

FORSCHUNGSBEIRAT



*Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0*

## **Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen**

**Empfohlene Zitierweise:**

Forschungsbeitrag der Plattform Industrie 4.0/acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen*, 2022, DOI: 10.48669/fb40\_2022-03

## Impressum

**Herausgeber**

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

**Projektbüro**

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften  
Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München

**Autorinnen und Autoren**

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU:  
Dr.-Ing. Arvid Hellmich, Florian Zumpe, Martin Zumpe, Marc Münnich,  
Torben Wiese, Thomas Büttner, Prof. Dr.-Ing. Steffen Ihlenfeldt  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA:  
Petra Foith-Förster, Michael Trierweiler, Daniel Ranke,  
Patricia Berkhan, Sina Rzesnitzeck, Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

**Koordination**

Paul Grünke, acatech  
Lisa Hubrecht, acatech

**Redaktion und Lektorat**

Karola Klatt, Berlin

**Gestaltung und Produktion**

GROOTHUIS. Gesellschaft der Ideen und Passionen mbH  
für Kommunikation und Medien, Marketing und Gestaltung;  
groothuis.de

**Bildnachweis**

Getty Images/iStockphoto (yoh4nn)  
Valerie Frenzel, Christian Hermeling  
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und  
Umformtechnik IWU

**Stand**

Juni 2022

---

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

 **acatech**

DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



**Fraunhofer**  
IWU



**Fraunhofer**  
IPA

---

Der **Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0** berät als strategisches und unabhängiges Gremium die Plattform Industrie 4.0, ihre Arbeitsgruppen und die beteiligten Bundesministerien, insbesondere das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Als **Sensor** von Entwicklungsströmungen beobachtet und bewertet der Forschungsbeirat die Leistungsprofilentwicklung von Industrie 4.0 und versteht sich als **Impulsgeber** für künftige Forschungsthemen und Begleiter beziehungsweise Berater zur Umsetzung von Industrie 4.0. Dabei konzentriert sich der Forschungsbeirat inhaltlich auf folgende **Themenfelder im Kontext von Industrie 4.0**:

- Wertschöpfungsnetzwerke
- Technologische Wegbereiter
- Neue Methoden und Werkzeuge
- Arbeit und Gesellschaft

Hier setzen die **Expertisen des Forschungsbeirats** an. Vor dem Hintergrund der Themenfelder werden klar umrissene Problemstellungen aufgezeigt, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe definiert und Handlungsoptionen für eine erfolgreiche Gestaltung von Industrie 4.0 abgeleitet.

Die Expertisen liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Autorinnen und Autoren. Alle bisher erschienenen Publikationen des Forschungsbeirats stehen unter [www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/](http://www.acatech.de/projekt/forschungsbeirat-industrie-4-0/) zur Verfügung.

# Inhalt

<b>Management Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Grundlagen zu Matrixproduktionssystemen</b> .....	<b>7</b>
2.1. Definition Matrixproduktionssystem.....	7
2.2. Vergleich der Matrixproduktion mit anderen Organisationsformen der Fertigung.....	9
<b>3. Methodik zur Erstellung der Expertise</b> .....	<b>12</b>
<b>4. Reifegradmodell und Gestaltungsfelder einer Matrixproduktion</b> .....	<b>14</b>
4.1. Reifegradmodell der Matrixproduktion.....	14
4.2. Gestaltungsfelder einer Matrixproduktion.....	16
4.3. Charakteristische Ausprägungen einer Matrixproduktion.....	20
<b>5. Ergebnisse der Befragung</b> .....	<b>22</b>
5.1. Motivation und Treiber zur Einführung von Matrixproduktionssystemen.....	22
5.1.1. Externe Treiber.....	22
5.1.2. Interne Treiber.....	22
5.1.3. Kriterien zur Bewertung und Entscheidung .....	23
5.2. Matrixproduktionssysteme in der Anwendung.....	23
5.2.1. Einordnung der befragten Anwender .....	24
5.2.2. Entwicklungspfade zur Matrixproduktion .....	30
5.2.3. Vorteile einer Matrixproduktion in den Lebenszyklusphasen.....	35
5.3. Technologien und Werkzeuge für Matrixproduktionssysteme.....	36
5.3.1. Reifegrade der am Markt verfügbaren Schlüsseltechnologien .....	36
5.3.2. Feinanalyse der Schlüsseltechnologien .....	37
<b>6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b> .....	<b>41</b>
6.1. Fazit aus den Befragungsergebnissen.....	41
6.2. Forschungsbedarfe.....	42
<b>Glossar</b> .....	<b>45</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>48</b>
Anhang A: Reifegradmodell.....	49
Anhang B: Charakteristika der befragten Anwender .....	56
<b>Literatur</b> .....	<b>61</b>
<b>Mitglieder des Forschungsbeirats</b> .....	<b>64</b>

# Management Summary

**Cyber-physische Matrixproduktionssysteme** zeichnen sich durch einen modularen Aufbau, eine flexible Steuerung und Verkettung der Produktionsressourcen sowie eine hohe informationstechnische Vernetzung aus. Sie werden von Expertinnen und Experten der Produktionstechnik als Lösungsansatz für eine wirtschaftliche Produktion in einem herausfordernden Marktumfeld mit sinkenden Stückzahlen, steigender Variantenvielfalt und schlechter Prognostizierbarkeit von Kundenbedarfen diskutiert und sollen eine hohe Produktivität in der Herstellung verschiedener Produktvarianten ermöglichen. Gleichzeitig soll eine hohe Resilienz beispielsweise gegenüber Unsicherheiten in der Lieferkette erreichbar sein. Eine höhere Komplexität gegenüber klassischen Produktionssystemen sowie fehlende Erfahrungen zu geeigneten Einsatzfeldern und deren Wirtschaftlichkeit stellen aktuell jedoch Hemmnisse bei der Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen in der industriellen Praxis dar.

Die vorliegende, vom Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 initiierte Expertise ermittelt den Umsetzungsstand von Matrixproduktionssystemen, fasst Erkenntnisse zur Einführung und zum Betrieb von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen zusammen und stellt sie der deutschen Industrie zur Verfügung. Außerdem werden Handlungsoptionen für die Industrie abgeleitet sowie der anwendungsorientierte Forschungsbedarf aufgezeigt. Dazu werden drei zentrale Fragen beantwortet:

- Frage 1: Welche Ansätze und Methoden zur Gestaltung und Umsetzung von Matrixproduktionssystemen sind in der Industrie bereits entwickelt und wie ist der Umsetzungsstand?
- Frage 2: Wie unterstützt Industrie 4.0 bei der Umsetzung und dem Betrieb von Matrixproduktionssystemen und welche digitalen Werkzeuge kommen zur Unterstützung bereits zum Einsatz?
- Frage 3: Welche Strategien gibt es für die Einführung von Matrixproduktionssystemen, welche Herausforderungen bestehen dabei und welche Forschungsbedarfe lassen sich zur weiteren Unterstützung der Industrie identifizieren?

Dazu wurde nach einer Analyse des Stands der Technik die Verbreitung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen in der deutschen Industrie untersucht. Knapp dreißig Unternehmen – Anwender von Matrixproduktionssystemen und Technologieanbieter – wurden ausführlich befragt, ihre Produktionssysteme und Lösungen analysiert und in ein eigens entwickeltes **Reifegradmodell** eingeordnet. Bei den Komponenten- und Technologieanbietern erfolgte die Einordnung hinsichtlich des Reifegrads ihrer Werkzeuge, Technologien und Produkte als Bestandteile einer realisierten cyber-physischen Matrixproduktion. Anhand von **Good Practice-Beispielen** zeigt die vorliegende Expertise erfolgreiche Umsetzungen sowie bewältigte Herausforderungen und angewandte Lösungen. Neben der grundsätzlichen Bewertung erfolgte

eine **Systematisierung bislang umgesetzter Matrixproduktionssysteme**, basierend auf den Antworten der befragten Personen. Mögliche **Handlungsoptionen** für produzierende Unternehmen in Form von potenziellen Entwicklungspfaden sowie **zukünftige Forschungsbedarfe** wurden aus den Ergebnissen der Analyse abgeleitet und runden sie ab.

Bereits realisierte cyber-physische Matrixproduktionssysteme konnten hauptsächlich in der Automobilindustrie, inklusive Zulieferer, und der Elektronik- und Halbleiterindustrie identifiziert werden. Die Auswertung der Interviews mit Anwendern ergab eine generelle **Verbesserung** der von den befragten Unternehmen **priorisierten Kennzahlen** im Vergleich zu ihren vorherigen Produktionssystemen. Die Einführung von Matrixproduktionssystemen erlaubte Änderungen im laufenden Betrieb, die mit vorherigen Systemen nicht möglich gewesen wären. Die analysierten Matrixproduktionssysteme ließen sich in zwei Ausprägungen gliedern:

- **Software-definierte Matrixproduktionssysteme** besitzen modulare Strukturen und sind mit einer automatisierten, optimierten Prozesssteuerung ausgestattet. Sie sind meist aufgrund von technologischen Restriktionen oder des Hardware-Aufbaus der Produktionsressourcen nicht rekonfigurierbar, zeichnen sich aber durch einen sehr hohen Automatisierungsgrad aus. Hauptmotivatoren für die Umsetzung der Matrixproduktion sind hier die Verkürzung von Innovations- und Produktlebenszyklen sowie der steigende Wettbewerb. Insbesondere in der Halbleiter- und Elektronikfertigung und vereinzelt in der mechanischen Fertigung wurde diese Kategorie genannt. Software-definierte Matrixproduktionssysteme haben sich häufig aus klassischen Werkstattfertigungen entwickelt, die um eine komplexe Werkstattsteuerung ergänzt wurden.
- **Cyber-physische Matrixproduktionssysteme** besitzen rekonfigurierbare, modulare Strukturen, die mit einer digital optimierenden Steuerung verbunden sind. Umsetzungsbeispiele für diese Ausprägung einer Matrixproduktion finden sich sowohl in der Serienfertigung vieler Varianten in sehr hohen Stückzahlen als auch in der Produktion kleiner Stückzahlen und für den Anlauf neuer Produktvarianten. Die Systeme wurden etabliert, um auf eine hohe Änderungsdynamik und gesteigerte Anforderungen des Marktes, beispielsweise nach individuellen Produkten, zu reagieren. Häufig lösten Matrixproduktionssysteme in diesem Feld starr verkettete Liniensysteme ab und zeigen einen hohen Grad der Standardisierung in der Anlagentechnik. Bei den meisten der in diesem Feld gefundenen Produktionssysteme handelt es sich um Montagesysteme.

Die Analyse der Technologieanbieter ergab, dass bereits in allen Gestaltungsfeldern einer Matrixproduktion **reife Standardlösungen** für die Umsetzung von Matrixproduktionssystemen am Markt verfügbar oder angekündigt sind. Technologien und Werkzeuge

werden von den Ausrüstern meist als Einzellösungen für bestimmte Gestaltungsfelder angeboten. Es konnte jedoch **kein Gesamtanbieter** gefunden werden, der die nötige Anlagentechnik und Prozessautomatisierung in allen steuerungsrelevanten Gestaltungsfeldern bereitstellt. Unternehmen, die eine Matrixproduktion umsetzen möchten, müssen also nach wie vor die Integrationsleistung vieler Einzelsysteme erbringen. Es wurde zudem deutlich, dass cyber-physische Matrixproduktionen nur gering verbreitet sind und in wenigen Branchen eingesetzt werden. Die wichtigsten Forschungsbedarfe gibt es bei Werkzeugen für die Gestaltung, Planung und Steuerung von Matrixproduktionssystemen einschließlich digitaler Zwillinge, der Einbindung des Menschen in entsprechende

Systeme sowie der Standardisierung von Hard- und Software. Der Hardwareaspekt ist aufgrund längerer Entwicklungszyklen dabei besonders zu adressieren. Herausforderungen, denen sich die Beteiligten stellen müssen, sind die Bildung und Etablierung tragfähiger Geschäftsmodelle sowie die inhaltliche, organisatorische und verwertungstechnische Vernetzung.

Die Expertise zeigt, dass Matrixproduktionssysteme **eine wirtschaftliche Produktion bei herausfordernden Marktanforderungen** ermöglichen und dass diese bereits in unterschiedlichen Reifegradstufen erfolgreich in der industriellen Umsetzung und Anwendung sind.

# 1. Einleitung

## Ausgangslage und Ziele

**Cyber-physische Produktionssysteme**<sup>1</sup> werden im akademischen Kontext seit circa 2011 verstärkt in den Blick genommen. Sie gelten als eine praktische Umsetzungsform von Industrie 4.0-Ansätzen auf dem Hallenboden.<sup>2</sup> Ihre erweiterten Möglichkeiten, insbesondere in den Bereichen Vernetzung, Erhebung von Daten und Auslagerung von Funktionen hin zu dezentralen Produktionsmitteln und Steuerungen, entfachten die Diskussion um alternative Produktionsinfrastrukturen und -layouts in einer neuen Qualität.<sup>3</sup> Dies gilt vor allem für veränderungsfähige Produktionssysteme, die konzeptionell seit Langem bekannt sind. Durch die voranschreitende Digitalisierung entwachsen sie dem Konzeptstadium und werden zunehmend praktisch umgesetzt. Die Matrixproduktion<sup>4</sup>, in der Literatur auch als „Modulare Montage“<sup>5</sup> oder „frei verkettetes Montagesystem“<sup>6</sup> bezeichnet, ist dabei eine Ausprägung veränderungsfähiger Produktionssysteme, deren Potenzial Expertinnen und Experten als sehr hoch einschätzen, wenn Schwankungen in der Produktionsmenge, wechselnde Produkteigenschaften und variierende Losgrößen die Auftragsbücher bestimmen.<sup>7</sup>

Exakt diesen Randbedingungen unterliegt der Markt aktuell: Dynamische Kundenanforderungen, einhergehend mit sinkenden Losgrößen und einer steigenden Produktvarianz, sowie steigender Rationalisierungsdruck aufgrund zunehmenden Wettbewerbs bestimmen das Handeln der Unternehmen. Aktuelle Beispiele sind der Trend zu alternativen Antriebssystemen im PKW-Sektor sowie die Rückkehr zu regionalen Lieferketten infolge von Unsicherheiten in den Wertschöpfungsnetzwerken.

Abbildung 1 verdeutlicht, dass bestehende Produktionssysteme für den Trend der Individualisierung nicht mehr passend erscheinen. Neue, flexiblere Fertigungskonzepte mit hoher Produktivität

werden gefordert. In diesem Zusammenhang entstehen Matrixproduktionssysteme, die für Produkte und Produktfamilien von differierendem Produktvolumen pro Variante gleichermaßen geeignet sind.

Noch bestehen Hürden, die die Umsetzung solcher Matrixproduktionssysteme in den Unternehmen hemmen. Diese reichen von der Gestaltung und Auslegung entsprechender Architekturen über Fragen nach den Schnittstellen, der Steuerung und Vernetzung bis hin zur Integration des Menschen in die Bedienung solcher Systeme.

Die vorliegende Expertise möchte deshalb ein aktuelles Bild des Umsetzungsstands in den wesentlichen Gestaltungsfeldern einer Matrixproduktion anhand eines Reifegradmodells vermitteln. Außerdem soll die Darstellung von Umsetzungsbeispielen als Good Practices helfen, Hemmnisse zu überwinden. Aktuelle Realisierungen der Matrixproduktion in der Industrie werden beschrieben und eingeordnet, Motivationen und Herausforderungen bei der Umsetzung identifiziert sowie Handlungsoptionen für die Umsetzung und weitere Forschungsbedarfe herausgearbeitet.

## Aufbau der Expertise

Im folgenden Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen zu Matrixproduktionssystemen erläutert und ein Vergleich zu anderen Produktionssystemen hergestellt. In Kapitel 3 wird das methodische Vorgehen zur Erarbeitung der Expertise verdeutlicht. In Kapitel 4 wird das entwickelte Reifegradmodell vorgestellt sowie auf charakteristische Ausprägungsformen von Matrixproduktionssystemen eingegangen. In Kapitel 5 wird die Auswertungen der Unternehmensbefragungen von den Anwendern und Ausrüstern dargestellt. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 6 in einem Fazit zusammengefasst und identifizierter Forschungsbedarf aufgezeigt.

1 Die orangefarbenen Begriffe sind im Glossar erläutert.

2 Vgl. Kagermann et al. 2011, S. 2.

3 Vgl. Bauernhansl 2014a, S. 17.

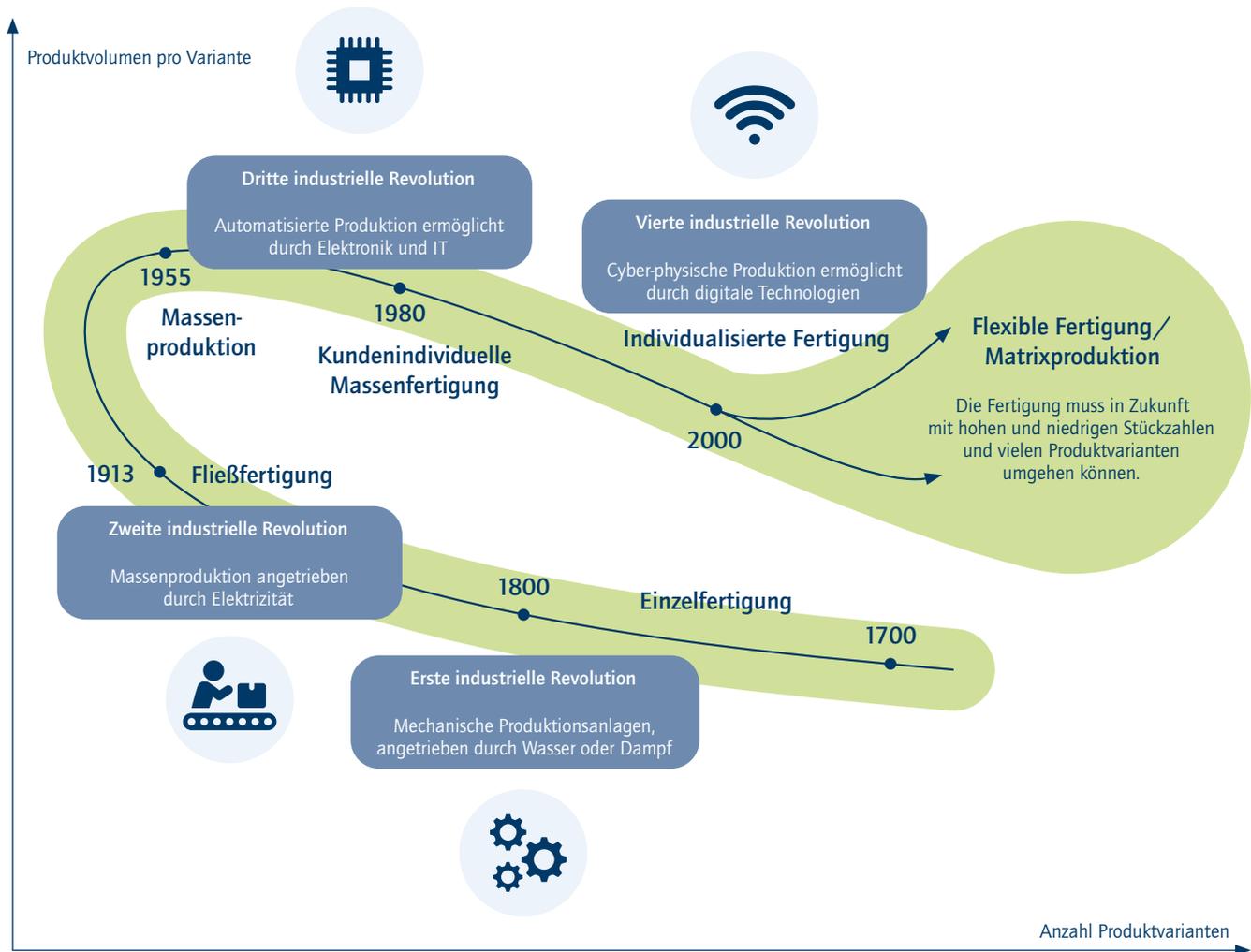
4 Vgl. Greschke/Herrmann 2014, S. 688, Huber 2018, S. 34, KUKA AG 2020.

5 Vgl. Poll 2016, Beuthner 2017, Herkommer 2017.

6 Vgl. Göppert et al. 2018, S. 151, Bauernhansl 2014b, S. 275, Foith-Förster/Bauernhansl 2016, S. 230.

7 Vgl. Bauernhansl 2015, Kern et al. 2015, Küpper et al. 2018, Foith-Förster et al. 2017, Hofmann et al. 2019.

Abbildung 1: Produktionsparadigmen im Wandel der Zeit



Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an Koren 2010

## 2. Grundlagen zu Matrixproduktionssystemen

Im folgenden Kapitel werden grundlegende Aspekte in Bezug auf Matrixproduktionssysteme beschrieben. Dazu werden notwendige Grundbegriffe definiert und erläutert, die Matrixproduktion charakterisiert und mit anderen Organisationsformen von Produktionssystemen verglichen.

### 2.1. Definition Matrixproduktionssystem

#### Matrixproduktionssystem

Ein Matrixproduktionssystem ist ein Produktionssystem, das räumlich ähnlich einer Matrix angeordnet ist.<sup>8</sup> Es besteht aus frei anfahrbaren und logistisch individuell beplanbaren **Prozessmodulen**, die über einen flexiblen Materialfluss miteinander verbunden sind.<sup>9</sup>

Ein Matrixproduktionssystem ermöglicht durch seine modulare Struktur die Herstellung **individualisierter Produkte** und eine kleinstufige Skalierung der Auftragsstückzahlen. Jeder Auftrag durchläuft einen spezifischen Pfad durch die Produktionsstruktur. Dies ermöglicht eine Taktunabhängigkeit. Die Auftragssteuerung kann während des Betriebs ad hoc die **Operationsreihenfolge** und **Auftragsverteilung** festlegen. Die Steuerung des Systems wird durch die Integration von cyber-physischen Elementen unterstützt.

Eine flexible Infrastruktur, Versorgungstechnik sowie Vernetzung begünstigen eine aufwandsarme Rekonfiguration, um sich kontinuierlich an veränderte Bedingungen anzupassen. Diese Bestandteile machen Matrixproduktionssysteme **resilient** und veränderungsfähig. **Veränderungsfähigkeit** beschreibt die Möglichkeit, Produktionseinrichtungen an neue Anforderungen anzupassen. Für die Ebene von Produktionssystemen werden im Regelfall vier Eigenschaften unterschieden – Wandlungsfähigkeit, Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Umrüstbarkeit. Diese Eigenschaften werden im Folgenden genauer erläutert.

#### Begriffe der Veränderungsfähigkeit von Produktionseinrichtungen

**Wandlungsfähigkeit** ist die taktische Fähigkeit einer ganzen Fabrik, sich an neue Produktgruppen und Mengen anzupassen. Im Regelfall erfordert dies auch Eingriffe in die Produktionssysteme, die entsprechend flexibel, rekonfigurierbar und umrüstbar gestaltet sein müssen.<sup>10</sup>

**Flexibilität** bezeichnet die operative Fähigkeit eines Produktionssystems, mit geringstem Kosten- und Zeitaufwand verschiedene Systemzustände innerhalb eines vorhandenen Flexibilitätskorridors einzunehmen (siehe Abbildung 2).<sup>11</sup>

**Rekonfigurierbarkeit** bezeichnet die taktische Fähigkeit eines Produktionssystems, sich an neue, ähnliche Produkt- und Mengenanforderungen anzupassen.<sup>12</sup> Wie Abbildung 2 zeigt, kann darüber der sogenannte Flexibilitätskorridor verschoben werden.<sup>13</sup>

**Umrüstbarkeit** bezieht sich auf die operative Fähigkeit einer einzelnen Station, sich auf bekannte Anforderungen innerhalb kurzer Zeit einstellen zu können.<sup>14</sup>

Da im Kontext der Matrixproduktion besonders die Veränderungsklassen Rekonfigurierbarkeit und Flexibilität von Bedeutung sind, soll deren Zusammenhang genauer erläutert werden. Dazu dient das in Abbildung 2 dargestellte Diagramm. Hier ist eine Wandlungsdimension, zum Beispiel Stückzahl, über die Zeit abgebildet. Dabei wird die Flexibilität über einen Korridor definiert, welcher die im operativen Betrieb notwendige Veränderungsfähigkeit bereitstellt. Für tiefergehende Veränderungen kann Rekonfiguration genutzt werden, um den Flexibilitätskorridor zu verschieben, damit beispielsweise deutlich höhere Stückzahlen produziert werden können.

8 Vgl. Greschke 2015, S. 119.

9 Vgl. Kern 2021, S. 134.

10 Vgl. Wiendahl et al. 2014b, S. 140.

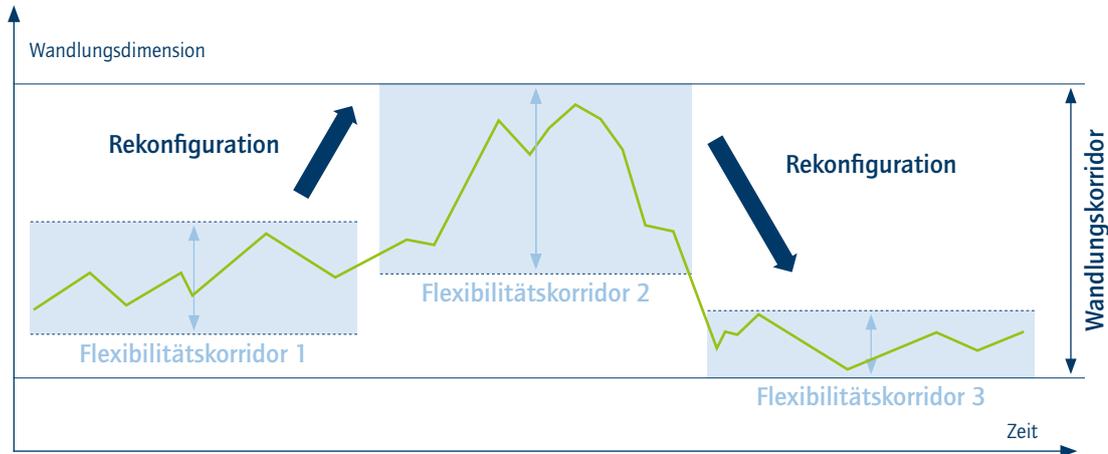
11 Vgl. Toni/Tonchia 1998, S. 1589, Zäh et al. 2005, S. 4, Wiendahl et al. 2014b, S. 140.

12 Vgl. Wiendahl et al. 2014b, S. 140.

13 Vgl. Azab et al. 2013, S. 111.

14 Vgl. Wiendahl et al. 2014b, S. 139.

Abbildung 2: Flexibilität und Rekonfiguration

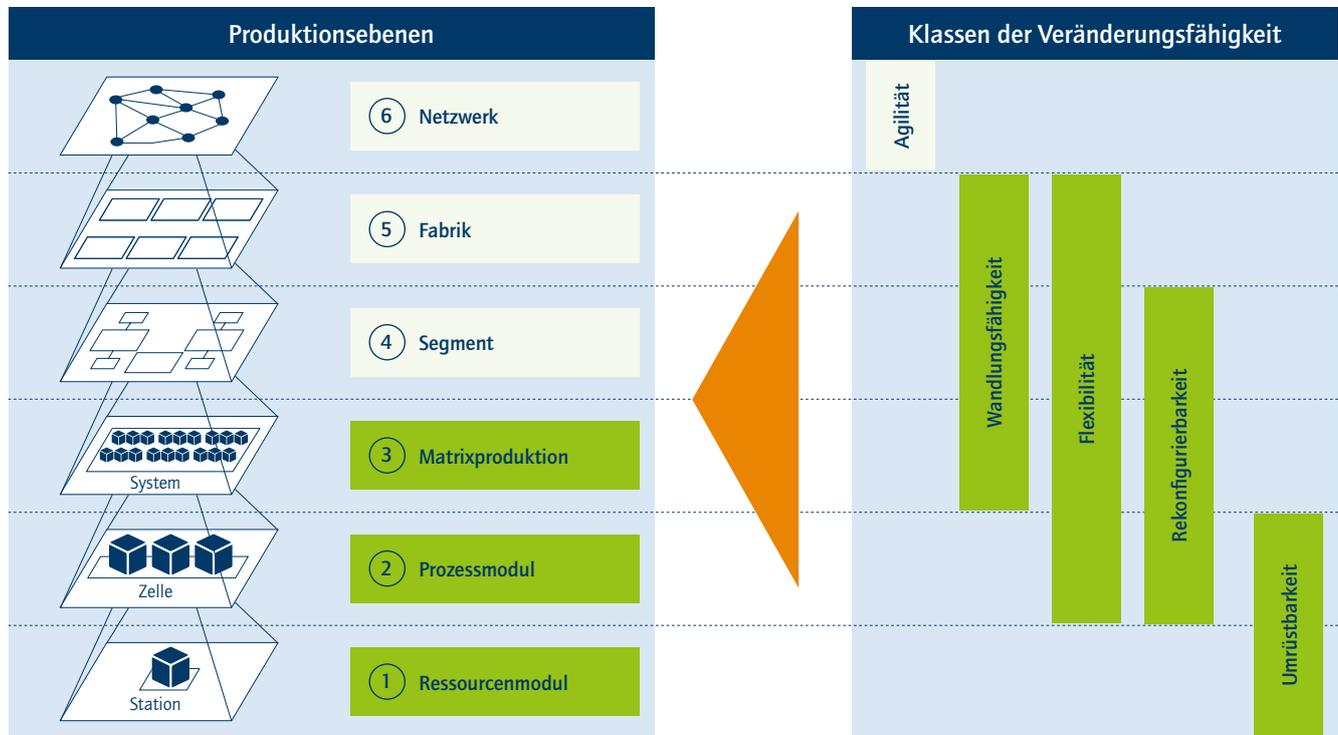


Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an Zäh et al. 2005, S. 4, Azab et al. 2013, S. 111

In der folgenden Abbildung 3 werden die Klassen der Veränderungsfähigkeit den sogenannten Produktionsebenen zugeordnet. Die Produktionsebenen dienen der Strukturierung des Gesamtsystems einer Produktion. Innerhalb der Expertise wird als höchstes Level die Ebene 3 betrachtet, da sich in dieser Ebene

Matrixproduktionssysteme einordnen. Um deren Teilelemente zu beschreiben, werden zusätzlich die Ebene 2, Prozessmodule, sowie Ebene 1, Ressourcenmodule, betrachtet. Die Fokussierung auf diese drei Ebenen mit den zugehörigen vier Klassen der Veränderungsfähigkeit wird über die farbliche Hervorhebung verdeutlicht.

Abbildung 3: Produktionssystemebenen mit den Klassen der Veränderungsfähigkeit



Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an Wiendahl et al. 2014b, S. 139

### Prozessmodul

Ein Prozessmodul ist die kleinste aus logistischer Sicht frei anfahrbare und unabhängig beplanbare Produktionsressource, die mehrere Prozessschritte ausführt.<sup>15</sup>

Prozessmodule sind autark betriebsfähig und können als geschlossene Einheit ausgegliedert, vervielfältigt, rekonfiguriert und verlagert werden. Ihre Größe und Komplexität hängt von der Produktionsaufgabe, von ihrem Funktionsumfang und von der Gestaltung der Prozessmodule ab. Je nach Funktionsumfang und Gestaltung können Prozessmodule autarke Zellen, zum Beispiel Einzelarbeitsplätze, Roboterzellen oder Bearbeitungszentren, sein. Sie können aber auch in sich verkettete Einheiten, wie Linienabschnitte oder U-Linien, oder eine Kombination aus diesen sein.<sup>16</sup>

Gemäß dieser Definition belegt ein Prozessmodul in der Ebenenbetrachtung von Produktionssystemen der Abbildung 3 die Zellebene. Ein Prozessmodul ist in sich ebenfalls modular aufgebaut. In der Regel besteht es aus mehreren **Ressourcenmodulen**.

### Ressourcenmodul

Ressourcenmodule führen wertschöpfende, handhabende oder andere unterstützende Aufgaben aus.<sup>17</sup> Aus logistischer Sicht sind sie nicht individuell beplanbar.

Beispiele für Ressourcenmodule sind einzelne Stationen, Betriebsmittel, Beschäftigte, aber auch Werkzeuge oder Handhabungseinrichtungen. Sie befinden sich in der Ebenenbetrachtung auf der untersten Stationsebene der Produktion. Aus Sicht der Logistik sind diese Betriebsmittel oder Stationen nicht individuell beplanbar, wenn sie mit anderen Ressourcenmodulen verkettet in einer Einheit verbunden sind. Sind Betriebsmittel oder Stationen dagegen einzeln und frei anfahrbar im Produktionssystem vorhanden und stehen der Auftragsplanung für eine individuelle logistische Beplanung zur Verfügung, so handelt es sich nicht um Ressourcenmodule, sondern Prozessmodule.

## 2.2. Vergleich der Matrixproduktion mit anderen Organisationsformen der Fertigung

Im Folgenden werden Matrixproduktionssysteme mit anderen Organisationsformen der Fertigung anhand von Kriterien der Gestaltung der Aufbauorganisation (Struktur), der Ablauforganisation (Prozesse) sowie der produktbezogenen Einsatzbereiche (Markt) verglichen. Welche Ausprägung der Kriterien bei cyber-physischen

Matrixproduktionen in Abgrenzung zu anderen Produktionssystemen vorliegen, ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

### Einordnung der Matrixproduktion

Cyber-physische Matrixproduktionssysteme sind aus flexibel verketteten, ortsfesten Prozessmodulen aufgebaut. Ein Auftrag durchläuft während der Produktion mehrere dieser stationären Prozessmodule, die von ortsflexibel einsetzbaren Arbeitskräften bedient werden. Bei einer hochdynamisch ausgeprägten Systemstruktur geht eine cyber-physische Matrixproduktion in eine fluide Produktion über. Im Fall der fluiden Produktion sind nicht nur das Produktionsobjekt und die Arbeitskräfte beweglich, sondern auch die Betriebsmittel, die während des Auftragsdurchlaufs konfiguriert werden.<sup>18</sup> In einer fluiden Produktion ist somit nur noch das Gebäude stationär, während alle anderen zur Leistungserstellung benötigten Produktionsressourcen beweglich sind.

Demgegenüber zeichnen sich klassische Produktionssysteme durch eine geringere Dynamik ihrer Systemstrukturen aus. Produktionslinien sind fest verkettete Systeme mit einem Fokus auf einen spezifischen Zweck und damit reduziertem Funktionsumfang sowie einer unidirektionalen, festen Verkettung. Eine etwas höhere Flexibilität bietet die Reihenfertigung, die das Auslassen von einzelnen Stationen der Linie erlaubt, aber keine Rückflüsse zulässt und damit eine teilflexible Verkettung aufweist. Werkstatt- und Gruppenfertigung sind flexibel verkettete Produktionssysteme mit starren Betriebsmitteln, welche die Produktionsobjekte im Auftragsdurchlauf passieren und von ortsflexiblen Arbeitskräften bedient werden.

### Funktionsumfang der Prozessmodule

Eine cyber-physische Matrixproduktion sieht eine bedarfsorientierte Rekonfiguration des Funktionsumfangs ihrer Prozessmodule vor. Der Zeitraum zwischen zwei Rekonfigurationen kann einige Monate, eine Woche oder auch nur wenige Stunden umfassen. Ein Weiterproduzieren des nicht von der Rekonfiguration betroffenen Subsystems ist dabei möglich – wenn auch mit entsprechend reduzierter Kapazität. In einer fluiden Produktion erfolgt die Konfiguration des Systems noch kurzzyklischer, ad hoc je Auftrag. In klassischen Organisationsformen, wie Einzelplatzsystemen, Werkstattfertigung, Gruppenfertigung und Linienfertigung, sind die Funktionsumfänge der Betriebsmittel dagegen fest definiert. Eine Anpassung dieser Systeme ist nur mit großem Aufwand möglich und bedingt einen generellen Systemumbau, der in der Regel einen Stillstand des gesamten Produktionssystems nach sich zieht.

Die Prozessmodule einer cyber-physischen Matrixproduktion werden prozessorientiert konfiguriert. Der Aufbau einer Linienproduktion folgt hingegen dem Produktaufbau ausgewählter

15 Vgl. Kern 2021, S. 134–135.

16 Vgl. Bauernhansl 2014a, S. 21, Aurich et al. 2003, S. 216, Baudzus/Krebs 2012, S. 345.

17 Vgl. Kern 2021, S. 160.

18 Vgl. Fries et al. 2021, S. 41.

Tabelle 1: Abgrenzung der cyber-physischen Matrixproduktion von klassischen Organisationsformen

Kriterien	Einzelplätze	Werkstatt	Gruppe	Linie	Cyber-physische Matrixproduktion	Fluide Produktion
Verkettung	keine	flexibel	flexibel	starr	flexibel	flexibel
Stationäre Elemente	Produktionsobjekt, Arbeitskräfte, Betriebsmittel, Gebäudeinfrastruktur	Gebäudeinfrastruktur				
Bewegliche Elemente	keine	Produktionsobjekt, Arbeitskräfte	Produktionsobjekt, Arbeitskräfte	Produktionsobjekt, Arbeitskräfte	Produktionsobjekt, Arbeitskräfte	Produktionsobjekt, Arbeitskräfte, Betriebsmittel
Funktionsumfang der Betriebsmittel & Zeitbezug der Änderung	fest definiert	fest definiert	fest definiert	fest definiert	periodisch rekonfigurierbar	dynamisch rekonfigurierbar
Segmentierungsmerkmal der Ressourcen	Produkt	Technologie	Produkt	Produkt	Prozesse	Auftrag
Zeitpunkt der Ressourcenzuordnung	vor Auftragsdurchlauf	vor Auftragsdurchlauf	vor Auftragsdurchlauf	vor Auftragsdurchlauf	während Auftragsdurchlauf	während Auftragsdurchlauf
Losgrößen (im Regelfall)	Batch, One-piece-flow	Batch	Batch, One-piece-flow	Batch, One-piece-flow	One-piece-flow	One-piece-flow
Möglicher Varianzgrad der Produkte	Individualisierung	Individualisierung	Konfiguration	Konfiguration	Individualisierung	Individualisierung
Anzahl Produktvarianten	hoch	hoch	mittel	mittel	hoch	hoch

■ Aufbauorganisation    
 ■ Ablauforganisation    
 ■ Markt

Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an Wiendahl et al. 2014a, S. 277

Produktvarianten. Produktionssysteme aus Einzelarbeitsplätzen sowie Gruppenfertigungen sind produktorientiert aufgebaut. Eine Werkstattfertigung wird meist nach Herstelltechnologien segmentiert.

### Auftragsplanung und Losgrößen

Eine starre oder teilflexible Linie wird prinzipiell vor dem Auftragsstart geplant. Modular gestaltete Produktionssysteme mit Einzelplätzen sowie Werkstatt- und Gruppenfertigung unterscheiden sich hinsichtlich der Ablauforganisation nicht von Matrixproduktionssystemen. Alle diese Produktionssysteme können während des Auftragsdurchlaufs unter Berücksichtigung der aktuellen System-situation flexibel geplant werden. Unterschiede bestehen jedoch in der Festlegung von Losgrößen. Während Einzelplatzsysteme und Werkstätten Aufträge gleicher Produkte zu Loses (Batches) zusammenfassen, werden Matrixproduktionssysteme, wie die Linienproduktion, mit einzelnen Flusseinheiten im One Piece Flow betrieben.

### Automatisierung

Die Wertschöpfung kann in jeder der Organisationsformen manuell bis hochautomatisiert ausgeprägt sein, da der Automatisierungsgrad von wertschöpfenden und handhabenden Produktionsprozessen maßgeblich von der Produkt- und Prozesskomplexität und von der Wirtschaftlichkeit der Automatisierung abhängt. Auch die Prozessautomatisierung zur Auftragssteuerung, zur Steuerung der Prozessmodule und zur Steuerung des Gesamtsystems ist in modularen Produktionssystemen von manuell bis hochautomatisiert möglich. Jedoch sind sowohl die Steuerungs- als auch die Automatisierungskomplexität in modularen und flexibel verketteten Systemen deutlich höher als dies in starren oder teilflexibel verketteten Systemen der Fall ist. Dies ist erforderlich, um der hohen Komplexität in Bezug auf Markt- und Produktanforderungen gerecht zu werden. Gemäß Ashby's Gesetz von der erforderlichen Varietät (Law of Requisite Variety: „Nur Varietät kann Varietät absorbieren“<sup>19</sup>) erfordert ein dynamisches Umfeld zur Komplexitätsbewältigung ein System mit einer gleichwertigen internen Komplexität, um der externen Komplexität ausreichend zu begegnen.<sup>20</sup>

19 Siehe Ashby 1964, zitiert nach Schwaninger 1996, S. 1949.

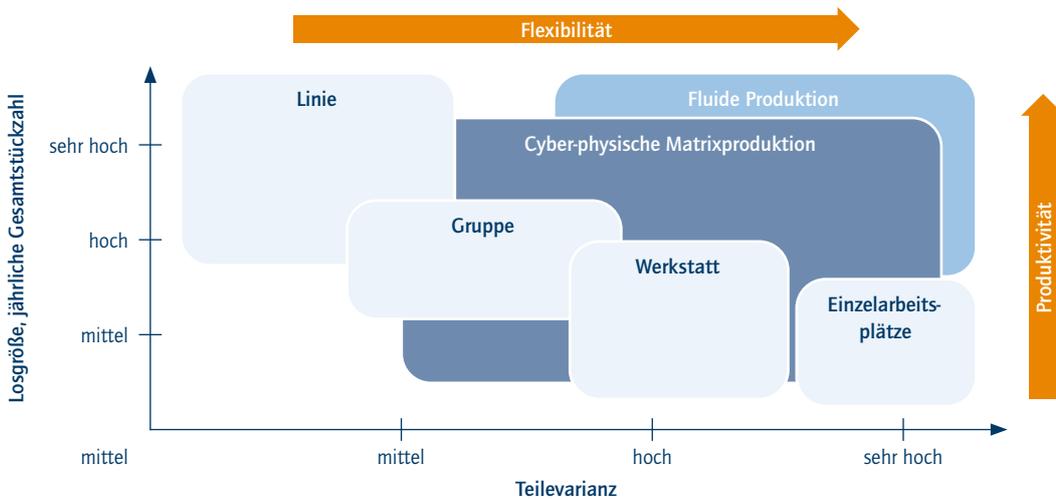
20 Vgl. Jäger et al. 2014, S. 646.

### Realisierbare Produkte und Produktvarianten

Modulare Systeme, wie die Matrixproduktion, die Werkstattfertigung und die Einzelplatzfertigung, können für die Herstellung einer hohen Anzahl an Produktvarianten eingesetzt werden. Dies entspricht dem Trend zu individualisierten Produkten. Gruppenfertigungen sind meist auf bestimmte Produktfamilien spezialisiert und damit in der Lage, eine mittlere Anzahl an Produktvarianten herzustellen. Starr verkettete Systeme sind hingegen nur für eine geringe Anzahl an Produktvarianten geeignet. Durch das Driften der Arbeitskräfte zwischen den Stationen und ein Nivellieren von Taktzeitspreizungen gelingt es jedoch, in einer variantenreichen Serienfertigung auf einer Linie ebenfalls eine mittlere Anzahl an Varianten bestimmter Produktfamilien herzustellen. Dies erfordert allerdings einen hohen Aufwand der Reihenfolgenbildung in einer Perlenkette und bedeutet oft Produktivitätsverluste. Einzelplatzsysteme und Werkstätten sind zur Herstellung bis hin zu **individuellen Produkten** ausgerüstet. Liniensysteme, aber auch die klassische Gruppenfertigung, werden vorrangig für die Herstellung von standardisierten oder konfigurierten Produkten eingesetzt.

Betrachtet man allein die Prozessfähigkeit der Systeme, so sind modulare Produktionssysteme hinsichtlich Produktstandardisierung durchlässig: Matrixproduktionssysteme sind ebenfalls in der Lage, standardisierte und konfigurierte Produkte herzustellen. Einzelplätze und Werkstätten können für die Produktion von individualisierten Produkten sowie von standardisierten und konfigurierten Produkten eingesetzt werden. Es ist jedoch meist wirtschaftlicher, standardisierte Produkte mit geringer Teilevarianz und sehr großen Losgrößen in spezialisierten und starren Liniensystemen zu produzieren, wie in Abbildung 4 dargestellt. Cyber-physische Matrixproduktionssysteme und die fluide Produktion lösen das klassische Spannungsfeld zwischen Flexibilität und Produktivität auf. Klassischen Produktionssystemen gelingt dies nicht – sie sind entweder auf eine hohe Flexibilität oder auf eine hohe Produktivität ausgelegt und somit entweder nur für kleine Stückzahlen wirtschaftlich oder nur bei einer hohen Produktstandardisierung und geringer notwendiger Flexibilität geeignet. Demgegenüber bieten die cyber-physische Matrixproduktion und die fluide Produktion die Möglichkeit, eine hohe Teilevarianz bei hohen jährlichen Gesamtstückzahlen produktiv zu fertigen.

Abbildung 4: Einordnung der Produktionssysteme im Spannungsfeld Flexibilität versus Produktivität



Quelle: Fraunhofer IPA & Fraunhofer IWU, angelehnt an Eversheim 1996, S. 103, 135, Wöhe/Döring 2000, S. 442, Spath et al. 2014, S. 10.10, erweitert durch Matrix-Produktionssysteme

### 3. Methodik zur Erstellung der Expertise

Die vorliegende Expertise untersucht den Umsetzungsstand von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen nach einem Mixed-Methods-Ansatz. Das Vorgehen ist in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt.

Zur Vorbereitung auf die Unternehmensbefragungen sowie deren Auswertung wurde der Stand der Wissenschaft und Technik zur Matrixproduktion, aber auch der flexiblen und modularen Produktionstechnik analysiert. Relevante Quellen und Erkenntnisse wurden in einem Reifegradmodell mit 13 Gestaltungsfeldern und jeweils fünf Stufen verdichtet, um die zu befragenden Unternehmen und deren Lösungen zielgerichtet einordnen und vergleichen zu können. Das Modell ist so gestaltet, dass es vielfältig einsetzbar ist und die Anwendung in verschiedenen Branchen und Produktionsprozessen ermöglicht. Es wird in Kapitel 4 eingeführt, eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Reifegradstufen ist in Anhang A verfügbar. Das Modell wurde nicht vollständig ausdefiniert, da es lediglich Anhaltspunkte und Leitlinien zur Einordnung von Umsetzungsständen bei den Unternehmen im Dialog ermöglichen soll. Auf Anwenderseite wurde eine Analyse der Matrixproduktionssysteme hinsichtlich Leistung, Kosten und Rahmenbedingungen durchgeführt und die Motivation zu deren Einführung erfragt. Auf der Ausrüsterseite erfolgte eine Bewertung ihrer Werkzeuge, Technologien und Produkte hinsichtlich Matrixproduktionssystemen. Das Reifegradmodell wurde um einen standardisierten Fragenkatalog ergänzt, mit dem die Datenerhebung über das Reifegradmodell unterstützt und zudem weitere Informationen zu Planungs- und Entwicklungsprozessen erhoben wurden.

Im Vorfeld der Unternehmensbefragungen wurde eine Recherche durchgeführt, um Unternehmen zu identifizieren, die bereits ein

Matrixproduktionssystem eingeführt haben. Anschließend wurden die Unternehmen anhand der Analyse des Stands der Technik nach Kriterien wie Branche, Tätigkeitsfeld, Größe und adressierte Gestaltungsfelder der Matrixproduktion ausgewählt und für die Interviews kontaktiert. Die Befragungen von 28 Unternehmen aus den Bereichen Anwendern von Matrixproduktionssystemen und Ausrüstern für solche selbst erfolgten von September 2021 bis Januar 2022 entweder direkt im Unternehmen oder digital. Die circa dreistündigen Gespräche wurden zwischen Fachleuten der Unternehmen, zumeist Geschäftsführenden oder jeweiligen Fachexpertinnen und -experten aus den betrachteten Unternehmensbereichen, und dem Autorenteam der Expertise geführt.

In allen Fällen wurden die Umsetzungsstände und -lösungen mit Bezug zur Matrixproduktion über Rundgänge oder Präsentationen von Prozessen und Produkten vorgestellt und gemeinsam in das Reifegradmodell eingeordnet. Lösungsansätze zur Planung und Umsetzung wurden diskutiert und Informationen themenspezifisch über den standardisierten Fragenkatalog ergänzt. Thematisiert wurde in der Regel nicht das komplette Unternehmen, sondern jeweils nur ein Bereich oder Standort, der als Matrixproduktion organisiert ist. Zusätzlich wurden Technologieausrüster hinsichtlich ihrer Kernkompetenzen befragt. Der Fokus lag auf Unternehmen, die Produktionsressourcen, Software für die Produktionssteuerung und Transportsysteme bereitstellen. Beratungsunternehmen wurden in die Expertise bewusst nicht mit einbezogen, da diese keine eigenen Technologien, Werkzeuge oder praktische Erfahrungen im Betrieb aus erster Hand einbringen können. Nach diesem Vorgehen wurden insgesamt 28 Unternehmen, 15 Anwender und 13 Technologieausrüster, hauptsächlich aus den Bereichen Automotive, Elektronik, Halbleiterindustrie und Maschinenbau, befragt.

Abbildung 5: Methodisches Vorgehen



Quelle: eigene Darstellung

Hieraus speist sich die Datenbasis für die nachfolgenden Auswertungen.

Die Auswertung der Interviews basiert auf den Einordnungen in das Reifegradmodell, den qualitativen Erkenntnissen aus den Interviews sowie den quantitativen Ergebnissen des Fragenkatalogs. Der Untersuchungsrahmen wurde durch die betrachteten Anwender und Ausrüster sowie die vorhandenen marktseitigen Treiber und Bedarfe abgesteckt. Darüber konnten Rückschlüsse auf den aktuellen Umsetzungsstand im Betrieb der Systeme sowie die potenziell verfügbaren Technologien gezogen werden. Ebenso konnten Beweggründe und Entscheidungskriterien für die Einführung sowie die Entwicklungs- und Planungsprozesse der Systeme und Ausrüstungsobjekte nachvollzogen werden.

Die ausgewerteten Interviews und die Einordnung in das Reifegradmodell sind in Kapitel 5 dargestellt. Aus den Befragungen wurde ein Rahmenwerk an Optionen für Unternehmen bereitgestellt, die sich mit der Einführung einer Matrixproduktion befassen. Dazu wurden die Interviewpartner genauer nach Motivation und Treibern zur Einführung befragt und diese, soweit die Ergebnisse durch die Unternehmen freigegeben wurden, quantitativ ausgewertet. In einer Gesamtübersicht wurden die erreichten Reifegrade nach Branchen der Anwender eingeordnet und Entwicklungspfade zu verschiedenen Ausprägungen von Matrixproduktionen beschrieben. Außerdem wurden die abgeleiteten Vorteile einer Matrixproduktion entlang verschiedener Lebenszyklusphasen hervorgehoben.

Marktverfügbare Schlüsseltechnologien der Ausrüster sind separat eingeordnet und hinsichtlich charakteristischer Merkmale und Eigenschaften genauer beschrieben.

Besonders gute Beispiele für Umsetzungen und Technologien wurden zudem als Good Practice-Beispiele in das Kapitel 5 der Studie aufgenommen und hervorgehoben dargestellt. Bei den Good Practice-Beispielen werden im Unterschied zum allgemeinen Teil der Expertise die Namen der Unternehmen genannt. Die Charakteristika der befragten Anwender und Ausrüster, also Stammdaten zum Unternehmen selbst sowie der Produktionsprozesse und Produkte, sind ausführlich in Anhang B (Anwender) und Anhang C (Ausrüster) vorgestellt.

Den Abschluss der Expertise stellen die zusammengefassten Ergebnisse aus den Befragungen sowie die weiteren Handlungsbedarfe in Kapitel 6 dar. Die Ergebnisse dienen dem knappen Überblick der relevanten Studienerkenntnisse, während die Forschungsbedarfe heute noch bestehende Defizite für eine stärkere Verbreitung von Matrixproduktionssystemen adressieren. Die hervorgehobenen Aspekte ergeben sich ebenfalls aus den durchgeführten Interviews und spiegeln die Hemmnisse in der Umsetzung von Matrixproduktionen wider. Diese dienen besonders den Ministerien und Fördermittelgebern sowie der Forschung und Entwicklung in Kooperation mit der Industrie als Ansatzpunkt, die Einführung und den Betrieb der Matrixproduktion weiter zu befähigen.

# 4. Reifegradmodell und Gestaltungsfelder einer Matrixproduktion

In diesem Kapitel wird das entwickelte Reifegradmodell der Matrixproduktion vorgestellt. Nach den Erläuterungen zu den definierten Stufen des Reifegradmodells, der Einordnung der verschiedenen Gestaltungsfelder und der Anwendung des Modells, werden die Gestaltungsfelder im zweiten Abschnitt detaillierter beschrieben und anhand einer Grafik zum Aufbau eines Matrixproduktionssystems verdeutlicht. Abschließend werden charakteristische Ausprägungen von Matrixproduktionssystemen aufgezeigt.

## 4.1. Reifegradmodell der Matrixproduktion

Das zentrale Werkzeug, um den Grad der Umsetzung einer Matrixproduktion in Unternehmen zu beurteilen, bildet ein für diese Expertise entwickeltes Reifegradmodell. Es dient zur Klassifizierung von Merkmalen und ordnet Prozessen und Technologien eines betrachteten Matrixproduktionssystems eine bestimmte Reife zu. Diese Einordnung ermöglicht es, den Umsetzungsstand einer Matrixproduktion zu bestimmen, den bisherigen Entwicklungspfad nachzuvollziehen und darüber hinaus weitere Entwicklungsstufen zu identifizieren. Damit dieser Umsetzungsstand und die Interdependenzen zwischen einzelnen Prozessen und Technologien vollständig erfasst werden können, wurden, aufbauend auf Modellen von Produktionssystemen, aus dem Stand der Technik insgesamt 13 Gestaltungsfelder für das Reifegradmodell definiert. Dabei lassen sich die Gestaltungsfelder danach gliedern, ob sie stärker auf die Aufbau- oder Ablaufstruktur einer Produktionsorganisation einwirken, das heißt, ob sie eher *strukturfokussiert* oder *steuerungsfokussiert* sind. Zusätzlich wird die Relevanz der Gestaltungsfelder für die jeweilige Befähigungsachse und damit für den erfolgreichen

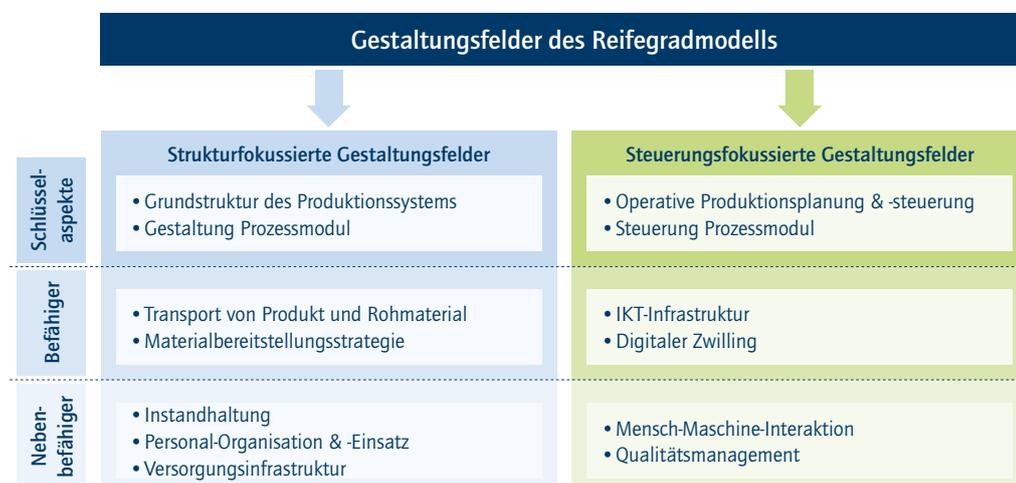
Betrieb von Matrixproduktionssystemen durch die Unterscheidung in *Schlüsselaspekte*, *Befähiger* und *Nebenbefähiger* verdeutlicht. Die Einordnung der Gestaltungsfelder ist in Abbildung 6 zusammengefasst dargestellt.

Die farbliche Abstufung soll verdeutlichen, dass die spezifische Relevanz der Gestaltungsfelder für ein Matrixproduktionssystem abnimmt. Oder anders ausgedrückt, wenn eine gewisse Stufe bei den Gestaltungsfeldern der Schlüsselaspekte nicht überschritten wird, ist das vorliegende Produktionssystem keine Matrixproduktion.

In Abbildung 7 sind die fünf Reifegradstufen in ihrer generischen Ausprägung nach Struktur und Steuerung abgebildet. Die Begriffe für die Stufen vermitteln, welche Haupteigenschaften das Produktionssystem bei den struktur- beziehungsweise steuerungsfokussierten Gestaltungsfeldern hat. Je höher die erreichte Stufe, desto höher ist der Reifegrad des Matrixproduktionssystems. An dieser Stelle wurde definiert, dass erst ab dem Erreichen der Stufe 2 eine Matrixproduktion vorliegt. In Anhang A ist das vollständige Reifegradmodell mit einer inhaltlichen Kurzbeschreibung sowie den fünf detaillierten Reifegradstufen aller 13 Gestaltungsfelder zu finden.

Die Einordnung der Anwendungsfälle der befragten Unternehmen erfolgt über die Betrachtung der jeweiligen Gestaltungsfelder mit der Zuordnung einer Reifegradstufe. Anschließend werden diese Ergebnisse innerhalb eines Spinnennetzdiagramms zusammengefasst, um einen Überblick zum generellen Umsetzungsstand der Anwendungsfälle zu geben.

Abbildung 6: Einordnung der Gestaltungsfelder des Reifegradmodells



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 7: Reifegradstufen



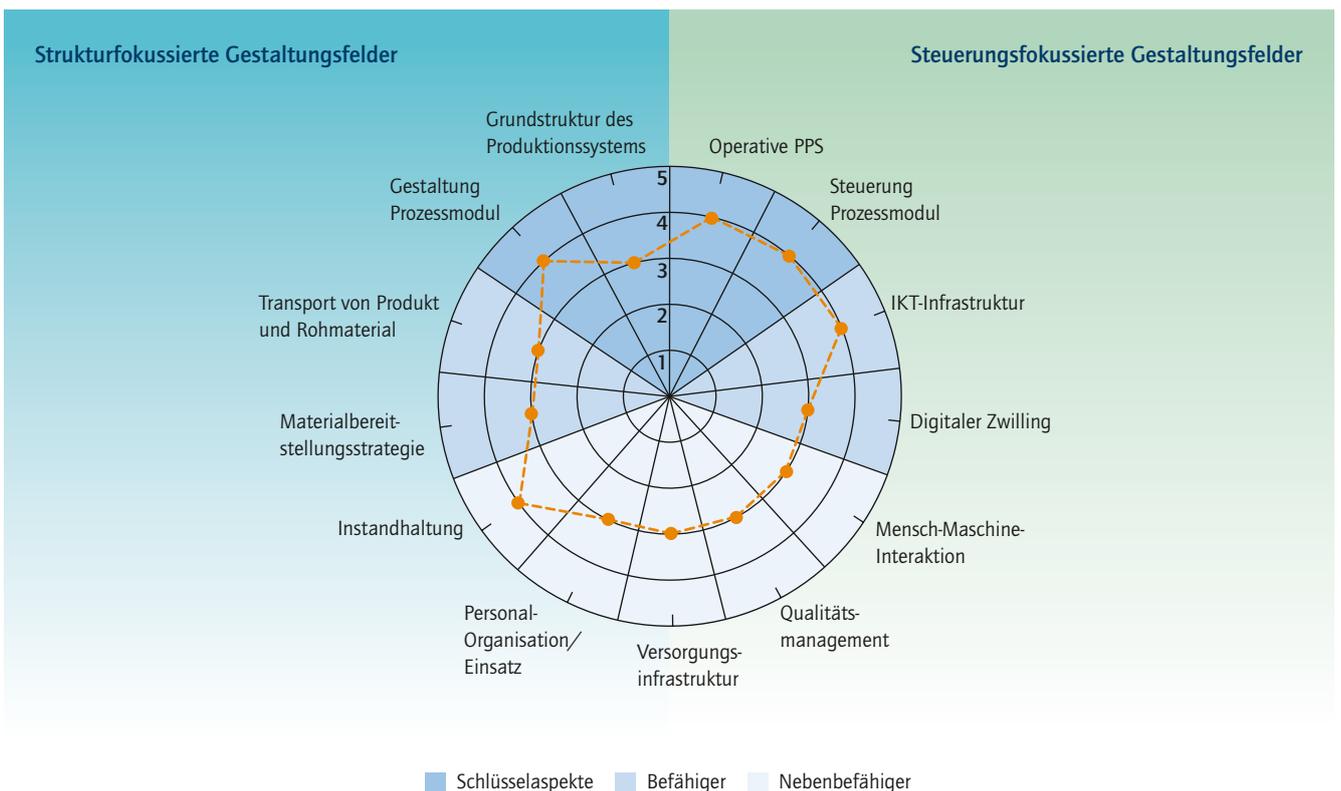
Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 8 ist ein beispielhaft erstelltes Spinnennetzdiagramm dargestellt. Hier findet sich die farbliche Einteilung in struktur- und steuerungsfokussierte Gestaltungsfelder wieder. Außerdem wird mittels der zunehmenden Transparenz die Kategorisierung der Gestaltungsfelder auf Basis des Stands der Technik in Schlüsselaspekte, Befähiger und Nebenbefähiger aus Abbildung 6 aufgegriffen. Die erreichten Reifegrade der jeweiligen Gestaltungsfelder sind über eine orangefarbene Markierung gekennzeichnet und mit einer Linie verbunden.

und Steuerung hohe Reifegrade erzielt. Auf der Seite der strukturfokussierten Gestaltungsfelder sind besonders die *Gestaltung der Prozessmodule* und die *Instandhaltung* mit einer Reifegradstufe 4 hervorzuheben. Auf der Seite der steuerungsfokussierten Gestaltungsfelder weisen die *Operative Produktionsplanung und -steuerung (Operative PPS)*, die *Steuerung der Prozessmodule* und die *Informations- und Kommunikationstechnik (IKT-Infrastruktur)* ebenfalls den Reifegrad 4 auf. Das gezeigte Beispiel repräsentiert eine vollumfängliche Umsetzung der Matrixproduktion, da Schlüsselaspekte und Befähiger eines Matrixproduktionssystemes sowohl strukturseitig wie auch steuerungseitig hohe Reifegradstufen aufweisen.

Der beispielhafte Anwendungsfall in Abbildung 8 zeigt eine cyber-physische Matrixproduktion, die in den Bereichen Struktur

Abbildung 8: Spinnennetzdiagramm eines beispielhaften Anwendungsfalls



Quelle: eigene Darstellung

## 4.2. Gestaltungsfelder einer Matrixproduktion

Die folgenden Abschnitte beschreiben die einzelnen Gestaltungsfelder und ihre spezifischen Reifegradstufen detaillierter. Die Gestaltungsfelder werden anhand der in Abbildung 9 beispielhaft dargestellten Matrixproduktion erläutert.

### a) Grundstruktur des Produktionssystems

Die Grundstruktur eines Produktionssystems umfasst seine Elemente und ihre Relationen untereinander.<sup>21</sup> Sie ist durch das räumliche, zeitliche und technische Zusammenwirken der Arbeitskräfte, Betriebsmittel und Produktionsobjekte charakterisiert.<sup>22</sup> Die Grundstruktur gibt entlang eines Regelwerks vor, wie die Segmentierung einer Produktionsaufgabe in Teilaufgaben innerhalb des Produktionssystems umzusetzen ist.<sup>23</sup>

Die Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Grundstruktur des Produktionssystems* beschreiben den Grad der modularen Auflösung des Systems bis hin zu einer autonom rekonfigurierbaren, fluiden Struktur. Mit höheren Reifegradstufen steigt die

Rekonfigurationsfähigkeit des Produktionssystems. Das bedeutet, dass eine aufwandsarme Veränderung der Systemstruktur mit steigender Granularität der Modularisierung des Systems möglich wird.

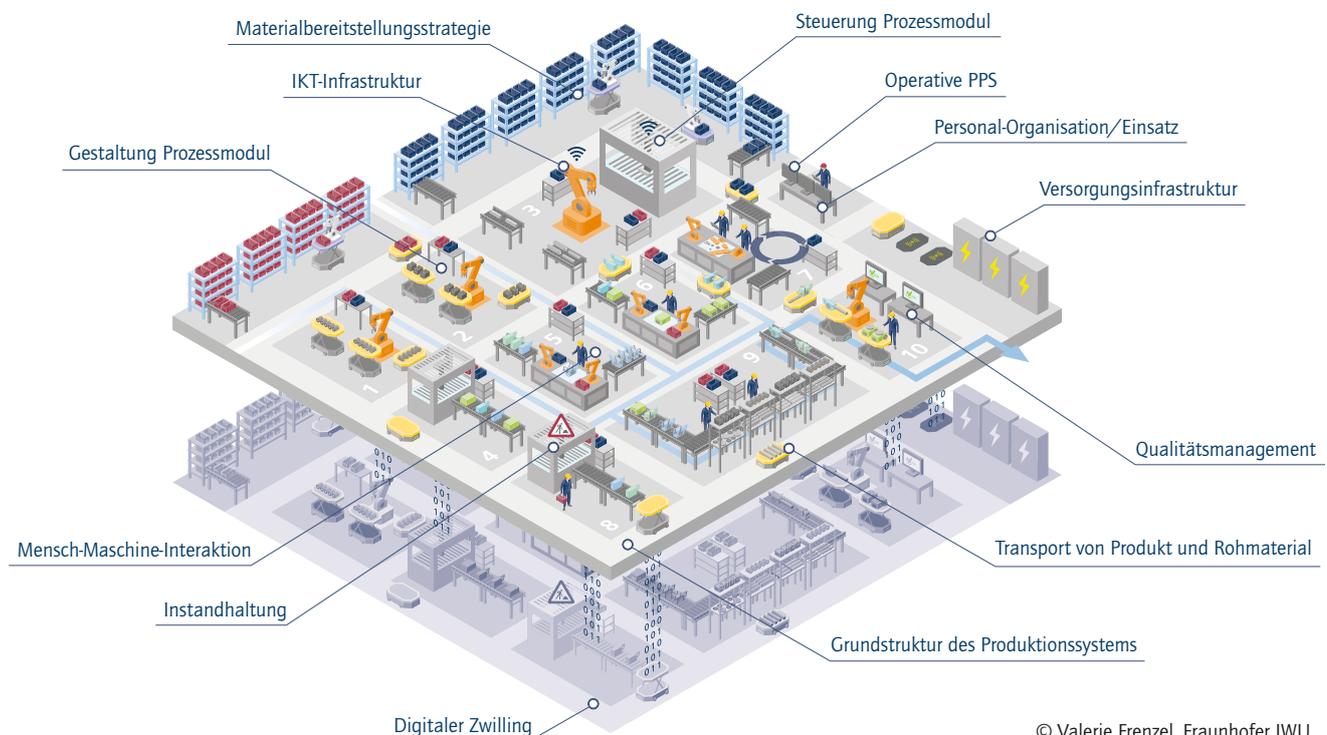
Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Grundstruktur des Produktionssystems*:

- Stufe 1: Starre, statische Struktur
- Stufe 2: Modulare Struktur
- Stufe 3: Modulare, systematisch rekonfigurierbare Struktur
- Stufe 4: Adaptive, automatisiert rekonfigurierbare Struktur
- Stufe 5: Fluide, autonom rekonfigurierbare Struktur

### b) Gestaltung Prozessmodul

Dieses Gestaltungsfeld beschreibt die Ausprägung der Prozessmodule und die Abstufungen von einem starren über ein modulares bis hin zu einem auftragspezifisch autonom konfigurierbaren

Abbildung 9: Aufbau eines Matrixproduktionssystems



© Valerie Frenzel, Fraunhofer IWU

Quelle: eigene Darstellung

21 Vgl. Ropohl 2009, S. 76.

22 Vgl. Petersen 2005, S. 51.

23 Vgl. Frese 2014, S. 3.1.

Prozessmodul, zum Beispiel mit wechselbaren Vorrichtungen und Werkzeugen. Berücksichtigt werden der Aufbau des Prozessmoduls selbst sowie der Material-Input beziehungsweise -Output. Die Grundlage der Reifegradstufen bilden jeweils Ausprägungen des modularen Aufbaus beziehungsweise der modularen Verwendbarkeit von Ressourcen oder Anlagen sowie deren Austauschbarkeit und Möglichkeit der Anordnung innerhalb der Matrix.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Gestaltung Prozessmodul*:

- Stufe 1: Starrer Aufbau
- Stufe 2: Starrer Aufbau, teilautomatisiertes Material-Handling
- Stufe 3: Rekonfigurierbarer Aufbau, automatisiertes Material-Handling
- Stufe 4: Adaptiver, modularer Aufbau
- Stufe 5: Fluid, autonomer Aufbau

### c) Steuerung Prozessmodul

Das Gestaltungsfeld *Steuerung Prozessmodul* beschreibt die Funktionen der maschinennahen Steuerung auf Ebene einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) oder vergleichbarer Ebene bei manuell betriebenen Modulen. Es umfasst die beiden Aspekte der Schnittstellen beziehungsweise der Möglichkeit der Einbindung in übergeordnete Systeme sowie der Art des Aufrufs von Prozessfunktionen. Mit steigendem Reifegrad reduziert sich der Aufwand der Integration der Prozessmodule durch standardisierte Schnittstellen. Die notwendigen Funktionsbeschreibungen der Module sind in unteren Reifegraden nicht, in höheren jedoch vollumfänglich vorzufinden. Die Intelligenz wird mit steigenden Reifegraden aufgrund der stärkeren Vernetzung dem aktuellen Trend folgend zunehmend dezentral verteilt.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Steuerung Prozessmodul*:

- Stufe 1: Keine Anbindung an externes Prozessleitsystem
- Stufe 2: Anbindung an Prozessleitsystem, starrer Aufruf der Prozessfunktionen
- Stufe 3: Aufruf von Prozessfunktionen mit anpassbaren Funktionsparametern
- Stufe 4: Flexibler Aufruf von Prozessfunktionen mit anpassbaren Zieleigenschaften
- Stufe 5: Autonome Planung und Ausführung der Prozessfunktionen

### d) Operative Produktionsplanung und -steuerung

Das Gestaltungsfeld *Operative PPS* umfasst innerhalb des Reifegradmodells die Einplanung der Aufträge in das Matrixproduktionsystem sowie deren Steuerung durch das System. Der modulare Charakter einer Matrixproduktion ermöglicht das freie Anfahren der einzelnen Prozessmodule. Dies eröffnen die Freiheitsgrade der sogenannten Auftragsverteilungs- und Operationsreihenfolgeflexibilität, die zur Maximierung der Zielerreichung genutzt werden können.<sup>24</sup> Entsprechend gliedern sich die Stufen ausgehend von starren zu flexiblen Steuerungen.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Operative Produktionsplanung und -steuerung*:

- Stufe 1: Zentralisierte Grobplanung, starre Steuerung
- Stufe 2: Zentralisierte Grob- und Feinplanung, teilautomatisierte Steuerung
- Stufe 3: Zentralisierte Grob- und Feinplanung, zentral optimierende Steuerung
- Stufe 4: Zentraler Auftragspool, selbstoptimierende Steuerung mit lokaler Intelligenz
- Stufe 5: Zentraler Auftragspool, dezentrale autonome Steuerung

### e) Materialbereitstellungstrategie

Die Materialbereitstellung hat die Aufgabe, das richtige Material zur richtigen Zeit und in der richtigen Menge an den Prozessmodulen zur Verfügung zu stellen. Sie erfolgt vom Wareneingang bis zum Prozessmodul und kann mehrere Stufen durchlaufen.<sup>25</sup>

Die Materialbereitstellung wird über die Prozessgestaltung, die Informationsflüsse, das Datenmanagement und die Logistikstruktur bestimmt. Eine grundlegende Herausforderung in der Matrixproduktion besteht darin, dass durch die steigenden Freiheitsgrade in der Steuerung das zeit-, orts- und mengenmäßige Zusammenbringen von Bedarf und Material erschwert ist. Es ist nicht zwangsläufig eine feste Auftragsreihenfolge und frühzeitige Beplanung der Ressourcen mit definierten Materialbedarfen gegeben, sie ergeben sich vielmehr während des Betriebs. Dieser Herausforderung ist durch eine entsprechende Gestaltung des Bereitstellungssystems, flexible Bereitstellungsprozesse und -elemente zu begegnen. Mit steigendem Reifegrad ist das Gesamtsystem befähigt, einzelne Elemente kurzzyklisch anzupassen und sich an neuen Bedingungen im System auszurichten. So werden Prozesse auf Materialebene neu definiert oder Bereitstellungsflächen adaptiv angepasst. In den höchsten Stufen geht die Entscheidungskompetenz vom Planer zum System über.

24 Vgl. Fries et al. 2020, S. 35.

25 Vgl. Bullinger/Lung 1994, S. 7-10, Wannewetsch 2014, S. 30.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Materialbereitstellungsstrategie*:

- Stufe 1: Starre Materialbereitstellung
- Stufe 2: Modulare, matrixfähige Materialbereitstellung
- Stufe 3: Rekonfigurierbare Materialbereitstellung
- Stufe 4: Adaptive Materialbereitstellung
- Stufe 5: Autonome, fluide Materialbereitstellung

## f) Transport von Produkt und Rohmaterial

Zur Überbrückung von einzelnen Lager- und Kommissionierungsstufen hin zur Produktion oder der Fortbewegung des Produkts innerhalb des Produktionssystems sind Transporte notwendig.<sup>26</sup> Deren technologische Gestaltung liegt im Fokus dieses Gestaltungsfelds. Die Transporte der Produkte und Rohmaterialien werden im klassischen Aufbau getrennt betrachtet und gestaltet. Außerdem stellen diese Transportvorgänge einen Verschwendungsprozess dar, da keine Wertschöpfung am Produkt vollzogen wird. Im Reifegradmodell findet sich diese Charakterisierung in den ersten Stufen wieder, löst sich jedoch zunehmend auf. Mit steigender Reifestufe werden zunächst die einzelnen Transportvorgänge im operativen Betrieb flexibler. Routen passen sich an und Transportmittel finden mit höheren Reifegraden selbstständig den besten Weg zwischen Quelle und Senke. Die Anpassungen sind bei niedrigem Reifegrad eher selten und haben einen großen Horizont, sie verschieben sich erst mit zunehmender Reife in den operativen Betrieb. Die Anpassungsverantwortung tragen bei geringer Reife Personen, bei zunehmender Reife treffen die Transportsysteme selbst Entscheidungen. Außerdem löst sich die Unterscheidung in Transporte von Rohmaterial und Transporte von Produkten auf. Die Transportmittel werden befähigt, ad hoc und bei Bedarf beide Arten zu transportieren. In der letzten Stufe kann zusätzlich Wertschöpfung während des Transports stattfinden.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Transport von Produkt und Rohmaterial*:

- Stufe 1: Starrer Transport
- Stufe 2: Modularer, matrixfähiger Transport
- Stufe 3: Rekonfigurierbarer Transport
- Stufe 4: Adaptiver Transport
- Stufe 5: Fluid, autonomer Transport

## g) Informations- und Kommunikationstechnik

In dieser Expertise soll unter „IKT-Infrastruktur“ sowohl die Netzwerkinfrastruktur als auch die beteiligten IT-Systeme verstanden werden. Dabei liegt der Fokus hauptsächlich auf der Infrastruktur zur Einplanung und Steuerung der Aufträge sowie auf der Anbindung

und Vernetzung der einzelnen Prozess- sowie Ressourcenmodule der Matrixproduktionssysteme.

Um den Anforderungen an Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit zu genügen, wird mit steigendem Reifegrad eine Modularisierung und Dezentralisierung der heute größtenteils monolithisch gestalteten Systeme gefordert. An deren Stelle treten Plattformen, die sich über einzelne Services an die Anforderungen anpassen lassen. Außerdem bedarf es einer flexiblen und gleichzeitig leistungsfähigen Infrastruktur zum Senden und Empfangen von Daten.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *IKT-Infrastruktur*:

- Stufe 1: Einfache IKT-Infrastruktur
- Stufe 2: Erweiterte IKT-Infrastruktur
- Stufe 3: Umfassende IKT-Infrastruktur
- Stufe 4: Plattformbasierte IKT-Infrastruktur
- Stufe 5: Serviceorientierte IKT-Infrastruktur

## h) Digitaler Zwilling

Digitale Zwillinge sind die virtuellen Abbilder von realen Objekten und Prozessen, die in einer bestimmten Frequenz und Genauigkeit miteinander synchronisiert werden.<sup>27</sup> Das Reifegradmodell beschreibt im Gestaltungsfeld *Digitaler Zwilling* virtuelle Abbilder von Objekten und Prozessen, die den Produktionsprozess ermöglichen, nicht aber digitale Zwillinge der konkreten Produkte, die während der Wertschöpfung entstehen. Der Fokus liegt hier auf den Ausprägungen der digitalen Modelle und deren Kommunikations- und Interaktionsmöglichkeiten mit dem realen Abbild. Ausschlaggebend für den Reifegrad sind die Struktur, der Grad der vorhandenen Dynamik, die Fähigkeit Echtzeitdaten zu verarbeiten, die Anwendbarkeit für Planungs- und Steuerungsaufgaben sowie die Autonomie in der Entscheidungsfindung.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Digitaler Zwilling*:

- Stufe 1: Digitale Master und statische Modelle
- Stufe 2: Digitale Verhaltensmodelle
- Stufe 3: Iterativ synchronisierte Verhaltensmodelle
- Stufe 4: Synchronisierter, aufgabenspezifischer Produktionszwilling
- Stufe 5: Vollumfänglicher Produktionszwilling

## i) Mensch-Maschine-Interaktion

Mit steigendem Funktionsumfang der Produktionssysteme verändert sich die Einbindung des Menschen in die Entscheidungsprozesse. Das Gestaltungsfeld *Mensch-Maschine-Interaktion* beschreibt in fünf Stufen Ausprägungen – von der menschenzentrierten

<sup>26</sup> Vgl. Arnold et al. 2008, S. 3, 6.

<sup>27</sup> Vgl. Olcott/Mullen 2020.

Entscheidung ohne maschinelle Unterstützung bis hin zur autonomen Entscheidung des Systems ohne Eingriff des Menschen. In diesem Gestaltungsfeld werden die Schwerpunkte auf den Informationsaustausch des Produktionssystems mit dem Menschen und den Grad der Autonomie der maschinellen Entscheidungen gelegt. Der Mensch wird zukünftig nicht mehr im Fokus der Arbeitsorganisation sein und lediglich in Stör- und Ausnahmefällen die Führung übernehmen.<sup>28</sup> Dies setzt die Entwicklung und erfolgreiche Etablierung von Assistenzsystemen voraus.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Mensch-Maschine-Interaktion*:

- Stufe 1: Mensch entscheidet selbst- und eigenständig
- Stufe 2: Assistierte Entscheidung
- Stufe 3: Teilweises Entscheiden
- Stufe 4: Geprüftes Entscheiden
- Stufe 5: Autonomes, delegiertes Entscheiden

#### j) Personal-Organisation/Einsatz

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gehören zu den wichtigsten, flexibelsten und differenziertesten Ressourcen im Produktionssystem, ihre Aufgabenfelder und Einsatzgebiete müssen gestaltet werden.<sup>29</sup> In Abhängigkeit von Ausbildung und Erfahrung liegen unterschiedliche Qualifikationen vor. In starren Produktionssystemen besteht eine feste Zuordnung von Personen zu bestimmten Aufgaben. Die Beschäftigten haben ein definiertes Aufgabenspektrum, das über die Zeit gleichbleibt. Ein Produktionssystem wird umso flexibler und resilienter, je mehr es die Eigenschaft des Menschen nutzt, sich schnell neue Fähigkeiten anzueignen und andere Aufgaben zu übernehmen. Aufgabenspektrum, Einsatzort und Einsatzdauer variieren mit zunehmendem Reifegrad. Das Ziel ist dabei der optimale Einsatz aller Fähigkeiten und Potenziale eines Menschen. Der zunehmend flexible Einsatz der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erfordert es gleichzeitig, sie für neue Aufgaben zu befähigen. Dazu eignen sich digitale Werkzeuge und transparente Leitsysteme.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Personal-Organisation/Einsatz*:

- Stufe 1: Fester Personaleinsatz
- Stufe 2: Teilflexibler Personaleinsatz
- Stufe 3: Ortsflexibler Personaleinsatz
- Stufe 4: Kurzfristig ortsflexibler Personaleinsatz
- Stufe 5: Orts- und zeitflexibler Personaleinsatz

#### k) Versorgungsinfrastruktur

Im Gestaltungsfeld *Versorgungsinfrastruktur* werden die Reifegrade der Energie-Infrastruktur und des Energiemanagements beschrieben. Die Energie-Infrastruktur beinhaltet vorrangig die Bereitstellung von elektrischer Energie, aber auch von weiteren Medien, die für die Wertschöpfungsprozesse notwendig sind. Dazu zählen unter anderem Druckluft, Öl, Kühlschmierstoffe, Gase und Wasser. Das Energiemanagement bezieht sich auf die Formen der Verteilung und Steuerung der Energieträger und Medien, beispielsweise durch den Einsatz von Speichertechnologien und die Kopplung von Sektoren. Die Reifegradstufen sehen eine zunehmende Flexibilität der Energieversorgung vor, um aufwandsarme Rekonfigurationen und Layoutveränderungen zu ermöglichen. Gleichzeitig soll die intelligente Versorgung von Prozessen und Anlagen in modularen Wertschöpfungsprozessen sichergestellt und kosteneffizient ermöglicht werden.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Versorgungsinfrastruktur*:

- Stufe 1: Starre Energieinfrastruktur, einfaches Energiemanagement
- Stufe 2: Nachrüstbare Energieinfrastruktur, passives Energiemanagement
- Stufe 3: Layoutorientierte Energieinfrastruktur, aktives Energiemanagement
- Stufe 4: Layoutflexible Energieinfrastruktur, optimiertes Energiemanagement
- Stufe 5: Layoutunabhängige Energieinfrastruktur, intelligentes Energiemanagement

#### l) Qualitätsmanagement

Das Qualitätsmanagement sichert die ordnungsgemäße Durchführung aller betrieblichen Prozesse, kontrolliert diese und führt bei auftretenden Fehlern eine sachgemäße Untersuchung durch.<sup>30</sup> Es handelt sich um eine heterogene und stetige Aufgabe, die sich auf technische und organisatorische Prozesse bezieht und deren Umfang und Umsetzung variieren kann. Die im Reifegradmodell definierten Stufen bilden ein Qualitätsmanagementsystem vom Reagieren hin zum Agieren ab. Während in niedrigen Stufen Regelkreise und Abschätzungen der zu erwartenden Risiken und Fehler vorherrschen, werden in den oberen Stufen zunehmend mehr Daten automatisiert aufgenommen, ausgewertet und in Entscheidungen überführt. Der Einsatz von Daten erlaubt das Erkennen von Anomalien, optimales Einplanen von Maßnahmen und die Maximierung der Ressourceneinsatzzeiten.

28 Vgl. Link/Hamann 2019, S. 683–687.

29 Vgl. Lukesch/Kellner 2019.

30 Vgl. Brüggemann/Bremer 2020, S. 5 ff.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Qualitätsmanagement*:

- Stufe 1: Standardisiertes Qualitätsmanagement
- Stufe 2: Erweitertes und überwacht  
Qualitätsmanagement
- Stufe 3: Etabliertes und datengetriebenes  
Qualitätsmanagement
- Stufe 4: Vorausschauendes Qualitätsmanagement  
(Predictive Quality)
- Stufe 5: Optimierendes Qualitätsmanagement

### m) Instandhaltung

Zur stetigen Durchführung der Produktionsprozesse sind repetitive Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit der Anlagen notwendig. Die Zeitpunkte und Maßnahmenumfänge sind das Aufgabengebiet der Instandhaltung.<sup>31</sup> Das herkömmliche Vorgehen sieht eine periodische Instandhaltung vor, das heißt für definierte Zeitpunkte sind definierte Maßnahmen vorgeschrieben. In modernen Instandhaltungen werden beide Faktoren flexibilisiert. Der Einsatz einer Maßnahme richtet sich nach dem Grad der Funktionsfähigkeit der Anlage und dem optimalen Zeitpunkt zur Maßnahmendurchführung im operativen Betrieb. Um Flexibilisierungsmöglichkeiten erfolgreich zu nutzen, sind die Datenaufnahme und -auswertung der Funktionseinheiten der Anlage sowie die Synchronisierung der Instandhaltung mit der Planung und Steuerung des Betriebs erforderlich.

Reifegradstufen des Gestaltungsfelds *Instandhaltung*:

- Stufe 1: Periodische Instandhaltung
- Stufe 2: Datengetriebene Instandhaltung
- Stufe 3: Echtzeitüberwachte Instandhaltung
- Stufe 4: Vorausschauende Instandhaltung (Predictive Maintenance)
- Stufe 5: Präventive Instandhaltung (Prescriptive Maintenance)

## 4.3. Charakteristische Ausprägungen einer Matrixproduktion

Matrixproduktionssysteme können je nach Kombination der Reifegrade in den struktur- und steuerungsfokussierten Gestaltungsfeldern verschiedene Ausprägungen zeigen. Die Kombinationsmöglichkeiten ergeben die in Abbildung 10 dargestellten Felder eines Portfolios. Sie werden im Folgenden anhand dreier, im Rahmen der Einführung von Matrixproduktionssystemen besonders bedeutender Ziele erläutert. Die Ziele sind Produktivität, Stückzahl- und Variantenflexibilität sowie Unabhängigkeit von Anlagentakten im

operativen Betrieb sowie die bedarfsgerechte Veränderungsfähigkeit (Rekonfiguration).

### Klassische Produktionssysteme

In das Feld der klassischen Produktionssysteme ordnen sich herkömmliche Produktionssysteme ohne komplexes Steuerungssystem ein. Es lässt sich in zwei Teilfelder gliedern. Das Feld oberhalb der diagonalen gestrichelten Trennlinie versammelt zum Beispiel Produktionslinien, die mittels teilautomatisierter Auftragseinplanungs- und -steuerungstools eine gewisse Flexibilität, vor allem hinsichtlich verschiedener Produktvarianten in einer Perlenkette, erreichen. Die Möglichkeit von Rekonfigurationen ist im Regelfall nicht vorgesehen. Das Teilfeld unterhalb der Diagonale beinhaltet zum Beispiel größere modulare Werkstattfertigungen, die zentral von der Werkstattleitung gesteuert werden. Die Rekonfigurierbarkeit ist in diesen Systemen aufgrund eingesetzter spezialisierter Prozessmodule, wie Fräsmaschinen oder Laserschneidanlagen, gering.

Die klassischen Produktionssysteme erlauben entweder eine Optimierung in Richtung höherer Produktivität (Feld oberhalb der Diagonale) oder höherer Flexibilität (Feld unterhalb der Diagonale). Es ist nicht möglich, Produktivität und Flexibilität gleichzeitig zu optimieren (siehe auch Abbildung 4).

### Software-definierte Matrixproduktion

Produktionssysteme im Feld software-definierte Matrixproduktion basieren strukturell auf den im Feld klassische Produktionssysteme geschilderten werkstattähnlichen Produktionssystemen. Sie verfügen jedoch darüber hinaus über eine ausgereifte, digital optimierende Steuerung. Der hohe Automatisierungsgrad der Steuerung erlaubt die Optimierung des Produktionssystems auf Basis von Echtzeitdaten. Freiheitsgrade im Produktionsablauf und die durch den modularen Aufbau bereitgestellte Flexibilität können so effizient genutzt werden.

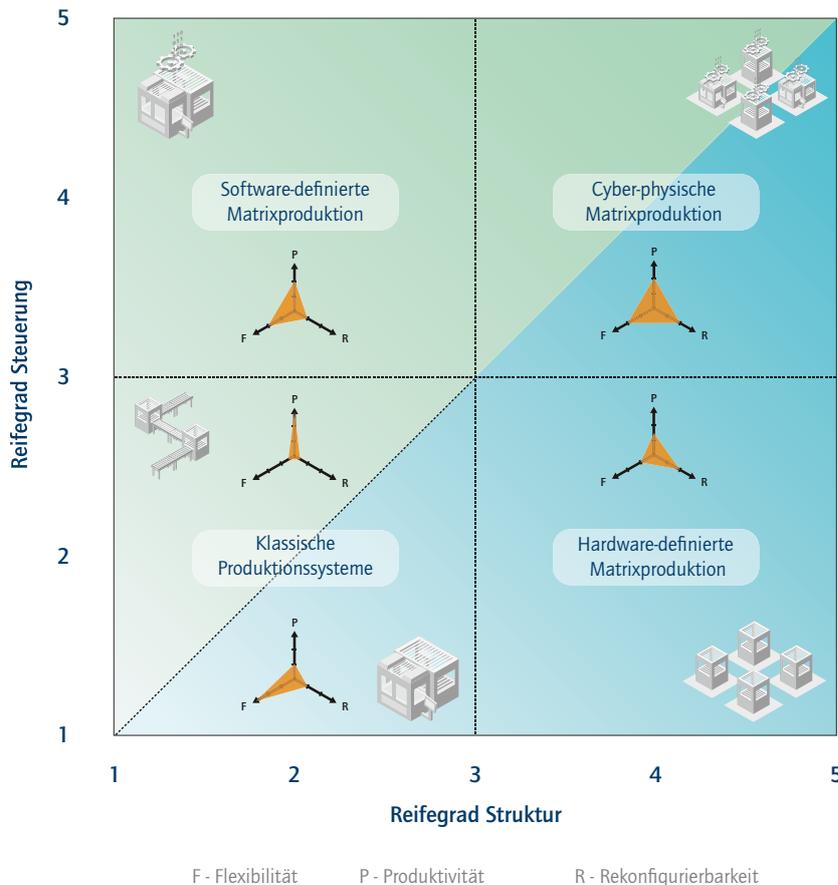
Die Produktionssysteme zeichnen sich durch eine modulare Bauform aus, die einen flexiblen Materialfluss ermöglicht. Aufgrund von Sensibilität und langen Inbetriebnahmezeiten der Prozessmodule werden jedoch im Regelfall keine Rekonfigurationen vorgenommen. Produktionssysteme in diesem Feld zielen auf eine hohe Produktivität bei gleichzeitig hoher Flexibilität ab. Da dies über die Nutzung ausgereifter digitaler Steuerungssysteme ermöglicht wird, werden Produktionssysteme in diesem Feld als „software-definierte Matrixproduktionen“ bezeichnet.

### Hardware-definierte Matrixproduktion

In das Feld der hardware-definierten Matrixproduktion können Produktionssysteme eingeordnet werden, die eine modulare Grundstruktur und ein hohes Rekonfigurationspotenzial aufweisen und deren Steuerung manuell oder teilautomatisiert erfolgt. Das hohe

31 Vgl. Pawellek 2016, S. 17 ff.

Abbildung 10: Charakteristische Ausprägungen von Matrixproduktionen



Quelle: eigene Darstellung

Rekonfigurationspotenzial wird entweder über den Aufbau der Prozessmodule aus leichten und mobilen Ressourcenmodulen oder über einen standardisierten Aufbau der Prozessmodule erzielt, die sich über Vorrichtung- und Werkzeugwechsel rekonfigurieren lassen. Eine Anpassung des Produktionssystems an verschiedene Produkte und Stückzahlen über vordefinierte Korridore ist möglich. Die Aufträge folgen im Regelfall vorab definierten Pfaden durch die Produktionsstruktur. Die Steuerungskomplexität ist somit gering, entsprechend niedrig sind die Reifegradstufen in den steuerungsfokussierten Gestaltungsfeldern. Die niedrige Automatisierung der Steuerung begrenzt in der Regel die erreichbare Produktivität auf einem mittleren Niveau. Da die Eigenschaften in diesem Feld hauptsächlich über die Gestaltung der Prozessmodule bestimmt sind, werden Produktionssysteme in diesem Feld als „hardware-definierte Matrixproduktionen“ bezeichnet.

### Cyber-physische Matrixproduktion

Produktionssysteme im Feld cyber-physische Matrixproduktion können als vollwertige Matrixproduktionen angesehen werden. Sie verfügen über hohe Reifegrade in Struktur und Steuerung, kombinieren also die Vorteile der software- und hardware-definierten Matrixproduktionen. Dies drückt sich in der Bezeichnung „cyber-physische Matrixproduktion“ aus. Sie bestehen aus einer modularen Struktur, die eine hohe Flexibilität ermöglicht. Darüber hinaus sind die Prozess- und Ressourcenmodule so aufgebaut, dass sie sich bezüglich Funktion und Layout-Anordnung rekonfigurieren lassen. Ausgereifte digitale Auftragssteuerungssysteme stellen über Optimierungsfunktionen eine hohe Produktivität sicher. Produktionssysteme in diesem Feld zielen auf eine hohe Produktivität bei gleichzeitig hoher Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit.

## 5. Ergebnisse der Befragung

Dieses Kapitel widmet sich den Ergebnissen der explorativen Forschung auf Basis von Expertenbefragungen. Zu Beginn wird die Motivation zur Einführung einer Matrixproduktion erfragt. Es wird zwischen externen und internen Treibern unterschieden und nach welchen Kriterien sowie Bewertungsgrundlagen eine Umsetzung erfolgte. Anschließend werden die Erkenntnisse aus den untersuchten Matrixproduktionen ausgewertet. Aus den Befragungsergebnissen ließen sich charakteristische Ausprägungsformen von Matrixproduktionen erkennen, aus denen im Anschluss spezifische Entwicklungspfade für Unternehmen hin zur Matrixproduktion abgeleitet werden konnten. Außerdem werden die Vorteile der Matrixproduktion in den Lebenszyklusphasen dargestellt. Abschließend richtet sich der Blick auf die Technologieanbieter und Systemintegratoren, die Technologien, Anlagen und Software bereitstellen, um ein Matrixproduktionssystem ausrüsten zu können. Die Ergebnisse zeigen den zur Verfügung stehenden Reifegrad der Schlüsseltechnologien und verdeutlichen Lücken sowie notwendigen Handlungsbedarf.

### 5.1. Motivation und Treiber zur Einführung von Matrixproduktionssystemen

In die Befragung wurden nur Unternehmen einbezogen, welche bereits ein Matrixproduktionssystem eingeführt haben. Die Zusammensetzung und Charakteristik der befragten Anwender sind in Anhang B zusammengefasst. Im Folgenden werden die Befragungsergebnisse zu externen und internen Treibern sowie Entscheidungskriterien zur Einführung einer Matrixproduktion erläutert.

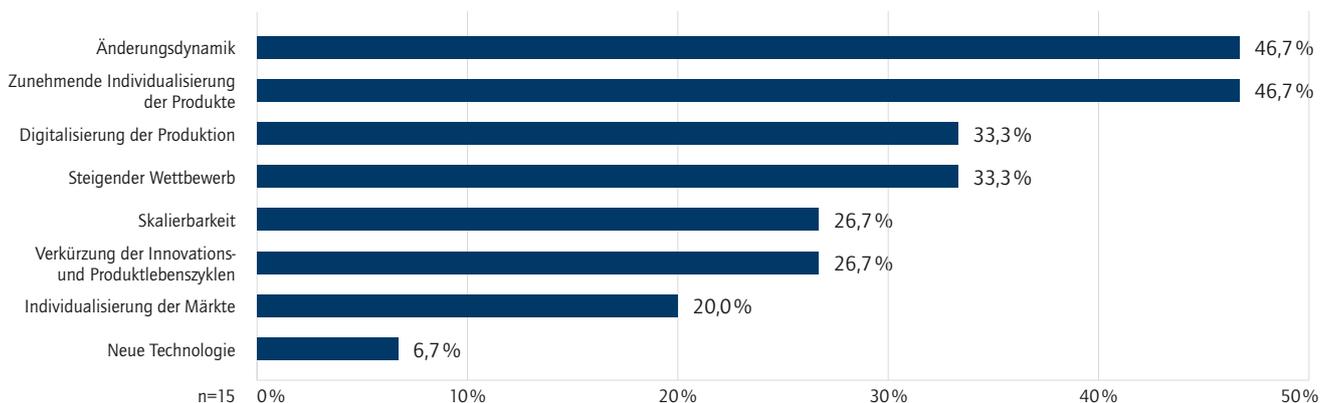
#### 5.1.1. Externe Treiber

Als konkrete Motivation für die Einführung der Matrixproduktion nannten die Befragten verschiedene Aspekte: Haupttreiber sind die *Änderungsdynamik* und die zunehmende *Individualisierung der Produkte*, wie von jeweils 46,7 Prozent der Befragten angegeben und in Abbildung 11 dargestellt. Weitere bedeutende Treiber sind die *Digitalisierung der Produktion* und der *steigende Wettbewerb*, die jeweils von 33,3 Prozent der Befragten als Motivation für die Einführung der Matrixproduktion genannt wurden. Knapp ein Viertel der befragten Unternehmen nannte den Bedarf nach *Skalierbarkeit* und die *Verkürzung der Innovations- und Produktlebenszyklen* als Treiber. Geringere Bedeutung hatten die *Individualisierung der Märkte* und die *Einführung von neuen Technologien*.

#### 5.1.2. Interne Treiber

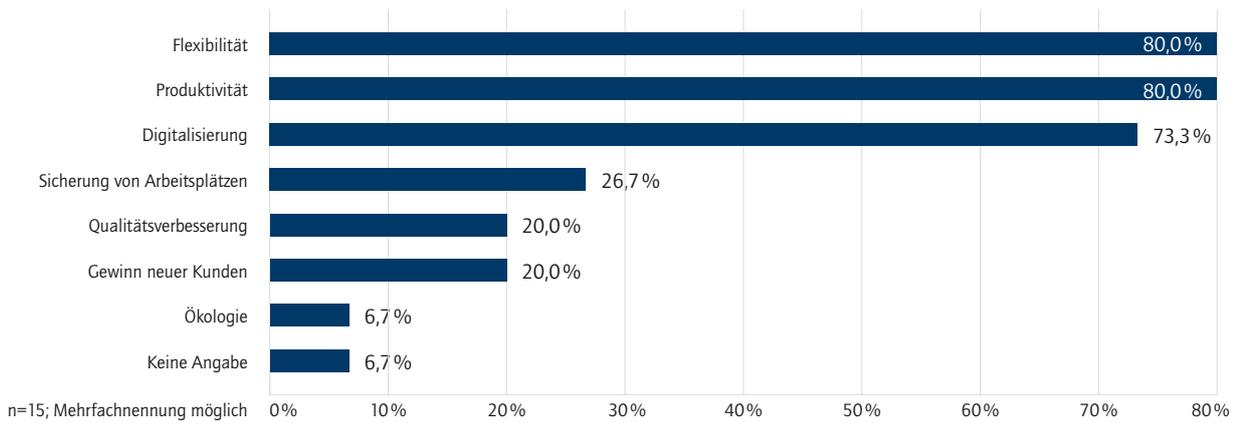
Abbildung 12 stellt den Zusammenhang der Einführung einer Matrixproduktion zur Unternehmensstrategie her. Es zeigt sich, dass die Matrixproduktion von jeweils 80 Prozent der untersuchten Unternehmen eingeführt wurde, um strategische Ziele in Richtung *Flexibilität* und *Produktivität* zu unterstützen. 73,3 Prozent stellen außerdem einen Zusammenhang zu strategischen *Digitalisierungszielen* her. Deutlich weniger wichtig war das Ziel der *Sicherung von Arbeitsplätzen* mit 26,7 Prozent Nennungen. Themen wie *Qualitätsverbesserung*, *Gewinn neuer Kundschaft* und *Ökologie* wurden nachrangig genannt.

Abbildung 11: Welche Treiber haben die Unternehmen motiviert, eine Matrixproduktion einzuführen?



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 12: Welche strategischen Unternehmensziele werden durch die Matrixproduktion unterstützt?



Quelle: eigene Darstellung

### 5.1.3. Kriterien zur Bewertung und Entscheidung

Es wurde untersucht, nach welchen Kriterien die Unternehmen die Einführung einer Matrixproduktion bewertet haben. Abbildung 13 zeigt, dass 26,7 Prozent der befragten Unternehmen die Einführung rein auf *quantitativ-monetäre Kriterien* gestützt haben. Knapp die Hälfte der Unternehmen bezog sich bei der Entscheidungsfindung auf *quantitative und qualitative Kriterien*. Im Wesentlichen wurden die folgenden Kriterien genannt:

- Simulationsgestützte Berechnung
- Geringere Ausgaben durch Investitionen
- Höhere Qualität
- Höhere Flexibilität
- Strategische Entscheidung des Vorstands in Richtung Industrie 4.0

Vertiefende Fragen ergaben, dass einige Unternehmen bei der monetären Bewertung klassische Investitionsrechnungen, wie die Kapitalwertmethode oder die Kosten-Vergleichs-Rechnung, verwendet haben. Über eine standardisierte Methodik zur Planung und

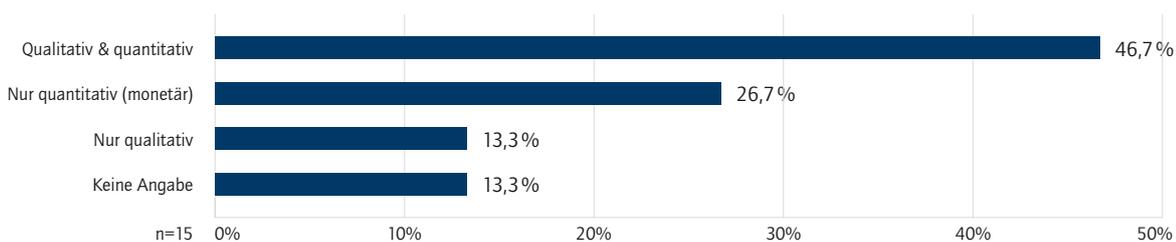
Bewertung der Matrixproduktion verfügte keines der befragten Unternehmen. Als Herausforderung wurde genannt, das Flexibilitätspotenzial zu quantifizieren und in der Wirtschaftlichkeitsrechnung zu berücksichtigen.

**Erkenntnis 1: Unternehmen führen branchenübergreifend Matrixproduktionssysteme ein, um eine wirtschaftliche Produktion bei herausfordernden Marktanforderungen zu sichern.**

## 5.2. Matrixproduktionssysteme in der Anwendung

Im Folgenden werden die untersuchten Anwendungsfälle von Matrixproduktionssystemen beschrieben. Dazu werden die Anwendungsfälle nach dem strukturellen und steuerungsspezifischen Aspekt eingeordnet. Anschließend werden identifizierte branchenspezifische Charakteristiken erläutert sowie Entwicklungspfade hin zur Matrixproduktion dargestellt. Abschließend werden Vorteile der Matrixproduktion im gesamten Lebenszyklus eines Produktionssystems aufgezeigt.

Abbildung 13: Nach welchen Kriterien wurde die Einführung der Matrixproduktion bewertet?



Quelle: eigene Darstellung

### 5.2.1. Einordnung der befragten Anwender

In den folgenden Branchen konnten Unternehmen identifiziert werden, die Matrixproduktionssysteme vollumfänglich oder in Teilen nutzen, beziehungsweise ihre Produktion dahingehend entwickeln.

Mit dominierendem Fertigungsanteil sind dies

- Halbleiterfertigung,
- Karosseriebau,
- Blechbearbeitung,
- spanende Fertigung und
- Elektronikfertigung.

Mit dominierendem Montageanteil sind dies

- Elektronikmontage,
- Komponentenvormontage und
- Montage von Antriebskomponenten.

Abbildung 14 ordnet die in der Expertise untersuchten Produktionssysteme gemäß ihrem Reifegrad in den charakteristischen Ausprägungsformen einer Matrixproduktion ein (siehe Kapitel 4.3). Der ermittelte Reifegrad *Struktur* ergibt sich aus dem Mittelwert der *Schlüsselaspekte strukturfokussierter Gestaltungsfelder* (siehe

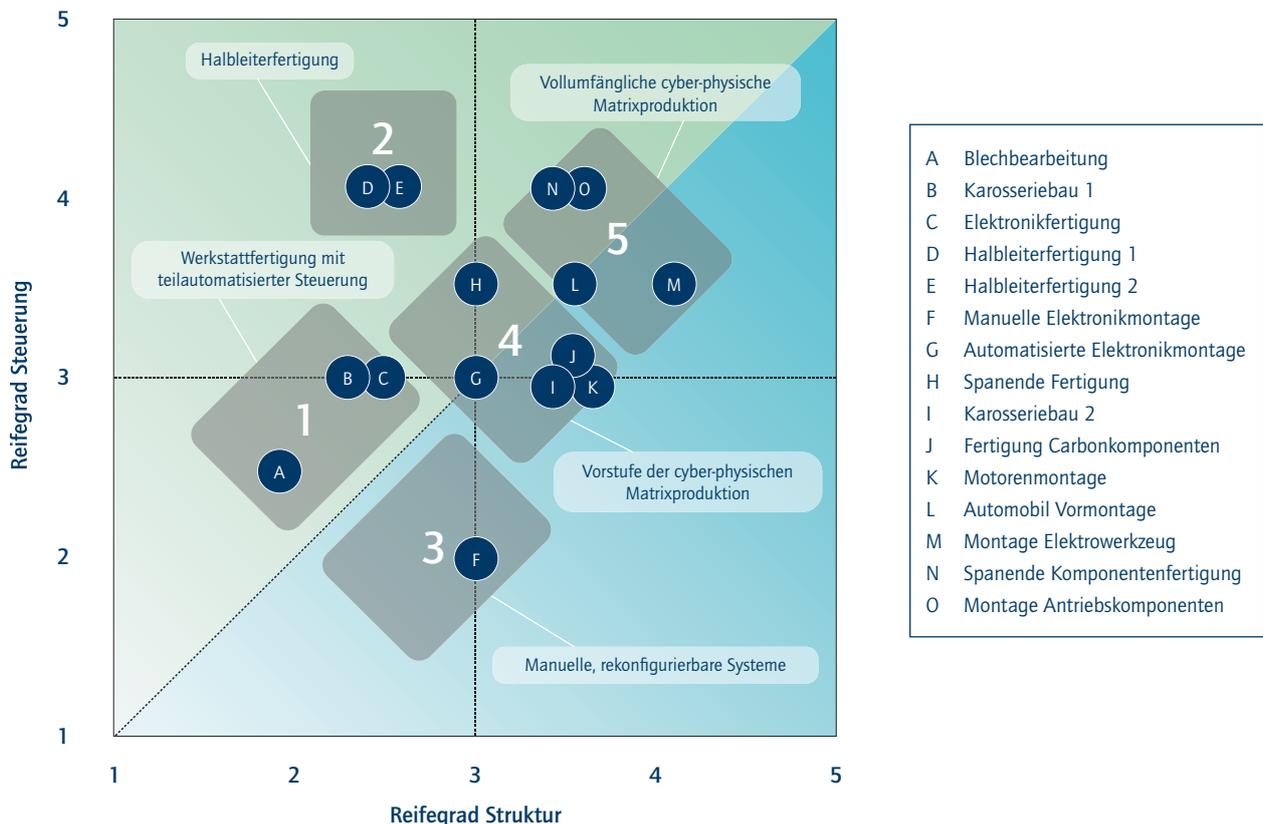
Abbildung 6). Der Reifegrad *Steuerung* berechnet sich analog aus dem Mittelwert der *Schlüsselaspekte steuerungsfokussierter Gestaltungsfelder*.

Die untersuchten Produktionssysteme lassen sich den in Kapitel 4.3 eingeführten charakteristischen Ausprägungsfeldern der *klassischen Produktionssysteme*, der *software-definierten Matrixproduktion* und der *cyber-physischen Matrixproduktion* zuordnen. Vertreter einer *hardware-definierten Matrixproduktion* konnten im Zuge der Expertise nicht gefunden werden. Es liegt die Schlussfolgerung nahe, dass umgesetzte Matrixproduktionssysteme mit sehr hohen Reifegraden in den strukturfokussierten Gestaltungsfeldern auch mittlere bis hohe Reifegrade in den steuerungsfokussierten Gestaltungsfeldern aufweisen. Die untersuchten Produktionssysteme ließen sich in fünf Cluster bündeln, die im Folgenden erläutert werden.

#### Cluster 1: Werkstattfertigung mit teilautomatisierter Steuerung

*Cluster 1* umfasst Werkstattfertigungen mit (teil-)automatisierter Steuerung, die aus frei anfahrbaren Anlagen und Arbeitsplätzen bestehen. Diese werden zentral von der Werkstattleitung gesteuert. Teilweise wird diese Tätigkeit von einem teilautomatisierten Auftragseinplanungs- und -steuerungstool unterstützt. Außerdem werden Materialtransporte zwischen den Prozessmodulen teilweise

Abbildung 14: Charakteristische Ausprägung untersuchter Matrixproduktionssysteme



Quelle: eigene Darstellung

oder vollständig automatisiert realisiert. Dies erlaubt eine hohe Flexibilität, kombiniert mit einer bereits höheren Produktivität als dies in klassischen manuell betriebenen Werkstattfertigungen möglich ist. Die Rekonfigurierbarkeit ist in diesen Systemen aufgrund der eingesetzten spezialisierten Prozessmodule, wie Fräsmaschinen, Laserschneidanlagen oder Bestückungsanlagen für Elektronikkomponenten auf Leiterplatten, gering.

### Cluster 2: Halbleiterfertigung

Das *Cluster 2* repräsentiert sogenannte Front-End-of-Line-Abschnitte von Halbleiterfertigungen mit hochautomatisierter Steuerung. Diese bestehen aus großen, hochspezialisierten Anlagen zur Herstellung von Halbleitern, die keine nennenswerten Rekonfigurationsmöglichkeiten vorsehen. Diese Art der Fertigung zeichnet sich durch eine sehr hohe Flexibilität und Produktivität aus. Die Flexibilität ergibt sich über die Möglichkeit, alle Prozessmodule frei anzufahren. Die hohe Produktivität wird über den Automatisierungsgrad von nahezu 100 Prozent sowohl in den Bearbeitungs- als auch bei den Transportprozessen erreicht. Die Auftragssteuerung zur Zuordnung der Arbeitsvorgänge zu den Prozessmodulen erfolgt ebenfalls automatisiert über optimierende Algorithmen. Besonders erwähnenswert ist der sehr hohe unternehmensübergreifende Standardisierungsgrad in der Halbleiterfertigung über den SEMI Equipment Communication Standard.<sup>32</sup> Dieser vereinfacht die Vernetzung und Integration aller im Produktionsprozess involvierten Ressourcen und ist somit die Basis für den hohen Automatisierungsgrad.

### Cluster 3: Manuelle, rekonfigurierbare Systeme

In *Cluster 3* wurde ein Produktionssystem eingeordnet, das sich aufgrund der Gestaltung der Prozessmodule einfach rekonfigurieren lässt. Das hohe Rekonfigurationspotenzial wird durch leichte und mobile Ressourcenmodule erreicht, die auftragsspezifisch zu

Prozessmodulen konfiguriert werden können. Die Entscheidung über die Konfiguration erfolgt bislang durch die Werkstattleitung ohne nennenswerte Automatisierung.

### Cluster 4: Vorstufe einer cyber-physischen Matrixproduktion

Das *Cluster 4* kann als Vorstufe einer vollumfänglichen cyber-physischen Matrixproduktion angesehen werden. Die in dieses Cluster eingeordneten Produktionssysteme zeichnen sich durch einen hohen Automatisierungsgrad sowohl bei den Bearbeitungs- als auch bei den Transportprozessen aus. Prozessmodule können je nach Auftrag flexibel angefahren werden. Zur Nivellierung der Auslastung wird in den automatisierten Auftragssteuerungssystemen die Arbeitsverteilungsflexibilität genutzt. Bei den strukturstarken Vertretern in diesem Cluster (Untersuchungsfälle I, J, K) sind außerdem Rekonfigurationsmöglichkeiten vorgesehen.

### Cluster 5: Vollumfängliche cyber-physische Matrixproduktion

Betrachtete Produktionssysteme, die in *Cluster 5* gebündelt sind, zeigen hohe Reifegrade in struktur- und steuerungsfokussierten Gestaltungsfeldern. Sie bestehen aus einer modularen Struktur, die hohe Flexibilität ermöglicht. Darüber hinaus sind die Prozess- und Ressourcenmodule so aufgebaut, dass sie sich bezüglich Funktion und Layout-Anordnung rekonfigurieren lassen. Des Weiteren nutzen sie ausgereifte automatisierte Auftragssteuerungssysteme. Arbeitsverteilungs- und Operationsreihenfolgeflexibilität werden genutzt, um eine hohe Produktivität zu erreichen. Im Rahmen der Expertise konnten für dieses Cluster sowohl Fertigungs- als auch Montagesysteme identifiziert werden. Darunter befinden sich die Zerspanung von Komponenten, Montagesysteme für Antriebskomponenten und Elektrowerkzeuge, aber auch eine Vormontage in der Automobilindustrie.

32 Siehe [http://www.edgeintegration.com/downloads/Guide\\_to\\_understanding\\_SECS.pdf](http://www.edgeintegration.com/downloads/Guide_to_understanding_SECS.pdf)



### Good Practice Infineon Dresden: Flexibilität durch hohen Automatisierungsgrad

Bei Infineon am Standort Dresden werden über vierhundert verschiedene Halbleiterprodukte auf Basis von 200mm und 300mm-Siliziumscheiben (Wafer) gefertigt. Während die 300mm-Fertigung bereits als vollautomatisiertes System geplant wurde, musste die 200mm-Fertigung nachträglich automatisiert werden (siehe Abbildung 15). Motiviert wurde die Automatisierung durch die Erhöhung des Outputs, die Verbesserung der Qualität und die hohen Lohnkosten in Europa. Die Fabrik wurde ausgehend von einer manuell geprägten Fertigung aus den 1990er-Jahren sukzessive automatisiert, wodurch verschiedenste Technologien aufeinander abgestimmt werden mussten. Heute zählt die 200mm-Fertigung zu den weltweit am höchsten automatisierten in diesem Segment.

#### Abbildung 15: Entwicklung der Automatisierung

In den letzten zehn Jahren wurde der Wafertransport in der Fabrik Schritt für Schritt automatisiert ...



Manuelle Bestückung der Anlagen und manuelle Lagerregale für die Handhabung von Batches

Quelle: © Infineon Technologies AG 2019



Vollautomatisierte Halle und Work Area Control Station (WAC)

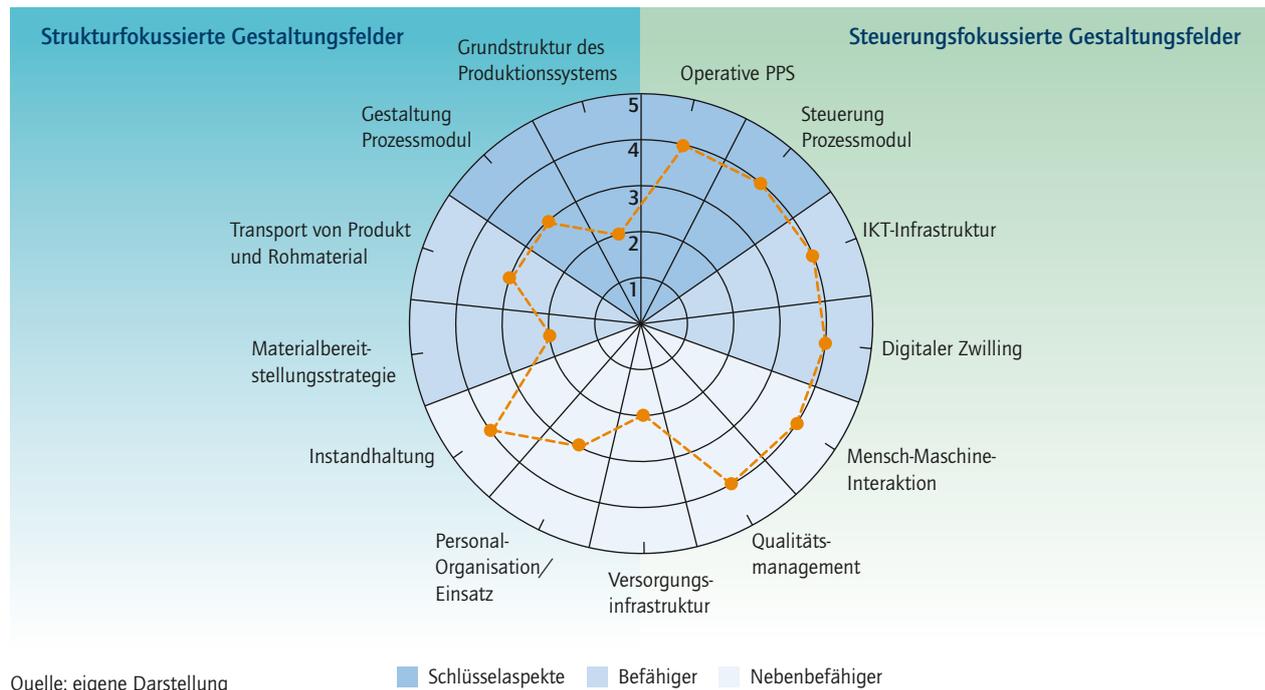
Die Herausforderung bei Infineon besteht in der Komplexität der Produktionssteuerung sowie der sehr hohen Sensitivität der Anlagen gegen Umwelteinflüsse und Konfigurationsveränderungen hinsichtlich physikalischer Parameter. Zur Herstellung der Wafer-Strukturen müssen die Anlagen mehrfach sequenziell angefahren und physikalische Parameter auf das Genaueste kontrolliert werden. So durchläuft ein Wafer über 50 Lithografieprozesse, wodurch bis zu 1.200 Prozessschritte notwendig werden. Dadurch ergibt sich eine Durchlaufzeit von 30 bis 60 Tagen und ein Work-In-Process-Bestand von circa 100.000 Losen.

Bei Infineon sind stabile, hochautomatisierte Anlagenstrukturen vorherrschend, weshalb Rekonfigurationen oder Änderungen im Fabriklayout nicht wirtschaftlich sind. Daher werden Flexibilitätspotenziale über den Materialfluss und die intelligente Auftragsplanung sowie -steuerung erreicht. Deshalb liegt ein Fokus von Infineon darauf, manuelle Transport- und Beladeprozesse zu automatisieren. Dafür kamen Deckentransportsysteme und schienengebundene Roboter zum Einsatz. Aufgrund des SEMI-Equipment-Communication-Standards konnten diese Lösungen direkt von Technologieanbietern bezogen und in die Steuerungssysteme integriert werden. Die Steuerung der Auftragsreihenfolge erfolgt über einen Dispatcher, der die Losreihenfolge optimiert und aus einem zentralen Auftragspool zuordnet. Eine Logik überprüft die Dispatch-Reihenfolge und passt diese, wenn nötig, ad hoc an. Zusätzlich besitzen Anlagen eine eigene Intelligenz, wodurch Fertigungsparameter je Los autonom angepasst werden (Run-to-Run-Control). Menschen greifen lediglich im Fehlerfall ein und werden dabei durch zentrale Bedien- und Beobachtungssysteme sowie Algorithmen unterstützt (Work Area Control). Dadurch konnten die Fertigungsdauern der Produkte um circa 20 Prozent reduziert werden. Zudem konnte durch die Nachautomatisierung der Durchsatz um circa 50 Prozent erhöht werden.

In Zukunft soll bei Infineon Dresden ein dynamisches und echtzeitfähiges Routing des Transportsystems zum Einsatz kommen. Zudem ist geplant, dass die Fabrikhallen über frei navigierbare Autonome Mobile Roboter (AMR) verbunden werden.

Die ermittelten Reifegradstufen sind in Abbildung 16 dargestellt.

Abbildung 16: Reifegradmodell Infineon Dresden



### Good Practice Daimler Truck Peking: Modular gestalteter Rohbau

DAIMLER TRUCK

Die Daimler Truck AG ist einer der weltweit größten Hersteller von Nutzfahrzeugen. Am Produktionsstandort in Peking realisiert Daimler Trucks ein modular gestaltetes Rohbaukonzept zur Fertigung von Karosserien für LKW-Fahrerhauskabinen.

Das Konzept mit dem Namen „CubeTruck“ ermöglicht es, eine hohe Varianz des Produktspektrums in einer Rohbauanlage abzubilden. Die Grundstruktur des Produktionssystems besteht aus standardisierten und skalierbaren Prozessmodulen in Form von Roboterzellen. Innerhalb dieser Zellen werden die Bauteile durch einen Roboter auf einer verfahrbaren, numerisch gesteuerten Achse mittels eines variantenspezifischen Greifers positioniert, während zusätzliche Schweißroboter diese mit Schweißpunkten fixieren. Starre und bodengebundene Geostationen, bekannt aus dem konventionellen Rohbau, entfallen somit.

Die Produktionssteuerung erfolgt mit fester Auftragsfolge. Ausgangspunkt der Materialbereitstellung sind die „Supermärkte“, die die benötigten Rohmaterialien bereitstellen. Diese werden Just-in-Sequence durch die Mitarbeitenden kommissioniert und mithilfe von Kitting-Trolleys zu den Prozessmodulen transportiert. Die Kitting-Trolleys verfügen über Radio-Frequency-Identification (RFID)-Tags, die mit Auftragsnummer und produktionsrelevanten Parametern verknüpft sind. Bevor Produkt und Rohmaterialien den Kitting-Trolleys automatisiert am Prozessmodul entnommen werden, findet ein Abgleich des Auftrags mit den Informationen des RFID-Tags statt.

Aufgrund des standardisierten Aufbaus der Prozessmodule lässt sich das Produktionssystem skalieren und auf veränderte Anforderungen anpassen. So ist es möglich, die einzelnen Prozessmodule über einen Werkzeugwechsel und die Umprogrammierung der Roboter aufwandsarm und ohne hohes Investment zu rekonfigurieren. Zusätzlich sind die Vorrichtungen zwischen den Prozessmodulen austauschbar, was die Ausfallsicherheit des Gesamtsystems erhöht. Der hohe Automatisierungsgrad des Produktionssystems reduziert zudem menschliche Prozessungenauigkeiten und steigert somit die Qualitätssicherheit. Durch die flexible Handhabung von Greifern wird der Zugang zu den Fügstellen erleichtert, woraus eine geringere Anzahl benötigter Sonderwerkzeuge resultiert. Dies verbessert die Verfügbarkeit der Ressourcen, reduziert die Investitionen und die Engineeringkosten, die bis zu 40 Prozent eines Gesamtprojekts ausmachen.

Die Daimler Truck AG strebt zukünftig eine Skalierung und Weiterentwicklung des modular gestalteten Rohbaukonzepts am Standort in Peking an und plant das Produktionssystem auf weitere Standorte zu übertragen.

Anmerkung: Für die ermittelten Reifegradstufen wurde keine Freigabe erteilt.

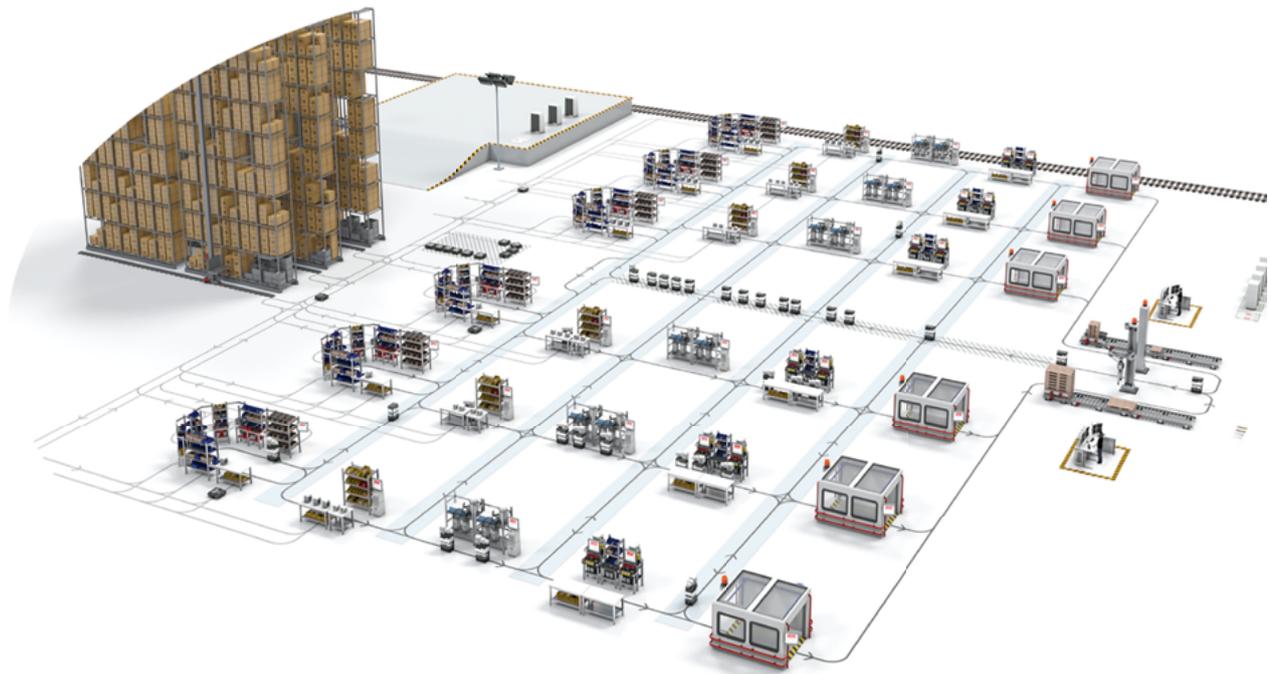
**Good Practice SEW-EURODRIVE Bruchsal:****Fertigung und Montage von Antriebskomponenten in einer cyber-physischen Matrixproduktion**

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG ist ein Hersteller von Antriebstechnik, wie Motoren, Getrieben und Umrichtern. Neben diesem Kerngeschäft hat sich der Unternehmensbereich MAXOLUTION® Fabrikautomatisierung gebildet. MAXOLUTION ist auf mobile Assistenzsysteme, fahrerlose Transportsysteme sowie die intelligente Verknüpfung dieser Systeme in der smarten Fabrik spezialisiert.

Die Herausforderungen bei SEW-EURODRIVE sind die hohe Individualisierung der Produkte aufgrund eines Produktkonfigurators, der stark heterogene Absatzmarkt und der Wunsch nach kürzesten Lieferzeiten. Dies führt zum Trade-Off: Intern ist eine hohe Produktivität das Ziel, extern eine hohe Kundenzufriedenheit.

Dem begegnet SEW-EURODRIVE mit einem durchgängigen Matrixproduktionssystem (siehe Abbildung 17), das sich stetig an den Kundenanforderungen ausrichtet und eine hohe Ressourcenauslastung von investitionsintensiven Prozessmodulen und Beschäftigten anstrebt. Dabei wird eine konsequente Lean-Ausrichtung aller Prozesse verfolgt. Dieser Ansatz wird ergänzt durch digitale Unterstützungswerkzeuge aus dem Bereich Industrie 4.0. Das System besteht aus flexibel verketteten Prozessmodulen. Im Montagebereich entspricht ein Prozessmodul einer klassischen U-Linie, die auf eine artgleiche Produktgruppe spezialisiert ist. Prozessmodule der mechanischen Fertigung und der Bestückung sind teilweise in sich verkettete Einheiten, teilweise einzelne Anlagen. Die Mitarbeitenden werden nach Bedarf flexibel den einzelnen Prozessmodulen zugeordnet. Kapitalintensive Ressourcen, wie eine automatisierte Ölbefüllung, werden über Produktgruppen hinweg ausgelastet. Eine Person überwacht das Gesamtsystem und dirigiert die Wertschöpfung, indem sie alle fünf Minuten einen zyklischen Soll-Ist-Vergleich des Produktionsfortschritts macht. Bei Handlungsbedarf wird eingegriffen, andernfalls werden Verbesserungspotenziale gesucht.

**Abbildung 17: Modulares Montagekonzept bei SEW-EURODRIVE**



Quelle: © SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG

SEW-EURODRIVE realisiert seinen automatisierten Materialfluss durch die Systeme von MAXOLUTION. Halbzeuge werden von der Kommissionierung durch alle notwendigen Montage-Prozessmodule bis in den Prüfungs- und Versandbereich von einem Fahrzeug transportiert. Dabei wird der Auftrag im Fahrzeug gespeichert. Im Montagebereich ist das Fahrzeug sowohl als Montageassistent als auch als Werkbank gestaltet. Wenn eine Übergabe vom Fahrzeug zum Prozessmodul erfolgt, so werden alle Informationen und Parameter direkt zwischen Fahrzeug und Prozessmodul kommuniziert. Die Steuerung der Flotte und des Gesamtsystems erfolgt durch eine dezentral optimierende Steuerung. Um die Ressourcenauslastungen der Prozessmodule noch weiter zu erhöhen, arbeitet SEW-EURODRIVE an einer weiteren Modularisierung und Flexibilisierung. In Zukunft sollen Montage-Prozessmodule ad hoc rekonfigurierbar sein, sodass eine direkte auftragsbezogene Anpassung möglich ist.

SEW-EURODRIVE erreicht kürzeste Durchlaufzeiten von bis zu fünf Tagen und eine hohe Produktivität unabhängig von der Varianz der Produkte.

Die ermittelten Reifegradstufen für den Fertigungsbereich sind in Abbildung 18 und für den Montagebereich in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 18: Reifegradmodell Fertigungsbereich SEW-EURODRIVE

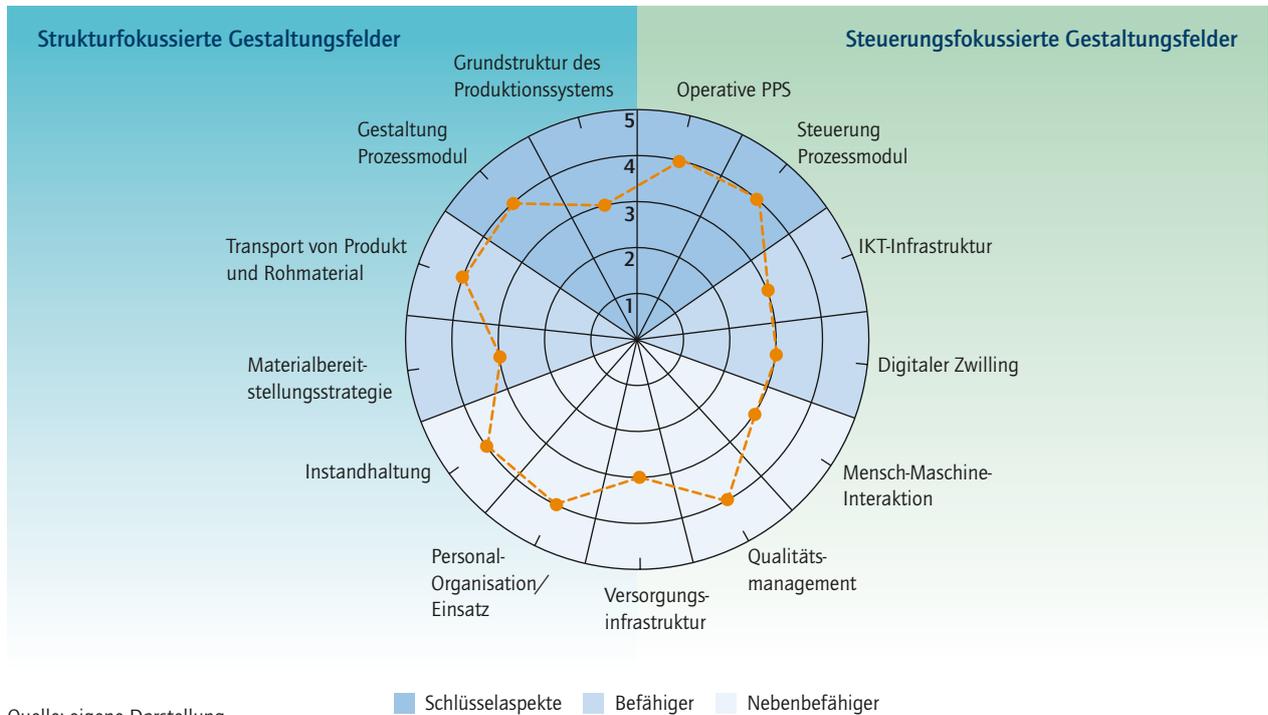
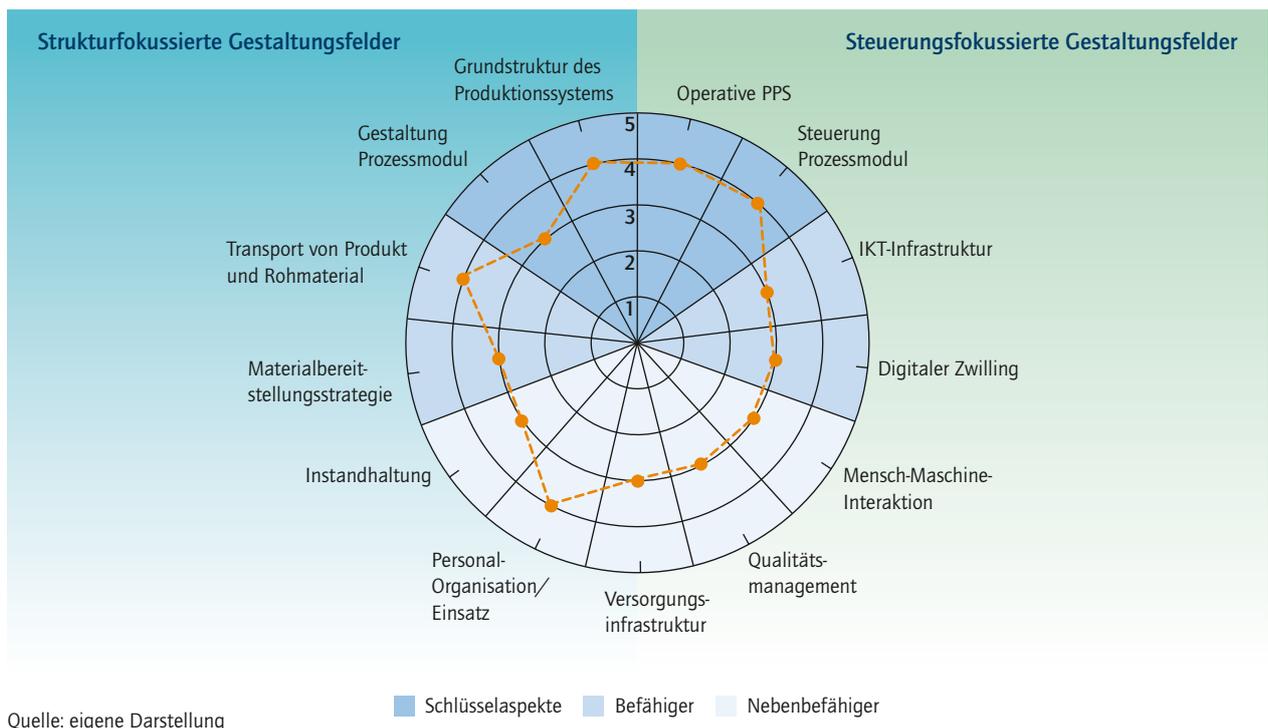


Abbildung 19: Reifegradmodell Montagebereich SEW-EURODRIVE



### 5.2.2. Entwicklungspfade zur Matrixproduktion

Aus den Befragungen der Unternehmen konnten drei charakteristische Entwicklungspfade zur Einführung eines Matrixproduktionssystems identifiziert werden. Der Verlauf der Pfade ist abhängig von der Ausgangssituation, das heißt der vorhandenen Aufbau- und Ablauforganisation im Unternehmen, sowie den Zielen, die Unternehmen mit der Einführung eines Matrixproduktionssystems verfolgen. Abbildung 20 bildet die Pfade schematisch ab.

#### Steuerungsorientierter Pfad – von der Werkstatt zur Matrixproduktion

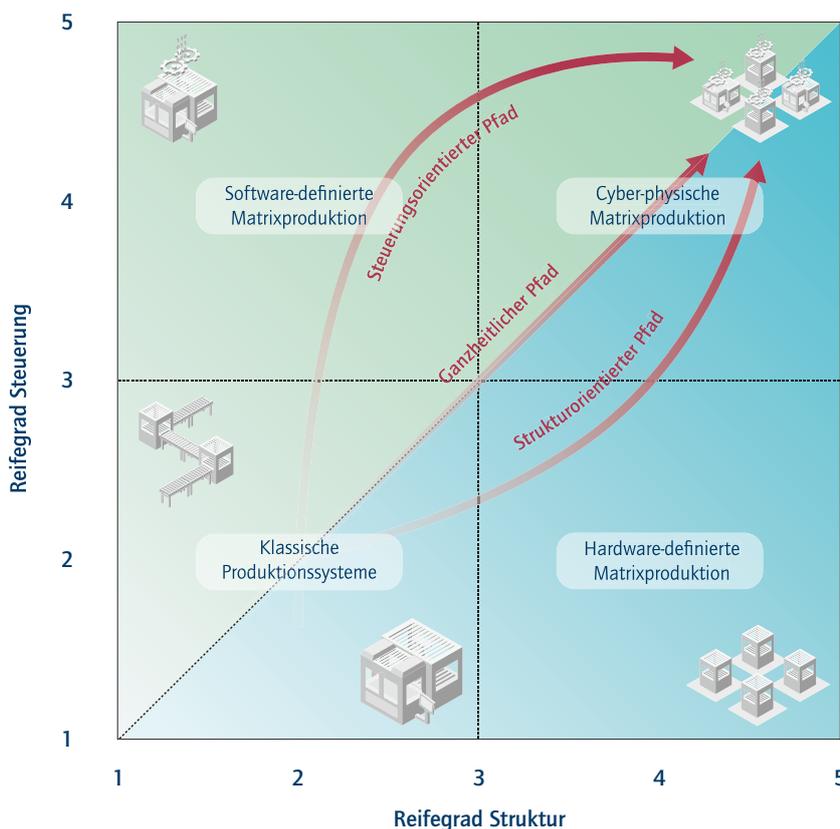
Der steuerungsorientierte Entwicklungspfad wurde von Unternehmen gewählt, die von einer Werkstattstruktur ausgingen. Die modulare Werkstattstruktur ermöglichte den Unternehmen bereits eine hohe Flexibilität, jedoch kann eine wesentliche Steigerung der Produktivität ohne Standardisierung und signifikante Weiterentwicklung der Auftragssteuerung nicht erfüllt werden. Dieser Entwicklungspfad geht einher mit einer höheren Industrialisierung und der Einführung von digital optimierenden Steuerungssystemen. Es müssen zunächst Abläufe standardisiert, IT-Systeme aufgebaut und an die höheren Anforderungen angepasst werden. Dies umfasst das Anlegen von Stammdaten (Arbeitspläne, Prozessmodule, Lagerorte etc.) sowie die Entwicklung und Implementierung eines Steuerungsalgorithmus zur Verteilung der Arbeitsvorgänge eines jeden Auftrags nach Produktivitätsgesichtspunkten. Anschließend können Materialflussaufgaben automatisiert werden.

Ein für die Expertise befragtes Unternehmen, das diesem Entwicklungspfad gefolgt ist, lässt eine wesentliche Verbesserung von Produktivitätskennzahlen erkennen. Wie Tabelle 2 zeigt, konnten der Flächenbedarf sowie die Anzahl der Mitarbeitenden reduziert und damit der Automatisierungsgrad erhöht werden. Dies ist hauptsächlich auf die Automatisierung des Materialflusses und des Material-Handlings zurückzuführen. Mit der Einführung einer automatisierten Materialflussteuerung konnten zudem die Durchlaufzeiten der Aufträge reduziert werden. Für die dafür notwendige Standardisierung von Prozessen ließen sich außerdem die Bestände reduzieren. Vom Startzeitpunkt des Vorhabens bis zum Abschluss der Umsetzung gibt das Unternehmen einen Zeitbedarf von vier Jahren an, zwei Jahre für die Planung und weitere zwei Jahre zur Umsetzung des Vorhabens.

**Tabelle 2: Exemplarische Kennzahlenveränderung von einem klassischen Produktionssystem zu einer software-definierten Matrixproduktion**

Kennzahlen	Veränderung
Flächenbedarf	Geringer
Anzahl Mitarbeitende	Geringer
Anzahl Betriebsmittel	Gleich
Automatisierungsgrad	Größer
Durchlaufzeit	Geringer
Bestände	Geringer
Planungs- und Umsetzungsdauer	24 - 48 Monate

**Abbildung 20: Entwicklungspfade zur Matrixproduktion**



Quelle: eigene Darstellung

Der Bedarf für eine Weiterentwicklung der Produktion zu einer vollwertigen cyber-physischen Matrixproduktion hängt zum einen davon ab, ob eine strukturelle Veränderungsfähigkeit mittels Rekonfiguration des Produktionssystems erforderlich ist. Zum anderen müssen die Prozessmodule eine rekonfigurationsgerechte Gestaltung zulassen. Ist beides gegeben, besteht die Weiterentwicklung daraus, die Prozessmodule rekonfigurationsgerecht aufzubauen. Außerdem wird der Funktionsumfang der automatisierten Steuerung erweitert. Tabelle 3 zeigt die Entwicklung ausgewählter Kennzahlen eines befragten Unternehmens, das den steuerungsorientierten Entwicklungspfad bis hin zu einer cyber-physischen Matrixproduktion durchlaufen hat. Der Flächenbedarf vergrößerte sich geringfügig. Über die Nutzung der Ressourcen für mehrere Produktgruppen konnten der Automatisierungsgrad wirtschaftlich erhöht und infolgedessen Betriebsmittel und Personal reduziert werden. Da in diesem Anwendungsfall auf den One-Piece-Flow umgestellt wurde, reduzierten sich die Bestände gegen null und damit ebenso die Durchlaufzeiten. Die Restrukturierung erfolgte im Verlauf mehrerer Jahre.

**Tabelle 3: Exemplarische Kennzahlenveränderung von einer software-definierten zu einer cyber-physischen Matrixproduktion**

Kennzahlen	Veränderung
Flächenbedarf	Geringfügig größer
Anzahl Mitarbeitende	Geringer
Anzahl Betriebsmittel	Geringer
Automatisierungsgrad	Größer
Durchlaufzeit	Geringer
Bestände	Geringer
Planungs- und Umsetzungsdauer	Mehrere Jahre

### Strukturorientierter Pfad – von der Linie zur Matrixproduktion

Der strukturorientierte Entwicklungspfad wird von Unternehmen gewählt, die in starr verketteten Liniensystemen produzieren. Dieser Entwicklungspfad geht mit einer Flexibilisierung des Systems durch die Auflösung der starren Strukturen einher. Bestehende Systeme müssen zunächst modularisiert und Rekonfigurationsmöglichkeiten vorgesehen sowie systematisch genutzt werden. Dieser Pfad ist insbesondere dann geeignet, wenn bestehende Produktionssysteme aus leicht zu rekonfigurierenden Produktionsressourcen aufgebaut sind, deren Flexibilitätskorridore angepasst werden können. Dies trifft besonders bei manuell geprägten Montagen zu. Statt mit dedizierten Linien für einzelne Produktgruppen kann im besten Fall mit einem einzigen System für mehrere ähnliche Produktgruppen gearbeitet werden.

In einem Montagebereich eines befragten Unternehmens konnte mit einer entsprechenden Reorganisation die Anzahl der Linien reduziert werden. Dadurch reduzierte sich auch der Flächenbedarf (siehe Tabelle 4). Die Modularisierung des Montagebereichs war mit bestehendem Equipment möglich. Der Automatisierungsgrad wurde wirtschaftlich erhöht und damit die Anzahl benötigter Fachkräfte gesenkt. Die Durchlaufzeit im Montagesystem selbst erhöhte

sich zwar, die Erhöhung ist jedoch im Vergleich zur Gesamtdurchlaufzeit der Produkte vernachlässigbar. Für diesen Bereich wurde als Zeitbedarf zur Planung und Umsetzung der Restrukturierung 36 Monate angegeben.

**Tabelle 4: Exemplarische Kennzahlenveränderung von einem klassischen Produktionssystem zu einer hardware-definierten Matrixproduktion**

Kennzahlen	Veränderung
Flächenbedarf	Geringer
Anzahl Mitarbeitende	Geringer
Anzahl Betriebsmittel	Geringer
Automatisierungsgrad	Größer
Durchlaufzeit	Größer
Bestände	Gleich
Planungs- und Umsetzungsdauer	36 Monate

Falls höhere Produktivitätsziele gefordert werden, können diese modularisierten Produktionssysteme mit der Investition einer komplexen Steuerung weiterentwickelt werden. Bei der Befragung der Unternehmen stellte sich heraus, dass eine weitere Modularisierung der Produktionsressourcen hin zu adaptiven und automatisiert rekonfigurierbaren Strukturen immer auch mit einer Standardisierung von Abläufen sowie dem Aufbau und der Anpassung einer digitalen Auftragssteuerung einherging. Dies bedeutet, dass höhere Reifegradstufen in den strukturfokussierten Gestaltungsfeldern nicht ohne Steuerungsautomatisierung erreichbar sind. Schrittweise wurden anschließend auch Materialtransporte automatisiert.

Wie Tabelle 5 zusammenfasst, konnte in einem Montagesegment eines Unternehmens, das von dedizierten Linien bis zu einer vollumfänglichen cyber-physischen Matrixproduktion entwickelt wurde, eine erhebliche Kennzahlenverbesserung erreicht werden. Die Anzahl der Betriebsmittel konnte von über zehn dedizierten Linien auf zwei Linien und eine Matrixmontage drastisch gesenkt werden. Gleichzeitig reduzierte sich der Flächenbedarf um knapp 70 Prozent. Auch die Anzahl benötigter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter reduzierte sich. Die Durchlaufzeiten im Montagesystem selbst erhöhten sich (vernachlässigbar im Vergleich zur Gesamtdurchlaufzeit), während die Umlaufbestände gleichblieben. Zur Planung der Entwicklung wurden 12 Monate benötigt, für die finale Umsetzung weitere 13 Monate.

**Tabelle 5: Exemplarische Kennzahlenveränderung von einer hardware-definierten zu einer cyber-physischen Matrixproduktion**

Kennzahlen	Veränderung
Flächenbedarf	Geringer
Anzahl Mitarbeitende	Geringer
Anzahl Betriebsmittel	Geringer
Automatisierungsgrad	Gleich
Durchlaufzeit	Größer
Bestände	Gleich
Planungs- und Umsetzungsdauer	25 Monate

**Good Practice:****Hersteller von Elektrowerkzeugen nutzt cyber-physisches Matrixmontagesystem**

Der Markt für Elektrowerkzeuge gilt als volatil. Welche Werkzeuge und Varianten in welcher Stückzahl nachgefragt werden, kann kaum genau prognostiziert werden. Gleichzeitig werden kurze Lieferzeiten erwartet. Um diese Anforderungen in der Produktion wirtschaftlich umzusetzen, entschied sich das befragte Unternehmen, statt mehr als zehn dedizierter Linien je Produktgruppe, zwei Linien für High-Runner-Produkte und ein modulares Produktionssystem für stark schwankende Produktumfänge einzusetzen. Das modulare Produktionssystem ermöglicht es, Prozessmodule flexibel anzufahren und so verschiedenste Produkte und Varianten effizient zu montieren. Außerdem sieht das System die Möglichkeit von Rekonfigurationen vor, indem verschiedene Prozessmodule vorgehalten werden. So können abhängig von Stückzahlschwankungen zusätzliche Prozessmodule integriert beziehungsweise aus dem System genommen werden.

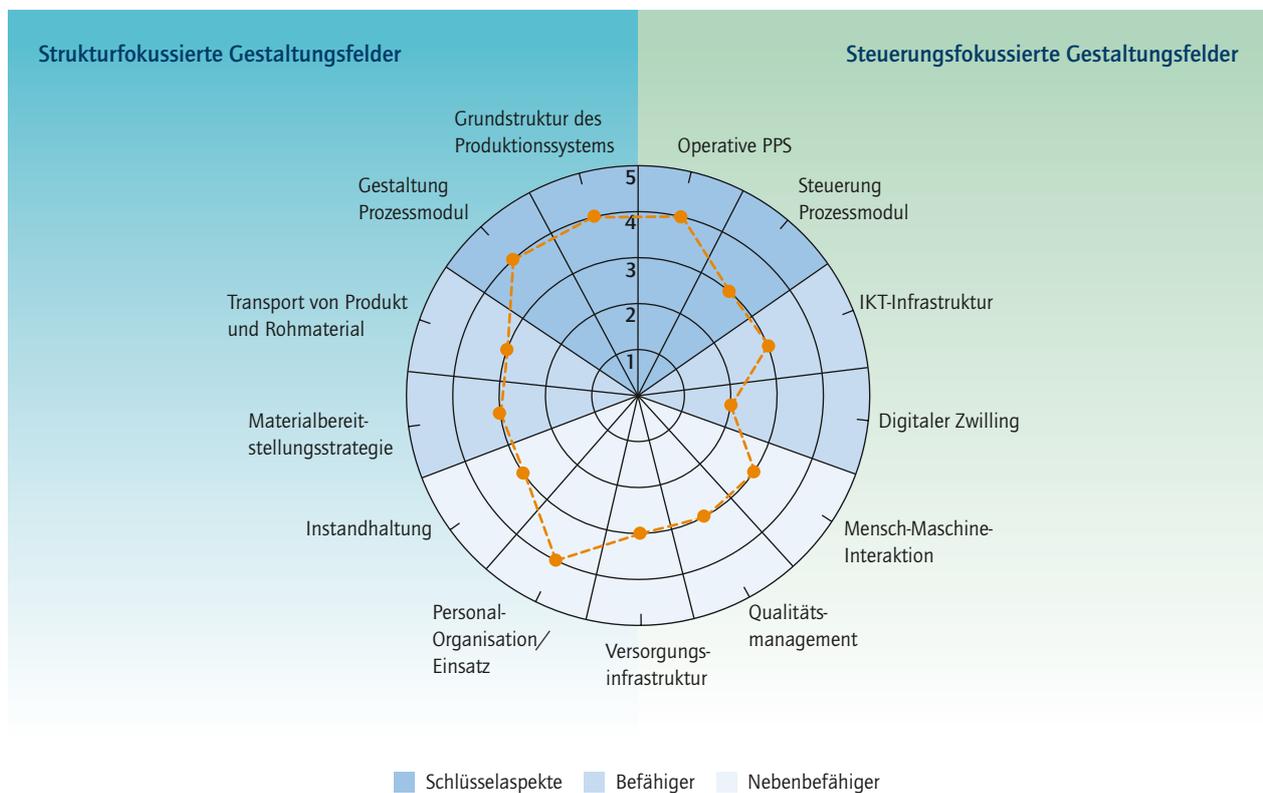
Die Mobilität der Prozessmodule und die Standardisierung ihrer Schnittstellen ermöglichen eine Umstellung und Inbetriebnahme innerhalb von fünf Minuten. Somit kann das Produktionssystem, unabhängig von Stückzahl, Variantenmix und zeitlichem Vorlauf, jegliche Produktionsprogramme wirtschaftlich produzieren.

Zur Steuerung der Aufträge durch das System wird eine eigens entwickelte Software genutzt. Sie entscheidet ad hoc, abhängig von der freien Verfügbarkeit, an welchen Prozessmodulen welche Arbeitsvorgänge durchgeführt werden. Dazu sind alle Prozessmodule und Arbeitskräfte in der Fertigung als cyber-physische Elemente im System abgebildet. Jedes Produkt wird auf einem Montagewagen vorkommissioniert und anschließend manuell durch die Produktion gefahren. Ein sogenanntes Human Machine Interface (HMI) am Wagen unterstützt mit Arbeitsanweisungen und gibt die Route vor. Weiterhin dient der Wagen als Montagevorrichtung.

Die Gestaltung und Umsetzung des Systems erforderten zunächst viel Aufwand und Kreativität, jedoch rechtfertigen die nun täglich erzielten Ergebnisse die Aufwände.

Die ermittelten Reifegradstufen sind in Abbildung 21 dargestellt.

**Abbildung 21: Reifegradmodell Hersteller Elektrowerkzeuge**



### Ganzheitlicher steuerungs- und strukturorientierter Pfad – auf direktem Weg zur cyber-physischen Matrixproduktion

Der steuerungs- und strukturorientierte Pfad beschreibt einen ganzheitlichen Weg zur cyber-physischen Matrixproduktion, auf dem strukturelle und steuerungstechnische Aspekte der Matrixeinführung gleichermaßen in Angriff genommen werden. Dieser Entwicklungspfad bietet sich für Unternehmen an, die bereits Erfahrung im Aufbau von rekonfigurationsfähigen Produktionssystemen gesammelt haben und versiert im Umgang mit einer automatisierten Auftragssteuerung sind oder mit entsprechenden Partnern zusammenarbeiten. Dieses Vorgehen erfordert zum Zeitpunkt der Einführung hohen gestalterischen und planerischen Aufwand, ermöglicht jedoch ambitionierte Zielsetzungen für Flexibilität, Rekonfiguration und Produktivität.

Ein Unternehmen, das den Sprung von Einzelarbeitsplätzen in ein cyber-physisches Matrixmontagesystem prototypisch vollzogen hat, konnte die in Tabelle 6 dargestellten Kennzahlen-Verbesserungen erreichen. Der Flächenbedarf für wertschöpfend genutzte Flächen in der Montage stieg, da jedoch Flächen zur Logistik und

Kommissionierung wegfelen, veränderte sich der Gesamtflächenbedarf nicht. Betriebsmittel und Personal konnten reduziert werden. Grund dafür sind Produktivitätsgewinne, die im Vergleich zu den vorherigen Einzelarbeitsplätzen auf der nun möglichen Arbeitsteilung und der Realisierung eines kontinuierlichen Arbeitsflusses beruhen. Umlaufbestände und die Durchlaufzeiten im Montagesystem selbst erhöhten sich, was jedoch keine nennenswerten Auswirkungen auf die Gesamtdurchlaufzeit der Baugruppe hatte.

**Tabelle 6: Exemplarische Kennzahlenveränderung von einem klassischen Produktionssystem direkt zu einer cyber-physischen Matrixproduktion**

Kennzahlen	Veränderung
Flächenbedarf	Gleich
Anzahl Mitarbeitende	Geringer
Anzahl Betriebsmittel	Geringer
Automatisierungsgrad	Gleich
Durchlaufzeit	Größer
Bestände	Größer
Planungs- und Umsetzungsdauer	> 36 Monate

#### Good Practice Audi Ingolstadt: Matrixproduktion für Baugruppen-Vormontage



Der Automobilkonzern Audi erarbeitet in Kooperation mit Jungheinrich in einem Pilotprojekt eine Matrixproduktion. Die betrachtete Vormontage wird aktuell über standardisierte Einzelarbeitsplätze realisiert. Zur Produktivitätsoptimierung soll diese als Matrix reorganisiert werden. Dazu wurde ein Versuchsbereich aufgebaut, in dem die Lösung entwickelt, getestet und für den operativen Betrieb vorbereitet wird (siehe Abbildung 22). Die Grundstruktur besteht aus standardisierten manuellen Prozessmodulen, an denen die Materialien zur Montage bereitgestellt werden. Zusätzlich ist eine automatisierte Prüfstation integriert. Die zu montierende Baugruppe wird über fahrerlose Transportfahrzeuge zu den einzelnen Modulen gefahren und so schrittweise komplettiert. Die Baugruppe bleibt während des Montagevorgangs einem Fahrzeug zugeordnet und wird auf diesem über eine Vorrichtung montiert. Der Fluss durch das Produktionssystem wird von einem zentralen Steuerungsalgorithmus in Kombination mit einem intelligenten Flottenmanagement geleitet. Dadurch werden die Ziele der Operationsreihenfolge- und Arbeitsverteilungsflexibilität maximal erreicht.

**Abbildung 22: Modulares Montagekonzept für die Türverkleidung (Audi Ingolstadt)**



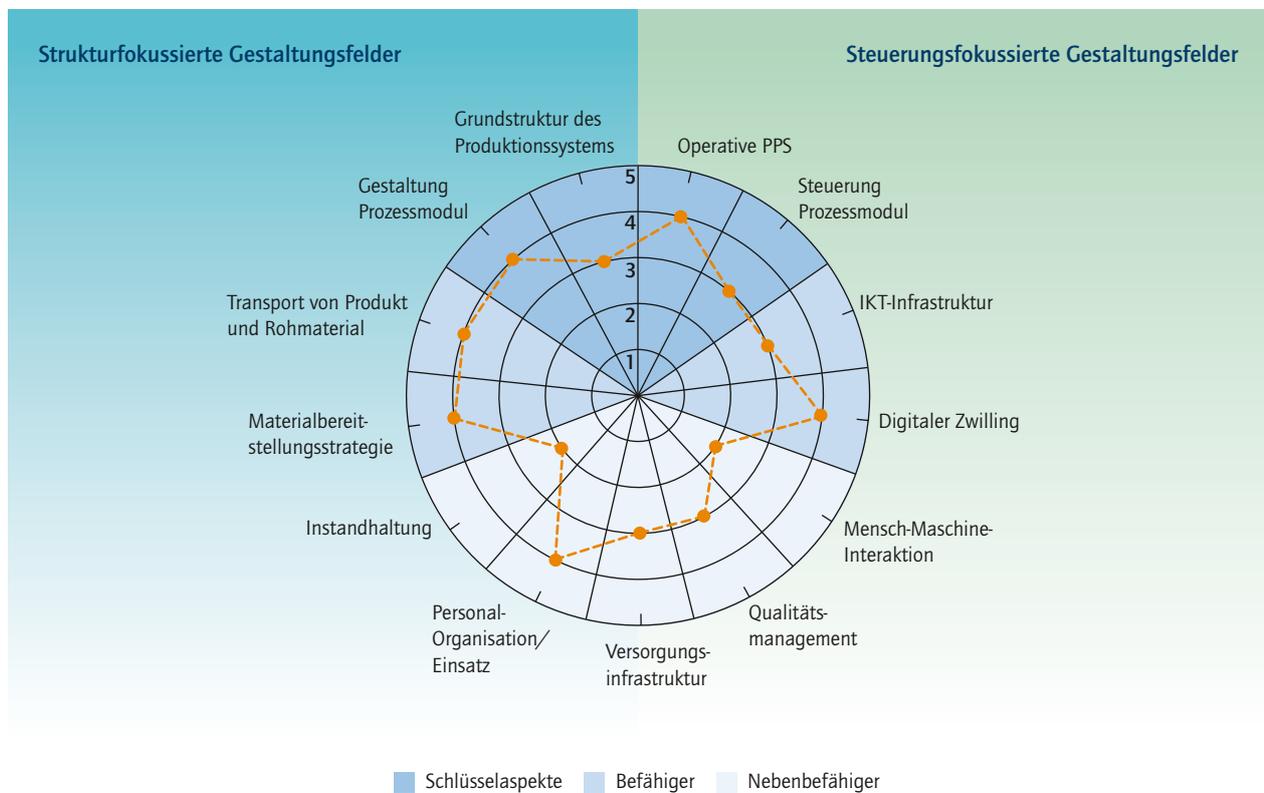
Quelle: © Audi AG

Basierend auf Erfahrungen aus ähnlichen Projekten wird damit gerechnet, dass die Reorganisation mit einer Reduzierung der Montagezeiten von circa 20 Prozent und einer Erhöhung der Personalauslastung einhergeht. Grund dafür sind die Möglichkeiten zur Arbeitsteilung, zur Erzeugung eines Prozessflusses und zur Entbindung der Fachkräfte von nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten. Zusätzlich kann das Produktionssystem aufgrund des standardisierten Aufbaus aller Prozessmodule durch Rekonfiguration an verschiedene äußere Einflüsse angepasst und skaliert werden. Das umfasst unter anderem die Anpassung der Materialbereitstellung, die Anpassung und Umlagerung von Montageschritten an den Prozessmodulen sowie die Möglichkeit der räumlichen Layoutanpassung durch die aufwandsarme Positionsänderung der Prozessmodule.

Nach erfolgreichem Abschluss des Pilotprojekts sollen weitere Anwendungsfälle, insbesondere in Baugruppenvormontagen, identifiziert und als Matrixproduktion reorganisiert werden.

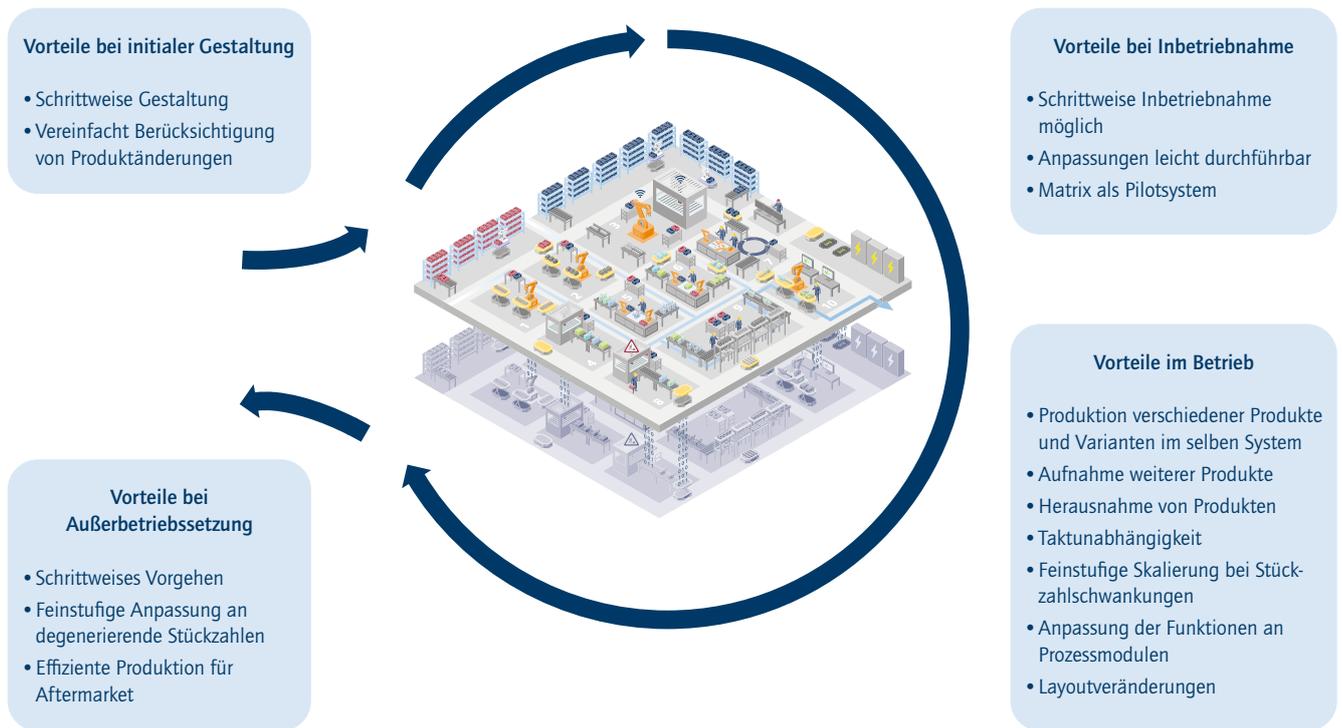
Die ermittelten Reifegradstufen sind in Abbildung 23 dargestellt.

Abbildung 23: Reifegradmodell Vormontage Audi



Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 24: Lebenszyklusphasen eines Matrixproduktionssystems



Quelle: eigene Darstellung

### 5.2.3. Vorteile einer Matrixproduktion in den Lebenszyklusphasen

Die befragten Unternehmen nannten über die beschriebenen Effekte auf die Kennzahlen hinaus weitere generelle Vorteile beziehungsweise Motivationen zur Umsetzung einer Matrixproduktion. Diese wurden nach den Lebenszyklusphasen des Produktionssystems in Abbildung 24 systematisiert.

#### Schrittweise Inbetriebnahme und Investition

Befragte Unternehmen geben an, dass ihnen die modulare Struktur hilft, die initiale Gestaltung des Produktionssystems schrittweise vorzunehmen und dabei leicht auf Änderungen aus der Produktentwicklung einzugehen. Auch die Möglichkeit, Investitionen schrittweise zu tätigen, wird als Vorteil genannt. Gleiches gilt für die Inbetriebnahme. Auch hier unterstützt die modulare Bauweise, Anpassungen aufgrund von Produktänderungen oder erkannten Verbesserungsmöglichkeiten gezielt und lediglich an den betreffenden Modulen vorzunehmen. Somit können bei Matrixproduktionssystemen die Vorteile des sogenannten **Simultaneous Engineering** besser genutzt werden. Als weitere Vorteile werden genannt, dass auf verkürzte Produktlebenszyklen und geänderte Marktbedarfe flexibler reagiert werden kann.

#### Nutzung als Pilot-, Ramp-Up- und Ramp-Down-System

Befragte Unternehmen gaben zwei Gründe für die Nutzung von Matrixproduktionssystemen als Pilotsysteme an: Sie fungieren zum einen als Ramp-up-Systeme, um Prozesse in der Ramp-up-Phase

neuer Produkte zu einer ausreichenden Reife zu führen. Damit dienen Matrixproduktionssysteme der Steigerung der Agilität von Unternehmen sowie der Minimierung von Investitionsrisiken. Zum anderen werden Matrixproduktionssysteme nach einer erfolgreichen Ramp-up-Phase von Produktgruppen bei ausreichend hohen Stückzahlen und einer positiven Marktprognose zu Liniensystemen umgebaut, wobei die Produktionsressourcen weitergenutzt werden.

Auch in der Außerbetriebsetzung zeigt sich eine Matrixproduktion vorteilhaft. So kann ein Auslaufen der Produktion ebenfalls schrittweise durchgeführt werden und somit eine feinstufige Anpassung an sinkende Stückzahlen erfolgen. Dies erlaubt ebenfalls eine effiziente Produktion von Ersatzteilen für den Aftermarket. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, ein Matrixproduktionssystem zur Durchführung von Produktdemontage zu rekonfigurieren, um so auch das Ende des Produktlebenszyklus abzubilden.

#### Ein System für viele Produktvarianten

Befragte Unternehmen produzieren in der Betriebsphase verschiedene Produkte und Varianten im selben System. Als Vorteil wurde neben der Taktunabhängigkeit der Ausgleich von Stückzahlenschwankungen genannt sowie die Möglichkeit, neue Produkte im laufenden Betrieb in das System zu integrieren oder auslaufende Produkte aus dem System herauszunehmen. Weitere Vorteile ergeben sich über die Möglichkeit der Rekonfiguration. Die modulare Bauweise ermöglicht eine feinstufige Skalierung der Stückzahlen, eine Anpassung der Funktionen der Prozessmodule sowie Layoutveränderungen.

**Erkenntnis 2:** Matrixproduktionssysteme eignen sich für verschiedenste Produktionsprozesse und Branchen.

### 5.3. Technologien und Werkzeuge für Matrixproduktionssysteme

Im Rahmen der Expertise wurden auch ausrüstende Unternehmen befragt, die Technologien zum Betrieb von Matrixproduktionssystemen entwickeln und anbieten. Dabei wurde auf Ausrüster fokussiert, die gemäß des Reifegradmodells Lösungen zu den sogenannten *Schlüsselaspekten* und *Befähigern* (siehe Kapitel 4.1) von Matrixproduktionen bereitstellen:

- Produktionsressourcen (Gestaltungsfelder *Gestaltung Prozessmodul* und *Steuerung Prozessmodul*)
- Produktionssteuerung (Gestaltungsfeld *Operative PPS*)
- Transportsysteme (Gestaltungsfeld *Transport von Produkt und Rohmaterial*)

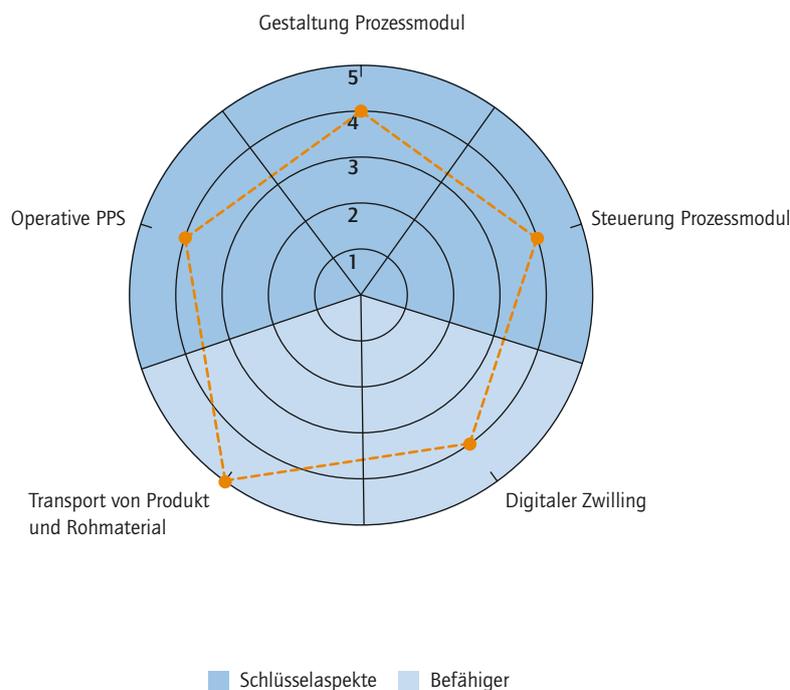
Weitere Erläuterungen zu den befragten Technologieausrüstern sind in Anhang C zusammengefasst.

#### 5.3.1. Reifegrade der am Markt verfügbaren Schlüsseltechnologien

Abbildung 25 zeigt, welche maximalen Reifegrade die Technologien, die von den befragten Technologieausrüstern angeboten werden, in den fokussierten Gestaltungsfeldern erreichen. Das Spinnennetz-Diagramm visualisiert hier nicht die Ergebnisse eines einzelnen Anbieterunternehmens, sondern fasst die höchsten erreichten Reifegrade aller Ausrüsterbefragungen zusammen. Das Spinnennetz-Diagramm zeigt, dass für jedes Gestaltungsfeld ein Reifegrad von Stufe 4 oder höher erreicht werden konnte. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die erforderlichen Technologien zur Umsetzung einer vollwertigen cyber-physischen Matrixproduktion bereitstehen.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Befragung, dass ausrüstende Unternehmen im Regelfall sowohl basierend auf konkreten Kundenprojekten (Market Pull) als auch eigeninitiativ über kundenneutrale Vorentwicklungen (Technology Push) Lösungen erarbeiten. Die Unternehmen äußern darüber hinaus die Absicht, sich in weiteren als den ursprünglichen Kernfeldern der Gestaltung zu entwickeln. Dies wird mit der Erwartung anwendender Unternehmen begründet, abgeschlossene Komplettlösungen zu erhalten. Der Anreiz für Anwender, auf Komplettanbieter zuzugehen, liegt offensichtlich darin, die komplexe Koordination von Auswahl, Einführung und Betrieb der Lösungen an einer zentralen Stelle zu

Abbildung 25: Maximalausprägungen der befragten Technologieausrüster



Quelle: eigene Darstellung

bündeln. Außerdem stellt die Aussicht, ein ausgereiftes System mit hoher Verfügbarkeit zu erhalten, ein entscheidendes Auswahlkriterium dar.

Keines der befragten ausrüstenden Unternehmen kann bereits über alle Gestaltungsfelder hinweg Lösungen anbieten. Dazu fehlt das notwendige Maß an Know-how, welches für die einzelnen Unternehmen nur schwer zu erreichen ist. Interdisziplinäre Kooperationen mehrerer Unternehmen mit sich ergänzenden Kompetenzen erscheinen vielversprechender. Die tiefergehenden Befragungen machen dafür einen Bedarf an Standardisierung von Produktionsressourcen, Abläufen, Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen deutlich. Aktuell werden je nach Anwendungsfall hohe Anpassungs- und Implementierungsaufwände zur Herstellung der **Interoperabilität** der unterschiedlichen Sub-Systeme benötigt. Entsprechend werden modular gestaltete Elemente mit standardisierten Funktionsumfängen und Schnittstellen von den Technologieanwendern gefordert. Dies vereinfacht sowohl die Einführung von Matrixproduktionssystemen als auch die Nutzung der Flexibilitäts- und Veränderungsfähigkeitspotenziale während der Betriebsphase.

### 5.3.2. Feinanalyse der Schlüsseltechnologien

#### Produktionsressourcen

Die Ergebnisanalyse der Befragungen zeigt, dass Anbieter in den Gestaltungsfeldern *Gestaltung und Steuerung von Prozessmodulen* hohe Reifegradstufen erreichen. Die Ausrüster bieten modular aufgebaute Fertigungs- und Montageeinrichtungen an, die es ermöglichen, bis zu einem gewissen Umfang Rekonfigurationen durchzuführen. Dazu zählt auch die Möglichkeit, gesamte Technologien aufwandsarm und in kurzer Zeit auszutauschen. Das wird zum Beispiel durch standardisierte Technologie-Kits, die durch Plug & Play gewechselt werden können, erreicht. Sie erlauben das Kombinieren von Technologien in einem Baukastensystem nach kundenspezifischen Anforderungen. Des Weiteren ist erkennbar, dass alle Anbieter Schnittstellen zur freien Anfahrbarkeit von **fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF)** für den Material-Input und -Output vorsehen. Außerdem bieten die Prozessmodule eine Vielzahl standardisierter Schnittstellen und Kommunikationsstandards, zum Beispiel **Open Platform Communications Unified Architecture (OPCUA)** und **Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)**, wodurch sie sich problemlos in die IT-Infrastruktur einbinden lassen. Mittels eigener Steuerungen können die Module je nach Anwendungsgebiet dezentral Steuerungsentscheidungen treffen und sind dadurch auf die matrixspezifischen Anforderungen der Arbeitsverteilungs- und Operationsreihenfolgeflexibilität vorbereitet.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass Lösungen für den digitalen Zwilling von den Ausrüstern bereitgestellt werden. Bisher werden diese vorrangig für die Planung und Inbetriebnahme genutzt. Anwendende Unternehmen setzen Lösungen ein, bei denen mittels des digitalen Zwillings in Echtzeit Anlagenstatus, Auftragszuordnung zu Prozessmodulen und Fahrtrouten von Transportfahrzeugen dargestellt werden. Dies schafft für das verantwortliche Personal Transparenz und unterstützt bei der Störungserkennung und

Verbesserung des Produktionssystems. Die Anbieter streben an, in Zukunft weitere Anwendungsfälle und Vorteile des digitalen Zwillings zu erschließen, um diesen bei der virtuellen Inbetriebnahme zu nutzen und im operativen Betrieb als Entscheidungsunterstützung gewinnbringend einzusetzen.

Außerdem zeigen die Befragungen, dass sich die ausrüstenden Unternehmen im Bereich der Prozessmodule mit Geschäftsmodellinnovationen wie sogenannten Subscription-Angeboten (digitale Abonnement-Modelle) beschäftigen.

#### Produktionsplanung und -steuerung

Im Bereich Produktionsplanung und -steuerung sticht die Halbleiterbranche als Vorreiter hervor. Die Befragungen ergaben, dass Halbleitersysteme in der Produktionssteuerung Lösungen mit einem Reifegrad der Stufe 4 anbieten. Besonders hervorzuheben sind die hochflexiblen und automatisierten Steuerungsprozesse der Auftragslose durch die Produktion. Dies wird durch eine hohe Standardisierung bei den Technologien, Schnittstellen und der Kommunikation aller Produktionsressourcen erreicht. Es werden keine Insellösungen entwickelt, sondern Lösungen, die in der gesamten Halbleiterbranche eingesetzt werden können.

Es konnten allerdings im Vorfeld der Befragung keine Ausrüster gefunden werden, die für andere Branchen ganzheitliche matrixfähige Steuerungslösungen anbieten. Gründe dafür sind unterschiedliche Produktionsanforderungen und fehlende einheitliche Standards. Das führt dazu, dass heutige Steuerungslösungen für Matrixproduktionssysteme aus Eigenentwicklungen der Anwender oder aus Lösungen, die zusammen mit dem Technologieausrüster spezifisch für den Anwendungsfall erstellt wurden, bestehen. Steuerungsanbieter arbeiten an standardisierten Lösungen, die einfach integriert werden können und die Flexibilitätsanforderungen der Auftragsverteilungs- und Operationsreihenfolgeflexibilität ermöglichen.

Weiteren Handlungsbedarf sehen die Ausrüster für Steuerungssoftware in der Prognose, Optimierung und Identifizierung von Ausfallszenarien und Anomalien. Dies soll in Zukunft durch mathematische Algorithmen, KI-Methoden sowie Big Data Analytics umgesetzt werden. Zudem sehen die Ausrüster Potenziale in der Erschließung weiterer Branchen und dem Geschäftsmodell Software-as-a-Service (SaaS).

#### Transportsysteme

Auch wenn der Transport von Produkt und Rohmaterialien in Matrixproduktionssystemen nicht zwingend automatisiert sein muss, liegt die Automatisierung dieser nicht wertschöpfenden Prozesse nahe und wird daher häufig angestrebt. Zur Realisierung des flexiblen Materialflusses wird ein ebenso flexibles Transportsystem benötigt.

Dafür müssen Fahrzeuge frei im Produktionssystem navigieren können. Auf dem Markt wird bereits eine Vielzahl von Systemen

**Good Practice XENON Dresden:****Matrixfähige Zellen zur automatisierten Komponentenfertigung und -prüfung**

Die XENON Automatisierungstechnik GmbH zählt zu den führenden deutschen Anbietern von kundenspezifischen, schlüsselfertigen Hightech-Automations- und Prüflösungen für die Branchen Automotive, Elektronikfertigung und Medizintechnik. Als Ausrüster für matrixfähige Prozessmodule erreicht XENON im gleichnamigen Gestaltungsfeld einen sehr hohen Reifegrad, der insbesondere durch konsequentes Anwenden des Modularitätsgedankens erreicht wird.

Je nach Kundenwunsch beziehungsweise Layout der Matrix sind verschiedene Größen der Produktionszellen möglich und lassen sich aus einem Baukasten kombinieren. Prüf- oder Montageszenarien können so gestaltet werden, dass sie bauteilflexibel in Hard- und Software sind. Es existieren einheitliche Schnittstellen für den Input und Output von Materialien, sodass AMR die Prozessmodule bedienen können. Die Modularität setzt sich über einheitliche Schnittstellen für verwendete Montage- und Prüfwerkzeuge fort. Besonders positiv hervorzuheben ist die Rekonfigurationsfähigkeit von Teilmodulen über standardisierte Räume/Abmessungen und standardisierte Schnittstellen-Kits, die aus mechanischen und elektronischen/datenseitigen Verbindungen bestehen. Eine beispielhafte Montagezelle ist in Abbildung 26 dargestellt.

Jedes Prozessmodul hat eine eigene (dezentrale) Steuerung und kann selbst Entscheidungen treffen, wobei eine zentrale Orchestrierung durch einen Leitrechner ebenso möglich ist. Standardisierte Schnittstellen und Kommunikationsstandards wie OPC UA und mehrere MES-Protokolle, wie GHP, iTac und SEC/GEM, werden unterstützt. Fernwartung wird über einen modulspezifischen Matrix-Code ermöglicht und die Module sind für eine Ad-hoc-Nutzung der Arbeitsverteilungs- und Operationsreihenfolgeflexibilität steuerungsseitig vorbereitet. Für die Prozessmodule steht ein digitaler Zwilling zur Verfügung, der aktuell vorrangig für die virtuelle Inbetriebnahme genutzt wird. Zukünftig können auch Verhaltensmodelle und Echtzeitdaten für einen betriebsbegleitenden digitalen Zwilling herangezogen werden. Weitere Entwicklungsziele von XENON sind die Mensch-Maschine-Interaktion, kollaborierende Roboter in den Modulen sowie Augmented Reality und zusätzliche Aspekte der Fernwartung. Weiterentwicklungen werden sowohl im Technology Push als auch aufgrund von Kundenanfragen vorangetrieben. XENON bietet als Technologieausrüster alle Voraussetzungen für die erfolgreiche Unterstützung der Anwender bei der Auswahl und Gestaltung der Prozessmodule für eine Matrixproduktion. Gelingen kann dies nur im Dialog, wozu XENON ausdrücklich bereit ist.

**Abbildung 26: Modulare Montagezelle**



### Good Practice SAP: Software zur Steuerung einer Matrixproduktion



Der Softwareanbieter SAP arbeitet an der Erweiterung seines Softwareportfolios, um Aufträge auch in Matrixproduktionssysteme unter Ausnutzung der gegebenen Flexibilität einzuplanen und deren Verlauf durch die Produktion zu steuern. Nach Release wird die Software als Standardwerkzeugkasten bereitstehen, bei dem zusätzliche Funktionsbausteine individuell zugeschnitten werden können. Die Steuerungssystematik erfolgt ad hoc auf Basis von Echtzeitdaten, wodurch unter anderem dynamisches Routing, der Transport des Erzeugnisses und die Materialbereitstellung des Gesamtsystems anhand verschiedener Zielkriterien optimiert werden können. Des Weiteren werden Flexibilitätspotenziale in der Operationsreihenfolge und der Arbeitsverteilung bei den Steuerungsentscheidungen genutzt.

Als weitere Entwicklungsbausteine im Rahmen der Matrixproduktion wird an Visualisierungswerkzeugen zur Erhöhung der Transparenz gearbeitet. Dadurch verspricht SAP eine erleichterte Komplexitätsbewirtschaftung und die Möglichkeit einer Plausibilitätsprüfung von Steuerungsentscheidungen für Fach- und Führungskräfte. Außerdem werden aktuell, basierend auf dem Softwareportfolio, Data Analytics Tools entwickelt, um beispielsweise den kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu unterstützen und den Steuerungsalgorithmus zu optimieren.

Darüber hinaus werden weitere Softwaremodule angeboten, welche die Unternehmen bei der Organisation ihrer Matrixproduktion unterstützen können. Diese sind:

- Modul zur Personaleinsatzplanung mit integrierter Kompetenzmatrix, um den Einsatz der Fachkräfte flexibel organisieren zu können
- Modul zur Instandhaltungsplanung, um die Möglichkeit der selektiven Instandhaltung einzelner Prozessmodule zu ermöglichen
- Modul zur Abbildung digitaler Zwillinge von Produkten sowie von Produktionsressourcen

SAP strebt an, zeitnah alle notwendigen Funktionalitäten zur Organisation einer Matrixproduktion als Off-the-Shelf-Lösung anzubieten.

angeboten, die nach dem Reifegradmodell bis zur Stufe 5 eingeordnet werden können. Einige Anbieter nutzen zur freien Navigation unter anderem sogenannte SLAM-Algorithmen (**Simultaneous Localization and Mapping**, Deutsch: Simultane Positionsbestimmung und Kartierung). Sie ermöglichen, dass die Fahrzeuge während der Fahrt kontinuierlich ihre gespeicherten Karten an geänderte Umgebungen anpassen. Außerdem werden dezentrale Funktionen zur Verhinderung von Zusammenstößen und Staubildung in die einzelnen Fahrzeuge integriert. Dies sichert eine hohe Flexibilität und darüber hinaus eine hohe Robustheit gegen Störeinflüsse.

Des Weiteren wird zum Einsatz von **fahrerlosen Transportsystemen (FTS)** ein umfassendes Flottenmanagementsystem zur effizienten Zuordnung von Transportaufträgen benötigt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Logik zur Erstellung der Transportaufträge selbst nicht Bestandteil des FTS-Systems ist, sondern im Regelfall über das System der Auftragssteuerung erfolgt.

Eine große Herausforderung stellt oftmals die Integration verschiedener Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller in dieselbe Umgebung dar. Eine direkte Kommunikation unter den Fahrzeugen lassen die Systemanbieter oft nicht zu. Zur Lösung dieses Problems arbeiten andere Unternehmen daran, verschiedene Flotten unterschiedlicher Hersteller über einen zentralen Flottenmanager zu verwalten. Auch die Anbieter automatisierter Transportlösungen arbeiten an neuen Angebotsformen im Bereich von Service- und Subscription-Modellen.

**Erkenntnis 3: Die zum Betrieb eines Matrixproduktionssystems erforderlichen Technologien und Werkzeuge stehen bereit.**

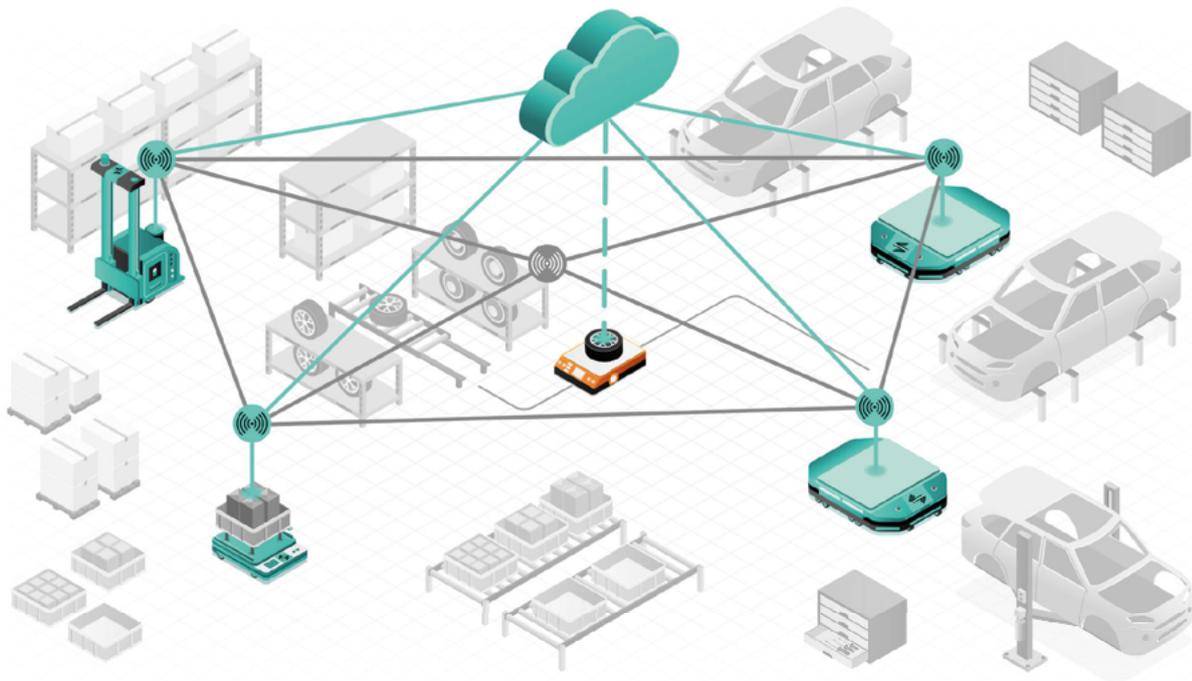
### Good Practice NODE Robotics Leinfelden-Echterdingen: Integration von fahrerlosen Transportsystemen



FTS beziehungsweise AMR werden als Schlüssel einer flexiblen und kosteneffizienten Intralogistik angesehen. Bei der Automatisierung und Flexibilisierung des Materialflusses stehen Anwender oft vor der Herausforderung, Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller in einem System zu integrieren. Dies liegt unter anderem an den proprietären Schnittstellen der verschiedenen Anbieter. Dazu bietet das Start-up NODE Robotics ein Softwaremodul an, mit dem sich heterogene FTF-Flotten ganzheitlich in einem System vereinen lassen (siehe Abbildung 27). Die Schnittstelle ist nach dem Standard der VDA 5050<sup>1</sup> gestaltet und kann über weitere offene Programmierschnittstellen (sogenannte API) angesteuert werden. Außerdem bietet das Start-up ein Softwaremodul an, das Transportaufträge eines übergeordneten Systems empfangen und entsprechend den Fähigkeiten geeigneten Fahrzeugen zuordnen kann.

Des Weiteren beschäftigt sich NODE Robotics mit der Nachrüstung spurgebundener Fahrzeuge, um diese zur freien Navigation zu befähigen. Dazu wird ein Retrofit-Modul angeboten. Eine Lösung zum direkten Datenaustausch der Fahrzeuge untereinander, um zum Beispiel Staubildung und Deadlocks zu verhindern, rundet das Angebot ab. Das Beispiel zeigt, dass die benötigten Lösungen zur Gestaltung einer flexiblen Intralogistik in Matrixproduktionssystemen marktreif bereitstehen.

Abbildung 27: Flottenmanagement und Koordination für AMR



Quelle: © NODE Robotics GmbH

<sup>1</sup> Die VDA 5050 beschreibt eine standardisierte Kommunikationsschnittstelle zum Austausch von Auftrags- und Statusdaten zwischen einer Leitsteuerung (Flottenmanagement-Software) und fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) für die Intralogistik. Vgl. VDA 2022.

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Aufbauend auf den Ergebnissen der Unternehmensbefragungen wird in diesem Kapitel ein Fazit gezogen und der notwendige Forschungsbedarf aufgezeigt. In Abbildung 28 sind die Haupterkenntnisse der Unternehmensbefragungen aus Kapitel 5 zusammengefasst.

### 6.1. Fazit aus den Befragungsergebnissen

Aus den Ergebnissen der Befragung lassen sich verschiedene Aspekte zur Verbreitung von Matrixproduktionssystemen, den Entwicklungspfaden, konkreten Einsatzszenarien und verfügbaren Technologien sowie ihren Anbietern zusammenfassen. Sie werden im Folgenden unter Einbezug weiterer Erkenntnisse aus den tiefergehenden Interviews zu bestehenden Herausforderungen interpretiert. Damit beantworten die folgenden Ausführungen die eingangs gestellten Fragen nach dem Umsetzungsstand von Matrixproduktionssystemen (Frage 1) und nach Methoden und Unterstützung zu ihrer Gestaltung (Frage 2) (siehe Management Summary).

#### Verbreitung von Matrixproduktionssystemen

Bei den Befragungen wurden ausschließlich Unternehmen berücksichtigt, die bereits ein Matrixproduktionssystem eingeführt haben oder sich in der Umsetzungsphase befinden. Die Zusammensetzung der befragten Unternehmen ist in Anhang B detailliert erläutert. Die abgefragten Unternehmenscharakteristika ergaben, dass **kaum KMU** darunter waren, sondern fast ausschließlich Standorte mit einer Konzernzugehörigkeit aus den Bereichen **Automobilindustrie, Halbleiter- und Elektronikindustrie**. Die Matrixproduktion als Alternative zu bestehenden Produktionssystemen scheint bei KMU noch wenig bekannt zu sein. Außerdem erfordern die Einführung und der Betrieb von Matrixproduktionssystemen **angepasste**

**Methoden und technische Grundvoraussetzungen**, die insbesondere in kleineren Unternehmen im Regelfall nicht selbst entwickelt werden können. Aus den Interviews geht hervor, dass die erforderliche Sicherheit für die Planung durch **Standardlösungen und ein verlässliches Netzwerk an Partnern** aus verschiedenen Gestaltungsfeldern noch nicht gegeben ist. Baukastensysteme, die den bisher hohen und schwer abschätzbaren Eigenanteil an Entwicklungsarbeit verringern, sind noch nicht vollständig verfügbar.

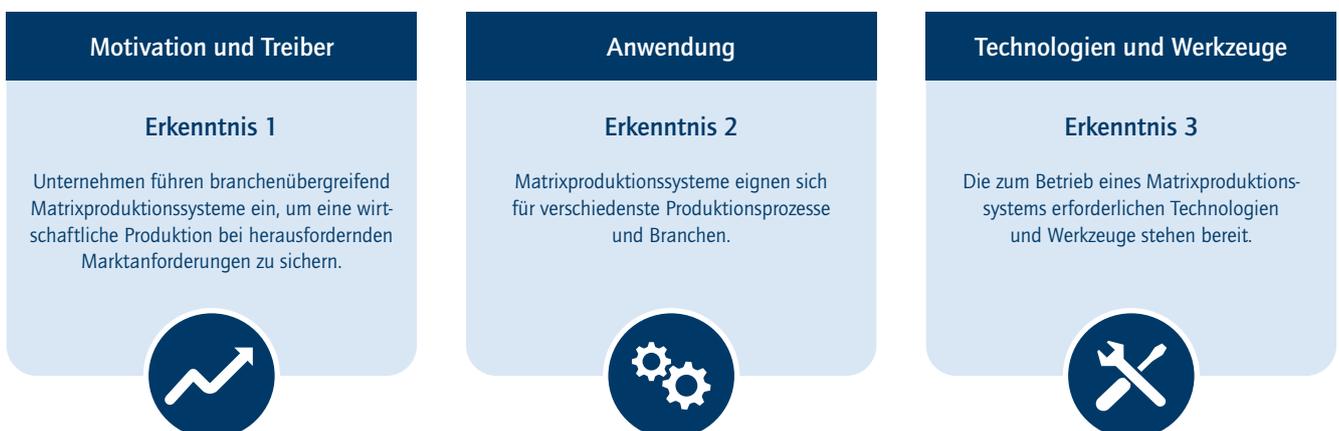
Auch zeigen die langen Planungs- und Umsetzungsphasen von Matrixproduktionssystemen, dass Bedarf an standardisierten Gestaltungs- und Umsetzungsmethoden besteht, um die Zeit zur Einführung deutlich zu verkürzen. Zudem wirken teils unbegründete Befürchtungen hinsichtlich unternehmerischer Risiken in Form von hohen Investitionskosten und Aufwänden möglicherweise abschreckend.

#### Entwicklungspfade zur Matrixproduktion

Unternehmen, die Matrixproduktionen umgesetzt haben, nehmen sowohl **steuerungsorientierte** als auch **strukturorientierte** Entwicklungspfade, um die Veränderungsfähigkeit in Produktionssystemen zu erhöhen.

Die Bereiche, die stärker von investitionsintensiven Fertigungstechnologien geprägt sind, wählen den Weg über die Entwicklung einer **automatisierten und intelligenten Auftrags- und Anlagensteuerung**, um die Flexibilität der modularen Systeme effizient zu nutzen. Dabei sticht der in der Halbleiterbranche genutzte SEMI Equipment Communication Standard heraus, der branchenweit Schnittstellen und Kommunikationsprotokolle vorgibt. Dies erleichtert es Anwendern, zwischen vergleichbaren Lösungen mit standardisierten Funktionsumfängen unterschiedlicher Hersteller auszuwählen.

Abbildung 28: Haupterkenntnisse aus den Unternehmensbefragungen



Quelle: eigene Darstellung

Für Werksbereiche, die sich überwiegend aus manuellen Montagearbeitsplätzen zusammensetzen, kann der Weg zur Matrixproduktion über **leicht zu rekonfigurierende Strukturen** erfolgen. Die Zusammensetzung des Montagesystems kann dann entsprechend der veränderlichen Anforderungen rekonfiguriert werden. Dabei zeigt sich, dass die IKT- und Versorgungsinfrastruktur ebenso rekonfigurationsfähig sein muss. Aus den Untersuchungen geht weiter hervor, dass kein Unternehmen über einen systematischen, in der Produktionsorganisation fest verankerten Prozess der Rekonfiguration verfügt. Dies lässt den Schluss zu, dass die Potenziale struktureller Veränderungen des Produktionssystems zur Erhöhung der Zielerreichung nicht vollständig genutzt werden.

Mit Ausnahme der Halbleiterindustrie haben alle Unternehmen die Matrixproduktion schrittweise über selbstentwickelte Lösungen eingeführt. Dies erfordert insbesondere hohe Kreativität der gestaltenden Bereiche. Auch an dieser Stelle kann der **Bedarf nach standardisierten Vorgehensweisen und Lösungen** festgestellt werden.

### Einsatz- und Betriebsszenarien von Matrixproduktionssystemen

Aus den Unternehmensbefragungen lassen sich vor allem die zunehmende Individualisierung von Produkten und die Bewältigung der Änderungsdynamik als wesentliche Motivationstreiber zur Einführung von Matrixproduktionssystemen identifizieren.

Die in der Expertise analysierten Matrixproduktionen ermöglichen eine wirtschaftliche Produktion bei herausfordernden Marktanforderungen. Zum einen setzen Unternehmen Matrixproduktion bei Produkten mit **großer Spreizung der Bearbeitungszeiten** ein. Zum anderen wird diese Form der Produktion genutzt, um **kaum prognostizierbare Produktionsprogramme**, bestehend aus unterschiedlichen Produkten mit hoher Varianz, zu fertigen. Dies zeigt sich in der Befragung daran, dass 75 Prozent der befragten Unternehmen als Bevorratungsstrategie das Make-to-Order- und Assemble-to-Order-Prinzip wählen. Entlang des Produktlebenszyklus lässt sich feststellen, dass Matrixproduktionen besonders im **Ramp-up und der Aftermarket-Produktion** spezifische Vorteile aufweisen. Durch den modularen Aufbau lassen sich flexibel Stückzahlen skalieren, was besonders in den Hochlauf- und Auslaufphasen von Produkten vorteilhaft ist. Darüber hinaus lässt sich schlussfolgern, dass die Einführung und der wirtschaftliche Betrieb einer Matrixproduktion durch ein **modulares Produktdesign** begünstigt wird.

### Reifegrad der benötigten Technologien

Für die befragten Technologieanbieter gilt, dass nahezu alle **Technologien auf einem hohen Reifegrad vorhanden** sind und die Anforderungen im Kontext der Matrixproduktion grundsätzlich erfüllt werden können. Große Defizite lassen sich jedoch bei standardisierten **Systemen zur Produktionssteuerung** erkennen. Es konnte kein Anbieter identifiziert werden, der aktuell ein standardisiertes Softwarepaket anbietet, mit dem die Vorteile der Matrixproduktion vollständig ausgeschöpft werden können. Umfassende Manufacturing Execution Systeme (MES), die matrixspezifische

Funktionen wie den dynamischen Arbeitsplan bereitstellen, um darüber die Freiheitsgrade des Prozess-Vorranggraphen für eine Operationsreihenfolgeflexibilität in der Einplanung und Steuerung nutzbar zu machen, sind jedoch in Entwicklung.

Weiterer Handlungsbedarf besteht zudem in **der Standardisierung von Technologien im Bereich der Prozessmodule und Transportsysteme**, beispielsweise für den herstellerübergreifenden Betrieb von fahrerlosen Transportsystemen. Eine Vereinheitlichung von Funktionsbausteinen und Schnittstellen würde die Einführung und Rekonfiguration dieser Systeme via Plug & Play erheblich vereinfachen.

### Auswahl von Technologieanbietern

Des Weiteren lässt sich aus den Untersuchungen schlussfolgern, dass eine stärkere Kooperation zwischen den Anbietern der unterschiedlichen Gestaltungsfelder zur Entwicklung eines Gesamtangebots als Schlüssel für die sichere Einführung und den wirtschaftlichen Betrieb von Matrixproduktionssystemen gesehen werden kann. Aktuell gibt es keine Netzwerke zwischen Technologieanbietern, Betreibern und Forschungs- und Entwicklungsdienstleistern. Weiterhin fehlen zentrale Anlaufstellen, um sich dem Thema Matrixproduktion zu nähern und den Bekanntheitsgrad der Technologien und Systeme zu steigern.

## 6.2. Forschungsbedarfe

Die Expertise zeigt, dass sich Matrixproduktionssysteme branchen- und produktübergreifend effizient aufbauen und betreiben lassen. Es wurde jedoch auch deutlich, dass vollumfängliche cyber-physische Matrixproduktionen bislang nur selten und nur in wenigen Branchen umgesetzt worden sind, obwohl Technologien mit hohem Reifegrad in allen Gestaltungsfeldern vorhanden sind. Welche Rückschlüsse lassen sich aus diesen Ergebnissen und den im vorangegangenen Kapitel skizzierten Herausforderungen auf Forschungsbedarfe ziehen (siehe Frage 3 im Management Summary)?

Es besteht vor allem ein Integrations- und Transferbedarf vorhandener Technologien. Zudem sind Forschungs- und Entwicklungsarbeiten notwendig, um Werkzeuge und Technologien für den Aufbau und Betrieb von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen weiterzuentwickeln. Die Forschungs- und Entwicklungsbedarfe gliedern sich in fünf Themenfelder:

### Werkzeuge für die Gestaltung, Planung und Steuerung

Ein hoher Bedarf „auf dem Weg zur Matrix“ besteht für eine **standardisierte Methodik zur Auswahl und Planung** der Grundstruktur des passenden Produktionssystems für ein spezifisches Produktportfolio und die zugehörigen Rahmenbedingungen. Diese zu erforschende Methodik muss den Vergleich der Wirtschaftlichkeit verschiedener Ausprägungen, Layouts und Steuerungsprinzipien mit abbilden können, um belastbare Entscheidungsgrundlagen zu bieten. Hinzu kommt der Bedarf an unterstützenden (Software-)

Werkzeugen, um die entwickelten Methoden in die Praxis zu transferieren. Weitere notwendige Aspekte der Auswahlmethodik sind die **Bewertung von Flexibilitätspotenzialen** und die **energetische Bewertung** einer Matrixproduktion. Essenziell hierfür ist ein **durchgängiger digitaler Zwilling**, der als Grundlage für die Machbarkeits-, Potenzial und Aufwandsabschätzung dient. Die energetische Bewertung, Erstellung eines CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks und Potenzialabschätzung der Nutzung erneuerbarer Energien können zukünftig über digitale Zwillinge erfolgen. Zudem ist es forschungs- und entwicklungsseitig notwendig, das Potenzial des digitalen Zwillings von der Planungsphase, in der er bereits punktuell etabliert ist, in den laufenden Betrieb zu übertragen. Hier können **prozessnebenläufig Optimierungen** durchgeführt und autonom Anpassungen am Produktionssystem und dessen Steuerung initiiert werden. Zudem lassen sich agile Konzepte für eine stets aktuelle Maschinen- und Anlagensicherheit umsetzen. Das dient nicht nur der Gewährleistung eines sicheren Betriebs der technischen Lösungen, sondern auch der Erfüllung rechtlicher Anforderungen.

Aus den Ergebnissen der Befragung ergibt sich, dass die Hardwarerealisierungen im Vergleich zu den softwarebasierten Gestaltungsfeldern niedrigere Reifegrade erreichen. Zudem sind typische Entwicklungszyklen von Software im Vergleich zu denen der Hardware kürzer. Daraus leitet sich ab, dass Hardware-Lösungen für eine flexible Produktion von der Ebene des Produktionssystems bis auf Komponentenebene schnellstmöglich vorangetrieben werden müssen. Die Expertise verdeutlicht hier den Bedarf nach einer **stärkeren Modularisierung**. Diese kann einerseits durch intelligente Vorrichtungen oder Prozessmodule erfolgen, die über Fähigkeiten verfügen, die Qualität der Prozesse mitabzusichern. Ein weiterer Ansatz wären hier modular einwechselbare **Teilkomponenten mit eigenem digitalem Abbild**, welche die notwendige digitale Bewertung bei sich ändernden Produkten mitabdecken.

Ein hohes Potenzial wird Matrixproduktionsstrukturen im Ramp-up und Ramp-down von Produktlebenszyklen attestiert. Deswegen sind forschungsseitig, insbesondere in der Gestaltung und Steuerung, auch **Hybridformen**, beispielsweise in Form von Matrix- und Linienlayouts, noch weiter voranzutreiben.

Ein weiterer Aspekt, in den noch Forschungs- und Entwicklungsaufwand fließen muss, ist der Umgang mit der Komplexität einer Matrixproduktion. Es ist zu erwarten, dass sich durch Forschungsarbeiten zu einer **autonomen Optimierung und Rekonfiguration des Systems**, ad hoc auf Basis von aktuellen Systemzuständen, sowie zur **Mensch-Integration in Entscheidungs-, Steuerungs- und Rekonfigurationsprozesse** weitere Produktivitätspotenziale in der Matrixproduktion erschließen lassen. Zudem können Matrixstrukturen als Enabler für eine Kreislaufwirtschaft auftreten und neben Montageprozessen auch Demontageprozesse flexibel realisieren.

### Einbindung des Menschen in Matrixproduktionssysteme

Die Analyse der umgesetzten Matrixproduktionssysteme in der Expertise zeigt, dass auch bei einer hohen Prozessautomatisierung der Mensch nach wie vor eine zentrale Rolle spielt. Die Einbindung

des Menschen in die **Kommunikation und die Bewertung der Plausibilität** von Entscheidungen ist essenziell. Zudem ergibt sich durch die hohe Änderungsdynamik der Systeme der Bedarf, **dezentrale Optimierungen des Systems** durch den Menschen zu ermöglichen und diese Änderungen an zentrale Systeme zur Berücksichtigung, Überprüfung und weiteren Optimierung zurückzuspielen. Fragestellungen des Change Managements und der Reaktionen von Mitarbeitenden bei der Umsetzung von Matrixproduktionssystemen wurden bei der Durchführung der Studie nicht ausführlich betrachtet. Daher existieren dafür zum jetzigen Zeitpunkt keine ausreichenden Daten und ebenso keine studienbasierten Erkenntnisse. In diesem Themenfeld besteht ein weiterführender Forschungsbedarf.

### Standardisierung

Eine Matrixproduktion basiert auf durchgehender Modularisierung. Diese muss konsequent von der Hardware über die Kommunikation bis zur Steuerung gedacht und umgesetzt werden. Als dritten Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt sehen wir daher die Definition eines **verbindlichen und durchgängigen Standards zur Kommunikation**. Dieser Standard muss alle Automatisierungsstufen, von der übergeordneten Planungs- bis zur SPS-Ebene, verbinden und eine bedarfsgerechte Datenaggregation beinhalten. Als Muster kann der SEMI-Equipment-Communication-Standard der Halbleiterindustrie herangezogen werden. Der Bedarf besteht damit in der Entwicklung eines ähnlich performanten und verbreiteten Standards für vernetzte Echtzeit-Lösungen. Ein großes Potenzial wird im OPC UA Kommunikationsstandard und in der Verwendung des echtzeitfähigen Time-Sensitive Networking (TSN) zur Datenübertragung gesehen.

Die Good Practice-Beispiele machen deutlich, dass sich **standardisierte Prozessmodule** sehr positiv auf die Flexibilität und Rekonfigurierbarkeit der Produktionssysteme auswirken. Es bedarf einer zumindest branchen- oder prozessspezifischen Standardisierung von Modulen, Anlagentechnik und Hardwareschnittstellen.

### Geschäftsmodelle

Die Vorteile der Matrixproduktion eröffnen Möglichkeiten für **neue Geschäftsmodelle**. Durch die hohe Flexibilität und Möglichkeit der Auslastungsoptimierung werden **Manufacturing-as-a-Service-Modelle (MaaS)** für Matrixproduktionssysteme sehr interessant. Ebenfalls denkbar sind sogenannte **Subscription-Modelle** für Prozessmodule oder Transportsysteme. Hierfür ist die Standardisierung der Hardware grundlegend. Derartige Entwicklungen können bis zu transportablen Maschinenkonzepten, beispielsweise im Standard-Containerformat, gedacht werden. Forschungsbedarf besteht hier im Bereich der **rechtlichen Absicherung** der neuen Geschäftsmodelle, inklusive der Klärung der Hoheit über die Daten und das Prozesswissen sowie etwaiger Haftungsfragen, und der Kostenabschätzungsalgorithmen für MaaS.

## Vernetzung

Neben den Forschungsbedarfen ist nicht zuletzt auch die **Vernetzung von Ausrüstern und Anwendern** eine Aufgabe, der sich Gremien, Forschungseinrichtungen und die Industrie stellen müssen. **Starke Netzwerke** haben das Potenzial, im Verbund ganzheitliche, aufeinander abgestimmte Lösungen für Matrixproduktionssysteme zu erarbeiten. Bisher wurden hauptsächlich Anwender identifiziert, die Konzernstrukturen angehören. Ein **Transfer des Konzepts Matrixproduktion in KMU** ist wichtig, um die nötige Breite zu gewinnen und auch in diesen Unternehmen die Vorteile der Matrixproduktion nutzbar zu machen. Schulungen und gezielt moderierte Veranstaltungen zur Vernetzung auf Ausrüsterebene können hier einen Beitrag leisten.

Insgesamt hat die Expertise gezeigt, dass Matrixproduktionssysteme in verschiedenen Produktionsprozessen und Branchen mit unterschiedlichen Reifegradestufen und Ausprägungsformen

eingesetzt werden. Sie ermöglichen eine wirtschaftliche Produktion bei herausfordernden Marktanforderungen und bieten dadurch eine Antwort auf die steigende Variantenvielfalt und schlecht prognostizierbare Kundenbedarfe.

Die Expertise bietet durch das entwickelte Reifegradmodell eine detaillierte Systematik zur Erfassung und Beschreibung von Matrixproduktionssystemen. Das ermöglicht eine Selbsteinordnung von Unternehmen und zeigt, neben den identifizierten Entwicklungspfaden hin zur Matrixproduktion, weitere Forschungs- und Entwicklungspotenziale auf. Zudem bieten die Good Practices eine Orientierung zur gelebten Umsetzung und Weiterentwicklung von Matrixproduktionssystemen.

Die Erkenntnisse aus den Unternehmensbefragungen zeigen jedoch auch, dass für den breiten Einsatz von Matrixproduktionssystemen neben der Weiterentwicklung der Technologien ein Transfer- sowie Vernetzungsbedarf von ausrüstenden und anwendenden Unternehmen besteht. Die Expertise zeigt die hier wesentlichen Stellhebel auf.

# Glossar

## Assemble-to-Order

Bei dieser Bevorratungsstrategie werden Standardkomponenten und Baugruppen prognoseorientiert auf einem Zwischenlager gefertigt. Erst nach Eingang des Kundenauftrags erfolgen eine auftragsbezogene Montage und der Versand. Beispiele: Baumaschinen, Werkzeugmaschinen.<sup>33</sup>

## Auftragsverteilung

Ist die auftragsbezogene Zuordnung beziehungsweise Beplanung von Fertigungs- und Montageoperationen zu Prozessmodulen. Falls mehrere Prozessmodule mit gleichen Fähigkeiten bereitstehen, kann dies als Freiheitsgrad genutzt werden, um die Systemauslastung zu nivellieren. Dies wird als „Arbeitsverteilungsflexibilität“ bezeichnet. Die Arbeitsverteilung erfolgt in Matrixproduktionssystemen ad hoc während der Auftragsbearbeitung.<sup>34</sup>

## Autonome Mobile Roboter (AMR)

AMR sind fahrerlose Transportfahrzeuge, bei denen die Fahrtrouten nicht vorgegeben sind. Stattdessen sind die Fahrzeuge in der Lage, frei im Raum zu navigieren.<sup>35</sup>

## Cyber-physisches Produktionssystem (CPPS)

Dieses Produktionssystem besteht aus autonomen und kooperativen Elementen und Teilsystemen, die kontextabhängig innerhalb und über alle Ebenen der Produktion – von Prozessen über Maschinen bis hin zu Produktions- und Logistiknetzwerken – miteinander verbunden sind. CPPS zeichnen sich durch folgende Hauptmerkmale aus:

- Intelligenz – die Elemente sind in der Lage, Informationen aus ihrer Umgebung aufzunehmen und autonom zu handeln.
- Konnektivität – die Elemente haben die Fähigkeit, Verbindungen zu den anderen Elementen des Systems (einschließlich der Menschen) für die Zusammenarbeit und Kooperation sowie zu im Internet verfügbaren Wissen und Diensten herzustellen und zu nutzen.
- Reaktionsfähigkeit – das System ist in der Lage, auf interne und externe Veränderungen zu reagieren.<sup>36</sup>

## Engineering-to-Order

Bei dieser kundenspezifischen Einmalfertigung ist neben Beschaffung, Fertigung, Montage und Versand auch die Konstruktion kundenauftragsspezifisch. Beispiel: Sondermaschinen.<sup>37</sup>

## Fahrerloses Transportsysteme (FTS)

Diese Systeme werden in der Intralogistik für den Material- und Produkttransport eingesetzt. Sie bestehen im Wesentlichen aus

- einem oder mehreren fahrerlosen Transportfahrzeugen,
- einem Leitsystem (Flottenmanagementsystem),
- Einrichtungen zur Positions- und Lagebestimmung,
- Einrichtungen zur Datenübertragung sowie
- Infrastruktur und peripheren Einrichtungen.<sup>38</sup>

## Fahrerloses Transportfahrzeug (FTF)

Ein FTF ist ein flurgebundenes Fördermittel mit eigenem Fahrantrieb, das automatisch gesteuert und berührungslos geführt wird. Es dient dem Material- und Produkttransport durch Ziehen und/oder Tragen von Fördergut mit aktiven oder passiven Lastaufnahmemitteln.<sup>39</sup>

## Flexibilität

Ist die operative Fähigkeit eines Produktionssystems, mit geringstem Kosten- und Zeitaufwand verschiedene Systemzustände innerhalb eines vorhandenen Flexibilitätskorridors einzunehmen.<sup>40</sup>

## Individualisiertes Produkt

Ein individualisiertes Produkt hat eine modulare Produktarchitektur. Es kann individuell konfiguriert werden und bietet zusätzlich die Möglichkeit einer kundenspezifischen Gestaltung innerhalb festgelegter Produktbereiche. Individualisierte Produkte setzen sich aus Allgemeinmodulen, kundenspezifischen Modulen und personalisierten Modulen zusammen. Allgemeinmodule werden plattformübergreifend genutzt. Kundenspezifische Module sind individuell auswählbar. Personalisierte Module sind kundenspezifisch gestaltete Module oder beinhalten kundenspezifisch gestaltete Einzelteile. Die kundenspezifische Gestaltung in personalisierten Modulen betrifft meist zusätzliche Funktionen, besondere Leistungsbereiche, spezielle Schnittstellen, eine Eignung für spezifische Bedingungen der Betriebsumgebung, ein spezielles Design oder spezifische Abmessungen.<sup>41</sup>

33 Vgl. Wiendahl 2020, S. 208.

34 Vgl. Fries et al. 2020, S. 21.

35 Vgl. VDI 2510 2005, S. 3.

36 Vgl. Monostori et al. 2016, S. 623–624.

37 Vgl. Wiendahl 2020, S. 209.

38 Vgl. VDI 2510 2005, S. 6–7.

39 Vgl. ebd., S. 7.

40 Vgl. Toni/Tonchia 1998, S. 1589; Zäh et al. 2005, S. 5; Wiendahl et al. 2014b, S. 140.

41 Vgl. Bauernhansl 2014a, S. 10; Baumberger 2007, S. 26; Hu 2013, S. 6; Lindemann/Baumberger 2006, S. 9.

**Individuelles Produkt**

Ein individuelles Produkt wird maßgeschneidert. In Abgrenzung zu einem individualisierten Produkt hat es keine standardisierte modulare Architektur.<sup>42</sup>

**Interoperabilität**

Ist die Fähigkeit zur aktiven, zweckgebundenen Zusammenarbeit von verschiedenen Komponenten, Systemen, Techniken oder Organisationen.<sup>43</sup>

**Kundenauftragsentkopplungspunkt (KEP)**

Der KEP kennzeichnet in der betrieblichen Logistikkette die Stelle, ab der die Aufträge bestimmten Kundenbedarfen zugeordnet sind. Die Lage des KEP gilt als vorrangiges Unterscheidungsmerkmal der Bevorratungsstrategien.<sup>44</sup>

**Make-to-Order**

Bei dieser Bevorratungsstrategie erfolgen Beschaffung, Fertigung, Montage und Versand kundenspezifisch. Beispiele: Extruderschnecken von Kunststoffmaschinen, Brücken von Hallenkränen.<sup>45</sup>

**Make-to-Stock**

Bei dieser Bevorratungsstrategie erfolgen Beschaffung, Fertigung und Montage aufgrund eines prognostizierten Produktionsprogramms. Die Lieferung erfolgt bei Nachfrage direkt aus dem Fertigwarenlager. Beispiele: Kameras, Haushaltsgeräte.<sup>46</sup>

**Manufacturing Execution System (MES)**

MES ist eine prozessnah operierende Ebene eines mehrschichtigen Fertigungsmanagementsystems, die für die Produktionssteuerung verantwortlich ist. Ein MES wird auch als Produktions- oder Prozessleitsystem bezeichnet.<sup>47</sup>

**Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)**

MQTT ist ein standardisiertes offenes Netzwerkprotokoll zum Austausch von Nachrichten. Es basiert auf einer Publish-Subscribe-Architektur und wird in der Machine-to-Machine-Kommunikation und im Internet der Dinge eingesetzt.<sup>48</sup>

**Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)**

OPC UA ist ein industrielles und herstellerunabhängiges Kommunikationsprotokoll für den Informationsaustausch zwischen Produkten unterschiedlicher Hersteller.<sup>49</sup>

**Operationsreihenfolge**

Ist die auftragsbezogene Reihenfolge der Fertigungs- und Montageoperationen. Operationsreihenfolgeflexibilität wird durch die Freiheitsgrade der Produktstruktur (modularer Aufbau individualisierter Produkte) und der Systemstruktur in einer Matrixproduktion (modulare Struktur, frei anfahrbare Prozessmodule) ermöglicht. Auch diese kann ähnlich der Auftragsverteilungsflexibilität zur Nivellierung der Systemauslastung genutzt werden.<sup>50</sup>

**Prozessmodul**

Ist die kleinste aus logistischer Sicht frei anfahrbare und unabhängig beplanbare Produktionsressource, die mehrere Prozessschritte ausführt.<sup>51</sup> Ein Prozessmodul setzt sich aus mehreren Ressourcenmodulen zusammen.

**Rekonfigurierbarkeit**

Bezeichnet die taktische Fähigkeit eines Produktionssystems, sich an neue, ähnliche Produkt- und Mengenanforderungen anzupassen.<sup>52</sup>

**Resilienz**

Beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Systems gegenüber äußeren Einflüssen. Ein resilientes Wertschöpfungssystem verfolgt die Aufrechterhaltung der wertschöpfenden und wirtschaftlichen Betriebsfähigkeit. Die Kernelemente eines resilienten Wertschöpfungssystems sind wandlungsfähige Produktionssysteme, souveräne Produktionsnetzwerke, lernende Prozesse und eine agile Organisation.<sup>53</sup>

**Ressourcenmodul**

Führt wertschöpfende, handhabende oder andere unterstützende Aufgaben aus.<sup>54</sup> Aus logistischer Sicht sind sie nicht individuell beplanbar.

**Simultaneous Engineering**

Bezeichnet das gleichzeitige Entwickeln von Produkt und Produktionseinrichtung. Das Simultaneous Engineering führt zu einer Reduzierung der Produktionsvorbereitungszeit, da die verschiedenen Aufgaben, wie Produktentwicklung, Fertigungsplanung und Fabrikplanung, nicht mehr sequenziell, sondern zeitlich parallel durchgeführt werden.<sup>55</sup>

**Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)**

SLAM umfasst die simultane Positionsbestimmung und Kartenerstellung von mobilen Robotern mithilfe von Sensorsystemen. Ausgangspunkt ist eine leere Karte der Umgebung, in der sich der Roboter initial orientieren muss. Danach kann der Roboter die

42 Vgl. Koren 2010, S. 33.

43 Siehe VDI/VDE 2017, S. 14.

44 Vgl. Wiendahl 2020, S. 208-210.

45 Vgl. ebd., S. 209.

46 Vgl. ebd., S. 208.

47 Vgl. Geisberger/Broy 2012, S. 249.

48 Vgl. Maritsch et al. 2015, S. 218-219.

49 Vgl. OPC Foundation 2018, S. 2.

50 Vgl. Fries et al. 2020, S. 21.

51 Vgl. Kern 2021, S. 134-135.

52 Vgl. Wiendahl et al. 2014b, S. 140.

53 Siehe Fraunhofer IPA 2021a, Fraunhofer IPA 2021b.

54 Vgl. Kern 2021, S. 160.

55 Vgl. VDI 4499-Blatt 1 2008, S. 50.

Umgebung selbst erkunden und eine Karte der Umgebung erstellen sowie kontinuierlich erweitern.<sup>56</sup>

**Umrüstbarkeit**

Ist die operative Fähigkeit einer einzelnen Station, sich auf bekannte Anforderungen innerhalb kurzer Zeit einstellen zu können.<sup>57</sup>

**Veränderungsfähigkeit**

Ist ein Oberbegriff für verschiedene Anpassungsmöglichkeiten von Produktionssystemen und ihrer Bestandteile. Hierzu gehören

Umrüstbarkeit, Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit.<sup>58</sup>

**Wandlungsfähigkeit**

Ist die taktische Fähigkeit einer ganzen Fabrik, sich an neue Produktgruppen und Mengen anzupassen. Im Regelfall erfordert dies auch Eingriffe in die Produktionssysteme, die entsprechend flexibel, rekonfigurierbar und umrüstbar gestaltet sein müssen.<sup>59</sup>

56 Vgl. Cadena et al. 2016, S. 1309.

57 Vgl. Wiendahl et al. 2014b, S. 139.

58 Vgl. ebd., S. 139.

59 Vgl. ebd., S. 140.

# Anhang

## Abbildungen

Abbildung 1:	Produktionsparadigmen im Wandel der Zeit	6
Abbildung 2:	Flexibilität und Rekonfiguration	8
Abbildung 3:	Produktionssystemebenen mit den Klassen der Veränderungsfähigkeit	8
Abbildung 4:	Einordnung der Produktionssysteme im Spannungsfeld Flexibilität versus Produktivität	11
Abbildung 5:	Methodisches Vorgehen	12
Abbildung 6:	Einordnung der Gestaltungsfelder des Reifegradmodells	14
Abbildung 7:	Reifegradstufen	15
Abbildung 8:	Spinnnetzdiagramm eines beispielhaften Anwendungsfalls	15
Abbildung 9:	Aufbau eines Matrixproduktionssystems	16
Abbildung 10:	Charakteristische Ausprägungen von Matrixproduktionen	21
Abbildung 11:	Welche Treiber haben die Unternehmen motiviert, eine Matrixproduktion einzuführen?	22
Abbildung 12:	Welche strategischen Unternehmensziele werden durch die Matrixproduktion unterstützt?	23
Abbildung 13:	Nach welchen Kriterien wurde die Einführung der Matrixproduktion bewertet?	23
Abbildung 14:	Charakteristische Ausprägung untersuchter Matrixproduktionssysteme	24
Abbildung 15:	Entwicklung der Automatisierung	26
Abbildung 16:	Reifegradmodell Infineon Dresden	27
Abbildung 17:	Modulares Montagekonzept bei SEW-EURODRIVE	28
Abbildung 18:	Reifegradmodell Fertigungsbereich SEW-EURODRIVE	29
Abbildung 19:	Reifegradmodell Montagebereich SEW-EURODRIVE	29
Abbildung 20:	Entwicklungspfade zur Matrixproduktion	30
Abbildung 21:	Reifegradmodell Hersteller Elektrowerkzeuge	32
Abbildung 22:	Modulares Montagekonzept für die Türverkleidung (Audi Ingolstadt)	33
Abbildung 23:	Reifegradmodell Vormontage Automobilhersteller	34
Abbildung 24:	Lebenszyklusphasen eines Matrixproduktionssystems	35
Abbildung 25:	Maximalausprägungen der befragten Technologieausrüster	36
Abbildung 26:	Modulare Montagezelle	38
Abbildung 27:	Flottenmanagement und Koordination für AMR	40
Abbildung 28:	Herleitung der zu untersuchenden Thesen	41
Abbildung 29:	Branchenverteilung und Supply-Chain-Einordnung	57
Abbildung 32:	Kundenauftragsentkopplungspunkt	58
Abbildung 30:	Unternehmensgröße (Anzahl der Beschäftigten am Standort)	58
Abbildung 31:	Fertigungsumfang (durchschnittliche Losgröße)	58
Abbildung 33:	Variantenanzahl	59
Abbildung 34:	Größe des Produkts	59
Abbildung 35:	Modulares Produktdesign	59
Abbildung 36:	Varianz der Bearbeitungszeiten der gefertigten Produktvarianten	60
Abbildung 37:	Fertigungsstruktur	60
Abbildung 38:	Erzeugnisstruktur	60
Abbildung 39:	Erzeugnisspektrum (Standardisierungsgrad der Produkte)	61
Abbildung 40:	Kernkompetenzen der befragten Technologieausrüster	62
Abbildung 41:	Unternehmensgröße (Anzahl der Beschäftigten)	62
Abbildung 43:	Können Sie höhere Stufen gemäß des Reifegradmodells anbieten (Technology Push)?	63
Abbildung 42:	Fragen Anwender Technologien an, die über den Stand der Technik hinausgehen (Market Pull)?	63
Abbildung 44:	Streben Sie in Zukunft neue Geschäftsmodelle an?	64

## Tabellen

Tabelle 1:	Abgrenzung der cyber-physischen Matrixproduktion von klassischen Organisationsformen	10
Tabelle 2:	Exemplarische Kennzahlenveränderung von einem klassischen Produktionssystem zu einer software-definierten Matrixproduktion	30
Tabelle 3:	Exemplarische Kennzahlenveränderung von einer software-definierten zu einer cyber-physischen Matrixproduktion	31
Tabelle 4:	Exemplarische Kennzahlenveränderung von einem klassischen Produktionssystem zu einer hardware-definierten Matrixproduktion	31
Tabelle 5:	Exemplarische Kennzahlenveränderung von einer hardware-definierten zu einer cyber-physischen Matrixproduktion	31
Tabelle 6:	Exemplarische Kennzahlenveränderung von einem klassischen Produktionssystem direkt zu einer cyber-physischen Matrixproduktion	33

## Anhang A: Reifegradmodell

Gestaltungsfeld	Betrachtungsgestand
a) Grundstruktur des Produktionssystems	Rekonfigurierbarkeit und Rekonfigurationsaufwand bezogen auf die Struktur des Produktionssystems
b) Gestaltung Prozessmodul	Aufbau der Prozessmodule, die aus einer oder mehreren Funktionseinheiten bestehen und einen definierten Prozessschritt abbilden; Schnittstellen für In- und Output; Austauschbarkeit und Rekonfigurierbarkeit; Modularisierung
c) Steuerung Prozessmodul	Einbindung und Steuerung der Prozessmodule in der Prozesselebene; Standardisierung der Schnittstellen; Datennutzung aus der Modulsteuerung; IT-seitige Funktionsbeschreibung der Module
d) Operative Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	Ablauf der Produktionsplanung und -steuerung; Primär- und Sekundärbedarfsplanung; Termin- und Kapazitätsplanung; Auftragsfreigabe, Ablaufplanung und Auftragsüberwachung
e) Materialbereitstellungsstrategie	Bereitstellungsprozesse (vom Wareneingang bis zur Station); Logistikstruktur (Lagerung und Lagerprozesse); Informationsfluss- und Datenmanagement (Buchung der Warenbewegung, Traceability der Bestände)
f) Transport von Produkt und Rohmaterial	Fördertechnik des Produktionssystems; Kommunikationsfähigkeit und Automatisierungsgrad; Transportrouten (starr oder dynamisch); Flottenmanagement (Steuerung der Fördertechnik); Last-Handling
g) IKT-Infrastruktur	Vernetzung des Produktionssystems (Kommunikationsfähigkeit M2M); IT-Architektur (Monolith/On-Premise, Plattform, Cloud, serviceorientiert); Datenerfassung (MDE und BDE), Datenspeicherung und -verarbeitung
h) Digitaler Zwilling	Modellierungstiefe (Verhaltensmodelle); Einsatzmöglichkeiten (statische und dynamische Simulation zur Entscheidungsunterstützung); Echtzeitfähigkeit
i) Mensch-Maschine-Interaktion	Unterstützung des Arbeitsprozesses; Entscheidungsunterstützung des Systems (von menschenzentrierter Entscheidung bis zu autonomen Entscheidungen); Informationsaustausch zwischen Menschen und Maschine
j) Personal-Organisation/Einsatz	Qualifikation und Einsatzmöglichkeiten des Personals (Job Rotation, Job Enrichment, Job Enlargement); Change Management
k) Versorgungsinfrastruktur	Energieinfrastruktur und Anschlüsse (zentrale/dezentrale Versorgung, Speichereinsatz, Standardisierung und Veränderungsfähigkeit); Energiemanagement (Lastspitzenmanagement, Energiemonitoring, Energiehandel)
l) Qualitätsmanagement	Methoden zur Überwachung und Verbesserung der Prozess- und Arbeitsqualität (KVP, SPC etc.); Qualitätsmanagementsystem; Methoden des Qualitätsmanagements (Six Sigma)
m) Instandhaltung	Einleitungszeitpunkt und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen (manuell, zyklisch oder datengetrieben)

## a) Grundstruktur des Produktionssystems

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
Grundstruktur des Produktionssystems	1	Starre, statische Struktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Linie, Werkstatt, Einzelarbeitsplatz (als Gesamtsystem beplant)</li> <li>Struktur bietet keine Möglichkeit zur aufwandsarmen Rekonfiguration</li> </ul>
	2	Modulare Struktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>freie logistische Disposition jedes Prozessmoduls</li> <li>Vorkehrungen zur Umstellung auf eine modulare Struktur des gesamten Produktionssystems oder Produktionsbereichen sind getroffen</li> </ul>
	3	Modulare, systematisch rekonfigurierbare Struktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strukturen für eine Rekonfiguration sind vorhanden (modulare Strukturen)</li> <li>Möglichkeiten des örtlichen Umzugs von Prozessmodulen sind gegeben</li> <li>Mensch erkennt Rekonfigurationsbedarfe aufgrund von Daten und/oder Simulation und setzt Rekonfigurationen um (Werkzeuge, Vorrichtungen, Technologien etc. ziehen auf andere Prozessmodule um)</li> <li>Produkteinführungen sind effizient umsetzbar</li> <li>Systemausfälle können schnell kompensiert werden</li> </ul>
	4	Adaptive, automatisiert rekonfigurierbare Struktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>System kann flexibel auf Veränderungen reagieren (System schlägt optimierte Rekonfiguration vor)</li> <li>Durchführung der Rekonfiguration automatisiert innerhalb eines gegebenen Rekonfigurationsrahmens, aber vom Menschen veranlasst</li> <li>Möglichkeit der Rekonfiguration je Schicht</li> </ul>
	5	Fluide, autonom rekonfigurierbare Struktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>autonome Rekonfiguration je Produkt</li> <li>System erkennt eigenständig Änderungen in der Auftragslage und passt sich selbstständig an</li> <li>Produktionssystem ist nicht mehr in abgeschlossene Prozessmodule aufgeteilt, sondern besteht aus fluiden Funktionseinheiten, die sich autonom zusammenfinden</li> </ul>

## b) Gestaltung Prozessmodul

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
Gestaltung Prozessmodul	1	Starrer Aufbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stand-alone-Maschinen, Einzeckmaschinen (z. B. klassische Werkzeugmaschine)</li> <li>Linien oder Montageplätze deren Stationen nicht einzeln beplant werden können</li> <li>keine Schnittstellen für automatisierten und freien Material-Input/-Output</li> </ul>
	2	Starrer Aufbau, teilautomatisiertes Material-Handling	<ul style="list-style-type: none"> <li>starre Fertigungs- und Montageeinrichtungen (z. B. Bearbeitungszentrum, Einzelmaschinen, Prüfgeräte etc., die über Materialflüsse miteinander verbunden sind oder verbunden werden können)</li> <li>einheitliche Schnittstellen für Material-Input/-Output vorhanden (durch Funktionseinheiten wie Förderband gegeben)</li> <li>Prozessmodul ist schwer austauschbar (höchstens durch gleiche Prozessmodule)</li> </ul>
	3	Rekonfigurierbarer Aufbau, automatisiertes Material-Handling	<ul style="list-style-type: none"> <li>modular aufgebaute Fertigungs- und Montageeinrichtungen mit Rekonfigurationsmöglichkeiten (z. B. Bearbeitungszentrum mit anpassbaren Funktionseinheiten: Werkzeugwechsler, Förderer, Rundtisch, Roboter etc.)</li> <li>einheitliche Schnittstellen für Material-Input/-Output vorhanden (siehe Stufe 2)</li> <li>durch den Anwender systematisch rekonfigurierbar (Prozessmodul kann mehrere Prozessschritte ausführen)</li> <li>Prozessmodul kann durch ein als gleichartig erachtetes ausgetauscht werden</li> </ul>
	4	Adaptiver, modularer Aufbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>modular aufgebaute Fertigungs- und Montageeinrichtungen mit einheitlichen Schnittstellen für Werkzeuge/Prozessköpfe (z. B. Roboterzelle mit austauschbarem Prozesskopf)</li> <li>Prozessmodul kann automatisch Rekonfigurationen durchführen (z. B. automatischer Werkzeug- oder Vorrichtungswechsel)</li> <li>Prozessmodul kann durch andere Prozessmodule ausgetauscht werden</li> </ul>
	5	Fluiden, autonomer Aufbau	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozessmodule werden autonom aus vorhandenen Funktionseinheiten mit standardisierten Schnittstellen zusammengestellt</li> <li>Mobile, kognitive Robotersysteme unterschiedlichster Größe mit wechselbaren Prozessköpfen/Werkzeugen</li> </ul>

c) Steuerung Prozessmodul

Steuerung Prozessmodul	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
	1	Keine Anbindung an externes Prozessleitsystem	<b>Stand-alone-Maschinen mit HMI-Anbindung:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Steuerung der Maschine über Bedientpult/HMI (z. B. Stanze, Ständerbohrmaschine, Industriesäge, konventionelle Fräsmaschine, Drehmaschine)</li> </ul>
	2	Anbindung an Prozessleitsystem, starrer Aufruf der Prozessfunktionen	<b>Alleinstehende unabhängige Module:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>geschlossene Einheit, in Prozessleitsystem integriert</li> <li>Mindestanforderung: Prozessfunktion starten und rückmelden</li> <li>eventuell hoher Aufwand für die Integration in das Prozessleitsystem (kein Plug &amp; Produce)</li> <li>Funktionen werden durch Prozessleitsystem orchestriert</li> <li>vorgegebene Funktionsparameter (lediglich Prozessausführung und keine Planung)</li> <li>Beispiel: Die Funktion des Prozessmoduls kann über das Prozessleitsystem gestartet werden. Das Prozessmodul liefert eine Rückmeldung an das Prozessleitsystem zum aktuellen Status (in Betrieb, Stopp, Störung etc.)</li> </ul>
	3	Aufruf von Prozessfunktionen mit anpassbaren Funktionsparametern	<b>Integrierbare Module:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>automatisch in ein vorhandenes oder neues Prozessleitsystem integrierbar (Plug &amp; Produce)</li> <li>Verwendung eines einheitlichen Standards, der eine formale Beschreibung der Schnittstellen und Funktionen der modularen Prozesseinheit besitzt (z. B. OPC UA, MQTT)</li> <li>Erfassung großer Datenmengen über die Steuerung und deren Nutzung (z. B. Identifikation von Anomalien, vorausschauende Wartung, Prozess-Monitoring etc.)</li> </ul>
	4	Flexibler Aufruf von Prozessfunktionen mit anpassbaren Zieleigenschaften	<b>Module mit eigener Intelligenz:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Prozess im Modul wird durch eigene Planungsfunktionen aus den Vorgaben der Schnittstelle gesteuert und ausgeführt</li> <li>Steuerung innerhalb des Moduls bildet die Funktion ab</li> <li>Beispiel: Übergabe der entsprechenden prozessbezogenen Zieleigenschaft (z. B. größerer Bohrungsdurchmesser), mit der das Prozessmodul automatisch den Fertigungsschritt neu plant und ausführt (z. B. Verwendung eines größeren Bohrers)</li> </ul>
	5	Autonome Planung und Ausführung der Prozessfunktionen	<b>Autonome, selbstoptimierende Module:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Übergabe der gewünschten Eigenschaften des Produkts und Regelung auf Bauteileigenschaften</li> <li>Beispiel: Übergabe des CAD-Modells an ein Prozessmodul (z. B. Bearbeitungszentrum), das im Anschluss die Fertigungsschritte und -parameter autonom plant und ausführt</li> </ul>

d) Operative Produktionsplanung und -steuerung (PPS)

Operative Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele	
			Produktionsplanung	Produktionssteuerung
	1	Zentralisierte Grobplanung, starre Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>manuelle Auftragseinplanung auf Systemebene mittels ERP durch den Menschen (erfahrungsbasiert)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>manuelle Steuerung nach Auftragsfreigabe über feste Vorgangsreihenfolge und Prioritätsregeln durch den Menschen (FIFO, frühester Liefertermin, bedarfsgerecht etc.)</li> </ul>
	2	Zentralisierte Grob- und Feinplanung, teilautomatisierte Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>teilautomatisierte Auftragseinplanung auf Systemebene mittels ERP (datenbasiert)</li> <li>Feinplanung auf einzelne Prozessmodule, z. B. über MES</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>teilautomatisierte Steuerung von Planabweichungen und Vorgangsreihenfolgen nach einfachen Prioritätsregeln am Prozessmodul durch das System</li> </ul>
	3	Zentralisierte Grob- und Feinplanung, zentral optimierende Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>siehe Stufe 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>automatische Steuerung von Planabweichungen und Reihenfolgen mittels optimierender Verfahren (z. B. Simulationen, genetische Algorithmen etc.) durch das MES</li> <li>Nutzung von Arbeitsverteilungsflexibilität über Produktionsmonitoring</li> </ul>
	Beispiel: Falls eine Störung auftritt, die zu einem zeitlichen Verzug führt, ist das PPS-System in der Lage, dies ad hoc durch die Einbeziehung anderer freier Prozessmodule auszugleichen.			
4	Zentraler Auftragspool, selbstoptimierende Steuerung mit lokaler Intelligenz	<ul style="list-style-type: none"> <li>automatisierte, optimierte Produktionsplanung durch Verwendung von Algorithmen und Simulationen (Regelkreise, KI, Reinforcement Learning etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Steuerung im System nach Auftragsfreigabe über dezentral optimierende Verfahren (z. B. Maschine stellt Dienst bereit nach Meldung einer freien Kapazität)</li> <li>Ad-hoc-Nutzung der Arbeitsverteilungs- und Operationsreihenfolgeflexibilität, beispielsweise über Vorranggraphen (dynamischer Arbeitsplan) auf Basis von Echtzeitdaten</li> <li>Kombination aus zentralen und lokalen Steuerungselementen</li> </ul>	
5	Zentraler Auftragspool, dezentrale, autonome Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autonome, agentenbasierte Entscheidungsstrukturen (Planung und Optimierung der Produktion mit Echtzeitdaten unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen, wie Kundenwünsche, Ressourcenverfügbarkeit etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>autonome, echtzeitbasierte Entscheidungsfindung</li> <li>Produkte entscheiden selbst mittels optimierender Verfahren</li> <li>Steuerung setzt Ressourcen entsprechend der Aufträge zusammen</li> </ul>	

Bemerkung: Im Kontext der Matrixproduktion geht der Trend in Richtung einer dezentralen Steuerung, da der hohe Bedarf an Flexibilität durch eine zentrale Steuerung schwer abbildbar ist.

## e) Materialbereitstellungsstrategie

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele	
			Bereitstellprozess und Logistikstruktur (Lager, Regale)	Informationsfluss und Datenmanagement
Materialbereitstellungsstrategie	1	Starre Materialbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>starre Lagersysteme mit eindeutiger Identifikation der Lagerplätze und fester Zuweisung von Bereitstellungsflächen</li> <li>Materialfluss ist arbeitsstationsabhängig (unveränderlicher, fester Stellplatz an der Arbeitsstation)</li> <li>Einsatz von verbrauchsorientierten Bereitstellungskonzepten wie Kanban oder bedarfsorientierten Methoden wie JIT &amp; JIS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>klassischer Informationsfluss (häufig papierbehaftet), geringe Transparenz im Materialfluss</li> <li>Behälter/Transporthilfsmittel mit Identifikation und Buchung im Warenwirtschaftssystem (z. B. über Barcode)</li> </ul>
	2	Modulare, matrixfähige Materialbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materialbereitstellung ist an Matrix angepasst, z. B. gibt es keinen „Freeze“ mehr</li> <li>teilflexible Lagersysteme und Bereitstellungsflächen (wenig Flexibilität hinsichtlich Anpassung oder Verschiebung)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prognose von Materialbedarfen</li> <li>digitalisierter Informationsfluss ohne Papier (Erhöhung der Transparenz im Materialfluss)</li> <li>projektbezogene, gezielte Datenaufnahme für identifizierte Prozesse hinsichtlich Optimierungspotenzial</li> </ul>
	3	Rekonfigurierbare Materialbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Möglichkeiten der regelmäßigen Anpassung von Bereitstellungsstrategien und -mengen</li> <li>Leitsystem steuert den Bereitstellprozess je nach Aufträgen an den Zellen</li> <li>Logistikelemente sind flexibel und rekonfigurierbar (z. B. anpassbare und verschiebbare Durchlaufregale)</li> <li>Einsatz von manuell vorkommissionierten Warenkörben, die je nach Variante dem Produktfluss folgen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Track &amp; Trace von Beständen (Ausstattung von Paletten/Behältern mit RFIDs und Regale mit entsprechenden Empfängern)</li> <li>automatisierte Datenaufnahme und -verarbeitung (durchgängige Vernetzung) sowie automatisierte Auswertung zur Nachschubauslösung</li> </ul>
	4	Adaptive Materialbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produkt steuert Bereitstellprozess automatisiert über Leitsystem</li> <li>Logistikflächen und Bereitstellungsplätze und -fächer werden dynamisch auf Basis von Echtzeitdaten angepasst</li> <li>Einsatz agiler, kollaborativer Maschinensysteme (z. B. benötigtes Material fährt mit Produkt mit)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>intelligente Behälter/Paletten, die kontinuierlich den Bestand im Lager oder der Produktion in Echtzeit übermitteln (z. B. über Gewichtsermittlung oder per Kamera)</li> <li>vollständige Transparenz des Materialflusses</li> </ul>
	5	Autonome, fluide Materialbereitstellung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produkt steuert Bereitstellungsprozesse autonom</li> <li>Autonomes, flexibles Lagersystem mit frei beweglichen Logistikelementen, die sich selbst zusammenstellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>autonome Entscheidungsprozesse des Logistiksystems</li> <li>Selbstop Optimierung der Materialbereitstellungsstrategie mit echtzeitbasierten Daten</li> </ul>

## f) Transport von Produkt und Rohmaterial

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele	
			Bereitstellprozess und Logistikstruktur (Lager, Regale)	Informationsfluss und Datenmanagement
Transport von Produkt und Rohmaterial	1	Starrer Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>starre Fördertechnik ohne Kommunikationsschnittstelle (z. B. Förderband, Stapler, Routenzug, Milkrun etc.)</li> <li>Transport in festen Zyklen (One-Piece-Flow oder in festen Losen)</li> <li>manueller und/oder teilweise automatisierter Transport mit manueller Lastübergabe</li> </ul>	
	2	Modularer, matrixfähiger Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fördertechnik mit Kommunikationsschnittstelle (zentrale Steuerung durch Leitsystem und Übergabe der Informationen an Fördertechnik oder Logistik)</li> <li>teilweise automatisiertes Lasthandling</li> <li>starr vorgegebene physikalische oder virtuelle Routen</li> <li>Einplanen von Ausweichrouten und Wartebuchten (bei FTS bzw. Fördertechnik an der Decke)</li> <li>Optimierung durch manuelle Eingriffe des Menschen (FIFO-Zuteilung von Aufträgen zu Fahrzeugen, keine Verhandlung in der Flotte)</li> <li>Regelmäßiges manuelles Anpassen des festen Streckennetzes an Layoutveränderungen</li> </ul>	
	3	Rekonfigurierbarer Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung eines Flottenmanagementsystems bzw. intelligenten Fördersystems (z. B. FTS, Deckentransportsystem)</li> <li>automatisiertes Lasthandling</li> <li>teilflexible physikalische oder virtuelle Routen von Fahrzeugen (Stapler, FTF etc.)</li> <li>dynamisches Routing gemäß festgelegter Regeln (z. B. Anhalten oder Ausweichen bei Hindernissen, Verkehrsregelung)</li> <li>Track &amp; Trace der Fördertechnik</li> </ul>	
	4	Adaptiver Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>echtzeitbasierter Informationsaustausch zwischen Flottenteilnehmern und Maschinen/Anlagen (z. B. Auftragsfortschritt an Prozessmodulen wird zur Planung der Transportbedarfe genutzt)</li> <li>selbständige, dynamische Aktualisierung der Einsatzumgebung im laufenden Betrieb (Kartierung)</li> <li>frei navigierende AMR ohne vorgegebene physikalische oder virtuelle Routen (Verwendung von SLAM-Algorithmen)</li> <li>Verwendung eines intelligenten Flottenmanagementsystems (Monitoring und Koordination von allen Flottenteilnehmern, intelligente Auftragszuweisung mit selbstständiger Optimierung von Fahrtrouten, intelligentes Laden etc.)</li> </ul>	
	5	Fluider, autonomer Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>AMR für Transport und Produktion (AMR produzieren während des Transports)</li> </ul>	

## g) IKT-Infrastruktur

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
IKT-Infrastruktur	1	Einfache IKT-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ERP zur Auftragseinplanung als On-Premise auf eigenen Servern</li> <li>• zentrale Datenspeicherung und -verarbeitung</li> <li>• kaum Vernetzung der Ressourcen oder Möglichkeiten der M2M-Kommunikation (oft papierbehaftet)</li> <li>• keine flächendeckende Internetanbindung</li> <li>• einfache BDE/MDE (z. B. Stückzählerfassung, Taktzeit, Stillstandszeit, Zeiterfassung Personal etc.)</li> </ul>
	2	Erweiterte IKT-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• On-Premise Software-Pakete (ERP, MES, MMS, CAQ, WMS etc.) auf eigenen Servern</li> <li>• Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung an den Ressourcen (z. B. Aufnahme und Auswertung von Qualitätsdaten, Energieverbräuchen etc.)</li> <li>• flächendeckende Internetanbindung (papierlose Fabrik)</li> <li>• Einsatz von Low-Code-Anwendungen* zur Parametrisierung von Shopfloor-Anwendungen (z. B. Konfiguration von Funktionen durch grafische Benutzeroberflächen)</li> </ul>
	3	Umfassende IKT-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IT-Systemlandschaft aus angepassten Standardlösungen und Erweiterungen</li> <li>• Aufbau eines Fertigungsnetzwerks zur Echtzeitkommunikation mit automatisiertem Datenaustausch (es müssen nicht alle Ressourcen eingebunden sein)</li> <li>• erweiterte Dezentralisierung von Datenspeicherung und -verarbeitung (Nutzung von Cloud, Cloud-Computing)</li> </ul>
	4	Plattformbasierte IKT-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• granulare Zusammensetzung der Software auf Plattform</li> <li>• echtzeitfähiges Fertigungsnetzwerk mit vollständiger Einbindung aller Fertigungsressourcen</li> <li>• durchgängige Vernetzung zur Parametrisierung und Anpassung von Shopfloor-Services und regelkreisbasierte Entscheidungsfindung zwischen allen Ressourcen der Fertigung und Infrastruktur (IIoT, Regelkreise, KI, ML etc.)</li> <li>• umfängliche dezentrale Datenspeicherung und -verarbeitung</li> <li>• Software-as-a-Service (SaaS)</li> </ul>
	5	Serviceorientierte IKT-Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Softwarearchitektur besteht aus Services mit standardisierten Schnittstellen</li> <li>• Echtzeitkommunikation zwischen allen Fertigungsressourcen und Infrastrukturkomponenten</li> <li>• Kommunikation und Entscheidungsfindung zwischen Ressourcen erfolgt weitgehend autonom unter Einbeziehung der Infrastruktur</li> </ul>

\*„Low-Code-Anwendung“: individuelle Anpassung von Lösungen sämtlicher Unternehmensprozesse ohne große Programmierkenntnisse (z. B. Erstellung von Dashboards über Node-Red, Grafana etc.), Nutzung von baukastenorientierten Anwendungen für verschiedene Arbeiten wie Datenanalyse (RapidMiner, KNIME, Azure etc.) oder Simulation.

## h) Digitaler Zwilling

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
Digitaler Zwilling	1	Digitale Master und statische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CAD-Daten der Ressourcen</li> <li>• aktuelles digitales Fabriklayout</li> <li>• Selbstbeschreibung des Anlagenzustandes (z. B. Condition Monitoring)</li> </ul>
	2	Digitale Verhaltensmodelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funktionales Simulationsmodell (Geometrie- und Verhaltensmodell von Ressourcen, z. B. für Materialflussanalyse und Layoutplanung)</li> <li>• Prozess- und Ressourcendaten sind digital hinterlegt (Produktionsgelände, eingesetzte Maschinen etc.)</li> <li>• Nutzung von Sensor- und Aktordaten aus der Produktion für die Simulationsmodelle</li> <li>• keine Verknüpfung der Verhaltensmodelle mit Daten aus der Fabrik</li> <li>• werden für die Produkt- und Prozessentwicklung sowie für die virtuelle Inbetriebnahme eingesetzt</li> </ul>
	3	Iterativ synchronisierte Verhaltensmodelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatisierte Datengewinnung aus der Fabrik</li> <li>• digitale Verhaltensmodelle werden zyklisch über Daten synchronisiert und für die Optimierung und Entscheidungsunterstützung genutzt</li> </ul>
	4	Synchronisierter, aufgabenspezifischer Produktionszwilling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stellt für ausgewählte Aufgaben Echtzeitdaten für Optimierungen und Entscheidungen bereit</li> <li>• automatische Synchronisation der Daten mit dem Verhaltensmodell</li> </ul>
	5	Vollumfänglicher Produktionszwilling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stellt alle wesentlichen Echtzeitdaten zur Befähigung von Optimierungen und Entscheidungen bereit</li> <li>• Visualisierung der kompletten Fabrik als digitaler Zwilling in Echtzeit</li> </ul>

## i) Mensch-Maschine-Interaktion

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
Mensch-Maschine-Interaktion	1	Mensch entscheidet selbst- und eigenständig	<ul style="list-style-type: none"> <li>wenig Unterstützung des Menschen durch Maschinen oder Systeme</li> <li>Informationsaustausch über HMIs/Touchpanels oder manuelle Eingabe über Schalter, Hebel, Tasten etc.</li> <li>Einsatz lokaler Anzeige- und Eingabegeräte zur Unterstützung von Arbeitsprozessen</li> <li>Einsatz von Kränen oder anderen Einrichtungen zur Bewegung von Lasten</li> </ul>
	2	Assistiertes Entscheiden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anzeige und Steuerung von relevanten Produktionsdaten auf entsprechenden Geräten (zentral und dezentral)</li> <li>Verwendung von Simulationssoftware zur assistierten Entscheidungsfindung</li> <li>Unterstützung im Arbeitsprozess (z. B. Pick-by-Light, Manipulatoren etc.)</li> </ul>
	3	Teilweises Entscheiden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung softwarebasierter Assistenz- und Entscheidungssysteme mit Echtzeitfeedback</li> <li>Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>Verwendung von Tablets zur Steuerung und Überwachung</li> <li>Mensch-Roboter-Kollaboration und intelligente Manipulatoren</li> <li>bedarfsgerechte, digitale Anleitung und Hilfestellung des Menschen im Arbeitsprozess durch das System</li> <li>dialogorientierte Systeme (z. B. Sprachsteuerung)</li> </ul> </li> </ul>
	4	Geprüftes Entscheiden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Systeme stoßen selbstständig Prozesse an und steuern diese unter Einbeziehung der Selektion und Aufbereitung von Informationen (z. B. auf Basis von Regelkreisen, KI, ML etc.)</li> <li>System gibt Entscheidungsalternativen vor, Verantwortung der Entscheidungen bleibt aber oft noch beim Menschen</li> <li>Beispiele: <ul style="list-style-type: none"> <li>Gestensteuerung (z. B. von Robotern)</li> <li>erweiterte und assistierte Realität (z. B. Augmented Reality, Datenbrillen)</li> <li>KI-basierte Exoskelette (individuelle Anpassung an Menschen durch KI)</li> <li>Einsatz von Gamification</li> <li>Information-Butler (Unterstützung im Büroalltag durch KI, z. B. Priorisierung und Aufbereitung von Informationen)</li> <li>agile, kollaborative Maschinensysteme</li> </ul> </li> </ul>
	5	Autonomes/delegiertes Entscheiden	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mensch übergibt dauerhaft die Kontrolle an das autonome, selbstoptimierende System</li> <li>Mensch kann jederzeit in das System eingreifen</li> <li>Einsatz von selbstlernenden Robotern (Erlernung von Schrittfolgen und Arbeitstechniken der Menschen)</li> </ul>

## j) Personal-Organisation/Einsatz

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
Personal-Organisation/Einsatz	1	Fester Personaleinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fachkräfte arbeiten im Bereich ihrer Ausbildung und erhalten bei Bedarf eine Fortbildung</li> <li>standardisierte Aufgaben mit wenig Verantwortung</li> <li>geringer Entscheidungsspielraum</li> </ul>
	2	Teilflexibler Personaleinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unterstützung der Fachkräfte in der Aufgabenvielfalt durch Informationsunterstützung (z. B. Assistenzsysteme)</li> <li>Weiterbildungsmöglichkeiten für die Fachkräfte</li> <li>nur kleiner Kreis des Personals kann Springertätigkeiten ausüben (Einsatz erfahrener Fachkräfte als Springer)</li> <li>flexible Verteilung der Springerkapazitäten auf Arbeitsinhalte (Arbeitsvertrag und Jobbeschreibung beachten)</li> </ul>
	3	Ortsflexibler Personaleinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>Großteil der Fachkräfte kann als Springer eingesetzt werden (Job Rotation)</li> <li>Erweiterung des Aufgabenspektrums der Fachkräfte (Job Enlargement)</li> <li>mehr Verantwortung und Entscheidungsspielraum für das Personal (Job Enrichment)</li> <li>Schulung der Fachkräfte während des Betriebs</li> <li>Kommunikationsmöglichkeiten zwischen dem Personal (z. B. über Tablets)</li> <li>transparente Darstellung des Personaleinsatzes (z. B. über Assistenzsystem)</li> </ul>
	4	Kurzfristig ortsflexibler Personaleinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>intelligente Personaleinsatzplanung (Fachkräfte werden kurzfristig ortsflexibel eingesetzt)</li> <li>umfangreiche Unterstützung der Fachkräfte in der Aufgabenvielfalt durch Assistenzsysteme (z. B. über Smart Wearables)</li> <li>einfache Integration neuer Fachkräfte durch kurze Schulungen</li> <li>dezentrale Führung und flache Hierarchien (keine zentrale Entscheidung, wo die Fachkräfte eingesetzt werden)</li> </ul>
	5	Orts- und zeitflexibler Personaleinsatz	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fachkräfte werden je nach Bedarf ad hoc, orts- und zeitflexibel eingesetzt</li> <li>flexibles Zeitmanagement für das gesamte Personal</li> <li>dezentrale Organisation des Personaleinsatzes (Menschen und System planen Personaleinsatz gemeinsam)</li> <li>Informationsbereitstellung je nach Aufgabenort und Qualifikation (Assistenzsysteme mit lernendem Ansatz)</li> </ul>

## k) Versorgungsinfrastruktur

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele	
			Infrastruktur und Anschlüsse	Energiemanagement
Versorgungsinfrastruktur	1	Starre Energieinfrastruktur, einfaches Energiemanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ortsfeste Energieinfrastruktur mit definierten Anschlüssen (langfristig orientiert, nur mit großem Aufwand veränderbar)</li> <li>• zentraler Stromanschluss</li> <li>• Fremdversorgung</li> <li>• keine Energiespeicherung und -rückgewinnung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• weitgehend fest installierte Leistung (Maschinenpark ist fest eingebunden)</li> <li>• kein Lastmanagement (wenig Flexibilität im Lastgang)</li> <li>• wenig Transparenz bei der Aufnahme des Energieverbrauchs</li> <li>• keine Energiemanagement-Zertifizierung</li> </ul>
	2	Nachrüstbare Energieinfrastruktur, passives Energiemanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vorhandene Flexibilität in der Infrastruktur, um neue Elektro- und Medienanschlüsse zu verlegen</li> <li>• feste, nicht standardisierte Medienanschlüsse</li> <li>• teilweise Nutzung von dezentraler Energieversorgung (z. B. PV, BHKW)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überwachung der Energieflüsse durch ein Energiemonitoring (z. B. Smart Metering)</li> <li>• energetische Transparenz ermöglicht Lastmanagement durch manuelle Eingriffe des Menschen</li> </ul>
	3	Layoutorientierte Energieinfrastruktur, aktives Energiemanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• modulare, nachrüstbare Energieinfrastruktur (z. B. abgehängte Versorgung von der Hallendecke)</li> <li>• Verwendung standardisierter, flexibler Anschlüsse (Anlagen können flexibel an Infrastruktur angebunden werden)</li> <li>• zentrale und dezentrale Versorgung</li> <li>• teilweise Nutzung von Speichertechnologien (Batterien, Druckluftspeicher, thermische Speicher etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vollständige energetische Transparenz durch umfangreiches Energiemonitoring</li> <li>• energieorientierte Produktionssteuerung durch aktives Lastmanagement basierend auf Prognosen</li> <li>• Einsatz von smarten Schützen und Leitungsschutzschaltern</li> <li>• Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilität</li> </ul>
	4	Layoutflexible Energieinfrastruktur, optimiertes Energiemanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• adaptive Energieinfrastruktur mit flexiblem, modularem Anschlusskonzept</li> <li>• Nutzung von Speichertechnologien</li> <li>• Infrastruktur für Sektorkopplung vorhanden</li> <li>• flexible Lademöglichkeiten der Transportsysteme (z. B. Induktionsstraßen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• optimiertes Energiemonitoring mit ganzheitlicher Energieflussoptimierung aller Energiearten</li> <li>• energieadaptive Produktionssteuerung durch agiles Lastmanagement basierend auf Prognosen und Echtzeitdaten</li> <li>• Nutzung von Sektorkopplung</li> <li>• Vermarktung von Energieflexibilität</li> </ul>
	5	Layoutunabhängige Energieinfrastruktur, intelligentes Energiemanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• wandelbare Energieinfrastruktur (Infrastruktur kann allen Layoutvarianten folgen)</li> <li>• zentrale und dezentrale Energieversorgung</li> <li>• umfangreicher Speichereinsatz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• autonomes Lastmanagement mit prädiktiver Erkennung von Lastspitzen und selbstoptimierender Anpassung</li> <li>• CO<sub>2</sub>-neutrale Fabrik</li> </ul>

## l) Qualitätsmanagement

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele	
Qualitätsmanagement	1	Standardisiertes Qualitätsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prozessdurchführung und Ergebnisse werden durch den Menschen kontrolliert</li> <li>• Prozesse werden geplant, befolgt und gelenkt</li> <li>• kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP)</li> </ul>	
	2	Erweitertes und überwachttes Qualitätsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung erweiterter Methoden und Werkzeuge (z. B. Auditierungsmethoden, Total Quality Management (TQM), Six Sigma, Kennzahlensysteme, Traceability etc.)</li> <li>• kontinuierliche Maschinenüberwachung (z. B. Werkzeug- und Werkstückspannung, Prozess- und Zustandsüberwachung etc.)</li> </ul>	
	3	Etabliertes und datengetriebenes Qualitätsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzung von Regelkreisen (kurzyklische KVPs)</li> <li>• datengetriebene Qualitätsregelung und Meldung bei Überschreitung der Toleranzgrenzen (z. B. Trendanalysen mithilfe von Statistical Process Control (SPC) oder Einsatz von Kamerasystemen zur Überwachung)</li> <li>• Ursachen von Störungen werden erkannt und können lokalisiert werden (aktives Alarmmanagement)</li> </ul>	
	4	Vorausschauendes Qualitätsmanagement (Predictive Quality)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In-Process-Parametrisierung von Betriebsmitteln auf Grundlage echtzeitbasierter Daten (z. B. automatische Anpassung von Prozessparametern wie Drehzahl, Vorschub etc.)</li> <li>• KI-basierte Fehlerfallanalyse und Prozessverbesserung</li> </ul>	
	5	Optimierendes Qualitätsmanagement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• autonome Selbstoptimierung der Prozessqualität durch das System (prozessübergreifende Verbesserungen und Anpassungen)</li> <li>• durchgängige Traceability vom Ausgangsmaterial bis zum Endprodukt</li> </ul>	

m) Instandhaltung

	Stufe	Beschreibung	Erläuterung und Beispiele
Instandhaltung	1	Periodische Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sichtprüfungen in regelmäßigen Zeitabständen</li> <li>Prüfung erfolgt auf Basis von Erfahrungswerten oder durch vorgeschriebene Zeitintervalle</li> </ul>
	2	Datengetriebene Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>funktionskritische Ressourcen werden überwacht und über ein Monitoring angezeigt</li> <li>periodische Prüfung erfolgt durch Messungen und/oder den Einsatz von SPC</li> </ul>
	3	Echtzeitüberwachte Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>durchgängige Messung von Maschinendaten und Reaktion bei der Erreichung von kritischen Grenzwerten</li> <li>Instandhaltungsmaßnahmen werden an funktionskritischen Ressourcen gemeldet und von der Fachkraft eingeleitet</li> <li>Instandhaltungsmaßnahmen werden manuell mit Produktionsplanung synchronisiert</li> </ul>
	4	Vorausschauende Instandhaltung (predictive)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von Predictive Maintenance (durchgängige Messung von Maschinendaten und automatische Reaktion bei der Erreichung von kritischen Grenzwerten sowie Nutzung von externen Daten)</li> <li>automatisierte Einleitung von Instandhaltungsmaßnahmen durch die Prozess-/Ressourcenmodule</li> <li>Instandhaltungsmaßnahmen werden automatisch mit der Produktionssteuerung synchronisiert</li> </ul>
	5	Präventive Instandhaltung (prescriptive)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von Prescriptive Maintenance (präventive Aktivitäten durch aktive Parameteränderungen der Anlage oder des Werkzeugs ermöglicht eigenständige Überführung in den Sollparameterbereich bei auftretenden Problemen, dadurch kann der Instandhaltungszeitpunkt flexibel verschoben werden)</li> <li>Maschine findet Fehler selbstständig und korrigiert diese aus eigener Kraft</li> <li>Maschine bestellt Ersatzteile</li> </ul>

Anhang B: Charakteristika der befragten Anwender

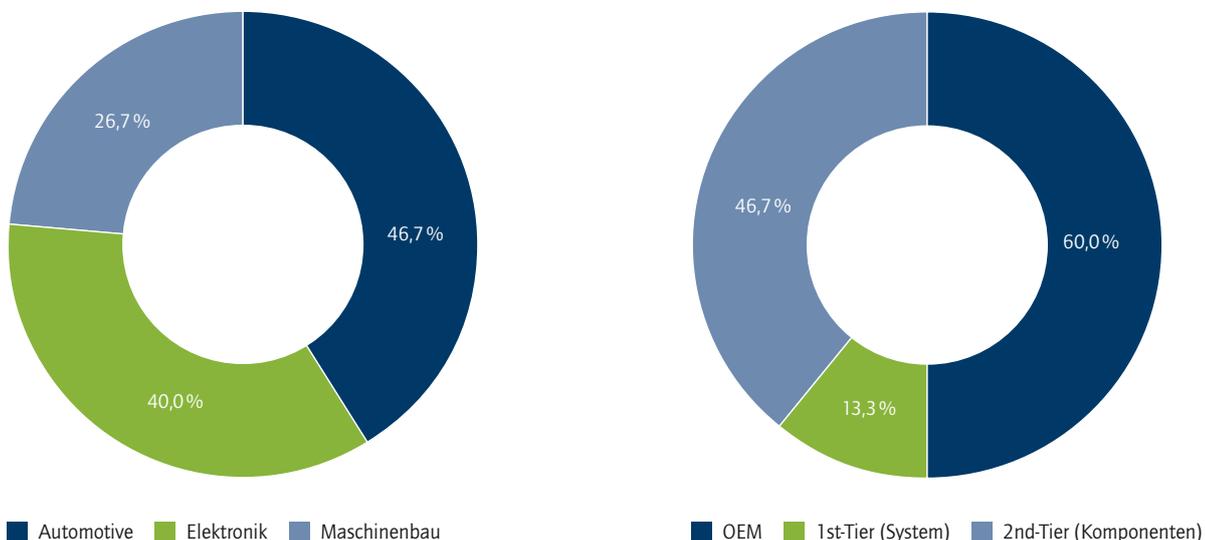
In diesem Abschnitt werden die Spezifika der befragten Anwender von Matrixproduktionssystemen beschrieben. Insgesamt wurden 15 Anwender gefunden, die einen Bezug zu cyber-physischen Matrixproduktionssystemen haben. Die Daten wurden auf Basis eines standardisierten Fragebogens gewonnen und konnten anschließend je nach Art der Frage quantitativ beziehungsweise qualitativ ausgewertet werden. Themen des Fragebogens waren unter anderem die Unternehmenscharakteristik, die Art der hergestellten Produkte und die Motivation zur Umsetzung der Matrixproduktion. Anschließend wurden Fachleute der Unternehmen in einem offenen Gespräch tiefergehend zu jedem Gestaltungsfeld befragt, um den Grad der Reife ihrer Produktionssysteme zu bestimmen. Als

Leitlinie diente das erstellte Reifegradmodell (siehe Anhang A). Den Abschluss der Interviews bildeten Fragen zur Weiterentwicklung der Matrixproduktion sowie zu zukünftigen Herausforderungen.

B.1: Allgemeine Informationen zu den befragten Anwendern

Die 15 befragten Unternehmen sind entlang der Supply-Chain über unterschiedliche Branchen verteilt und haben ein cyber-physisches Matrixproduktionssystem entweder bereits umgesetzt, befinden sich in der Umsetzung oder in der Planung. Dabei stellt die Expertise Unternehmen der diskreten Fertigung in den Vordergrund.

Abbildung 29: Branchenverteilung und Supply-Chain-Einordnung



n=15; Mehrfachnennung möglich

Quelle: eigene Darstellung

### Branchenverteilung und Supply-Chain-Einordnung

Den größten Anteil haben Unternehmen aus den Branchen Automotive (46,7 Prozent), gefolgt von Elektronik (40 Prozent) und Maschinenbau (26,7 Prozent). In weiteren Branchen, wie Pharma, Medizintechnik, Lebensmittel und Chemie, konnten keine Matrixproduktionen in der Vorabrecherche identifiziert werden. Die größte befragte Gruppe waren mit einem Anteil von 60 Prozent Original Equipment Manufacturer (OEM), gefolgt von Komponentenherstellern (2nd-Tier) mit 46,7 Prozent und Systemherstellern (1st-Tier) mit 13,3 Prozent. Abbildung 29 stellt die Branchenverteilung und Supply-Chain Einordnung der befragten Unternehmen dar. Mehrfachnennungen waren möglich.

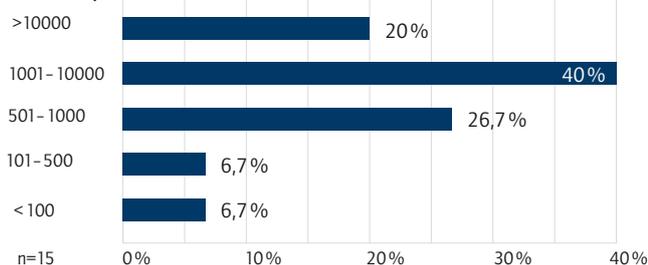
### Kundenverhältnis

Das Kundenverhältnis der Befragten ist mit 66,7 Prozent zum Großteil B2B (Business-to-Business). Direkt an Privatpersonen (Business-to-Consumer, kurz: B2C) liefern lediglich 40 Prozent der Unternehmen (Mehrfachnennungen waren möglich).

### Unternehmensgröße

Die Unternehmensgröße wurde anhand der Anzahl der Beschäftigten am Standort bestimmt. Aus Abbildung 30 wird ersichtlich, dass hauptsächlich Großunternehmen befragt wurden. KMU konnten als Nutzer einer Matrixproduktion kaum identifiziert werden.

Abbildung 30: Unternehmensgröße (Anzahl der Beschäftigten am Standort)



Quelle: eigene Darstellung

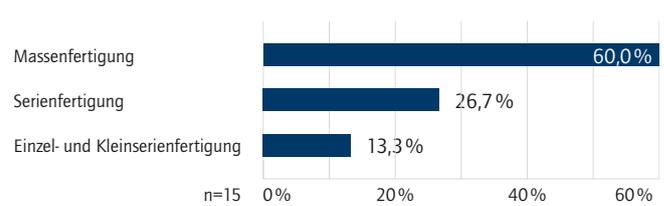
### Fertigungsumfang

Der Fertigungsumfang, der die durchschnittliche Stückzahl einer repräsentativen Produktvariante beschreibt, wurde nach den folgenden Ausprägungen differenziert:

- Einzel- und Kleinserienfertigung (< 250 Stück/Jahr)
- Serienfertigung (> 250 bis 12.000 Stück/Jahr)
- Massenfertigung (> 12.000 Stück/Jahr)

Die Ergebnisse in Abbildung 31 zeigen, dass der Großteil der befragten Unternehmen (60 Prozent) der Massenfertigung zuzuordnen ist. 26,7 Prozent produzieren in Serienfertigung und den kleinsten Anteil macht die Einzel- und Kleinserienfertigung aus.

Abbildung 31: Fertigungsumfang (durchschnittliche Losgröße)

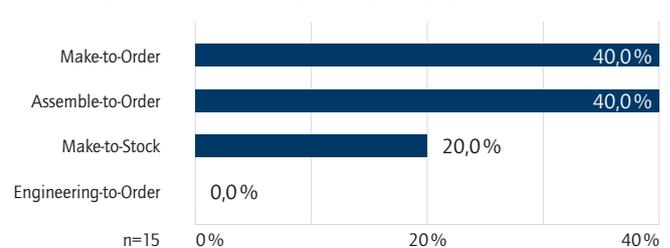


Quelle: eigene Darstellung

### Kundenauftragsentkopplungspunkt

Die Einordnung nach dem Kundenauftragsentkopplungspunkt ist in Abbildung 32 dargestellt. Die Mehrzahl der Unternehmen fertigt nach Make-to-Order und Assemble-to-Order mit jeweils 40 Prozent, gefolgt von Make-to-Stock mit 20 Prozent. Unternehmen, die nach Engineering-to-Order produzieren, waren in der Befragung nicht vertreten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Unternehmen zum überwiegenden Anteil auf Kundennachfrage produzieren.

Abbildung 32: Kundenauftragsentkopplungspunkt



Quelle: eigene Darstellung

## B.2: Produktspektrum der untersuchten Anwender

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften der gefertigten Produkte näher charakterisiert.

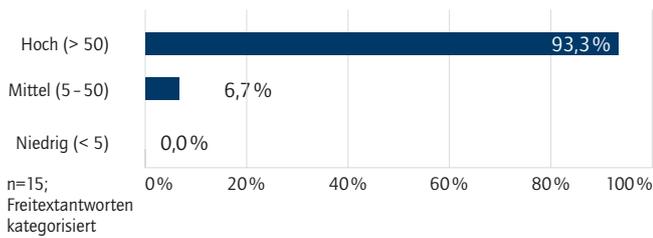
### Varietanzahl

In dieser Expertise wird der Begriff der „Produktvariante“ als eine Veränderung der Grundaufführung, die durch Anpassen, Hinzufügen oder Entfernen von Einzelteilen oder Baugruppen entsteht, definiert. Dabei können sich Gestalt, Beschaffenheit und Eigenschaft des Produkts verändern.<sup>60</sup> Die Variantenanzahl beschreibt die Anzahl der Produktvarianten im betrachteten Arbeitssystem und kann in die in Abbildung 33 dargestellten Abstufungen unterteilt werden.<sup>61</sup> Abbildung 33 ist zu entnehmen, dass die Variantenanzahl in den betrachteten Produktionsbereichen im Regelfall über fünfzig liegt. Dabei lässt sich außerdem feststellen, dass die Variantenanzahl in den betrachteten Montagebereichen im Durchschnitt höher ist als in den Fertigungsbereichen.

60 Vgl. Dangelmaier 2009, S. 228.

61 Vgl. Lödding 2001, S. 33.

Abbildung 33: Variantenanzahl

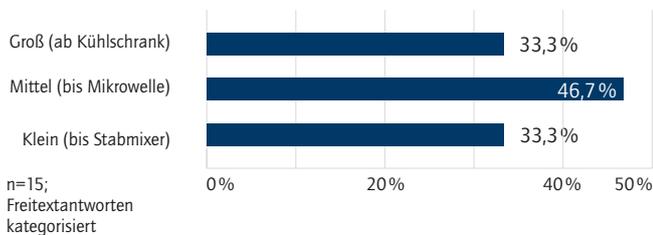


Quelle: eigene Darstellung

### Größe der Produkte

Weiterhin wurde nach Produktgrößen gefragt, die nach den in Abbildung 34 dargestellten Ausprägungen differenziert wurden. Den größten Anteil hatten mittelgroße Produkte (46,7 Prozent), danach folgten große und kleine Produkte mit jeweils 33,3 Prozent. Auch hier waren Mehrfachnennungen möglich.

Abbildung 34: Größe des Produkts

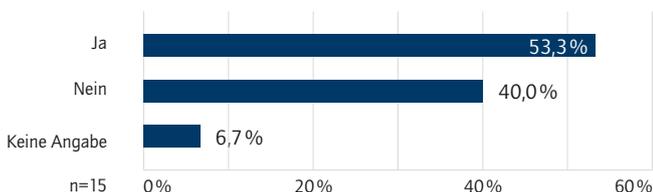


Quelle: eigene Darstellung

### Modulares Produktdesign

Die Vertreterinnen und Vertreter der Unternehmen wurden gefragt, ob in der Produktentwicklung eine modulare Bauweise (Baukastenprinzip) als matrixspezifischer Aspekt berücksichtigt wird. Die Verteilung der Ergebnisse ist in Abbildung 35 dargestellt. Daran ist zu erkennen, dass 53,3 Prozent der Unternehmen eine Modulbauweise ihrer Produkte in der Entwicklung berücksichtigen.

Abbildung 35: Modulares Produktdesign

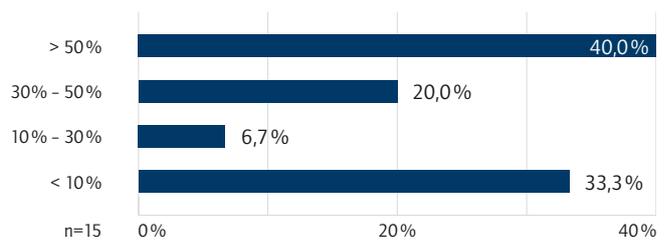


Quelle: eigene Darstellung

### Varianz der Bearbeitungszeiten

Die Varianz der Bearbeitungszeiten der unterschiedlichen Produkte ist in Abbildung 36 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem Großteil der Befragten die Zeiten um mehr als 50 Prozent variieren. Ungefähr ein Drittel der Unternehmen gab eine Abweichung von weniger als 10 Prozent an.

Abbildung 36: Varianz der Bearbeitungszeiten der gefertigten Produktvarianten

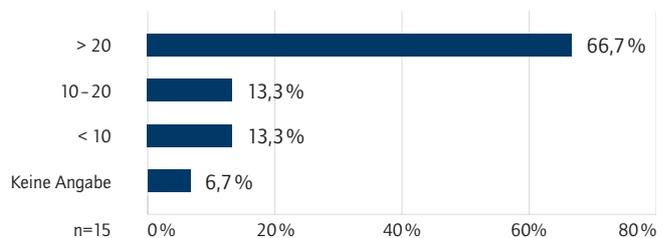


Quelle: eigene Darstellung

### Fertigungsstruktur

Abbildung 37 zeigt die Verteilung der Fertigungsstruktur, das heißt der durchschnittlichen Anzahl aufeinanderfolgender Arbeitsgänge und Montageschritte im Fertigungsprozess. Zwei Drittel der Unternehmen fertigen ihre Produkte mit mehr als zwanzig Arbeitsgängen.

Abbildung 37: Fertigungsstruktur



Quelle: eigene Darstellung

### Erzeugnisstruktur

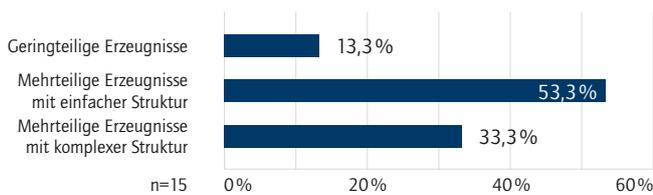
In einem weiteren Schritt wurde die Erzeugnisstruktur untersucht, die Aufschluss über die Strukturtiefe (durchschnittliche Anzahl der Strukturstufen/Stücklistenstufen  $N_{ST}$ ) und Strukturbreite (durchschnittliche Anzahl der Stücklistenpositionen  $N_{Pos}$ ) gibt.<sup>62</sup> Zur Vereinfachung wurden folgende Abstufungen gewählt:

- Geringteilige Erzeugnisse wie Hämmer ( $N_{ST} \leq 3$ ,  $N_{Pos} \leq 25$ )
- Mehrteilige Erzeugnisse mit einfacher Struktur wie Bohrmaschinen ( $5 > N_{ST} > 3$ ,  $500 > N_{Pos} > 25$ )
- Mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur wie Sondermaschinen ( $N_{ST} > 5$ ;  $N_{Pos} > 500$ )

Die Mehrzahl der Unternehmen produziert mehrteilige Erzeugnisse mit einer einfachen Struktur (53,3 Prozent), wie Abbildung 38 zeigt. Danach folgen mit 33,3 Prozent mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur und mit 13,3 Prozent geringteilige Erzeugnisse.

62 Vgl. Büdenbender 1991, S. 38.

Abbildung 38: Erzeugnisstruktur



Quelle: eigene Darstellung

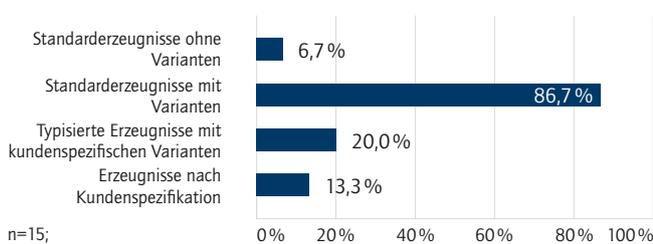
### Erzeugnisspektrum

Ein weiteres Untersuchungsmerkmal ist das Erzeugnisspektrum, das den Standardisierungsgrad eines Produkts beschreibt und inwieweit Kundenwünsche Einfluss auf die Gestaltung des Produkts nehmen können.<sup>63</sup> Dafür sollten sich die Unternehmen in eine der folgenden vier Kategorien einordnen:

- Standarderzeugnisse ohne Varianten (Standardkonstruktion ohne Variantenprogramm)
- Standarderzeugnisse mit Varianten (Standardkonstruktion mit Variantenprogramm)
- Typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten (auftragsbezogene Anpassungskonstruktion auf Basis einer vorhandenen Grundkonstruktion für verschiedene Typen)
- Erzeugnisse nach Kundenspezifikation (auftragsbezogene Neukonstruktion auf Basis von Kundenanforderungen)

Die Verteilung der Antworten in Abbildung 39 zeigt, dass die Produkte der befragten Unternehmen überwiegend Standarderzeugnisse mit Varianten (86,7 Prozent) sind. Typisierte Erzeugnisse mit kundenspezifischen Varianten werden von 20 Prozent und Erzeugnisse nach Kundenspezifikation von 13,3 Prozent der untersuchten Unternehmen gefertigt. Den geringsten Anteil haben Standarderzeugnisse ohne Varianten mit 6,7 Prozent.

Abbildung 39: Erzeugnisspektrum (Standardisierungsgrad der Produkte)



n=15;  
Freitextantworten  
kategorisiert

Quelle: eigene Darstellung

## Anhang C: Charakteristika der befragten Ausrüster

In diesem Abschnitt werden die befragten Technologieausrüster näher beschrieben. Insgesamt wurden 13 ausrüstende Unternehmen interviewt. Analog zur Befragung der Anwender wurde ein Fragebogen erstellt, der neben allgemeinen Informationen auch zukünftige Herausforderungen und Entwicklungstendenzen adressiert. In einer offenen Diskussion konnten zudem mithilfe des Reifegradmodells (siehe Anhang A) Erkenntnisse zur jeweiligen Kernkompetenz des befragten Ausrüsters ermittelt werden. Außerdem ermöglichte dies zu bewerten, welche Maximalausprägungen die Technologieausrüster für die Schlüsseltechnologien einer Matrixproduktion liefern können (siehe Abbildung 25).

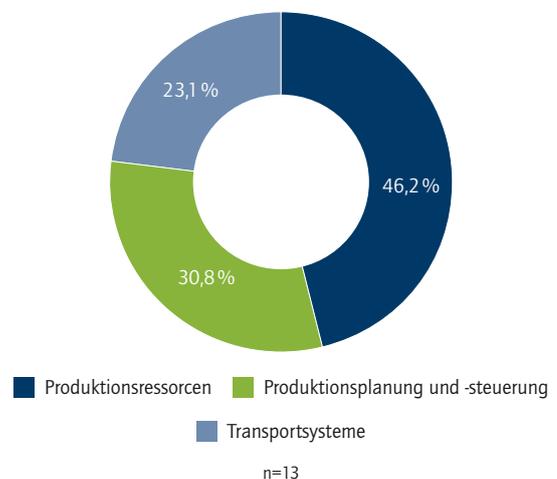
### C.1: Allgemeine Informationen zu den befragten Ausrüstern

Die Befragung der Technologieausrüster konzentriert sich auf Unternehmen, die in Gestaltungsfeldern aktiv sind, die in Kapitel 4.1 als Schlüsselaspekte und Befähiger der cyber-physischen Matrixproduktion identifiziert wurden. Dazu zählen Hersteller von Produktionsressourcen, Softwareanbieter für die Produktionsplanung und -steuerung und Anbieter von Transportsystemen. Im Regelfall fokussieren sich Technologieanbieter auf technisch verwandte Gestaltungsfelder.

#### Zuordnung der befragten Ausrüster zu den Kernkompetenzen

Abbildung 40 zeigt, wie sich die befragten Unternehmen auf die Kernkompetenzen im Kontext Matrixproduktion verteilen. Als Kernkompetenzen wurden Produktionsressourcen (Gestaltungsfelder *Gestaltung und Steuerung von Prozessmodulen*), die Produktionsplanung und -steuerung (Gestaltungsfeld *Operative PPS*) sowie Transportsysteme (Gestaltungsfeld *Transport von Produkt und Rohmaterial*) definiert. Wie Abbildung 40 zu entnehmen ist, wurden zu 46,2 Prozent Ausrüster von Produktionsressourcen, zu 30,8 Prozent Anbieter von PPS-Lösungen sowie zu 23,1 Prozent Anbieter von Transportsystemen befragt.

Abbildung 40: Kernkompetenzen der befragten Technologieausrüster



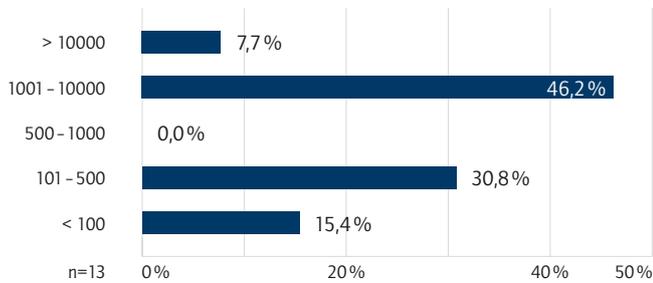
Quelle: eigene Darstellung

63 Vgl. Schomburg 1980, S. 38–43, Büdenbender 1991, S. 36.

**Unternehmensgröße**

In Abbildung 41 ist die Unternehmensgröße der Ausrüster dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass neben den führenden Lieferanten von Technologien und Werkzeugen auch kleinere Unternehmen (Start-ups) in die Befragung mit einbezogen wurden.

**Abbildung 41: Unternehmensgröße (Anzahl der Beschäftigten)**



Quelle: eigene Darstellung

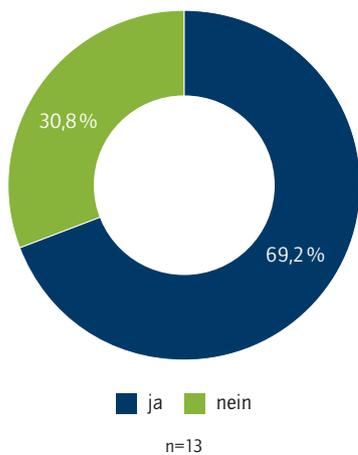
**C.2: Entwicklungstendenzen der untersuchten Ausrüster**

Neben den nachgefragten, verfügbaren Technologien wurden die Ausrüster auch zu Technologien höherer Reifestufen befragt.

**Forschung und Entwicklung**

Die Ergebnisse aus Abbildung 42 zeigen, dass der Großteil der befragten Technologieausrüster (69,2 Prozent) von ihren Kunden eine Nachfrage nach Technogien erhalten, die über den Stand der Technik hinausgehen. Hingegen geben 30,8 Prozent der befragten Ausrüster an, dass Anwender keinen Bedarf nach neuen Technologien äußern (Market Pull).

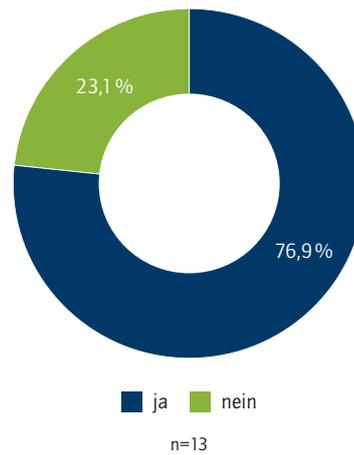
**Abbildung 42: Fragen Anwender Technologien an, die über den Stand der Technik hinausgehen (Market Pull)?**



Quelle: eigene Darstellung

In Abbildung 43 ist die Verteilung der Antworten auf die Frage: „Könnten Sie höhere im Reifegradmodell definierte Stufen bereits anbieten?“ dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass 76,9 Prozent der Unternehmen angeben, höhere Stufen in der Matrixproduktion befähigen zu können als bisher vom Markt angefragt werden. Außerdem gaben alle befragten Technologieausrüster an, dass sie eine kundenneutrale Vorentwicklung haben (Technology Push).

**Abbildung 43: Können Sie höhere Stufen gemäß des Reifegradmodells anbieten (Technology Push)?**

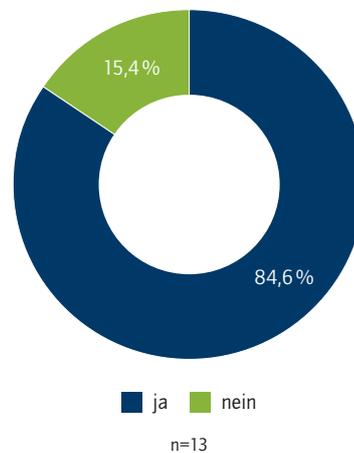


Quelle: eigene Darstellung

**Zukünftige Geschäftsmodelle**

Ein Großteil der befragten Technologieausrüster strebt in Zukunft neue Geschäftsmodelle an. Die Ergebnisse sind in Abbildung 44 dargestellt. Für die untersuchten Unternehmen werden zunehmend sogenannte Everything-as-a-Service-Modelle (XaaS) interessant. Zur Monetarisierung werden sowohl Leasing-Modelle als auch Subscription-Modelle oder Pay-per-Use-Ansätze erwogen. Häufig wurden in diesem Rahmen Software-as-a-Service (SaaS), Equipment-as-a-Service (EaaS) und Manufacturing-as-a-Service (MaaS) genannt.

**Abbildung 44: Streben Sie in Zukunft neue Geschäftsmodelle an?**



Quelle: eigene Darstellung

# Literatur

**Arnold et al. 2008**

Arnold, D./Isermann, H./Kuhn, A./Tempelmeier, H./Furmans, K.: *Handbuch Logistik*, Berlin/Heidelberg: Springer, 2008.

**Aurich et al. 2003**

Aurich, J.C./Barbian, P./Wagenknecht, C.: „Prozessmodule zur Gestaltung flexibilitätsgerechter Produktionssysteme“. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 98: 5, 2003, S. 214–218.

**Azab et al. 2013**

Azab, A./ElMaraghy, H./Nyhuis, P./Pachow-Frauenhofer, J./Schmidt, M.: „Mechanics of change: A framework to reconfigure manufacturing systems“. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6: 2, 2013, S. 110–119.

**Bandte 2007**

Bandte, H.: *Komplexität in Organisationen. Organisationstheoretische Betrachtungen und agentenbasierte Simulation*, Wiesbaden: Dt. Univ.-Verl., 2007.

**Baudzus/Krebs 2012**

Baudzus, B./Krebs, M.: „Manuelle Montageprozesse im wandlungsfähigen Produktionssystem“. Szenariobasierte Gestaltung rekonfigurierbarer Prozessmodule. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 107: 5, 2012, S. 344–348.

**Bauernhansl 2014a**

Bauernhansl, T.: „Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma“. In: Bauernhansl, T./Hompele, M. ten/Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Wiesbaden: Springer Fachmedien 2014, S. 5–35.

**Bauernhansl 2014b**

Bauernhansl, T.: „Automobilindustrie ohne Band und Takt – Forschungscampus ARENA2036“. In: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.): *23. Deutscher Materialfluss-Kongress: Mit Fachkonferenz Automobillogistik; TU München, Garching, 20. und 21. März 2014*, Düsseldorf: VDI-Verl. 2014, S. 269–276.

**Bauernhansl 2015**

Bauernhansl, T.: „Automotive industry without conveyer belt and cycle – research campus ARENA2036“. In: Bargende, M./Reuss, H.-C./Wiedemann, J. (Hrsg.): *15. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motortechnik*, Wiesbaden: Springer Vieweg 2015, S. 1145–1154.

**Baumberger 2007**

Baumberger, G.C.: *Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten*, München: Verl. Dr. Hut, 2007.

**Beuthner 2017**

Beuthner, A.: *Audi-A8-Montage: Jenseits eingefahrener Wege*, 2017. URL: [www.automobil-produktion.de/technik-produktion/produktionstechnik/audi-a8-montage-jenseits-eingefahrener-wege-126.html](http://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/produktionstechnik/audi-a8-montage-jenseits-eingefahrener-wege-126.html) [Stand: 10.02.2020].

**Brüggemann/Bremer 2020**

Brüggemann, H./Bremer, P.: *Grundlagen Qualitätsmanagement*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020.

**Büdenbender 1991**

Büdenbender, W.: *Ganzheitliche Produktionsplanung und -steuerung. Konzepte für Produktionsunternehmen mit kombinierter kundenanonymer und kundenbezogener Auftragsabwicklung*, Berlin/Heidelberg: Springer, 1991.

**Bullinger/Lung 1994**

Bullinger, H.-J./Lung, M.M.: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*, Stuttgart: Teubner, 1994.

**Cadena et al. 2016**

Cadena, C./Carlone, L./Carrillo, H. et al.: „Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age“. In: *IEEE Transactions on Robotics*, 32: 6, 2016, S. 1309–1332.

**Dangelmaier 2009**

Dangelmaier, W.: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschkralinen?*, Heidelberg: Springer, 2009.

**Eversheim 1996**

Eversheim, W.: *Organisation in der Produktionstechnik*, Düsseldorf: VDI-Verl., 1996.

**Foith-Förster et al. 2017**

Foith-Förster, P./Eising, J.-H./Bauernhansl, T.: „Effiziente Montagesysteme ohne Band und Takt“. Sind modulare Produktionsstrukturen eine konkurrenzfähige Alternative zur abgetakteten Linie? In: *wt Werkstattstechnik online*, 107: 3, 2017, S. 169–175.

**Foith-Förster/Bauernhansl 2016**

Foith-Förster, P./Bauernhansl, T.: „Changeable Assembly Systems Through Flexibly Linked Process Modules“. In: *Procedia CIRP*, 41, 2016, S. 230–235.

**Fraunhofer IPA 2021a**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Hrsg.): *Elemente eines resilienten Wertschöpfungssystems*, 2021. URL: [www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber\\_uns/Leitthemen/resiliente-wertschoepfung/elemente-eines-resilienten-wertschoepfungssystems.html](http://www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber_uns/Leitthemen/resiliente-wertschoepfung/elemente-eines-resilienten-wertschoepfungssystems.html) [Stand: 11.11.2021].

**Fraunhofer IPA 2021b**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA (Hrsg.): *Resiliente Wertschöpfung*, 2021. URL: [www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber\\_uns/Leitthemen/resiliente-wertschoepfung.html](http://www.ipa.fraunhofer.de/de/ueber_uns/Leitthemen/resiliente-wertschoepfung.html) [Stand: 11.11.2021].

**Frese 2014**

Frese, E.: „Organisationsstrukturen und Managementsysteme“. In: Eversheim, W./Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management „Betriebsstätte“*, Berlin/Heidelberg: Springer 2014, 3.1–3.93.

**Fries et al. 2021**

Fries, C./Fechter, M./Ranke, D. et al.: „Fluid Manufacturing Systems (FLMS)“. In: Weißgraeber, P./Heieck, F./Ackermann, C. (Hrsg.): *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application*, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg 2021, S. 37–44.

**Fries et al. 2020**

Fries, C./Wiendahl, H.-H./Foith-Förster, P.: „Planung zukünftiger Automobilproduktionen“. In: Bauernhansl, T./Fechter, M./Dietz, T. (Hrsg.): *Entwicklung, Aufbau und Demonstration einer wandlungsfähigen (Fahrzeug-) Forschungsproduktion*, Berlin: Springer Vieweg 2020, S. 19–43.

**Geisberger/Broy 2012**

Geisberger, E./Broy, M. (Hrsg.): „agendaCPS“. Integrierte Forschungsagenda Cyber-physical Systems, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2012.

**Göppert et al. 2018**

Göppert, A./Hüttemann, G./Jung, S./Grunert, D./Schmitt, R.: „Frei verkettete Montagesysteme“. Ein Ausblick. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 113: 3, 2018, S. 151–155.

**Greschke 2015**

Greschke, P.: *Matrix-Produktion als Konzept einer taktunabhängigen Fließfertigung*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2015.

**Greschke/Herrmann 2014**

Greschke, P./Herrmann, C.: „Das Humanpotenzial einer taktunabhängigen Montage“. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 109: 10, 2014, S. 687–690.

**Herkommer 2017**

Herkommer, G.: *Audi – Die Zukunft heißt ‚Modulare Montage‘*, 2017. URL: [www.computer-automation.de/feldebene/robotik/audi-die-zukunft-heisst-modulare-montage.138533.html](http://www.computer-automation.de/feldebene/robotik/audi-die-zukunft-heisst-modulare-montage.138533.html) [Stand: 10.02.2022].

**Hofmann et al. 2019**

Hofmann, C./Brakemeier, N./Krahe, C./Stricker, N./Lanza, G.: „The Impact of Routing and Operation Flexibility on the Performance of Matrix Production Compared to a Production Line“. In: Schmitt, R./Schuh, G. (Hrsg.): *Advances in Production Research*, Cham: Springer International Publishing 2019, S. 155–165.

**Hu 2013**

Hu, S.J.: „Evolving Paradigms of Manufacturing: From Mass Production to Mass Customization and Personalization“. In: *Procedia CIRP*, 7, 2013, S. 3–8.

**Huber 2018**

Huber, W.: *Industrie 4.0 kompakt – wie Technologien unsere Wirtschaft und unsere Unternehmen verändern. Transformation und Veränderung des gesamten Unternehmens*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.

**Jäger et al. 2014**

Jäger, J./Kluth, A./Schatz, A./Bauernhansl, T.: „Complexity Patterns in the Advanced Complexity Management of Value Networks“. In: *Procedia CIRP*, 17, 2014, S. 645–650.

**Kagermann et al. 2011**

Kagermann, H./Lukas, W.-D./Wahlster, W.: „Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution“. In: *VDI nachrichten*, 2011: 13, 2011, S. 2–3.

**Kern 2021**

Kern, W.: *Modulare Produktion. Methodik zur Gestaltung eines modularen Montagesystems für die variantenreiche Serienmontage im Automobilbau*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021.

**Kern et al. 2015**

Kern, W./Rusitschka, F./Kopytynski, W./Keckl, S./Bauernhansl, T.: „Alternatives to assembly line production in the automotive industry“. In: *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Production Research (IFPR)*, Manila 2015.

**Koren 2010**

Koren, Y.: *The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems*, Hoboken, N.J.: Wiley, 2010.

**KUKA AG 2020**

KUKA AG (Hrsg.): *Matrix-Produktion: ein Beispiel für Industrie 4.0*, 2020. URL: [www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2016/10solution-systems-matrix-produktion](http://www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2016/10solution-systems-matrix-produktion) [Stand: 10.02.2022].

**Küpper et al. 2018**

Küpper, D./Sieben, C./Kuhlmann, K./Lim, Y.H./Ahmad, J.: *Will Flexible-Cell Manufacturing Revolutionize Carmaking?*, 2018. URL: [www.bcg.com/de-de/publications/2018/flexible-cell-manufacturing-revolutionize-carmaking](http://www.bcg.com/de-de/publications/2018/flexible-cell-manufacturing-revolutionize-carmaking) [Stand: 15.04.2021].

**Lindemann/Baumberger 2006**

Lindemann, U./Baumberger, G.C.: „Individualisierte Produkte“. In: Lindemann, U./Reichwald, R./Zäh, M.F. (Hrsg.): *Individualisierte Produkte: Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*, Berlin/Heidelberg: Springer 2006, S. 7–16.

**Link/Hamann 2019**

Link, M./Hamann, K.: „Einsatz digitaler Assistenzsysteme in der Produktion“. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 114: 10, 2019, S. 683–687.

**Lödding 2001**

Lödding, H.: *Dezentrale bestandsorientierte Fertigungsregelung*, Düsseldorf: VDI-Verl., 2001.

**Lukesch/Kellner 2019**

Lukesch, M./Kellner, F.: *Übungsbuch Produktionswirtschaft*, Berlin/Heidelberg: Springer Gabler, 2019.

**Maritsch et al. 2015**

Maritsch, M./Kittl, C./Ebner, T.: „Sichere Vernetzung von Geräten in Smart Factories mit MQTT“. In: Weisbecker, A./Burmester, M./Schmidt, A. (Hrsg.): *Mensch und Computer 2015 – Workshopband*, Berlin: de Gruyter Oldenbourg 2015, S. 217–224.

**Monostori et al. 2016**

Monostori, L./Kádár, B./Bauernhansl, T. et al.: „Cyber-physical systems in manufacturing“. In: *CIRP Annals*, 65: 2, 2016, S. 621–641.

**Olcott/Mullen 2020**

Olcott, S./Mullen, C.: *Digital Twin Consortium Defines Digital Twin*, 2020. URL: <https://blog.digitaltwinconsortium.org/2020/12/digital-twin-consortium-defines-digital-twin.html> [Stand: 14.12.2021].

**OPC Foundation 2018**

OPC Foundation (Hrsg.): *OPC Unified Architecture. Interoperabilität für Industrie 4.0 und das Internet der Dinge*, 2018. URL: <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2017/11/OPC-UA-Interoperability-For-Industrie4-and-IoT-DE.pdf> [Stand: 20.01.2022].

**Pawellek 2016**

Pawellek, G.: *Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik*, Berlin/Heidelberg: Springer, 2016.

**Petersen 2005**

Petersen, T.: *Organisationsformen der Montage. Theoretische Grundlagen, Organisationsprinzipien und Gestaltungsansatz*, Aachen: Shaker, 2005.

**Poll 2016**

Poll, D.: *Das Ende des Fließbands*, 2016. URL: [www.produktion.de/technik/das-ende-des-fließbands-306.html](http://www.produktion.de/technik/das-ende-des-fließbands-306.html) [Stand: 10.02.2022].

**Ropohl 2009**

Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik*: KIT Scientific Publishing, 2009.

**Schomburg 1980**

Schomburg, E.: *Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau*, Diss., RWTH Aachen, 1980.

**Schwanager 1996**

Schwanager, M.: „Systemtheorie“. In: Kern, W. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*, Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1996, S. 1946–1960.

**Spath et al. 2014**

Spath, D./Weck, M./Seliger, G.: „Produktionssysteme“. In: Eversheim, W./Schuh, G. (Hrsg.): *Produktion und Management „Betriebshütte“*, Berlin/Heidelberg: Springer 2014, 10.1–10.34.

**Toni/Tonchia 1998**

Toni, A. de/Tonchia, S.: „Manufacturing flexibility: A literature review“. In: *International Journal of Production Research*, 36: 6, 1998, S. 1587–1617.

**Ulrich/Probst 1995**

Ulrich, H./Probst, G.J.B.: *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln. Ein Brevier für Führungskräfte*, Bern: Haupt, 1995.

**VDA 2022**

Verband der Automobilindustrie: *Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. VDA 5050, Version 2.0.0*, 2022. URL: [https://www.vda.de/dam/jcr:a059f08e-15ad-4d9e-b285-c0f657bada3c/VDA5050-V2\\_0\\_0-DE.pdf](https://www.vda.de/dam/jcr:a059f08e-15ad-4d9e-b285-c0f657bada3c/VDA5050-V2_0_0-DE.pdf) [Stand: 30.03.2022].

**VDI 2510 2005**

VDI 2510: *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2005.

**VDI 4499-Blatt 1 2008**

VDI 4499-Blatt 1: *Digitale Fabrik. Grundlagen*, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2008.

**VDI/VDE 2017**

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: *Industrie 4.0 – Begriffe/Terms*, 2017. URL: [www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/industrie-40-begriffeterms](http://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/industrie-40-begriffeterms) [Stand: 18.01.2022].

**Wannenwetsch 2014**

Wannenwetsch, H.: *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung*, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2014.

**Wiendahl 2020**

Wiendahl, H.-H.: „Auftragsmanagement“. In: Bauernhansl, T. (Hrsg.): *Fabrikbetriebslehre 1: Management in der Produktion*, Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg 2020, S. 193–294.

**Wiendahl et al. 2014a**

Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P.: „Funktionale Arbeitsbereichsgestaltung“. In: Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P. (Hrsg.): *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, München: Hanser 2014, S. 261–290.

**Wiendahl et al. 2014b**

Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P.: „Systematik der Veränderungsfähigkeit“. In: Wiendahl, H.-P./Reichardt, J./Nyhuis, P. (Hrsg.): *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, München: Hanser 2014, S. 117–150.

**Wöhe/Döring 2000**

Wöhe, G./Döring, U.: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, München: Vahlen, 2000.

**Zäh et al. 2005**

Zäh, M.F./Möller, N./Vogl, W.: „Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success?“. In: Zäh, M. (Hrsg.): *1<sup>st</sup> International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005)*, München: Utz 2005, S. 3–10.

# Mitglieder des Forschungsbeirats

## Vertreterinnen und Vertreter der Wissenschaft

**Prof. Reiner Anderl**, TU Darmstadt  
**Prof. Thomas Bauernhansl**, Universität Stuttgart / Fraunhofer IPA  
**Prof. Manfred Broy**, TU München  
**Prof. Angelika Bullinger-Hoffmann**, TU Chemnitz  
**Prof. Claudia Eckert**, TU München / Fraunhofer AISEC  
**Prof. Ulrich Epple**, RWTH Aachen  
**Prof. Alexander Fay**, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg  
**Prof. Jürgen Gausemeier**, Universität Paderborn  
**Prof. Hartmut Hirsch-Kreinsen**, TU Dortmund  
**Prof. Gerrit Hornung**, Universität Kassel  
**Prof. Gisela Lanza**, KIT – Karlsruher Institut für Technologie  
**Prof. Peter Liggesmeyer**, TU Kaiserslautern / Fraunhofer IESE  
**Prof. Wolfgang Nebel**, Universität Oldenburg / OFFIS  
**Prof. Sabine Pfeiffer**, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
**Prof. Frank Piller**, RWTH Aachen  
**Prof. Thomas Schildhauer**, Alexander von Humboldt Institut für Internet und Gesellschaft/Institute of Electronic Business  
**Prof. Rainer Stark**, TU Berlin  
**Prof. Michael ten Hompel**, TU Dortmund / Fraunhofer IML  
**Prof. Wolfgang Wahlster**, DFKI – Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

## Vertreterinnen und Vertreter der Industrie

**Klaus Bauer**, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG  
**Dr. Jan-Henning Fabian**, ABB AG  
**Dr. Ursula Frank**, Beckhoff Automation GmbH & Co. KG  
**Dr. Christina Franke**, Robert Bosch GmbH  
**Dietmar Goericke**, VDMA – Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e.V.  
**Prof. Torsten Kröger**, Intrinsic  
**Dr. Uwe Kubach**, SAP SE  
**Prof. Peter Post**, Festo AG & Co. KG  
**Dr. Harald Schöning**, Software AG  
**Dr. Georg von Wichert**, Siemens AG  
**Dr. André Walter**, Airbus Operations GmbH

