

Nachhaltige und resiliente Produktion durch Nutzung von Manufacturing-Service im Netzwerk

Flexible Wertschöpfung mit MaaS

M. M. Hertwig, J. Lentjes, T. Komenda

ZUSAMMENFASSUNG Durch die Digitalisierung befähigt, erfolgte die Formung von Industrie 4.0, wodurch die Produktion kleiner Losgrößen unter wettbewerbsförderlichen Rahmenbedingungen möglich wird. Eine kleinteilige, bedarfsorientierte Wertschöpfung erlaubt Fertigungskapazitäten als Dienstleistung anzubieten. Für die Umsetzung von Manufacturing-as-a-Service-Ansätzen ist dies die Basis. Servicebasierte Fertigungsansätze bieten das Potenzial der Steigerung von Flexibilität, um resilienter und nachhaltiger zu produzieren.

STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, Industrie 4.0, Technologietransfer

Flexible value creation by using MaaS – Applying networked manufacturing services to create sustainability and resilience in the production system

ABSTRACT Enabled by digitalization, Industry 4.0 was born, facilitating the production of small batch sizes under conditions that stimulate competitiveness. Small-scale, demand-orientated value creation enables manufacturing capacities to be offered as a service. This forms the basis for the implementation of manufacturing-as-a-service approaches. Service-based manufacturing approaches offer the potential to increase flexibility to create more resilient and sustainable production systems.

1 Einleitung und Motivation

Durch die Einführung des Paradigmas Industrie 4.0 wurde die Erschließung neuer Geschäftspotenziale durch innovative Produktionssteuerung angestrebt [1]. Doch neben der Nutzung zur Optimierung der Produktion anhand von Daten wurden nur begrenzt Organisationsinnovationen in Produktionsunternehmen erfolgreich implementiert. Auch haben sich die Lieferketten oft nur geringfügig verändert, wodurch diese in Krisensituationen anfällig waren. So geschehen in der Hochphase der COVID-19-Pandemie und der geopolitischen Erschütterungen durch den Ukraine-Überfall.

Viele Unternehmen haben etablierte Lieferketten und Lieferantennetzwerke analysiert und Veränderungen geplant. Da die etablierten Lieferbeziehungen unter Kosten-, Verfügbarkeits- und Dynamikkriterien optimiert sind, sind neue Mechanismen erforderlich, um durch Veränderung nicht die Wettbewerbsfähigkeit einzubüßen.

Hier wird ein datengetriebenes Produktionsmanagement als vielversprechend betrachtet. Damit wird vor allem eine flexibel skalierbare Gestaltung der Fertigung angestrebt, um die als brüchig, ängstlich, nicht-linear und sogar unbegreiflich (brittle, anxious, non-linear, incomprehensible: BANI) beschriebenen Rahmenbedingungen besser zu beherrschen [2]. Denn in volatilen Zeiten stehen etablierte Prozesse stärker unter Risiko, was ein zügiges Reagieren erfordern kann. Mittels Datenanalyse aus der Fertigung soll ein besseres Verständnis der Wirkungen erzeugt werden, um so bei Abweichungen nachsteuern zu können. Jedoch gelingt es damit hauptsächlich die Prozesse innerhalb der Fabrik

zu optimieren. Um vergleichbare Effekte in der Lieferkette zu erzielen, bedarf es Zugriff auf die Daten hinreichender Alternativen, um Ausfällen und Verzögerungen entgegenzuwirken.

Ein neuer Ansatz für die Gestaltung resilienter Wertschöpfung ist eine dienstleistungsorientierte Gestaltung der Fertigung. Mit Manufacturing-as-a-Service (MaaS) soll Wertschöpfung kleinteilig und bedarfsorientiert ermöglicht werden [3]. Dabei werden Fertigungsfähigkeiten geeignet gebündelt als Dienstleistung am Markt verfügbar gemacht. Dieser Ansatz bietet sowohl Potenziale für das Anbieterunternehmen als auch den potenziellen Kunden, um flexibel auf geänderte Rahmenbedingungen zu reagieren und Anforderungen an Nachhaltigkeit und Resilienz zu erfüllen.

2 Service-orientierte Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken

Die zunehmende Menge an Daten verändert die Kommunikation und die Geschäftsprozesse. Global wurden im Jahr 2023 Daten im Volumen von 126,35 Zetabyte (10^{18} Byte) erzeugt, was eine Verdopplung gegenüber 2020 und eine 25-fache Steigerung gegenüber 2011 – dem Startjahr der Industrie-4.0-Initiative – bedeutet [4]. Prognosen deuten darauf hin, dass das globale Datenvolumen in den kommenden Jahren weiterhin exponentiell wachsen wird. Ein signifikanter Anteil dieser Daten entstammt mittlerweile dem industriellen Sektor. Die systematische Nutzung und Verwertung dieser Daten bietet erhebliche Chancen, sowohl interne Prozesse zu optimieren als auch neue externe Wertschöpfungspotenziale zu erschließen [5]. Dennoch bleiben die praktische Nutzung und Monetarisierung industrieller Daten hinter den

Erwartungen zurück. Erhebungen zufolge wird nur ein geringer Anteil der in der Industrie erzeugten Daten genutzt, etwa 80 % der Daten bleiben ungenutzt [6].

Auf Basis der verfügbaren Daten ergibt sich das Potenzial, auch industrielle Prozesse verstärkt dienstleistungsorientiert zu gestalten. Denn die Fülle an Daten ermöglicht eine verbesserte Prozessbeschreibung, verspricht kürzer Rüst- und Einfahr-Prozesse und kostenoptimiertes Produzieren auch bei kleinen Stückzahlen. Eine stärkere Verzahnung der Wertschöpfungsbeteiligten innerhalb eines Produktionsnetzwerkes ermöglicht eine flexiblere und kundenorientierte Produktion. Die service-orientierte Wertschöpfung trägt somit zur Schaffung nachhaltiger Wettbewerbsvorteile und zur Anpassungsfähigkeit an dynamische Marktbedingungen bei [7].

2.1 Produktionsnetzwerke und lokal vernetzte Produktion

Die Digitalisierung in der Produktion dient als befähigendes Element, um Prozesse besser zu beschreiben und mittels Daten zu steuern. Eine datenbasierte Beschreibung von Prozessen erlaubt die Aggregationen von Daten aus verschiedenen Quellen: Die vernetzten Informationen ermöglichen es, durch geeignete Strukturierung aufgabenrelevante Teile zu nutzen sowie eine zeitoptimierte Abstimmung über Organisationsgrenzen hinweg.

Dies ist eine relevante Voraussetzung, um effiziente Produktionsnetzwerke zu etablieren, die ein zentrales Konzept moderner Fertigung sind. Dabei werden miteinander verbundene Produktionsstätten strategisch verteilt, aus unterschiedlichen Motiven auch häufig geografisch [8]. Ein Produktionsnetzwerk umfasst sowohl interne Produktionsstandorte wie auch externe Partner (Zulieferer, Hersteller und Distributoren), die sich durch eine komplexe Beziehung zwischen verschiedenen Akteuren in der Wertschöpfungskette auszeichnen. Diese Netzwerke ermöglichen eine flexible Reaktion auf Marktveränderungen, was die Umsetzung von Just-in-Time- und Lean-Prinzipien erleichtert, inklusive einer schnellen Adaption an geänderte Kundenbedürfnisse in lokalen Märkten. Zusätzlich bietet die Dezentralisierung der Produktionsstätten das Potenzial einer effizienten Ressourcennutzung [9]. Auch können Unternehmen von regionalen Kostenvorteilen, wie niedrigeren Löhnen oder günstigeren Rohstoffpreisen, profitieren. Dies ist ein Grund, weshalb sich dieser Ansatz vor allem in der Automobilindustrie durchgesetzt hat. Die Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien spielt eine entscheidende Rolle, um den Austausch von Daten und die Koordination der Abläufe zwischen den einzelnen Standorten zu optimieren [10].

Die zunehmenden Anforderungen im Kontext Nachhaltigkeit und Verträglichkeit für das ökologische und soziale Umfeld haben eine Übersetzung auf den lokalen Maßstab angestoßen. Die Etablierung lokaler, vernetzter Produktionen zielt darauf ab, die Wertschöpfungsstufen innerhalb eines geografischen Gebiets zu etablieren. Ein wichtiges Ziel ist dabei auch die regionale Nähe zu Kunden, passenden Arbeitskräften und möglichen Produktionsressourcen. Dies fördert nicht nur die regionale Wirtschaft, sondern reduziert auch Transportkosten und -zeiten, wodurch eine nachhaltigere und umweltfreundlichere Produktionsweise entsteht [11]. Der Einsatz von modernen Informations- und Kommunikationstechnologien ermöglicht diese Art der Wertschöpfungsorganisation.

Ein Ansatz in diesem Kontext ist die urbane Produktion, die neben dem Einklang von ökonomischer Leistungsfähigkeit sowie sozialer und ökologischer Verträglichkeit auch eine Einbettung in urbane Systeme anstrebt. Durch technologische Innovationen in der Produktion und bessere Vernetzung mit Stakeholdern im Umfeld wird angestrebt, Verschwendung zu minimieren und Ressourcen optimal einzusetzen. Außerdem ermöglicht dieser Ansatz eine Transformation von alt-industriellen Strukturen hin zur modernen Wirtschaftsgestaltung im Quartier. Die Nähe zwischen den Beteiligten, aber auch potenziellen Kunden, benötigten Personalressourcen und gesellschaftlichen Vertretern unterstützt einen kurzfristigen Austausch und damit die Steigerung der Innovationskraft. Durch agile Produktionsmethoden, eine hohe Anpassungsfähigkeit an lokale Marktbedingungen und die stabile Zusammenarbeit zwischen den Entitäten lassen sich weitere Wettbewerbsvorteile erlangen. Besonders effektive Treiber in der Realisierung sind der Einsatz neuer Produktionsverfahren, digitaler Datennutzung und gut ausgebildeter Fachkräfte [12].

2.2 Service-orientierte Fertigung und Produktionsdienstleistungen

Service-orientierte Fertigung ist ein innovativer Ansatz, der sich aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Industrie 4.0 und datenbasierten Produktionsprozessen herausgebildet hat [13]. Der Ansatz zeichnet sich durch eine verstärkte Integration von Dienstleistungen sowie eine erweiterte Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen aus. Im Gegensatz zu Produktionsnetzwerken findet nicht ausschließlich eine Optimierung von Fertigungsabläufen und Materialflüssen statt. Vielmehr liegt ein Fokus auf der Bereitstellung von Mehrwertdiensten, die den Kundenbedürfnissen gerecht werden, der service-orientierten Fertigung, einer kundennahe Interaktion und der Entwicklung individueller Lösungen, was zu einer erhöhten Kundenzufriedenheit führt. Im Vergleich zur lokal vernetzten Produktion, welche die räumliche Nähe zu Märkten und Rohstoffen betont, hebt sich die service-orientierte Fertigung durch die Schaffung eines ökosystemartigen Ansatzes hervor, bei dem Dienstleistungen als integraler Bestandteil der Wertschöpfung betrachtet werden.

Im Gegensatz zur service-orientierten Fertigung, welche die Integration von Dienstleistungen in den gesamten Produktionsprozess fokussiert, konzentrieren sich Fertigungsdienstleistungen auf die Schaffung von spezifischen Tätigkeiten, die entlang der Wertschöpfung benötigt werden [14]. Diese lassen sich punktuell oder als Bestandteil der Wertschöpfung integrieren. Im Gegensatz zur service-orientierten Fertigung, die den Kunden ins Zentrum stellt, sind Fertigungsdienstleistungen eher transaktional und können auch in einem vernetzten, netzwerk-organisierten Produktionskontext erbracht werden. Sie ermöglichen es, die Kooperation verschiedener Akteure fähigkeitsorientiert zu entwickeln und zu nutzen und damit die Modularisierung in der Wertschöpfung zu unterstützen [15]. Die Dienstleistungstiefe hängt maßgeblich von den technischen Fähigkeiten, verfügbaren Ressourcen und der etablierten Organisation ab. Prinzipiell sind Fertigungsdienstleistungen als Bereitstellung spezifischer Fertigungsfähigkeiten zu klassifizieren. Der Kunde erhält so einen optimalen Fertigungsprozess(-schritt) vom Dienstleister. Dabei werden spezifische Kenntnisse und Technologien als Dienstleistung gefasst und angeboten [16].

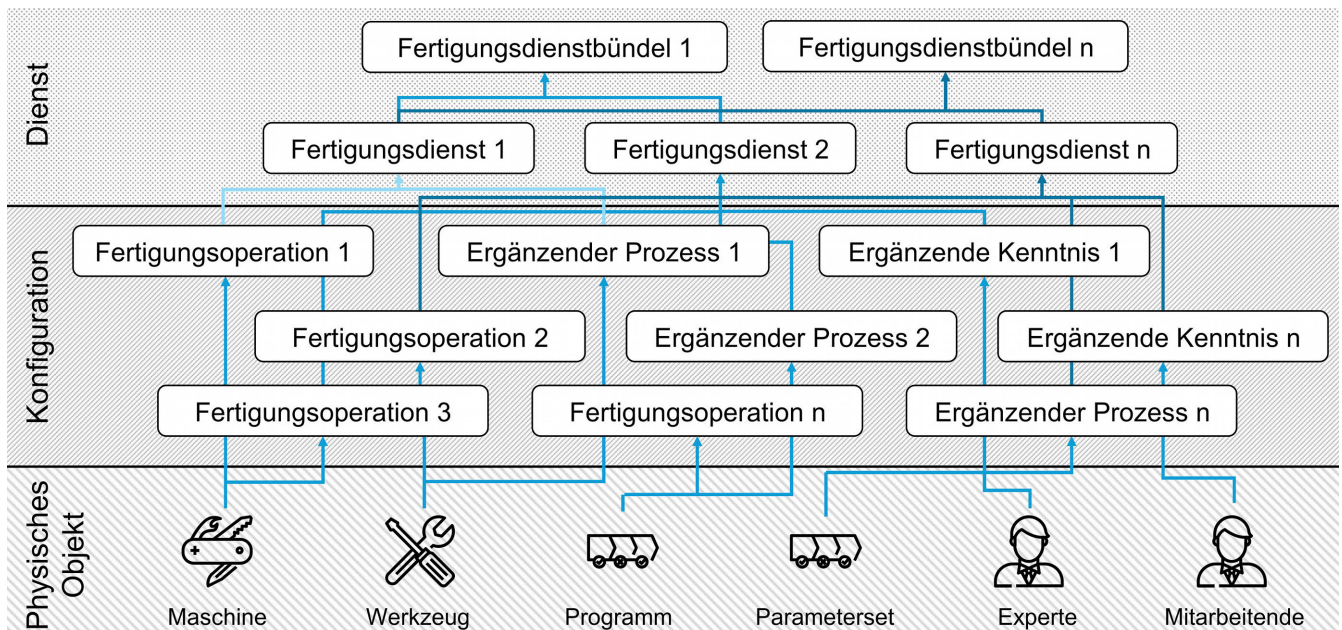


Bild 1. Unterteilung der Fertigungsdienste vom physischen Objekt zum Dienst. Grafik: Fraunhofer IAO

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass beide Ansätze sich durch einen hohen Grad an Kunden- und Marktorientierung auszeichnen. Damit ermöglichen sie eine flexible Reaktion und hohe Adaptionfähigkeit, was Wettbewerbsvorteile mit sich bringt. Gleichsam lassen sich mit dem agilen Ansatz auch innovative Ansätze realisieren und Aspekte der Nachhaltigkeit beziehungsweise multidimensionaler Verbesserung berücksichtigen.

3 Abgrenzung von Manufacturing-as-a-Service

Eine Serviceorientierung in der Produktion bietet vielfältige Vorteile. Vor allem Manufacturing-as-a-Service (MaaS) besitzt das Potenzial, bestehende Lieferketten zu transformieren. Denn aus linearen Lieferketten lassen sich durch kleinteilige, bedarfsgerechte Fertigungsdienstleistungen vernetzte und adaptive Fertigungsnetzwerke ausprägen. Die Vielfalt und Spezifität der Fertigungsdienstleistungen befähigen eine schnelle Reaktion auf sich ändernde Rahmenbedingungen. Durch das Vernetzen einzelner Fertigungsfähigkeiten lassen sich kosteneffektive, skalierbare und schnelle Lösungen bilden. Dies gilt nicht nur unter normalen Betriebsbedingungen, sondern kann besonders bei Erschütterungen und Unterbrechungen in der Lieferketten (von Belieferung bis Bereitstellung) relevant werden. Eine Transformation von produktionsorientierter zu serviceorientierter Fertigung wird durch Cloud Manufacturing ermöglicht [17].

Verschiedene Abgrenzungen sind in der Literatur zu finden; durch Schuseil et al. [18] erfolgte eine Zusammenführung relevanter Elemente mit dem Ziel der übergreifenden Definition: Manufacturing-as-a-Service ist ein dienstleistungs-basiertes Produktionskonzept, das durch Fertigungsdienste (Manufacturing Services = MfgS) möglich wird. Befähigend wirkt dabei der Ansatz des cloudbasierten Produktionsmanagements (Cloud-Manufacturing = CMfg). Die Verarbeitung von Daten und Informationen erfolgt über eine Plattform, um verschiedene Beteiligte zusammenzubringen und den Austausch zu ermöglichen.

In Bild 1 ist in Anlehnung an Kusiak [19] eine Unterteilung der Fertigungsdienste dargestellt, wobei eine Unterteilung in Dienst, Konfiguration und physisches Objekt vorgenommen wird.

Die physischen Objekte besitzen Fähigkeiten, welche für die Durchführung einer Fertigungsoperation oder ergänzende Prozesse nötig sind. Durch eine geeignete Kombination der Fähigkeiten lassen sich unterschiedliche Fertigungsdienste konfigurieren, die ebenso zu Fertigungsdienstbündeln verknüpft werden können.

Für eine Abgrenzung (Tabelle) von Manufacturing-as-a-Service von Cloud-Manufacturing (CMfg), Manufacturing Grid (MGrid) und Outsourcing erfolgte eine Konkretisierung der wichtigen Merkmale [18]. So können bei MaaS die Fertigungsdienste sowohl geografisch als auch logisch verteilt sein. Weiterhin zeichnet sich MaaS primär durch eine bedarfsgetriebene und zumeist kurzfristig orientierte Zusammenarbeit aus. Zudem limitiert die kleinteilige Gestaltung von Diensten den Austausch nicht auf eine Branche, sondern ermöglicht neue Ansätze zur industrieübergreifenden Zusammenarbeit.

4 Potenziale und Hürden für die produktive Umsetzung

Basierend auf der obigen Begriffsdefinition lässt sich ableiten, dass MaaS auf unterschiedlichen Detailebenen Anwendung finden kann. Voraussetzung ist neben der Schaffung der organisatorischen Rahmenbedingungen auch die technologische Basis. Zu dieser zählt, dass Prozessdaten mehrheitlich vorliegen und teilweise Prozesse auch digital beschrieben sind. Unterstützende Methoden für die Modellierung können dabei Structured Analysis and Design Technique (SADT) oder Unified Modeling Language (UML) sein, um Stoffströme und Informationsflüsse maschinenlesbar zu formalisieren [20].

Zusätzlich hat die Diskussion um die Dienstleistungsorientierung in der Fertigung durch die BANI-Realität an Fahrt aufgenommen. Denn die flexible Gestaltung von Wertschöpfungsketten vermag Unterbrechungen von Lieferketten, die durch fehlende Arbeitskräfte, eingeschränkte oder verspätete Lieferungen oder

Tabelle. Unterscheidung der Produktionsparadigmen basierend auf wichtigen Merkmalen.

Dienstleistungsorientierte Produktionsparadigmen		Manufacturing-as-a-Service (MaaS)	CloudManufacturing (CMfg)	Manufacturing Grid (MGrid)	Outsourcing
Abgrenzungsmerkmale	Werte	Erfüllungsgrad: erfüllt (P), unter bestimmten Bedingungen (+) und nicht erfüllt (O)			
Geografische Abgrenzung	Physische Verteilung (verschiedene Standorte)	P	P	P	P
	Logische Verteilung und physische Verteilung	P	P	P	O
	Logische Verteilung (innerhalb derselben Einrichtung)	P	+	O	O
Zeitliche Abgrenzung	Kurzfristig (nachfrageorientierte Zusammenarbeit)	P	P	O	O
	Langfristig (Vertragsabschluss)	O	P	P	P
Abdeckung der Wertschöpfungskette	Verschiedene Wertschöpfungsstufen entlang Lieferkette	O	O	P	P
	Komponenten/Systeme	O	P	P	P
	Fertigungsdienstleistungsbündel	P	P	P	O
	Fertigungsdienste	P	O	O	O
Branchenschwerpunkt	Branchen-/ Industrieübergreifend	P	P	+	O
	Branchen-/ Industrieintern	P	P	P	P

ausgefallene Lieferanten auftreten können, zu adressieren [21]. Allgemein bietet die Transformation von der produktorientierten zur serviceorientierten Produktion die Möglichkeit, neue zweckorientierte, stärker regional ausgerichtete Wertschöpfungsnetze zu schaffen als Beiträge zur Widerstandsfähigkeit der Lieferketten sowie der Kreislauffähigkeit der Produktionsindustrie.

4.1 Potenzielle Mehrwerte durch zielgerichtete Anwendung

Aktuell ist eine abnehmende Zuverlässigkeit der bestehenden Beziehungen in Lieferketten zu erleben, wobei die Fragilität signifikant von äußeren nicht beeinflussbaren Aspekten gesteuert wird. Unterbrechungen und Störungen sind wahrscheinlicher und haben einen größeren Impact [22]. Die Servitisierung der Produktion bietet bei entsprechender Gestaltung durch eine kleinteilige und flexibel gestaltbare Vernetzung von Wertschöpfungspartnern verschiedene Potenziale:

- **Steigerung der Reaktionsfähigkeit:** Durch eine kleinteilige Verknüpfung von Fertigungsschritten lassen sich diese einfacher deterministisch beschreiben. Dies ermöglicht die Suche und den Abgleich von Bedarfsprofil und Angebot schneller durchzuführen. Dies ist ein Vorteil gegenüber komplexen Systemen, die durch die Verknüpfung Freiheitsgrade einschränken und eine erhöhte Anzahl an erfüllten Kriterien für die Validierung

erforderlich machen. Somit lassen sich bei signifikant gesenktem Zeitaufwand passende Lösungen identifizieren und erste Maßnahmen zur Reaktion starten.

- **Widerstandsfähigkeit:** Die Reaktionsfähigkeit erlaubt es, eine Krise effizienter zu bewältigen. Beispielsweise könnte dies einer Unterbrechung eines Knotens oder einer Verbindung in der Lieferkette entsprechen (Transport der gelieferten Waren/Materialien oder der Stopp einer Anlage des Lieferanten selbst). MaaS kann dazu beitragen, sich zügig von derartigen Unterbrechungen zu erholen.
- **Kreislauffähigkeit:** Ein maximaler Mehrwert der servicebasierten Fertigung gelingt, wenn Wertschöpfungsschritte modularisiert und standardisiert werden. Unterstützt durch die Cloud-Fertigung ist auch die digitale Beschreibung des Produktes einfacher, was die Anwendung der relevanten R-Strategien entlang des Produktlebenszyklus erleichtert. Dabei haben die R-Strategien zum Ziel, den Verbrauch von natürlichen Ressourcen zu reduzieren und eine Kreislaufführung zu erlauben [23]. Auch können die beteiligten Fertigungsorganisationen ihren Materialeinsatz optimieren und durch Einbringen ihrer spezifischen Expertise zu einem besser reparierbaren (länger in Gebrauch), haltbareren (verlangsamter Abnutzung) und demontierbaren Endprodukt (wiederverwendbar) beizutragen.
- **Nachhaltige Produktion:** MaaS erlaubt eine modulare Gestaltung des Fertigungsprozesses mit reduzierter Komplexität. Das

verringert die Abhängigkeit von spezialisierten Anbietern, wodurch die Produkte innerhalb der Wertschöpfungskette lange Transportwege zurücklegen müssen. Eine optimierte Auslastung reduziert die Volatilität und erlaubt die Produktion besser an äußere Rahmenbedingungen anzupassen, um beispielsweise erneuerbare Energieangebote auszuschöpfen. Auch die optimierte Anlagenutzung optimiert den Ressourcenverbrauch in holistischer Perspektive.

- **Ressourcenoptimierung:** Der Ansatz der servicebasierten Fertigung erlaubt es Herstellern, die Produktionsmengen bedarfsgerecht zu erhöhen oder zu senken. Durch den bedarfsorientierten Zugriff auf Produktionskapazitäten entstehen für den Kunden keine Investitionskosten oder Verluste aus den Schwankungen. Die angebotenen Produktionskapazitäten können gleichzeitig industrieübergreifend offeriert werden, was zu einer gesteigerten Gesamtanlageneffektivität (Overall Equipment Efficiency, OEE) und einer optimierten Auslastung des qualifizierten Personals führt.
- **Kostenvorteile:** Der Ansatz MaaS erlaubt sowohl eine direkte als auch eine indirekte Produktionskostenoptimierung. So kann durch die kleinteilige Organisation stets die kostenoptimale Konfiguration ausgewählt werden, um Produkte zu erstellen. Damit lassen sich direkte Produktionskosten senken. Gleichsam lassen sich Kapazitätsbedarfsschwankungen ohne zusätzliche Investitionskosten oder Stillstandsaufwände realisieren. Damit reduzieren sich indirekte Anteile der Produktionskosten, die sich meist in Form von Gemeinkosten in den Produktionskosten niederschlagen. Dies kann das Unternehmen auch in die Lage versetzen, sich nachhaltig zu differenzieren und somit Wettbewerbsvorteile zu realisieren.
- **Förderung von Innovationen:** Die Zusammenarbeit mit spezialisierten Dienstleistern erlaubt einen schnellen Zugriff auf die individuellen Kompetenzen in fortschrittlichen Technologien. Damit wird eine Entwicklung neuer Produkte und die Verbesserung von bestehenden Prozessen befähigt. Ebenso bietet der Ansatz das Potenzial, community-getriebene Ansätze, wie Crowd-Engineering, zu nutzen. Damit werden Innovationen schneller marktfähig.
- **Neue Geschäftsmodelle:** Durch MaaS lassen sich zusätzlich zu bereits etablierten Geschäftsprozessen weitere Angebote mit neuen Ertragskonzepten und Geschäftsmodellen realisieren. Der Aufbau eines Produktionsnetzwerkes mit vielen kleinteiligen Fertigungskapazitäten ermöglicht es, flexibel auf geänderte Nachfragen zu reagieren oder gar gemeinschaftlich Produkte bedarfsorientiert in kleinen Stückzahlen anzubieten.

Für die Europäische Union bietet dieses neue Produktionsparadigma die Aussicht, die Wirtschaftsbeziehungen innerhalb der Grenzen des Staatenbundes zu stärken.

Neben den bereits guten Bedingungen durch den gemeinsamen Binnenmarkt, einer mehrheitlich gleichen Währung und einem gemeinsamen Gesetzesrahmenwerk bieten die verschiedenen Staaten unterschiedlich ausgeprägte Fähigkeiten und erfolgreiche Unternehmen [24]. Diese Diversität lässt sich durch dienstleistungsorientierte Fertigungsorganisation erfolgsorientiert nutzbar machen und bietet somit das Potenzial, die Abhängigkeit von anderen Volkswirtschaften zu reduzieren. Außerdem lassen sich durch neue Produktionsparadigmen Innovationen in der Wertschöpfung realisieren und diese stärken, wodurch die Produktionsstandorte als attraktiver wahrgenommen werden [25].

4.2 Hürden für die Einführung in die industrielle Nutzung

Obwohl die Einführung von MaaS viele Potenziale bietet, steht die Verbreitung und das Verständnis dazu in krassem Gegensatz. Die Hürden lassen sich gemäß dem arbeitswissenschaftlichen Ansatz in technische Herausforderungen, organisatorische Rahmenbedingungen und soziale Aspekte unterscheiden.

- **Verfügbarkeit von Daten:** Bedeutsam für die Nutzbarkeit aller Vorteile des MaaS-Ansatzes ist die Verfügbarkeit von Daten, um die Prozesse und deren Verfügbarkeit echtzeitnah zu ermitteln und zu beschreiben. Dafür bedarf es einer Datenaggregation aus allen datenerzeugenden Systemen, was eine horizontale Datendurchgängigkeit erfordert. Gemäß der Bewertung von *Hertwig et al.* ist die geringe Durchdringung von Industrie-4.0-Prinzipien ein Indikator für zusätzlich nötigen Aufwand [26]. Des Weiteren fehlt es an übergreifenden Standards und einheitlichen Normen, um Prozesse zu beschreiben, Daten zu kuratieren sowie einheitlichen Schnittstellen zu Plattformen. Diese fehlende Interoperabilität ist ein bedeutendes Hemmnis für die Einführung von MaaS.
- **Bereitschaft Daten und Informationen zu teilen:** Eine weitere Hürde ist die fehlende Bereitschaft, Daten zu teilen. Dies würde den Verlust der Entscheidungsmacht über diese Daten bedeuten. Ergänzt um die Bedenken zum Datenschutz und der Datensicherheit, erschwert dies die automatisierte Bewertung von Bedarf und Angebot. Denn ein effizienter Einsatz von MaaS beruht auf der Sammlung und Auswertung großer Datenmengen über alle Wertschöpfungsstufen hinweg.
- **Offenheit gegenüber Geschäftsmodell-Innovationen:** Viele produzierenden Unternehmen sind in ihrem Tätigkeitsfeld und mit ihrem Produktportfolio bereits langfristig erfolgreich, was oft auf ihre technologische Innovationsfähigkeit zurückzuführen ist. Das etablierte Geschäftsmodell wird dabei selten geändert. Die Mehrzahl dieser Unternehmen ist jedoch aufgrund von Größe und Organisationsstruktur geeignet, vom MaaS-Ansatz zu profitieren. Eine der zentralen Herausforderungen ist die Notwendigkeit eines kulturellen Wandels innerhalb der Organisationen. Unternehmen müssen von traditionellen Produktionsansätzen abweichende Denkweisen und Praktiken annehmen. Denn mit der Einführung von MaaS sind nicht selten Veränderungen von Geschäftsmodell und Prozessen verbunden, was auch zu Widerständen in der Belegschaft führen kann. Die Herausforderung bei neuen Geschäftsmodellen ist unter anderem die Akzeptanz am Markt.
- **Umstellung von produktorientierter zu serviceorientierter Fertigungsorganisation:** Zusätzlich muss die Auftragsabwicklungsorganisation entsprechend gestaltet werden, um dienstleistungsorientierte Fertigungskompetenzen ausspielen zu können. Es sind unterschiedliche Vorbereitungen zielführend, um eine Bewertung der Anfrage durchzuführen, daraus den benötigten Aufwand abzuleiten, die zeitliche Verfügbarkeit zu klären und offene Informationen für eine erfolgreiche Realisierung zu ermitteln. Je größer dabei der datenbasierte und automatisierte Anteil des Prozesses ist, desto kürzer sind Reaktionszeiten und desto effektiver das MaaS-Angebot im Ökosystem.
- **Ein weiterer entscheidender Faktor für die Einführung und den Betrieb von Manufacturing-as-a-Service** ist das passend qualifizierte Personal. Im Gegensatz zu hoch standardisierten und teilautomatisierten Prozessen und Produkten sind die

Kundenanforderungen nicht vollständig planbar und normiert. Auch bedarf es bei einer verstärkt datengestützten Beschreibung von Produktionsprozessen auch passender Kompetenzen für Datenanalyse, digitale Technologien und agile Produktionsmethoden.

5 Technische Ansätze für die Befähigung der industriellen Nutzung

Neben dem Verständnis der Mehrwerte in der Industrie bedarf es auch technischer Lösungen, um dem MaaS-Ansatz zum Durchbruch zu verhelfen. Die technische Befähigung ist ein elementarer Bestandteil, um die Hürden zu überwinden und so den möglichen Mehrwert zu erzielen.

Zu den unterstützenden technischen Ansätzen zählen softwaregestützte Plattformen auf denen Anbietende und Nachfragende zusammenfinden können. Sie sind die Basis für ein Promoten und Auffinden von Diensten. Plattformen bieten den Rahmen für MaaS-Ökosysteme. Ein weiteres befähigendes Element sind Dienste, die potenziell über die Plattform ausgespielt werden. Sie unterstützen die Ökosystem-Beteiligten durch Funktionalitäten. Zu diesen Diensten können Ident-Dienste, Kalkulations-, Such- und Bewertungsdienste zählen. Diese Services können zentral über die Plattformbetreiber oder dezentral durch Nutzende bereitgestellt werden.

5.1 Daten- und Service-Ökosysteme

Die geringe Ausnutzung von industriellen Daten in der Wertschöpfung hemmt die Etablierung innovativer Geschäftskonzepte und verhindert damit ein zusätzliches Wirtschaftswachstum neben der physischen Produktion und Gütererstellung. Eine der Hauptursachen ist die unzureichende Interoperabilität von Daten-systemen, Bedenken zu Datensicherheit und Datenschutz sowie ein Mangel an geeigneten Geschäftsmodellen und Dienstleistungsangeboten.

Diese Herausforderungen zu überwinden, ist der Anspruch der industriellen Daten- und Service-Ökosysteme (DSÖ), die auf den Prinzipien von Gaia-X basieren. Sie erlauben einen souveränen und interoperablen Daten- und Serviceaustausch über Unternehmensgrenzen und Plattformen hinweg sowie die Bereitstellung, Auffindbarkeit und Nutzung digitaler Services und Datenprodukte [27]. Somit schaffen sie die Grundlage für innovative Wertschöpfungsmodelle, die auf Daten und datenbasierten Dienstleistungen beruhen, und eröffnen Unternehmen neue Möglichkeiten, bisher ungenutzte Datenressourcen für die Entwicklung neuartiger Geschäftsmodelle zu aktivieren [28].

Ein Beispiel für ein solches Ökosystem ist „Pontus-X“. Pontus-X ist ein nicht-proprietäres, offenes und dezentrales System auf Basis der Gaia-X-Standards. Es ist der Gegenentwurf zu zentralisierten Plattformen, die eine Abhängigkeit von einem einzelnen Anbietenden oder einer Betriebsorganisation und damit verbundene Lock-in-Effekte verursachen können [29]. Stattdessen wird durch ein gemeinschaftlich von den Teilnehmenden gestaltetes Rahmenwerk eine faire und transparente Kollaborationsumgebung geschaffen. Mittels einer Bedienoberfläche (Graphical User Interface, GUI) erfolgt der Zugriff auf einen föderierten Katalog, in dem Funktionen zur Veröffentlichung, Entdeckung und zum Konsum von Datenprodukten und digitalen Services angeboten sind.

Seit der Entwicklung durch das Unternehmen deltaDAO AG im Jahr 2021 erfolgt inzwischen der Betrieb durch 19 Unternehmen und Institutionen gemeinsam. Zahlreiche Leuchtturmprojekte und internationale Initiativen, darunter EuProGigant, Gaia-X 4 Future Mobility, Cooperants, Accurate, Service-Meister, Auto-werkstatt 4.0, Dione-X und agrifood TEF, nutzen Pontus-X und sein Open-Source-Framework als Grundlage für ihre Aktivitäten.

5.1.1 Effektiver rechtsicherer Vertragsschluss mittels Smart Contracts

Das Pontus-X-Ökosystem beruht auf Standards von Gaia-X. Neben den angebotenen Service-Funktionen im föderierten Katalog, stellt das Framework auch Mechanismen für Verträge bereit. So lassen sich Vertragsverhandlungen und rechtssichere Vertragsabschlüsse zwischen Serviceanbietenden und Konsumenten über die Plattform schließen. Dies geschieht durch ein automatisiertes Vertragswerk, das auf Smart Contracts basiert. Die Verträge werden stets direkt zwischen den verhandelnden Parteien geschlossen, wobei der Serviceanbieter die volle Kontrolle über die Vertragsbedingungen behält. Smart Contracts gewähren automatisiert Zugriff auf die angebotenen Services, basierend auf den in den Vertragsbedingungen festgelegten Richtlinien. Dieser Ansatz erhöht die Effizienz und Transparenz von Transaktionen innerhalb des Ökosystems und stärkt die Vertrauensbasis zwischen den Beteiligten, indem er rechtliche und operative Sicherheit gewährleistet [30].

5.1.2 Sicherstellung der Daten-Souveränität durch Compute-to-Data

Da eine signifikante Hürde für die Nutzung von Sharing-Ansätzen die datenseitige Hoheit ist, ermöglicht die Compute-to-Data (C2D)-Komponente die technische Souveränität über Daten in Pontus-X. Basierend auf dem Compute-to-Data-Ansatz werden sensible Daten sicher und effizient direkt an ihrer Quelle verarbeiten. Vertrauliche Rohdaten verlassen dabei nie ihren ursprünglichen Speicherort, sodass kein anderer Partner hoheitliche Rechte über die Daten erhält. Dieses Vorgehen trägt signifikant zur Reduktion der Datenschutzrisiken und Übertragungskosten bei, da die sensiblen Daten nicht auf anderen Speicher- oder Recheneinheiten übertragen werden. Dabei geht Compute-to-Data über traditionelle Modelle der Datenfreigabe hinaus, indem es Ökosystem-Teilnehmenden erlaubt, nicht nur Datensätze, sondern auch containerisierte Software-Assets zu veröffentlichen. Dieser Ansatz ermöglicht es allen Ökosystem-Entitäten, benutzerdefinierte Algorithmen, Simulationswerkzeuge, KI-Modelle und andere spezialisierte Fertigungsanwendungen sicher in das DSÖ zu integrieren (Bild 2), ohne zugrunde liegendes geistiges Eigentum oder proprietäre Kenntnisse preiszugeben [31].

Der tokenisierte Zugang auf Basis von Smart Contracts (Bild 2: ①) ermöglicht den Zugriff auf containerisierte Algorithmen, Softwarekomponenten und Datensätze [32]. Durch Erzeugung einer gekapselten für den jeweiligen Anwendungsfall geschaffenen Ausführungsumgebung (Bild 2: ②), lassen sich Elemente aus verschiedenen Quellen verbinden und ausführen (Bild 2: ③-⑤). Anwendungsfälle sind föderierte Datenanalysen, Lernverfahren unter Nutzung verteilter Datensätze und die Modellbildung über verschiedene Serviceanbieter hinweg. Nach Übergabe der Resultate an den Bedarfsträger (Bild 2: ⑥) wird

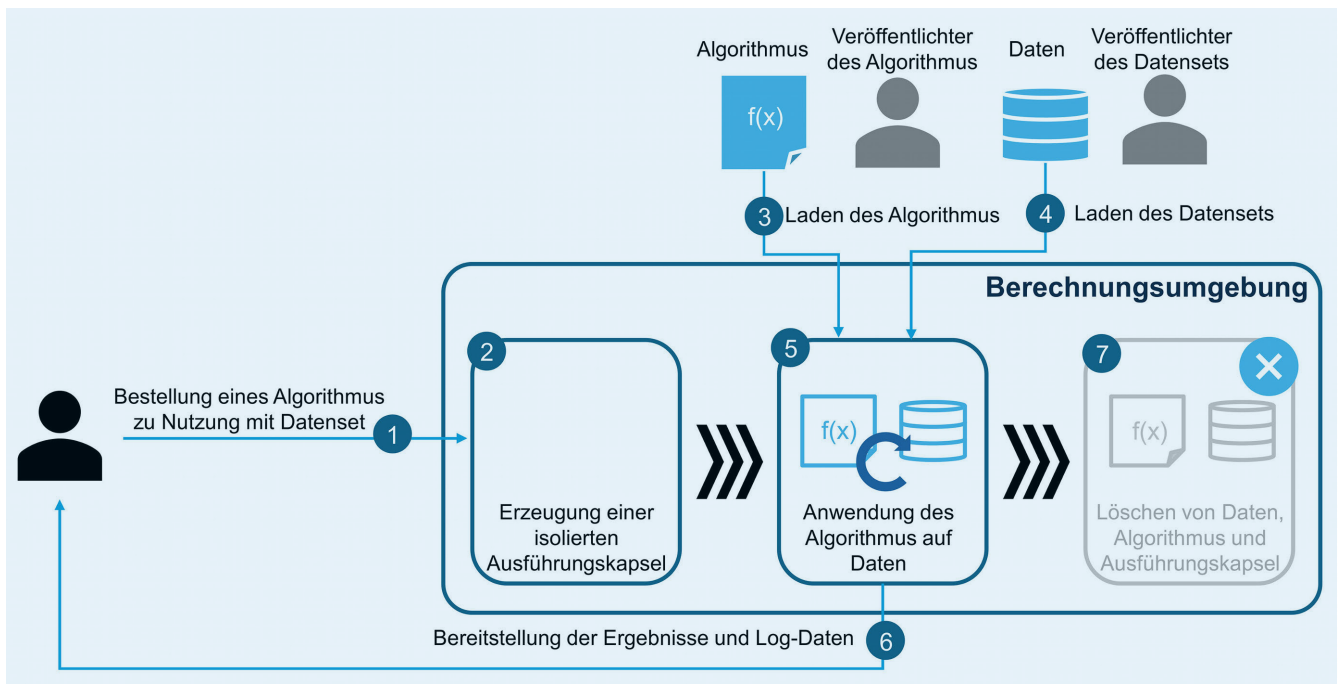


Bild 2. Vereinfachte Darstellung des Compute-to-Data-Ansatzes im föderierten Datensystem in Anlehnung an [30]. Grafik: deltaDAO

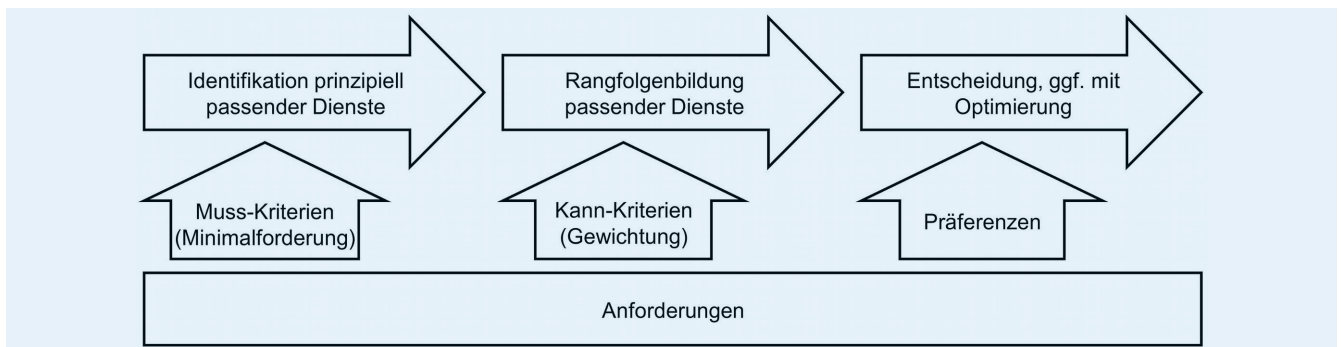


Bild 3. Auswahl einer Fertigungsdienstleistung. Grafik: Fraunhofer IAO

die Anwendungsumgebung gelöscht (Bild 2: ⑦). Dadurch ist sichergestellt, dass keine Zentralisierung oder Aufgabe des geistigen Eigentums nötig ist [33].

Mit den genannten Funktionalitäten bietet Pontus-X den Wegbereiter für Manufacturing-as-a-Service (MaaS), indem Fertigungskapazitäten über den föderierten Katalog flexibel als Dienstleistung bereitgestellt werden, Smart Contracts für eine schnelle und sichere Vertragsabwicklung genutzt werden und die Datensouveränität durch Compute-to-Data sichergestellt wird.

5.2 Verknüpfung von Servicenachfrage und -angebot

Eine Herausforderung bei der Realisierung von MaaS ist die Identifikation passender Fertigungsdienstleistungen, die möglichst optimal auf die Anforderungen der Kunden abgestimmt sind. Ein Grund hierfür ist der Aufwand, den der Abgleich von Fertigungsdienstleistungen mit den gestellten Anforderungen mit sich bringt, insbesondere, wenn dies manuell erfolgt. Eine mögliche Lösung für den Abgleich verfügbarer Fertigungsdienstleistungen mit produktseitigen Anforderungen ist ein stufenweises Vorgehen, bei dem zunächst aus den Anforderungen resultierende Muss-

Kriterien auf ihre Erfüllung durch die Fertigungsdienstleistungen überprüft werden. Für damit als prinzipiell passend identifizierte Fertigungsdienstleistungen kann eine „Passung“ auf der Grundlage von Kann-Kriterien und somit eine Rangfolge ermittelt werden. Die resultierende Rangfolge kann dann als Eingangsinformation für die Entscheidung durch den Anwender, auch unter Anwendung eines Optimierungsverfahrens, dienen. Das resultierende Vorgehen ist in Bild 3 visualisiert.

Um die manuellen Aufwände der Anwender zu reduzieren, wurde für die drei Stufen des Lösungsansatzes zur Entscheidungsunterstützung bei der Auswahl eines möglichst passenden Fertigungsdienstes das in Kapitel 5.1 vorgestellte dezentrale plattformbasierte Ökosystem entwickelt. Die Services ermöglichen Eingabe und Verwaltung sowohl von dienstleistungsspezifischen als auch von anforderungsbezogenen Daten und unterstützen auch den eigentlichen Abgleich zur Identifikation möglicher Dienste, deren Rangfolgenbildung sowie von Fragestellungen der Optimierung im Rahmen der Entscheidungsfindung.

Die Services sind als Web-Services beziehungsweise Web-Applikationen für die Anwendung per Internetbrowser realisiert. Das Matchmaking zur Identifikation potenziell geeigneter Ferti-

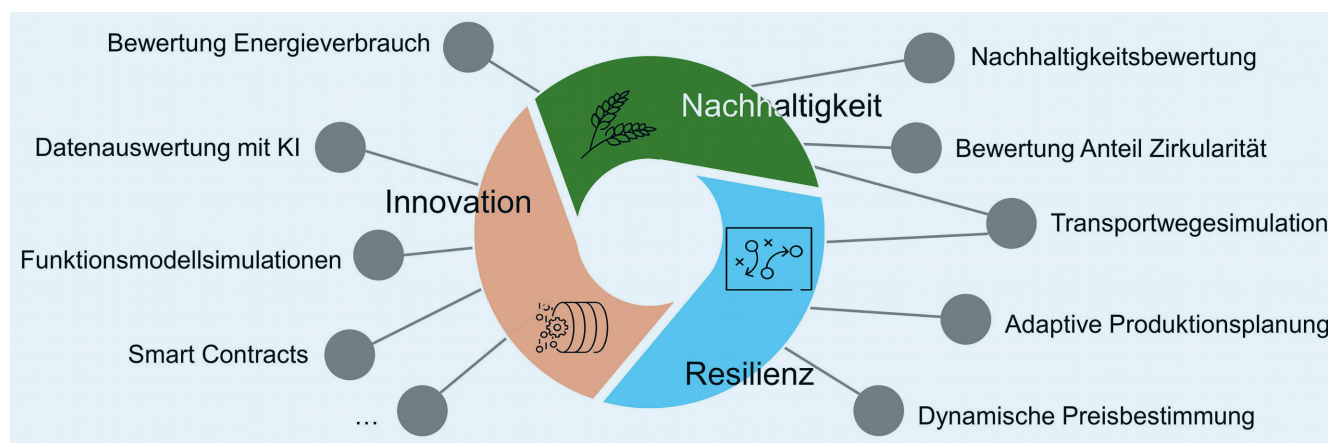


Bild 4. Weitere IT-gestützte Funktionen gemäß den Mehrwert-Dimensionen von MaaS (Manufacturing-as-a-Service). Grafik: Fraunhofer IAO

gungsdienstleistungen und die Ermittlung von Rangfolgen stellen ihre Funktionalitäten programmatisch zur Verfügung und können bei Bedarf über eine spezifische Web-Applikation aufgerufen werden. So können sie nicht nur von anderen Softwarebausteinen, sondern auch von Anwendern aufgerufen werden. Ein Service zur Optimierung des Einsatzes von Fertigungsdienstleistungen steht als Web-Anwendung mit grafischer Benutzeroberfläche zur Verfügung. Zudem wird ein Web-Service für die Speicherung und Verwaltung von Informationen bereitgestellt.

5.3 Weitere IT-gestützte Funktionen und Services für das Ökosystem

Der bedeutende Vorteil eines föderierten, plattformbasierten Ökosystems ist, dass es jedem Partner im Ökosystem möglich ist, existierende Services zu nutzen und, wenn nötig, fehlende zu ergänzen. Aufbauend hierauf können weitere IT-gestützte Services ins Ökosystem eingebracht werden, um die Etablierung eines Manufacturing-as-a-Service-Ökosystems zu unterstützen. Die Potenziale von MaaS-Ansätzen lassen sich in drei Hauptdimensionen – nachhaltiger Produzieren, flexible Marktreaktion und innovative Betriebskonzepte – aggregieren (**Bild 4**).

Diese und weitere IT-gestützten Funktionen lassen sich vergleichbar mit der Funktion Verknüpfung von Servicenachfrage und -angebot (siehe Kapitel 5.2) in Form von Web-Services über das Ökosystem ausspielen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag untersucht die service-orientierte Wertschöpfung in Produktionsnetzwerken und hebt deren Vorteile in einem digitalen und vernetzten Umfeld hervor. Produktionsnetzwerke profitieren von der Digitalisierung durch verbesserte Datensteuerung und erlauben flexible, effiziente Reaktionen auf Marktveränderungen. Der Ansatz der service-orientierten Fertigung integriert Dienstleistungen in den Produktionsprozess, um Kundenbedürfnisse besser zu erfüllen und die Kundenzufriedenheit zu steigern. Manufacturing-as-a-Service (MaaS) transformiert traditionelle Lieferketten in adaptive Netzwerke und nutzt Cloud-Manufacturing, um kosteneffektive und skalierbare Lösungen zu bieten. Der Beitrag diskutiert die Potenziale von MaaS, etwa die verbesserte Reaktionsfähigkeit und Widerstandsfähigkeit, sowie die Herausforderungen bei der Einführung, einschließlich technischer und

organisatorischer Barrieren und der Notwendigkeit für qualifiziertes Personal.

Die zukünftige Implementierung der service-orientierten Wertschöpfung wird von der Entwicklung technischer Lösungen und Plattformen abhängen, die eine effiziente Vernetzung und Datenverarbeitung ermöglichen. Der Einsatz von Daten- und Service-Ökosystemen, wie Pontus-X, kann als Wegbereiter für MaaS dienen, der die Zusammenarbeit zwischen Dienstleistern und Kunden verbessert. Unternehmen müssen bereit sein, ihre Geschäftsmodelle zu adaptieren und neue Kooperationen einzugehen, um die Vorteile der service-orientierten Ansätze voll auszuschöpfen. Die Integration von Smart Contracts und Compute-to-Data-Technologien wird die Effizienz und Sicherheit in der industriellen Nutzung erhöhen. Produzierende Unternehmen in Deutschland und die europäische Wirtschaft insgesamt können durch diese Ansätze gestärkt werden, indem innovative und nachhaltige Wertschöpfungsmodelle realisierbar werden.

FÖRDERHINWEIS

Europäische Kommission – Horizon Europe Forschungs- und Innovationsprogramm (HORIZON CL4–2023-TWIN-TRANSITION-01–07), Projekt ACCURATE (Achieving Resilience through Manufacturing as a Service, Digital Twins and Ecosystems), Förderkennzeichen 101138269

LITERATUR

- [1] Qin, J.; Liu, Y.; Grosvenor, R.: A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP* 52 (2016), pp. 173–178
- [2] Cascio, J.: Facing the Age of Chaos. Stand: 29.04.2020. Internet: [medi-um.com/@cascio/facing-the-age-of-chaos-b00687b1f51d](https://www.medi-um.com/@cascio/facing-the-age-of-chaos-b00687b1f51d). Zugriff am 11.04.2025
- [3] Kusiak, A.: Service manufacturing: Basic concepts and technologies. *Journal of Manufacturing Systems* 52 Part A (2019), pp. 198–204
- [4] Tenzer, F.: Volumen der jährlich generierten/replizierten digitalen Datenmenge weltweit von 2010 bis 2023 und Prognose für 2028. Internet: de.statista.com/statistik/daten/studie/267974/umfrage/prognose-zum-weltweit-generierten-daten-volumen/. Zugriff am 11.04.2025
- [5] Otto, B.; Korte, T.; Azkan, C. et al.: Data Economy. Status Quo der deutschen Wirtschaft & Handlungsfelder in der Data Economy. Stand 2019. Internet: www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/

PDF/2019/Gutachten_Data-Economy_Status_Quo.pdf. Zugriff am 11.04.2025

- [6] Demary, V.; Fritsch, M.; Goecke, H. et al.: Readiness Data Economy. Bereitschaft der deutschen Unternehmen für die Teilhabe an der Datenwirtschaft. Stand: 2019. Internet: www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2019/Gutachten_Readiness_Data_Economy.pdf. Zugriff am 11.04.2025
- [7] Esmailian, B.; Behdad, S.; Wang, B.: The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems* 39 (2016), pp. 79–100
- [8] Schuh, G.; Friedli, T.; Lanza, G. et al.: Zukunftsfähige Produktionsnetzwerke in disruptiven Zeiten. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 117 (2022) 12, S. 794–798
- [9] Peukert, S.; Martin, M.; Prank, S. et al.: Kreislauffähige Produktionsnetzwerke. Entscheidungsunterstützung zur Umsetzung zirkulärer Ökosysteme. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 119 (2024) 12, S. 885–889
- [10] Martin, M.; Benfer, M.; Peukert, S. et al.: A Changeable Decision Support System Based on Data Models for Global Production Networks. *Procedia CIRP* 120 (2023), pp. 684–689
- [11] Hertwig, M.; Zimmermann, N.; Lentjes, J.: Method for development of sustainable relations of manufacturing companies in industrial estates. 24th International Conference on Production Research, ICPR 2017 (2017), doi.org/10.12783/dtetr/icpr2017/17697
- [12] Verhaelen, B.; Martin, M.; Peukert, S. et al.: Practice-oriented methodology for increasing production ramp-up efficiency in global production networks of SME. *Production Engineering* 17 (2023) 1, pp. 145–177
- [13] Gao, J.; Yao, Y.; Zhu, V. C. Y. et al.: Service-oriented manufacturing: a new product pattern and manufacturing paradigm. *Journal of Intelligent Manufacturing* 22 (2011) 3, pp. 435–446
- [14] Mamasoulas, A.; Mourtzis, D.; Chrysosouris, G.: A manufacturing innovation overview: concepts, models and metrics. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 33 (2020) 8, pp. 769–791
- [15] Bask, A.; Lipponen, M.; Rajahonka, M. et al.: The concept of modularity: Diffusion from manufacturing to service production. *Journal of Manufacturing Technology Management* 21 (2010) 3, pp. 355–375
- [16] Yuan, M.; Zhou, Z.; Cai, X. et al.: Service composition model and method in cloud manufacturing. *Robotics and computer-integrated Manufacturing* 61 (2020), #101840
- [17] Henzel, R.; Herzwurm, G.: Cloud Manufacturing: A state-of-the-art survey of current issues. *Procedia CIRP* 72 (2018), pp. 947–952
- [18] Schuseil, F.; Hertwig, M.; Lentjes, J. et al.: A semantic matchmaking approach to empower human decision-making in Manufacturing-as-a-Service scenarios. 2024 AHFE International Conference on Human Factors in Design, Engineering, and Computing (AHFE 2024 Hawaii Edition), 2024, doi.org/10.54941/ahfe1005751
- [19] Kusiak, A.: Service manufacturing = Process-as-a-Service + Manufacturing Operations-as-a-Service. *Journal of Intelligent Manufacturing* 31 (2020) 1, pp. 1–2
- [20] Baghbani, M.: IDEF0 Modeling Standard: A Tool for Process Map Drawing under Requirements of ISO 9001:2015. A Case Study. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, 8 (2019) 4, pp. 57–66
- [21] Herold, D. M.; Marzantowicz, L.: Supply chain responses to global disruptions and its ripple effects: an institutional complexity perspective. *Operations Management Research* 16 (2023) 4, pp. 2213–2224
- [22] Melnyk, S. A.; Closs, D. J.; Griffis, S. E. et al.: Understanding Supply Chain Resilience. *Supply Chain Management Review* (2014) January/February, pp. 34–41
- [23] Deutsches Institut für Normung: Circular Thinking in Standards. Wie Normung eine Circular Economy unterstützen kann. Stand: 2025. Internet: www.din.de/forschung-und-innovation/themen/circular-economy/normenrecherche/modell-der-r-strategien#:~:text=Alle%20R%2DStrategien%20haben%20das,Einsatz%20von%20Sekund%C3%A4rrohstoffen%20zu%20f%C3%B6rdern.&text=Alle%20R%2DStrategien%20haben%20zum,Kreislauff%C3%BChrung%20von%20Materialien%20zu%20unterst%C3%BCtzen. Zugriff am 11.04.2025
- [24] Castelo-Branco, I.; Cruz-Jesus, F.; Oliveira, T.: Assessing Industry 4.0 readiness in manufacturing: Evidence for the European Union. *Computers in Industry* 107 (2019), pp. 22–32
- [25] Xu, X.; Lu, Y.; Vogel-Heuser, B. et al.: Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems* 61 (2021), pp. 530–535
- [26] Hertwig, M.; Schuseil, F.; Lentjes, J. et al.: Ontology-based matchmaking and resource scheduling for Manufacturing as a Service. *Procedia CIRP*, Volume 134 (2025), pp. 372–377
- [27] Dumss, S.; Weber, M.; Schwaiger, C. et al.: EuProGigant – A Concept Towards an Industrial System Architecture for Data-Driven Production Systems. *Procedia CIRP* 104 (2021), pp. 324–329
- [28] Hoffmann, F.; Weber, M.; Weigold, M. et al.: Developing GAIA-X Business Models for Production. Hannover: publish-Ing 2022
- [29] Perscheid, G.; Moormann, J.: Dezentrale Plattformen – Idee, Entwicklung, Perspektiven. *BIT* (2021) 2, S. 67–76
- [30] Gast, F.; Berchtenbreiter, V.; Dumss, S. et al.: Automatic Publication of Data to Data- and Service Ecosystems from the Shopfloor. *Procedia CIRP* 130 (2024), pp. 1589–1597
- [31] Ocean Protocol Foundation: Architecture. Architecture overview. Ocean protocol. Stand: 10.09.2024. Internet: docs.oceanprotocol.com/developers/compute-to-data/compute-to-data-architecture. Zugriff am 11.04.2025
- [32] Kaniovskyi, Y.; Koehler, M.; Benkner, S.: A containerized analytics framework for data and compute-intensive pipeline applications. SIGMOD/PODS'17: International Conference on Management of Data, Chicago IL USA, 2017, pp. 1–10
- [33] Gehrler, R.; Dumss, S.; Gast, F. et al.: EuProGigant: A decentralized Federated Learning Approach based on Compute-to-Data and Gaia-X. *Procedia CIRP* 128 (2024), pp. 710–715

Dr. - Ing. Michael M. Hertwig 

michael.hertwig@iao.fraunhofer.de
Tel. +49 711 970-2288

Dr. - Ing. Joachim Lentjes 

joachim.lentjes@iao.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO 
Nobelstr.12, 70569 Stuttgart
www.engineering.iao.fraunhofer.de

Thomas Komenda

thomas@delta-dao.com
Tel. +49 176 / 64219492

deltaDAO AG
Katharinenstr. 30a (Contor), 20457 Hamburg

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)