Gerade im Bereich der Konstruktion bieten 3D-fähige Technologien weitgehende Möglichkeiten, vgl. Kapitel 4.2.2.1. Heute stützt sich die Fähigkeit, Maschinen trotz gestiegener Produktkomplexität schneller und in überzeugender Qualität entwickeln und dabei auf Kundenwünsche eingehen zu können, wesentlich auf 3D-Technologien. Im Umkehrschluss ermöglicht bzw. treibt 3D neue Geschäftsstrategien. Dabei geht es den Unternehmen beim Einsatz von 3D-Technologien im Entwicklungsbereich um die Beschleunigung von Innovationsprozessen trotz erhöhter Produktkomplexität und um die gleichzeitige Begrenzung von Risiken (Kuhlmann & Voskamp, 2019, S. 28). Da 3D-Technologien im Entwurf vollständig digital sind, bieten sie grundsätzlich die Möglichkeit zur Virtualisierung und damit zur Bearbeitung außerhalb der Betriebsstätte. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang das erwartete Maß des Anstiegs der örtlichen und zeitlichen Entgrenzung im Aufgabenbereich FuE/Konstruktion. Wenngleich die Digitalisierung diese Entwicklung ohne Frage antreibt und ermöglicht, dürften hier noch weitere Faktoren wie kürzer werdende Innovationszyklen und neue Geschäftsmodelle hinzukommen.

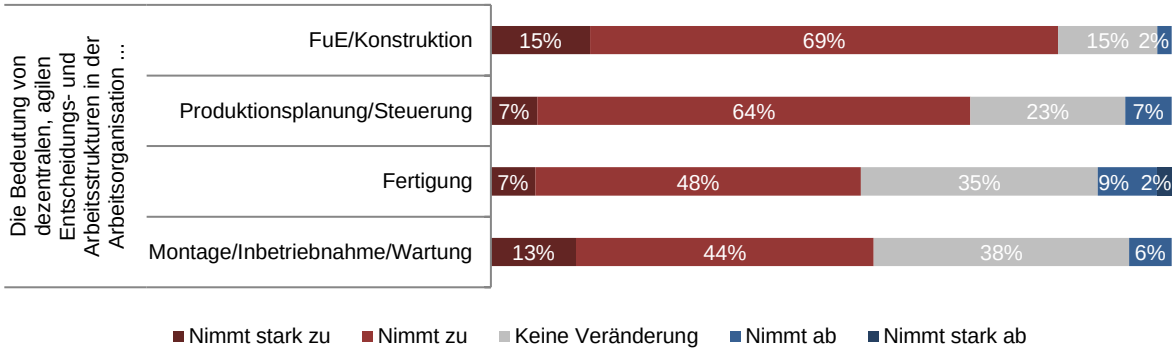
Abbildung 31: Zukünftige arbeitszeitliche Flexibilität



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

All die bisher beschriebenen Änderungen werden – getrieben durch die digitale Transformation und einen zunehmenden Wettbewerbsdruck – auch Auswirkungen auf die verfasste Arbeitsorganisation in Maschinenbauunternehmen haben. Die durch das Experten-Delphi nahegelegte weitgehende und alle Aufgabenbereiche betreffende strukturelle Flexibilisierung (Abbildung 32) steht dabei mit verschiedenen Entwicklungen im Einklang: Neben der in Teilen noch immer ausgeprägten Werkstattproduktion, aber auch der zunehmenden Durchdringung mit Lean-Konzepten – dies gilt nicht nur für die Produktion, sondern auch für die Verwaltung, vgl. Kapitel 3.1 – ist es die Digitalisierung in zwei Dimensionen. Da der Maschinenbau zugleich Anbieter und Nutzer von Industrie-4.0-Technologien ist, erfahren sowohl seine Produkte als auch seine Produktionsprozesse einen Wandel. Auf der einen Seite voll durchdigitalisierte und vernetzte ganzheitliche Produktionssysteme, auf der anderen Seite Maschinen, deren Softwareanteil beständig steigt (Dispan & Schwarz-Kocher, 2018) und das Serviceangebot stärkt (hybride Wertschöpfung). Gerade die Softwareentwicklung bietet ein hohes Maß zur Flexibilisierung, da sie nicht an klassisch gegenständliche Prozesse gebunden ist, vgl. auch Kapitel 4.2.2.

Abbildung 32: Zukünftige betriebsstrukturelle Flexibilität



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Dabei ergeben sich durch die Digitalisierung zum Teil „virale“ Strategien, um die Organisation von Maschinenbauunternehmen insgesamt stärker agil und projektbezogen auszurichten. In der Fallstudie über einen marktdominanten Spezialmaschinenbauer in Kapitel 2.3.4 wurde die Entwicklung digitaler Produkte, Services und Geschäftsmodelle zunächst in einer ausgelagerten und sehr flexibel strukturierten Einheit umgesetzt. Als diese Einheit ein hohes Maß an Reife erreicht hatte, wurde sie im Sinne eines „Spin-ins“ in das Hauptgeschäft integriert, um auch dort eine säulenübergreifende, flexible Arbeit zu befördern: Die Beschäftigten aus der digitalen Einheit wirken dabei als kollegiale „Change Agents“. Dazu passt, dass künftig neben der formellen und der nicht-formalen Weiterbildung insbesondere dem informellen Lernen eine hohe Bedeutung zugesprochen wird (Abbildung 45, S. 63).

4.3.3 Lernförderliche Arbeitsorganisation und Handlungsspielräume

Eine lernförderliche Arbeitsorganisation kann einen wichtigen Beitrag zur stetigen Weiterentwicklung der Qualifikations- und Kompetenzprofile der Beschäftigten leisten und das Lernen im Arbeitsprozess befördern. Arbeitsgebundenes Lernen findet meist als ein Lernen statt, das als „fluide, temporär, selbstgesteuert und als nicht formell organisiert charakterisiert werden kann“ (Dehnbostel, 2008). Dennoch bestehen in der Arbeitsumgebung, den Arbeitsaufgaben, der Arbeitsorganisation sowie der Unternehmenskultur konkrete Gestaltungsfelder, die einen informellen Lernprozess am Arbeitsplatz begünstigen (Schäfer, 2009). Tabelle 4 fasst diese zusammen.

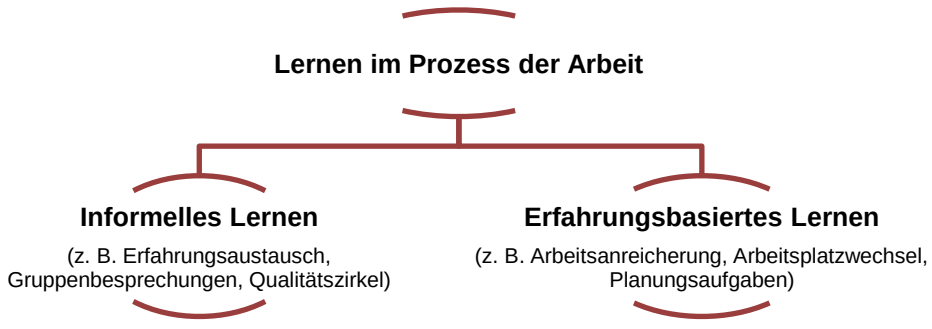
Tabelle 4: Gestaltungfelder einer lernförderlichen Arbeitsumgebung

Arbeitsumgebung	Arbeitsaufgaben	Arbeitsorganisation
Nutzung ergonomischer Gestaltungskriterien	Schaffung vollständiger, problemhaltiger Tätigkeiten	Gestaltung relevanter Strukturmerkmale
Z. B. Beleuchtung, Farbgestaltung, Lärm, Klima, mechanische Schwingungen, Gefahrstoffe, Arbeitsmittel	Z. B. Selbstständigkeit, Partizipation, Kommunikation, Kooperation, Information und Feedback am Arbeitsplatz	Z. B. Produktionsablauf, Gruppenarbeit, Arbeitsteilung, Hierarchie, Arbeitszeit und Entgelt
Unternehmenskultur		

Quelle: Eigene Darstellung. Schäfer (2009).

Da die Lernförderlichkeit der Arbeitsumgebung eng mit dem Lernen im Prozess der Arbeit verbunden ist, unterscheidet sie sich deutlich vom Lernen im Sinne der formalen Weiterbildung bzw. Qualifizierung. Die formale Weiterbildung findet im Regelfall außerhalb des unmittelbaren Arbeitskontextes statt – also nicht auf dem Hallenboden. Es gibt Lerneinheiten und -ziele, die durch eine mehr oder minder praxisnahe Didaktik vermittelt und überprüft werden. Demgegenüber stehen beim Lernen im Prozess der Arbeit der Praxiskontext und die damit verbundenen Routinen (bzw. deren Änderungen im Sinne eines Paradigmenwechsels, siehe unten) im Vordergrund. Dementsprechend wird diese Form des Lernens von informellen und erfahrungsbasierten Prozessen (Abbildung 33) dominiert. Dabei heißt informell nicht, dass die Inhalte und das Lernen nicht zu spezifizieren wären; auch informell erworbenes Wissen lässt sich somit grundsätzlich formalisieren bzw. anerkennen. Durch die weitergehende Digitalisierung in Form von Assistenz- und Tutorensystemen können derartige Anerkennungsmechanismen mitunter sogar automatisiert erfolgen (Bovenschulte, 2020).

Abbildung 33: Formen des Lernens im Prozess der Arbeit



Quelle: Eigene Darstellung. Schäfer (2009).

Mit Blick auf die Lernförderlichkeit in der Industrie 4.0 gilt, dass aufgrund der systemimmanenten und digital ermöglichten Flexibilität und Adaptivität auch eine beständige Veränderung der Organisationsentwicklung einhergeht. Demnach ist die Ausbildung der Arbeitsorganisation selbst ein Lernprozess, der unter anderem dem systematischen Ausprobieren von Lösungsansätzen dient. Auf diese Weise kann es zu einem langfristigen Wandel von einem alten und erprobten Paradigma zu einem neuen und auf die neuen Anforderungen besser eingehenden Paradigma kommen.

In diesem Sinne ist eine lernförderliche Arbeitsorganisation gleichsam ein umfassendes betriebliches Lernprojekt, das dazu dient, passende von unpassenden Lösungen zu unterscheiden, zu erfassen und in einer für den individuellen Betrieb sinnvollen Praxis zusammenzuführen (Mühlbradt, Kuhlang & Finsterbusch, 2018, S. 202). Kommt es zur Einführung neuer Maschinen, Produktionstechnologien und/oder digitaler Systeme, müssen diese in die bestehenden Prozessschritte eingepasst werden. Je systemischer die neuen Elemente sind, desto umfassender und weitreichender wandelt sich die gesamte Arbeitsorganisation. Die Arbeitssystemgestaltung steht dabei vor der Aufgabe, die Elemente nicht nur zu orchestrieren, sondern mitunter sehr weitgehend zu modifizieren und anzupassen. Dazu passt die Erkenntnis aus Forschungsprojekten zur Implementierung und Nutzung digitaler Werkzeuge in produzierenden Unternehmen, wonach dieser Prozess ein hohes Maß an Eigenleistung und Adaptivität des Unternehmens erfordert; in Einzelfällen wird die Modifikation oder sogar Entwicklung von digitalen Werkzeugen „im Unternehmen selbst vorgenommen unter Einbeziehung des Sachverstandes verschiedener Akteure und in einem Prototyping-Verfahren, welches auch die Nutzer in die Entwicklung und Erprobung einbezieht. So kann gefolgert werden, dass sich angemessene digitale Werkzeuge nicht als fertige Lösungen ‚Off-the-Shelf' einkaufen lassen. Stattdessen werden diese intern, mit starkem Bezug zu Tätigkeitsinhalten und betrieblichem Wissen, entwickelt. Entsprechend sind einschlägige Kompetenzen zu Konzeption, Arbeitsanalyse und Beteiligungsmanagement erforderlich. Diese müssen teilweise aufgrund fehlender Vorerfahrungen im Prozess selbst erworben werden" (Senderek, 2018, S. 104).

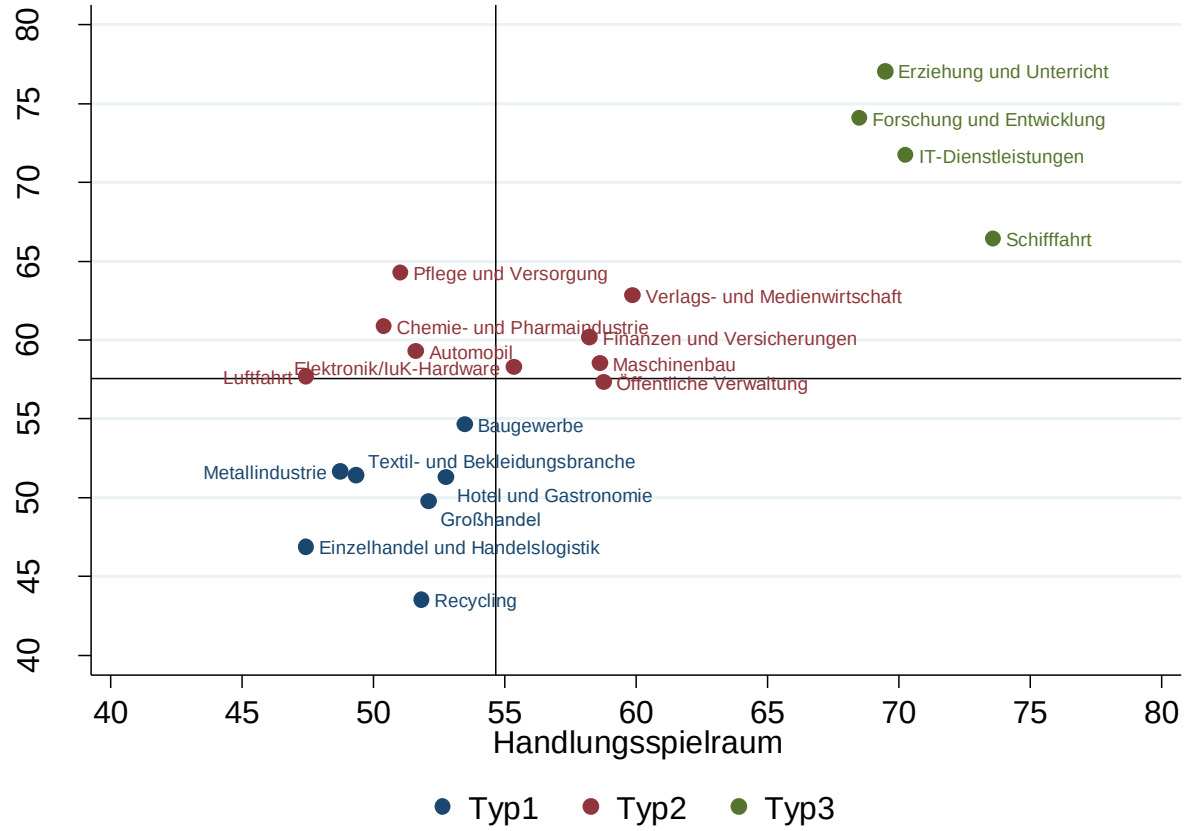
Über die Etablierung neuer Produktions- und Arbeitssysteme hinaus kann die Nutzung derselben in der betrieblichen Praxis mehr oder weniger lernförderlich sein. Zur vertiefenden Untersuchung der branchenspezifischen Lernförderlichkeitspotenziale wurde auf Basis der BIBB/BAuA-ETB 2012 eine indexbasierte Bewertung der Wissens- und Lernintensität und Handlungsspielräume im Maschinenbau im Vergleich zu anderen Branchen vorgenommen.[14,15] Die beiden Faktoren Wissens- und Lernintensität und Handlungsspielräume sind dabei zentrale Determinanten für ein lernförderliches Arbeitsumfeld. Als Branche vom Typ 2 befindet sich der Maschinenbau mit Blick auf die Lernförderlichkeit nahe dem gesamtwirtschaftlichen Durchschnitt (Abbildung 34).[16] Gemäß der Branchentypisierung ist der Maschinenbau damit unter anderem vergleichbar der IuK-/Elektronikbranche. Gleichzeitig deuten die Ergebnisse an, dass der Maschinenbau schon heute – und gerade im Vergleich mit der IuK-/Elektronikbranche, aber auch der Automobilindustrie –überdurchschnittliche Handlungsspielräume aufweist, was eine lernförderliche Arbeitsgestaltung nahelegt. Wie weiter oben dargestellt, dürfte die Werkstattfertigung komplexer Produkte, aber auch ein lang getakteter Fließprozess das Lernen im Prozess der Arbeit fördern. Da die Bewertung der Wissens- und Lernintensität im Maschinenbau dies nicht wie erwartet abbildet, dürften die oft noch hierarchische Führungsstruktur und das damit einhergehende Führungsverhalten sowie die Unternehmenskultur dafür verantwortlich sein, dass die Beschäftigtenpotenziale nicht vollständig entwickelt und abgerufen werden.

[14] Mit dem *indexbasierten Ansatz* wurden Branchen auf Basis einer hierarchischen Clusteranalyse mit den indexierten Variablen Handlungsspielraum und Wissens-/Lernintensität in drei Typen unterteilt. Die Indexvariablen sind jeweils gewichtete Mittelwerte von vier (Handlungsspielraum) und sieben (Wissens-/Lernintensität) Indikatorvariablen aus der BIBB/BAuA-ETB 2012. Um den Informationsgehalt der Daten optimal zu nutzen, wurde die Gewichtung der Indikatoren durch eine Faktoranalyse ermittelt (Cleff, 2015). Für eine Übersicht der Indikatorenauswahl und -gewichtung siehe Tabelle 7 im Anhang. Die Anzahl der Cluster erfolgte auf Grundlage inhaltlicher und statistischer Kriterien, u. a. grafische Analyse des Dendrogramms. Der Index *Handlungsspielraum* erfasst die Freiheitsgrade und Vielfalt der Arbeitsprozesse und bildet einen Faktor der Dimension Arbeitsorganisation ab (Hartmann, Engelhardt, Hering, Wangler und Birner, 2014; Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [BAuA], 2014). Der Index *Wissens-/Lernintensität* spiegelt die Komplexität der Aufgaben und Lernanforderungen für Beschäftigte wider und kann der Dimension Qualifikation zugeordnet werden (Tiemann, 2009).

[15] Siehe Tabelle 11 für die Branchendefinition nach Wirtschaftszweigklassifikation.

[16] Zur besseren Übersichtlichkeit werden nur 20 der 34 untersuchten Branchen in der Abbildung dargestellt. Die dargestellten Branchen decken 87 % der Stichprobe der BIBB/BAuA-ETB 2012 ab.

Abbildung 34: Branchentypen nach indexbasiertem Ansatz, 2012



Anmerkungen: Im Sinne der Übersichtlichkeit werden nur ausgewählte Branchen in der Abbildung dargestellt.
Quelle: Eigene Berechnung. BIBB/BAuA-ETB 2012.

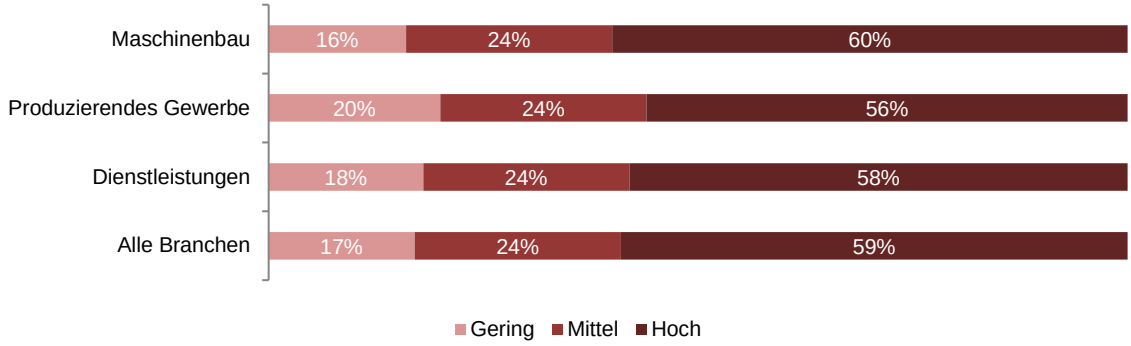
Um nachfolgend die branchenspezifischen Potenziale für eine lernförderliche Arbeitsgestaltung zu spezifizieren, wurden mittels eines Clusterverfahrens branchenspezifische Anteile der Beschäftigten an drei Typen der Lernförderlichkeit ermittelt:[17]

- **Geringe Lernförderlichkeit:** ständige Wiederholung von Arbeitsgängen; vorgeschriebene Strukturen; soziale Unterstützung
- **Mittlere Lernförderlichkeit:** eigenständiges Handeln; teils monotone, repetitive Arbeitsvorgänge
- **Hohe Lernförderlichkeit:** hohes Maß an eigenständigen Entscheidungs- und Lernmöglichkeiten; selbstständiges Problemlösen; stetige Wissensaneignung; Einarbeiten in neue Tätigkeitsfelder; autonome Arbeitsumgebung; selbstverantwortliches Handeln; soziale Unterstützung

Mit Blick auf die Lernförderlichkeit des Arbeitsumfeldes im Maschinenbau im Vergleich zu anderen Branchen ergeben sich insgesamt recht einheitliche Werte, wenngleich der Maschinenbau etwas besser abschneidet als die aggregierten Vergleichsbranchen (Abbildung 35). Insbesondere im Vergleich zum produzierenden Gewerbe bietet der Maschinenbau somit eine höhere Lernförderlichkeit; die naheliegenden Gründe wurden bereits weiter oben diskutiert: hochkomplexe Produkte und entsprechende Aufgabenvielfalt in einer nicht vollständig segmentierten Arbeitsteilung aufgrund der Werkstattproduktion und der langen Taktung in den Fließprozessen.

[17] Zur Berechnung der Anteile der Beschäftigten nach drei Typen der Lernförderlichkeit wurden eine multiple Korrespondenzanalyse und eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Die Methodik orientiert sich an Lorenz und Valeyre (2005). Die Anzahl der Cluster erfolgte auf Basis inhaltlicher und empirischer Kriterien. Grundlage für die empirische Analyse bilden elf Indikatoren, die potenziellen Einfluss auf die Lernförderlichkeit von Beschäftigten haben. Tabelle 8 im Anhang gibt die Ausprägungen der Indikatoren entsprechend des Lernförderlichkeitstyps auf Basis der BIBB/BAuA-ETB 2012 wieder.

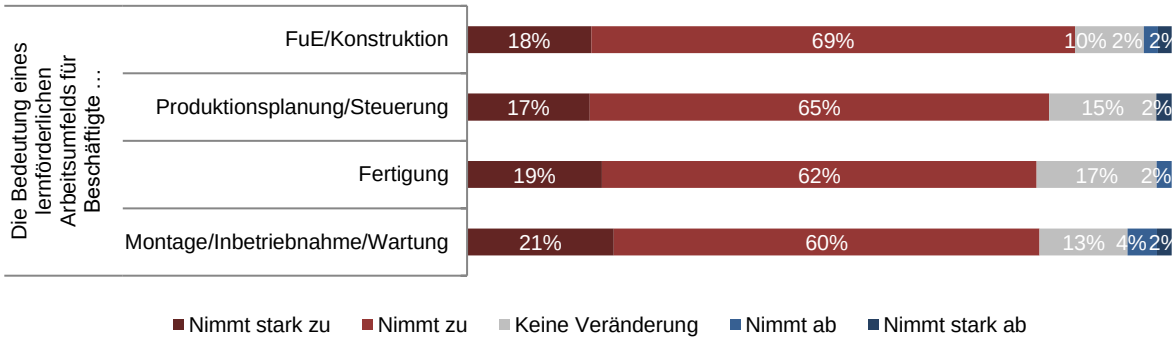
Abbildung 35: Lernförderlichkeit des Arbeitsumfelds, 2012



Quelle: Eigene Berechnung. BIBB/BAuA-ETB 2012.

Anknüpfend an den in Abbildung 35 dokumentierten Ist-Stand erwarten die Teilnehmenden der Delphi-Befragung, dass die Bedeutung der Lernförderlichkeit im Prozess der Arbeit weiter zunehmen wird (Abbildung 36) – und zwar über alle Aufgabenbereiche im Maschinenbau. Damit dürfte die Bedeutung von Arbeitssystemen als Lernsysteme im Maschinenbau in Zukunft außer Frage stehen. Und tatsächlich sollten sich mit einer weiteren Etablierung von Technologien der Industrie 4.0 – etwa mit einer zunehmenden Augmentierung – vielfältige Möglichkeiten für ein qualitativ hochwertiges Lernen im Prozess der Arbeit ergeben. Eine solche Entwicklung bietet darüber hinaus auch Potenziale für Inklusion und Partizipation von leistungsgeminderten und leistungsgewandelten Menschen; eine Perspektive, die gerade vor dem Hintergrund des demografischen Wandels, der alternden Belegschaften und der zu erwartenden Fachkräfteengpässe Bedeutung erlangen dürfte: „Angesichts der steigenden Leistungsfähigkeit technischer Systeme und des erhöhten Bewusstseins von Menschen mit Behinderung als Beschäftigte (insbesondere vor dem Hintergrund, dass der Großteil der Behinderungen im Leben erworben wird), wird erwartet, dass die technischen Potenziale für eine Inklusion und Arbeitspartizipation stärker genutzt werden“ (Apt, Bovenschulte et al., 2018, S. 35–36).

Abbildung 36: Zukünftige Bedeutung der Lernförderlichkeit des Arbeitsumfelds

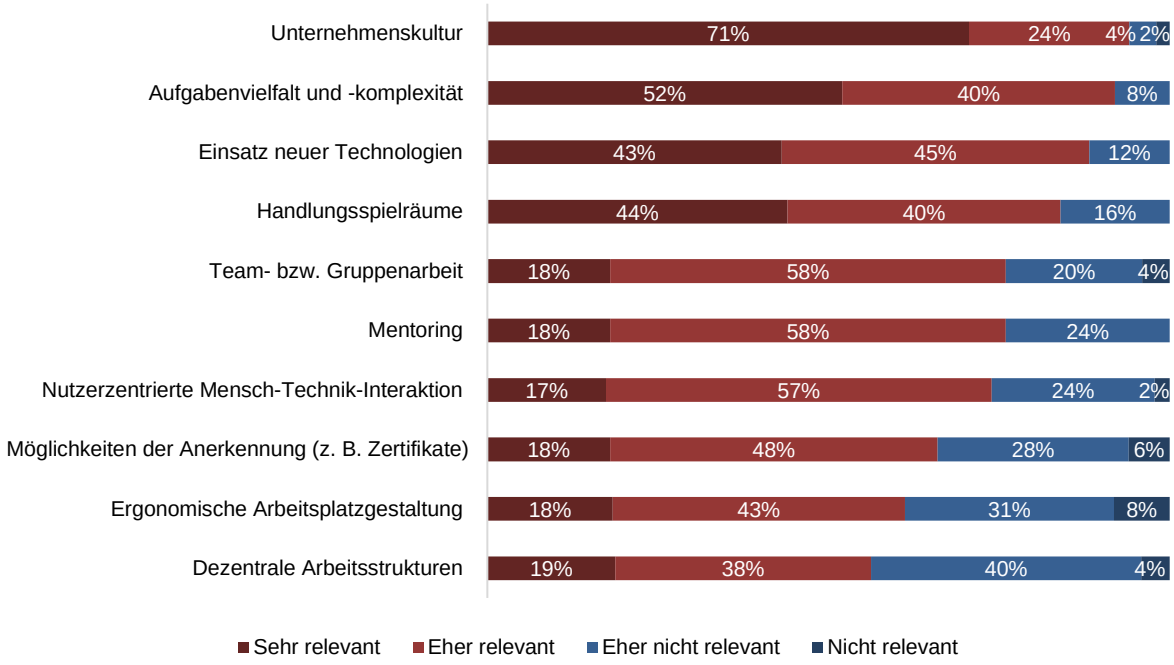


Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Bei der Frage nach den Gründen bzw. Voraussetzungen für lernförderliche Arbeitsbedingungen und Arbeitsmittel ergaben sich aus den Antworten der Expertenbefragung vier besonders relevante Faktoren (Abbildung 37): An erster und besonders herausgehobener Stelle wird die Unternehmenskultur genannt, gefolgt von der Aufgabenvielfalt und -komplexität, dem Einsatz neuer Technologien und den zur Verfügung stehenden Handlungsspielräumen. Die herausgehobene Bedeutung der Unternehmenskultur ist besonders deshalb relevant, weil sie von den Beschäftigten gemäß DGB-Index Gute Arbeit relativ negativ bewertet wird, vgl. Abbildung 25.

Dieser Befund deckt sich mit der Einschätzung durch eine Analyse für die IG Metall, nach der ein Großteil der Maschinenbauunternehmen hierarchisch und wenig partizipativ im Hinblick auf Entscheidungen organisiert ist (Hirsch-Kreinsen, 2017). Auch zur Lernförderlichkeit wurden die Fachleute im zweiten Zyklus des Delphis gefragt, wie eine Unternehmenskultur hierzu einen Beitrag leisten kann. Die folgende Antwort fasst die genannten Rückmeldungen stellvertretend zusammen: „Lernförderliche Arbeitsgestaltung ist in einer partizipativen, offenen, nicht-hierarchischen, kommunikativen Unternehmenskultur eher möglich. Lernförderlichkeit hat auch etwas mit Selbstorganisation, Neugierde, Kommunikation und Kooperation zu tun."

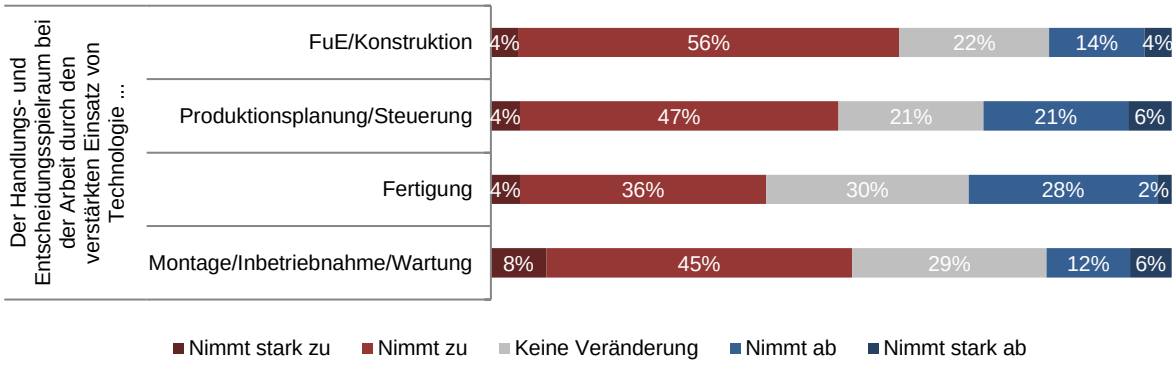
Abbildung 37: Kriterien zur Schaffung von Lernförderlichkeit



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Mit der Unternehmenskultur und der damit verbundenen (Personal-)Führung sind somit auch die Fragen nach individuellen Handlungsspielräumen und der Verantwortungsübernahme durch die Beschäftigten verbunden, also zwei weitere der „Top 4"-Nennungen durch die Experten (Abbildung 37). Eine hohe Aufgabenkomplexität und ausgeprägte Handlungsspielräume sind im Zusammenspiel mit (hoch-)qualifizierten Beschäftigten wichtige Bausteine der Innovationsfähigkeit von Unternehmen (Apt et al., 2016, S. 51–52); dies trifft auf den deutschen Maschinenbau ohne Frage zu, zeigt aber auch, dass in einer Stärkung der Handlungsspielräume noch Potenzial für zukünftige Entwicklungen besteht. Der Umstand, dass in der Delphi-Befragung die Veränderung der Handlungsspielräume in den verschiedenen Aufgabenbereichen des Maschinenbaus vergleichsweise ambivalent eingeschätzt wird (Abbildung 38) – gerade in den Bereichen Produktionsplanung/Steuerung und Fertigung werden auch signifikante Rückgänge erwartet –, muss vor dem Hintergrund des Gesagten daher als „Alarmsignal" verstanden werden. Ein Grund für den in Teilen erwarteten Rückgang dürfte die möglicherweise zunehmende Modularisierung von Produkten und Produktionsprozessen sein: „Ein schon seit einigen Jahren bestehender aber zunehmend an Bedeutung gewinnender Trend im Maschinenbau sind modulare Konzepte; ähnlich wie die Digitalisierung betrifft die Modularisierung sowohl den Fertigungsprozess als auch das Produkt (‚Baukastensysteme'). Hauptmotive für die Modularisierung liegen darin, durch die Nutzung von Standard- und Serienkomponenten und die damit verbundene Realisierung von Skaleneffekten die Kosten zu senken und die Komplexität zu reduzieren. Dabei erfordern Baukastensysteme ein strukturiertes Vorgehen in der Entwicklung und verhindern auf diese Weise ein Over-Engineering" (Dispan, 2016, S. 7).

Abbildung 38: Zukünftiger Wandel der Handlungs- und Entscheidungsspielräume



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

4.3.4 Gestaltungsoptionen

- **Führung neu denken:** Sowohl in quantitativen als auch qualitativen Untersuchungen wird deutlich, dass sich die Führungsstrukturen in Maschinenbaufirmen grundsätzlich ändern müssen: Weg von hierarchischen und unilateralen Strukturen und Stilen hin zu partizipativen und agilen Formen, die auf weitergehenden Handlungs-, Entscheidungs- und auch Verantwortungsspielräumen der Beschäftigten beruhen. Aufgrund der bestehenden hohen Komplexität und Aufgabenvielfalt und der nicht von engen Takten dominierten Arbeitsabläufe einerseits sowie der zunehmenden Digitalisierung der Produkte (Erhöhung des Softwareanteils) und damit verbundener Geschäftsmodelle andererseits (hybride Wertschöpfung) sind bereits gute Voraussetzungen für neue Führungskonzepte gegeben. Diese sind mit hoher Wahrscheinlichkeit eher als die tradierten Formen in der Lage, die Belegschaft in die bestehende und zukünftige digitale Transformation einzubeziehen und dabei auch Antworten auf die verstärkte räumliche und zeitliche Entgrenzung der Arbeit zu finden.
  Gefordert sind dabei Angebote, die gerade von KMU aufgegriffen und partizipativ umgesetzt werden können und die daher von den Sozialpartnern gemeinsam getragen sowie in die Unternehmen kommuniziert werden (konzertierte Aktion „Führung im digitalen Wandel“).

- **Erhalt der Aufgabenkomplexität**: Die mit der hohen Produktkomplexität eng korrelierte Aufgabenkomplexität im Maschinenbau ist ein wichtiger Baustein der Arbeitszufriedenheit der Beschäftigten und der Innovationsfähigkeit der Unternehmen. Bei der sich immer stärker abzeichnenden Verschiebung der Werkstattfertigung hin zu Fließprozessen und einer Modularisierung der Produktion besteht die Gefahr, dass die Aufgabenvielfalt künftig abnimmt. Dies gilt auch für das Bestreben, die Produkte selbst stärker zu modularisieren und im Idealfall im Sinne eines Baukastens je nach Kundenwunsch zusammenzustellen. Wenngleich die Prozesse zur Vereinfachung/Vereinheitlichung der Produkte und Produktionsprozesse aus Gründen der Kosteneffizienz und Wettbewerbsfähigkeit unstrittig sein dürften, muss parallel dazu berücksichtigt werden, wie Arbeitszufriedenheit und Innovationsfähigkeit in diesen geänderten Regimen erhalten und gestärkt werden können.
  Ein Ansatz zum Erhalt der Aufgabenkomplexität kann die Verlagerung der Gestaltungsaufgabe vom Produkt hin zum Produktions- und Kompetenzentwicklungsprozess sein. Ein solches Vorgehen kann in bestehenden oder zukünftigen Experimentierräumen der BMAS-Förderung entwickelt und systematisiert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Aufgabenkomplexität besteht in der Stärkung partizipativer Technikentwicklung (Kapitel 4.2.3).

- **Flexibilität als Resilienzstrategie stärken:** Es ist Unternehmen des Maschinenbaus bislang nur teilweise gelungen, orts- und zeitflexible Formen des Arbeitens zu etablieren. Dabei dürften neben sektoralen Limitationen, z. B. technische und prozessbedingte Grenzen mobilen Arbeitens in der Fertigung, auch Vorbehalte innerhalb von Betrieben und mangelnder Anpassungsdruck in Richtung einer strikten Flexibilisierung größere Fortschritte z. B. bei der Schaffung flexiblerer Arbeitszeitregelungen verhindert haben. In der Corona-Krise zeigt sich exemplarisch, dass flexible Modelle zur Gestaltung von Arbeitszeit und Arbeitsort nicht nur im Interesse der Beschäftigten sind. Vielmehr tragen die konsequente Schaffung der infrastrukturellen und organisatorischen Voraussetzungen sowie die Etablierung solcher Modelle im Normalbetrieb zur Resilienz von Unternehmen in Krisenlagen bei.

  Daher sollten Förderinstrumentarien geschaffen werden, die Unternehmen im Maschinenbau dabei unterstützen, gemeinsam mit den Beschäftigten nicht ausgeschöpfte Flexibilisierungspotenziale zu analysieren und innovative Lösungen auch für fertigungsnahe Arbeitsplätze zu schaffen. Dabei sind ebenfalls Themen wie IT-Sicherheit, Datenschutz etc. zu berücksichtigen.

4.4 Qualifikation

4.4.1 Qualifikations- und Berufsstruktur im Kontext neuer Anforderungen

Das Qualifikationsniveau im Maschinenbau ist in Deutschland überdurchschnittlich hoch (Tabelle 5). So verfügten 2019 17,2 % aller sozialversicherungspflichtig Beschäftigten der Branche über einen Hochschulabschluss. Im Vergleich dazu liegt der Wert für das produzierende Gewerbe insgesamt bei nur 12,3 %, im Dienstleistungssektor bei 16,1 %. Der Anteil von Beschäftigten mit abgeschlossener Berufsausbildung lag 2019 im Maschinenbau bei 70,2 %. Im produzierenden Gewerbe insgesamt lag der Anteil bei 67,9 %, im Dienstleistungssektor bei 59,5 %. Hingegen ist der Anteil von Beschäftigten ohne Berufsabschluss im Maschinenbau mit 9,2 % geringer als im Produzierenden Gewerbe (11,9 %) und im Dienstleistungssektor (12,8 %).

Mit Blick auf die Entwicklung der Beschäftigtenzahlen nach Qualifikation von 2013 bis 2019 zeigt sich innerhalb des Maschinenbaus der größte Anstieg bei Beschäftigten mit Hochschulabschluss. Deren Anzahl stieg um 30,4 %. Die Zahl der Beschäftigten mit Berufsabschluss stieg im selben Zeitraum nur um 7,4 %. Die Beschäftigtenzahl ohne Berufsabschluss stagnierte praktisch (0,1 %). Damit ist im Maschinenbau zwischen 2013 und 2019 ein erkennbarer Akademisierungstrend zu verzeichnen. Bei einem Zuwachs der Zahl sozialversicherungspflichtig Beschäftigter um fast 80.000 zwischen 2013 und 2019 entfiel mehr als die Hälfte des Anstiegs auf Beschäftigte mit Hochschulabschluss (43.494).

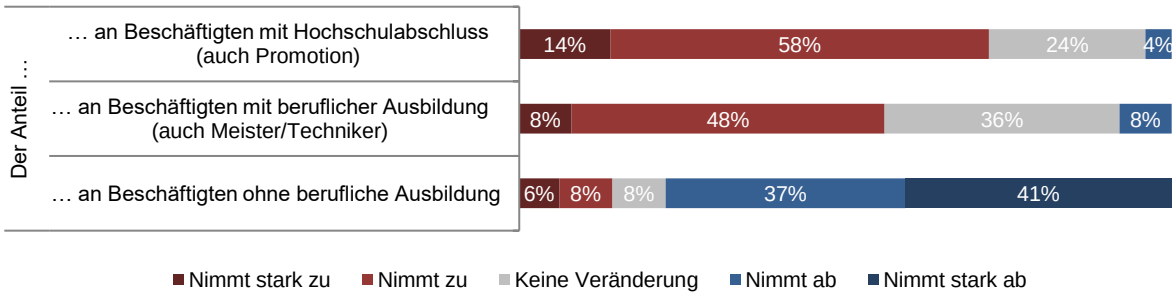
Tabelle 5: Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte nach Qualifikation, 2013 – 2019

	Maschinenbau		Produzierendes Gewerbe		Dienstleistungen		Alle Branchen	
	2019	Δ 2013 – 2019	2018	Δ 2013 – 2018	2018	Δ 2013 – 2018	2019	Δ 2013 – 2019
Ohne Berufsabschluss	100.267	+ 150	1.108.340	- 46.498	2.552.358	+ 468.841	4.111.632	+ 811.751
Anteil/Wachstum	*9,2%*	*+ 0,1%*	*11,9%*	*- 4,0%*	*12,8%*	*+ 22,5%*	*12,4%*	*+ 24,6%*
Mit Berufsausbildung	761.743	+ 52.298	6.328.583	+ 311.873	11.824.525	+ 1.247.637	20.454.941	+ 2.270.322
Anteil/Wachstum	*70,2%*	*+ 7,4%*	*67,9%*	*+ 5,2%*	*59,5%*	*+ 11,8%*	*61,5%*	*+ 12,5%*
(Fach-)Hochschulabschluss	186.365	+ 43.494	1.147.029	+ 234.253	3.204.048	+ 921.533	5.530.417	+ 1.694.043
Anteil/Wachstum	*17,2%*	*+ 30,4%*	*12,3%*	*+ 25,7%*	*16,1%*	*+ 40,4%*	*16,6%*	*+ 44,2%*
Keine Angabe	37.206	- 16.763	741.430	- 80.189	2.285.152	- 599.054	3.189.183	- 912.746
Anteil/Wachstum	*3,4%*	*- 31,1%*	*8,0%*	*- 9,8%*	*11,5%*	*- 20,8%*	*9,6%*	*- 22,3%*
Insgesamt	1.085.581	+ 79.179	9.325.382	+ 419.439	19.866.083	+ 2.038.957	33.286.173	+ 3.863.370

Quelle: Eigene Darstellung. Stichtage 30.09.2013 und 30.06.2018 für das produzierende Gewerbe und Dienstleistungen. Stichtage 31.03.2013 und 31.03.2019 für Maschinenbau und alle Branchen. Sozialversicherungspflichtige Beschäftigung ohne geringfügige Beschäftigung. Statistik der Bundesagentur für Arbeit: Sonderauswertung.

In den kommenden Jahren dürfte sich diese Tendenz insbesondere zur Akademisierung weiter fortsetzen, darauf deuten die Ergebnisse der Delphi-Befragung hin. Die teilnehmenden Expertinnen und Experten wurden um ihre Einschätzung zur künftigen Entwicklung der Qualifikationsstruktur gebeten (Abbildung 39). Demnach gehen 72 % der Befragten von einer Zunahme des Anteils von Beschäftigten mit Hochschulabschluss im Maschinenbau aus. Nur 24 % rechnen mit keinen Veränderungen, 4 % erwarten einen sinkenden Anteil. Für Beschäftigte mit beruflicher Ausbildung inklusive Techniker und Meister sind die Befragten uneins: Während 56 % von einer Zunahme des Anteils ausgehen, erwarten 36 % keine Veränderung, 8 % gehen von einem Rückgang aus. Eindeutiger fällt dabei die Erwartung der Fachleute hinsichtlich der Entwicklung des Beschäftigtenanteils ohne Berufsabschluss aus: 78 % erwarten, dass dieser Anteil abnehmen oder stark abnehmen wird, 8 % sehen keine Veränderung, 14 % rechnen mit einer Zunahme oder einer starken Zunahme.

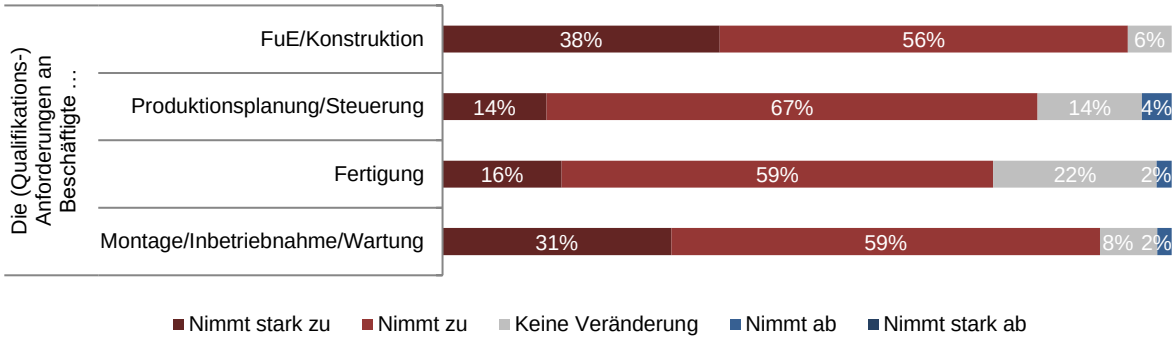
Abbildung 39: Zukünftige Entwicklung der Qualifikationsstruktur



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Demnach rechnen die Befragten mit einer erheblichen Zunahme der bereits zu beobachtenden Akademisierung und dem spürbaren Rückgang des Anteils von Beschäftigten ohne formale Qualifikation. Diese Entwicklung ist über sämtliche Funktionsbereiche der Wertschöpfung im Maschinenbau hinweg zu erwarten. Mit einem besonders starken Zuwachs der Qualifikationsanforderungen rechnen die im Delphi Befragten demnach für die Bereiche FuE/Konstruktion und Montage/Inbetriebnahme/Wartung (Abbildung 40).

Abbildung 40: Zukünftige Entwicklung der (Qualifikations-)Anforderungen



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Diese Entwicklung dürfte insbesondere darauf zurückzuführen sein, dass gerade vorgenannte Bereiche gefordert sind, wenn es darum geht, schnell und flexibel auf neue Kundenanforderungen einzugehen und diesen gerecht zu werden (Abbildung 14). Abbildung 40 verdeutlicht, dass die Teilnehmenden der Delphi-Befragung darüber hinaus auch in den Bereichen Produktionsplanung/Steuerung sowie Fertigung von steigenden Qualifikationsanforderungen ausgehen, wenngleich in geringerer Intensität.

Um genauer zu identifizieren, welche Anforderungen im Einzelnen steigen werden, wurden die Teilnehmenden der Delphi-Befragung im zweiten Zyklus gebeten, dazu nähere Angaben zu machen.

Für den Bereich **FuE/Konstruktion** lässt sich auf dieser Grundlage ein dynamisches Zusammenwirken unterschiedlicher Treiber für steigende Anforderungen an Beschäftigte identifizieren. Da Kundinnen und Kunden zunehmend individuelle und höchst spezifische Anforderungen stellen, erhöht sich infolge der Digitalisierung die Komplexität von Maschinen und Anlagen. Neue Fertigungsverfahren, z. B. 3D-Druck, schaffen neue Möglichkeiten und damit auch neue Anforderungen an Entwicklerinnen wie Entwickler. Insgesamt geht es für Beschäftigte in den FuE- und Konstruktionsabteilungen von Maschinenherstellern verstärkt darum, Lösungen für die individuellen Probleme jedes Kunden und jeder Kundin zu finden – und dies in einem komplexer werdenden technologischen Umfeld bei verschärften Auflagen durch staatliche Regulierung. Neben einschlägigen fachlichen und digitalen Kompetenzen erfordert dies von Beschäftigten in Entwicklung und Konstruktion vor allem die Bereitschaft zur leistungsorientierten, interdisziplinären Zusammenarbeit sowie zum Arbeiten in agilen Prozessen und Strukturen.

Im Bereich der **Produktionsplanung/Steuerung** führen nach Einschätzung der Fachleute ebenfalls die erhöhte Komplexität der Maschinenprodukte in Verbindung mit steigendem Kosten- und Zeitdruck zu erhöhten Anforderungen. Zwar stehen für Planung und Steuerung neue IT-gestützte Anwendungen zur Verfügung, die Beschäftigte bei ihrer Arbeit unterstützen; diese digitalen Werkzeuge stellen jedoch zugleich neue Anforderungen an den Umgang mit datengestützter Produktionsplanung und Steuerung.

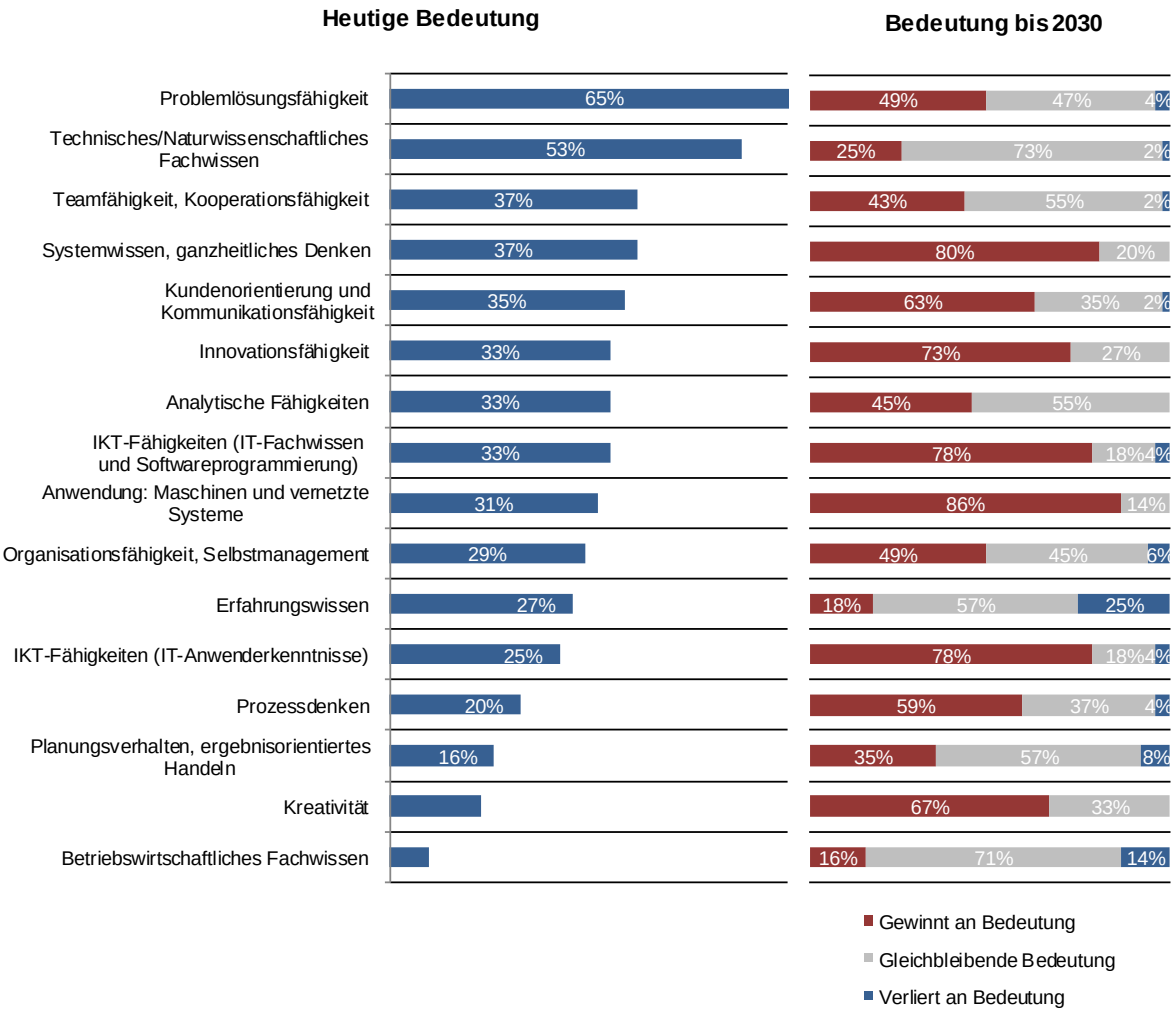
Für Beschäftigte der **Fertigung** erhöhen sich die Anforderungen nach Einschätzung der Experten der Delphi-Befragung vor allem infolge neuer Fertigungstechnologien. Zwar werden Beschäftigte etwa durch Robotik und KI-gestützte Systeme zur Produktionssteuerung einerseits entlastet, andererseits fallen bei zunehmendem Automatisierungsgrad jedoch speziell einfache Tätigkeiten in der Produktion weg. Beschäftigte können und müssen sich demnach stärker auf komplexere Aufgaben und neue Produktionstechnologien wie additive Fertigungsverfahren einstellen sowie anspruchsvolle Aufgaben übernehmen, z. B. Programmieraufgaben.

Beschäftigte im Bereich **Montage, Inbetriebnahme und Wartung** sind nach Einschätzung der Fachleute grundsätzlich ähnlichen Veränderungen ausgesetzt wie Beschäftigte in der Produktion. Auch an sie stellt der Umgang mit komplexen mechatronischen Systemen höhere Anforderungen als bislang. Spezifisch kommen dabei noch erhöhte Anforderungen aufgrund eines stärkeren Kundenkontaktes hinzu. In der Montage, Inbetriebnahme und Wartung sind die Beschäftigten an der Schnittstelle zum Kunden besonders darauf angewiesen, dessen individuellen Anforderungen zu erfüllen. Wo digitale Technologien zur Entwicklung hybrider Wertschöpfungsmodelle genutzt werden, stehen die Beschäftigten zudem stärker als früher im kontinuierlichen Kundenkontakt, was andere kommunikative und problemlösungsorientierte Kompetenzen erfordert.

4.4.2 Kernkompetenzen und Berufsbilder der Zukunft

Um die Entwicklung künftiger Kompetenzanforderungen abzuschätzen, die an Beschäftigte im Maschinenbau gestellt werden, wurden die Fachleute im Rahmen der Delphi-Befragung sowohl zur gegenwärtigen Bedeutung bestimmter Kompetenzen befragt als auch um ihre Einschätzung gebeten, wie sich die Bedeutung der betreffenden Kompetenzen künftig entwickeln wird (Abbildung 41): Die Ergebnisse spiegeln die strukturellen Anforderungen an Beschäftigte des Maschinenbaus wider. So wird deutlich, dass Beschäftigte vor allem in der Lage sein müssen, in der Interaktion mit Kunden komplexe Zusammenhänge zu erkennen, Anforderungen zu analysieren und im Team innovative Lösungen für bestehende Probleme zu finden.

Abbildung 41: Heutige und zukünftige Bedeutung ausgewählter Kompetenzen



Anmerkungen: Die Liste der Kernkompetenzen wurde in Anlehnung an Apt, Schubert und Wischmann (2018) erstellt. Die Befragten konnten bis zu fünf Kompetenzen auswählen. Der Prozentwert bezieht sich auf den Anteil der Befragten, die die entsprechende Kompetenz genannt haben.
Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Hinsichtlich der Erwartungen an die Relevanz der abgefragten Kompetenzen bis 2030 lässt sich erkennen, welche wesentlichen Anpassungen im Bereich des Kompetenzbedarfs die Teilnehmenden der Delphi-Befragung für Beschäftigte im Maschinenbau erwarten.

So wird mit einer zunehmenden Relevanz von Kompetenzen im Bereich domainübergreifender und anpassungsbezogener Kompetenzen gerechnet. 80 % der Befragten erwarten, dass Systemwissen und ganzheitliches Denken künftig an Bedeutung gewinnen werden, 59 % gehen von zunehmender Relevanz von Prozessdenken aus und 49 % der Befragten sehen höhere Anforderungen an Organisationsfähigkeit und Selbstmanagement von Beschäftigten im Maschinenbau.

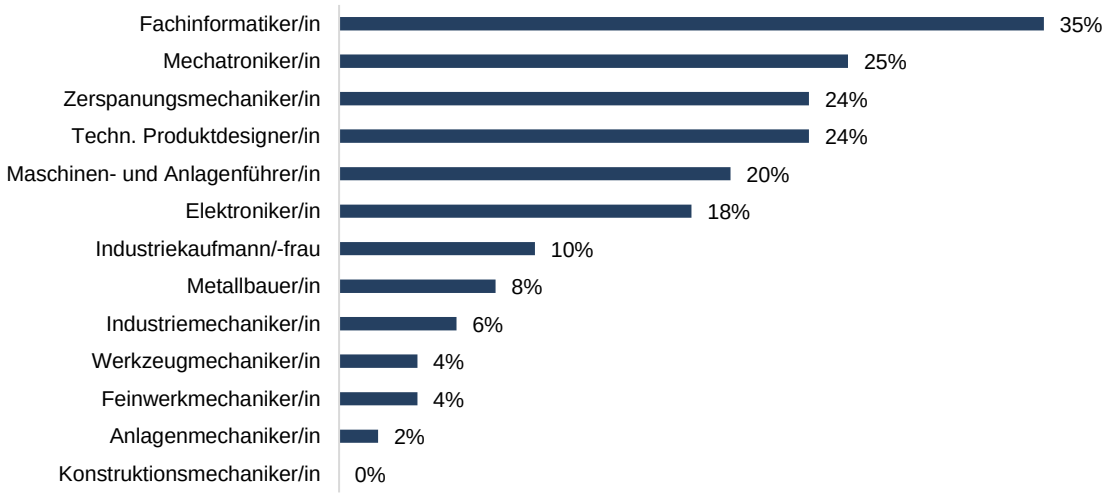
Während sich die Branche strukturell durch eine hohe Innovationstätigkeit, Fertigungstiefe und Spezialisierung auszeichnet, vgl. Kapitel 3.1, nehmen die Anforderungen an Beschäftigte in Bezug auf ihre Innovationsfähigkeit zu (73 %). Unterstrichen wird diese Annahme dadurch, dass 67 % der Befragten von einer zunehmenden Bedeutung von Kreativität ausgehen. Dabei deutet dieser Wert auf eine substanzielle Veränderung im Anforderungsprofil für Beschäftigte hin. Im Verhältnis zu den übrigen abgefragten Kompetenzen nennen nur 12 % der Expertinnen und Experten Kreativität als gegenwärtig besonders relevant. Im Lichte der erwarteten technologischen und arbeitsorganisatorischen Veränderungen deutet dieser Befund darauf hin, dass sich Beschäftigte, die zunehmend mit technischen Systemen in ihrer Arbeit konfrontiert sind, künftig verstärkt auf kreative und innovationsbezogene Tätigkeiten konzentrieren dürften. Diese Entlastung sowie eine zunehmende Konzentration menschlicher Arbeitskraft auf Innovationsentwicklung erscheinen notwendig – umso mehr, als es für den Maschinenbau künftig mindestens so stark wie bereits heute um die Entwicklung kundenindividueller Lösungen gehen dürfte. Während 65 % der befragten Expertinnen und Experten Problemlösungsfähigkeit als bereits heute bedeutende Kompetenz nennen, gehen 49 % davon aus, dass die Relevanz dieser Kompetenz künftig noch steigen wird; 47 % gehen von einer gleichbleibenden Bedeutung aus.

Eine Zunahme der Anforderungen ist ebenfalls im Bereich der technologiebezogenen Kompetenzen zu erwarten. Während nach Einschätzung der Expertinnen und Experten die Bedeutung technischen und naturwissenschaftlichen Fachwissens gleich bleiben dürfte (73 %), nimmt die Relevanz im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) stark zu. Dies gilt sowohl für komplexe Anforderungen im Bereich des IT-Fachwissens und der Softwareentwicklung (78 %) als auch für IT-Anwenderkenntnisse. Im zweiten Zyklus der Delphi-Befragung wurden die Teilnehmenden um eine differenzierte Einschätzung und die Konkretisierung gebeten, welche IT-bezogenen Kompetenzen sie künftig im Einzelnen für besonders wesentlich halten. In dieser Abfrage zeigt sich, dass die aus Sicht der Expertinnen und Experten künftig als besonders wichtig erachteten IT-bezogenen Kompetenzen primär im Bereich der anwendungsbezogenen Kompetenzen liegen. Dabei geht es neben grundlegenden Anwenderkenntnissen speziell um den Einsatz von Online-Kommunikationsmedien und die Informationsrecherche mittels digitaler Arbeitsmittel, die im Maschinenbau, verglichen mit anderen Sektoren, stark verbreitet sind (Abbildung 18). Darin zeigt sich, dass IT-bezogene Kompetenzen nicht losgelöst von der Entwicklung anderer Kompetenzanforderungen zu betrachten sind. Vielmehr ist der Umgang mit IKT-Systemen von besonderer Bedeutung, wenn es um zunehmende Interaktion mit Kundschaft und im Team geht sowie um die Recherche im Zusammenhang mit der Analyse komplexer Zusammenhänge und die Entwicklung innovativer Problemlösungen. Dabei ist auffällig, dass die Teilnehmenden der Delphi-Befragung Anwenderkenntnissen etwa im Bereich der Informationsrecherche und Online-Kommunikation künftig eine noch größere Bedeutung beimessen als Kompetenzen im Bereich der Softwareentwicklung und des Machine Learnings. Wenn für den Maschinenbau von einer Zunahme der Anforderungen im Bereich von IT-Kompetenzen die Rede ist, dürfte es demnach bis 2030 nicht überwiegend darum gehen, Beschäftigte zu Softwareentwicklerinnen und Softwareentwicklern weiterzubilden und entsprechende Fachkräfte für die Branche zu gewinnen. Vielmehr stellen sich den Beschäftigten in der Breite neue Herausforderungen im Umgang und in der Anwendung digitaler Arbeitsmittel, die sie bei ihrer Arbeit unterstützen.

Während die Teilnehmenden der Delphi-Befragung insgesamt davon ausgehen, dass die meisten abgefragten Kompetenzen künftig an Bedeutung gewinnen und damit die Anforderungen in allen Bereichen steigen dürften (Abbildung 41), bildet das Erfahrungswissen hier eine deutliche Ausnahme. So nennen 27 % der Befragten Erfahrungswissen als eine gegenwärtig bedeutende Kompetenz. Über dessen künftige Relevanz besteht hingegen erkennbar Uneinigkeit. Während 18 % der Befragten mit einer zunehmenden Bedeutung rechnen und 57 % von einer gleichbleibenden Bedeutung ausgehen, erwartet immerhin jede und jeder Vierte der Befragten, dass die Relevanz von Erfahrungswissen künftig abnehmen wird. Im Umfeld eines sonst steigenden Anforderungsniveaus stellt dieses Ergebnis eine erkennbare Abweichung dar, weshalb die Expertinnen und Experten im zweiten Zyklus der Delphi-Befragung gezielt um eine Einschätzung gebeten wurden, inwiefern sich die Rolle von Erfahrungswissen künftig ändern könnte. Die Rückmeldungen der Befragten deuten an, dass Erfahrungswissen auch künftig relevant bleiben dürfte, perspektivisch jedoch weniger an den einzelnen Mitarbeiter und die einzelne Mitarbeiterin gebunden sein könnte. So könnten digitale Technologien zur Systematisierung betrieblichen Erfahrungswissens beitragen und im Sinne eines betrieblichen Wissensmanagements künftig einfacher gesichert und verfügbar gemacht werden. Eine in der Delphi-Befragung vorgebrachte Möglichkeit ist, Erfahrungswissen aus betrieblichen Prozessen mittels KI systematisch zu erfassen (vgl. Apt et al., 2016). Darüber hinaus könnte sich der Stellenwert von Erfahrungswissen in einem zunehmend interdisziplinären und prozessorientierten Arbeitsumfeld relativieren, wenn Wissen aufgrund der hohen Veränderungsdynamik von Produkten und Prozessen schneller veraltet.

Vor dem Hintergrund der damit beschriebenen Veränderung in den Kompetenzanforderungen können Berufe im Maschinenbau ganz unterschiedlich von der Änderung der Tätigkeitsprofile betroffen sein. In der Delphi-Befragung wurde daher um eine Einschätzung gebeten, welche Berufsbilder sich in ihrem Tätigkeitsprofil künftig besonders stark wandeln werden (Abbildung 42).

Abbildung 42: Berufe mit hoher Veränderung des beruflichen Tätigkeitsprofils



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

In erheblichem Maße betroffen von Veränderungen im Tätigkeitsprofil dürfte demnach der/die **Fachinformatiker/in** sein. Dieser Befund ist vor dem Hintergrund der zunehmenden Integration digitaler Technologien wenig überraschend. Der Beruf ist nicht branchenspezifisch, er ist als informationstechnischer Beruf ganz wesentlich von den Digitalisierungstrends vernetzter Produktion, Blockchain und Edge Computing sowie von steigenden Ansprüchen im Bereich der IT-Sicherheit betroffen (Berufenet, 2020a).

Nach Einschätzung der Teilnehmenden der Delphi-Befragung sind außerdem die Berufe Mechatroniker/in, Zerspanungsmechaniker/in, Technischer Produktdesigner/Technische Produktdesignerin sowie Maschinen- und Anlagenführer/in stark von veränderten Tätigkeitsprofilen betroffen.

Das gegenwärtige Tätigkeitsprofil **Mechatroniker/in** umfasst insbesondere den Bau mechatronischer Systeme aus mechanischen, elektrischen und elektronischen Komponenten, z. B. von Industrierobotern. Beschäftigte dieses Berufes prüfen Bauteile und montieren diese zu komplexen Systemen (Berufenet, 2020c). Ein wesentlicher Technologietrend, der Beschäftigte dieses Berufes speziell im Maschinenbau wesentlich beeinflussen dürfte, sind kollaborative Roboter. Kollaborative Roboter können Mechatroniker und Mechatronikerinnen „vor allem bei Aufgaben, die ergonomisch schwierig, monoton, filigran, schmutzig oder gefährlich sind", entlasten.[18] Auch die Virtualisierung von Arbeitsumgebungen durch AR- und VR-Technologien dürfte künftig das Arbeiten im Beruf der Mechatronikerin bzw. des Mechatronikers signifikant beeinflussen.[19]

Das Tätigkeitsprofil von **Zerspanungsmechanikern und Zerspanungsmechanikerinnen** umfasst gegenwärtig typischerweise die Herstellung von Maschinen oder Maschinenkomponenten. Dabei bedienen sie mit moderner Steuerungstechnik ausgestattete Dreh-, Fräs- und Schleifmaschinen, sogenannte CNC-Maschinen. Die Beschäftigten regeln und kontrollieren Maschinenparameter, übernehmen das Handling von Metallrohlingen, überwachen den Fertigungsprozess und kontrollieren hergestellte Werkstücke (Berufenet, 2020e). Ähnlich wie der Mechatronik-Beruf dürfte das Tätigkeitsprofil Zerspanungsmechaniker/in durch den Einsatz kollaborativer Robotik und die Verwendung assistiver AR- und VR-Systeme beeinflusst werden.[20]

Für Beschäftigte des Berufs **technischer Produktdesigner/technische Produktdesignerin** ergeben sich künftig veränderte Tätigkeitsprofile. Das Berufsbild umfasst das Entwerfen und Konstruieren von Maschinen und Anlagen(-bauteilen). Dabei orientierten sich Entwurf und Konstruktion an den individuellen Kundenerfordernissen. Technische Produktdesignerinnen und -designer erstellen gemeinsam mit Entwicklerinnen und Entwicklern CAD-Modelle unter Berücksichtigung elektronischer Komponenten und geeigneter Werkstoffe. Auf Basis der erstellten Modelle entwickeln technische Produktdesignerinnen und -designer Montagepläne und Stücklisten für die spätere Fertigung der Maschinen und Anlagen (Berufenet, 2020d). Ein wesentlicher Technologietrend mit Auswirkungen auf das Tätigkeitsfeld von Beschäftigten dieses Berufes ist der 3D-Druck zur Erstellung von Prototypen.[21]

Der Beruf der **Maschinen- und Anlagenführerin** bzw. des **Maschinen- und Anlagenführers** ist ein auch in der Metall- und Kunststoffverarbeitung verbreiteter Beruf. Zu ihren Aufgaben gehören die Bedienung von Maschinen zur Herstellung von Bauteilen und Bauteilgruppen. Dabei übernehmen sie sämtliche für den Einsatz der Maschine relevanten Arbeitsgänge, von der Bereitstellung notwendiger Materialien und Vorprodukte über die Bedienung der Maschine während des Bearbeitungsprozesses bis zur Qualitätsprüfung hergestellter Werkstücke (Berufenet, 2020b). Ähnlich wie im Falle der Mechatronikerinnen und Mechatroniker sowie der Zerspanungsmechanikerinnen und Zerspanungsmechaniker ist auch der Beruf Maschinen- und Anlagenführer/in zunehmend vom Einsatz digitaler Assistenztechnologien wie VR- und AR-basierter Systeme geprägt[22]; dies dürfte perspektivisch zu einer erheblichen Veränderung des Tätigkeitsprofils führen.

Aus der Analyse der Delphi-Ergebnisse und aktueller Trends in den ausgewählten Berufen resultiert, dass vor allem Berufe im Bereich der Fertigung von erheblichen Veränderungen des Tätigkeitsprofils betroffen sein werden. Maßgebliche Treiber dafür sind neue, digitale Technologien, mit denen Beschäftigte während der Arbeitsverrichtung kollaborieren.

---

[18] Vgl. https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/faces/index?path=null/kurzbeschreibung/trends&dkz=2868&such=Mechatroniker%2Fin, zuletzt aufgerufen am 24.04.2020.

[19] Ebd.

[20] Vgl. https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/faces/index?path=null/kurzbeschreibung/trends&dkz=29053&such=Zerspanungsmechaniker%2Fin, zuletzt aufgerufen am 24.04.2020.

[21] Vgl. https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/faces/index?path=null/kurzbeschreibung/trends&dkz=90571&such=Techn.+Produktdesigner%2Fin+-+Maschinen-+u.+Anlagenkonstrukt, zuletzt aufgerufen am 24.04.2020.

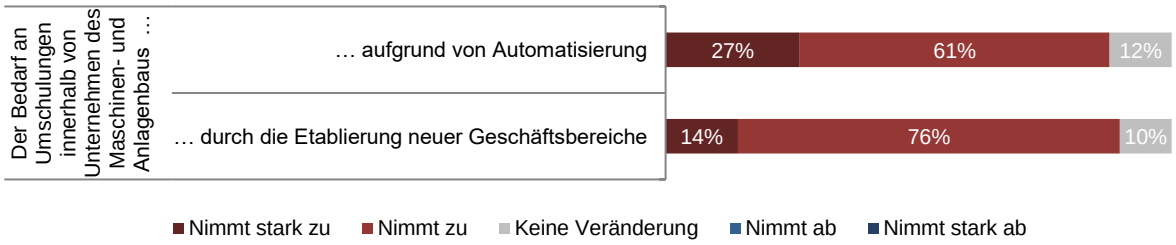
[22] Vgl. https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/faces/index?path=null/kurzbeschreibung/trends&dkz=132653&such=Maschinen-+und+Anlagenf%C3%BChrer%2Fin+-+Metall-%2C+Kunststofftechnik, zuletzt aufgerufen am 24.04.2020.

4.4.3 Ausrichtung der beruflichen Aus- und Weiterbildung

Steigende Kompetenzanforderungen und sich wandelnde Berufsbilder stellen Beschäftigte und Unternehmen gleichermaßen vor Herausforderungen. Das gemeinsame Ziel muss darin liegen, Beschäftigte in die Lage zu versetzen, neue und steigende Anforderungen zu bewältigen. Nur so können Unternehmen sicherstellen, dass sie über jene Kompetenzen verfügen, die wettbewerbsrelevant für den Maschinenbau sind. Damit erzeugt ein sich dynamisch veränderndes Anforderungsspektrum die Notwendigkeit einer teilweisen Neuausrichtung beruflicher Aus- und Weiterbildung.

In der Delphi-Befragung wurden die Teilnehmenden um ihre Einschätzung gebeten, wie sich Automatisierung und die Etablierung neuer Geschäftsbereiche im Maschinenbau auf Umschulungsbedarfe auswirken werden. Die Ergebnisse in Abbildung 43 zeigen, dass neben der Automatisierung auch die Etablierung neuer Geschäftsbereiche Treiber für einen verstärkten Bedarf an Umschulungen hervorrufen wird.

Abbildung 43: Treiber für Umschulungsbedarf innerhalb von Unternehmen



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Wie die Betrachtung besonders von Berufsbildern, die von sich wandelnden Tätigkeitsprofilen betroffen sind, gezeigt hat, treten die Folgen der Automatisierung mit Blick auf Berufe im Bereich der Fertigung nach Einschätzung der Expertinnen und Experten bereits offen zutage (Abbildung 42). Dies ist insofern zu erwarten, als sich gerade in der Fertigung neue, automatisierte Verfahren ganz unmittelbar auf die Arbeit von Beschäftigten auswirken. Um näheren Aufschluss darüber zu gewinnen, welche neuen Geschäftsbereiche künftig zu erhöhten Umschulungsbedarfen führen könnten, wurden die Teilnehmenden der Delphi-Befragung um eine nähere Einschätzung gebeten.

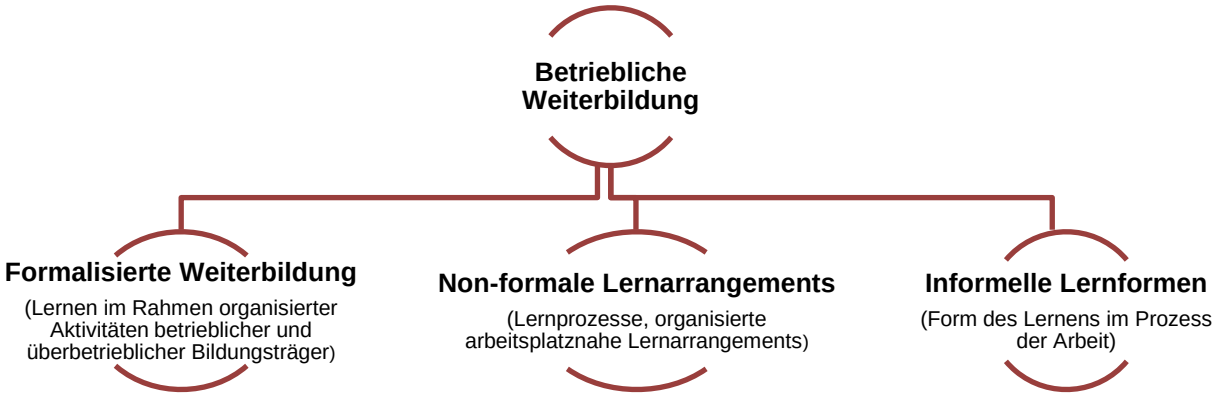
Dabei kommen die Expertinnen und Experten zu dem Ergebnis, dass insbesondere Veränderungen im Bereich der Leistungserbringung von Maschinen- und Anlagenherstellern zu erhöhten Weiterbildungsbedarfen beitragen. So müssen sich Beschäftigte in der Entwicklung und Herstellung von Maschinen und Anlagen auf technische Veränderungen, z. B. im Bereich neuer Antriebstechnologien, und auf komplexer werdende Systeme einstellen. Steigende regulatorische Anforderungen machen zudem die Verwendung neuer Werkstoffe notwendig. Dass sich Unternehmen und Beschäftigten dadurch in den kommen Jahren neue Herausforderungen stellen werden, ist auch ein Ergebnis einer Fallstudie (Kapitel 5.2).

Neben der reinen Produktebene verweisen die Teilnehmenden der Delphi-Befragung auf die zunehmende Servicekomponente im Maschinenbau als Treiber für steigende Umschulungsbedarfe. Wie in der Fallstudie mit einem global führenden Hersteller von Spezialmaschinen deutlich wird, sind sogenannte Subscription-Modelle, bei denen Maschinen nur nach deren Leistung an Maschinenanwender vertrieben werden, ein wesentlicher Trend in der Branche (Kapitel 5.1), der auch aufseiten der Beschäftigten die Aneignung neuer Kompetenzen notwendig macht. Sowohl in Verbindung mit als auch unabhängig von subscriptionbasierten Vertriebsmodellen gehören Services wie Predictive Maintenance, Condition Monitoring sowie E- und Blended-Learning-Angebote für Maschinenanwender zunehmend zum Leistungsspektrum von Unternehmen des Maschinenbaus. Die damit beschriebenen Veränderun-

gen in der Leistungserbringung dürften darin münden, dass bestehende Berufsbilder zunehmend diffundieren und breitere, interdisziplinäre sowie kommunikative Tätigkeiten erlernt und eingeübt werden müssen.

Ein steigender, durch Automatisierung und neue Geschäftsfelder getriebener Umschulungsbedarf sowie steigende Kompetenzanforderungen (Abbildung 43) führen zur Frage, welche Formen der Weiterbildung künftig notwendig sind. Im Delphi wurden die Teilnehmenden dahingehend befragt, wie sie die künftige Bedeutung unterschiedlicher Lernformen in der Weiterbildung einschätzen.

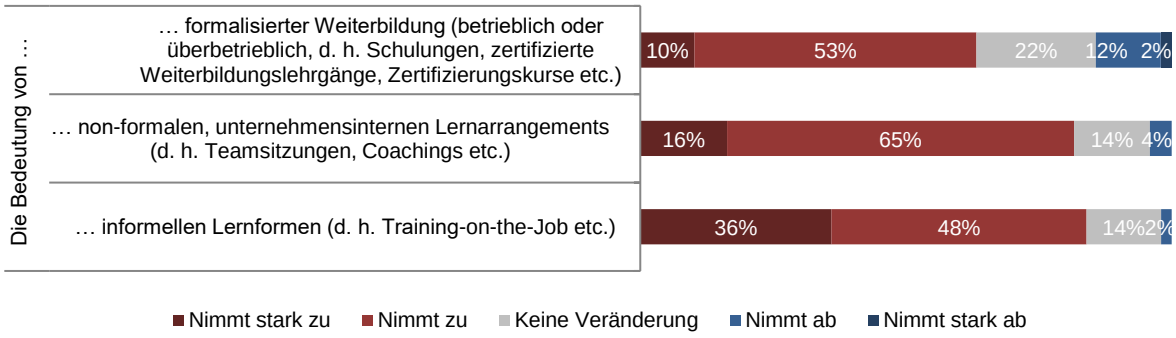
Abbildung 44: Formen betrieblicher Weiterbildung



Quelle: Eigene Darstellung. Abel (2018).

Unter formalisierten Formen der Weiterbildung (Abbildung 44) versteht man organisierte Aktivitäten betrieblicher und überbetrieblicher Bildungsträger, z. B. Seminare und Webinare. Non-formale Lernarrangements sind ebenfalls organisierte Lernangebote, die jedoch arbeitsplatznahes, prozesshaftes Lernen ermöglichen, wie die Lernfabrik oder die Lernwerkstatt. Als informelle Lernformen versteht Abel (2018) das Lernen im Prozess der Arbeit, z. B. Lernen durch Beobachten und Ausprobieren (Diettrich & Vonken, 2011).[23]

Abbildung 45: Zukünftige Bedeutung der Weiterbildung nach Lernform



Quelle: Delphi-Befragung (1. Zyklus).

Die Ergebnisse der Delphi-Befragung deuten darauf hin, dass künftig sowohl formalisierte Weiterbildungsformate als auch non-formale und informelle Lernformen an Bedeutung gewinnen werden, wenngleich nicht in selbem Ausmaß (Abbildung 45). So gehen 63 % der Befragten davon aus, dass die Bedeutung formalisierter Weiterbildung künftig zunehmen wird, wobei nur 10 % mit einer starken Zunahme rechnen. Eine gleichbleibende Bedeutung erwarten 22 %, 14 % rechnen mit einer abnehmenden oder

[23] Zum Einfluss informeller und non-formaler Lernformen auf die Lernförderlichkeit der Arbeitsumgebung vgl. Kapitel 4.3.3.

stark abnehmenden Bedeutung formaler Schulungen und Lehrgänge. Deutlicher fallen die Ergebnisse für non-formale Lernarrangements aus: 81 % der Befragten gehen von einer zunehmenden oder stark zunehmenden Bedeutung aus, nur 14 % erwarten keine Veränderung, 4 % eine abnehmende Bedeutung. Einen besonders ausgeprägten Bedeutungszuwachs erwarten die Teilnehmenden der Delphi-Befragung für informelle Lernformen: 36 % gehen hier von einer stark steigenden, 48 % von einer steigenden Bedeutung aus; 14 % erwarten keine Veränderung, nur 2 % der Befragten rechnen mit abnehmender Relevanz.

Im zweiten Zyklus der Delphi-Befragung wurden die Teilnehmenden gebeten, konkrete Lernformate und Lernkonzepte zu benennen, die sie künftig für besonders relevant halten. Die genannten Lernformate bestätigen die Ergebnisse aus dem ersten Zyklus der Befragung insofern, als vor allem informelle Lernarrangements, also das Lernen im Prozess der Arbeit, als vielversprechendes Konzept verstanden werden. Die Fachleute nennen in der Befragung Teamsitzungen, Coachings bis hin zu verstetigten und auf die individuelle Entwicklung von Beschäftigten einzahlende Formate wie Mentoring und Patenschaften als relevante Formate der Weiterbildung. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass vor allem digitale Lernarrangements, die ein personalisiertes und ubiquitäres, also zeitlich und örtlich flexibles Lernen ermöglichen, orientiert am individuellen Kenntnisstand, als wesentlich für die Zukunft betrieblicher Weiterbildung im Maschinenbau verstanden werden. Auch die Kombination von Online- und Offline-Angeboten (Blendend Learning) dürfte den Experteneinschätzungen zufolge künftig an Bedeutung gewinnen.

Formale Lernangebote wie Lehrgänge werden teilweise eher kritisch betrachtet. Einzelne Teilnehmende stellen deren Wirksamkeit in Frage und verweisen darauf, dass Lernarrangements stets mit einer wirksamen Lernerfolgskontrolle verbunden werden müssten, um sicherzustellen, dass Beschäftigte die Lernziele tatsächlich erreichen. Im Zusammenhang mit Erfolgskontrollen werden von den Expertinnen und Experten auch Zertifizierungsmodelle befürwortet, die im Bereich der Weiterbildung eine formale Anerkennung erfolgreich abgeschlossener Weiterbildungsangebote und damit auch informell und non-formal erworbener Kompetenzen ermöglichen.

4.4.4 Gestaltungsoptionen

- **Digitalisierung als Chance für das Lernen im Prozess der Arbeit nutzen:** Da die digitalen Werkzeuge und Arbeitsmittel im Zuge der Realisierung von Industrie 4.0 zunehmend individuelle Kooperation ermöglichen, zeichnet sich ein Trend hin zu digital unterstützenden Systemen ab. Diese Systeme können für das Lernen im Prozess der Arbeit genutzt werden und zu einem festen Bestandteil der alltäglichen Tätigkeit werden. Die Trennung in „Arbeit“ und „Lernen/Weiterbildung“ wird damit weitgehend aufgehoben. Auf diese Weise lässt sich die Flexibilität und Fluidität von Kompetenzprofilen effizienter und individueller umsetzen als mit den heute gängigen Maßnahmen der formellen Weiterbildung. Mit der Realisierung von Arbeitssystemen als Lernsysteme ändert sich perspektivisch deren Rolle: Werden die Inhalte im Prozess der Arbeit, unmittelbar auf dem Hallenboden, digital unterstützt vermittelt/erworben sowie überprüft/bestätigt, sinkt die Bedeutung formal erworbener Qualifikationen. Die informell erworbenen Fähigkeiten können wiederum als digitale „Credit Points“ verwendet werden, die auch von anderen Arbeitgebern anerkannt werden, in der gleichen oder in anderen Branchen. In Fortschreibung der Nationalen Weiterbildungsstrategie sind Mechanismen und Rollen zu definieren, wie ein solches System der Anerkennung beruflich erworbener Kompetenzen umgesetzt und vereinheitlicht werden kann.

- **Arbeitsplatznahe, informelle Lernarrangements für KMU ermöglichen:** Insbesondere KMU stehen bei Fragen der Digitalisierung nicht zuletzt aufgrund begrenzter Ressourcen vielfach vor besonderen Herausforderungen. Dennoch bieten digitale Angebote gerade in der Weiterbildung eine erhebliche Chance, Nachteile für kleinere Unternehmen auszugleichen. So können mittels Online-Plattformen, VR- und AR-Systemen und simulationsbasierten Formaten arbeitsplatznahe Lernarrangements entwickelt werden (Kohl, 2019, S. 5), die es auch KMU im Maschinenbau ermöglichen, das Potenzial informeller und non-formaler Lernformen in der Weiterbildung zu nutzen, etwa in Form virtueller Lernfabriken. Entsprechende Angebote, die unter enger Einbindung der Sozialpartner entwickelt werden sollten, könnten durch entsprechende förderpolitische Maßnahmen ermöglicht werden. Mit Verbänden und Gewerkschaften könnten entsprechende Angebote entwickelt und realisiert werden.

- **Digitale Kompetenzen durch höhere Selbstwirksamkeit nutzen:** Bei der Entwicklung digitaler Kompetenzen geht es für die meisten Beschäftigten nicht darum, selbst Softwaresysteme zu entwickeln und Datenanalysen durchzuführen. Vielmehr reichen in der Breite der Belegschaften des Maschinenbaus grundlegende Anwenderkenntnisse, die etwa dazu befähigen, selbstständige Informationsrecherchen durchzuführen und digitale Kommunikationskanäle zu nutzen. Um bei weniger digitalaffinen Beschäftigten Vorbehalte und Unsicherheiten abzubauen, muss die Fähigkeit und die Bereitschaft zum Umgang mit digitalen Anwendungen aus einer ganzheitlichen Perspektive gefördert werden. Die digitale Arbeitsgesellschaft als gesellschaftliches Teilsystem ist eng verbunden mit der privaten Lebenswirklichkeit von Erwerbstätigen. So kann auch bei weniger digitalaffinen Beschäftigten auf private Erfahrungen im Umgang mit moderner IKT-Technologie aufgebaut werden. Bei der Entwicklung und Einführung digitaler Arbeitsmittel sollten Unternehmen daher auch die privaten Erfahrungen der Beschäftigten im Umgang z. B. mit Smartphones, Tablets, E-Readern und Smart-Home-Technologien einbeziehen. Dies gilt für die Orientierung am Prinzip intuitiver Bedienung, für die Gestaltung der Technologieeinführung wie für die Kommunikationsstrategie im Umgang mit der Einführung neuer Technologien.

5 Fallstudien

5.1 Global Player im Umbruch – Neue Vertriebsmodelle als Schlüssel zur Geschäftsmodellinnovation

Die Fallstudie basiert auf einem Interview mit zwei leitenden Angestellten eines führenden Maschinenherstellers. Bei dem Unternehmen handelt es sich um einen großen und global tätigen Hersteller von Spezialmaschinen. In seinem Bereich ist das Unternehmen mit rund 40 % Weltmarktanteil führend. In einzelnen Teilmärkten verfügt es sogar über rund 80 % Anteil. Trotz der starken Marktposition durchläuft das Unternehmen seit Jahren eine tiefgreifende Restrukturierung und steht aktuell aufgrund prinzipiell stagnierender oder schrumpfender Absatzmärkte unter Druck.

Mechanisch, also in puncto Geschwindigkeit oder Präzision, sind die Maschinen bis an die Grenzen des technisch Machbaren optimiert, sodass hier nur noch geringe Leistungssprünge und damit dauerhafte Wettbewerbsvorteile zu realisieren sind. Hinzu kommt, dass ein Großteil der Kundschaft die Höchstleistungen nicht ausreizt, sondern die Maschinen eher bei 70 bis 80 % des Möglichen fährt. Überdies sind die Maschinen typische „Made in Germany"-Qualitätsprodukte mit einem langen Lebenszyklus, u. a. durch hohe Standzeit, sehr gute Ausführungsqualität und nicht genutzte Leistungsreserven, sodass praktisch keine Notwendigkeit zur Erneuerung der Maschinen durch die Kunden besteht. Aus diesem Grund versucht das Unternehmen, mehr und mehr auf hybride Wertschöpfung zu setzen, indem das Servicegeschäft deutlich ausgebaut wird. Dabei führte das Unternehmen in den vergangenen Jahren in einer eigenen Digitalisierungseinheit, unabhängig von der bestehenden traditionellen Unternehmensstruktur, ein Pay-per-Use/Subscription-Geschäftsmodell ein. Dieses beinhaltet das Consulting für Maschinenanwender, die Maschinenüberwachung und die Versorgung mit Verbrauchsmaterialien. Das Pay-per-Use/Subscription-Geschäftsmodell soll in Zukunft durch neue Connected Services weiterentwickelt und sukzessive unternehmensweit ausgerollt werden.

Besondere Bedeutung hat die Versorgung der Kundinnen und Kunden mit Verbrauchsmaterialien. Das Unternehmen stellt, mit Ausnahme des empfindlichen Grundstoffs, alle für die Produktion benötigten Verbrauchsmaterialien zur Verfügung. Dazu überwacht es den Durchsatz und die Verbrauchsstände der Maschinen, ebenso den Maschinenzustand und die Abnutzung von Verschleißteilen bzw. Werkzeugen, und bestückt das Warenlager in Echtzeit mit den benötigten Substanzen. Das Unternehmen stellt diese Verbrauchsmaterialien nicht selbst her, sondern arbeitet hierbei mit zertifizierten Herstellern zusammen. Nutzen die Kundinnen und Kunden Komponenten oder Materialien von Zulieferern, die nicht vom Unternehmen gelistet sind, erlöschen die Garantieansprüche oder die weiteren Services des Unternehmens können nicht genutzt werden; die Schaffung derartiger proprietärer Ökosysteme gibt es z. B. auch im Bereich 3D-Drucker. Nur Zulieferer, die das Qualitätsregime und den vom Unternehmen kontrollierten Exklusivzugang akzeptieren, haben somit eine Möglichkeit, ihre Vorprodukte und Substanzen dauerhaft verkaufen zu können. Dies liegt auch an dem hohen Marktanteil des Unternehmens, sodass es gewissermaßen als Plattform fungieren kann, die zwischen den Kunden und den Zulieferern agiert.

Mit diesem Geschäftsmodell reduziert das Unternehmen bei seinen Kunden den Aufwand für die Beschaffung nach dem Prinzip „Alles aus einer Hand" und bietet dafür eine digitale Integration des verbundenen Workflows. Die Zulieferer werden ebenfalls in den Workflow eingebunden, sodass sich für diese der Vertriebsaufwand reduziert und sie gleichsam in ein „Abonnement" aufgenommen werden (Planbarkeit/Verlässlichkeit des Absatzes). Durch KI-basierte Anwendungen wird der Kunde dabei zusätzlich unterstützt.

Mit der Einbindung der Zulieferer von Verbrauchsmaterialien hat sich das Unternehmen einen Anteil an einem Markt gesichert, der deutlich größer ist als der Maschinenmarkt. Um zukünftige Wachstumsmärkte zu erschließen, entwickelt das Unternehmen neue Anwendungs- und Geschäftsmodelle, die auf einer Diversifizierung seines technologischen Know-hows beruhen; Beispiele hierfür sind erste Pilotprojekte in der Medizintechnik und der Verkehrstelematik.

Da es sich um ein Traditionsunternehmen handelt, das seinen Aufstieg einem exzellenten mechanischen und mechatronischen Können verdankt, die neuen Geschäftsfelder aber zu einem Großteil datengetrieben und somit „digital“ sein werden, stellte sich für das Unternehmen die Herausforderung, die wenig entwickelten „digitalen“ Kompetenzen aufzubauen. Zu diesem Zweck wurde eine digitale Einheit außerhalb des Stammhauses und Stammgeschäfts etabliert, um neuartige Lösungen und Anwendungsfälle zu entwickeln und aufzubauen. Die digitale Einheit unterscheidet sich in ihrer agilen und transversalen Organisation, den Kompetenz- und Verantwortungskonzepten sowie der projektorientierten Art zu denken und (gemeinsam) zu arbeiten, deutlich von dem klassisch strukturierten (Silos/Zuständigkeiten) und ganz vom „German Engineering“ geprägten Kerngeschäft. Nachdem die digitale Einheit ein ausreichendes Maß an Reife und auch Erfolgen erreicht hat, wird sie nun im Sinne eines „Spin-ins“ in das Stammgeschäft integriert. Die Beschäftigten der digitalen Einheit agieren in diesem Prozess gleichsam als „Change Agents“, die die Kolleginnen und Kollegen des Stammgeschäfts in der täglichen Arbeit für neue, agile Herangehensweisen und Problemlösungen interessieren und gewinnen sollen. Dabei sind es oftmals auch kleine Schritte wie das Überwinden von festgefahrenen Prozesselementen, die zu einer nach und nach positiven Wahrnehmung und Kooperation führen.

Ziele dieses Prozesses sind weiterhin, den von der mechanischen Welt geprägten Perfektionismus zu relativieren – wenn die Maschinen ohnehin nur zu 70 bis 80 % ihres Leistungsvermögens genutzt werden, muss das Engineering nicht zwangsläufig auf 120 % Leistungsvermögen ausgerichtet sein –, stärker agil zu arbeiten, Betaversionen von Maschinen in den Markt einzuführen sowie letzte Optimierungen im laufenden Betrieb vorzunehmen, z. B. durch die Möglichkeit von Softwareupdates. Viele Kundinnen und Kunden haben Interesse daran, neue Lösungen frühzeitig zu nutzen und sind bereit, dafür anfängliche Einschränkungen hinzunehmen, wenn diese später durch Updates behoben werden können (vgl. Updates der Steuerungs-Software bei Automobilen).

5.2 Digitalisierung schafft neue Perspektiven für KMU und Beschäftigte

Die Fallstudie basiert auf einem Interview mit der Geschäftsführung eines mittelständischen Herstellers für automatisierte Zuführsysteme. Das Familienunternehmen beschäftigt mehr als 400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in sieben europäischen Ländern und ist in seinem Segment Weltmarktführer für automatisierte Zuführtechnik.

Das in dieser Fallstudie untersuchte Unternehmen hat in den vergangenen Jahren bereits einen tiefgreifenden Transformationsprozess durchlaufen, der auf sämtlichen im Projekt QuaTOQ betrachteten Dimensionen zu erheblichen Veränderungen führte. Neue Geschäftsfelder wurden erschlossen, Arbeitsprozesse grundlegend neu strukturiert. Die Folgen einer aktiven Gestaltung des Transformationsprozesses sind steigende Umsätze und steigende Effizienz.

Als Anbieter von Zuführsystemen hat das Unternehmen eine Schlüsselfunktion, wenn es darum geht, Produktionsprozesse von Kundinnen und Kunden aus unterschiedlichen Branchen zu automatisieren. Dabei liefert das Unternehmen Systeme an Anwendende aus verschiedenen Branchen. Das Kundenspektrum umfasst produzierende Unternehmen aus den Bereichen Automotive, Medizintechnik, Elektronik, Verbindungstechnik, Kosmetik, Lebensmittel und Konsumgüter. In dieser Marktposition spürt das Unternehmen seit Jahren eine deutliche Veränderung der Kundenbedürfnisse. Systemanwender verlangen zunehmend flexible und adaptive Zuführsysteme, weil sie ihre gesamten Produktionsprozesse derzeit flexibilisieren, um ihrerseits den sich stetig wandelnden Anforderungen ihrer Kundschaft gerecht werden zu können. Diese Entwicklung dürfte in den kommenden fünf bis zehn Jahren weiter anhalten. In diesem Zusammenhang rechnet das in dieser Fallstudie untersuchte Unternehmen mit einem anhaltenden Investitionsbedarf im Bereich der Prozesstechnik. Langfristig könnten flexible und adaptive Fertigungsprozesse bei den Maschinenanwendern jedoch zu einem Rückgang des Investitionsvolumens führen, wenn maschinenanwendende Unternehmen nicht mehr darauf angewiesen sind, ihren Maschinenpark bei Anpassungen des Produktionsprogramms grundlegend verändern zu müssen. Diese Perspektive macht es notwendig, neue Geschäftsfelder zu erschließen, die einen höheren Serviceanteil an der Wertschöpfung aufweisen. Dieser resultiert nicht zuletzt daraus, dass flexiblere Fertigungssysteme zu erhöhter Komplexität führen. Daraus folgen zusätzliche Anforderungen an die Überwachungs- und Steuerungstechnik sowie an die Beschäftigten von Maschinenanwendern – Maschinenführerinnen und Maschinenführer – und an Beschäftigte des Maschinenherstellers in den Bereichen Montage, Inbetriebnahme sowie Wartung/Service, die das hier untersuchte Unternehmen z. B. mittels Datenbrillen in ihrer Arbeit unterstützt. In Bezug auf die Anforderungen an Steuerungs- und Überwachungstechnik hat das Unternehmen ebenfalls schon reagiert. Es bietet sowohl im Zusammenhang mit den eigenen Zuführsystemen als auch unabhängig davon eine eigene IoT-Lösung an. Mittels einer mobilen IoT-Plattform wird auch Maschinenanwendern, die bislang noch keine Erfahrung mit IoT-Anwendungen haben, ein niedrigschwelliger Einstieg ermöglicht, der die Echtzeitüberwachung einzelner Maschinen und ganzer Produktionslinien erlaubt. So ergibt sich für das hier untersuchte Unternehmen die Chance, neue und erweiterte Serviceleistungen im Bereich Predictive Maintenance und Fernwartung zu realisieren. Zugleich bietet sich auch dem Hersteller von Zuführtechnik selbst über die eigene IoT-Plattform die Möglichkeit, etwa den Inbetriebnahme- und Abnahmeprozess zu verbessern, indem Leistungsparameter automatisch erfasst und ausgewiesen werden. Die IoT-Plattform entwickelte das Familienunternehmen gemeinsam mit einem Start-up, das mittlerweile in der Unternehmensgruppe aufgegangen ist – eine Kooperation, die einen erkennbaren und nachhaltigen Mehrwert für die Leistungsfähigkeit des Traditionsunternehmens geschaffen hat.

Nicht nur ein Wandel der Kundenbedürfnisse führt zu steigendem Anpassungsdruck. Auch das regulative Umfeld verschärft sich für Maschinenanwender und Hersteller immer weiter. Als Folge spielen neue Antriebstechnologien eine zunehmend wichtige Rolle. Neue, nachhaltigere Werkstoffe und Konstruktionen werden erforderlich. Perspektivisch schafft 3D-Druck-Technologie in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, Systemkomponenten, Bauteile und Bauteilgruppen aus alternativen Werkstoffen und nach innovativen Konstruktionsprinzipien herzustellen.

Bereits heute setzt das in dieser Fallstudie untersuchte Unternehmen 3D-Drucker auch in der Fertigung ein. Anlagenkomponenten werden adaptiv und individuell gefertigt und in Zuführsystemen verbaut. Für die Beschäftigten führt der Einsatz von 3D-Druckern sowohl in der Konstruktion als auch in der Fertigung zu Veränderungen und neuen Qualifikationsanforderungen. In der Konstruktion müssen Bauteile gezielt für die Herstellung im neuen Fertigungsverfahren anstelle der spanenden Fertigung mittels CNC-Fräsen entwickelt werden. Beschäftigte in der Fertigung sehen sich dabei gleich mehrfachen Veränderungen ausgesetzt. Einerseits geht es darum, den Umgang mit 3D-Druckern einzuüben. Andererseits schafft das neue Verfahren Unsicherheiten insbesondere bei Bedienerinnen und Bedienern von CNC-Maschinen, die bislang jene Bauteile hergestellt haben, die künftig aus dem 3D-Drucker kommen. Als Folge der Technologieeinführung zeigte sich jedoch, dass aufgrund der zunehmenden Komplexität der produzierten Anlagen trotz Einsatz des 3D-Drucks weiterhin in gleichem Umfang wie zuvor Arbeiten mit CNC-Maschinen durchgeführt werden mussten. In der Konstruktion wurden sogar zusätzliche Arbeitsplätze geschaffen, um den Konstruktionsaufwand für 3D-Drucker und zu fräsende Komponenten bewältigen zu können.

Ohnehin geht das Unternehmen mit Blick auf die langfristige Perspektive solcher Arbeitsplätze mit höherem Anteil handwerklicher Verrichtungen von hoher Beschäftigungssicherheit aus – trotz fortschreitender Digitalisierung. Während entsprechende Tätigkeiten gerade im Sondermaschinenbau auch langfristig nicht gänzlich zu ersetzen sind, bestehen speziell im handwerklichen Bereich erhebliche Fachkräfteengpässe. So fällt es zunehmend schwer, Nachwuchs für diese Tätigkeiten zu gewinnen.

Neben handwerklichen Kompetenzen geht das hier untersuchte Unternehmen davon aus, dass künftig vor allem der Bedarf an Softwareentwicklerinnen und -entwicklern sowie Beschäftigten mit Programmierfähigkeiten steigen wird. Darüber hinaus besteht ein zunehmender Bedarf an ausgeprägten Sozial- und Führungskompetenzen. Sowohl hinsichtlich der zunehmenden Interaktionsdichte mit Kundinnen und Kunden als auch im Zusammenhang mit den sozialen Herausforderungen bei der Führung in Zeiten dynamischer Transformation sieht das Unternehmen mit Blick auf die bestehende Belegschaft und für künftige Neueinstellungen einen erheblichen Bedarf.

6 Szenario: Maschinen- und Anlagenbau 2030

Das Jahr 2025 bedeutete einen Wendepunkt für die deutsche Maschinenbaubranche. Nachdem es im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung eine gewisse Zeit so aussah, als ob die globalen Internetkonzerne aus den USA und China buchstäblich nach den (technologischen) Sternen Deutschlands greifen würden, indem sie ihre erdrückende Macht in Sachen „Industrial Internet“ ausspielen und die Marktregeln neu buchstabieren würden, gründete sich die „Manufacturing Platform Alliance“, in der sich auf Initiative einiger führender Maschinenbau- und Technologiekonzerne die Branche organisierte und auf gemeinsamen Standards beruhende Plattform-Dienste entwickelte. Unter Nutzung der ersten Umsetzungsschritte der Gaia-X-Cloud konnte der deutsche Maschinenbau seine Position als noch exportstärkste nationale Branche nutzen, um neue datengetriebene Nutzungsmodelle und -regeln im Maschinenbau durchzusetzen. Da hierbei konsequent Prinzipien einer verantwortungswürdigen, nachvollziehbaren und transparenten KI-Nutzung Anwendung fanden, ergab sich im weltweiten Wettbewerb ein hoher Vertrauenszugewinn und Wettbewerbsvorteil. Damit war vorerst die Gefahr gebannt, dass sich ein Intermediär zwischen die Maschinenbauer und deren Kundschaft schieben konnte.

Die Kraftanstrengungen der Branche waren enorm und insbesondere für die KMU an der Grenze der Machbarkeit; nicht wenige Betriebe scheiterten und verschwanden vom Markt. Die Nachwirkungen der zurückliegenden Corona-Pandemie und die damit verbundenen Umbrüche (in Folge der Wiederbelebung der Wirtschaft unter Maßgabe des Green Deals) beschrieben zwar eine aussichtsreiche Perspektive, bargen aber gleichfalls vielfältige Unsicherheiten, die auch aus einer zögerlichen Politik resultierten, die (zu) lange zwischen dem Festhalten am Bestehenden und dem Wagen einer neuen, progressiven Beschäftigungspolitik schwankte. Wie sich in den weiteren 2020er Jahren zeigte, boten die fort- und durchgesetzte Energie- und Mobilitätswende, die sich überraschend gut entwickelnde Kreislaufwirtschaft, die Nutzung neuer Konstruktionsprinzipien wie etwa der avancierende Leichtbau etc. unerwartet dynamische Marktpotenziale. Da der Anteil der digitalen Wertschöpfung in Form hybrider Geschäftsmodelle beständig zunahm, waren neben der Manufacturing Platform Alliance die Wandlungsprozesse in den Unternehmen selbst wesentlich für den Erfolg. Damit auch kleine und mittlere Unternehmen Schritt halten konnten, etablierten sich auf breiter Front Ansätze einer evolvierenden Kompetenzentwicklung, mit der eine individuelle Weiterentwicklung der Beschäftigten gewährleistet werden konnte. Im Dreiklang aus Technologie, Organisation und Qualifikation erregte in diesem Kontext ein Bundesprogramm Anfang der 2020er Jahre hohe Aufmerksamkeit, das zunächst auf den Maschinenbau als Pionierbranche beschränkt war, aufgrund des großen Erfolges aber schon bald für weitere Branchen geöffnet wurde.

Der Kern des Programms „DinoKom – Digitale Innovation und Kompetenzen“ sah vor, dass für jedes Forschungs- und Entwicklungsprojekt zum Thema Digitalisierung und Innovation eine Kofinanzierung zum Zweck der zeitgleichen Kompetenzentwicklung beantragt werden konnte. Damit wurde es möglich, gemeinsam mit Wissenschaftspartnern die Kompetenzen genau in dem Moment aufzubauen, zu dem die digitalen Innovationen im Betrieb entwickelt und implementiert wurden; es gab somit kein „zu früh“ oder „zu spät“, sondern eine evolvierende (Weiter-)Entwicklung des benötigten Wissens. So konnte auch die Arbeitsorganisation beständig an neue Aufgaben und Herausforderungen angepasst werden, sodass sich neben bzw. mit dem ganzheitlichen Produktionssystem auch ein ganzheitliches Kompetenzsystem etablieren konnte.

Im Ergebnis wurde mit derartigen Ansätzen erreicht, dass bis Ende der 2020er Jahre zwei bisher fast unvereinbar nebeneinanderstehende Charakteristika des Maschinenbaus miteinander in Einklang gebracht werden konnten: einerseits die Vereinfachung und Standardisierung der Produkte und Prozesse durch eine weitreichende Modularisierung – Kritiker sprachen lange von einer „Legoisierung“ der Branche –, um Skaleneffekte realisieren zu können, andererseits der Erhalt der für die Innovationsfähigkeit der Unternehmen überlebenswichtigen Aufgabenkomplexität der Beschäftigten. Ein Schlüssel hierfür war auch der Wandel der Führungsstrukturen in den Unternehmen, um Partizipation, Flexibilität und Verantwortung zu stärken.

Anhang

Tabelle 6: Branchenübersicht nach WZ 2008 und Beobachtungen nach Datenbasis

Branche	WZ 2008	Beobachtungen		
		BIBB/BAuA-ETB 2012	DGB Index Gute Arbeit 2016	DGB Index Gute Arbeit 2018
Landwirtschaft	1–3	179	75	72
Bergbau	5–9	30	25	118
Ernährungsgewerbe	10–11	474	204	10
Sonstiges verarbeitendes Gewerbe	12; 16-19; 22-23; 31–33	708	410	338
Textil- und Bekleidungsbranche	13–15	145	36	36
Chemie- und Pharmaindustrie	20–21	444	197	158
Metallindustrie	24–25	691	491	399
Maschinenbau	28	495	299	252
Elektronik und IuK-Hardware	26–27	643	215	200
Automobil	29	614	360	264
Sonstiger Fahrzeugbau	30	107	55	48
Recycling	38	88	30	22
Energie- und Wasserversorgung	35–36	270	119	114
Baugewerbe	41–43	841	467	367
Kraftfahrzeughandel und sonstige Serviceleistungen	45	157	124	89
Großhandel	46	197	267	239
Einzelhandel und Handelslogistik	47	1.258	488	386
Hotel und Gastronomie	55–56	314	138	140
Landverkehr und Transport in Rohrfernleitungen	49	314	137	131
Schifffahrt	50	11	8	1
Luftfahrt	51	41	26	31
Sonstige Tätigkeiten für Verkehr und Verkehrsvermittlung	52; 79	270	168	141
Nachrichtenübermittlung	53; 61	344	164	126
Verlags- und Medienwirtschaft	58-60; 73	343	126	119
Finanzen und Versicherungen	64–66	806	398	271
Immobilienbranche	68	114	50	43
IT-Dienstleistungen	62–63	341	175	161
Forschung und Entwicklung	72	100	67	69
Sonstige wirtschaftliche Dienstleistungen	69-71; 74; 77–78; 80–82	940	464	454
Öffentliche Verwaltung	84	1.400	893	748
Erziehung und Unterricht	85	1.415	961	881
Pflege und Versorgung*	86–88	923	1.113**	915
Gesundheits- und Sozialwesen (ohne Pflege und Versorgung)	75; 86–88	1.719	362**	349
Sonstige öffentliche und persönliche Dienstleistungen	37; 39; 95–96	157	89	52
Kultur, Sport und Unterhaltung	90–93	216	68	68

*Anmerkungen: * Die Branche „Pflege und Versorgung“ umfasst nur Beschäftigte in den Berufen „Gesundheits- und Krankenpflege, Rettungsdienst und Geburtshilfe“ (KldB 2010: 813) und „Altenpflege“ (KldB 2010: 821). Der wertschöpfende Kern in der Branchendefinition für die BIBB/BAuA-ETB 2012 schließt Beschäftigte in Berufen der Gastronomie (KldB 2010: 292, 293, 623, 632, 633), Objektpflege (KldB 2010: 541, 832) und Objektsicherheit (KldB 2010: 341, 531, 532) aus. Die Ausschlussregel gilt nicht für Beschäftigte in der Gastronomie für die Branchen „Ernährungsgewerbe“, „Einzelhandel und Hotel“ und „Gastronomie“ sowie für Beschäftigte in der Objektpflege für die Branche „Recycling“. Für einen Vergleich der BIBB/BAuA-ETB 2006 und 2012 wurden die Branchen näherungsweise über den WZ 2003 und KldB 1992 definiert. Die Branchendefinition für den DGB-Index Gute Arbeit erfolgt ausschließlich auf Grundlage des WZ 2008.*

*** Die Branche „Pflege und Versorgung“ ist im DGB-Index Gute Arbeit näherungsweise über Beschäftigte ohne akademischen Abschluss in den aufgelisteten Wirtschaftszweigen definiert. Die Branche „Gesundheits- und Sozialwesen (ohne Pflege und Versorgung)“ ist im DGB-Index Gute Arbeit näherungsweise über Beschäftigte mit akademischem Abschluss in den aufgelisteten Wirtschaftszweigen definiert.*

Tabelle 7: Indikatorenauswahl und -gewichtung für Branchentypisierung

Index	BIBB/BAuA-Indikatoren	Wirkungs-richtung	Gewicht
Handlungsspiel-raum	Häufigkeit, eigenständig schwierige Entscheidungen zu treffen	+	0,21
	Häufigkeit, dass Arbeitsdurchführung bis in alle Einzelheiten vorgeschrieben	-	- 0,31
	Häufigkeit, dass sich derselbe Arbeitsgang bis in alle Einzelheiten wiederholt	-	- 0,29
	Häufigkeit, eigene Arbeit selbst zu planen und einzuteilen	+	0,29
Wissens-/ Lernintensität	Häufigkeit, Wissenslücken zu schließen	+	0,13
	Häufigkeit, sich in neue Aufgaben hineinzudenken und einzuarbeiten	+	0,19
	Häufigkeit, bisherige Verfahren zu verbessern und etwas Neues zu probieren	+	0,22
	Organisieren, Planen und Vorbereiten von fremden Arbeitsabläufen	+	0,19
	Entwickeln, Forschen, Konstruieren	+	0,23
	Ausbilden, Lehren, Unterrichten, Erziehen	+	0,18
	Informationen sammeln, recherchieren, dokumentieren	+	0,16

Quelle: Eigene Darstellung.

Tabelle 8: Typen der Lernförderlichkeit

Indikatorenausprägung nach Typ der Lernförderlichkeit:

Indikator	Hoch	Mittel	Niedrig	Gesamt
Planung von Weiterbildungsmaßnahmen				0,58
Zufriedenheit mit Weiterbildungsmaßnahmen				0,61
Problemlösen				0,84
Entscheidungsfreiheit				0,65
Wissensaneignung				0,62
Lernpotenzial				0,73
Verbesserungspotenzial				0,66
Methodenautonomie				0,53
Repetitionsrate				0,69
Soziale Unterstützung (Kollegen)				0,90
Soziale Unterstützung (Vorgesetzte)				0,78
Beobachtungen	9.050	3.683	2.637	15.370
Anteil	59%	24%	17%	100%

Charakterisierung von Lernförderlichkeitstypen:

Niedrig: ständige Wiederholung von Arbeitsgängen; vorgeschriebene Strukturen; soziale Unterstützung
Mittel: eigenständiges Handeln; monotone, repetitive Arbeitsvorgänge
Hoch: hohes Maß an eigenständigen Entscheidungs- und Lernmöglichkeiten; selbstständiges Problemlösen; stetige Wissensaneignung; Einarbeiten in neue Tätigkeitsfelder; autonome Arbeitsumgebung, selbstverantwortliches Handeln; soziale Unterstützung

Anmerkungen: Innerhalb der Heatmap tragen rote Bereiche in besonderem Maß zur Definition eines Lernförderlichkeitstyps bei. Blaue und weiße Bereiche dokumentieren eine vergleichsweise schwache Ausprägung.
Quelle: Eigene Berechnung. BIBB/BAuA-ETB 2012.

Literaturverzeichnis

Abel, J. (2018). *Kompetenzentwicklungsbedarf für die digitalisierte Arbeitswelt* (Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung e. V. (FGW), Hrsg.). Düsseldorf. Verfügbar unter http://www.fgw-nrw.de/fileadmin/user_upload/FGW-Studie-I40-09-Abel-komplett-web.pdf

Allespach, M. & Ziegler, A. (Hrsg.). (2012). *Zukunft des Industriestandortes Deutschland 2020*. Marburg: Schüren-Verlag.

Amlinger-Chatterjee, M. (2016). *Psychische Gesundheit in der Arbeitswelt* (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Hrsg.). Dortmund/Berlin/Dresden. Verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2353-3a.pdf?__blob=publicationFile&v=7

Apt, W., Bovenschulte, M., Hartmann, E. A. & Wischmann, S. (2016). *Foresight-Studie „Digitale Arbeitswelt“* (Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Hrsg.) (Forschungsbericht 463). Berlin: Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit). Verfügbar unter https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/f463-digitale-arbeitswelt.pdf;jsessionid=081290CCC2C6539AFEE629B5E36DCF66?__blob=publicationFile&v=2

Apt, W., Bovenschulte, M., Priesack, K., Weiß, C. & Hartmann, E. A. (2018). *Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb* (Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Hrsg.) (Forschungsbericht 502). Verfügbar unter https://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/PDF-Publikationen/Forschungsberichte/fb502-einsatz-von-digitalen-assistenzsystemen-im-betrieb.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Apt, W., Schubert, M. & Wischmann, S. (2018). *Digitale Assistenzsysteme. Perspektiven und Herausforderungen für den Einsatz in Industrie und Dienstleistungen* (Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit), Hrsg.). Berlin. Verfügbar unter https://www.iit-berlin.de/de/publikationen/digitale-assistenzsysteme

Berufenet. (2020a). *BERUFENET Steckbrief: Fachinformatiker/in der Fachrichtung Digitale Vernetzung* (Bundesagentur für Arbeit (BA), Hrsg.). Verfügbar unter https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/bkb/133560.pdf

Berufenet. (2020b). *BERUFENET Steckbrief: Maschinen- und Anlagenführer/in mit dem Schwerpunkt Metall- und Kunststofftechnik* (Bundesagentur für Arbeit (BA), Hrsg.). Verfügbar unter https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/bkb/132653.pdf

Berufenet. (2020c). *BERUFENET Steckbrief: Mechatroniker/in* (Bundesagentur für Arbeit (BA), Hrsg.). Verfügbar unter https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/bkb/2868.pdf

Berufenet. (2020d). *BERUFENET Steckbrief: Technische/r Produktdesigner/in der Fachrichtung Maschinen- und Anlagenkonstruktion* (Bundesagentur für Arbeit (BA), Hrsg.). Verfügbar unter https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/bkb/90571.pdf

Berufenet. (2020e). *BERUFENET Steckbrief: Zerspanungsmechaniker/in* (Bundesagentur für Arbeit (BA), Hrsg.). Verfügbar unter https://berufenet.arbeitsagentur.de/berufenet/bkb/29053.pdf

Bovenschulte, M. (2020). *Kognitive Assistenzsysteme* (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Hrsg.) (Horizon-Scanning). Berlin: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.

Bovenschulte, M., Ehrenberg-Silies, S. & Compagna, D. (2014). Horizon-Scanning: Ein strukturierter Blick ins Ungewisse. *TAB-Brief*, (43), 14–18. Verfügbar unter https://www.iit-berlin.de/de/publikationen/tab/at_download/download

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.). (2014). *Gefährdungsbeurteilung psychischer Belastung. Erfahrungen und Empfehlungen*. Berlin.

Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (Hrsg.). (2018). *IoT-Plattformen - aktuelle Trends und Herausforderungen. Handlungsempfehlungen auf Basis der Bitkom Umfrage 2018*. Faktenpapier.

Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. & Fraunhofer IAO (Hrsg.). (2014). *Studie Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*.

Cleff, T. (2015). *Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse* (3. Aufl.). Wiesbaden: Springer Gabler.

Cohen, L., Duboé, P., Buvat, J., Meltont, D., Khadikar, A. & Shah, H. (2018). *Augmented and Virtual Reality in Operations* (Capgemini, Hrsg.).

Commerzbank AG (Hrsg.). (2014). *Maschinenbau. Branchenbericht*.

Commerzbank AG (Hrsg.). (2019). *Maschinenbau in Deutschland*. Branchenbericht. Frankfurt am Main. Verfügbar unter https://media.events.commerzbank.de/media/projekt-medien/e_mail/2018/newsletter_1/branchen/Maschinenbau.pdf

Dehnbostel, P. (2008). Lern- und kompetenzförderliche Arbeitsgestaltung. In Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB) (Hrsg.), *Lernen im Prozess der Arbeit* (Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis (BWP), Bd. 37, 2/2008, S. 5–8). Bonn.

Diettrich, A. & Vonken, M. (2011). Lernen im Betrieb im Spannungsfeld ökonomischer und pädagogischer Interessen. Herausforderungen in Wissenschaft und Praxis. *Berufsbildung in Wissenschaft und Praxis (BWP)*, *40*(1), 6–9.

Dispan, J. (2012). Maschinen- und Anlagenbau: Herausforderungen und Zukunftsfelder. In M. Allespach & A. Ziegler (Hrsg.), *Zukunft des Industriestandortes Deutschland 2020* (S. 216–233). Marburg: Schüren-Verlag. Verfügbar unter http://www.imu-institut.de/data/publication/maschinen-und-anlagenbau-herausforderungen-und-zukunftsfelder/view

Dispan, J. (2016). *Modulare Bauweise im Maschinen- und Anlagenbau. Wirkungen von Baukastensystemen auf Beschäftigung*. Kurzstudie für die IG Metall (Informationsdienst des IMU Instituts 2/2016). Stuttgart.

Dispan, J. (2017). *Entwicklungstrends im Werkzeugmaschinenbau 2017. Kurzstudie zu Branchentrends auf Basis einer Literaturrecherche* (Hans-Böckler-Stiftung, Hrsg.) (Working Paper Forschungsförderung 029).

Dispan, J. (2019). *Modulare Bauweise und neue Produktionskonzepte im Werkzeugmaschinenbau* (Hans-Böckler-Stiftung (HBS), Hrsg.) (Working Paper Forschungsförderung Nummer 118/Februar 2019). Düsseldorf. Verfügbar unter http://www.imu-institut.de/data/dokumente-pdf/2019WzmbmodularHBSWP_118_2019.pdf

Dispan, J. & Schwarz-Kocher, M. (2018). *Digitalisierung im Maschinenbau. Entwicklungstrends, Herausforderungen, Beschäftigungswirkungen, Gestaltungsfelder im Maschinen- und Anlagenbau* (Hans-Böckler-Stiftung (HBS), Hrsg.) (Working Paper Forschungsförderung Nummer 094/September 2018). Düsseldorf. Verfügbar unter https://www.boeckler.de/pdf/p_fofoe_WP_094_2018.pdf

Dumitrescu, R., Gausemeier, J., Slusallek, P., Cieslik, S., Demme, G., Falkowski, T. et al. (2018). *Autonome Systeme* (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. (acatech), Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI) & Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik (IEM), Hrsg.).

Fraunhofer Austria, TÜV Austria Gruppe (Hrsg.). (2016). *Sicherheit in der Mensch-Roboter Kollaboration*.

Fuchs, T. (2006). *Was ist gute Arbeit? Anforderungen aus der Sicht von Erwerbstätigen* (2 Aufl.) (Geschäftsstelle der Initiative Neue Qualität der Arbeit, Hrsg.) (INQA-Bericht 19). Dortmund. Verfügbar unter http://www.inqa.de/SharedDocs/PDFs/DE/Publikationen/inqa-19-was-ist-gute-arbeit.pdf?__blob=publicationFile

Gensicke, M., Tschersich, N. & Hartmann, J. (2012). *BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2011/2012. Strukturkontrolle, Steuerung und Gewichtung der Stichprobe* (TNS Infratest, Hrsg.). München. Verfügbar unter https://www.bibb.de/dokumente/pdf/a22_etb12_methodenberichte_04Gewichtungsbericht_Los__1.pdf

Glatz, R. (2018). *Pressekonferenz AMB 2018*. VDMA Software und Digitalisierung (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), Hrsg.).

Hartmann, E. A., Engelhardt, S. von, Hering, M., Wangler, L. & Birner, N. (2014). *Der iit-Innovationsfähigkeitsindikator. Ein neuer Blick auf die Voraussetzungen von Innovationen* (Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit), Hrsg.) (iit perspektive 16). Verfügbar unter https://www.iit-berlin.de/de/publikationen/der-iit-innovationsfaehigkeitsindikator

Hausmann, R., Hidalgo, C. A., Bustos, S., Coscia, M., Chung, S., Jimenez, J. et al. (2011). *The Atlas of economic complexity. Mapping paths to prosperity*. [Cambridge, Mass.]: Center for International

Development, Harvard University. Verfügbar unter https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30678659/HarvardMIT_AtlasOfEconomicComplexity_Part_I.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1545141483&Signature=1a8PQ3pQ3GaYuHu9zIGQphpVHZc%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DThe_Atlas_of_Economic_Complexity.pdf

Heesen, J., Müller-Quade, J. & Wrobel, S. (2020). *Zertifizierung von KI-Systemen* (Lernende Systeme – Die Plattform für Künstliche Intelligenz, Hrsg.) (Impulspapier).

Hidalgo, C. A. & Hausmann, R. (2009). The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *106*(26), 10570–10575. https://doi.org/10.1073/pnas.0900943106

Hirsch-Kreinsen, H. (2017). *Digitalisierter Maschinenbau. Wandel und Entwicklungschancen qualifizierter Arbeit* (IG Metall, Hrsg.). Frankfurt a. M.

Holler, M. (2013). *Methodenbericht zur Weiterentwicklung des DGB-Index Gute Arbeit in der Erhebungsperiode 2011/2012* (Internationales Institut für Empirische Sozialökonomie gGmbH (inifes), Hrsg.). Stadtbergen. Verfügbar unter http://index-gute-arbeit.dgb.de/veroeffentlichungen/zur-praxis/++co++78aa5846-3690-11e4-b7f7-52540023ef1a

Holler, M. (2017). *Verbreitung, Folgen und Gestaltungsaspekte der Digitalisierung in der Arbeitswelt. Auswertungsbericht auf Basis des DGB-Index Gute Arbeit 2016* (Institut DGB-Index Gute Arbeit, Hrsg.). Berlin. Verfügbar unter http://index-gute-arbeit.dgb.de/++co++1c40dfc8-b953-11e7-8dd1-52540088cada

Institut DGB-Index Gute Arbeit (Hrsg.). (2016). *DGB-Index Gute Arbeit - Der Report 2016. Wie die Beschäftigten die Arbeitsbedingungen in Deutschland beurteilen*. Themenschwerpunkt: Die Digitalisierung der Arbeitswelt. Eine Zwischenbilanz aus der Sicht der Beschäftigten. Berlin. Verfügbar unter http://index-gute-arbeit.dgb.de/veroeffentlichungen/jahresreports/++co++76276168-a0fb-11e6-8bb8-525400e5a74a

Institut DGB-Index Gute Arbeit (Hrsg.). (2018). *DGB-Index Gute Arbeit Der Report 2018. Wie die Beschäftigten die Arbeitsbedingungen in Deutschland beurteilen*. Mit dem Themenschwerpunkt: Arbeit mit Kundschaft, PatientInnen, Lernenden etc. - Interaktionsarbeit. Berlin. Verfügbar unter https://index-gute-arbeit.dgb.de/veroeffentlichungen/jahresreports/++co++2710716a-e72f-11e8-891f-52540088cada

Jerzy, N. (2019). Die 10 größten deutschen Maschinenbauer. *Capital*. Zugriff am 22.04.2020. Verfügbar unter https://www.capital.de/wirtschaft-politik/die-10-groessten-deutschen-maschinenbauer

Kind, S., Hartmann, E. A. & Bovenschulte, M. (2011). *Die Visual-Roadmapping-Methode für die Trendanalyse, das Roadmapping und die Visualisierung von Expertenwissen. Ein Instrument des iit – Institut für Innovation und Technik für den Einsatz in Politik und Wirtschaft zum Management von Innovation und Technologie* (Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH (iit), Hrsg.) (iit perspektive 4). Verfügbar unter https://www.iit-berlin.de/de/publikationen/iit-perspektive-4

Klapper, J., Gelec, E., Pokorni, B., Hämmler, M. & Rothenberger, R. (09/2019). *Potenziale digitaler Assistenzsysteme. Aktueller und zukünftiger Einsatz digitaler Assistenzsysteme in produzierenden Unternehmen.* Stuttgart: Fraunhofer-IAO in Kooperation mit der Memex GmbH. Verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5550798.pdf

Kohl, M. (2019). *Industrie 4.0 + Arbeit 4.0 = Aus- und Weiterbildner 4.0? Auswirkungen von Digitalisierung und neuen Arbeits- und Lernformen auf das Bildungspersonal.* Hochschule der Bundesagentur für Arbeit.

Kuhlmann, M., Splett, B. & Wiegrefe, S. (2018). Montagearbeit 4.0? Eine Fallstudie zu Arbeitswirkungen und Gestaltungsperspektiven digitaler Werkerführung. *WSI-Mitteilungen*, *71*(3), 182–188.

Kuhlmann, M. & Voskamp, U. (2019). *Digitalisierung und Arbeit im niedersächsischen Maschinenbau* (SOFI Arbeitspapier 2019-15). Göttingen: Soziologisches Forschungsinstitut Göttingen an der Georg-August-Universität. Verfügbar unter http://sofi.uni-goettingen.de/fileadmin/user_upload/Workingpaper_Kuhlmann_Voskamp.pdf

Laserscanning Europe GmbH (Hrsg.). (2020). *Laserscanning ist moderne 3D-Vermessung*. Zugriff am 26.04.2020. Verfügbar unter https://www.laserscanning-europe.com/de/laserscanning

Lorenz, E. & Valeyre, A. (2005). Organisational Innovation, Human Resource Management and Labour Market Structure. A Comparison of the EU-15. *Journal of Industrial Relations*, *47*(4), 424–442.
Matthias Opfinger. (2018). *Die Herstellung von Metallerzeugnissen in Deutschland – eine Branchenanalyse* (Ifo Institut, Hrsg.).
Mühlbradt, T., Kuhlang, P. & Finsterbusch, T. (2018). Lernförderliche Arbeitsorganisation in der Industrie 4.0. In S. Wischmann & E. A. Hartmann (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung* (S. 195–205). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
Paul, H. & Wollny, V. (2014). *Instrumente des strategischen Managements. Grundlagen und Anwendungen* (2., aktualisierte und erw. Aufl.). München: De Gruyter Oldenbourg.
Pfeiffer, S., Lee, H., Zirnig, C. & Suphan, A. (2016). *Industrie 4.0 - Qualifizierung 2025* (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), Hrsg.). Frankfurt a. M.
PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (Hrsg.). (2019). *PwC Maschinenbau-Barometer Q3/2019. Schwerpunkt: Mitarbeiter und Weiterbildung*. Verfügbar unter https://www.pwc.de/de/industrielle-produktion/pwc-maschinenbau-barometer-q3-2019.pdf
PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (Hrsg.). (2020). *PwC Maschinenbau-Barometer Q1/2020. Schwerpunkt: Investitionen & Coronavirus*. Verfügbar unter https://www.pwc.de/de/industrielle-produktion/pwc-maschinenbau-barometer-q1-2020.pdf
Quest Trend Magazin (Hrsg.). (2019). *Branchenstruktur des deutschen Maschinenbaus 2018. Die drei Gruppen in der Branchenstruktur des Maschinenbaus und ihre Positionen*. Verfügbar unter https://www.quest-trendmagazin.de/maschinenbau/branchenstruktur/branchenstruktur-des-maschinenbaus.html
Rechenbach architecture (Hrsg.). (2020). *3D Laserscanning für den Anlagenbau*. Verfügbar unter https://www.laser-scanning-architecture.com/besser-bauen/fabrik-anlagenbau/
Rohrbach-Schmidt, D. (2009). *The BIBB/IAB- and BIBB/BAuA-Surveys of the Working Population on Qualification and Working Conditions in Germany* (Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), Hrsg.) (BIBB-FDZ Daten- und Methodenberichte 1/2009). Bonn. Verfügbar unter https://www.bibb.de/dokumente/pdf/BIBB_BAuA_2006_Data_Manual_neu.pdf
Rohrbach-Schmidt, D. & Hall, A. (2013). *BIBB/BAuA-Erwerbstätigenbefragung 2012* (Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), Hrsg.) (BIBB-FDZ Daten- und Methodenberichte 1/2013). Bonn. Verfügbar unter https://www.bibb.de/veroeffentlichungen/de/publication/show/7093
Rörig, O. & Döble, M. (2018). *Supply Chain AuditMaschinenbau. Potenziale für Maschinenbau-Unternehmen und ihre Zulieferindustrie* (Dr. Wieselhuber & Partner GmbH, Hrsg.).
Roth, I. (2017). *Digitalisierung und Arbeitsqualität. Eine Sonderauswertung auf Basis des DGB-Index Gute Arbeit 2016 für den Dienstleistungssektor* (Vereinte Dienstleistungsgewerkschaft (ver.di), Hrsg.). Berlin. Verfügbar unter http://innovation-gute-arbeit.verdi.de/++file++592fd69d086c2653a7bb5b05/download/digitalverdi_web.cleaned.pdf
Ruhr-Universität Bochum. (2000). *NIFA Panel. Panelstudie zur technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und sozialen Entwicklung beim Einsatz flexibler Arbeitssysteme im Maschinenbau*. CD-ROM. Bochum.
Schäfer, E. (2009). *Warum lernförderliche Arbeitsgestaltung?* (Hans-Böckler-Stiftung (HBS), Hrsg.). Verfügbar unter https://www.boeckler.de/pdf/mbf_nmp_lernfoerd_arbeit_einfuehrung.pdf
Senderek, R. (2018). Lernförderliche Arbeitssysteme für die Arbeitswelt von morgen. In S. Wischmann & E. A. Hartmann (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung* (S. 87–105). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
Statista GmbH (Hrsg.). (2019a). *Anzahl der Beschäftigten im deutschen Maschinenbau in den Jahren 1991 bis 2018*. Verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/30821/umfrage/beschaeftigte-im-maschinenbau-in-deutschland-seit-1991/
Statista GmbH (Hrsg.). (2019b). *Maschinenbau in Deutschland*. Verfügbar unter https://de.statista.com/themen/256/maschinenbau/
Statista GmbH (Hrsg.). (2019c). *Umsatzanteile der vier größten Industriezweige am Verarbeitenden Gewerbe insgesamt in Deutschland im Jahr 2018*. Verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152392/umfrage/umsatzanteile-der-groessten-industriezweige-in-deutschland/

Statista GmbH (Hrsg.). (2020). *Anzahl der Beschäftigten im Maschinenbau in Deutschland nach Sektoren in den Jahren 2018 und 2019*. Verfügbar unter https://de.statista.com/statistik/daten/studie/236658/umfrage/beschaeftigtenzahl-im-maschinenbau-in-deutschland-nach-sektoren/

Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige*. Verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/GueterWirtschaftklassifikationen/klassifikationwz2008_erl.pdf?__blob=publicationFile

Statistisches Bundesamt. (2017). *Produzierendes Gewerbe und Dienstleistungen im Überblick* (Statistisches Jahrbuch). Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (Destatis). Verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/ProdGewerbeDienstleistungen.pdf?__blob=publicationFile

Tiemann, M. (2009). *Wissensintensive Berufe. Empirische Forschungsarbeit* (Bundesinstitut für Berufsbildung (BIBB), Hrsg.) (Schriftenreihe des Bundesinstituts für Berufsbildung Heft 114). Bonn. Verfügbar unter https://www.bibb.de/veroeffentlichungen/en/publication/download/6176

Urban, H.-J. (2019). *Gute Arbeit in der Transformation. Über eingreifende Politik im digitalisierten Kapitalismus*. Hamburg: VSA: Verlag.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Hrsg.). (2017). *4. Ordnungspolitisches Kolloquium des VDMA und der IMPULS-Stiftung. Das Produktivitätsparadoxon im Maschinen- und Anlagenbau*.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Hrsg.). (2019). *Maschinenbau in Zahl und Bild 2019*. Frankfurt a. M. Verfügbar unter https://www.vdma.org/documents/14969753/26250981/Maschinenbau+in+Zahl+und+Bild+2019.pdf/fe7cbf9d-3873-d927-4d98-c979dac2b5f0

Vorgrimler, D. & Wübben, D. (2003). *Die Delphi-Methode und ihre Eignung als Prognoseinstrument* (Statistisches Bundesamt (Destatis), Hrsg.) (Wirtschaft und Statistik 8/2003). Wiesbaden.

Wischmann, S. & Hartmann, E. A. (2018). Prognostizierte Veränderungen der gestaltbaren Arbeitssystemdimensionen. In S. Wischmann & E. A. Hartmann (Hrsg.), *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung* (S. 9–31). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau. (2018). *Technology Scout* (2nd Edition) (Working Group Additive Manufacturing, Hrsg.). Frankfurt a. M.

Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (Hrsg.). (2020). *Innovationen Branchenreport Maschinenbau 2019*. Verfügbar unter http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/brarep_inno/issue/2019/17_maschinenbau2019.pdf

Zika, G., Helmrich, R., Maier, T., Weber, E. & Wolter, M. I. (2018). *Arbeitsmarkteffekte der Digitalisierung bis 2035. Regionale Branchenstruktur spielt eine wichtige Rolle* (Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit (IAB), Hrsg.) (IAB-Kurzbericht 9/2018). Verfügbar unter http://doku.iab.de/kurzber/2018/kb0918.pdf