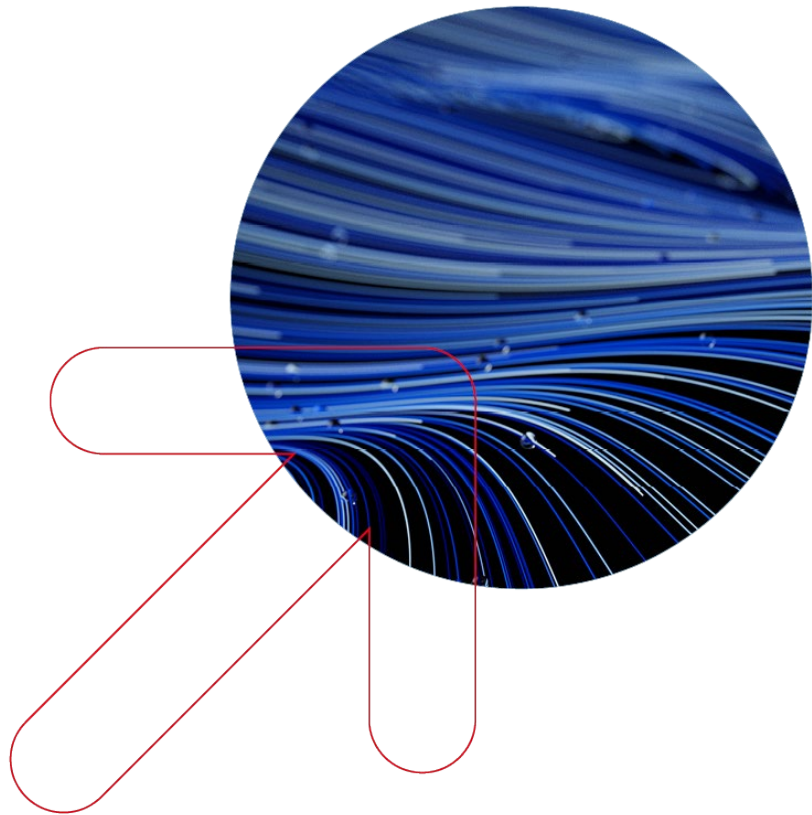


WIK • Diskussionsbeitrag

Nr. 521



Vernetzte Produktion – 360 Grad Überblick über die Perspektiven in KMU

Autorinnen und Autoren:

Katrin Bürger

Malte Roloff

Martin Lundborg

Marina Happ

Sebastian Tenbrock

Marie-Christin Papen



WIK

Wissenschaftliches Institut
für Infrastruktur und
Kommunikationsdienste

Bad Honnef, Dezember 2024

Impressum

WIK Wissenschaftliches Institut für
Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik.org
www.wik.org

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin und Direktorin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor, Verwaltungs- und Abteilungsleiter	Alex Kalevi Dieke
Direktor, Abteilungsleiter	Prof. Dr. Bernd Sörries
Abteilungsleiter	Dr. Christian Wemick
Abteilungsleiter	Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

Stand: Januar 2024

ISSN 1865-8997

Bildnachweis Titel: © Robert Kneschke - stock.adobe.com

Weitere Diskussionsbeiträge finden Sie hier:
<https://www.wik.org/veroeffentlichungen/diskussionsbeitraege>

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder. WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Zusammenfassung	V
Summary	VI
1 Einleitung	1
2 Definitive Grundlagen	4
3 Perspektiven der KMU in der vernetzten Produktion	5
3.1 Methodik der Literaturrecherche und Interviews	5
3.2 Ergebnisse der Expert:inneninterviews und der Literaturrecherche	7
3.2.1 Status quo	7
3.2.2 Bedarfe	9
3.2.3 Hemmnisse und Eintrittsbarrieren	11
3.3 Zwischenfazit	13
4 Das Periodensystem der vernetzten Produktion	15
4.1 Methodik zur Erstellung des Periodensystems	15
4.2 Übersicht über das Periodensystem der vernetzten Produktion	17
4.3 Organisatorische Readiness	18
4.3.1 Datenzugang (Dz)	18
4.3.2 Cybersicherheit (Cy)	19
4.3.3 Qualifikation (Qu)	20
4.4 Technische Readiness	21
4.4.1 Cyber-physische Systeme (CPS)	21
4.4.2 Datennetze (Dn)	22
4.4.3 Datenaustausch (Da)	23
4.4.4 Datenräume (Dr)	24
4.4.5 Digitaler Zwilling (DT)	26
4.5 Datendarstellung	27
4.5.1 Visualisierung (Vi)	27

4.5.2	Extended Reality (XR)	28
4.6	Datenverwertung	29
4.6.1	Predictive Quality (PQ)	30
4.6.2	Predictive Maintenance (PM)	30
4.6.3	Predictive Energy Consumption (PE)	30
4.6.4	Predictive Demand (PD)	30
4.6.5	Flexible Fertigungssysteme (FF)	31
4.6.6	Agile Produktionsprozesse (AP)	31
4.6.7	Automatisierte Anpassung (AA)	32
4.6.8	Kollaborative Roboter (KR)	32
4.6.9	Künstliche Intelligenz (KI)	33
4.7	Anwendungsfälle	34
5	Praxisbeispiele	36
5.1	Auswahl der Praxisbeispiele	36
5.2	Deskriptive Auswertung der ausgewählten Praxisbeispiele	37
5.3	Erweiterte Auswertung	42
5.4	Zwischenfazit	46
6	Schlussfolgerung und Ausblick	47
7	Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schaubild	16
Abbildung 2:	Das Periodensystem der vernetzten Produktion	18
Abbildung 3:	Verteilung der Praxisbeispiele in Deutschland	38
Abbildung 4:	Unternehmen der Praxisbeispiele nach Bundesländern (N=72)	38
Abbildung 5:	Zuordnung der Unternehmen zu den neuen (Ost) und den alten (West) Bundesländern (N=72)	39
Abbildung 6:	Größenklassen der Unternehmen (N=72)	40
Abbildung 7:	Technologiebereiche entsprechend der entwickelten Technologiesortierung	41

Abbildung 8:	Übersicht über Anteile der Reifegrade, die ein Unternehmen mindestens erreicht haben sollte, um die beschriebene Lösung zu implementieren. Reifegradeinschätzung basierend auf Reifegradmodell	42
Abbildung 9:	Verteilung der Elemente aus dem Bereich Datenverwertung der Periodensystems der vernetzten Produktion in den Praxisbeispielen	43
Abbildung 10:	Ausgewählte Praxisbeispiele zur Veranschaulichung der Bedarfe und Herausforderungen von KMU	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Struktur des Leitfadens	6
Tabelle 2:	Übersicht der betrachteten Studien	55
Tabelle 3:	Leitfadenentwurf der Expert:inneninterviews	55

Abkürzungsverzeichnis

AA	Automatisierte Anpassung
AAS	Asset Administration Shells
AP	Agile Produktionsprozesse
AR	Augmented Reality
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CPS	Cyber-physische Systeme
CRA	Cyber Resilience Act
DPP	Digitaler Produktpass
Dr	Datenräume
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung
DT	Digitaler Zwilling
ERP-System	Enterprise Resource Planning-System
FF	Flexible Fertigungssysteme
IDSA	International Data Spaces Association
IDS	International Data Spaces
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
KR	Kollaborative Roboter
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MR	Mixed Reality
MT	Manufacturing Technology
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PD	Predictive Demand
PE	Predictive Energy Consumption
RL	Reinforcement Learning
ROI	Return on Investment
TSN	Time Sensitive Networking
VR	Virtual Reality
XML	Extensible Markup Language
XR	Extended Reality

Zusammenfassung

Der Diskussionsbeitrag zur vernetzten Produktion in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) identifiziert die aktuellen Herausforderungen, Bedarfe und Perspektiven im Kontext der Digitalisierung von Produktionsprozessen und zeigt praxisnahe Lösungsansätze auf. Die Ergebnisse der Literaturrecherche und der Interviews verdeutlichen eine signifikante Diskrepanz zwischen der wahrgenommenen Relevanz und der tatsächlichen Implementierung von Produktionstechnologien. KMU haben erste Schritte in Richtung Digitalisierung unternommen, doch es fehlen oft Ressourcen, Fachwissen und infrastrukturelle Voraussetzungen, um diese Technologien umfassend zu integrieren. Die Bedarfsanalyse hebt zentrale Anforderungen wie die Integration bestehender Produktionssysteme in digitale Netzwerke, die Sicherstellung der Qualifikation von Fachkräften und die Gewährleistung der Datensicherheit hervor. Gleichzeitig werden finanzielle, technische und organisatorische Hemmnisse aufgezeigt, die durch fehlende Standardisierung und Unsicherheiten im Bereich der IT-Sicherheit verstärkt werden.

Für einen strukturierten Überblick der vernetzten Produktion wurde ein Periodensystem entwickelt, das vier Hauptbereiche unterscheidet: 1) organisatorische Readiness, 2) technische Readiness, 3) Datendarstellung und 4) Datenverwertung. Organisatorische Readiness umfasst Aspekte wie Datenzugang, Cybersicherheit und Qualifikation, während technische Readiness durch Elemente wie cyberphysische Systeme, Datennetze und digitale Zwillinge definiert wird. Sie bilden die Basis für eine erfolgreiche Umsetzung von vernetzten Produktionsprozessen. Der Bereich Datendarstellung beinhaltet die Elemente Visualisierung und Extended Reality, welche die Informationen für Mitarbeitende aufbereitet. Die Datenverwertung fokussiert die aktive Nutzung der erhobenen Daten mit Elementen wie Predictive Maintenance oder flexiblen Fertigungssystemen.

Die amtliche Statistik zeigt, dass im Jahr 2023 jedes vierte KMU erste Schritte in Richtung vernetzter Produktion unternommen hat, etwa durch die Analyse von Daten aus intelligenten Geräten und Sensoren. Dennoch bleibt die Umsetzung komplexer Konzepte wie die vernetzte, autonome Produktion noch begrenzt. Die Prognose für zukünftige Entwicklungen aus den Expert:inneninterviews ist ambivalent. Strukturelle und technologische Barrieren müssen noch überwunden werden. Gleichzeitig könnten der Wettbewerbsdruck und gesetzliche Vorgaben die Entwicklung beschleunigen.

Summary

The discussion paper on networked production in SMEs identifies the current challenges, needs and perspectives in the context of the digitalisation of production processes and presents practical solutions. The results of the literature research and interviews illustrate a significant discrepancy between the perceived relevance and the actual implementation of production technologies. SMEs have taken the first steps towards digitalisation, but often lack the resources, expertise and infrastructural requirements to fully integrate these technologies. The needs analysis emphasises key requirements such as integrating existing production systems into digital networks, ensuring the qualification of skilled workers and guaranteeing data security. At the same time, financial, technical and organisational obstacles are identified, which are exacerbated by a lack of standardisation and uncertainties in the area of IT security.

For a structured overview of networked production, a periodic table was developed that distinguishes between four main areas: 1) organisational readiness, 2) technical readiness, 3) data representation and 4) data utilisation. Organisational readiness includes aspects such as data access, cyber security and qualification, while technical readiness is defined by elements such as cyber-physical systems, data networks and digital twins. They form the basis for the successful implementation of networked production processes. The area of data presentation includes the elements of visualisation and extended reality, which presents the information to employees. Data utilisation focuses on the active use of the collected data with elements such as predictive maintenance or flexible manufacturing systems.

Official statistics show that by 2023, one in four SMEs will have taken their first steps towards networked production, for example by analysing data from smart devices and sensors. Nevertheless, the implementation of complex concepts such as networked, autonomous production is still limited. The forecast for future developments from the expert interviews is ambivalent. Structural and technological barriers still need to be overcome. At the same time, competitive pressure and legal requirements could accelerate development.

1 Einleitung

Durch die aktuellen Entwicklungen der Digitalisierung im Produktionsbereich steht die deutsche Industrie möglicherweise vor dem nächsten großen Innovationschritt. Mit Industrial Internet of Things (IIoT) werden physische Geräte und Sensoren in industriellen Umgebungen miteinander vernetzt, um Daten zu sammeln, zu analysieren und Anlagen zu steuern. IIoT ermöglicht es, Maschinen und Anlagen in Echtzeit zu überwachen, Wartungsbedarf vorherzusagen und die Steuerung zu automatisieren. Im Unterschied zum allgemeinen Internet of Things (IoT), das physische Objekte durch drahtgebundene und drahtlose Netzwerke miteinander verbindet, bezieht sich IIoT speziell auf komplexe industrielle Maschinen, die mit Sensoren und branchenspezifischer Software ausgestattet sind. Darüber hinaus umfasst IIoT häufig Mensch-Maschine-Schnittstellen, die einen fehlerfreien Betrieb unterstützen sollen.¹ IoT wird aktuell bereits verstärkt von deutschen Unternehmen genutzt.²

Im nächsten Entwicklungsschritt der Digitalisierung können Daten zwischen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette ausgetauscht werden, u.a. um den Digitalen Produktpass (DPP) zu implementieren und hierdurch den Informationspflichten des Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz nachzukommen sowie um die Beschaffung und das Qualitätsmanagement zu verbessern.

Damit der Datenaustausch zwischen den Akteuren skaliert und kosteneffizient implementiert werden kann, ist es erforderlich, Plattformen für den Austausch von Daten zu etablieren. Datenräume im Rahmen von Gaia-X und Catena-X sowie zukünftig Manufacturing-X sind Plattformen, die den sicheren Austausch und die gemeinsame Nutzung von Daten in verschiedenen Branchen ermöglichen. Diese Datenräume zeichnen sich durch hohe Sicherheits- und Datenschutzstandards aus und ermöglichen den Unternehmen, die Kontrolle über die eigenen Daten zu behalten. Sie bieten den Unternehmen eine Basis, ihre Daten effektiv zu nutzen, um Innovationen voranzutreiben und Wettbewerbsvorteile zu erzielen.

Ein effizienter Datenaustausch braucht Konzepte, Standards und Normen, um die Kompatibilität der auszutauschenden Daten verschiedener Unternehmen sicherzustellen. Die Verwaltungsschale beispielsweise ist ein standardisiertes Konzept, um Informationen über physische Objekte (z. B. Maschinen, Anlagen, Produkte) zu erfassen, zu verwalten und auszutauschen. Beispielsweise werden mit dem digitalen Produktpass zudem Standards für den Datenaustausch in Bezug auf Produkte erarbeitet.

¹ Karmakar et al., 2019

² In Deutschland nutzten 36% der Unternehmen mit 10 oder mehr Mitarbeitende IoT im Jahr 2021, 10,1% nutzen IoT in ihren Produktionsprozessen. Es wurden die aktuellsten vorliegenden Daten genutzt. Siehe Eurostat Data Browser (<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/fb89b035-9c3b-4ad9-bb67-1ec1309b249d?lang=en>)

Weil der Datenaustausch entlang der Wertschöpfungskette stattfindet, müssen sich auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) innerhalb der Kette aktiv am Datenaustausch beteiligen.³ Diese Notwendigkeit ist unter anderem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erkannt worden. Der Einbezug der KMU wird zum Beispiel im Förderkonzept für Manufacturing-X als explizite Bedingung identifiziert.⁴

Deutschland hat insgesamt einen hohen Anteil an KMU. Das produzierende Gewerbe bestand im Jahr 2022 aus 682.196 kleinen und mittleren Unternehmen. Das macht 98,8% der Unternehmen im produzierenden Gewerbe in Deutschland aus.⁵ KMU sind im Vergleich zu Großunternehmen weniger digitalisiert⁶ und lediglich 22% nutzen IoT in ihren Produktionsprozessen (Stand: Jahr 2021).⁷ Da KMU eine überwiegende Mehrheit in dem Wirtschaftsbereich ausmachen, erscheint es als essentiell, sie als Teil der Wertschöpfungskette nicht außer Acht zu lassen und die Hintergründe für den geringen Vernetzungsstand in der Produktion zu analysieren.

Dieses Forschungsprojekt untersucht den Status quo der vernetzten Produktion für KMU und gibt Einblicke in Anwendungsfälle. Ziel ist es, den aktuellen Stand zu erfassen, Herausforderungen zu identifizieren und Potenziale aufzuzeigen. Um diese Zielsetzung zu erreichen, werden folgende Forschungsfragen untersucht:

1. Was sind die Grundlagen in der vernetzten Produktion und welche Ansätze gibt es?
2. Welche spezifischen Bedarfe und Hemmnisse bestehen für KMU in der vernetzten Produktion?
3. Welche konkreten Anwendungsfälle gibt es in der vernetzten Produktion?
4. Welche Ausblicke können für die Zukunft der vernetzten Produktion in KMU identifiziert werden?

Zu Beginn werden die definitorischen Grundlagen vorgestellt. Anschließend wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, bei der relevante Studien und Berichte zur Digitalisierung und zur vernetzten Produktion in KMU analysiert werden. Diese Untersuchung liefert Erkenntnisse über den Status quo sowie über die Bedarfe und Hemmnisse, die KMU in diesem Bereich erleben. Ergänzt wird diese Analyse durch Interviews mit neun Fachexpert:innen aus Forschung und Förderinitiativen, die im Bereich der vernetzten Produktion tätig sind. Diese Gespräche ermöglichen es, praxisnahe Einblicke zu gewinnen und die theoretischen Erkenntnisse aus der Literatur mit Erfahrungen aus der Praxis abzugleichen.

³ Laut Definition der Europäischen Kommission ist zählt ein Unternehmen als KMU, wenn es einen Jahresumsatz von höchstens 50 Millionen Euro erwirtschaftet und maximal 249 Mitarbeitende beschäftigt. Vgl. IfM Bonn, 2024b

⁴ Vgl. BMWK, 2023

⁵ Vgl. IfM Bonn, 2024

⁶ Vgl. Büchel et al., 2024

⁷ Destatis, 2024

Auf Basis der gesammelten Erkenntnisse wird im nächsten Schritt ein strukturiertes Modell entwickelt, das als Periodensystem der vernetzten Produktion bezeichnet wird. Dieses Modell systematisiert die verschiedenen Bestandteile und Ansätze der vernetzten Produktion und bietet einen klaren Rahmen, um die unterschiedlichen Aspekte dieser Thematik strukturiert darzustellen. Das Periodensystem der vernetzten Produktion wird ausführlich in Kapitel 3 beschrieben.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts werden Anwendungsbeispiele aus der Praxis gesammelt und analysiert. Diese Beispiele veranschaulichen, wie digitale Technologien in KMU implementiert wurden und welche Erfolge dabei erzielt werden konnten. Durch die Analyse der Praxisbeispiele wird nicht nur überprüft, inwieweit sich die Erkenntnisse aus der Literatur und den Expert:inneninterviews in den Anwendungen widerspiegeln, sondern auch die praktische Relevanz des entwickelten Periodensystems validiert. Kapitel 4 widmet sich diesen Anwendungsfällen und zeigt auf, wie die einzelnen Elemente des Periodensystems in der Praxis umgesetzt werden.

In Kapitel 5 werden die Erkenntnisse abschließend zusammengebracht und die Bedeutung und Potenziale der vernetzten Produktion für KMU bewertet.

2 Definitiorische Grundlagen

Eine genaue Definition des Begriffs der vernetzten Produktion existiert nicht, sie wird in vergangenen Studien häufig als Grundlage der Industrie 4.0 bezeichnet.⁸ Im Rahmen von Industrie 4.0 strebt die vernetzte Produktion eine vollständige digitale Integration von Wertschöpfungsketten an, in der nicht nur Maschinen und Produkte, sondern auch das gesamte Produktionsumfeld miteinander kommunizieren und autonom optimieren kann.⁹ Dieser Ansatz beruht auf der Technologie der Cyber-Physischen Systeme (CPS), die physische Objekte mit digitaler Intelligenz verbindet, sowie auf IoT, das Geräte miteinander kommunizieren lässt. Als Arbeitsdefinition nutzen wir die folgende Formulierung: Vernetzte Produktion bezeichnet den Einsatz digitaler Technologien zur Integration und Vernetzung von Maschinen, Geräten, Produktionsanlagen und Menschen in der Fertigung. Ziel ist die Schaffung eines intelligenten, flexiblen und automatisierten Produktionssystems, das auf Echtzeitdaten zugreift und eigenständig Entscheidungen treffen kann, um Produktionsprozesse zu optimieren.¹⁰ Die Vernetzung in der Produktion umfasst entsprechend nicht nur die technischen Komponenten, sondern auch Prozesse und Geschäftsmodelle, die durch die digitale Transformation ermöglicht werden. So kann Konnektivität als neues, digitales Geschäftsmodell Möglichkeiten im Bereich der vorausschauenden Wartung bieten, beispielsweise durch einen Remote-Service.¹¹ Damit kann die vernetzte Produktion ein entscheidender Faktor für Effizienzsteigerungen und eine anpassungsfähige Fertigung sein. Diese Technologien bieten Unternehmen die Chance, ihre Produktionskosten zu senken, die Qualität zu steigern und auf Marktveränderungen schneller zu reagieren.¹²

Das vorliegende Forschungsprojekt stellt KMU in den Fokus. KMU zeichnen sich durch ihre relative Flexibilität und Innovationsfähigkeit aus, sind jedoch oft durch begrenzte Ressourcen und eine geringere Digitalisierung im Vergleich zu großen Unternehmen gekennzeichnet.¹³ Laut der Europäischen Kommission gelten Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von höchstens 50 Millionen Euro als KMU.¹⁴ Diese Unternehmen haben oft nicht die Ressourcen, um umfangreiche digitale Transformationsprozesse in kurzer Zeit umzusetzen, profitieren jedoch stark von gezielten Fördermaßnahmen und der Anpassung digitaler Lösungen an ihre spezifischen Bedürfnisse.¹⁵

⁸ Vgl. Klocke et al., 2017

⁹ Vgl. Kies et al., 2024

¹⁰ Die Arbeitsdefinition orientiert sich an den Beschreibungen aus den Studien Schuh et al., 2017, Münsterland, 2022 Seite 2 und Kies et al., 2024

¹¹ Vgl. Industrie-Wegweiser, 2024

¹² Vgl. Hermann et al., 2016

¹³ Vgl. Papen et al., 2022

¹⁴ Vgl. Europäische Kommission, 2003

¹⁵ Vgl. KfW, 2024

3 Perspektiven der KMU in der vernetzten Produktion

Das nachfolgende Kapitel gibt einen Überblick zum aktuellen Stand der Literatur der vernetzten Produktion mit einem besonderen Augenmerk auf KMU. Es wurde im ersten Schritt eine Literaturrecherche zu dem aktuellen Stand, den Bedarfen sowie den Herausforderungen der vernetzten Produktion durchgeführt (Forschungsfrage 1). Im zweiten Schritt wurden die zentralen Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Expert:inneninterviews zusammengeführt, um praxisnahe und aktuelle Informationen der Expert:innen zu berücksichtigen. Aus der Gegenüberstellung von Literatur und Praxis lassen sich übergeordnete Erkenntnisse ableiten (Forschungsfrage 2).

3.1 Methodik der Literaturrecherche und Interviews

Um einen umfassenden Überblick über den Stand der vernetzten Produktion in KMU zu erlangen, wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Dazu wurden neben amtlichen Statistiken wie Destatis und Eurostat, Veröffentlichungen mit dem Fokus auf vernetzte Produktion und Industrie 4.0 herangezogen. Hierbei lag der Schwerpunkt auf deutschsprachigen Publikationen sowie der Unterscheidung von Unternehmensgrößen (KMU und Großunternehmen). Tabelle 2 im Anhang illustriert die relevanten Studien, welche für die Literaturrecherche verwendet wurden.

Die Erkenntnisse aus den Studien werden in Kapitel 3.2 vorgestellt. Dabei werden die Erkenntnisse aus der Literatur mit den Ergebnissen der Expert:inneninterviews kombiniert, um Redundanzen zu vermeiden. Die kombinierte Betrachtung aus Literatur und Expert:inneninterviews ermöglicht einen umfassenden Blick für die jeweiligen Bereiche des Status Quo, der Bedarfe sowie den Herausforderungen von KMU.

Für die Untersuchung zur vernetzten Produktion in KMU wurden insgesamt neun Interviews mit Expert:innen aus Förderinitiativen und der Forschung durchgeführt. Die Interviews fanden im Zeitraum Juli 2024 bis Oktober 2024 statt. Einige der Befragten haben einen speziellen Fokus auf Datenräume. Der überwiegende Teil der Expert:innen hat regelmäßig direkten Kontakt zu KMU. Die Erhebung erfolgte mithilfe teilstrukturierter, leitfadengestützter Interviews.¹⁶

¹⁶ Der detaillierte Leitfaden ist im Anhang in Tabelle 3 einsehbar.

Tabelle 1: Struktur des Leitfadens

Nummer	Thema der Frage	Methodik
0a	Begrüßung / Information	-
0b	Information zum Hintergrund des Projektes bzw. zum Forschungsprogramm	-
1	Kurze Vorstellung durch den Interviewpartner	Offene Frage
2	Einschätzung zur aktuellen Lage der vernetzten Produktion	Likert-Skala
3	Einschätzung des Potenzials der vernetzten Produktion	Likert-Skala
4	Bewertung der Bedarfe aus der Literatur	Likert-Skala
5	Bewertung der Herausforderungen aus der Literatur	Likert-Skala
6	Erfahrungsberichte aus der Praxis	Offene Frage
7	Entwicklung in den nächsten 10 Jahren	Offene Frage
0c	Ende / Verabschiedung	-

Die Konzeption des Leitfadens beinhaltete sowohl offene Fragen als auch strukturierte Skalenfragen. Skalenfragen ermöglichen eine Vergleichbarkeit zwischen den Interviewenden und auch offene Fragen sind notwendig, um tiefere Einblicke in die Expertise und Erfahrungen zu erhalten. Es handelt sich um eine qualitative Expert:innenbefragung, die entsprechend nicht das Ziel hat, eine repräsentative Stichprobe abzubilden.

Die Befragungen waren wie folgt aufgebaut: Die Expert:innen wurden zunächst gebeten, ihre Rolle und ihre Erfahrungen im Bereich der vernetzten Produktion vorzustellen. Anschließend wurde die Bedeutung der vernetzten Produktion im Mittelstand auf einer Likert-Skala von 1 (gar nicht relevant) bis 10 (sehr relevant) bewertet, sowohl im aktuellen Zustand als auch in der idealen Zukunft.

Daraufhin wurden die Expert:innen gebeten, die spezifischen Bedarfe und Herausforderungen in KMU ebenfalls anhand der vorgegebenen Skala zu bewerten. Zu den abgefragten Bedarfen zählten unter anderem die Modernisierung von Bestandsanlagen, die Verbesserung administrativer Rahmenbedingungen sowie die Kompetenzentwicklung für Führungskräfte und Mitarbeitende. Herausforderungen wie Fachkräftemangel, mangelnde Standardisierung und Defizite in der IT-Sicherheit wurden ebenfalls erörtert. Die einzelnen Befragungspunkte zu den Bedarfen und Herausforderungen sind das Resultat der vorangegangenen Literaturrecherche. Hierbei wurde der überwiegende Fokus auf Literatur mit Bezug zu KMU gelegt.

Zudem wurden die Expert:innen gefragt, ob es zusätzliche Bedarfe oder Hemmnisse gibt, die in den vorherigen Fragen nicht erfasst wurden. So wurde sichergestellt, dass wichtige Punkte im Interview Berücksichtigung finden. Die Expert:innen wurden nach ihren persönlichen Erfahrungen mit Unternehmen gefragt, die Bestrebungen im Bereich der vernetzten Produktion unternommen haben. Diese Erfahrungen zeigen exemplarisch das Vorgehen der Unternehmen und welche Bedarfe und Herausforderungen bei der

Implementierung je nach Branche vorhanden sind. Die abschließende Frage konzentrierte sich auf die Einschätzung zur zukünftigen Bedeutung und den potenziellen Treibern der vernetzten Produktion.¹⁷

3.2 Ergebnisse der Expert:inneninterviews und der Literaturrecherche

3.2.1 Status quo

Da keine einheitliche Definition des Begriffs der vernetzten Produktion existiert (siehe Kapitel 0), ist auch der aktuelle Stand in KMU nur schwer einheitlich bestimmbar. In den untersuchten Studien beziehen sich die quantitativen Erhebungen zum Stand der Implementierung auf den Begriff der Industrie 4.0 oder einzelnen Technologiebestandteilen der vernetzten Produktion.

Im Jahr 2022 halten 64% der Industrieunternehmen die Anpassung von Geschäftsprozessen bzw. betrieblichen Abläufen im Rahmen der Digitalisierung für eine wichtige Wettbewerbsstrategie.¹⁸ In einer Befragung des Bitkom aus dem Jahr 2021 stimmen 91% der Befragten der Aussage zu, dass Industrie 4.0 die Voraussetzung für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie ist. Laut der Studie nutzen 62% der Industrieunternehmen bereits spezielle Anwendungen für Industrie 4.0. Trotzdem sehen sich knapp zwei Drittel als Nachzügler in der Digitalisierung.¹⁹

Einerseits haben viele KMU erkannt, dass Industrie 4.0 mit der digitalen Vernetzung von Systemen und intelligenten, flexiblen Fertigungsprozessen an Relevanz gewinnt.²⁰ Andererseits stehen sie vor erheblichen Herausforderungen bei der Umsetzung dieser Technologien. In unserer Expert:innenbefragung gaben alle Befragten eine Diskrepanz zwischen dem aktuellen Status Quo und der persönlichen Einschätzung zur Relevanz von vernetzter Produktion in deutschen KMU an. Auf einer Likert-Skala von 1 bis 10 bewerten die Expert:innen die Status quo im Durchschnitt mit dem Wert 4,9 und die Relevanz mit dem Wert 8,7.²¹

In der Literatur wird deutlich, dass bereits jedes zweite KMU erste Schritte in Richtung der vernetzten Produktion unternommen hat, etwa durch die Nutzung von ERP-

¹⁷ Für jedes Interview wurde ein Gesprächsprotokoll, konsolidiert aus den Gesprächsnotizen und der Transkription der Interviews, erstellt. Bei der Auswertung wurde wie folgt vorgegangen: Zu jeder Frage wurden die Antworten aller Expert:innen gegenübergestellt. Es wurde untersucht, ob die Expert:innen in ihrer Meinung konsistent sind, es zwei konträre Meinungen gibt oder es Einzelstimmen gibt, die abweichen. Diese Strukturierung wurde dann um die Erläuterungen der Expert:innen ergänzt, sodass ein Stimmungsbild mit weiterführenden Informationen erarbeitet werden konnte.

¹⁸ Vgl. Bitkom, 2022

¹⁹ Vgl. Bitkom, 2024. Es wurden sowohl KMU als auch Großunternehmen aus der Industrie befragt.

²⁰ Vgl. Becker et al., 2017

²¹ In den Expert:inneninterviews haben fünf von neun Befragten eine quantitative Bewertung in Form der Likert-Skala abgegeben.

Systemen.²² Dennoch bleiben viele Unternehmen hinter den Möglichkeiten, die vernetzte Produktionstechnologien bieten, da sie oft nicht über die notwendigen Ressourcen oder das Wissen verfügen, um diese Technologien vollständig zu integrieren.²³ Elementare Voraussetzungen der Readiness für eine vernetzte Produktion wie Qualifikation und Schulungen oder die IoT Infrastruktur sind nicht oder nicht umfänglich in den Unternehmen umgesetzt. So liegt im Jahr 2021 der Einsatz von IoT-Geräten in Produktionsprozessen in KMU bei 5,1%. Bei Großunternehmen hingegen ist der Einsatz mit 15,9% deutlich stärker verbreitet.²⁴

Insbesondere Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau haben Fortschritte in der Digitalisierung gemacht, stehen jedoch immer noch vor der Herausforderung, ihre Systeme zu vernetzen und ihre Daten sinnvoll zu integrieren.²⁵ Als wesentliches Hindernis wird die fehlende Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen und Maschinen genannt, was zu ineffizienten Arbeitsabläufen und höheren Kosten führt. Interoperabilität ermöglicht es, Wertschöpfungssysteme im Sinne der Industrie 4.0 zukunftsfähig zu machen und das Zusammenwirken heterogener Systeme zu ermöglichen.²⁶

Darüber hinaus haben KMU Schwierigkeiten, die notwendigen Investitionen in digitale Technologien zu tätigen.²⁷ Dies wird durch eine Kombination aus begrenzten finanziellen Ressourcen und Unsicherheiten über den Nutzen und die langfristige Tragfähigkeit der Technologien verstärkt.

Nach der Einschätzung der befragten Expert:innen hat die vernetzte Produktion im Mittelstand aktuell eine moderate bis begrenzte Bedeutung, abhängig von Branche und Unternehmensgröße.²⁸ Die Befragten sind sich einig, dass viele KMU die potenziellen Vorteile kennen, jedoch durch strukturelle und finanzielle Hemmnisse eingeschränkt sind. Besonders wichtig erscheinen infrastrukturelle Investitionen, strategische Orientierung und eine gezielte Förderung des Wissenstransfers. Die Umsetzung bleibt für viele Unternehmen eine Herausforderung und wird primär in Branchen mit starkem Wettbewerbs- und Innovationsdruck oder in größeren Unternehmen ausgeführt.

Obwohl der Erfolg der digitalen Transformation in KMU stark von der Schaffung sicherer und vertrauenswürdiger Datenökosysteme abhängt,²⁹ haben viele KMU Bedenken hinsichtlich der Datensicherheit und fürchten, dass sie die Kontrolle über ihre sensiblen Daten verlieren könnten.³⁰ Diese Bedenken werden durch die Ergebnisse der Fraunhofer IPA-Studie bestätigt, die darauf hinweist, dass die Akzeptanz vernetzter

22 Im Jahr 2023 nutzen 23% der Kleinstunternehmen (1-9 Beschäftigte), 51% der Kleinunternehmen (10-49 Beschäftigte) und 85% der mittelständischen Unternehmen eine ERP-Software. Vgl. Destatis, 2024

23 Vgl. Mesloh, 2021, S. 464 und Sauer et al., 2023 S.31

24 Destatis, 2024

25 Vgl. Anderl, 2015

26 Vgl. Drath et al., 2023

27 Vgl. Ludwig et al., 2016

28 Sechs Expert:innen bewerten die Frage „Von 1-10 welche Bedeutung hat vernetzte Produktion im Mittelstand aktuell?“ mit Werten zwischen 3 und 6 auf einer Likert-Skala von 1 bis 10.

29 Vgl. Waseem et al.

30 Vgl. Becker et al., 2017

Produktionssysteme in KMU auch von der Bereitstellung klarer und einfach zu implementierender Standards abhängt.³¹

Während zwei Expert:innen eine vollständige Implementierung vernetzter Produktion befürworten, betonen andere die Notwendigkeit einer pragmatischen, schrittweisen Umsetzung, die auf die spezifischen Herausforderungen von KMU eingeht. Wesentlich für die Erreichung dieser Ziele sind Effizienzsteigerungen durch Digitalisierung, die Förderung des Datenmanagements und eine strategische Integration, die sowohl administrative Prozesse vereinfacht als auch die Wettbewerbsfähigkeit sichert. Die Digitalisierung solle dabei nicht nur als technologische, sondern auch als prozessuale und kulturelle Transformation verstanden werden, die nachhaltiges und ökologisches Handeln erleichtert und den Unternehmen hilft, auf die Herausforderungen von Fachkräftemangel und regulatorischen Anforderungen besser zu reagieren.

3.2.2 Bedarfe

Die spezifischen Bedarfe der KMU im Bereich der vernetzten Produktion konzentrieren sich auf mehrere Schlüsselbereiche. Ein vorrangiger Bedarf liegt in der Integration bestehender Produktionssysteme in digitale Netzwerke, um die Effizienz und Flexibilität der Produktionsabläufe zu steigern. So kann die Schaffung modularer und skalierbarer Lösungen entscheidend sein, um KMU den Einstieg in die vernetzte Produktion zu erleichtern.³² Diese Lösungen müssen flexibel genug sein, um an die spezifischen Bedürfnisse der KMU angepasst werden zu können und gleichzeitig die Komplexität und Kosten reduzieren.

Mit einem durchschnittlichen Relevanzwert von 8,8 laut den befragten Expert:innen wird die Modernisierung von Bestandsanlagen als äußerst wichtig eingeschätzt.³³ Demnach bestehen die Haupthindernisse in hohen Kosten und einem unklaren ökonomischen Nutzen. KMU betrachten die Modernisierung als entscheidend für ihre Prozesse und benötigen klare ROI-Darstellungen (Return on Investment). Eine spezifische Maßnahme, die zwei Expert:innen vorgeschlagen haben, ist es vernetzte Produktion nicht als Einzelprojekt zu betrachten. Es solle auch eine gut durchdachte Datenstrategie im Unternehmen entwickelt werden und eine funktionierende Interoperabilität für eine effiziente und automatisierte Integration vorhanden sein. Es müsste demnach möglich sein, dass unterschiedlich programmierte Maschinen über Schnittstellen ohne weitere Hürden miteinander kommunizieren können.

Ein weiterer wesentlicher Bedarf liegt im Bereich der Datensicherheit. Die Bitkom-Befragung³⁴ hebt hervor, dass viele KMU Bedenken hinsichtlich der Sicherheit ihrer Daten haben, insbesondere wenn es um die Verknüpfung von Produktionssystemen mit

³¹ Vgl. Müller et al., 2016

³² Ebd.

³³ Sechs Expert:innen haben auf einer Skala von 1 bis 10 im Schnitt eine Bewertung von 8,8 abgegeben.

³⁴ Vgl. Bitkom, 2023, Folie 8

externen Netzwerken geht. In einer repräsentativen Erhebung aus 2017 benennen 48% der befragten KMU Datensicherheit als größte Herausforderung.³⁵ Um das Vertrauen in vernetzte Produktionssysteme zu stärken, benötigen KMU robuste Sicherheitslösungen, die den Schutz sensibler Unternehmensdaten gewährleisten.

KMU haben einen hohen Bedarf an qualifiziertem Personal, das nicht nur über technisches Wissen, sondern auch über die Fähigkeit verfügt, digitale Transformationsprozesse zu leiten.³⁶ Die Ausbildung und Weiterbildung von Mitarbeitenden im Bereich der digitalen Technologien wird daher als eine der größten Herausforderungen angesehen.³⁷ Dies wird durch die Ergebnisse aus der Literaturrecherche³⁸ bestätigt, die darauf hinweist, dass KMU Schwierigkeiten haben, die notwendigen Schulungsprogramme und Ressourcen bereitzustellen, um ihre Mitarbeitende auf die Anforderungen der vernetzten Produktion vorzubereiten. Die Expert:innen aus der Interviewbefragungen bekräftigen die Literaturergebnisse. Den Bedarf an Kompetenzentwicklung schätzen sie auf einer Likert-Skala von 1 bis 10 im Schnitt mit 7,6 (N=5) ein und wird somit im Schnitt als wichtig eingestuft.

Zwei Expert:innen sehen ergänzende Bedarfe in der Sensibilisierung zu den Potenzialen der Daten und dem Verständnis in digitalen Technologien, welche durch Schulungen oder Weiterbildungsmaßnahmen gefördert werden können.³⁹ Ein Experte spricht sich für gezielte Migration aus, um den wachsenden Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften zu decken. Neben neuen Fachkräften ist auch der Ausbau der Fachkompetenzen beim bestehenden Personal für eine Produktionssteigerung wichtig. Zwei weitere Befragte sehen die Kompetenzentwicklung darin, neben dem grundlegenden Verständnis für IT-Systeme und Technologien auch externe Personen einzubinden. Sie sehen einen verstärkten Bedarf im Aufbau von Partnerschaften und Netzwerken, um auch externes Know-How für ihr Unternehmen zu nutzen.

Neben den Bedarfen auf der technischen Seite findet sich in KMU das Interesse an verbesserten administrativen Rahmenbedingungen von Förderprojekten.⁴⁰ Die Einschätzung der Expert:innen ist hier zweigeteilt. Während die eine Hälfte eine hohe Relevanz in dem Bedarf sieht, misst die andere Hälfte dem Aspekt keine hohe Gewichtung bei. Die Expert:innen sehen administrativen Prozesse nur indirekt beeinflusst und nennen die Mehrarbeit durch die Administration als vorgeschobenen Grund der Unternehmen, um ihre Produktionsprozesse nicht zu vernetzen. Der andere Blickwinkel sieht die administrativen Rahmenbedingungen für die KMU als zu komplex und führt rechtliche

³⁵ Vgl. Becker et al., 2017

³⁶ Vgl. Saam et al., 2016

³⁷ Vgl. Becker et al., 2017

³⁸ Vgl. Fraunhofer IPK, 2024 und Ludwig et al., 2016

³⁹ Im Expert:innen wurden neben der Bewertung der identifizierten Bedarfe auch um eine kurze Erläuterung ihrer Einschätzung gebeten.

⁴⁰ Vgl. Fichtelpeter, 2019

Unsicherheit bei begrenzten Ressourcen im Unternehmen an. Konkreter wurde hier der Bedarf an zielgruppengerechter Kommunikation und Entbürokratisierung genannt.

3.2.3 Hemmnisse und Eintrittsbarrieren

Trotz des wachsenden Bewusstseins für die Bedeutung der Digitalisierung stehen KMU laut den befragten Expert:innen vor erheblichen Hemmnissen und Eintrittsbarrieren bei der Umsetzung vernetzter Produktionssysteme.

Ein bedeutendes Hemmnis für KMU ist nach Einschätzung der befragten Expert:innen die fehlende Standardisierung und Interoperabilität der Technologien. Demnach sind Standards wichtig, doch viele Unternehmen würden den finanziellen Mehrwert vernetzter Produktion nicht unmittelbar erkennen. Die Interviews verdeutlichen außerdem, dass Vertrauen in einen sicheren Datenaustausch eine entscheidende Rolle spielt. Normen und Standards sollen demnach nicht nur Transparenz schaffen, sondern auch das Vertrauen der Unternehmen in die Technologien der vernetzten Produktion fördern. Die Expert:innen betonen, dass eine enge Verzahnung mit Initiativen wie Gaia-X, Manufacturing-X und Catena-X notwendig ist, um verlässliche und sichere Dateninfrastrukturen aufzubauen. Zusätzlich erschwert die Integration unterschiedlicher Formate und Dateitypen, insbesondere in der heterogenen Maschinenlandschaft, den Vernetzungsprozess. Fortschritte in der Standardisierung, beispielsweise durch Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) und deutsche Industrieinitiativen, können laut den Befragten Lösungsansätze bieten, um Interoperabilität und Effizienz innerhalb der Produktionssysteme zu fördern. In der Literatur wird der Bedarf an sicheren und standardisierten Datenökosystemen deutlich.⁴¹ Diese sind notwendig, um den reibungslosen Austausch von Produktionsdaten über Unternehmensgrenzen hinweg zu ermöglichen. Insbesondere für KMU, die oft keine eigenen IT-Abteilungen haben, ist die Bereitstellung einfacher und benutzerfreundlicher Lösungen von zentraler Bedeutung, um an diesen Ökosystemen teilzunehmen und die Vorteile der vernetzten Produktion voll ausschöpfen zu können.

Als logische Folge setzen KMU nach Einschätzung der Expert:innen derzeit andere Prioritäten, insbesondere im Bereich der grundlegenden Digitalisierung ihrer Prozesse. Viele Unternehmen sehen demnach keinen unmittelbaren Nutzen in der Standardisierung und betrachten die vernetzte Produktion nicht ganzheitlich. Dadurch bleibt das volle Potenzial dieser Technologien oft ungenutzt. Diese Unsicherheit wird durch die Vielzahl an verfügbaren, aber nicht kompatiblen Systemen verstärkt, was die Implementierung vernetzter Produktionssysteme zusätzlich erschwert.⁴²

Defizite bei der IT-Sicherheit stellen eine weitere Herausforderung dar. Im Bereich Vertrauens- und Sicherheitsprobleme äußerten die befragten Expert:innen, dass mangeln-

⁴¹ Vgl. Bitkom, 2022

⁴² Vgl. Drath et al., 2023

des Vertrauen und Unsicherheiten bezüglich der Sichtbarkeit und Kontrolle von Daten eine bedeutende Hürde darstellen. Insbesondere das sogenannte Blackbox-Problem, bei dem die Funktionsweise vernetzter Systeme nicht vollständig nachvollzogen werden kann, führt in vielen Unternehmen zu Vorbehalten gegenüber der vernetzten Produktion. Zudem fehlt es KMU häufig an einem grundlegenden Verständnis für die Risiken des Datenteilens, was zu einer Zurückhaltung bei der Nutzung von vernetzten Systemen führt. Die Expert:innen betonten außerdem, dass Sicherheitsfragen meist erst nach Vorfällen ernsthaft in den Fokus rücken, was die präventive Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen erschwert. Ein weiterer Faktor ist die Sorge vor Betriebsausfällen durch Cyberangriffe, die den Vertrauensaufbau zusätzlich erschweren.

Der Einbezug der Belegschaft und der Fachkräftemangel stehen in einem engen Zusammenhang, da eine aktive Mitwirkung der Mitarbeitenden zur Fachkräftesicherung beitragen kann. Hohe Kosten für IT-Sicherheitsexpert:innen sowie die Risiken durch Social Engineering stellen zusätzliche Herausforderungen dar.⁴³ Oftmals fehlen finanzielle und personelle Ressourcen für den Aufbau von IT-Kompetenzen, sodass KMU auf Outsourcing angewiesen sind. Es handelt sich laut einem der Expert:innen um ein dynamisches Problem: Da KI langfristig eine zentrale Rolle in der vernetzten Produktion spielen kann, kann die Umsetzung spezifischer Bildung helfen, diese Potenziale zu erschließen und damit Herausforderungen wie den Fachkräftemangel langfristig zu entschärfen. Der Fachkräftemangel wird auch in der Literatur zugleich als Herausforderung und Beschleuniger für Automatisierung beschrieben.⁴⁴ Ein Befragter stellt fest, dass sich Unternehmen intensiver mit Automatisierung beschäftigten, was positive Entwicklungen mit sich bringen könnte. Selbst bei hoher Automatisierung bleibt das Problem bestehen, insbesondere im Hinblick auf bezahlbare, qualitativ hochwertige Fachkräfte, die schwer zu finden sind. Die Bedeutung des Fachkräftemangels hängt von der Entwicklung der KMU ab: Wenn sie sich nicht in Richtung vernetzte Produktion entwickelten, ist das Problem weniger relevant. Zudem sind oft bereits Fähigkeiten intern vorhanden, doch müssen laut Einschätzung der Expert:innen die Umsetzung einer vernetzten Produktion als Gewinn vermittelt werden, um eine höhere Priorität zu erhalten. Laut der Initiative Plattform Industrie 4.0 stehen viele Mitarbeitende der Digitalisierung skeptisch gegenüber, insbesondere in traditionellen Unternehmen. Diese Skepsis resultiert häufig aus der Sorge um Arbeitsplatzsicherheit und der Angst vor tiefgreifenden Veränderungen in etablierten Arbeitsprozessen. Ein erfolgreiches Change Management ist erforderlich, um die Akzeptanz neuer Technologien zu fördern und die Mitarbeiterschaft für die Vorteile der Digitalisierung zu gewinnen.⁴⁵

Expert:innen äußerten in den Interviews, dass eine mangelnde strategische Orientierung in den Unternehmen vorherrscht. Es wurde darauf hingewiesen, dass die strategische

⁴³ Die Qualifizierung der Mitarbeiter:innen wird in der Literatur als große Herausforderung in der Umsetzung von vernetzter Produktion angesehen. (vgl. Becker et al. 2017)

⁴⁴ Fachkräftemangel ist eine Herausforderung, gleichzeitig schließt es Lücken in der Digitalisierung. Vgl. Pape et al. 2021, Gandert, 2024 und Froschauer, 2023

⁴⁵ Vgl. Ludwig et al., 2016

Ausrichtung häufig stark von dem Engagement der Führungskräfte abhängt und die Kosten der Einführung eine zentrale Rolle spielen.

Darüber hinaus stellen auch rechtliche Rahmenbedingungen eine Eintrittsbarriere dar. In einer repräsentativen Befragung von Industrieunternehmen sehen 82% den Abbau von rechtlichen Unsicherheiten beim Datenaustausch mit anderen Unternehmen als wichtigste Maßnahme, um Industrie 4.0-Anwendungen voranzutreiben.⁴⁶ Mangelnde rechtliche Sicherheit in Bezug auf den Datenschutz und die Datennutzung hindern KMU daran, vernetzte Produktionssysteme vollständig zu implementieren. Diese Bedenken werden durch Umfragen und Literatur unterstützt, die zeigen, dass KMU die rechtlichen Risiken scheuen, die mit der Digitalisierung verbunden sind.⁴⁷

3.3 Zwischenfazit

Die digitale Transformation in KMU ist uneinheitlich und geprägt von Fortschritten in Teilbereichen wie der Einführung von ERP-Systemen oder Sensorik, jedoch mangelt es an der umfassenden Integration vernetzter Produktionstechnologien. Der Einsatz moderner IoT-Geräte in Produktionsprozessen liegt mit 5,1% in KMU deutlich hinter den Großunternehmen (15,9%). Haupthemmnisse sind begrenzte Ressourcen, fehlendes Wissen und infrastrukturelle Defizite, wie unzureichende Interoperabilität zwischen Maschinen und Systemen. Trotz wachsender Erkenntnis zur strategischen Bedeutung der vernetzten Produktion und einer moderaten Bewertung der aktuellen Relevanz durch Expert:innen bleibt die Umsetzung hinter den Möglichkeiten zurück.

KMU benötigen Unterstützung bei der Modernisierung bestehender Anlagen und der Integration digitaler Netzwerke. Expert:innen bewerten diese Bedarfe mit hoher Relevanz. Datensicherheit und die Entwicklung robuster Standards sind entscheidend, da Bedenken bezüglich Datenschutz und mangelnde IT-Kompetenz zentrale Hürden darstellen. Neben technischen Anforderungen besteht ein hoher Bedarf an Kompetenzentwicklung der Mitarbeitenden. Weiterbildung und strategische Partnerschaften werden als wesentliche Maßnahmen hervorgehoben, um das Verständnis für Digitalisierung und deren Potenziale zu fördern. Zudem zeigen KMU Interesse an vereinfachten administrativen Rahmenbedingungen und anwendungsfreundlichen Datenökosystemen.

KMU sehen sich mit vielfältigen Barrieren konfrontiert, darunter hohe Investitionskosten, fehlende Standardisierung und Interoperabilität sowie Sicherheitsbedenken. Zusätzlich hemmen rechtliche Unsicherheiten, ein Mangel an qualifiziertem Personal und kulturelle Widerstände die Einführung vernetzter Technologien. Der Fachkräftemangel wird als dynamische Herausforderung beschrieben, die sowohl die Digitalisierung bremst als auch Anreize für Automatisierung schafft. Auch strategische Defizite in der Zielsetzung und operative Prioritäten erschweren die Transformation. Die Interviews verdeutlichen, dass

⁴⁶ Vgl. Bitkom, 2022

⁴⁷ Vgl. Saam et al., 2016 und Becker et al., 2017

fehlende Integration und Misstrauen gegenüber Datentechnologien die Wettbewerbsfähigkeit von KMU beeinträchtigen können. Dieses Zwischenfazit zeigt eine klare Diskrepanz zwischen der Bedeutung, die der vernetzten Produktion zugesprochen wird und den bestehenden Umsetzungshemmnissen. Es verdeutlicht den Bedarf an zielgerichteter Unterstützung, um die Herausforderungen systematisch zu adressieren.

4 Das Periodensystem der vernetzten Produktion

Die Literaturrecherche hat ergeben, dass das Themengebiet in der vernetzten Produktion ein Sammelbegriff für verschiedene Technologien und Anwendungen ist. Bisher fehlt ein aktueller Überblick über die verschiedenen Bestandteile des Themas, insbesondere in KMU-gerechter Darstellung.⁴⁸ Mit dem zweiten Teil des Forschungsprojekts zu diesem Diskussionsbeitrag wurde eine Übersicht zu den Bestandteilen erarbeitet. Die Form für die Aufbereitung orientiert sich an dem KI-Periodensystem.⁴⁹ Es wurde ein neues Periodensystem für die vernetzten Produktion herausgearbeitet, welches die einzelnen Unterthemen illustriert und in einen Zusammenhang bringt. Nachfolgend wird dieses Periodensystem beschrieben.

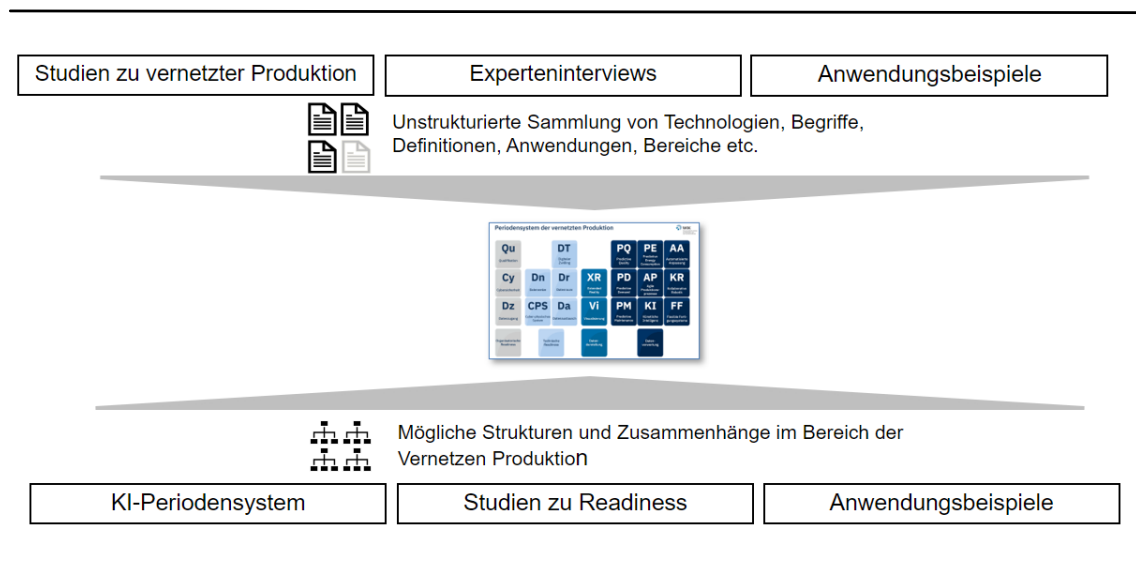
4.1 Methodik zur Erstellung des Periodensystems

Die Erstellung des Periodensystems wurde in zwei Schritten vollzogen. Im ersten Schritt wurde eine unstrukturierte Sammlung von Technologien, Begriffen, Definitionen, Anwendungen, verschiedene Bereiche etc. erstellt. Quellen waren vorangegangenen Studien (siehe Kapitel 2), Expert:inneninterviews (Kapitel 2) und verschiedene Anwendungsbeispiele (siehe Kapitel 5). Im zweiten Schritt wurden Strukturen aus der Literatur, Bereiche aus verschiedenen Reifegradmodelle ("Readiness") zu Digitalisierung und KI sowie erkennbare Strukturen aus den Anwendungsbeispielen gesammelt. Auf dieser Basis wurde das Periodensystem für vernetzte Produktion abgeleitet. Die Vorgehensweise ist im Schaubild unten dargestellt.

⁴⁸ Die Recherche ergab, dass es bisher nur eine ähnliche Darstellung des Periodensystems existiert. Winters (2024) zeigt in seinem Periodic Table of Industry 4.0 eine detaillierte Ausführung der Bestandteile in 6 Gruppen und insgesamt 70 Elementen. Eine wissenschaftliche Herleitung des Periodensystems war nicht ersichtlich. Im direkten Vergleich gibt es Überschneidungen, jedoch konzentriert sich das hier vorgestellte Periodensystem auf die Zielgruppe KMU.

⁴⁹ Vgl. Bitkom, 2018

Abbildung 1: Schaubild



Quelle: Eigene Darstellung

Insgesamt wurden 32 Studien aus dem Themenkomplex der vernetzten Produktion ausgewertet.⁵⁰ Neben der Analyse der vorhandenen Literatur wurden Interviews mit Expert:innen durchgeführt (s. Kapitel 0).

Aus der Fachliteratur und Datenbanken von Förderprojekten⁵¹ wurden geeignete Anwendungsbeispiele herangezogen. Die Beispiele veranschaulichen den Einsatz moderner Technologien in realen vernetzten Produktionsumgebungen und zeigen auf, welche Voraussetzungen für die Umsetzung erfüllt sein müssen. Dies dient als wichtige Grundlage, um die Kategorien des Periodensystems der vernetzten Produktion praxisnah zu formulieren und abstrakte Konzepte auch greifbar zu machen. Genutzte Quellen sind unter anderem Schuh et al.⁵² und VDI/VDE⁵³ bei denen jeweils zwei Use-Cases aus der vernetzten Produktion genutzt werden, um die vorgestellten Inhalte beispielhaft durch die Anwendungen zu veranschaulichen.⁵⁴ Darüber hinaus bietet die Broschüre der International Data Space Association einen Überblick zu Datenökosystemen und 13 Anwendungsbeispielen aus verschiedenen Branchen, unter anderem Automobil, Luftfahrt oder Logistik.⁵⁵ Das Fraunhofer IPT konsolidiert und präsentiert ihre Erfolgsbeispiele aus Forschungs- und Entwicklungsprojekten in der Broschüre „Industrie 4.0 – vernetzte, adaptive Produktion“.⁵⁶

⁵⁰ Die Auflistung der gesichteten Literatur findet sich in Tabelle 2 im Anhang.

⁵¹ Hier sind unter anderem die Datenbank der Plattform Industrie 4.0, IDS Veröffentlichung mit Use-Cases, Gaia-X Datenbank zu nennen. Siehe hierfür auch Kapitel 5.1.

⁵² Vgl. Schuh et al., 2018

⁵³ Vgl. VDI/VDE, 2008

⁵⁴ Vgl. Schuh et al., 2018 und VDI/VDE et al., 2008.

⁵⁵ Vgl. International Data Space Association, 2022

⁵⁶ Vgl. Klocke et al., 2017

Das KI-Periodensystem des Bitkom wurde als Vorbild herangezogen. Es wurde im Jahr 2018 vom Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (Bitkom) veröffentlicht und bietet eine umfassende und strukturierte Übersicht über zentrale Einsatzzwecke, Chancen und Risiken von KI. Das Periodensystem wurde entwickelt, um Unternehmen, insbesondere KMU einen klaren Einstieg in die komplexen Teilbereiche der KI zu ermöglichen. Das Periodensystem gruppiert KI-Elemente in übersichtliche Kategorien, die von grundlegenden Algorithmen und Technologien bis hin zu konkreten Anwendungen und ethischen Fragestellungen reichen.

Der Begriff „Digitale Readiness“ beschreibt den Grad der Fähigkeit und Bereitschaft eines Unternehmens, neue Technologien und Prozesse zu implementieren. Da wir uns bei der Entwicklung des Periodensystems der vernetzten Produktion am KI-Periodensystem orientieren und es einige Veröffentlichungen zu KI-Readiness in Bezug auf KMU gibt, ist es sinnvoll, auch die Readiness-Studien im Kontext der vernetzten Produktion zu berücksichtigen.⁵⁷ Zu nennen sind die Studien mit einem Readiness Modell, welche die Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung vernetzter Produktion für die Unternehmen individuell bestimmen können.⁵⁸ Auf dieser Basis wurden die maßgeblichen Einflussgrößen der vernetzten Produktion in das Periodensystem aufgenommen. Die in den Readiness-Studien verwendeten Begriffe und Konzepte in Bezug auf vernetzte Produktion lassen sich in zwei Bereiche unterteilen: organisatorische und technische Readiness.

4.2 Übersicht über das Periodensystem der vernetzten Produktion

In Abbildung 2 ist das erarbeitete Periodensystem der vernetzten Produktion dargestellt. Für das Periodensystem wurden 19 Elemente identifiziert, die in vier Bereiche eingeteilt wurden. Analog zum Periodensystem aus der Chemie, bei dem einzelne Elemente (z.B. H wie Wasserstoff und O wie Sauerstoff) durch eine gezielte Kombination ein komplexes Molekül bilden (z.B. das Wassermolekül H₂O), lassen sich aus den verschiedenen Elementen des Periodensystems spezifische Anwendungsfälle entwickeln. Ein Beispiel für eine Anwendung ist die Umsetzung des digitalen Produktpasses, die Darstellung der Informationen für die Verpflichtungen aus dem Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz oder die Optimierung der Zulieferkette.

Das Periodensystem der vernetzten Produktion stellt eine umfassende und strukturierte Übersicht über die relevanten Technologien und Konzepte dar. Allerdings unterliegt es den Herausforderungen des kontinuierlichen technologischen Wandels und der Einführung neuer Innovationen. Das hat zur Konsequenz, dass bestimmte Elemente im Periodensystem in der Zukunft angepasst oder ergänzt werden müssen, um mit den neusten Entwicklungen Schritt zu halten. Daher erfordert das Periodensystem eine regelmäßige, kritische Überprüfung und mögliche Erweiterung, um sicherzustellen, dass es stets den

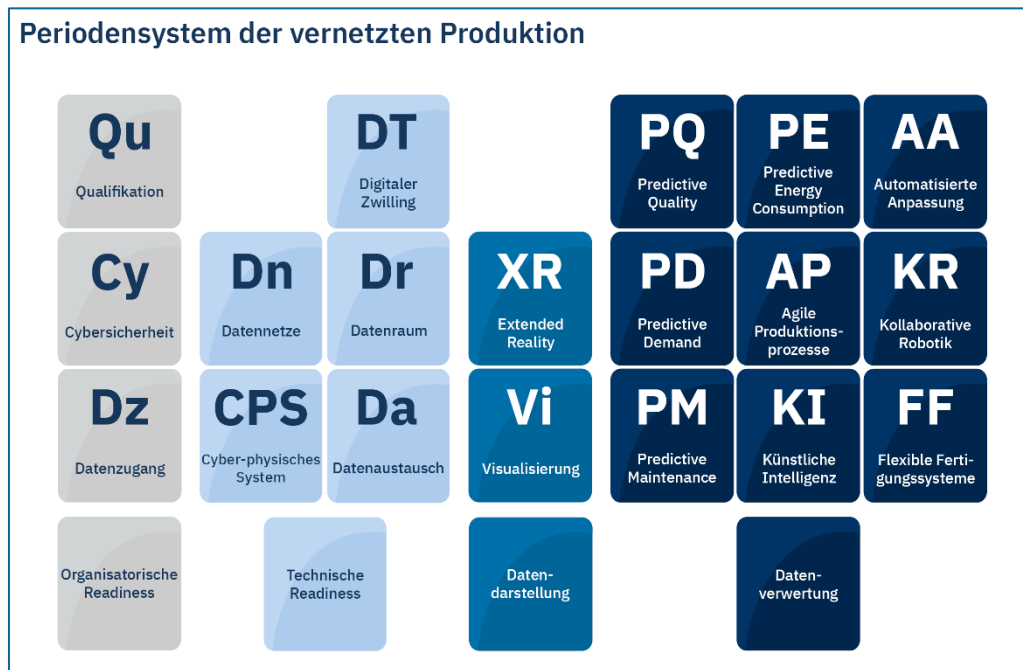
⁵⁷ Vgl. Roloff et al., 2024

⁵⁸ Readiness Modelle finden sich unter anderem in Ehemann et al., 2021, Anderl, 2015 oder Appelfeller, 2018.

aktuellen Stand der vernetzten Produktion widerspiegelt und als Orientierungshilfe weiterhin relevant bleibt.

Nachfolgend werden diese Bereiche und ihre Elemente näher beschrieben.

Abbildung 2: Das Periodensystem der vernetzten Produktion



Quelle: Eigene Darstellung

4.3 Organisatorische Readiness

Der erste Bereich des Periodensystems (“Organisatorische Readiness”) umfasst organisatorischen Themen, die als Grundlage für die Implementierung zu verstehen sind, inklusive der Sicherstellung eines Datenzugangs, der Gewährleistung von Cybersicherheit und der fortlaufenden Qualifikation von Geschäftsführenden und Mitarbeitenden.

4.3.1 Datenzugang (Dz)

Ein effizienter und sicherer Zugang zu Daten ist die zentrale Grundlage für die industrielle Vernetzung und datengetriebene Produktionsprozesse. Daten gelten heute als eine der wertvollsten Ressourcen der Wirtschaft, deren strategische Nutzung entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen ist.⁵⁹ Dabei stellt das Ungleichgewicht zwischen

⁵⁹ <https://www.ifo.de/medienbeitrag/2023-04-10/daten-sind-das-erdoel-des-21-jahrhunderts-deutschland-wird-es-nicht>

datenbesitzenden und datenabhängigen Akteuren eine zentrale Herausforderung dar.⁶⁰ Um dem entgegenzuwirken, hat die Europäische Kommission mit der Digitalstrategie „Gestaltung der digitalen Zukunft Europas“ und insbesondere mit dem Datengesetz (Data Act⁶¹) eine sektorenübergreifende Regulierung geschaffen.⁶²

Das Datengesetz zielt darauf ab, einen Binnenmarkt für Daten zu etablieren, um die Datensouveränität Europas zu stärken und Innovationen zu fördern.⁶³ Es verpflichtet dazu, vernetzte Produkte so zu gestalten, dass Verbraucher und Dritte auf entstehende Daten einfach und (rechts-)sicher zugreifen, diese nutzen und teilen können. Diese Regelungen gelten sowohl für personenbezogene als auch nicht-personenbezogene Daten, wobei die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) weiterhin für personenbezogene Daten uneingeschränkt Anwendung findet.⁶⁴

Für die vernetzte Produktion bedeutet das Datengesetz nicht nur eine rechtliche Harmonisierung, sondern auch die Schaffung von Zugangsrechten. Diese erleichtern die Integration von Technologien wie IoT und KI in industrielle Prozesse, fördern die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungsketten und steigern die Effizienz.

4.3.2 Cybersicherheit (Cy)

In Kapitel 2 wurde deutlich, dass Cybersicherheit bzw. IT-Sicherheit wichtig für die Implementierung der vernetzten Produktion ist. Es stellt eine unverzichtbare Grundlage dar, um die Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit sensibler Produktionsdaten zu gewährleisten. Die Cybersicherheit ist sowohl für den Schutz des eigenen Unternehmens als auch für die Geschäftspartner wichtig (siehe u.a. Kapitel 2).⁶⁵

Die Integration von Sensoren, IoT-Geräten und industriellen Steuerungssystemen birgt einzigartige Sicherheitsrisiken, insbesondere durch die Vernetzung von Produktions- und Verwaltungsnetzwerken sowie die direkte Anbindung von Produktionsanlagen an das Internet.⁶⁶ Dies erhöht die potenzielle Angriffsfläche erheblich und macht Unternehmen anfällig für Cyber-Angriffe, deren Folgen von Produktionsausfällen bis hin zu physischen Schäden an Anlagen reichen können.⁶⁷

Um Cybersicherheitsrisiken zu mindern, sind umfassende Sicherheitsmaßnahmen erforderlich. Dazu zählen Penetrationstests, Verhaltensanalysen, die Implementierung

⁶⁰ https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-42060-4_2

⁶¹ Data Act; abrufbar unter: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/data-act>

⁶² <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/eu-digitalstrategie.html?nn=214278>

⁶³ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/strategy-data>

⁶⁴ Vgl. „Häufig gestellte Fragen zum Datengesetz“ <https://ec.europa.eu/newsroom/dae/redirect/document/108144>

⁶⁵ <https://www.ipt.fraunhofer.de/de/publikationen/whitepaper-trendreporte-studien/cybersecurity-vernetzte-produktion.html>

⁶⁶ <https://www.industry-of-things.de/vernetzte-produktion-unternehmen-muessen-ihre-anlagen-besser-schuetzen-a-c596e697c495719190ba26fad2df0df0/>

⁶⁷ <https://www.dgq.de/fachbeitraege/wie-wichtig-ist-cyber-sicherheit-in-der-produktion/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

moderner Schutzmechanismen wie Intrusion Detection Systeme, die bei einem Cyberangriff Ereignisdaten erstellen,⁶⁸ und Zero Trust Network Access, der einen sicheren Fernzugriff ermöglicht.⁶⁹ Ebenso wichtig sind ein kontinuierliches Netzwerkmonitoring, die Analyse von Logdaten und die Erkennung von Verhaltensmustern, um potenzielle Bedrohungen frühzeitig zu erkennen.⁷⁰

Neben technologischen Maßnahmen spielt die Schulung der Mitarbeitenden im Bereich Cybersicherheit eine zentrale Rolle, um das Sicherheitsbewusstsein zu stärken. Zudem ist eine enge Zusammenarbeit zwischen IT- und Automatisierungsexpert:innen unabdingbar, um spezifischen Bedrohungslagen effektiv begegnen zu können.⁷¹

Die Umsetzung solcher Maßnahmen wird zunehmend auch durch europäische Regelungen wie die EU-Maschinenrichtlinie, den Cyber Resilience Act (CRA) und die NIS-2-Richtlinie gefordert. Diese Regelungen unterstreichen die wachsende Bedeutung der Cybersicherheit für produzierende Unternehmen und machen deutlich, dass proaktives Handeln unerlässlich ist, um Sicherheit, Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit in einer vernetzten Produktionsumgebung zu gewährleisten.⁷²

Zusätzliche Risiken durch eine vernetzte Produktion können die Verwaltung von Produktionsprozessen, der Wartung, die Maschinenumgebung oder der Faktor Mensch sein.⁷³ Hier gilt es, bestehende Maßnahmen und deren Evaluierung den neuen Gegebenheiten anzupassen. Darunter fallen insbesondere die Erfassung von Echtzeit-Datenströmen, bei denen die Integrität und Vertraulichkeit der Daten gewährleistet werden muss.⁷⁴

4.3.3 Qualifikation (Qu)

Für die erfolgreiche Umsetzung der vernetzten Produktion ist die Entwicklung der notwendigen Kompetenzen der Geschäftsführenden und Mitarbeitenden entscheidend (siehe hier auch Kapitel 2). Neben der Vermittlung von Fachwissen zu Themen wie u.a. IoT, IIoT, CPS, Big Data, KI, maschinellem Lernen, digitalen Zwillingen, Automatisierung und Sicherheit sollten praktische Möglichkeiten geschaffen werden, um neue Technologien in kontrollierten Umgebungen zu erproben. Simulationen der vernetzten Produktion mit digitalen Zwillingen oder reale Übungsszenarien helfen beispielsweise, (Arbeits-)Prozesse besser zu verstehen und zu optimieren. Workshops zur Vernetzung von

68 https://www.bsi.bund.de/DE/Service-Navi/Publikationen/Studien/IDS02/gr1_hm.html, letzter Zugriff am 11.12.2024

69 <https://www.catonetworks.com/de/blog/cybersecurity-cyber-resilience-manufacturing-strategies/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

70 <https://www.catonetworks.com/de/blog/cybersecurity-cyber-resilience-manufacturing-strategies/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

71 <https://www.dgq.de/fachbeitraege/wie-wichtig-ist-cyber-sicherheit-in-der-produktion/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

72 <https://industrie.de/cybersecurity/wie-steht-es-um-die-cybersecurity-in-der-produktion/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

73 Vgl. Niesen et al., 2016

74 Vgl. Tupa et al., 2017

Maschinen in smarten Fabriken sowie virtuelle Trainingslabore, die immersive Technologien nutzen, bieten Mitarbeitenden zudem die Möglichkeit von praxisnahen Erfahrungen mit Cyber-Physischen Systemen und Robotersystemen.⁷⁵

Die Schulung von Mitarbeitenden im Bereich der vernetzten Produktion sollte sowohl spezifische technologische Kenntnisse als auch bereichsübergreifende Kompetenzen fördern. Praxisnahe Workshops, abteilungsübergreifende Trainings und digitale Lernplattformen können somit dabei helfen, Mitarbeitende optimal auf die Anforderungen einer zunehmend vernetzten und automatisierten Produktionsumgebung vorzubereiten.⁷⁶

4.4 Technische Readiness

Für die Vernetzung und Datenkommunikation zwischen physischen Objekten müssen technische Voraussetzungen gegeben sein, die auch als Grundlage für die Vernetzung von Komponenten verstanden werden können.⁷⁷

Im Periodensystem der vernetzten Produktion wird die technische Readiness in verschiedene Ebenen aufgeteilt:

- **Cyber-physische Systeme** bilden die Grundlage für die Generierung von Daten und die Zusammensetzung der Systeme.
- **Datennetze** ermöglichen die Übertragung von Daten.
- Der **Datenaustausch** fokussiert auf die Methoden, wie Daten über die Datennetze zwischen Anlagen und Systemen ausgetauscht werden können.
- **Datenräume** beschreiben das System für die Umsetzung des Datenaustausches als Plattform.
- **Digitale Zwillinge**, inklusive z.B. der Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS) geben vor, wie die Daten aussehen, die ausgetauscht werden.

4.4.1 Cyber-physische Systeme (CPS)

Grundlage für die technische Realisierung der vernetzten Produktion bilden die Cyber-physischen Systemen (CPS). Sie beschreiben das Gesamtmodell, wie integrierte

⁷⁵ „Smart factories erfordern neue Kompetenzen“ <https://www.dgg.de/fachbeitraege/wie-wichtig-ist-cyber-sicherheit-in-der-produktion/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

⁷⁶ Bspw. <https://digitalzentrum-augsburg.de/teil1-vernetzte-produktion/>, https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/referenzprojekte/lernfabrik_vernetzte_production.html

⁷⁷ Das Internet der Dinge (IoT) bzw. das Industrielle Internet der Dinge (IIoT) umfasst jegliche miteinander vernetzte Objekte, wie z.B. verfolgte Objekte (beispielsweise mit Radio Frequency Identification (RFID)-Tags), Datenobjekte (z.B. Sensoren), interaktive Objekte (z.B. Aktoren) sowie smarte Objekte (z.B. Softwarekomponenten, die auf Sensordaten einwirken). Das Internet of Things bzw. das Industrial Internet of Things kann als Grundlage für die Vernetzung von Komponenten verstanden werden, die den Fokus auf der Vernetzung und der Datenkommunikation zwischen physischen Objekten legen. Vgl. Malik et al., 2021

Maschinen und Anlagen verbunden werden, und wie die physischen oder mechanischen Komponenten mit Sensoren, Aktoren und IT-Systemen integriert werden. Diese IT-Systeme umfassen Modelle für die Netzwerk- und Kommunikationsinfrastrukturen sowie Rechen-, Analyse- und Steuerungseinheiten. Durch die digitale Vernetzung ermöglicht ein CPS eine bidirektionale Kommunikation zwischen der physischen und der digitalen Welt, wodurch eine dynamische und effiziente Interaktion von Maschinen und Prozessen realisierbar wird.⁷⁸

Obwohl die Konzepte, die in einem CPS zusammenfließen, eng miteinander verbunden sind, handelt es sich um spezifische technische Ansätze, die auf unterschiedlichen Technologien basieren. Sensoren und Aktoren übernehmen dabei die Erfassung physischer Größen und deren Umsetzung in digitale Signale, während Kommunikations- und Analysensysteme für die Verarbeitung und Übertragung der Daten sorgen. Diese enge Verzahnung verschiedener technischer Elemente schafft die Voraussetzung für die Integration in größere Netzwerke, wie sie in der vernetzten Produktion erforderlich sind.

In ihrer Gesamtheit sind CPS ein entscheidender Baustein für die Weiterentwicklung von Produkten und Produktionsprozessen. Sie ermöglichen nicht nur eine höhere Effizienz und Flexibilität, sondern auch die Umsetzung innovativer Konzepte wie der intelligenten Fabrik im Sinne von Industrie 4.0.⁷⁹

4.4.2 Datennetze (Dn)

Moderne Technologien aus dem informations- und kommunikationstechnologischen Bereich spielen eine Schlüsselrolle bei der Realisierung von einer durchgängigen Ende-zu-Ende-Konnektivität in der vernetzten Produktion. Insbesondere auf lokaler Ebene wächst der Bedarf an drahtloser Kommunikation, da sie eine einfache Nachrüstbarkeit bestehender Infrastrukturen ermöglicht. Mobile oder prozessintegrierte Sensorik können so effizient in Produktionsnetzwerke integriert werden. Die verfügbaren Technologien lassen sich dabei grob in lokale Verbindungsmöglichkeiten wie beispielsweise Bluetooth und ZigBee sowie flächendeckende Lösungen wie 5G und WLAN unterteilen.⁸⁰

Beide Ansätze bieten spezifische Vor- und Nachteile. Lokale Lösungen erfordern keine komplexe Infrastruktur und können flexibel eingesetzt werden, während flächendeckende Technologien eine zentrale Verwaltung ermöglichen, was Störungen minimiert. Die Wahl der passenden Technologie hängt von den individuellen technischen und wirtschaftlichen Anforderungen ab. Dabei hat sich 5G als vielseitige Lösung herauskristallisiert: Mit hohen Datenraten, niedrigen Latenzen und einem regulierten Frequenzspektrum erfüllt es selbst die strengen Anforderungen industrieller Anwendungen und eignet sich für eine Vielzahl

⁷⁸ Vgl. Pivoto et al., 2021, <https://industrie-wegweiser.de/cyber-physische-systeme-chancen-risiken/> und <https://plattformindustrie40.at/forschung-entwicklung-innovation/cyber-physische-systeme>, Letzter Zugriff am 11.12.2024

⁷⁹ Siehe dazu auch: Pivoto et al., 2021, <https://industrie-wegweiser.de/cyber-physische-systeme-chancen-risiken/> sowie <https://plattformindustrie40.at/forschung-entwicklung-innovation/cyber-physische-systeme>, Letzter Zugriff am 11.12.2024

⁸⁰ Vgl. Schmitt et al., 2020

von Szenarien. Ergänzend sorgt Time Sensitive Networking (TSN) für die Einhaltung von Echtzeitanforderungen und ermöglicht den Übergang von lokalen Anwendungen hin zu globalen Netzwerken.⁸¹

4.4.3 Datenaustausch (Da)

Während die Datennetze den “Weg” für die Daten darstellen, regelt der Datenaustausch das “wie” die Anlagen und Komponenten die Daten miteinander austauschen. Der Datenaustausch stellt somit die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Geräten, Maschinen und Systemen her. Die Standardisierung von Schnittstellen und Kommunikationsprotokollen spielt dabei eine zentrale Rolle, um Interoperabilität und Effizienz zu gewährleisten. Protokolle wie Modbus, MQTT, MT-Connect, Umati und insbesondere OPC UA decken spezifische Anwendungsfälle ab und ermöglichen die strukturierte Übertragung von Daten. Die Voraussetzung für eine reibungslose Kommunikation ist jedoch, dass alle beteiligten Systeme kompatible Protokolle unterstützen, was oft durch Harmonisierungsbemühungen erreicht wird.⁸²

OPC UA ist ein offener Kommunikationsstandard, der speziell für industrielle Anwendungen entwickelt wurde. Er ermöglicht eine plattformübergreifende Kommunikation zwischen heterogenen Geräten und Systemen und integriert Funktionen wie Datensicherheit, Datenmodellierung und zeitliche Synchronisation. Ein zentrales Merkmal von OPC UA ist die Verwendung eines einheitlichen Datenmodells, das die Integration unterschiedlicher Systeme erleichtert und eine standardisierte Kommunikation fördert. Es ist ein essenzielles Werkzeug, um die Interoperabilität in einer zunehmend komplexen Produktionsumgebung sicherzustellen.

Automation Markup Language ergänzt diese Standards, indem es eine XML-basierte Sprache bereitstellt, die speziell für die Beschreibung von Automatisierungsanlagen und Produktionsprozessen entwickelt wurde. Automation Markup Language ermöglicht es, Anlagen und Prozesse in einem einheitlichen Format zu beschreiben, wodurch Informationen zwischen verschiedenen Systemen und Plattformen konsistent ausgetauscht werden können. Dies reduziert die Komplexität und erhöht die Transparenz in der vernetzten Produktion.

Die Implementierung von Standards wie OPC UA und Automation Markup Language ist besonders für KMU von Vorteil, da sie die Integration heterogener Produktionssysteme erheblich erleichtert. Durch die Einhaltung solcher Standards können Unternehmen sicherstellen, dass ihre Systeme nahtlos mit anderen kommunizieren und kompatibel bleiben, auch wenn neue Technologien oder Partner in die Produktionsumgebung integriert

⁸¹ Ebd.

⁸² Vgl. Klocke et al., 2017, Schmitt et al., 2020 und Kiesel et al., 2020

werden. Dies führt zu einer verbesserten Skalierbarkeit, höheren Effizienz und einer stärkeren Flexibilität, um auf veränderte Marktanforderungen zu reagieren.

Darüber hinaus fördern diese Standards die Datensicherheit und den Schutz sensibler Produktionsdaten, da sie auf geprüften Kommunikationsprotokollen basieren, die Sicherheitsmechanismen wie Verschlüsselung und Authentifizierung integrieren. Dies ist in einer vernetzten Produktionsumgebung, die zunehmend Ziel von Cyberangriffen ist, von entscheidender Bedeutung.

Zusammengefasst bildet die Standardisierung des Datenaustauschs durch die genannten Protokolle die Grundlage für eine effiziente und sichere Kommunikation in der vernetzten Produktion. Sie schafft die Voraussetzung für eine durchgängige Interoperabilität, verbessert die Integration von Systemen und stärkt die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen, die von den Vorteilen einer vernetzten Produktion profitieren möchten.⁸³

4.4.4 Datenräume (Dr)

Die Datenräume gehen einen Schritt weiter als der Datenaustausch und haben das Ziel, ein System für einen standardisierten Datenaustausch zwischen internen und auch externen Akteuren wie Zulieferern und Kunden zu implementieren. Trotz ihrer zentralen Rolle gibt es keine einheitliche Definition, da bestehende Ansätze oft vage bleiben oder voneinander abweichen. Eine aus unserer Sicht passende Definition zu Datenräumen liefert das Projekt PROCESS-X:

„Ein Datenraum (oft auch als Data Space bezeichnet) ist ein digitaler, sicherer Bereich, in dem Unternehmen und Organisationen Daten miteinander austauschen und gemeinsam nutzen können, ohne die Kontrolle über ihre eigenen Daten zu verlieren. In der Regel sind diese Datenräume mit strikten Zugriffsrechten und Regeln versehen, um den Datenschutz und die Datensicherheit zu gewährleisten. Ziel ist es, einen vertrauenswürdigen, interoperablen Rahmen für den Datenaustausch zu schaffen, der eine sichere und kollaborative Nutzung von Daten ermöglicht.“⁸⁴

Reiberg et al. (2022) definieren in ihrem Whitepaper Datenräume als

„eine föderierte, offene Infrastruktur für souveränen Datenaustausch, die auf gemeinsamen Vereinbarungen, Regeln und Standards beruht.“⁸⁵

Sie leiten diese Definition durch die Identifikation wiederkehrender Prinzipien her, die zentrale Akteure wie die EU-Kommission, Gaia-X oder die International Data Spaces (IDS) hervorheben. Ein Schlüsselprinzip ist der Austausch von Daten (Data Sharing), der

⁸³ Siehe weitere Literatur: Drath et al., 2023, Babel, 2024, Maiwald, 2018 und Baum et al., 2018

⁸⁴ Siehe <https://www.namur.net/de/fokusthemen/process-x.html>, Letzter Zugriff am 11.12.2024

⁸⁵ Vgl. Reiberg et al., 2022

in Datenräumen durch unterschiedliche Formen wie Datenübertragung zwischen unterschiedlichen Akteuren (z.B. Zulieferer und ihre Kunden) oder zeitlich begrenzten Zugang realisiert wird. Teilnehmer behalten dabei ein hohes Maß an Kontrolle über ihre Daten und gestalten den Austausch aktiv mit. Zudem wird durch klare Governance-Mechanismen sichergestellt, dass Rechte und Pflichten der Beteiligten geregelt sind, wobei diese Mechanismen auf gemeinsamen Standards und demokratisch legitimierten Regeln basieren.

Ein weiteres zentrales Element ist die Datenhoheit und Kontrolle, die das Vertrauen der Teilnehmer stärkt und die Einhaltung europäischer Werte wie Datensouveränität gewährleistet. Die Offenheit der Datenräume ermöglicht es, eine breite Anzahl von Akteuren einzubinden, Lock-In-Effekte zu vermeiden und die Datenökonomie diverser und wettbewerbsfähiger zu gestalten. Schließlich fördern Föderation und Interoperabilität eine dezentrale Struktur, die auf offenen Standards basiert und einen flexiblen Austausch sowie die Verbindung mit anderen Datenräumen erlaubt.

Zusammenfassend basieren Datenräume auf den Grundprinzipien Austausch, Governance, Kontrolle, Offenheit und Föderation, wobei zu jedem Zeitpunkt die vollständige Kontrolle der eigenen Daten gewährleistet wird. Diese Prinzipien sind nicht nur für die Entwicklung konsensfähiger Definitionen entscheidend, sondern auch für die Umsetzung vertrauenswürdiger und zukunftsfähiger Datenökosysteme.⁸⁶

Viele Datenräume befinden sich aktuell in der Entwicklung. Sie werden für die verschiedenen Branchen in Zusammenarbeit zwischen den betroffenen Unternehmen implementiert. Ein Beispiel aus der Automobilbranche ist Catena-X. Das Projekt hat die Vision, "den ersten offenen und kollaborativen Datenraum für die Automobilindustrie – für optimierte Geschäftsprozesse durch datengesteuerte Wertschöpfungsketten" anzubieten.⁸⁷ Catena-X hat 193 Mitglieder (Stand November 2024), inklusive u.a. Continental, BMW, Amazon Web Services, Google, Ford Werke, IBM Deutschland, SAP, Robert Bosch, Stellantis, Volkswagen und Mercedes Benz.⁸⁸

Mit den geförderten Projekten im Rahmen von Manufacturing-X werden ebenso zahlreiche neue Datenräume für den Datenaustausch in verschiedenen Branchen und Wertschöpfungsketten entwickelt. Allein mit dem geförderten Projekt Factory-X werden elf Datenräume entwickelt. Beispiele sind Datenräume zu kollaborative Engineering, Logistik, Zustandsüberwachung in der Industrie, modulare Produktion, Fertigung On-Demand, Betrieb-as-a-Service, Rückverfolgbarkeit und Energieverbrauch/Lastenmanagement.⁸⁹ Das Projekt Robot-X „beschäftigt sich [...] mit dem Aufbau eines vernetzten Datenraums zum harmonisierten Austausch von digitalen Zwillingen robotischer Komponenten, um

⁸⁶ Vgl. Reiberg et al., 2022.

⁸⁷ Siehe Catena-X, <https://catena-x.net/de/vision>, Letzter Zugriff am 28.11.2024

⁸⁸ https://catena-x.net/fileadmin/user_upload/06_Ueber_uns/Catena-X_List_of_Members_02.pdf, Letzter Zugriff am 28.11.2024

⁸⁹ Siehe <https://factory-x.org/de/projekte/>, Letzter Zugriff am 28.11.2024

eine daten- und modellbasierte Systementwicklung mittels KI zu ermöglichen“.⁹⁰ Mit dem PROCESS-X/namur-Projekt wird ein Datenraum für die Prozessindustrie entwickelt. Use Cases bei PROCESS-X fallen in den Bereichen „Predictive Steam Production“, „Waste Heat Marketplace“ und „Automated as Built“.⁹¹

Auch auf EU-Ebene entstehen ebenso Datenräume. Derzeit werden in 14 Sektoren/Bereichen gemeinsame europäische Datenräume entwickelt, um datengestützte Innovationen auf Basis von vertrauenswürdigen und sicheren Daten aus der gesamten EU voranzutreiben.⁹²

4.4.5 Digitaler Zwilling (DT)

Mit den CPS, den Datennetzen, dem Datenaustausch und den Datenräumen werden zwar Datensätze generiert, gespeichert und ausgetauscht, jedoch braucht es zusätzlich einheitlichen Vorgaben dafür, wie die Daten selbst aussehen. Die Lösungen hierfür liefern digitale Zwillinge. Ein digitaler Zwilling ist die virtuelle Repräsentation eines physischen Objekts, Systems oder Prozesses, die dessen Eigenschaften, Zustände und Verhaltensweisen realitätsgetreu nachbildet.⁹³

Ein zentraler Bestandteil des digitalen Zwillings ist seine Fähigkeit, Datenaspekte zu strukturieren und semantische Modelle zu verwenden. Datenaspekte enthalten die spezifischen Informationen eines Zwillings in anwendungsbezogenem Kontext und ermöglichen eine einheitliche Interpretation der Daten durch die Partner im Netzwerk. Diese semantischen Modelle schaffen ein gemeinsames Verständnis der Daten und erhöhen deren Nutzbarkeit in unterschiedlichen Szenarien bzw. Use Cases.

Im Kontext von Industrie 4.0 wird die Verwaltungsschale als Rahmen genutzt, um digitale Zwillinge zu realisieren.⁹⁴ Sie bildet die Merkmale und Verhaltensweisen physischer Objekte in standardisierter digitaler Form ab. Die Verwaltungsschale gewährleistet herstellerübergreifende Interoperabilität, ist sowohl für intelligente als auch passive Produkte anwendbar und deckt den gesamten Lebenszyklus eines Produkts ab – von der Entwicklung über die Nutzung bis zur Entsorgung. Zudem ermöglicht sie durchgängige Wertschöpfungsketten, indem sie Transparenz und Vernetzung entlang der gesamten Produktions- und Lieferkette fördert.⁹⁵

Ein weiteres Merkmal der Verwaltungsschale ist die sichere Bereitstellung und Verwaltung von Metadaten. Diese enthalten Identifikatoren und Verweise auf konkrete Daten, wobei der Zugriff erst nach Freigabe der Zugriffs- und Nutzungsrechte erfolgt. So wird

⁹⁰ Siehe <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Manufacturing-x/Module/projekt-robot-x.html>, Letzter Zugriff am 28.11.2024

⁹¹ Siehe <https://www.namur.net/de/fokusthemen/process-x.html>, Letzter Zugriff am 11.12.2024

⁹² Siehe <https://gaia-x.eu/>, Letzter Zugriff am 11.12.2024

⁹³ <https://industrialdigitaltwin.org/>

⁹⁴ <https://industrialdigitaltwin.org/>

⁹⁵ <https://industrialdigitaltwin.org/>

eine kontrollierte und rechtssichere Datennutzung gewährleistet. Auch passive Assets ohne eigene Kommunikationsschnittstelle, wie beispielsweise Werkzeuge oder einfache Bauteile, können durch Technologien wie Barcodes oder QR-Codes eingebunden werden.

Der digitale Zwilling und die Verwaltungsschale bilden gemeinsam die Grundlage für innovative und zukunftsfähige Industrieprozesse. Sie ermöglichen eine nahtlose Integration in das vernetzte Produktionsumfeld und schaffen die Basis für Effizienzsteigerungen, eine verbesserte Ressourcennutzung und die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle in der Industrie 4.0.⁹⁶

Die Industrial Digital Twin Association (IDTA) hat den digitalen Zwilling und die Verwaltungsschale als zentrale Standards in ihrem Rahmenwerk für Industrie 4.0 und datengetriebenen Ökosysteme definiert. Gemeinsam sollen sie Interoperabilität, Sicherheit und Datensouveränität gewährleisten, um den Anforderungen der Industrie 4.0 gerecht zu werden und datenbasierte Innovationen zu fördern.⁹⁷

4.5 Datendarstellung

Die Elemente der Datendarstellung haben die Funktion, die Daten zu visualisieren, gegebenenfalls in Echtzeit zu verfolgen sowie die Analysen zu ermöglichen. Besonders durch Visualisierungstechniken und den Einsatz von Extended Reality (XR) – einschließlich Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) und Mixed Reality (MR) – können komplexe Daten und Prozesse intuitiv und interaktiv dargestellt werden. Moderne Technologien der Informationsdarstellung ermöglichen es, große Datenmengen aus Produktionssystemen in verständliche, visuell ansprechende Formate umzuwandeln, wodurch die Analyse und Interpretation erleichtert werden.

4.5.1 Visualisierung (Vi)

Im Kontext der vernetzten Produktion spielen Visualisierungs- und Analysetools eine zentrale Rolle, um die wachsende Menge an Daten aus unterschiedlichen Systemen und Prozessen effizient nutzbar zu machen. Dashboards und Analysetools ermöglichen es Unternehmen, (Echtzeit-)Daten aus verschiedenen Produktionssystemen zu erfassen, zu analysieren und anschaulich darzustellen. Dadurch können sie die Entscheidungsfindung verbessern, die Betriebseffizienz steigern und eine schnellere Reaktionsfähigkeit auf Störungen oder Optimierungsmöglichkeiten fördern.⁹⁸

⁹⁶ <https://industrialdigitaltwin.org/>

⁹⁷ <https://industrialdigitaltwin.org/>

⁹⁸ Bspw. <https://www.industry-of-things.de/management-dashboard-zur-auswertung-von-datenstroemen-in-der-produktion-a-585603/>, Letzter Zugriff am 11.12.2024

Dashboards bieten eine intuitive Benutzeroberfläche, die es ermöglichen, komplexe Daten aus unterschiedlichen Quellen in einer übersichtlichen und leicht verständlichen Form zu präsentieren. Analysetools, oft unterstützt durch Technologien wie maschinelles Lernen und KI, gehen einen Schritt weiter, indem sie tiefgehende Einblicke ermöglichen. Diese Werkzeuge können Prozessanomalien identifizieren, die Effizienz einzelner Maschinen oder ganzer Produktionslinien bewerten und sogar Vorhersagen zu potenziellen Störungen oder Wartungsbedarfen treffen.

Eine der größten Herausforderungen in der vernetzten Produktion ist die Integration heterogener Datenquellen. Produktionsumgebungen bestehen häufig aus einer Vielzahl unterschiedlicher Maschinen, Systeme und Protokolle, die Daten in diversen Formaten generieren. Visualisierungslösungen wie Dashboards und Analysetools bieten hierfür eine praktikable Lösung, indem sie diese heterogenen Datenquellen in einem kohärenten System zusammenführen. Dies erhöht die Transparenz über die gesamte Wertschöpfungskette und verbessert die Steuerung komplexer Produktionsprozesse.

Ein konkretes Beispiel für die Visualisierung ist die BASyX-Plattform, die flexible Lösungen für die Verwaltung und Visualisierung von Produktionsdaten bietet. BASyX nutzt standardisierte Verwaltungsschalen (engl. Asset Administration Shells, AAS), um Daten aus verschiedenen Maschinen und Systemen interoperabel und einheitlich darzustellen. Durch die Verwendung von BASyX können Unternehmen nicht nur Echtzeitdaten visualisieren, sondern diese auch in automatisierte Prozesse einbinden, um etwa Wartungszyklen zu optimieren oder Produktionsengpässe frühzeitig zu erkennen.⁹⁹

Visualisierungstools tragen zudem maßgeblich zur vorausschauenden Instandhaltung bei. Durch die Analyse historischer und aktueller Daten lassen sich Muster erkennen, die auf zukünftige Ausfälle oder Abnutzung hinweisen. Diese proaktive Wartung reduziert außerplanmäßige Stillstandzeiten und senkt langfristig die Produktionskosten.¹⁰⁰

4.5.2 Extended Reality (XR)

Extended Reality (XR), ein Oberbegriff für Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) und Mixed Reality (MR), eröffnet weitreichende Potenziale für die vernetzte Produktion, indem sie digitale Informationen nahtlos in physische Arbeitsumgebungen (z.B. auf dem Shopfloor oder eine Lagerhalle) integriert und neue Möglichkeiten für die Interaktion mit Daten und Prozessen schafft. Diese Technologien können die Effizienz, Qualität und Flexibilität entlang der gesamten Wertschöpfungskette verbessern.¹⁰¹

AR spielt eine zentrale Rolle in der vernetzten Produktion, da sie Echtzeitinformationen und Daten direkt in das Sichtfeld der Mitarbeitenden projiziert. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Überwachung von Maschinenzuständen und Produktionsabläufen, ohne

⁹⁹ <https://www.iese.fraunhofer.de/blog/device-integration-mit-basyx/>, Letzter Zugriff am 11.12.2024

¹⁰⁰ Siehe auch dazu: Stark et al., 2016, Schmäh et al., 2019.

¹⁰¹ Vgl. Orsolits et al., 2020

zwischen physischen und digitalen Interfaces wechseln zu müssen. Besonders in der Wartung und Instandhaltung entfaltet AR ihr Potenzial, indem Techniker:innen detaillierte Anleitungen und Reparaturhinweise direkt auf die Maschinen projiziert bekommen. Dies reduziert Fehler, minimiert Ausfallzeiten und steigert die Effizienz der Prozesse. In Schulungen und Trainings bietet AR immersive Erfahrungen, die es Mitarbeitenden erleichtern, komplexe Arbeitsabläufe schneller zu erlernen und sicher auszuführen.¹⁰²

In der Produktionsoptimierung hilft AR, Fehler zu vermeiden, indem Produktionsanweisungen und Qualitätskontrollrichtlinien präzise auf Arbeitsobjekte projiziert werden. Ebenso kann AR im Supply Chain Management die Überwachung von Lagerbeständen verbessern, indem Lagerarbeiter:innen in Echtzeit durch visuelle Hinweise unterstützt werden. In der Qualitätskontrolle bietet AR die Möglichkeit, Soll-Werte und Toleranzen direkt über physische Produkte zu legen, wodurch Abweichungen schneller erkannt werden.¹⁰³

VR ermöglicht eine vollständig immersive Umgebung, die für die Simulation und Planung von Produktionsprozessen genutzt werden kann. Vor der Implementierung neuer Produktionslinien oder Maschinen können Szenarien virtuell getestet und optimiert werden.¹⁰⁴

MR kombiniert Elemente von AR und VR und erlaubt die gleichzeitige Interaktion mit digitalen und physischen Elementen. In der vernetzten Produktion wird MR beispielsweise genutzt, um Prototypen virtuell in die reale Produktionsumgebung zu integrieren und so frühzeitig Anpassungen vorzunehmen. Sie ermöglicht zudem die Zusammenarbeit über geografische Distanzen hinweg, indem Expert:innen in Echtzeit auf virtuelle Modelle oder Produktionssysteme zugreifen können, während sie in der physischen Umgebung ihrer Kolleg:innen präsent bleiben.¹⁰⁵

4.6 Datenverwertung

Der letzte Bereich im Periodensystem beinhaltet Elemente zur Datenverwertung. Die Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen ermöglicht es, Produktionsprozesse nicht nur in Echtzeit zu überwachen, sondern auch zu optimieren und dadurch die Qualität und Effizienz erheblich zu steigern. Dabei kommt modernen computergestützten Verfahren, insbesondere der KI, eine Schlüsselrolle zu. KI-basierte Methoden, einschließlich maschinellen Lernens und Predictive Analytics, erlauben die Identifikation von Mustern, die Ableitung präziser Vorhersagen sowie die Integration heterogener Datenströme aus verschiedenen Quellen.

¹⁰² Ebd.

¹⁰³ Ebd.

¹⁰⁴ Ebd.

¹⁰⁵ Vgl. Orsolits et al., 2020.

4.6.1 Predictive Quality (PQ)

Predictive Quality umfasst den Einsatz von Datenanalysen und maschinellem Lernen, um die Qualität von Produkten während des Produktionsprozesses vorherzusagen und sicherzustellen. Ziel ist es, die Produktqualität zu erhöhen, Ausschuss und Nacharbeit zu minimieren und zu gewährleisten, dass die Endprodukte den Qualitätsstandards entsprechen. Hierbei werden Produktionsdaten, Qualitätskontrolldaten, Prozessparameter und Umgebungsbedingungen genutzt.¹⁰⁶

4.6.2 Predictive Maintenance (PM)

Predictive Maintenance bezieht sich auf die Nutzung von Datenanalysen und maschinellem Lernen, um den Zustand von Maschinen und Anlagen in Echtzeit zu überwachen und vorzusagen, wann Wartungsarbeiten erforderlich sind. Das Hauptziel ist es, ungeplante Ausfallzeiten zu minimieren und die Lebensdauer von Maschinen zu verlängern, indem Wartungsarbeiten vor einem Ausfall durchgeführt werden. Dabei werden Sensordaten, Maschinendaten, historische Wartungsdaten und Betriebsbedingungen genutzt.¹⁰⁷

4.6.3 Predictive Energy Consumption (PE)

Predictive Energy Consumption im Kontext vernetzter Produktion bezieht sich auf die Vorhersage des Energieverbrauchs in Produktionsprozessen durch den Einsatz fortschrittlicher Datenanalyse und maschineller Lerntechniken. In einer vernetzten Produktionsumgebung sind Maschinen, Systeme und Prozesse digital miteinander verknüpft, was eine umfassende Erfassung und Auswertung von Energiedaten ermöglicht. Insgesamt kann Predictive Energy Consumption Unternehmen dabei helfen, ihren Energieverbrauch effizienter zu gestalten, Kosten zu sparen und ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen, indem sie die Möglichkeiten der vernetzten Produktion und fortschrittlicher Analysetechniken ausschöpfen.¹⁰⁸

4.6.4 Predictive Demand (PD)

Die Vernetzung von Produktionsanlagen und -systemen ermöglicht das Sammeln großer Mengen an Daten, einschließlich historischer Verkaufszahlen, Produktionsraten, Wartungsinformationen, Lagerbestände sowie externer Faktoren wie Marktdaten und Wetterbedingungen. Predictive Demand Forecasting nutzt Analysetools, um Muster in diesen

¹⁰⁶ Vgl. Lee et al., 2019

¹⁰⁷ Siehe auch: Nzeako, et al., 2024, Oyewole et al., 2024, <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/deloitte-analytics/articles/iot-analytics-in-manufacturing.html>, <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/process-and-operations/us-predictive-maintenance.pdf>, letzte Zugriffe am 11.12.2024

¹⁰⁸ Vgl. Khafaga et al., 2023, Kapp et al., 2023, Faiq et al., 2023 sowie Khajavi et al., 2023

Daten zu erkennen, Schlussfolgerungen abzuleiten und zukünftige Nachfragen vorherzusagen. Maschinelles Lernen und KI spielen dabei eine zentrale Rolle, indem sie aus historischen Daten lernen und kontinuierlich mit neuen Informationen angereichert werden können, um präzisere Vorhersagen zu liefern.

Das Erfassen und Analysieren von Daten in Echtzeit in einer vernetzten Produktionsumgebung macht eine unmittelbare Anpassung auf Veränderungen in der Nachfrage oder im Produktionsprozess möglich, was zu dynamischen Produktionsplänen sowie zur Vermeidung von Engpässen oder Überproduktionen beiträgt. Präzise Vorhersagen erlauben Unternehmen zusätzlich ihre Lieferkette zu optimieren, Bestände besser zu verwalten und dadurch Kosten zu sparen.¹⁰⁹

4.6.5 Flexible Fertigungssysteme (FF)

Flexible Fertigungssysteme (FF) sind moderne Produktionsanlagen, die darauf ausgelegt sind, sich dynamisch und effizient an wechselnde Produktionsanforderungen und Produktvarianten anzupassen. Diese Systeme zeichnen sich durch ihre Modularität, hohe Automatisierung und kurze Umrüstzeiten aus. Die modularen Einheiten lassen sich leicht umkonfigurieren oder können erweitert werden. Automatisierte Werkzeuge wie Roboter und CNC-Maschinen spielen eine zentrale Rolle, da sie für unterschiedliche Aufgaben programmiert werden können, was eine schnelle und effiziente Anpassung ermöglicht.

Vernetzte Produktion gewährleistet, dass flexible Fertigungssysteme virtuell nahtlos mit anderen Produktionssystemen kommunizieren und Daten austauschen können. Dies sorgt für eine präzise Steuerung und Überwachung der Produktionsprozesse, eine bessere Planung und eine effizientere Ressourcennutzung. Grundsätzlich können flexible Fertigungssysteme in der vernetzten Produktion eine höhere Produktivität, Kosteneffizienz und Anpassungsfähigkeit erreichen.¹¹⁰

4.6.6 Agile Produktionsprozesse (AP)

Agile Produktionsprozesse im Kontext vernetzter Produktion ermöglichen eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, indem sie Echtzeit-Datenanalyse und -steuerung nutzen. Durch die Integration von Informationstechnologie und operativer Technologie sowie den Einsatz kollaborativer Roboter (Cobots) können Entscheidungen dezentral getroffen und Produktionsprozesse sofort optimiert werden.

Diese agilen Prozesse fördern Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit, unterstützen eine kundenzentrierte Produktion und eine kontinuierliche Verbesserung der

¹⁰⁹ Vgl. Seyedan et al., 2020, Punia et al., 2022 sowie Blackburn et al., 2015

¹¹⁰ Vgl. Wree et al. 2024, Brecher et al., 2021, Glenn, 2023, Tempelmeier et al., 2023 sowie Rüttimann et al., 2023

Produktionsprozesse, wodurch Unternehmen die Möglichkeit haben, schneller auf Marktveränderungen und individuelle Kundenwünsche reagieren können.¹¹¹

4.6.7 Automatisierte Anpassung (AA)

Die automatische Anpassung beschreibt die Fähigkeit moderner Produktionssysteme, Betriebsparameter autonom und dynamisch zu optimieren und sich flexibel an veränderte Bedingungen anzupassen. Dabei nutzen diese Systeme Technologien wie Sensorik, vernetzte Software und künstliche Intelligenz, um Prozesse auf Basis von Echtzeitdaten ohne menschliches Eingreifen zu steuern. Ziel ist es, die Effizienz, Qualität und Resilienz der Produktion zu maximieren.¹¹²

Produktionssysteme mit automatischer Anpassung zeichnen sich durch Selbstoptimierung, Flexibilität und Autonomie aus. Sie erfassen kontinuierlich Daten, etwa zu Materialqualität, Energieverbrauch oder Maschinenauslastung, und passen Prozesse eigenständig an. Künstliche Intelligenz spielt hierbei eine zentrale Rolle: Sie ermöglicht es, Muster in den Daten zu erkennen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Integration solcher Systeme erhöht die Anpassungsfähigkeit an hochdynamische Fertigungsumgebungen und steigert die Widerstandsfähigkeit gegen externe Störungen.¹¹³

Die automatische Anpassung ist ein entscheidender Pfeiler der vernetzten Produktion. Durch den Einsatz von Technologien wie KI und insbesondere Reinforcement Learning wird es möglich, Produktionssysteme flexibler, effizienter und widerstandsfähiger zu gestalten. Dies eröffnet nicht nur neue Potenziale für die Effizienzsteigerung, sondern trägt auch zur Nachhaltigkeit und Innovationsfähigkeit der Industrie bei.¹¹⁴

4.6.8 Kollaborative Roboter (KR)

Kollaborative Roboter, bekannt als Cobots, sind speziell darauf ausgelegt, sicher und effizient mit menschlichen Arbeitskräften zusammenzuarbeiten, ohne eine physische Trennung durch Schutzvorrichtungen zu erfordern. Ihre Ausstattung umfasst modernste Sicherheitsmechanismen, Sensorik und intelligente Steuerungssysteme, die eine präzise Wahrnehmung der Umgebung sowie eine adaptive Interaktion ermöglichen. Diese Technologien gewährleisten eine sichere Zusammenarbeit, auch in dynamischen Arbeitsumgebungen.

¹¹¹ Vgl. de Oliveira-Dias et al., 2023, Ding et al., 2023 sowie Agarwal et al., 2023

¹¹² <https://www.baer-automation.de/de/magazin-details/automatisierte-fertigung>. Letzter Zugriff am 11.12.2024

¹¹³ <https://www.baer-automation.de/de/magazin-details/automatisierte-fertigung>. Letzter Zugriff am 11.12.2024

¹¹⁴ Vgl. <https://www.produktion.de/technik/digitalisierung/wie-sich-intelligente-produktionssysteme-anpassen-koennen-443.html>, Letzter Zugriff am 11.12.2024, Klocke et al., 2017 sowie Baum et al. 2018

Im Kontext der vernetzten Produktion übernehmen Cobots Aufgaben, die repetitiv, monoton oder körperlich belastend sind. Dadurch können menschliche Arbeitskräfte ihre Kapazitäten auf anspruchsvollere und wertschöpfende Tätigkeiten konzentrieren. Cobots zeichnen sich durch ihre vergleichsweise niedrigen Anschaffungskosten und geringeren Platzbedarf aus, wodurch sie insbesondere für KMU eine attraktive Option darstellen. Unternehmen, die oft durch niedrige Stückzahlen und eine hohe Varianz in der Produktion geprägt sind, profitieren von der Flexibilität und Wirtschaftlichkeit dieser Roboterlösungen.¹¹⁵

Cobots werden ein hohes wirtschaftliches Potenzial zugeschrieben: Eine Studie von MarketsandMarkets prognostiziert, dass der Markt für kollaborative Roboter bis 2030 einen Wert von 11,8 Milliarden USD erreichen wird, gegenüber 1,9 Milliarden USD im Jahr 2024.¹¹⁶ Praktische Beispiele aus der Industrie verdeutlichen den Nutzen dieser Technologie. Bosch setzte Cobots in der Endkontrolle ein und erreichte eine Gesamtanlagen-effektivität von über 90%. Die Lösung amortisierte sich innerhalb von weniger als 20 Monaten und führte zu signifikanten Kosteneinsparungen im Vergleich zur vorherigen manuellen Inspektion.¹¹⁷

Cobots sind somit ein essenzieller Bestandteil moderner Produktionsumgebungen und fördern die Transformation hin zu effizienteren und flexibleren Prozessen. Sie verbinden technologische Innovation mit wirtschaftlicher Skalierbarkeit, was sie zu einem Schlüsselement der Industrie 4.0 macht.¹¹⁸

4.6.9 Künstliche Intelligenz (KI)

Künstliche Intelligenz kommt in allen Bereichen der vernetzten Produktion zum Einsatz, um Prozesse stärker zu automatisieren, Entscheidungen zu optimieren und die Anpassungsfähigkeit an dynamische Anforderungen zu verbessern und zu vereinfachen. Durch maschinelles Lernen und datengetriebene Ansätze können Produktionssysteme komplexe Zusammenhänge in Echtzeit analysieren, Vorhersagen treffen und eigenständig Verbesserungen implementieren. KI trägt dazu bei, Effizienz und Qualität entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu erhöhen, von der Ressourcenplanung bis zur Endkontrolle.

Ein besonders innovativer Teilbereich der KI ist das Reinforcement Learning (RL). Reinforcement Learning (be- oder verstärkendes Lernen) ermöglicht es einem Agenten, durch Interaktion mit seiner Umgebung eigenständig Strategien zu entwickeln, die einen Zielparameter maximieren, beispielsweise Effizienz oder Termintreue. Das Ziel ist es, dass der Agent selbstständig optimale Strategien erlernt. Der Agent soll dadurch fähig sein, zu erkennen, was für eine Strategie in bestimmten Situationen am erfolgreichsten ist. Im

¹¹⁵ Vgl. Görke et al., 2017

¹¹⁶ Vgl. MarketsandMarkets, 2024.

¹¹⁷ Vgl. McKinsey & Company, 2019.

¹¹⁸ Vgl. Görke et al., 2017 sowie MarketsandMarkets, 2024

Gegensatz zu konventionellen Methoden, deren Anpassungsfähigkeit an neue sich ständig ändernde Bedingungen eingeschränkt ist, können Reinforcement Learning-Algorithmen handlungsfähigere Agenten in dynamischen Umgebungen realisieren.¹¹⁹

Reinforcement Learning kann beispielsweise dabei helfen, Produktionsprozesse durch den Einsatz von Robotern zu automatisieren und diese auch für Multi-Task-Anwendungen in der industriellen Produktion einsatzfähig zu machen.¹²⁰ Auch in der intelligenten Fertigungsplanung trägt Reinforcement Learning dazu bei, Rüstzeiten und Durchlaufzeiten zu minimieren sowie die Termintreue zu erhöhen.¹²¹ Zudem werden diese Algorithmen häufig bei chemischen Prozessen für die sichere Regelung und Steuerung eingesetzt.¹²²

Reinforcement Learning kann somit die Robustheit und Anpassungsfähigkeit von Produktionen erhöhen.¹²³

4.7 Anwendungsfälle

Die Anwendungsfälle der vernetzten Produktion entstehen durch das Zusammenspiel verschiedener Elemente im Periodensystem der vernetzten Produktion.

Beispielsweise fasst der digitale Produktpass (DPP) alle relevanten Daten eines Produkts über dessen gesamten Lebenszyklus hinweg zusammen.¹²⁴ Bei dem Produktpass gewährleisten die Datenräume (Dr), ein sicherer Datenzugang (Dz) und den Datenaustausch (Da), dass alle Beteiligten – von der Produktion über die Logistik bis hin zur Entsorgung – Zugriff auf die aktuellen Produktdaten haben.¹²⁵ Ein digitaler Zwilling (DT) und die Visualisierung (Vi) ermöglichen die Visualisierung der Produktinformationen in Echtzeit, während Cybersicherheit (Cy) die Vertraulichkeit und rechtsgemäße Handhabung dieser sensiblen Daten gewährleistet. KI-Algorithmen analysieren die Daten, um beispielsweise Optimierungspotenziale in der Lieferkette oder bei der Recyclingfähigkeit aufzuzeigen. Extended Reality (XR) kann genutzt werden, um den Produktpass für Anwender intuitiv und interaktiv darzustellen.¹²⁶

Die Optimierung und Transparenz von Lieferketten profitieren ebenfalls von vernetzten Technologien wie Vorhersagemodellen für Predictive Demand (PD), um Bedarfsprognosen zu präzisieren und Engpässe zu vermeiden.¹²⁷ Flexible Fertigungssysteme (FF) und

119 <https://digitalzentrum-chemnitz.de/wissen/reinforcement-learning/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

120 <https://www.hnu.de/forschung/forschungs-und-transfereinrichtungen/technologie-transfer-zentrum-ttz-quenzburg/leistungen-und-forschungsschwerpunkte/reinforcement-learning-rl-in-der-robotik/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

121 <https://ind-ai.net/industrielle-produktion/abloesung-fuer-die-heuristik/2/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

122 <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv/dataanalytics/auto.html>, letzter Zugriff am 11.12.2024

123 <https://digitalzentrum-chemnitz.de/wissen/reinforcement-learning/>, letzter Zugriff am 11.12.2024

124 <https://www.bmvv.de/faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass>, <https://www.bmvv.de/umweltpolitische-digitalagenda/so-funktioniert>, letzter Zugriffe am 11.12.2024

125 <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/industry/digitaler-produktpass>, letzter Zugriff am 11.12.2024

126 Vgl. Hennig et al., 2024, Barwasser et al., 2024

127 Vgl. Fernández Muñoz et al., 2024, Vieweg et al., 2023.

agile Produktionsprozesse (AP) erlauben eine schnelle Anpassung an Veränderungen in der Nachfrage. Kommunikationsprotokollstandards für den Datenaustausch (Da) sichern eine reibungslose Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten der Lieferkette. Gleichzeitig bieten Visualisierung (Vi) und Extended Reality (XR) Möglichkeiten, Lieferkettenprozesse zu simulieren und zu analysieren. KI-gestützte Systeme (KI) erkennen Schwachstellen oder Ineffizienzen, während Cybersicherheit (Cy) sicherstellt, dass vertrauliche Informationen nicht kompromittiert werden.¹²⁸

In der vernetzten Produktion spielen Bedarfs- und Kapazitätsfertigungskonzepte zudem zunehmend eine zentrale Rolle bei der Optimierung von Produktionsprozessen. Durch die digitale Vernetzung von Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette können Produktionskapazitäten effizienter genutzt und Leerzeiten signifikant reduziert werden. Integrierte Softwaresysteme ermöglichen eine durchgängige Planung und Steuerung der Produktion, von der Auftragserfassung bis zur Auslieferung¹²⁹. Diese Systeme erlauben es Unternehmen, Aufträge flexibel zu verteilen und freie Kapazitäten bei Partnern oder Zulieferern zu nutzen. Durch Echtzeitdatenaustausch und intelligente Algorithmen können Produktionsaufträge dynamisch an die verfügbaren Ressourcen angepasst werden, was zu einer verbesserten Auslastung der Anlagen und kürzeren Durchlaufzeiten führt. Die Vernetzung ermöglicht zudem eine präzisere Bedarfsprognose und Kapazitätsplanung, wodurch Überproduktion vermieden und Just-in-Time-Fertigung optimiert werden kann. Diese kollaborative Nutzung von Produktionsressourcen steigert nicht nur die Effizienz einzelner Unternehmen, sondern erhöht auch die Wettbewerbsfähigkeit ganzer Produktionsnetzwerke.¹³⁰

¹²⁸ Vgl. Höppner et al., 2023

¹²⁹ <https://blog.a-w.com/vernetzung-entlang-der-value-chain>, letzter Zugriff am 11.12.2024

¹³⁰ <https://blog.telekom-mms.com/digital-stories/so-gelingt-die-effizienzsteigerung-von-betrieb-und-trieb-in-der-fertigungsindustrie>, <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Dossiers/A-Z/vernetzte-produktion.html>, <https://100prozent.digital/digital-vernetzt-gemeinsam-mit-kooperationen-mehr-erreichen/>, <https://www.produktion.de/technik/digitalisierung/effizientere-montage-durch-vernetzte-arbeitsprozesse-279.html>, <https://www.augmentir.com/de/blog/connected-enterprise>, letzte Zugriffe am 11.12.2024

5 Praxisbeispiele

Praxisbeispiele sind konkrete Digitalisierungsprojekte, die von Unternehmen erfolgreich umgesetzt wurden. Sie dienen als anschauliche Beispiele dafür, wie Digitalisierungslösungen in der Praxis angewendet werden und bieten anderen Unternehmen wertvolle Einblicke und Orientierungshilfen.

Ergänzend zur Literaturstudie, Interviews und die Erstellung des Periodensystems wurde im Forschungsprojekt für diesen Diskussionsbeitrag Beispiele von Projekten aus der Praxis erhoben. Diese werden nachfolgend dargestellt, um ein Verständnis dafür zu generieren, wie die Projekte im Bereich vernetzter Produktion in den Unternehmen tatsächlich aussehen.

Zu Beginn wird die Auswahl und das Vorgehen zur Erfassung der Digitalisierungsprojekte vorgestellt. Anschließend werden gesammelten Praxisbeispiele deskriptiv dargestellt. Danach werden die Praxisbeispiele mit den Elementen aus dem Bereich Datenverwertung des Periodensystems aus Kapitel 4.6 verglichen, um die Praxisrelevanz des Periodensystems zu verdeutlichen. Drittens werden aus der Literatur identifizierten Bedarfe und Herausforderungen der KMU in der vernetzten Produktion aus Kapitel 0 mit ausgewählten Beispielen aus der Praxis illustriert.

5.1 Auswahl der Praxisbeispiele

Die Auswahl der Praxisbeispiele konzentrierte sich auf solche, die einen Fokus auf vernetzte Produktion legen. Dabei wurden die Beispiele berücksichtigt, bei denen Teile der Produktion mit Sensoren über das Internet vernetzt werden und aus den Datenmengen relevante Informationen für andere Teile der Produktion abgeleitet werden können.

Für die Auswahl der Praxisbeispiele wurden weitere inhaltliche Kriterien herangezogen: Dazu zählen die Beteiligung von KMU bzw. die Eignung für KMU, die Marktreife der Anwendungen, die Integration digitaler Technologien und ob eine ausreichend verständliche Beschreibung des Projekts vorhanden ist, um die Lösung zu verstehen.¹³¹ Dies entspricht dem gleichen Vorgehen wie bei der Erstellung der Datenbank Praxisbeispiele@Mittelstand aus dem Diskussionsbeitrag von Papen et al.¹³²

Insgesamt wurden zwischen 400 und 500 Praxisbeispiele gesichtet. 22 Beispiele wurden in die Übersicht aufgenommen, sodass sich zusammen mit den bestehenden Beispielen aus der Datenbank Praxisbeispiele@Mittelstand insgesamt 72 Praxisbeispiele zu vernetzter Produktion in die Analyse aufgenommen wurden.

¹³¹ Vgl. Papen et al., 2022

¹³² Die Datenbank Praxisbeispiele@Mittelstand sowie die Studie finden sich unter www.wik.org.

In den meisten Fällen wurden die folgenden Quellen für die Recherche der Praxisbeispiele verwendet:

- Praxisbeispiele von Mittelstand-Digital / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)¹³³
- Landkarte Anwendungsbeispiele Industrie 4.0 der Plattform Industrie 4.0 / Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)¹³⁴
- Anwendungen der Plattform lernende Systeme¹³⁵ (Nachhaltigkeit-Karte)
- Online-Landkarte Wirtschaft digital der Industrie und Handelskammern¹³⁶
- VDI Zentrum Ressourceneffizienz¹³⁷
- nachhaltig.digital - Kompetenzplattform für Nachhaltigkeit und Digitalisierung im Mittelstand¹³⁸

Einige dieser Quellen werden nicht mehr gepflegt bzw. es werden keine neuen Beispiele mehr aufgenommen. Daher wurden in der vierten Iteration bis auf zwei Ausnahmen fast ausschließlich Praxisbeispiele aus dem Netzwerk Mittelstand Digital einbezogen.

5.2 Deskriptive Auswertung der ausgewählten Praxisbeispiele

Im Folgenden werden die identifizierten Praxisbeispiele im Bereich der vernetzten Produktion deskriptiv analysiert. Dabei stehen die Region, die Größe, der Wertschöpfungsbereich sowie der Reifegrad der Unternehmen im Fokus.

Regionsbezogene Auswertung

Für jedes Praxisbeispiel wurden die Anschrift, einschließlich Postleitzahl und Bundesland, des Unternehmens erfasst. Anhand dieser Geokoordinaten kann die Verteilung der Praxisbeispiele in Deutschland über eine Heatmap in Python visualisiert werden (siehe Abbildung 3).

133 Vgl. die Angebote auf den Seiten der Zentren im Netzwerk Mittelstand-Digital: <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Navigation/DE/Praxis/Kompetenzzentren/kompetenzzentren.html>

134 Vgl. <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/karte-anwendungsbeispiele-formular.html>

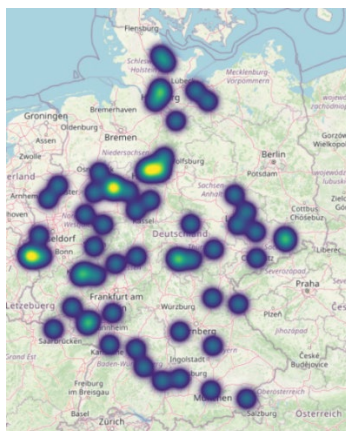
135 Vgl. <https://www.plattform-lernende-systeme.de/nachhaltigkeit-karte.html>

136 Vgl. <https://www.ihk.de/landkarte-digital>

137 Vgl. <https://www.ressource-deutschland.de/>

138 Vgl. <https://nachhaltig.digital/>

Abbildung 3: Verteilung der Praxisbeispiele in Deutschland

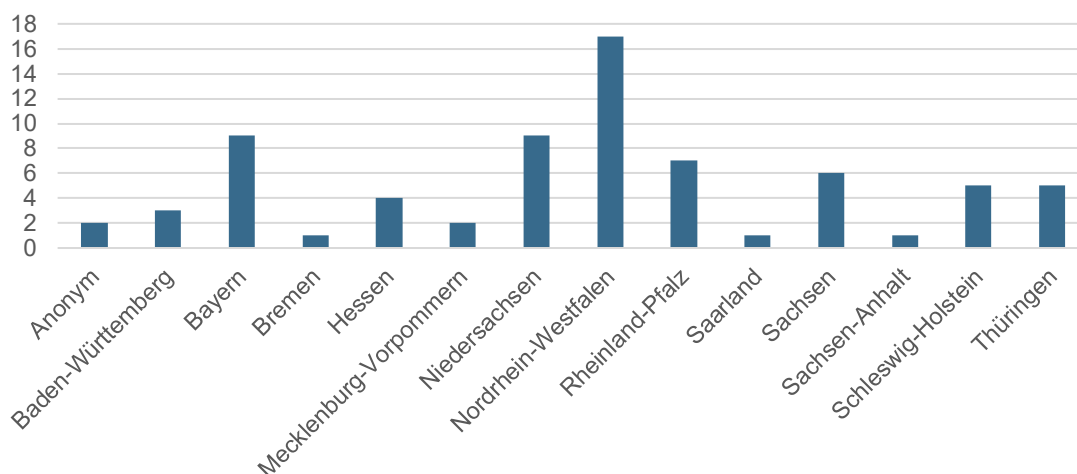


Quelle: Eigene Darstellung

Verteilung der Praxisbeispiele in Deutschland

Mit Ausnahme von Hamburg und Berlin sind Praxisbeispiele aus Unternehmen aller Bundesländer vertreten, von zwei Praxisbeispielen liegen keine Adressdaten vor. Auffällig ist, dass sich die Mehrheit der Praxisbeispiele in Unternehmen der alten Bundesländer, insbesondere in Nordrhein-Westfalen (17), Bayern (9) und Niedersachsen (9) sowie Rheinland-Pfalz (7) befindet. In den ostdeutschen Bundesländern sind vor allem Unternehmen aus Sachsen (6) und Thüringen (5) vertreten (siehe Abbildung 4).

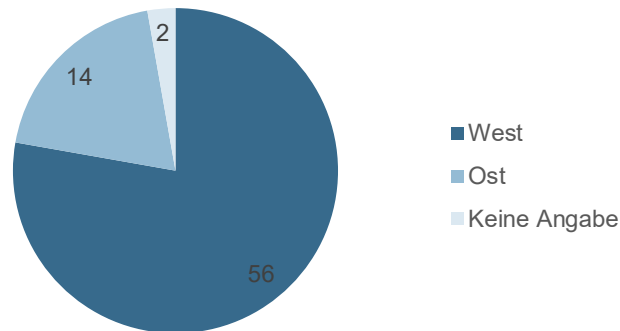
Abbildung 4: Unternehmen der Praxisbeispiele nach Bundesländern (N=72)



Quelle: Eigene Darstellung

Insgesamt stammen 56 der Praxisbeispiele aus den alten Bundesländern, lediglich 14 aus den neuen Bundesländern (siehe Abbildung 5).

Abbildung 5: Zuordnung der Unternehmen zu den neuen (Ost) und den alten (West) Bundesländern (N=72)



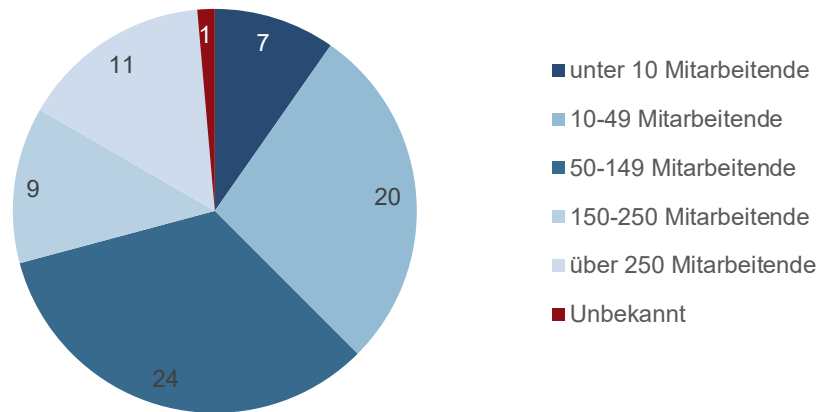
Quelle: Eigene Darstellung

Größenklassen

Die Unternehmensgröße spielt eine entscheidende Rolle bei der Digitalisierung, was sich besonders in einer wachsenden „Digital Gap“ zwischen Großunternehmen und KMU widerspiegelt.¹³⁹ Abbildung 6 zeigt, dass die erfassten Praxisbeispiele im Bereich der vernetzten Produktion überwiegend in mittleren Unternehmen mit 50 bis 149 Mitarbeitenden (24), aber auch in kleineren mit 10 bis 49 Mitarbeitenden (20) zu finden sind. Praxisbeispiele aus größeren Unternehmen mit über 250 Mitarbeitenden (11) sowie solchen mit 150 bis 250 Mitarbeitenden (9) sind weniger stark vertreten, ebenso liegt der Anteil an Kleinstunternehmen mit weniger als 10 Mitarbeitenden bei lediglich sieben Praxisbeispielen. Zu einem Unternehmen gibt es keine Angaben zur Größe.

¹³⁹ Vgl. Arendt, 2018

Abbildung 6: Größenklassen der Unternehmen (N=72)



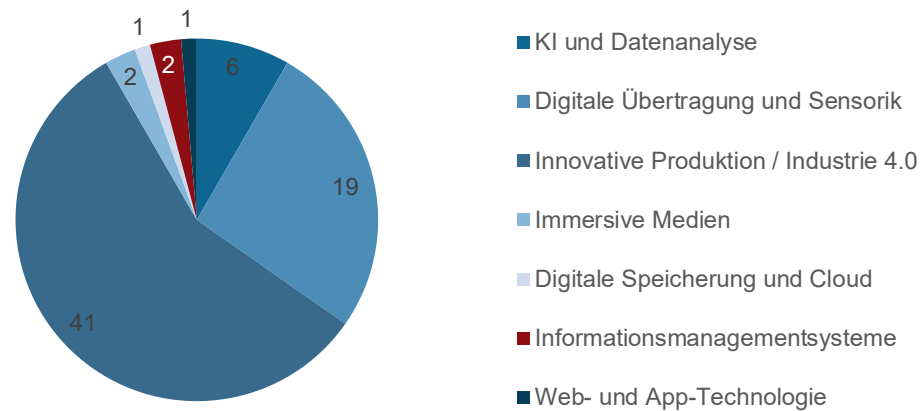
Quelle: Eigene Darstellung

Technologien

Hinsichtlich der eingesetzten Technologien in den Praxisbeispielen kommen vor allem Informationsmanagementsysteme zum Einsatz (41). Zudem setzen rund ein Fünftel der Beispiele Technologien im Bereich Digitale Übertragung und Sensorik ein (19). Weniger häufig vertreten sind KI und Datenanalyse (6), Immersive Medien (2), Informationsmanagementsysteme (2) sowie Digitale Speicherung und Cloud (1) und Web- und App-Technologie (1). Die Kategorien sind nicht immer vollständig trennscharf, Mehrfachnennungen liegen bei den Beispielen allerdings nicht vor (Abbildung 7).¹⁴⁰

¹⁴⁰ In Papen et al., 2021 wird die Technologieklassifizierung vorgenommen und erläutert.

Abbildung 7: Technologiebereiche entsprechend der entwickelten Technologiesortierung¹⁴¹

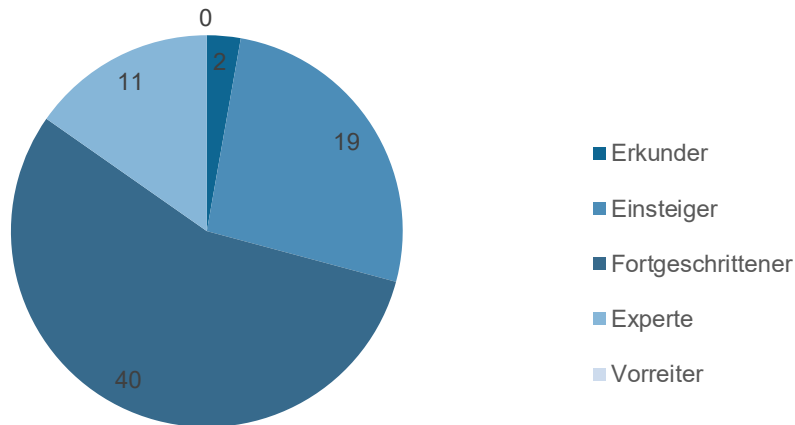


Quelle: Eigene Darstellung

Darüber hinaus wurden Mindestreifegrade erfasst, die ein Unternehmen erfüllen sollte, um eine konkrete Lösung implementieren zu können (Abbildung 8). Der größte Teil der Lösungen benötigt demnach die Reifegradstufe 3, den Fortgeschrittenen (40). Einsteigerfreundliche Lösungen mit der Reifegradstufe 2 machen rund ein Viertel der gesammelten Praxisbeispiele aus (19). Lösungen, die Expert:innenwissen als Reifegradstufe 4 benötigen, sind mit 11 Digitalisierungsprojekten hingegen weniger vertreten. Es werden zwei Lösungen für den geringstmöglichen Reifegrad 1 (Erkunder) in der Sammlung der Praxisbeispiele aufgenommen.

¹⁴¹ Vgl. Papen et al., 2021

Abbildung 8: Übersicht über Anteile der Reifegrade, die ein Unternehmen mindestens erreicht haben sollte, um die beschriebene Lösung zu implementieren. Reifegradeinschätzung basierend auf Reifegradmodell¹⁴²



Quelle: Eigene Darstellung

5.3 Erweiterte Auswertung

Für die erweiterte Auswertung werden die Praxisbeispiele mit den Ergebnissen aus den vorangehenden Kapiteln verglichen. Im Periodensystem der vernetzten Produktion sind neun verschiedenen Elemente für die der Datenverwertung definiert:

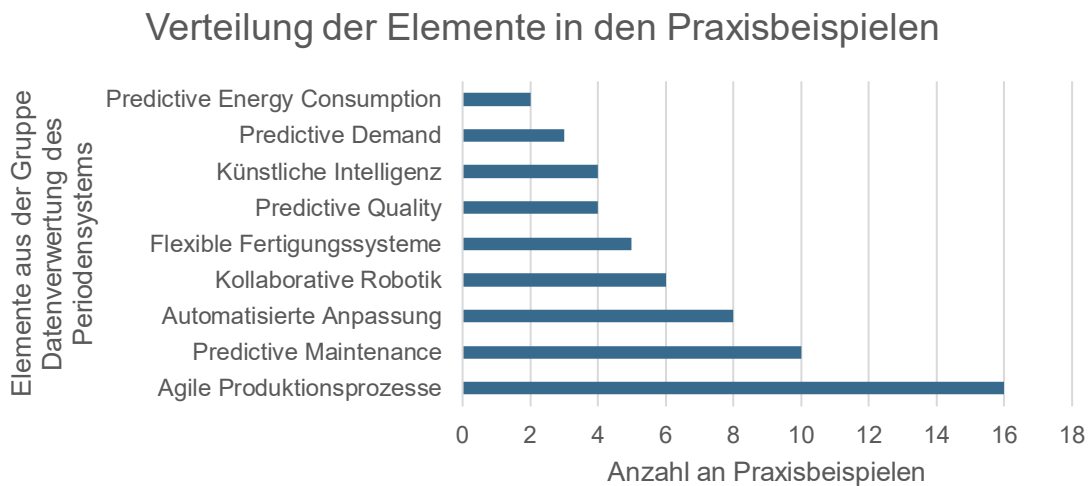
1. Predictive Quality
2. Predictive Maintenance
3. Predictive Energy consumption
4. Predictive Demand
5. Flexible Fertigungssysteme
6. Agile Produktionsprozesse
7. Kollaborative Robotik
8. Automatisierte Anpassung
9. Künstliche Intelligenz

In der Sammlung der Digitalisierungsprojekte wurde händisch geprüft, zu welcher der Kategorien die einzelnen Praxisbeispiele zugeordnet werden können. Somit werden die

¹⁴² Vgl. Hellge et al., 2019

Elemente der Datenverwertung des Periodensystems der vernetzten Produktion (siehe Kapitel 0) mit den Praxisbeispielen zusammengebracht. Ziel der erweiterten Auswertung ist es, für die Kategorien der Datenverwertung anschauliche, praktische Anwendungslösungen aufzuzeigen. Zudem konnte auch herausgefunden werden, dass die Elemente der Datenverwertung aus dem Periodensystem in den 72 Praxisbeispielen vertreten sind und somit neben der Theorie auch praktische Anwendbarkeit darstellen. Insgesamt konnte zu allen neun Kategorien mindestens ein Praxisbeispiel zugeordnet werden, siehe Abbildung 9.

Abbildung 9: Verteilung der Elemente aus dem Bereich Datenverwertung der Periodensystems der vernetzten Produktion in den Praxisbeispielen



Quelle: Eigene Darstellung

In der Kategorisierung der Praxisbeispiele wird deutlich, dass insbesondere drei Bereiche der Datenverwertung häufig vertreten sind: agile Produktionsprozesse, Predictive Maintenance und automatisierte Anpassung. Es handelt sich nicht um eine repräsentative Stichprobe, jedoch lässt sich aus den gesammelten Praxisbeispielen der KMU erkennen, dass schnelle und flexible Anpassungen eine zentrale Rolle in der Implementierung vernetzter Produktion haben. Weniger Praxisbeispiele finden sich zu vorausschauender Nachfrage (Predictive Demand) und dem vorausschauenden Energieverbrauch (Predictive Energy Consumption). Den gesammelten Praxisbeispielen kann in der Regel nicht nur ein Element der Datenverwertung zugeordnet werden (siehe hierfür Kapitel 4.7). In Abbildung 9 wurde die Zuordnung so vorgenommen, dass genau das Element aus der Datenverwertung gewählt wurde, welches am besten für das Praxisbeispiel geeignet ist.

Zusätzlich zum Periodensystem der vernetzten Produktion haben sich in Kapitel 3.2.2 vier zentrale Bedarfe und Kapitel 3.2.3 vier zentrale Hemmnisse herauskristallisiert. Diese Bedarfe und Herausforderungen haben sich durch die Einschätzungen aus den

qualitativen Expert:inneninterviews bestätigt. Die Verbesserung administrativer Rahmenbedingungen als ein Bedarf ist kein Bestandteil eines Praxisprojekts und somit nicht in der Anwendung beschrieben. Ebenso werden von KMU Projektangebote zur Förderung konkreter Aufgabenstellungen nachgefragt. Dieser Bedarf besteht, kann jedoch nicht in einzelnen Digitalisierungsprojekten veranschaulicht werden, da es sich eine Einflussgröße aus der Politik handelt. Daher werden in der erweiterten Auswertung zwei der vier Bedarfe in der Sammlung der Praxisbeispiele untersucht. Die Bedarfe und Herausforderungen lauten:

Bedarfe

- Modernisierung von Bestandsanlagen
- Kompetenzentwicklung für Führungskräfte und Mitarbeitende

Herausforderungen

- Fachkräftemangel
- Mangelnde Standardisierung und fehlender Überblick
- Defizite und Unsicherheiten in der IT-Sicherheit und IT-Infrastruktur
- Mangelnde strategische Orientierung

Zur Veranschaulichung, wie diese Herausforderung in der Praxis überwunden wurden und welche Bedarfe aus der Literaturrecherche und den Expert:inneninterviews sich in den Praxisbeispielen wiederfinden, werden nachfolgend vier Praxisbeispiele in Form von Steckbriefen vorgestellt. Die Steckbriefe beinhalten deskriptive Daten des Unternehmens und eine Kurzbeschreibung. Es werden jeweils zwei Praxisbeispiele illustriert, die einen der Bedarfe bedient haben bzw. bei der eine der genannten Herausforderungen überwunden wurde.

Abbildung 10: Ausgewählte Praxisbeispiele zur Veranschaulichung der Bedarfe und Herausforderungen von KMU

<p style="text-align: right;">Praxisbeispiel ✕</p> <p>Deskriptive Daten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Titel Digitalisierung im Maschinenbau • Branche Maschinenbau / Software / Steuerungssoftware • Region Niedersachsen • Größe 50 bis 149 Mitarbeiter • Reifegrad 3 (3 – Fortgeschritten) 	<p style="text-align: right;">Praxisbeispiel ✕</p> <p>Deskriptive Daten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Titel Die digitale Fabrik • Branche Maschinenbau / Herstellung vom Pumpen • Region Schleswig-Holstein • Größe 50 bis 149 Mitarbeiter • Reifegrad 3 (3 – Fortgeschritten)
<p>Bedarf: Modernisierung von Bestandsanlagen</p> <p>Das Unternehmen benötigte eine effizientere Produktionssteuerung und die Integration älterer Maschinen. Dafür wurden alle Maschinen vernetzt und ältere Anlagen mittels Retrofit angepasst. Eine KI optimiert die Prozesse, verteilt Aufträge und bestellt automatisch Material. Zusätzlich bietet das Unternehmen jetzt Steuerungssoftware und Schnittstellen für Industrie 4.0 an.</p>	<p>Bedarf: Kompetenzentwicklung für Führungskräfte und Mitarbeitende</p> <p>Das Unternehmen förderte die Kompetenz der Mitarbeitenden durch ihre Einbindung als Key-User bei der Einführung eines digitalen Workspaces. Dieser vereint alle Tools, löst Kompatibilitätsprobleme und bietet Echtzeitinformationen zur Produktion und zum Lagerbestand.</p>
<p style="text-align: right;">Praxisbeispiel ✕</p> <p>Deskriptive Daten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Titel Visualisierung und Aufbereitung von Maschinendaten • Branche Maschinenbau • Region Schleswig-Holstein • Größe 10 bis 49 Mitarbeiter • Reifegrad 3 (3 – Fortgeschritten) 	<p style="text-align: right;">Praxisbeispiel ✕</p> <p>Deskriptive Daten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Titel Agiles Planen • Branche Feinwerktechnik • Region Schleswig-Holstein • Größe 50 bis 149 Mitarbeiter • Reifegrad 3 (3 – Fortgeschritten)
<p>Herausforderung: Mangelnde Standardisierung und fehlende Übersicht</p> <p>Im Maschinenbauunternehmen werden nur begrenzt Daten gesammelt. Durch Software und zusätzliche Sensoren in den Maschinen möchte das Unternehmen die Daten visualisieren und so aufbereiten, dass eine Integration in bestehende Systeme möglich ist.</p>	<p>Herausforderung: Mangelnde strategische Orientierung</p> <p>Die mangelnde strategische Orientierung zeigt sich in langsamen Prozessen bei der Auftragsannahme zwischen den Schwesterunternehmen. Ziel ist es, die Planungszeit um 70% zu verkürzen. Ein digitaler Zwilling, der mit dem ERP-System verknüpft wird, soll Transparenz schaffen und die Planung effizienter gestalten.</p>

Quelle: Eigene Darstellung

5.4 Zwischenfazit

Die Sammlung und Auswertung von Praxisbeispielen im Bereich der vernetzten Produktion bieten einen wertvollen Einblick zur Veranschaulichung der Digitalisierungserfolge von KMU. Sie verdeutlichen, wie Unternehmen unterschiedlicher Größe und aus verschiedenen Regionen Projekte zur vernetzten Produktion erfolgreich implementiert haben. Zentrale Bedarfe wie agile Produktionsprozesse (AP), flexible Fertigungssysteme (FF) und automatisierte Anpassungen (AP) sind besonders häufig in den gesammelten Digitalisierungsprojekten vertreten. Die Gegenüberstellung mit den Elementen der Datenverwertung aus dem entwickelten Periodensystem der vernetzten Produktion unterstreicht die Praxisrelevanz der theoretischen Kategorien. Alle neun Elemente der Datenverwertung konnten in den konkreten Digitalisierungsprojekten abgedeckt werden, was auf die breite Anwendbarkeit des Periodensystems hinweist.

Die weitergehende Auswertung, welche die zentralen Bedarfe und Herausforderungen aus der Literatur und den Expert:inneninterviews mit den Praxisbeispielen verknüpft, bietet tiefere Einblicke in die Digitalisierungsprojekte. Es wird deutlich, dass die Modernisierung von bestehenden Maschinen und Anlagen in den individuellen Projekten ganz unterschiedlich je nach Bedarf umgesetzt werden kann. Außerdem wird deutlich, dass es auch der Einbindung der Mitarbeitenden bedarf, um solche Digitalisierungsprojekte umzusetzen und neue Technologien im Unternehmen zielgerichtet einzubetten. In den Praxisbeispielen spiegeln sich auch die Herausforderungen aus der Literatur klar wider. Dem Fachkräftemangel wird durch KI-gestützte Automatisierung entgegengewirkt, während standardisierte IT-Infrastrukturen die Datenqualität verbessern. Die strategische Orientierung wird durch den Einsatz digitaler Zwillinge unterstützt, welche präzise Entscheidungsgrundlagen bieten.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Der Diskussionsbeitrag zur vernetzten Produktion in KMU zeigt die aktuellen Herausforderungen, Bedarfe und Perspektiven im Kontext der Digitalisierung von Produktionsprozessen identifiziert und praxisnahe Lösungsansätze aus der Anwendung auf.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche und der Interviews zeigen, dass eine signifikante Diskrepanz zwischen der wahrgenommenen Relevanz und der tatsächlichen Implementierung von vernetzten Produktionstechnologien besteht. KMU haben erste Schritte in Richtung Digitalisierung unternommen, doch es mangelt oft an Ressourcen, Fachwissen und den notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen, um diese Technologien vollständig zu integrieren. Die Bedarfsanalyse identifiziert zentrale Anforderungen, wie die Notwendigkeit, bestehende Produktionssysteme in digitale Netzwerke zu integrieren, die Qualifikation von Fachkräften sicherzustellen und die Datensicherheit zu gewährleisten. Zudem werden zahlreiche Hemmnisse wie finanzielle, technische und organisatorische Barrieren aufgezeigt, die vor allem durch mangelnde Standardisierung und Unsicherheiten im Bereich der IT-Sicherheit verstärkt werden. Diese Erkenntnisse beantworten die Forschungsfrage zu den Bedarfen und Hemmnissen in der vernetzten Produktion (Forschungsfrage 2).

Um die Forschungsfrage zu den Ansätzen und Grundlagen der vernetzten Produktion zu beantworten, wurde ein Periodensystem für die vernetzte Produktion entwickelt (Forschungsfrage 1). Basierend auf der Literaturrecherche werden vier Hauptbereiche unterschieden: organisatorische Readiness, technische Readiness, Datendarstellung und Datenverwertung. Die organisatorische Readiness umfasst Aspekte wie den Datenzugang, Cybersicherheit und Qualifikation. Die technische Readiness wird durch Elemente wie cyberphysische Systeme, Datennetze und digitale Zwillinge strukturiert. In der Kategorie der Informationsdarstellung spielen Technologien wie Visualisierung und Extended Reality eine zentrale Rolle. Schließlich zeigt der Bereich der Datenverwertung des Periodensystems mit Elementen wie Predictive Quality und Predictive Maintenance, dass KMU bereits von der Anwendung dieser Technologien profitieren können, jedoch noch Potenziale ungenutzt bleiben. Diese Ergebnisse belegen, wie die verschiedenen Elemente der vernetzten Produktion zusammenwirken und die Innovationsfähigkeit von KMU steigern können.

Anhand von Praxisbeispiele aus KMU wurden die identifizierten Bedarfe und Herausforderungen durch konkretere Praxisbeispiele verdeutlicht (Forschungsfrage 3). Hierbei wurden für mindestens zwei Bedarfe und vier zentrale Herausforderungen aus Kapitel 2 passende Praxisbeispiele gefunden, die die Umsetzung in der Praxis widerspiegeln. Beispielsweise verdeutlichen die Steckbriefe der Digitalisierungsprojekte von KMU die Notwendigkeit zur Modernisierung von Bestandsanlagen und die Integration digitaler Technologien in bestehende Produktionsprozesse. In diesen Beispielen mussten Unternehmen bestehende Maschinen nachrüsten oder adaptieren, um sie mit modernen Technologien wie IoT und KI kompatibel zu machen. Ebenso wurden Herausforderungen, wie

die mangelnde Standardisierung durch diese Praxisbeispiele verdeutlicht. Ziel ist es, die Schwierigkeiten, denen Unternehmen bei der Umsetzung vernetzter Produktion begegnen, klar herauszuarbeiten und Lösungen in konkreten Projekten aufzuzeigen. Die Praxisbeispiele veranschaulichen, wie KMU diese Barrieren überwunden haben und stellen eine Verbindung zwischen den theoretischen Herausforderungen und den praktischen Lösungen her.

Eine eindeutige und belastbare Prognose für zukünftige Entwicklungen zu erstellen, konnte in dem Forschungsprojekt nicht umgesetzt werden (Forschungsfrage 4). Auf der einen Seite setzen KMU nur langsam die vernetzte Produktion um. Mindestens jedes fünfte KMU hat erste Schritte in Richtung Digitalisierung unternommen, etwa durch die Einführung von ERP-Systemen oder den Einsatz von smarten Geräten und Sensoren zur Datenanalyse.¹⁴³ Trotz dieser ersten Schritte bleibt die Implementierung komplexer Konzepte wie einer vernetzten, autonomen Produktion in vielen Unternehmen begrenzt. Strukturelle und technologische Barrieren müssen hierfür überwunden werden. Auf der anderen Seite können Treiber wie Wettbewerbsdruck oder Regulatorik die Entwicklung stark beeinflussen. Die Expert:inneninterviews bestätigen diese Einschätzung: In Branchen mit hohem Wettbewerbs- und Innovationsdruck sehen die befragten Expert:innen die vernetzte Produktion als ein wesentliches Instrument zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit. Dies wird als besonders wichtig eingeschätzt, da Unternehmen von globalen Märkten und sich schnell ändernden Kundenanforderungen betroffen sind. Ein Experte betonte, dass ohne den Einsatz von vernetzten Systemen KMU in den nächsten 10 Jahren nicht mehr konkurrenzfähig seien.

Das Forschungsprojekt liefert wertvolle Erkenntnisse, weist jedoch auch einige Limitationen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Zum einen beschränkt sich die Analyse auf eine begrenzte Anzahl an Interviews und Praxisbeispielen, was bedeutet, dass die Ergebnisse nicht pauschal auf alle KMU übertragbar sind. Ein weiteres Problem stellt die schnelle technologische Entwicklung dar, die eine langfristige Prognose erschwert. Technologische Innovationen und sich schnell ändernde Marktsituationen führen dazu, dass sich die Relevanz bestimmter Technologien und Konzepte im Laufe der Zeit verändern kann.

Der Vergleich bestehender Reifegradmodelle zum Thema Industrie 4.0, wie er in aktuellen Studien bereits erfolgt, liefert wertvolle Einsichten, welche Modelle am besten geeignet sind, den digitalen Transformationsprozess in KMU zu unterstützen.¹⁴⁴ Hierbei könnte untersucht werden, wie diese Modelle konkret in der Praxis angewendet werden und wie sie mit dem entwickelten Periodensystem der vernetzten Produktion kombiniert werden kann. Das Periodensystem der vernetzten Produktion könnte als Grundlage dienen, um die Fortschritte von KMU in Bezug auf organisatorische und technische

¹⁴³ Vgl. Destatis, 2024

¹⁴⁴ Schuhmacher, 2022 vergleicht und beurteilt in seiner Studie zehn Industrie 4.0-Reifegradmodelle.

Readiness sowie Datendarstellung und Datenverwertung innerhalb eines Reifegradmodells zu messen.

Ein tiefergehender Blick auf die einzelnen Elemente des Periodensystems der vernetzten Produktion könnte interessante Erkenntnisse liefern. Es wäre eine wertvolle Ergänzung der Forschung, zu untersuchen, welche Handlungsempfehlungen sich aus den verschiedenen Elementen der vernetzten Produktion für Politik und Regulierung ableiten lassen, um die digitale Transformation von KMU gezielt voranzutreiben und die Umsetzung von Industrie 4.0 in der Praxis zu erleichtern. Zudem kann das Thema Datenräume in diesem Zusammenhang weiter vertieft werden, da diese eine zentrale Rolle für die Vernetzung und den Austausch von Daten zwischen Unternehmen und innerhalb von Produktionsnetzwerken spielen. Eine genaue Analyse von Datenräumen könnte aufzeigen, wie KMU durch den Zugang zu verlässlichen und sicheren Datenräumen gestärkt werden können.

7 Literaturverzeichnis

- Agarwal, V., Hameed, A. Z., Malhotra, S., Mathiyazhagan, K., Alathur, S., & Appolloni, A. (2023): Role of Industry 4.0 in agile manufacturing to achieve sustainable development. *Business Strategy and the Environment*, 32(6), 3671-3688.
- Anderl, R., Picard, A., Wang, Y., Fleischer, J., Dosch, S., Klee, B., Bauer, J. (2015): Leitfaden Industrie 4.0 - Orientierungshilfe für die Einführung in den Mittelstand. Zugriff am 10.12.2024. https://www.researchgate.net/publication/321854095_Leitfaden_Industrie_40_-_Orientierungshilfe_fur_die_Einfuehrung_in_den_Mittelstand
- Appelfeller, W., Feldmann, C. (2018): Die digitale Transformation des Unternehmens. Springer Berlin Heidelberg. Zugriff am 10.12.2024. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-65413-2>
- Arendt, L. (2018): Barriers to ICT adoption in SMEs: How to Bridge the Digital Divide?. In *Journal of Systems and Information Technology*, 10(2), S.93-108.
- Arnold, C., Kiel, D., Voigt, K. I. (2016): How the industrial internet of things changes business models in different manufacturing industries. *International Journal of Innovation Management*, 20(08), 1640015.. HOW THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS CHANGES BUSINESS MODELS IN DIFFERENT MANUFACTURING INDUSTRIES | Request PDF
- Babel, W. (2024): Systemintegration in Industrie 4.0 und IoT: Vom Ethernet bis hin zum Internet und OPC UA. Springer-Verlag.
- Barwasser, A., Schuseil, F., Werner, A., Zimmermann, N. (2024): Der Digitale Produktpass.
- Baum, C. (2018): Industrie 4.0-Vernetzte, adaptive Produktion. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT). Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen. Aachen.
- Becker, W., Ulrich, P., Botzkowski, T. (2017): Industrie 4.0 im mittelstand: best practices und implikationen für KMU. Springer-Verlag.
- Bitkom (2018): Digitalisierung gestalten mit dem Periodensystem der Künstlichen Intelligenz. Digitalisierung gestalten mit dem Periodensystem der Künstlichen Intelligenz | Leitfaden 2018 | Bitkom e. V.
- Bitkom (2022): Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken, Zugriff am 10.12.2024. Industrie 4.0 – so digital sind Deutschlands Fabriken
- Bitkom Research (2022): Digitale Transformation - Digitale Wertschöpfungsketten und Geschäftsmodelle in der deutschen Industrie. Im Auftrag von Autodesk GmbH. Zugriff am 10.12.2024. <https://bitkom-research.de/sites/default/files/Bitkom%20Research%20Studie%202022.pdf>
- Bitkom (2023): Datenökonomie – Wo steht die deutsche Wirtschaft? Zugriff am 10.12.2024. <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Unternehmen-oeffnen-sich-Datenoekonomie>
- Bitkom (2024): Digitalisierung der Wirtschaft. Zugriff am 13.12.2024. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2024-02/240229Bitkom-ChartsDigitalisierung-der-Wirtschaftfinal.pdf>
- Blackburn, R., Lurz, K., Priebe, B., Göb, R., & Darkow, I. L. (2015): A predictive analytics approach for demand forecasting in the process industry. *International Transactions in Operational Research*, 22(3), 407-428
- BMWK (2023): Förderkonzept zur Unterstützung der Industrieinitiative „Manufacturing-X“, zuletzt abgerufen am 10.12.2024 https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Manx_Foerderkonzept.html
- Brecher, C., Weck, M. (2021): Roboter und Robotersteuerungen. In: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 3*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46569-1_13.
- Büchel, J., Bakalis, D., Scheufen, M. (2024): Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland, Langfassung der Ergebnisse des Digitalisierungsindex im Rahmen des Projekts „Entwicklung und Messung der Digitalisierung der Wirtschaft am Standort Deutschland“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und

- Klimaschutz (BMWK), Köln. Zugriff am 10.12.2024. <https://www.iwkoeln.de/studien/jan-buechel-dennis-bakalis-marc-scheufen-digitalisierung-der-wirtschaft-in-deutschland-2023.html>
- BSI - Leitfaden zur Einführung von Intrusion-Detection-Systemen, BSI - Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik - BSI-Leitfaden zur Einführung von Intrusion-Detection-Systemen (Zugriff am 10.12.2024).
- Ding, B., Ferras Hernandez, X., Agell Jane, N. (2023): Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies: an integrative approach. *Production planning & control*, 34(5), 442-458.
- Drath, R., Mosch, C., Hoppe, S., Faath, A., Barnstedt, E., Fiebiger, B., Schlögl, W. (2023): Diskussionspapier–Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML. Technical Report. AutomationML eV and Industrial Digital Twin Association (IDTA) and OPC Foundation and VDMA.
- KfW (2024): KfW-Innovationsbericht Mittelstand 2023 Innovationstätigkeit im Mittelstand tritt auf der Stelle. Zugriff am 10.12.2024. KfW-Innovationsbericht Mittelstand 2023
- Destatis (2024): IKT-Indikatoren für Unternehmen: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige, Beschäftigtengrößeklassen. Zugriff am 10.12.2024. <https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/url/13ee3b9c>
- de Oliveira-Dias, D., Maqueira-Marin, J. M., Moyano-Fuentes, J., Carvalho, H. (2023): Implications of using Industry 4.0 base technologies for lean and agile supply chains and performance. *International Journal of Production Economics*, 262, 108916.
- Drath, R., Mosch, C., Hoppe, S., Faath, A., Barnstedt, E., Fiebiger, B., Schlögl, W. (2023): Diskussionspapier–Interoperabilität mit der Verwaltungsschale, OPC UA und AutomationML. Technical Report. AutomationML eV and Industrial Digital Twin Association (IDTA) and OPC Foundation and VDMA.
- Ehemann, T., Tafvizi Zavareh, M., Göbel, J. C., Dupont, S., Zink, K.J., Siedler, C., Aurich, J. C. (2021): Mit dem InAsPro-Transformationskonzept die Digitalisierung planen. In: Bauer, W., Mütze-Niewöhner, S., Stowasser, S., Zanker, C., Müller, N. (eds) *Arbeit in der digitalisierten Welt*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-62215-5_14
- Europäische Kommission (2003): Empfehlung der Kommission - vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. Zugriff am 10.12.2024. eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003H0361
- Eurostat Data Browser (2024): ICT usage in enterprises (isoc_e). Zugriff am 09.04.2024. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/isoc_eb_jotn2__custom_14098764/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=fb89b035-9c3b-4ad9-bb67-1ec1309b249d
- Faiq, M., Tan, K. G., Liew, C. P., Hossain, F., Tso, C. P., Lim, L. L., ...Shah, Z. M. (2023): Prediction of energy consumption in campus buildings using long short-term memory. *Alexandria Engineering Journal*, 67, 65-76.
- Fechtelpeter, C., Heim, Y., Löffler, T., Niewöhner, N. (2019): Vorstudie zur Entwicklung einer bedarfs- und nutzergerechten Unterstützung von KMU bei der Einführung und Anwendung von Industrie 4.0. Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0.
- Fraunhofer IPK (2024): Maßgeschneiderte Skills. Letzter Zugriff 11.12.2024. <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/medien/futur/futur-2024-1/massgeschneiderte-skills.html>
- Froschauer, G., Ropin, D. F. H., & Seybold, M. K. (2023): Der wechselseitige Einfluss des Arbeitskräftemangels und des Digitalisierungs- und Automatisierungsgrades in produzierenden Unternehmen in der Region Innviertel.
- Gandert, E. (2024): Digitalisierung schließt Lücken im Fachkräftemangel. *CITplus*, 27: 24-26. <https://doi.org/10.1002/citp.202400909>
- Görke, M., Blankemeyer, S., Pischke, D., Oubari, A., Raatz, A., Nyhuis, P. (2017): Sichere und akzeptierte Kollaboration von Mensch und Maschine: Integrierte Betrachtung technischer und nicht technischer Gestaltungsfaktoren für die Einführung nachhaltiger und effizienter kollaborativer Montagesysteme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(1-2), 41-45.

- Hellge, V., Schröder, D., Bosse, C. (2019): Der Readiness-Check Digitalisierung - Ein Instrument zur Bestimmung der digitalen Reife von KMU. Letzter Zugriff am 29.11.2024. https://digitalzentrum-kaiserslautern.de/wp-content/uploads/2021/08/Broschuere_Readiness_Check_Digitalisierung_Januar_2019_final.pdf
- Hennig, S., Schulze, B., Wallisch, F., & Anke, J. (2024): Mit Low-Code vom digitalen Produktpass bis zur Automatisierung ganzer Wertschöpfungsketten. *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 61(5), 1256-1277.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016): Design principles for industrie 4.0 scenarios. In 2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS) (pp. 3928-3937). IEEE.
- Höppner, P., Wölfl, A. (2023): Mit KI, Big Data und Plattformen zu resilienteren globalen Lieferketten. *Bauwirtschaft: Droht ein Absturz in der Baubranche?*, 65.
- IfM Bonn (2016): KMU-Definition des IfM Bonn. Zugriff am 10.12.2024. [https://www.ifm-bonn.org/definitionen-kmu-definition-des-ifm-bonn](https://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn)
- IfM Bonn (2024): Wirtschaftsbereichsstruktur der Unternehmen. Zugriff am 05.12.2024. https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/statistik/mittelstand_im_einzelnen/dokumente/Unt_2022_D_BR-STR.pdf
- IfM Bonn (2024b): Kennzahlen der KMU nach Definition der EU-Kommission. Zugriff am 10.12.2024. <https://www.ifm-bonn.org/statistiken/mittelstand-im-ueberblick/kennzahlen-der-kmu-nach-definition-des-ifm-bonn/kennzahlen-deutschland>
- IFO-Institut (2023): <https://www.ifo.de/medienbeitrag/2023-04-10/daten-sind-das-erdoel-des-21-jahrhunderts-deutschland-wird-es-nicht>
- International Data Space Association (2022): Data spaces overview - Let's build the future data economy!. Zugriff am 10.12.2024. https://www.hannovermesse.de/apollo/hannover_messe_2022/obs/Binary/A1142011/IDSA%20Data%20space%20overview_web.pdf
- Industrie-Wegweiser (2024): Zugriff am 10.12.2024, <https://industrie-wegweiser.de/5-digitale-geschaeftsmodelle-fuer-die-industrie/>
- Khafaga, D. S., El-kenawy, E. S. M., Alhussan, A. A., Eid, M. M. (2023): Forecasting energy consumption using a novel hybrid dipper throated optimization and stochastic fractal search algorithm. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 37(2), 2117-2132.
- Kapp, S., Choi, J. K., Hong, T. (2023): Predicting industrial building energy consumption with statistical and machine-learning models informed by physical system parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 172, 113045.
- Karmakar, A., Dey, N., Baral, T., Chowdhury, M., Rehan, M. (2019): Industrial internet of things: A review. In 2019 international conference on opto-electronics and applied optics (optronix) (pp. 1-6). IEEE.
- Khajavi, H., Rastgoo, A. (2023): Improving the prediction of heating energy consumed at residential buildings using a combination of support vector regression and meta-heuristic algorithms. *Energy*, 272, 127069..
- Kiesel, R., Pothen, M., Arntz, K., Bergs, T., Schmitt, R. H. (2020): Interoperabilität als Erfolgsfaktor für die vernetzte, adaptive Produktion. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115(5), 344-347.
- Klocke, F., Bergs, T., Bobek, T., Huwer, T., Liu, G., Pothen, M., Staasmeyer, J.-H., Winands, K. (2017): Vernetzte, adaptive Produktion. *Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT*
- Lee, J., Bagheri, B., Kao, H. A. (2015): A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, 3, 18-23.
- Lee, S. M., Lee, D., Kim, Y. S. (2019): The quality management ecosystem for predictive maintenance in the Industry 4.0 era. *International Journal of Quality Innovation*, 5(1), 4.
- Ludwig, T., Kotthaus, C., Stein, M., Durt, H., Kurz, C., Wenz, J., ..., Wulf, V. (2016): Arbeiten im Mittelstand 4.0-KMU im Spannungsfeld des digitalen Wandels. *HMD Prax. Wirtsch.*, 53(1), 71-86.

- Maiwald, M. (2018): Voll integrierte und vernetzte Systeme und Prozesse-Perspektive: Smarte Sensorik, Aktorik und Kommunikation. *atp magazin*, 60(10), 70-85.
- Malik, P. K., Sharma, R., Singh, R., Gehlot, A., Satapathy, S. C., Alnumay, W. S., ..., Nayak, J. (2021): Industrial Internet of Things and its applications in industry 4.0: State of the art. *Computer Communications*, 166, 125-139.
- McKinsey & Company (2019): Industry 4.0 Capturing value at scale in discrete manufacturing. Zugriff am 10.12.2024. <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/advanced%20electronics/our%20insights/capturing%20value%20at%20scale%20in%20discrete%20manufacturing%20with%20industry%204%200/industry-4-0-capturing-value-at-scale-in-discrete-manufacturing-vf.pdf>
- MarketsandMarkets (2024): "Collaborative robots, market share & growth report 2030". Zugriff am 10.12.2024. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/collaborative-robots-market>
- Mesloh, M. (2021): Digitale Integration – Chancen für kleine und mittelständische Unternehmen in Deutschland, *Wirtschaftsdienst*, ISSN 1613-978X, Springer, Heidelberg, Vol. 101, Iss. 6, pp. 461-465, <https://doi.org/10.1007/s10273-021-2942-1>. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/237879/1/461-465-Mesloh.pdf>
- Müller, F. G., Bressner, M., Görzig, D., Röber, T. (2016): Industrie 4.0: Entwicklungsfelder für den Mittelstand. Zugriff am 10.12.2024. <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/5e891d9d-96cf-4b5b-9011-20fc7547ec3b>
- Münsterland (2023): Der Weg zur vernetzten Produktion. Zugriff am 10.12.2024 https://www.muensterland.com/site/assets/files/684441/foresight-bericht-5-der_weg_zur_vernetzten_produktion_final.pdf.
- Fernández Muñoz, P., Tost, M., Dietrich, V., Melcher, F., Kloppmann, W. (2024): Integration von Technologien für mehr Transparenz in Lieferketten. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 169(4), 192-196.
- Nzeako, Godwin, et al. "The role of AI-Driven predictive analytics in optimizing IT industry supply chains." *International Journal of Management & Entrepreneurship Research* 6.5 (2024): 1489-1497
- T. Niesen, C. Houy, P. Fettke and P. Loos (2016): Towards an Integrative Big Data Analysis Framework for Data-Driven Risk Management in Industry 4.0, 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Koloa, HI, USA, pp. 5065-5074
- Orsolits, H., Lackner, M. (Eds.) (2020): *Virtual Reality und Augmented Reality in der Digitalen Produktion*. Springer-Verlag.
- Oyewole, A., Okoye, C., Ofodile, O., Ejairu, E. (2024): Reviewing predictive analytics in supply chain management: Applications and benefits. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 568-574. 6. 10.30574/wjarr.2024.21.3.0673.
- Papen, M. C., Magalhaes, K. M., Tenbrock, S., Märkel, C. (2022): Digitalisierungsanwendungen und Identifikation von Digitalisierungstrends im Mittelstand (No. 495). WIK Diskussionsbeitrag.
- Pivoto, D. G., De Almeida, L. F., da Rosa Righi, R., Rodrigues, J. J., Lugli, A. B., Alberti, A. M. (2021): Cyber-physical systems architectures for industrial internet of things applications in Industry 4.0: A literature review. *Journal of manufacturing systems*, 58, 176-192.
- Punia, S., Shankar, S. (2022): Predictive analytics for demand forecasting: A deep learning-based decision support system. *Knowledge-Based Systems*, 258, 109956.
- Reiberg, A., Niebel, C., Krämer, P. (2022): Was ist ein Datenraum. Definition des Konzeptes Datenraum.
- Reinhardt, G. O. (2023): *Flexible Fertigungssysteme (FFS)* (pp. 1-492). DUNCKER UND HUMBLOT.
- Roloff, M., Papen, M. C., Märkel, C., Lundborg, L. (2024): KI und KI-Readiness im Mittelstand, https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Kurzstudien/2024/WIK-C_Kurzstudie_KI-Readiness.pdf

- Rüttimann, B. G. (2023): Verkürzung der Prozessdurchlaufzeit. In *Lean-Kompendium: Einführung in die moderne Fertigungstheorie* (pp. 45-86). Cham: Springer International Publishing.
- Saam, M., Viète, S., Schiel, S. (2016): *Digitalisierung im Mittelstand: Status Quo, aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen*, Forschungsprojekt im Auftrag der KfW Bankengruppe, KfW Bankengruppe, Frankfurt.
- Sauer, O., Sardesai, S., Henke, J., Schmelting, J., Meyer, T., Kujath, M., Kuhn, T., Schnicke, F., Harst, S., Wenzel, K. (2023): *Manufacturing-X*.
- Schmäh, M., Hämmerle, A., Kolb, M., Kurz, K., Okkucu, B., Solarino, M., Strehl, K. (2019): Der deutsche Mittelstand–Aufbruch in das digitale Zeitalter? Teil 2: Quo vadis?. *Marke 41: das neue Journal für Marketing*, (2), 68-74.
- Schmitt, R. H., König, N., Jung, S., Peterek, M. (2020): Architektur einer vernetzten, adaptiven Produktion. In *Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium: Internet of Production–Turning Data into Value* (pp. 4-19).
- Schuh, G., Boos, W., Kelzenberg, C., de Lange, J., Stracke, F., Helbig, J., Boshof, J., Ebbecke, C. (2018): *Industrie 4.0: Implement it!*.
- Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier J., ten Hompel, M., Wahlster, W. (Eds.) (2017): *Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies (acatech STUDY)*, Munich: Herbert Utz Verlag.
- Schumacher, J., Gronau, N. (2022): Im Vergleich: Industrie 4.0-Reifegradmodelle. *Factory Innovation*. 2022. 42-59. 10.30844/FI22_2_42-59.
- Seyedan, M., Mafakheri, F. (2020): Predictive big data analytics for supply chain demand forecasting: methods, applications, and research opportunities. *Journal of Big Data*, 7(1), 53.
- Stark, R., Damerau, T., Lindow, K. (2016): *Industrie 4.0–Digitale Neugestaltung der Produktentstehung und Produktion am Standort Berlin: Herausforderungen und Lösungsansätze für die digitale Transformation und Innovation*. *Industrie 4.0 grenzenlos*, 169-184.
- Tempelmeier, H., Helber, S., Kuhn, H. (2023): Konfigurationsplanung von Produktionssystemen. In *Handbuch Logistik* (pp. 1-34). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tupa, J., Simota, J., Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 1223-1230.
- VDI/VDE, Institut für Medien- und Kompetenzforschung (2008): *Vernetzte Produktionsanlagen - Praxisnahe Informationen für Hersteller, Anwender und Dienstleister Band 4 - Digitale Technologien*. Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.
- Vieweg, O., Schreyenackers, P. (2023): *Das Lieferkettengesetz-Technologien für mehr Transparent in der Supply Chain*.
- Waseem, M., Ahmad, A., Mäkitalo, N., Kotilainen, P., Hästbacka, D., Mätäsniemi, K., Mikkonen, T. *Enabling Liquid Artificial Intelligence with IDSA and GAIA-X*. Zugriff am 10.12.2024. [Enabling-Liquid-Artificial-Intelligence-with-IDSA-and-GAIA-X.pdf](#)
- Winter, J. (2024): *Periodic Table of Industry 4.0 Elements*, letzter Zugriff am 10.12.2024. <https://www.jeffwinterinsights.com/insights/periodic-table-of-industry-40-elements>
- Wree, C., Raßmann, R., Gesell, G. S., Schönfeld, T. (2024): *Flexible Fertigungssysteme basierend auf zentralen, leistungsfähigen Steuerungen für integriertes maschinelles Lernen und Produktranstransport*.

8 Anhang

Tabelle 2: Übersicht der betrachteten Studien

Einordnung	Studien
Literatur Allgemein	Bitkom (2018) Bitkom (2022) Bitkom Research (2022) Bitkom (2023) Hoßbach-Zimmermann et al. (2023) Karmakar et al., 2019 Hermann et al., 2016 Schuh et al. (2018) Kies et al., 2024 Ludwig et. al (2016) Fraunhofer IPK,2024 Münsterland, 2022 Sauer et al. (2023) Drath et al. (2023) Tupa et al. (2017) Müller et al. (2016) Brock et al. (2024) Waseem et al.
Literatur mit explizitem Mittelstandsbezug	Mesloh (2021) Fichtelpeter et. al. (2019) Saam et al. (2016) Becker et al., 2017 Müller et al., 2016
Literatur mit Use Cases	International Data Spaces Association (2022) Klocke et al., 2017 VDI/VDE (2008) Schuh et al. (2018)
Literatur zu Readiness	Ehemann, et al. (2021) Anderl (2015) Appelfeller (2018) Roloff et al., 2024 Schumacher et al. (2022)

Tabelle 3: Leitfadentwurf der Expert:inneninterviews

Frage	Ziel
<p>Begrüßung: Hallo Frau/Herr XXX. Vielen Dank, dass Sie sich Zeit nehmen für unser Gespräch.</p> <p>In unserem Gespräch soll es heute um ein Projekt zum Thema Vernetzte Produktion. Wir möchten in diesem Projekt relevante Ansätze und Use Cases für KMU, aber auch Hemmnisse identifizieren. Außerdem möchten herausfinden, wie die Zukunft der vernetzten Produktion für KMU aussehen könnte.</p> <p>Sind Sie damit einverstanden, dass das Gespräch aufgezeichnet wird?</p>	<p>Begrüßung / Information / Eis brechen</p>
<p>Rückfragen zum WIK bzw. zum Forschungsprogramm des WIK:</p> <p>WIK als Think Tank 1982 gegründet, 100%-Tochterunternehmen des BMWK</p> <p>Fokus zunächst auf Netzsektoren (TK, Energie, Post), jetzt auch zunehmend auf Fragestellungen zur Digitalisierung</p> <p>WIK ist für die Begleitforschung von Mittelstand Digital zuständig</p> <p>Forschungsprogramm ist unabhängig, also ohne einen externen Auftragsgeber; als Think Tank bearbeitet das WIK innovative Fragestellungen.</p> <p>Rückfragen?</p>	<p>Information zum Hintergrund des Projektes bzw. zum Forschungsprogramm</p>
<p>(Kurze) Vorstellung und Rolle der/des Interviewten: In welchem Bereich arbeiten Sie? Zentrum?</p>	<p>Besseres Verständnis/Besonderer Kontext</p>
<p>Offene Frage: Von 1-10 welche Bedeutung <u>hat</u> vernetzte Produktion im Mittelstand aktuell?</p> <p>Können Sie dies kurz begründen, vielleicht in einem Satz?</p>	<p>Status Quo</p>
<p>Von 1-10 Welche Bedeutung <u>sollte</u> nach Ihrer Einschätzung vernetzte Produktion im Mittelstand haben?</p>	<p>Einschätzung der Relevanz</p>

Frage	Ziel
<p>Wir haben aktuelle Studien zum Thema vernetzte Produktion und Industrie 4.0 im Mittelstand ausgewertet und einige zentrale Bedarfe und Herausforderungen für KMU identifiziert.</p> <p>Bitte bewerten sie die folgenden Bedarfe auf einer Skala von 1 (gar nicht relevant) bis 10 (sehr relevant) und erklären wie warum (warum nicht relevant)?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Modernisierung von Bestandsanlagen 2. Verbesserung administrativer Rahmenbedingungen 3. Kompetenzentwicklung für Führungskräfte und Mitarbeitende 4. Projektangebote zur Förderung konkreter Aufgabenstellungen <p>Bitte bewerten sie die folgenden Herausforderungen auf einer Skala von 1 (gar nicht relevant) bis 10 (sehr relevant) und erklären wie warum(warum nicht relevant)?</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Fachkräftemangel 2. Mangelnde Standardisierung und fehlende Übersicht 3. Defizite und Unsicherheiten bei IT-Sicherheit und IT-Infrastruktur 4. Mangelnde strategische Orientierung 	<p>Bedarfe und Herausforderungen der vernetzten Produktion in KMU</p>
<p>Haben wir Bedarfe oder Hemmnisse für KMU aus Ihrer Sicht vergessen, die ebenfalls relevant sind? Auf welcher Skala sehen Sie Ihre Punkte?</p>	<p>Fehlende Aspekte berücksichtigen</p>
<p>Gibt es bei Ihrer Bewertung bestimmte Kriterien, die Sie berücksichtigt haben, um die Relevanz für KMU zu bewerten?</p>	<p>Bewertungskriterien ermitteln</p>
<p>Gibt es eine Gruppe an KMU für die das Thema vernetzte Produktion keine Relevanz hat? Wenn ja, warum und wie zeichnet sich diese Gruppe aus?</p>	<p>Sonderstellungen bestimmter KMU identifizieren</p>

Frage	Ziel
[Wenn Antwort schwer: bestimmte Größen, Regionen oder andere Merkmale?]	
<p>Welche Erfahrungswerte haben Sie in KMU bereits gesammelt?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Was genau wurde umgesetzt? Welche Technologien wurden dort implementiert? • Was für Kennzeichen/Merkmale haben die Unternehmen? Aus welchen Branchen (Automobil, Lebensmittel, Chemie, Maschinenbau, Medizintechnik,...) des Produktionssektors waren die Unternehmen? Was haben die Betriebe produziert? In welchem Teil der Wertschöpfungskette sind sie aktiv? • In welcher Stufe der Implementierung waren sie? <ul style="list-style-type: none"> ○ 1- Computerisierung ○ 2 - Vernetzung, ○ 3 - Visualisierung, ○ 4 - Transparenz, ○ 5 - Vorhersage ○ 6 – Adaptabilität • Welche Fragen kommen am häufigsten zu dem Thema vernetzte Produktion? 	Erfahrungswerte sammeln
<ul style="list-style-type: none"> • Wie wichtig/unwichtig wird vernetzte Produktion in 10 Jahren sein? Wo können bereits etablierte Prozesse gebildet werden und wie hoch schätzen Sie den Implementierungsstand in KMU? <ul style="list-style-type: none"> • Wer/Was wird der größte Treiber sein? Gesetzgebung, Partnerunternehmen, Wettbewerbsdruck? • Sehen Sie Potenzial für die Anwendung von vernetzten Produktionsmethoden in anderen Sektoren, wie beispielsweise im Dienstleistungsbereich? Welche politischen, gesellschaftlichen und gesetzlichen 	Einschätzung der zukünftigen Entwicklung

Frage	Ziel
<p>Rahmenbedingungen müssten sich Ihrer Meinung nach ändern, um die Anwendung vernetzter Technologien auch außerhalb des Produktionssektors zu fördern und zu erleichtern?</p>	
<p>Verabschiedung:</p> <p>Vielen Dank für das Gespräch!</p> <ul style="list-style-type: none"> • Falls Sie im Nachgang noch etwas ergänzen möchten, melden Sie sich gerne bei mir. • Können wir uns im Nachgang auch melden, falls wir noch weitere Fragen haben? 	<p>Ende/ Verabschiedung</p>

ISSN 1865-8997