

FORSCHUNGSBEIRAT



Expertise des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0

Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen – Zusammenfassung

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 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 diese Erkenntnisse der deutschen Industrie zur Verfügung. Außerdem werden Handlungsoptionen für produzierende Unternehmen abgeleitet und anwendungsorientierte Forschungsbedarfe aufgezeigt.

Bereits realisierte cyber-physische Matrixproduktionssysteme konnten hauptsächlich in der Automobilindustrie, inklusive Zulieferer, und der Elektronik- und Halbleiterindustrie identifiziert werden. Die Einführung von Matrixproduktionssystemen erlaubt Änderungen im laufenden Betrieb, die mit vorherigen Systemen nicht möglich gewesen wären. Die analysierten Matrixproduktionssysteme gliedern sich in zwei Ausprägungen:

- **Software-definierte Matrixproduktionssysteme** besitzen modulare Strukturen und sind mit einer automatisierten, optimierten Prozesssteuerung ausgestattet. Sie 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. Häufig lösten cyber-physische Matrixproduktionssysteme starr verkettete Liniensysteme ab und zeigen einen hohen Standardisierungsgrad in der Anlagentechnik. Bei den meisten der in diesem Feld gefundenen Produktionssysteme handelt es sich um Montagesysteme.

Die Analyse der Technologieanbieter ergab, dass bereits für jedes Gestaltungsfeld einer Matrixproduktion **reife Standardlösungen** für deren Umsetzung am Markt verfügbar oder angekündigt sind.

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 Matrixproduktionssysteme 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 Hardware-Aspekt 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 sind.

Definitionen

Matrixproduktionssystem

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

Die Matrixproduktion, auch als „Modulare Montage“ oder „frei verkettetes Montagesystem“ bekannt, ist eine Ausprägung veränderungsfähiger Produktionssysteme. Ihr Potenzial schätzen Expertinnen und Experten als sehr hoch ein, wenn Schwankungen in der Produktionsmenge, wechselnde Produkteigenschaften und variierende Losgrößen die Auftragsbücher bestimmen. Noch bestehen Hürden, die die Umsetzung solcher cyber-physischen 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. In der Expertise wird daher, anhand eines Reifegradmodells, der aktuelle Umsetzungsstand ermittelt, um anschließend Handlungsoptionen abzuleiten.

Vergleich der Matrixproduktion mit anderen Organisationsformen der Fertigung

Tabelle 1 zeigt die Abgrenzung der Matrixproduktion zu anderen Organisationsformen der Fertigung. Dabei werden Kriterien der Gestaltung der Aufbauorganisation (Struktur), der Ablauforga-

nisation (Prozesse) sowie der produktbezogenen Einsatzbereiche (Markt) miteinander verglichen.

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	Betriebsmittel, Gebäudeinfrastruktur	Betriebsmittel, Gebäudeinfrastruktur	Betriebsmittel, Gebäudeinfrastruktur	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

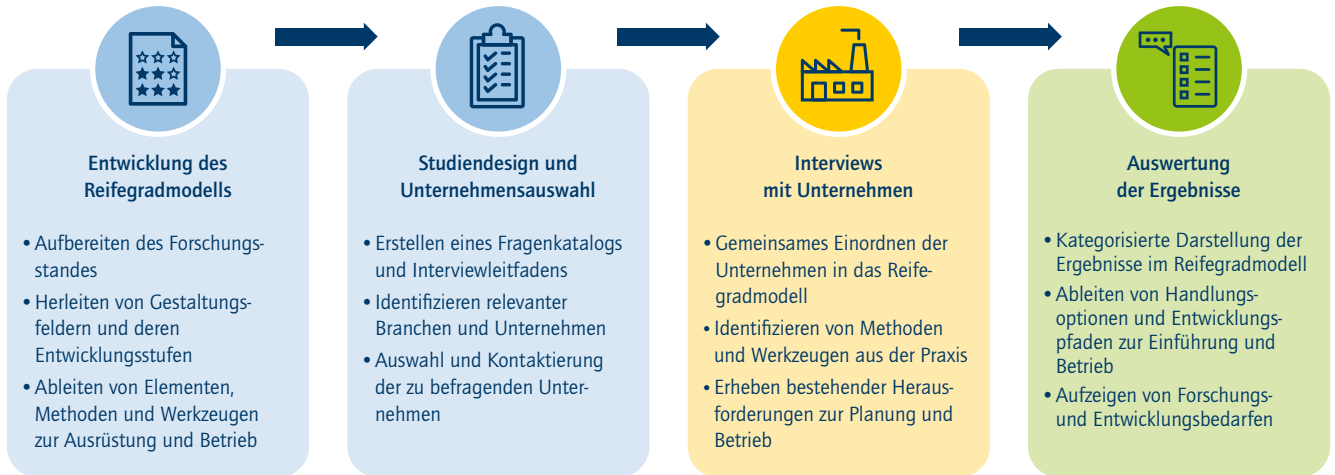
Quelle: eigene Darstellung, angelehnt an Wiendahl et al. 2014a, S. 277

Methodik zur Erstellung der Expertise

Die Expertise untersucht den Umsetzungsstand von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen nach einem Mixed-Methods-Ansatz. Der aktuelle Forschungsstand wurde in einem Reife-

gradmodell verdichtet, das die Grundlage für die Befragungen der Unternehmen und die Auswertung der Ergebnisse bildet (vgl. Abb. 1).

Abbildung 1: Methodisches Vorgehen



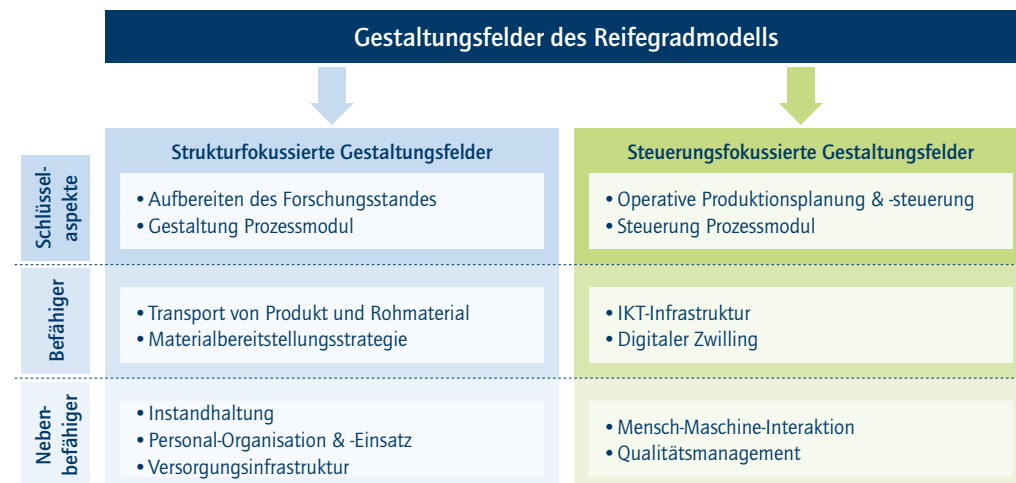
Quelle: eigene Darstellung

Reifegradmodell der Matrixproduktion

Um eine Bestandaufnahme des aktuellen Fortschrittgrads einer spezifischen Matrixproduktion unternehmen zu können, bedarf es einer Möglichkeit die untersuchten Anwendungsfälle innerhalb eines Systems einzuordnen. Das zentrale Werkzeug, um den Grad der Umsetzung einer Matrixproduktion in Unternehmen zu beurteilen, bildet hierfür ein für diese Expertise entwickeltes **Reifegradmodell**. Es dient der 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 2 zusammengefasst dargestellt.

Abbildung 2: Einordnung der Gestaltungsfelder des Reifegradmodells

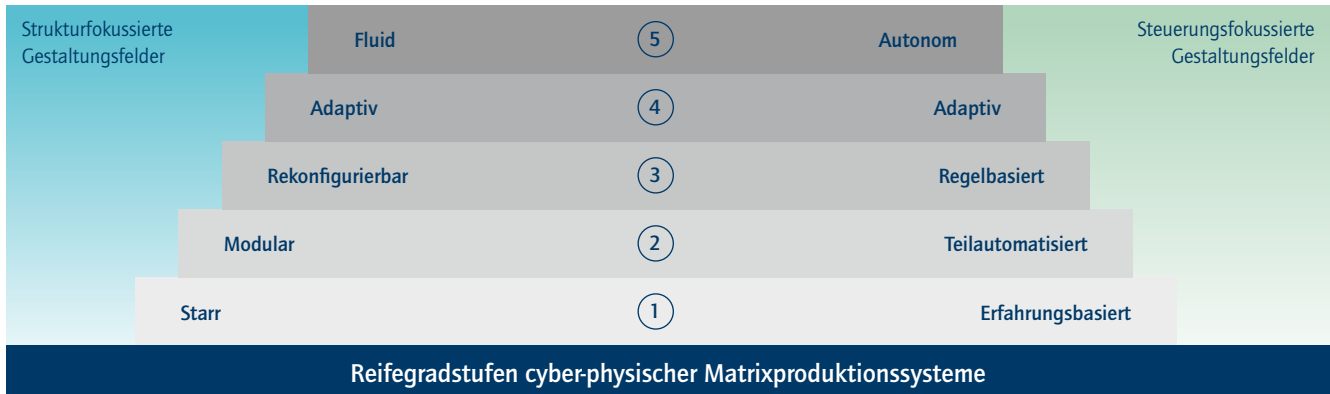


Quelle: eigene Darstellung

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.

Abbildung 3 zeigt die fünf Reifegradstufen in ihrer generischen Ausprägung nach Struktur und Steuerung. Die Begriffe für die Stufen vermitteln, welche Haupteigenschaften das Produktionssystem bei den struktur- beziehungsweise steuerungsfokussierten Gestaltungsfeldern hat. Je höher die erreichte Stufe, desto höher der Reifegrad des Matrixproduktionssystems.

Abbildung 3: Reifegradstufen



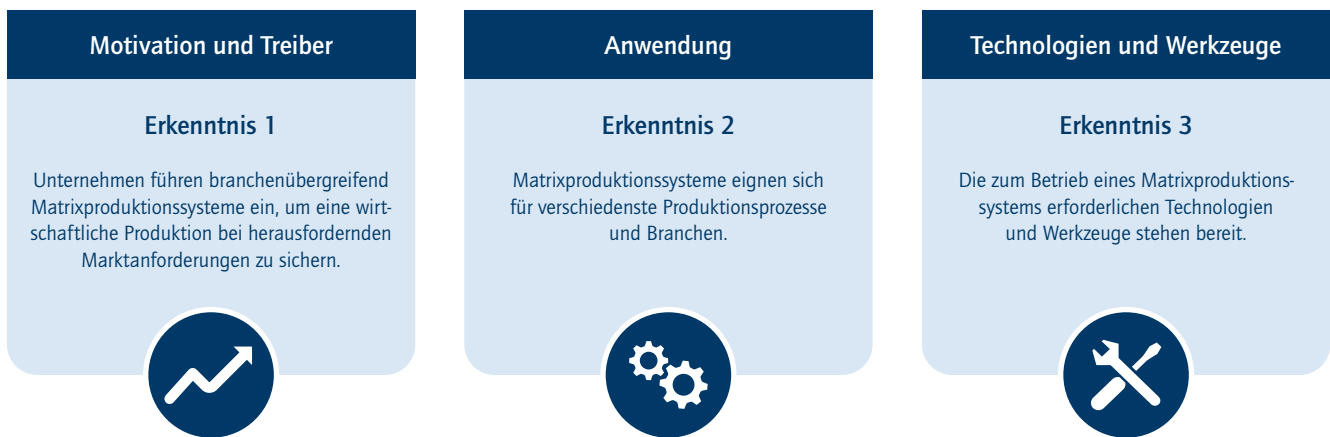
Quelle: eigene Darstellung

Ergebnisse der Befragung

Aus den Ergebnissen der Befragung lassen sich verschiedene Aspekte zur Verbreitung von Matrixproduktionssystemen, den Entwicklungspfaden, konkreten Einsatzszenarien und verfügbaren

Technologien sowie ihren Anbietern zusammenfassen. Die zentralen Erkenntnisse der Befragungen sind in Abbildung 4 zusammengefasst.

Abbildung 4: Haupterkenntnisse der Expertise

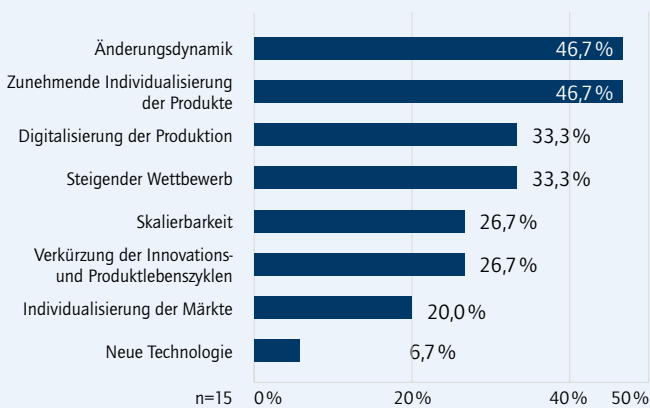


Quelle: eigene Darstellung

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. Die beiden folgenden Abbildungen verdeutlichen zum einen die Treiber, die

Abbildung 5: Welche Treiber haben die Unternehmen motiviert, eine Matrixproduktion einzuführen?



Quelle: eigene Darstellung

Motivationstreiber für die Einführung von Matrixproduktionssystemen sind vor allem die zunehmende Individualisierung von Produkten und die Bewältigung der Änderungsdynamik. Große Spreizungen der Bearbeitungszeiten und kaum prognostizierbare Produktionsprogramme sind mithilfe einer Matrixproduktion besser zu bewältigen.

Matrixproduktionssysteme sind vor allem in der Automobil-, Halbleiter- und Elektronikindustrie verbreitet. KMU sind hingegen kaum vertreten. Standardisierte Gestaltungs- und Umsetzungsmethoden könnten hier Abhilfe leisten, da sie lange Planungs- und Umsetzungsphasen umgehen würden, welche sich KMUs nicht leisten können.

Nahezu alle der benötigten Technologien sind mit einem hohen Reifegrad vorhanden. Lediglich bei standardisierten Systemen zur Produktionssteuerung sind Defizite zu erkennen.

Weiterer Handlungsbedarf besteht zudem in der Standardisierung von Technologien im Bereich der Prozessmodule und Transportsysteme. 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

Unternehmen zur Einführung von Matrixproduktionssystemen bewegt haben. Zum anderen zeigen sie die strategischen Unternehmensziele, die durch Matrixproduktionssysteme unterstützt werden.

Abbildung 6: Welche strategischen Unternehmensziele werden durch die Matrixproduktion unterstützt?



Quelle: eigene Darstellung

wirtschaftlichen Betrieb von Matrixproduktionssystemen gesehen werden kann. Aktuell gibt es keine Netzwerke zwischen Technologieanbietern, Betreibern sowie Forschungs- und Entwicklungsdienstleistern. Weiterhin fehlen zentrale Anlaufstellen, um sich dem Thema Matrixproduktion zu nähern und den Bekanntheitsgrad der Technologien und Systeme zu steigern.

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.

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, die detailliert in der Expertise dargestellt werden:

- Werkzeuge für die Gestaltung, Planung und Steuerung
- Einbindung des Menschen in Matrixproduktionssysteme
- Standardisierung
- Geschäftsmodelle
- Vernetzung

Schlussfolgerung

Insgesamt hat die Expertise gezeigt, dass Matrixproduktionssysteme in verschiedenen Produktionsprozessen und Branchen mit unterschiedlichen Reifegradstufen 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 cyber-physischen 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.

Abbildungen und Tabellen

Tabelle 1: Abgrenzung der cyber-physischen Matrixproduktion von klassischen Organisationsformen	2
Abbildung 1: Methodisches Vorgehen	3
Abbildung 2: Einordnung der Gestaltungsfelder des Reifegradmodells	3
Abbildung 3: Reifegradstufen	4
Abbildung 4: Hauptkenntnisse der Expertise	4
Abbildung 5: Welche Treiber haben die Unternehmen motiviert, eine Matrixproduktion einzuführen?	5
Abbildung 6: Welche strategischen Unternehmensziele werden durch die Matrixproduktion unterstützt?	5



Impressum

Herausgeber

Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 /
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 Gestal-
tung; groothuis.de

Bildnachweis

Getty Images/iStockphoto (yoh4nn)

Stand

Juli 2022