1.1 Datenstrukturen für eine resiliente Life Cycle Sustainability

R. H. Schmitt, M. Bodenbenner, H. Brings, B. Montavon

Gliederung

1 Motivation 40

2 Daten als Enabler der Life Cycle Sustainability 41

2.1 Life Cycle Sustainability – Definition und Zielsetzung 41

2.2 Datengetriebene Nachhaltigkeitsstrategien und -bewertung 42

3 Resilientes Produktionsdatenmanagement 44

3.1 Resilienz – Definition und Herausforderungen 44

3.2 FAIR Data und FACT Algorithms 46

3.3 Von FAIR und FACT zu Produktionsdatenmanagement 48

4 Datenstrukturen und technologische Lösungsbausteine 50

4.1 5G als Infrastruktur (Vernetzte Ressourcen) 51

4.2 Domänenadaptierte Datenstrukturen (Daten) 52

4.3 Von Daten- zu Informationsmanagement mittels Kontextualisierung (Informationen) 53

4.4 Der Digitale Zwilling als Automatisierungsvehikel (Wissen) 55

4.5 Nachhaltigkeits- und Qualitätsmanagement als Synergie (Aktion) 56

5 Ausblick 57

6 Literatur 59

doi: 10.24406/publica-958

Kurzfassung

Datenstrukturen für eine resiliente Life Cycle Sustainability

Die Perspektive der Life Cycle Sustainability von morgen vereinigt die Megatrends Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Resilienz unter den Rahmenbedingungen eines verantwortungsvollen Umgangs mit Ressourcen. Die Betrachtung definierter Nachhaltigkeitskriterien für ein Produkt und seine Komponenten über mehrere Lebenszyklen mit dem Ziel des Werterhalts oder der Wertsteigerung, fokussiert diese drei Megatrends auf das notwendige Datenmanagement. Die Daten bestimmen den technologischen Gestaltungsspielraum und ermöglichen eine objektive Bewertung. Die effektive Nutzung bereits existierender Bausteine wie Smart Sensors, Digital Twins, Cyber Physical Systems, intelligente Algorithmen zur Mustererkennung und Entscheidungsfindung und andere sind durch die notwendige fortschrittliche Kommunikation in Bezug auf Geschwindigkeit, Latenz und Jitter zu ergänzen. Der Zeithorizont der Life Cycle Sustainability sowie die a priori gegebenenfalls unbekannte Nutzung der Daten führen zu weiteren Herausforderungen: Diese müssen über Produktions- und Nutzerzyklen hinaus für einen langen Zeitraum und für viele Stakeholder zuverlässig auffindbar, zugänglich, interoperabel und wiederverwendbar sein, selbst wenn zwischen der Datenerhebung und der Datennutzung mehrere Jahrzehnte, vielzählige Dateneigner sowie mehrfache Systembrüche liegen. Die FAIR- und FACT- Prinzipien bieten einen geeigneten Rahmen, sofern Sie auf die Domäne der Produktionstechnik zugeschnitten werden, um wirtschaftlich erfolgreiche zirkuläre Wertschöpfung zu ermöglichen. Hierfür wird im Beitrag ein Ansatz vorgestellt und anhand verschiedener Beispiele aus den Bereichen 5G, Sensordatenmanagement, Automatisierung, und Qualitätsmanagement illustriert.

Schlagwörter: Datenmanagement, Resilienz, Sensing, Nachhaltigkeit

Abstract

Data Structures for Resilience in Life Cycle Sustainability

The perspective of tomorrow's life cycle sustainability combines the megatrends of sustainability, digitalisation and resilience under the boundary conditions of responsible use of resources. The cross-life cycle consideration of defined sustainability criteria for a product and its components with the aim of maintaining or increasing value focuses these three megatrends on the necessary data management. The data determine the technological scope and enable an objective evaluation. The effective use of already existing building blocks such as smart sensors, digital twins, cyber physical systems, intelligent algorithms for pattern recognition and decision making and others need to be complemented by the necessary advanced communication in terms of speed, latency and jitter. The temporal horizon of life cycle sustainability and the a priori unknown use of data lead to further challenges: Beyond production and user cycles, data must be reliably findable, accessible, interoperable and reusable for a long period of time and for many stakeholders, even if there are several decades, numerous data owners and multiple system breaks between data collection and data use. The FAIR and FACT principles offer a suitable framework, provided they are tailored to the domain of production technology, to enable economically successful circular value creation. The article presents an approach for this and illustrates it with various examples from the areas of 5G, sensor data management, automation and quality management.

Keywords: Data Management, Resilience, Sensing, Sustainability

1 Motivation

Das Versprechen zunehmenden Wohlstands und die Teilhabe Aller daran bei steigender Gesamtpopulation ist in Bezug auf Erhalt von Natur und Umwelt, sodass auch der Verantwortung für nachfolgende Generationen nachgekommen werden kann, eine der größten gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Dies spiegelt sich auch in den politischen Makrozielen zur Reduktion des Klimawandels wider – bspw. dem Erreichen von CO_2-Neutralität bis 2050 oder dem sogenannten 1,5 Grad Ziel. Die Naturkatastrophen der jüngeren Vergangenheit, die aktuelle Energiekrise sowie die steigende politische Präsenz rücken das Thema Nachhaltigkeit somit auch für produzierende Unternehmen in den operativen und strategischen Fokus.

Ein Megatrend, die Digitalisierung, gilt mit ihren Metaphern der Cyber-Physischen Systeme, abgebildet in Digitalen Zwillingen, als Enabler für die nachhaltige Gestaltung der Produktionstechnik. Dies wird sowohl in der produktionstechnischen Gemeinschaft [1], der Erforschung von neuen Technologien [2] als auch in der europapolitischen Ausrichtung konkretisiert [3]. Dennoch stand bei der Umsetzung von Industrie 4.0 bisher vor allem die Vernetzung der Ressourcen im Vordergrund [4]. Hiermit gehen zwei Herausforderungen einher: Um das Potential der Daten im Sinne der Nachhaltigkeit zu nutzen, muss der spezifische digitale Schatten nicht nur gespeichert, sondern auch zu Informationen, Wissen sowie konkreten Aktionen aggregiert und verarbeitet werden [2]. Zum anderen können Daten nicht über einen langen Zeitraum in praktisch unbegrenzter Menge gesammelt werden, ohne selbst zu einem erheblichen Treiber des CO_2-Fußabdrucks zu werden. Der Energieverbrauch der Datenspeicherung hängt im Einzelfall von vielen Faktoren ab, eine Überschlagsrechnung schätzt jedoch ein CO_2– Äquivalent von etwa einer Tonne für die Cloudspeicherung von 100 Gigabyte über 10 Jahre ab. Gleichzeitig wurde die Erwartung, dass die relevante Datenmenge bis 2025 auf ca. 80 Billionen Gigabyte zunimmt [1], bereits 2022 mit fast 100 Zettabyte, die erzeugt, gespeichert, verteilt und konsumiert wurden, übertroffen. Eine vollständige Speicherung der gesamten erzeugten jährlichen Brutto-Datenmenge über je 10 Jahre wäre in dieser Schätzung mit ca. 1.000 Milliarden Tonnen CO_2– Äquivalent verbunden – dies entspricht mehr als dem 20-fachen des weltweiten CO_2-Ausstoß 2021 [5]. Auch wenn viele Technologieunternehmen – darunter auch die Hyperscaler – selbst an der nachhaltigeren Gestaltung ihrer Dateninfrastruktur arbeiten [6], so wird deutlich, dass allein aus diesem Aspekt heraus ein konsequentes Datenmanagement sowie Strategien zur effizienten Aggregation der Daten und anschließenden Rohdatenreduktion notwendig sind.

Ein dritter aktueller Megatrend ist Resilienz als erstrebenswerte Eigenschaft für die Gesellschaft und damit auch für ihre produzierenden Unternehmen. In global vernetzten, komplexen Produktionssystemen haben unerwartete Störungen schnell weitreichende-Auswirkungen [7] – beispielsweise, wenn krisenhafte Situationen im Logistikbereich Containerpreise verachtfachen und die Rentabilität einer global verteilten Produktion in Frage stellen [8]. Betrachtet man nicht nur die Rentabilität, sondern geht von multidimensionalen Unternehmenszielen entlang der FESG-Kriterien aus [9], entsteht ein direkter Bezug zwischen Resilienz und Nachhaltigkeit.

Die drei Megatrends Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Resilienz werden in der Perspektive der Life Cycle Sustainability fokussiert, da diese sowohl eine Konkretisierung der Makroziele als auch technologischer Strategien ermöglicht. Außerdem schafft diese einen Bezugsrahmen für die Implementierung des notwendigen Datenmanagements. Zentraler Aspekt dessen sind geeignete Datenstrukturen. Dieser Beitrag betrachtet die o.g.

Fokussierung der Megatrends in drei Hauptabschnitten: Zunächst wird das Konzept der Life Cycle Sustainability motiviert und die Rolle der Daten entlang der Wissenspyramide hervorgehoben (Abschnitt 2). Anschließend werden der Resilienzbegriff für die Life Cycle Sustainability interpretiert und die Implikationen für Datenstrukturen und Algorithmen abgeleitet (Abschnitt 3). Abschließend werden technologische Lösungsansätze als Bausteine zur Erreichung einer resilienten Life Cycle Sustainability vorgestellt (Abschnitt 4).

2 Daten als Enabler der Life Cycle Sustainability

2.1 Life Cycle Sustainability – Definition und Zielsetzung

Die Ursprünge der Life Cycle Sustainability liegen im Life Cycle Thinking [10]. Life Cycle Thinking fordert die Betrachtung des kumulierten Fußabdrucks eines Produktes über seinen gesamten Lebenszyklus, oft auch als *cradle to grave* bezeichnet. Life Cycle Thinking wurde bereits 2003 in die *Integrated Product Policy* der Europäischen Union mit Fokus auf ökologische Nachhaltigkeit aufgenommen [11]. Die Erweiterung hin zu Life Cycle Sustainability lässt sich in die Entwicklung des Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) einordnen [10], [12]. Der ursprüngliche Betrachtungshorizont umfasst die Kriterien der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit [12]. Ohne Einschränkungen können hier jedoch weitere Kriterien und eine Gewichtung dieser mit einbezogen werden, sodass Life Cycle Sustainability insbesondere auch mit einer an den FESG-Kriterien ausgerichteten, grünen und wirtschaftlichen Produktion kompatibel ist.

Die Umsetzung der Life Cycle Sustainability setzt damit die Optimierung – d.h. Reduzierung – des Fußabdrucks eines Produkts im Rahmen definierter Nachhaltigkeitskriterien entsprechend des Life Cycle Thinking als Ziel voraus. Damit ist es aus einer Zielperspektive, insbesondere im ökologischen Bereich, kongruent zu Closed-Loop Ansätzen sowie der Idee einer Circular Economy. Aus der Herausforderung der Ressourcenknappheit bei steigendem globalem Wohlstand sind über die Zeit verschiedene Frameworks entstanden [13]. Hier seien exemplarisch *Cradle-to-Cradle,* das *Ricoh Comet System* sowie die *Performance Economy* genannt. Ihnen gemein ist die Darstellung der Zirkularität auf mehreren Ebenen vom Produkt bis zum Rohmaterial. Die nachhaltige Gestaltung der Produktion wird daher oftmals synonym mit der Umsetzung einer Circular Economy verstanden. Auch wenn dies aus akademischer Sicht nicht vollständig zutreffend ist, sind die entwickelten Strategien und Technologien auch für die Erreichung einer Life Cycle Sustainability zielführend. Kompakt können die übergeordneten Strategien als *9R - Refuse, Rethink, Reduce, Reuse, Repair, Refurbish, Remanufacture, Repurpose, Recycle, Recover -* zusammengefasst werden [14].

Als Konsequenz muss im Zuge der Life Cycle Sustainability der Betrachtungshorizont über den Fokus auf ein Produkt und einen Lebenszyklus, wie er zunächst im Life Cycle Thinking zu impliziert sein scheint, hinaus erweitert werden. Aus dieser Motivation heraus schlägt dieser Beitrag eine spezifischere Definition der Life Cycle Sustainability vor, welche die Erweiterung auf mehrere Lebenszyklen explizit vorsieht:

> *Life Cycle Sustainability ist die objektive Erfüllung definierter Nachhaltigkeitskriterien über den gesamtem Lebenszyklus eines Produktes inklusive der Betrachtung vorheriger und nachfolgender Lebenszyklen des Produktes selbst oder einzelner Bestandteile.*

Abbildung 1 stellt dieses Verständnis grafisch dar: Über mehrere Lebenszyklen und Nutzungsphasen hinweg können ein Produkt bzw. seine Bestandteile verschiedene Zustände aufweisen. Life Cycle Sustainability wird erreicht, wenn über diese Zustände hinweg definierte Nachhaltigkeitskriterien erfüllt werden.

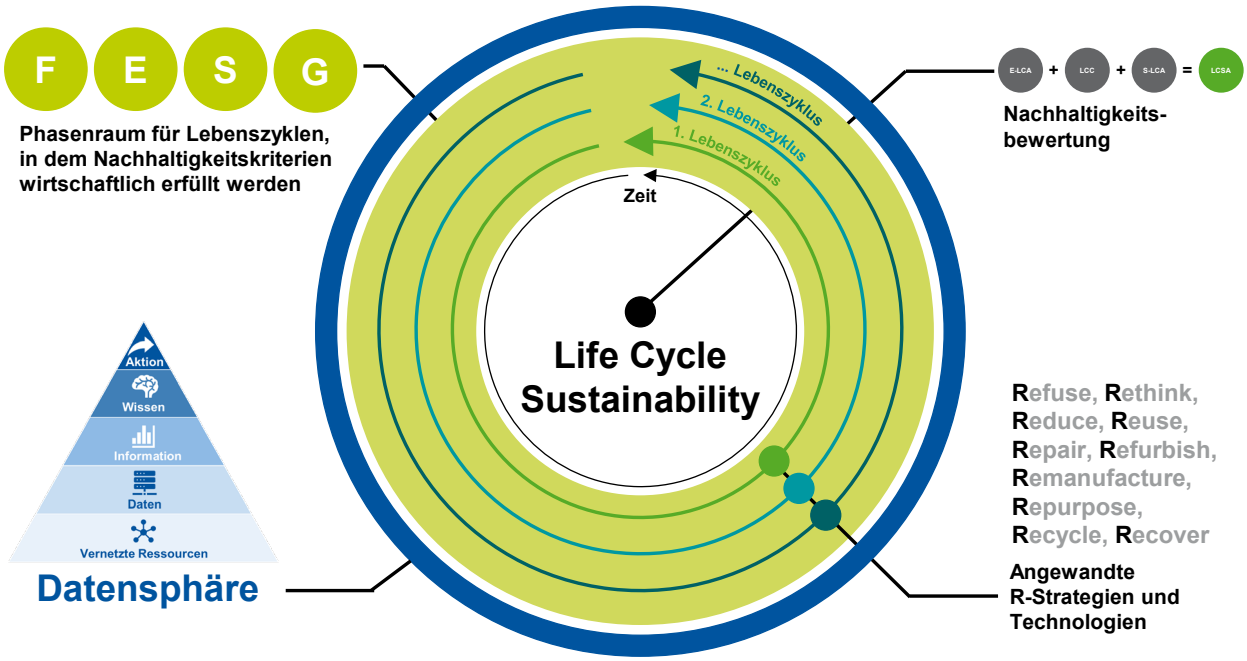

Abbildung 1: Erweitertes Verständnis von Life Cycle Sustainability in diesem Beitrag

Angewandte Nachhaltigkeitsstrategien und geeignete Technologien sind notwendig, um den Übergang zu neuen Zuständen, die das Einhalten der Kriterien mit einem längeren Zeithorizont erlauben, zu erreichen. Die physikalischen Lebenszyklen werden durch eine Datensphäre ergänzt, welche in zweierlei Hinsicht notwendig ist: Zum einen ermöglicht sie, eine objektive Nachhaltigkeitsbewertung mittels datenbasierter Kennzahlen abzubilden. Zum anderen sind die Daten die Grundlage für die notwendigen Informationen, die zielgerichtete Aktionen und die Anwendung von Nachhaltigkeitsstrategien ermöglichen.

2.2 Datengetriebene Nachhaltigkeitsstrategien und -bewertung

Zur Umsetzung der 9R Strategien und ähnlicher Ansätze sind Digitale Zwillinge entscheidend und stellen einen Enabler dar, ein erhebliches Nachhaltigkeitspotential zu heben. [1], [2], [13]. KRISTOFFERSEN et. al. konkretisieren diese Annahme in einem an der Wissenspyramide ausgerichteten Review bereits veröffentlichter Ansätze, welches im in Abbildung 2 gezeigten *Smart Circular Economy Framework* mündet [2].

Zentrales Element der Wissenspyramide als Ordnungsrahmen ist dabei der Datenfluss und die entsprechende Verarbeitung über die Ebenen hinweg:

- **Vernetzte Ressourcen** sind die Grundlage zur Erhebung relevanter Daten über den gesamtem Lebenszyklus hinweg.
- **Daten** sind die Rohform einer aufgenommenen Information sowie ihrer Darstellung als Zeichen, jedoch ohne Kontext und Interpretation.
- **Informationen** werden aus Daten gewonnen, bspw. durch Interpretation, Aggregation und Kontextualisierung. Sie ermöglichen deskriptive Analysen.

- **Wissen** stellt die Weiterentwicklung von Informationen zu Insights und Entscheidungsgrundlagen dar, und ermöglicht diagnostische bzw. explorative Maßnahmen.
- **Aktionen** sind die konkrete, ggf. autonome Umsetzung von Entscheidungen auf Basis des gewonnenen Wissens. Hierzu zählen insbesondere prädiktive und präskriptive Methoden.

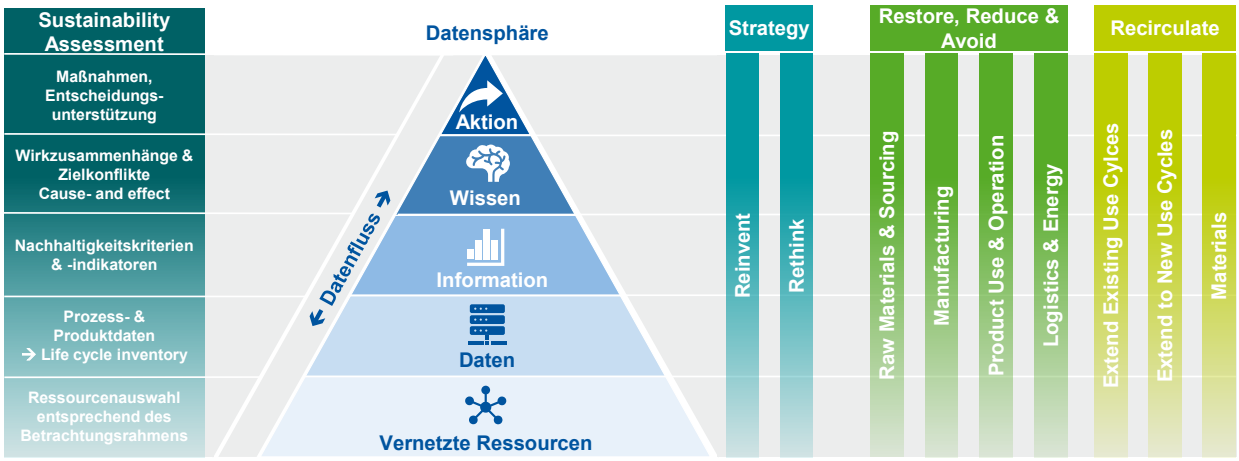

Abbildung 2: Smart Circular Economy Framework nach KRISTOFFERSEN et al [2] sowie Ebenen der Nachhaligkeitsbewertung

Die Wissenspyramide ist gleichzeitig ein Ordnungsrahmen für die objektive Nachhaltigkeitsbewertung, da an ihr die Aggregation verfügbarer Daten über Kennzahlen und Indikatoren hin zur Beurteilung der erwarteten Erfüllung von Nachhaltigkeitskriterien erfolgen kann. Die Wichtigkeit einer objektiven Bewertung kann an der Frage der Sekundäreffekte verdeutlicht werden: Ist es im Betrachtungshorizont des ersten Lebenszyklus beispielsweise möglich, das eingesetzte Material praktisch vollständig in einem neuen Produkt zu recyclen, erscheint dies zunächst ökologisch nachhaltig. Wird mit dem neuen Produkt jedoch ein Bedarf adressiert, der zugleich auch kreiert wird, ist der Fußabdruck nicht kleiner als zuvor. Ein ähnlicher Effekt tritt auf, wenn, bspw. durch Refurbishment, ein Second-Hand-Markt entsteht, der jedoch durch die geringeren Kosten eine vom Primärmarkt disjunkte Käuferschaft adressiert [13]. Daher ist es auch notwendig, den Bezugsrahmen von Nachhaltigkeitsindikatoren möglichst objektiv zu quantifizieren. Darüber hinaus ist transparente Nachhaltigkeitsbewertung ein wichtiger Baustein zur Integration von Kundschaft und Mitarbeitenden in die Nachhaltigkeitsstrategie. So legen GRANSKOG et al. dar, dass durch diese Integration und Kommunikation die Synergie von Nachhaltigkeit und Wertschöpfung besser gelingen kann [15].

Zur Operationalisierung, vor allem auf den unteren Ebenen der Wissenspyramide, ist die Dekomposition der definierten Kategorien- und Kriterien-spezifischen Nachhaltigkeitsindikatoren in konkrete quantifizierbare Größen, die Nachhaltigkeitskennzahlen, notwendig, damit Datenerhebung, -darstellung sowie -verarbeitung und damit auch die entsprechenden Datenstrukturen gestaltet werden können. Abbildung 3 zeigt die Kategorien eines von SOHNIUS et al. entwickelten Kennzahlenmodells, welches eine solche Dekomposition darstellt [16]. Spezifische Größen sind beispielsweise der absolute Materialverbrauch für Verpackung in Tonnen (Ökologie/Materialien) oder die Fluktuation der Mitarbeitenden (Soziales/Beschäftigungsverhältnis).

Insgesamt wird auf Seite der Nachhaltigkeitsstrategien deutlich, dass die verfügbaren Technologien und ihr Impact in den höheren Ebenen der Wissenspyramide zunehmen. Das gleiche gilt für die objektive Nachhaltigkeitsbewertung, die nur bei geeigneter Datenaggregation- und Verarbeitung gelingen kann. Im Ziel der Life Cycle Sustainability erstreckt sich diese Voraussetzung zudem über mehrere Lebenszyklen. Die umfassende Vernetzung von Ressourcen sowie langfristige und belastbare Verfügbarkeit nutzbarer Daten werden somit zur grundlegenden Voraussetzung zur Gestaltung einer Grünen Produktion.

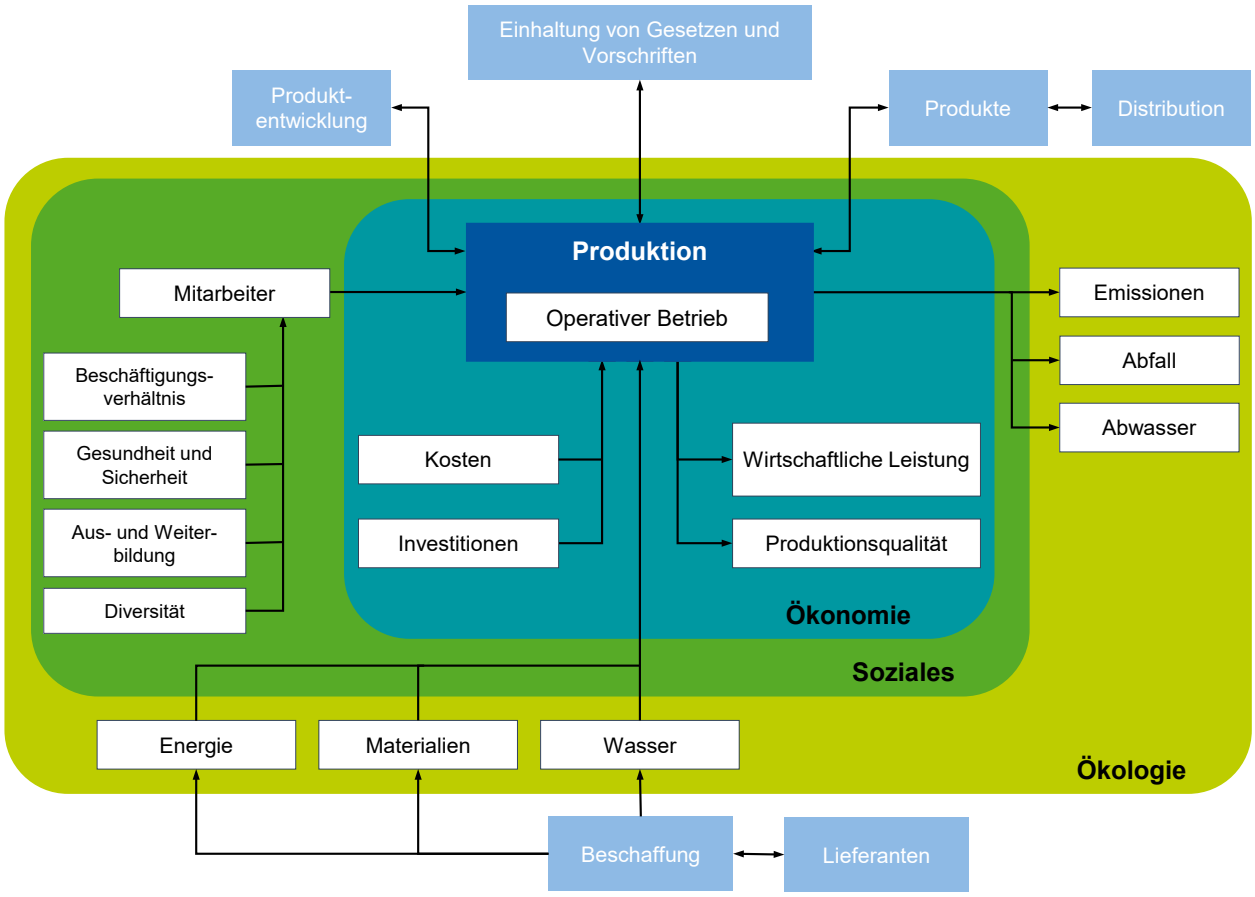

Abbildung 3: Kategorien messbarer Größen zur Beurteilung der Erreichung definierter Nachhaltigkeitskriterien nach SOHNIUS et al. [16]

3 Resilientes Produktionsdatenmanagement

3.1 Resilienz – Definition und Herausforderungen

Resilienz ist ein Begriff, der in mehreren Wissenschaftsdisziplinen definiert und dabei mit unterschiedichen Eigenschaften konnotiert ist. Im Bereich der Produktionstechnik versteht man hierunter im Allgemeinen die Fähigkeit eines Systems, in Anbetracht einer Störung oder eines anderen, unerwarteten Stimulus, innerhalb einer gewissen Erholungszeit, zu einem wertschöpfenden Zustand zurückzukehren [4]. Darüber hinaus wird die Resilienz häufig mit Charakteristika wie Robustheit, Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Agilität verbunden [17].

Für das Ziel einer resilienten Life Cycle Sustainability schlagen die Autoren vor, den Resilienzbegriff wie folgt zu definieren:

Resilienz in der Life Cycle Sustainability bezeichnet die Fähigkeit, in Anbetracht eines unerwarteten Ereignisses definierte Nachhalitkeitskriterien über den gesamten Lebenszyklus weiterhin, ggf. unter Aufnahme eines begrenzten zusätzlichen Fußabdrucks, aufrecht zu halten.

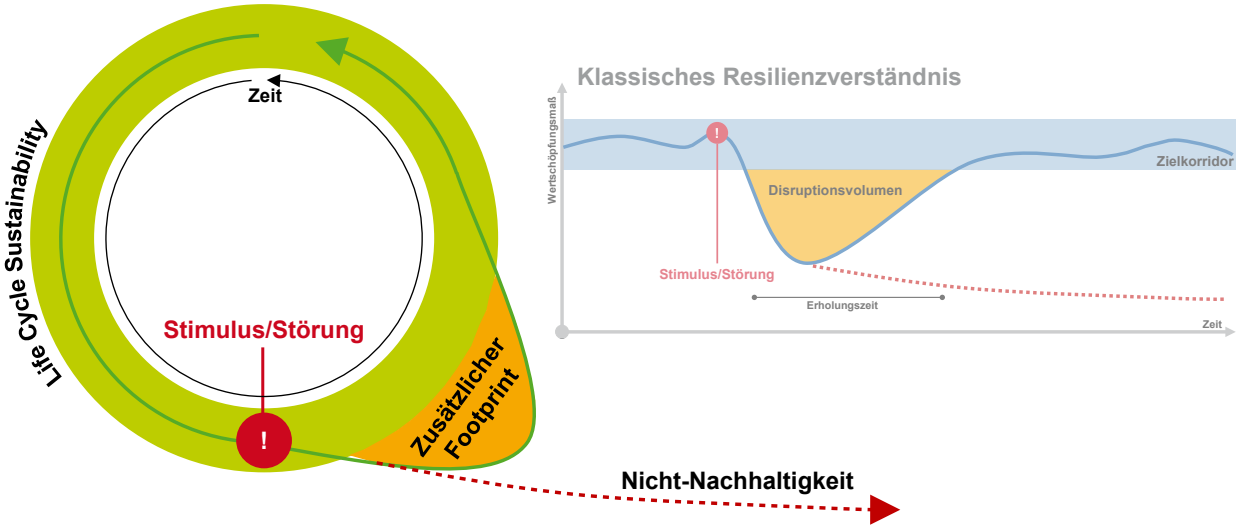

Abbildung 4: Reinterpretation des Resilienzbegriffes für Life Cycle Sustainability

Diese Re-Interpretation überführt den im Vergleich zum geläufigen Resilienz-Verständnis linearen in einen sich über ggf. mehrere Lebenszyklen erstreckenden zirkulären Zielkorridor (Abbildung 4).

Auf Grundlage dessen, dass wesentliche Technologien und Strategien zur Erreichung einer Life Cycle Sustainability datengetrieben sind (vgl. Abschnitt 2), ergeben sich bezogen auf die Resilienz unter anderem folgende konkrete Herausforderungen für das Datenmanagement:

1. Die Datenverfügbarkeit selbst muss resilient werden in dem Sinne, dass eine mangelnde Verfügbarkeit im Moment der Anwendung datengetriebener Technologien nicht selbst zu einer Störung werden darf.
2. Daten müssen in geeigneter Form vorgehalten werden, um bei einer Störung schnell und mit begrenztem Fußabdruck technologisch reagieren zu können. Dies betrifft nicht nur die Verfügbarkeit der Daten selbst, sondern auch deren Verarbeitung entlang der Wissenspyramide.
3. Es müssen Möglichkeiten zur Erhebung notwendiger, jedoch zuvor nichtexistierender Daten berücksichtigt werden, beispielsweise auf Basis der Messtechnik.
4. Zur Entscheidungsfindung müssen Daten zur Bewertung der Reaktion in Bezug auf den zusätzlichen Fußabdruck und die langfristige Erreichbarkeit der Nachhaltigkeitsziele geeignet vorliegen.
5. Das Datenmanagement muss über sehr langfristige Zeiträume sichergestellt werden.
6. Die Implementierung des Datenmanagements selbst, insbesondere das Vorhalten und Verarbeiten von Daten, bringt einen eigenen, zusätzlichen Beitrag zum Fußabdruck im Sinne des Life Cycle Thinkings ein.

Diese Herausforderungen münden zum einen in der Notwendigkeit der Etablierung des Produktionsdatenmanagements als eigenständige Aufgabe, zum anderen in der Anpassung oder Erweiterung bestehender Bereiche der Produktionstechnik, wie z.B. Qualitätsmanagement und Automatisierung.

3.2 FAIR Data und FACT Algorithms

Die Verarbeitung und Aggregation von Daten entlang der Wissenspyramide erfordert ihre zweifels- und fehlerfreie Interpretation. Nur so kann sichergestellt werden, dass Inkonsistenz verschiedener Daten erkannt und Fehlentscheidungen vermieden werden können [18], um die Resilienz der Life Cycle Sustainability zu stärken. Ein ausreichender Umfang an Dokumentation mittels Metadaten und Kontextinformationen zu erfassten und gespeicherten Daten ist daher Grundvoraussetzung dafür diese Daten zu finden, zu verstehen und (wieder-) zu verwenden, sowie aus dem daraus abgeleiteten Wissen Entscheidungen zu treffen. Diese Ausgangslage mündete 2016 in die von WILKINSON et al. vorgestellten „FAIR Guiding Principles“ für Daten [19]. „FAIR“ ist hierbei nicht im herkömmlichen Sinne zu verstehen, sondern als Akronym der englischen Begriffe für die vier Säulen nachhaltigen Datenmanagements: *Findability, Accessibility, Interoperability* und *Reusability*, vgl. Abbildung 5. Aufgeschlüsselt in mehrere Aspekte der vier Prinzipien, formulieren WILKINSON et al. folgende Anforderungen:

Findability - Um Daten überhaupt verwenden zu können, müssen Daten zunächst gefunden werden können. Dies erfordert zum einen eindeutige und persistente Identifikatoren für Daten, sowie die Beschreibung der Daten anhand ausführlicher Metadaten, welche sowohl Menschen als auch Algorithmen ermöglichen mittels entsprechender Suchanfragen diese Daten zu finden. Technisch bedeutet dies, dass sowohl Daten als auch Metadaten in einem durchsuchbaren Index verwaltet werden, also beispielsweise einer Datenbank.

Accessibility - Wenn Daten gefunden werden können, müssen Sie im zweiten Schritt auch erreichbar sein. Dies bedeutet nicht, dass Daten frei verfügbar sein müssen, sondern dass die Zugriffsregeln klar und transparent kommuniziert werden, d.h. nachvollziehbar ist, wer und unter welchen Bedingungen Zugriff auf die Daten erhalten kann. Auf technischer Ebene ist dazu die Verwendung standardisierter und öffentlicher Datenformate und Datenaustauschprotokolle erforderlich, sowie die technische Netzanbindung der Speicherressource.

Interoperabilitiy - Interoperabilität erfordert, dass Daten allgemein verständlich und interpretierbar sind. Kernaspekt dessen ist die Verwendung bekannter und definierter Terme und Sprachen für die Darstellung der Daten (bzw. der darin enthaltenen Informationen). Das Weiteren kann die Interoperabilität von Daten durch Referenzieren anderer Metadaten und Daten, also der Einordnung in einen größeren Kontext, erheblich gesteigert werden.

Reusability - Die Einhaltung der zuvor genannten drei Kriterien ist notwendig, um Daten zu einem späteren Zeitpunkt nutzen zu können, reicht aber allein nicht aus. Um entscheiden zu können, ob Daten für eine spezifische Anwendung (wieder)verwendet werden können, müssen Informationen zum Ursprung der Daten und allen relevanten Attributen verfügbar sein. Dabei ist die Einhaltung von domänen-spezifischen Anforderungen und die Angabe einer Nutzungslizenz elementar.

Werden Daten gemäß der FAIR Prinzipien erfasst, verwaltet und gespeichert, erfüllt auch das Datenmanagement selbst Nachhaltigkeitsaspekte. Daten, zu denen keinerlei oder

wenig Informationen über ihren Kontext gespeichert sind, können nicht eindeutig interpretiert und damit auch nicht (wieder-) verwendet werden. Solche Daten können daher als verloren betrachtet werden [20] und stellen, falls trotzdem langfristig gespeichert, einen zusätzlichen und vermeidbaren Fußabdruck dar.

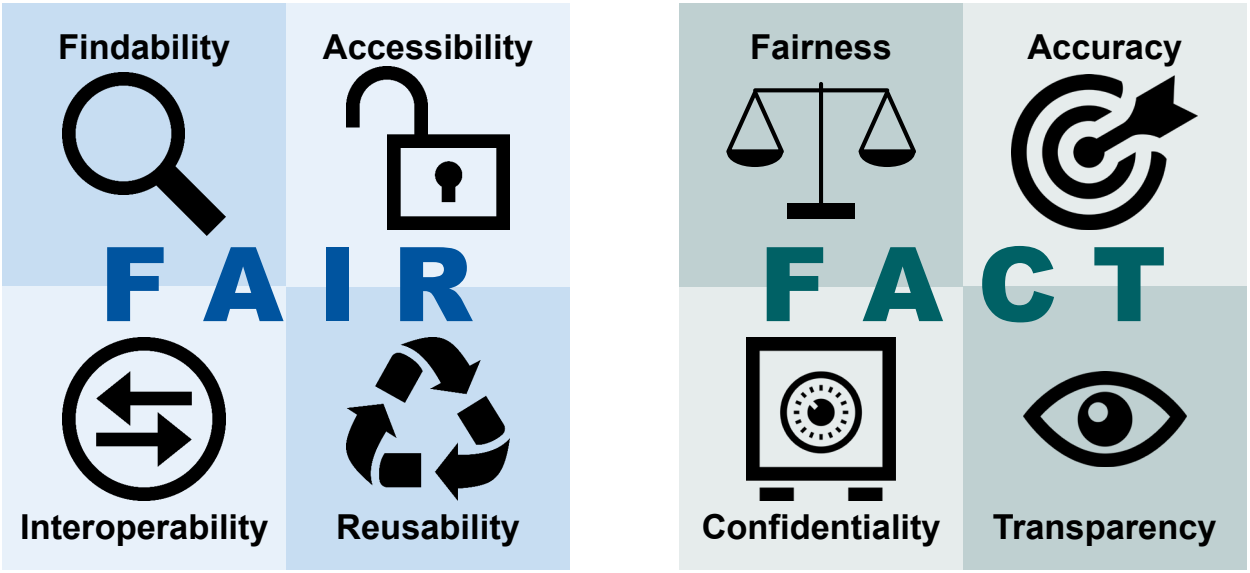

Abbildung 5: Links: die "FAIR Guiding Principles" für Daten [19], rechts: Herausforderungen der verantwortungsvollen Datenanalyse [21]

Die Aggregation und Verarbeitung von Daten entlang den einzelnen Ebenen der Wissenspyramide umfasst eine Vielzahl von Algorithmen und Softwarebausteinen, welche auch Verfahren des Maschinellen Lernens umfassen können. Um die Belastbarkeit der abgeleiteten Entscheidungen im Sinne einer resilienten Life Cycle Sustainability zu erreichen, müssen nicht nur die zugrunde liegenden Daten interpretierbar, genauer FAIR, sondern auch die maschinelle Datenverarbeitung bzw. die Algorithmen korrekt und nachvollziehbar sein [22]. Dies knüpft an die Kriterien für eine verantwortungsvolle Datenanalyse an, welche VAN DER AALST et al. [21] anhand von vier Bedingungen darstellen: Fairness, Genauigkeit, Vertraulichkeit und Transparenz, vgl. Abbildung 5.

Fairness - Fairness bezieht sich dabei nicht auf die zugrunde liegenden Daten und die FAIR Prinzipien, sondern auf eingesetzte Algorithmen und fordert die Unvoreingenommenheit dieser. Das heißt sowohl die für das Training verwendete Datengrundlage als auch die Implementierung des Algorithmus müssen sicherstellen, dass die Datenauswertung nicht verzerrt wird.

Accuracy - Aufgrund der hochdimensionalen Datenräume und heterogenen Eingangsdaten komplexer Algorithmen und Softwarelösungen ist die Präzision eines Ergebnisses, sowohl im Sinne der Genauigkeit einer Berechnung als auch ihrer Wiederholbarkeit, oft nicht nachvollziehbar. Daher ist es wichtig, nicht nur ein Ergebnis, sondern auch eine Angabe über dessen Genauigkeit, ggf. der Sensitivität gegenüber veränderten Eingangsgrößen, zu ermitteln und zurückzugeben. Eingeschlossen wird in dieser Definition häufig auch der Begriff der Korrektheit, also die Eigenschaft, wie genau ein spezifischer Sachverhalt algorithmisch abgebildet wird. Zu unterscheiden ist also zwischen im engeren Sinne „accuracy“ and „correctness“.

Confidentiality - Verarbeitete Daten enthalten unter Umständen sensible Informationen. Um die Datensouveränität sicherzustellen, dürfen von Algorithmen berechnete Ergebnisse daher keine Rückschlüsse auf diese sensiblen Eingangsdaten zulassen. Ebenso

darf ein Ergebnis auch keinen Rückschluss auf die implementierungs-technischen Details eines Algorithmus ermögliche, weil der Algorithmus selbst geistiges Eigentum ist. Daher ist die Sicherstellung der Vertraulichkeit sowohl der Daten als auch der Algorithmen ein integraler Bestandteil verantwortungsvoller Datenanalyse.

Transparency - Zuletzt müssen eingesetzte Verfahren transparent sein, damit die berechneten Ergebnisse nachvollziehbar sind. Algorithmen dürfen nicht als Black-Box betrachtet und eingesetzt werden, da die Ergebnisse sonst nicht von Menschen verstanden werden können. Transparency stellt dabei keinen Widerspruch zu Confidentiality dar, dennoch ist die parallele Realisierung beider Anforderungen eine große Herausforderung.

3.3 Von FAIR und FACT zu Produktionsdatenmanagement

Die Etablierung eines Produktionsdatenmanagements auf Basis von FAIR und FACT birgt großes Potential für die Erreichung der Resilienz der Life Cycle Sustainability, ist jedoch aufgrund der technischen und organisatorischen Randbedingungen in der Produktion eine große Herausforderung. Betrachtet man den Datenlebenszyklus in der Produktion (Abbildung 6) wird deutlich, dass FAIR und FACT umfassende Bedeutung haben und in nahezu allen Abschnitten des Datenlebenszyklus berücksichtigt werden müssen.

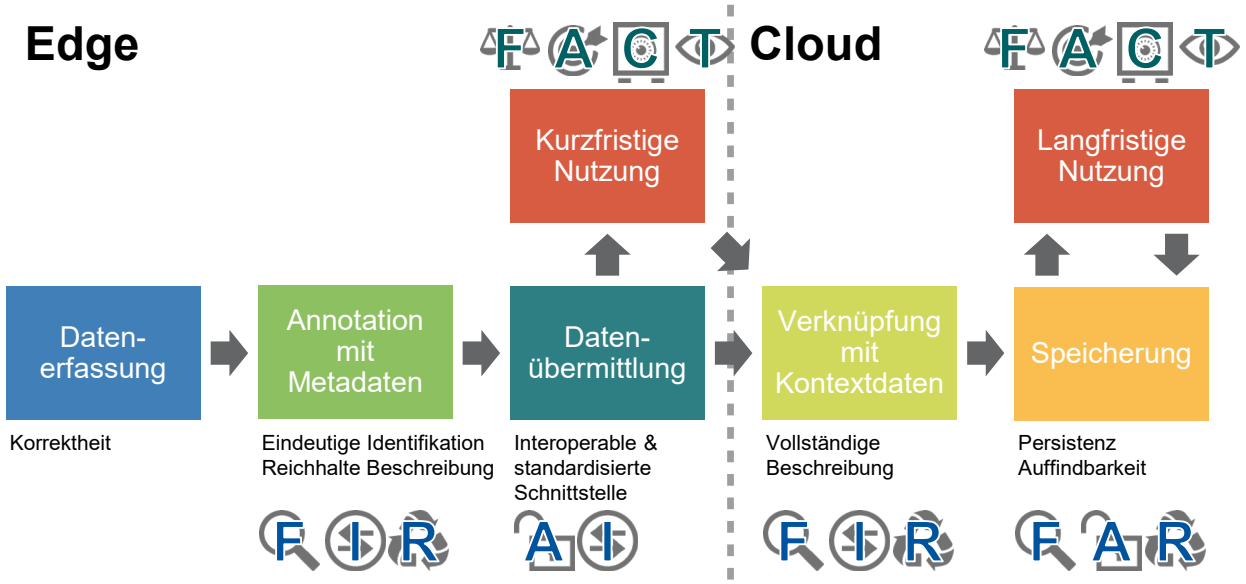

Abbildung 6: Der FAIRe Datenlebenszyklus nach BODENBENNER et al. [23]

Eines der Kernprobleme bei der Umsetzung der FAIR Prinzipien ist die Heterogenität. So existiert nicht nur eine sehr große Menge sehr verschiedener (Mess-)Systeme zur Erfassung von Daten und dementsprechend unterschiedliche Modelle und Formate zur Repräsentation, sondern eine ebenso heterogene Gruppe an Stakeholdern sowie möglicher daten-getriebene Anwendungen, die jeweils andersartige Anforderungen an die Daten haben [24]. Die Herausforderung ist daher nicht nur die technische Vereinheitlichung verwendeter Modelle, Formate und Protokolle zur Speicherung und Übermittlung der Daten (Accessibility & Interoperability), für die bereits viele Ansätze, wie die Verwendung offener Standardprotokolle und Formate existieren, so zum Beispiel OPC UA, MQTT oder JSON und XML. Kritisch für die langfristige Nutzung der Daten ist vor allem deren Kontextualisierung [25]. Dazu ist die Annotation durch aussagekräftige Metadaten und die Verknüpfung mit anderen Daten notwendig, damit Daten gefunden und auf ihre Verwendbarkeit

hin bewertet werden können (Findability & Reusability). Daten dementsprechend zu verwalten und die Auffindbarkeit für beliebige, teils noch unbekannte, Anwendungen und Szenarien zu ermöglichen stellt die zentrale Herausforderung dar. Einfach alle erfassten Daten zu speichern, da sie eventuell eines Tages relevant sein könnten, stellt keine ausreichende Lösung dar. Zum einen müssen auch diese Daten kontextualisiert sein, da sie sonst nicht in Informationen oder Wissen transformiert werden können, zum anderen verbraucht die Speicherung der Daten in zentralen Datenspeichern, wie Cloud-Systemen, eine große Menge Energie. Datenspeicherung hat also selbst einen signifikanten Fußabdruck, der zur Einhaltung der Zielwerte der Nachhaltigkeitskriterien und somit das Erreichen der Life Cycle Sustainability auf ein notwendiges Minimum reduziert werden sollte. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass zum Zeitpunkt der Datenerhebung die konkrete Nutzung in der Langzeitperspektive noch nicht bekannt ist und aus der Retrospektive geeignete Datensätze identifiziert werden müssen. Schlüssel dazu ist die Speicherung der Kontextdaten, auch über den Zeitraum der Speicherung der eigentlichen (Mess-)Daten hinaus. Für die Bewertung der Verwendbarkeit eines Datensatzes sind in erster Linie nur die Kontextinformationen notwendig, nicht die Daten selbst [19]. Da Kontextinformationen in der Regel eine deutlich geringere Änderungsrate haben als die Daten selbst, kann so zunächst der DatenFußabdruck reduziert werden. Insbesondere können die Daten selbst bei Bedarf und ausführlicher Dokumentation mittels Kontextinformationen reproduziert oder nicht (mehr) vorliegende Daten erhoben werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Synthetisierung geeigneter Daten.

Der datengetriebene Erkenntnisgewinn in der Produktion beruht verstärkt auf nicht monolithischen, sondern service-orientierten Anwendungen. Bestandteil dieser Anwendungen sind in der Regel zusammengesetzte IT-Systeme, die auch Plattformen externer Unternehmen, wie Cloud-Systeme, und mehrschichtige Architekturen einschließen [26]. Insbesondere nimmt die Rolle von Dienstleistenden, welche die Verarbeitung der Daten sowie die Bereitstellung von Analysen und Handlungsempfehlungen anbieten, stetig zu [27], [28]. Diese Ausgangssituation führt zu einer mehrschichtigen Vertrauensproblematik: Aus Sicht des produzierenden Unternehmens sind die verwendeten Daten hoch sensibel, da sie Rückschlüsse auf Betriebsgeheimnisse zulassen können oder diese sogar selbst darstellen [29]. Für Software-Dienstleistungsunternehmen ist die Kontrolle über die Nutzung und Geheimhaltung der Implementierungsdetails der verwendeten Algorithmen essenziell zur Sicherung der Geschäftsgrundlage [30]. *Confidentiality* ist somit eine substanzielle Voraussetzung für Datensouveränität.

Dem gegenüber steht jedoch die Anforderung an *Transparency*. Die Datenverarbeitung muss transparent und nachvollziehbar sein, um hieraus abgeleitete Entscheidungen absichern und verantwortungsvoll gestalten zu können. Außerdem kann nur so eine objektive Bewertung von Maßnahmen gegenüber gewählten Nachhaltigkeitszielen sichergestellt werden [31]. Zusätzlich muss auch die Unsicherheit der gewonnen Information berücksichtigt werden, um ihre Belastbarkeit sicherzustellen und das Risiko damit verbundener Entscheidungen zu bewerten.

In der Messtechnik ist beispielsweise die mit dem Messwert assoziierte Messunsicherheit das wichtigste Gütekriterium für die Qualität der Messung [32]. Bei der Verarbeitung von Messdaten durch Algorithmen gehen diese Informationen häufig verloren, da der Beitrag eines beliebigen Algorithmus zur Unsicherheit des Ergebnisses nur schwer oder unter Umständen gar nicht bestimmt werden kann. Das Kriterium der Transparency muss daher im Kontext der des Produktionsdatenmanagements auch die Sicherstellung von Korrektheit und Genauigkeit von Algorithmen umfassen.

Die FAIR- und FACT-Prinzipien legen wichtige Gestaltungsrichtlinien dar, an denen sich auch das Produktionsdatenmanagement orientieren sollte. Dies gilt sowohl im Allgemeinen als auch in der Perspektive einer resilienten Life Cycle Sustainability, welche die Langzeitanforderungen und Vertrauenswürdigkeit fokussiert. Da FAIR und FACT dem Forschungsdatenmanagement entstammen, können diese jedoch nicht einfach übernommen, sondern müssen auf die domänenspezifischen Eigenschaften der Produktionstechnik adaptiert werden. Dies gilt insbesondere in komplexen Wertschöpfungsnetzwerken, in denen Kunden-, Lieferanten- und Wettbewerbsbeziehungen vorliegen und Datensouveränität wirtschaftlich entscheidend ist.

4 Datenstrukturen und technologische Lösungsbausteine

Die Etablierung von Produktionsdatenmanagement als Voraussetzung für Life Cycle Sustainability ist weder ein singuläres Handlungsfeld, noch kann eine einzige, allgemeingültige Umsetzung erwartet werden. Vielmehr ist es die Integration interdisziplinärer, datengetriebener Technologien und Methoden in den Dimensionen Mensch, Organisation und Technik in mehreren Handlungsfeldern. Nachfolgend seien hiervon einige mit Bezug auf die in Abschnitt 3 genannten Herausforderungen exemplarisch aufgeworfen:

- Das **Qualitätsmanagement** muss um die Betrachtung bereits a priori bekannter Nachhaltigkeitsstrategien (bspw. Reparatur oder Remanufacturing durch den Originalhersteller) erweitert werden. Dies betrifft insbesondere auch das Management der Daten, deren Notwendigkeit zur Technologischen Umsetzung oder Nachhaltigkeitsbewertung bekannt ist (vgl. Herausforderungen 4, 6).
- Techniken des Datenmanagement sowie der Datenverarbeitung, zusammengefasst als **Informationsmanagement** müssen spezifisch für die Produktion weiter adaptiert bzw. entwickelt werden. Dies ist insbesondere relevant, um den Datenfluss im Sinne der Wissenspyramide sicherzustellen, auch wenn die technologische Ausgestaltung von Nachhaltigkeitsstrategien und damit der:die Datenkonsument:in a priori nicht bekannt ist. Zudem bringen die Menge der Daten, die Langfristigkeit der Life Cycle Sustainability sowie der eigene Fußabdruck des Datenmanagements zusätzliche Anforderungen ein (vgl. Herausforderungen 2, 5, 6).
- Unter **Sensing** kann die Erfassung von notwendigen Informationen verstanden werden, zu welchen die notwendigen Daten jedoch nicht oder nicht mehr vorliegen. Dies umfasst zum einen die Betrachtung der Messtechnik als Enabler zur gezielten, situativen Erfassung von Daten (bspw. der Zustandsbewertung), aber auch eine weitere Interpretation des Begriffes hin zur Erfassung von Kund:innenfeedback oder Felddaten. Zusätzlich bringt die Metrologie als Disziplin wesentliche Aspekte der langfristigen, physikalischen Vertrauenswürdigkeit erhobener Daten ein (vgl. Herausforderungen 3, 5)
- Eine geeignete **Dateninfrastruktur** wird als Backbone datengetriebener Technologien zur unvermeidbaren Voraussetzung. Neben Fragen der Kompatibilität, Skalierbarkeit und Wirtschaftlichkeit steht jedoch auch die Resilienz und Nachhaltigkeit der Infrastruktur selbst im Fokus (vgl. Herausforderung 1).
- Die **Automatisierung** erhält im Zielbild einer resilienten Life Cycle Sustainability eine erweiterte Bedeutung. Durch sie können die Reaktionsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit sowie soziale Kompatibilität von technologischen Lösungen gesteigert werden, bspw. im Rahmen einer automatisierten Demontage. Dies setzt jedoch auch eine inhärent datengetriebene Automatisierung voraus. (vgl. Herausforderung 2)

- Die **Qualifikation von Mitarbeiter:innen** und Etablierung soziotechnischer Ökosysteme ist notwendig, da die entstehenden Produktionssysteme von erheblicher Komplexität sein werden. Die partizipierenden Akteur:innen müssen in die Lage versetzt werden, Entscheidungen im Sinne der Life Cycle Sustainability datenbasiert und objektiviert zu treffen (vgl. Herausforderungen 2, 4, 6)

In den genannten Handlungsfeldern sind geeignete Modelle und entsprechende Datenstrukturen dabei charakteristische, wiederkehrende Elemente. Nachfolgend werden diese anhand von technologischen Lösungsbausteinen als Beispiele konkretisiert. Diese erstrecken sich über alle Ebenen der Wissenspyramide.

4.1 5G als Infrastruktur (Vernetzte Ressourcen)

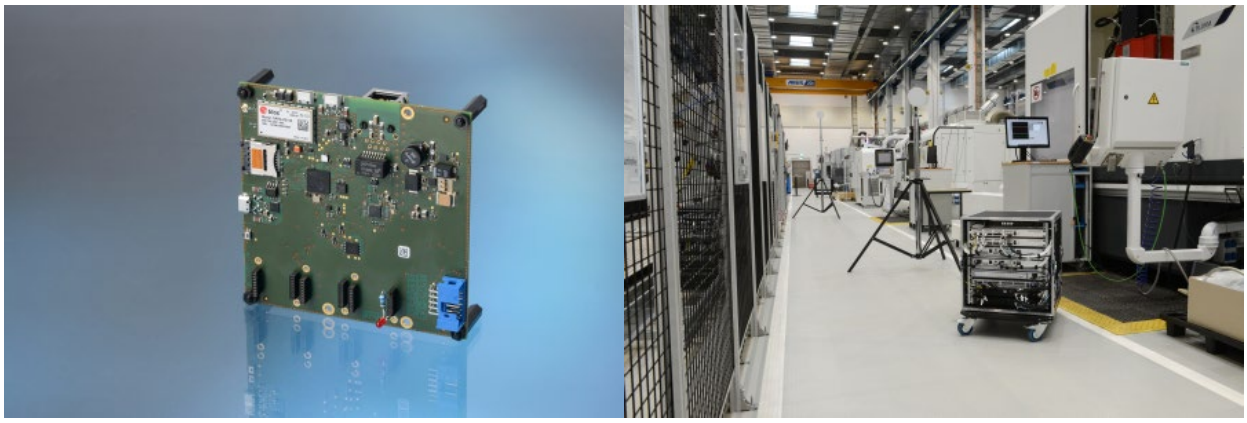

Abbildung 7: Links: Elektronikboard zur 5G-basierten Vernetzung von Sensoren. Rechts: Lokaler Testaufbau zur Evaluation von 5G Use-Cases in der Produktion. Bildquelle: Fraunhofer IPT

Die industrielle Kommunikation ist, insbesondere in der Automatisierung, schon immer mit hohen Anforderungen bezüglich Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Echtzeitfähigkeit verbunden. Die Etablierung datengetriebener Technologien in der Produktionstechnik, aber insbesondere auch die Aspekte der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von automatisierten Systemen, überführen diese Anforderungen zusätzlich auf die drahtlose Kommunikation. Hinzu kommen die Anforderungen an die Resilienz cyber-physischer Produktionssysteme, welche, von SCHMITT et al. wie folgt zusammengefasst werden: Dezentrale IT-Strukturen, Datensicherheit, Modularität technischer Systeme, Konvergenz von Shopfloor und Office IT sowie Integration des Menschen in Soziotechnische Systeme [33]. Auf Netzwerkebene liegen zudem technische Anforderungen für die resiliente Gestaltung der Kommunikationsnetze selbst vor, wie sie bspw. der VDE in einem Positionspapier zusammenfasst [34].

5G ist hier eine Schlüsseltechnologie, welche die o.g. Anforderungen adressieren und als Backbone einer geeigneten Infrastruktur für vernetzte Ressourcen dienen kann. Es ist zudem durch das konvergente Design anschlussfähig an andere Netzwerktechnologien. Die verschiedenen Profile sind geeignet, die Vernetzung der Ressourcen für mehrere Aspekte der datengetriebenen Nachhaltigkeit abzubilden:

- Durch die Natur als Mobilfunkstandard wird die ortsunabhängige Vernetzung und damit die Erhebung von Daten im Feld ermöglicht, bspw. in der Nutzungsphase eines Lebenszyklus beim Kunden.

- Die Anwendungsprofile eMMB (enhanced mobile Broadband) und mMTC (massive Machine Type Communication) eignen sich zur Kommunikation großer Mengen von Sensordaten mit hoher Bandbreite oder eine hohe Anzahl von Sensoren. MOHANRAM et al. validieren die industrielle Anwendbarkeit beispielhaft anhand einer Multisensorplattform auf Basis eines STM32 [35]. Diese enthält für Monitoringzwecke Interfaces zu Dehnungsmesstreifen, Beschleunigungs- und Temperatursensoren und ist in Abbildung 7 dargestellt.
- Die Kombination von 5G und Time-Sensitive Networking ermöglicht die Realisierung drahtloser Automatisierungsnetze. KEHL et al. evaluieren diesen Ansatz für die Anwendung in der mobilen Robotik und zeigen, dass das Jitter (99.9% Intervall) auf unter 1µs reduziert und damit Echtzeitfähigkeit erreicht werden kann [36].

Die Entscheidung, ob sich eine Vernetzung von Ressourcen über 5G im Vergleich zu anderen Technologien lohnt, muss in Abhängigkeit der erwarteten Vorteile getroffen werden. KIESEL et al. stellen ein Modell zur techno-ökonomischen Bewertung latenzkritischer Anwendungen hinsichtlich der Zielkriterien Flexibilität, Mobilität, Produktivität, Qualität, Sicherheit, Nachhaltigkeit und Nutzungsgrad vor [37]. Dieser Ansatz kann auf die technologische Umsetzung datengetriebener Nachhaltigkeitsstrategien im Sinne von Abschnitt 2 und die Ziele der Life Cycle Sustainability übertragen werden.

4.2 Domänenadaptierte Datenstrukturen (Daten)

Damit Daten bei einer Störung der Life Cycle Sustainability schnell gefunden und abgerufen werden können, müssen Daten in einer indizierbaren und leicht durchsuchbaren Struktur gespeichert werden. Grundvoraussetzung dafür ist der Transfer der FAIR Prinzipien in die Produktionstechnik anhand spezifischer Anforderungen und der technischen Abbildung dieser. Neben der Verwendung einer einheitlichen Beschreibungssprache (vgl. Abschnitt 4.3) ist es erforderlich standardisierte Datenmodelle, -formate und Datenaustausch- bzw. Kommunikationsprotokolle zu verwenden [38] (vgl. Abschnitt 3.3). Dazu können aus der Informatik bekannte und standardisierte Lösungen für den Einsatz in der Produktionstechnik adaptiert werden. Die Bandbreite verfügbarer Lösungen reicht von Einzellösungen für einen der drei Aspekte bis hin zu „All-in-One“-Lösungen, wie beispielsweise OPC UA. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht verschiedener Modelle, Formate und Protokolle. Zum einen bedienen die Datenmodelle jedoch teils unterschiedliche Anwendungsfälle, sodass in der Regel mehr als nur ein Datenmodell umgesetzt werden muss, um Daten in erforderlichen Modellen bereitzuhalten, wodurch der Umsetzungsaufwand erheblich steigt. Zum anderen sind die meisten Modelle komplex und erfordern daher fortgeschrittene Datenmodellierungskenntnisse. Außerdem bleiben die FAIR Prinzipien in diesen Modellen mehrheitlich unberücksichtigt.

Tabelle 1: Beispiele für standardisierte Datenformate, Datenmodelle und Kommunikationsprotokolle für den Einsatz in der Produktionstechnik

Modell	Format	Protokoll
Asset Administration Shell	JSON	HTTP
Digital Calibration Certificate	XML	MQTT
OPC UA (via XML und TCP/IP)		
MTConnect		

Eine Infrastruktur und Datenstruktur, welche die Definition von Messsystem-Schnittstellen mit geringem Aufwand ermöglicht, wurde von MONTAVON et al. [39], [40] vorgestellt und von BODENBENNER et al. [41] zu einer Modellbeschreibungssprache weiterentwickelt. Alle Eigenschaften und Daten eines Messsystems können dadurch mittels vier verschiedener Elemente abgebildet werden: Variablen für die Darstellung von Messwerten, Parameter für einstellbare Eigenschaftswerte, Funktionen zur Ausführung komplexer Prozeduren und Objekten zur Strukturierung aller Eigenschaften. Jedes Element erfordert die Definition spezifischer vorgeschriebener Attribute, anhand der eine technische Interoperabilität mit anderem System sichergestellt werden kann. Diese Attribute umfassen bei Messwerten und Parametern unter anderem den zulässigen Wertebereich, die mathematische Dimension und auch die physikalische Einheit. Da alle diese Eigenschaften über die Schnittstelle stets zusammen mit dem eigentlichen Messwert bereitgestellt werden, können diese Werte ohne Vorwissen verarbeitet werden. So können zum Beispiel passende Speicher- oder Tabellenstrukturen von Datenbanken automatisiert und effizient aufgebaut und verwaltet werden. Abbildung 8 zeigt ein solches Datenpaket. Darüber hinaus kann das Datenmodell auch in komplexere Strukturen, wie z.B. OPC UA oder Asset Administration Shell übersetzt werden.


```
{
   “covariance”: [
         [1.3276206530821578e-10, 1.0791437929694123e-11, 7.9915972948561065e-11],
         [1.079143792969412e-11, 5.5091565613752213e-11, 1.0896977314156854e-11],
         [7.9915972948561065e-11, 1.0896977314156854e-11, 5.9079887330941402e-11]
      ],
   “datatype”: “double”,
   “description”: “Position in Cartesian Coordinates in meter.”,
   “dimension”: [3],
   “hash”: “3a785573eecfc75434572906c31bae675f1c173612bc25579c996bddf4e51a85”,
   “label”: “Calibration of machine tool.”,
   “name”: “Position [m]”,
   “range”: [-40, 40],
   “timestamp”: “2022-06-13T11:27:15.046550Z”,
   “unit”: “MTR”,
   “uuid”: “MEA-Position”,
   “value”: [2.4184784967537318, 0.32977268925781256, -3.8299400458421968]
}
```


Abbildung 8: Strukturiertes Datenpaket zum interoperablen Austausch von Messdaten gemäß [23], [40], Abbildung aus [38]

Interoperable Schnittstellen und Systeme tragen wesentlich zur Resilienz der Dateninfrastruktur von Produktionssystemen bei, da (Teil-)Ausfälle von Geräten oder Subsystemen mit geringem Aufwand durch andere, aber nicht notwendigerweise identische, Geräte oder Subsysteme ersetzt werden können. Außerdem senken sie die technische Hürde, ein möglichst automatisiertes, datengetriebenes und zeitnahes Life Cycle Sustainability Assessment zu implementieren.

4.3 Von Daten- zu Informationsmanagement mittels Kontextualisierung (Informationen)

Daten können im Wesentlichen auf zwei verschiedenen Wegen zu Informationen aggregiert werden:

Kontextualisierung – Durch die Beschreibung von Daten mittels Metadaten bzw. Metainformationen können Daten interpretiert und in einen größeren Zusammenhang eingeordnet werden. Einfaches Beispiel dafür ist die physikalische Einheit, ohne die Messwerte in verschiedenen Ländern unterschiedlich interpretiert werden könnten.

Datenauswertung – Mittels der Verarbeitung einer Datenmenge durch Algorithmen können Zusammenhänge von Daten aufgedeckt werden und lassen dadurch die Interpretation von Menschen zu. So können beispielsweise die einzelnen Positionsdaten einer mobilen Einheit zu einem Pfad zusammengefasst werden und durch den Abgleich mit den Solldaten die Abweichung der Bewegung ermittelt werden. Diese Information kann dann entsprechend weiterverarbeitet werden.

Bei der Auswertung von Daten durch Algorithmen wird zunehmend auf Machine Learning Verfahren gesetzt. Diese entsprechend der FACT Prinzipien und mit einem angemessenen Fußabdruck zu gestalten ist jedoch eine große Herausforderung [42]. Außerdem wird durch Machine Learning allein noch kein Informationsmanagement in der Langzeitperspektive erreicht.

Die Kontextualisierung stellt hier zunächst den leichtgewichtigeren Ansatz dar und kann auch als Vorstufe zur Datenauswertung deren Effizienz erhöhen. Zudem kann in der Kontextualisierung auch der Fußabdruck des Datenmanagements selbst nochmals reduziert werden: Insbesondere bei hochfrequenten Daten, deren Speicherung einen großen Fußabdruck bedeutet, kann die Speicherung von Kontextinformationen, die die Reproduktion der Daten möglich macht, den Fußabdruck erheblich senken. Voraussetzung dafür ist, dass die Daten in kurzer Zeit mit geringem Fußabdruck erzeugt werden können. Durch die Definition von FAIRen Datenmodellen kann Informationsmanagement synergetisch mit Datenmanagement betrieben werden, da die Beschreibung der Daten mit Kontextinformationen ein Grundprinzip von FAIR ist. FAIRe Daten können langfristig und zuverlässig zu Informationen kontextualisiert werden.

Da die Erfassung, Verarbeitung und Speicherung im Zuge steigenden Vernetzungsgrades verstärkt in massiv verteilten Systemen erfolgt, wird die nachträgliche Kontextualisierung von Daten erschwert. Entscheidend ist daher Daten so früh wie möglich, bestenfalls auf Geräte- oder Edge-Level, mit Metadaten und verfügbaren Kontextinformationen zu annotieren.

Dieser Ansatz wurde unter anderem von BODENBENNER et al. vorgestellt und baut direkt auf einer einheitlichen Datenstruktur auf, wie in Abschnitt 4.2 vorgestellt. Die Autoren stellen eine mehrschichtige Softwarearchitektur für *FAIR Sensor Services* vor, die sowohl die technische Interoperabilität der Daten als auch semantische Interoperabilität der Informationen zu Messdaten sicherstellt. Dazu wird wie die Software des Cyber-physikalischen Messsystems wie in Abbildung 9 gezeigt in drei Schichten unterteilt. Die unterste Schicht (**L1**) deckt dabei die geräte-spezifische und nicht verallgemeinerbare Implementierung des internen System-Logik ab. Die mittlere Schicht (**L2**), das sogenannte „FAIRification-Layer“, reichert die Daten basierend auf dem SOIL-Modell mit Metainformationen an, wie beispielweise der physikalischen Einheit. Die oberste Schicht (**L3**) implementiert die Kommunikationsschnittstelle und stellt alle Daten und Metadaten in einem standardisierten Datenformat über ebenfalls standardisierte Protokolle zur Verfügung. **L2** und **L3** können auf Basis des SOIL-Metamodells unabhängig vom spezifischen Gerät implementiert werden. Möglich wird dies durch die Adaption modell-basierter Softwareentwicklung, bei der mittels der „SensOr Interfacing Language (SOIL)“ [41], ein einfaches Modell für die Schnittstelle eines Messsystems definiert werden kann. Dieses Modell kann dann zur

automatisierten Generierung des FAIRification Layers, sowie der passenden Schnittstelle und des gewünschten Datenformates genutzt werden [23].

Dadurch liegen Messwerte schon unmittelbar nach der Messung nicht nur in Form eines Datums, sondern bereits als Information vor. Dies erhöht die Verfügbarkeit der Messwerte im Falle einer Störung der Life Cycle Sustainability. Außerdem kann so verhindert werden, dass die Speicherung undokumentierter und daher kaum verwendbarer Daten erfolgt.

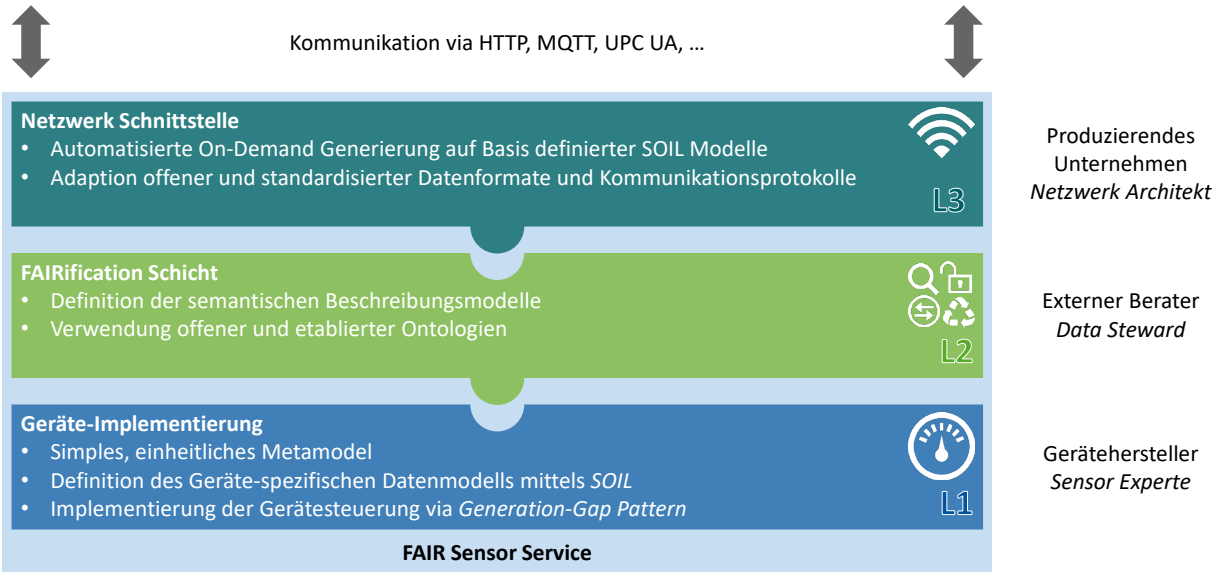

Abbildung 9: Softwarearchitektur eines "FAIR Sensor Services"

4.4 Der Digitale Zwilling als Automatisierungsvehikel (Wissen)

Die datengetriebene Automatisierung benötigt leistungsfähige Datenstrukturen, welche sowohl den kurzfristigen Horizont der Durchführung der konkreten Operationen selbst als auch den langfristigen Horizont im Sinne der Life Cycle Sustainability berücksichtigen. Zusätzlich ist eine Balance zwischen Standardisierung und Use-Case spezifischer Flexibilität notwendig, um Interoperabilität und Komplexität der Implementierung auszutarieren. Hier ist die domänenspezifische Adaption von Datenstrukturen aufbauend auf weiter verbreiteten Standards ein Lösungsansatz. GÖPPERT et al. stellen hierzu eine *Digital Twin Pipeline* vor [43]: Das erste Ziel ist die Erstellung einer domänenspezifischen Ontologie. Zunächst werden für die Domäne allgemein geeignete Standard-Ontologien und Metamodelle analysiert. Diese werden dann mittels Experteninput durch Kombination und/oder konforme Erweiterung an die erwarteten Use-Cases anpasst. Die resultierende Ontologie stellt Syntax und Semantik zur Modellierung der konkreten Use-Cases bereit, ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 10 gezeigt. Aus dieser Modellbeschreibung, welche als Digital Twin interpretiert wird, ist dann zum einen das Deployment eines automatisierten Systems auf Basis generativer Programmierung möglich. Zum anderen kann die Ontologie-basierte Modellierung zum persistenten, wiederverwendbaren und interoperablen Management Use-case bezogener Informationen in Form von Wissen verwendet werden.

GÖPPERT et al. evaluieren die Digital Twin Pipeline für die Steuerung frei verketteter Montagesysteme. In der Referenzimplementierung wird auf MASON und BOT als allgemeine Ontologien aufgebaut, welche mit SOIL und der Asset Administration Shell als Meta-Modellen kombiniert wird. Das in der Beschreibungsphase gewonnene Modell wird mittels JSON als Markup-Sprache abgebildet, sodass dieses anschließend in verschiedenen Softwareumgebungen geladen werden kann [43]. KAVEN et al. integrieren diesen Ansatz

in ein Leitsystem zur frei verketteten Montage eines Batteriepacks. Dabei wird aus dem Digital Twin heraus eine MQTT-basierte, VDA 5050 kompatible Kommunikationsstruktur zwischen Leitsystem und fahrerlosen Transportsystemen generiert [44].

Die Digital Twin Pipeline ist ein entscheidender Enabler zur technologischen Realisierung frei verketteter Montagesysteme. Diese tragen wiederum durch ihre inhärenten Fähigkeiten, Resilienz- und Nachhaltigkeit zu adressieren, zur Life Cycle Sustainability bei [45].

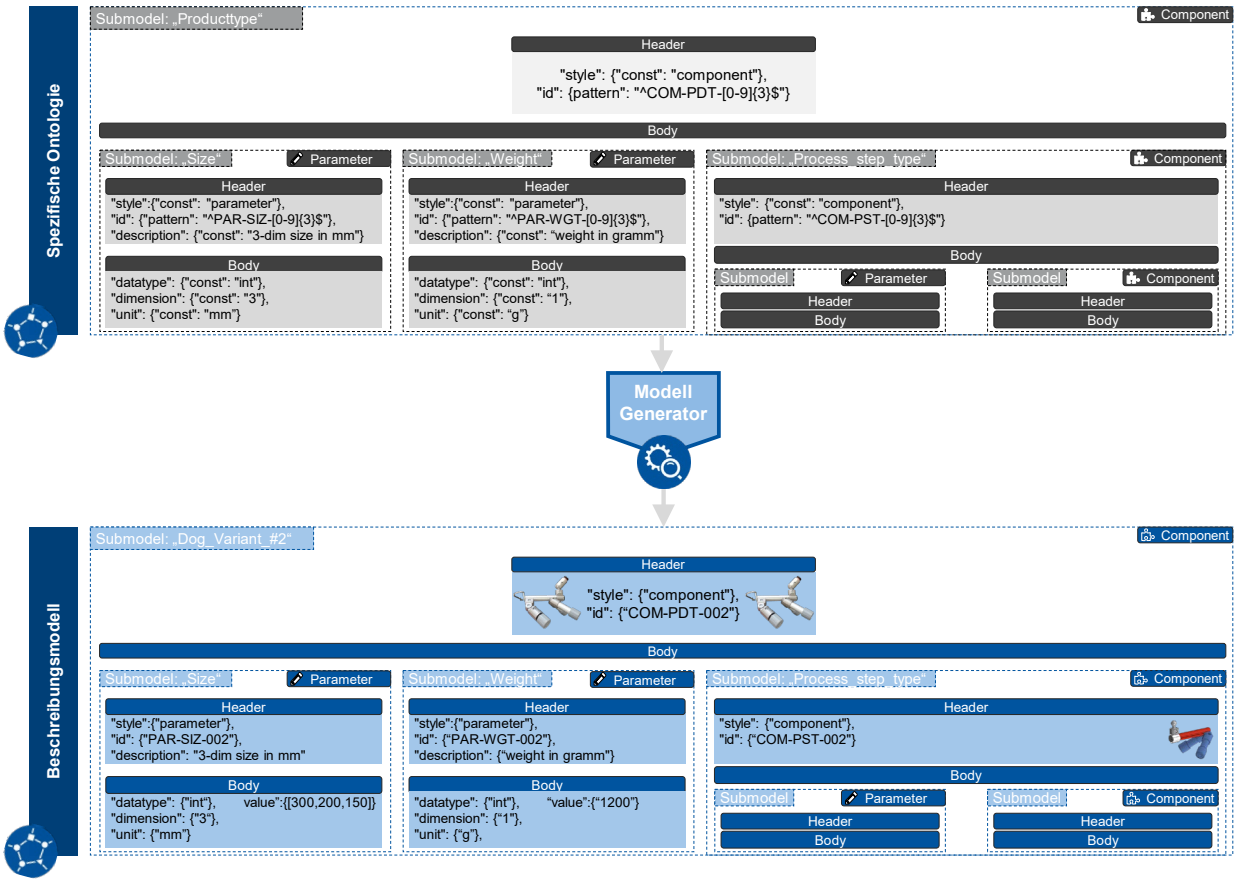

Abbildung 10: Ontologie und daraus basierend formuliertes Beschreibungsmodell für ein zu montierendes Produkt [43]

4.5 Nachhaltigkeits- und Qualitätsmanagement als Synergie (Aktion)

Die Herausforderungen des Nachhaltigkeits- und Qualitätsmanagement lassen sich in die gleichen Dimensionen des normativen, strategischen und operativen Managements nach BLEICHER einordnen [46]. In der Perspektive des Aachener Qualitätsmanagement Modells (ACQMM) spiegelt sich dies in der unternehmerischen Qualität wider, die als *momentane[r] Überdeckungsgrad von Marktanforderungen, Unternehmensausrichtung und Unternehmensfähigkeiten* verstanden wird [47]. Nachhaltigkeitsziele werden dabei zu Marktforderungen. Das ACQMM beinhaltet daneben als zentrales Element den Quality Stream, der den qualitätsbezogenen Wertstrom darstellt und sich am Produktlebenszyklus orientiert. Damit ist eine direkte Anschlussfähigkeit an das Ziel der Life Cycle Sustainabilility gegeben. Qualitäts- und Nachhaltigkeitsmanagement können integriert werden, indem geeignete Strategien zur Erreichung strategischer Nachhaltigkeitsziele und KPIs sowie zur Nachhaltigkeitsbewertung in die Quality Forward bzw. Backward Chain(s) integriert werden.

Abbildung 11 zeigt einen Ansatz zur Einbettung des Nachhaltigkeitsmanagement in das ACQMM. Die Sicht auf den Produktlebenszyklus wird explizit anhand ausgewählter R-Strategien (vgl. Abschnitt 2) fokussiert. Ein zweiter Fokus im eingebetteten Life Cycle Thinking liegt im Datenmanagement, insbesondere der vertikalen und horizontalen Integration.

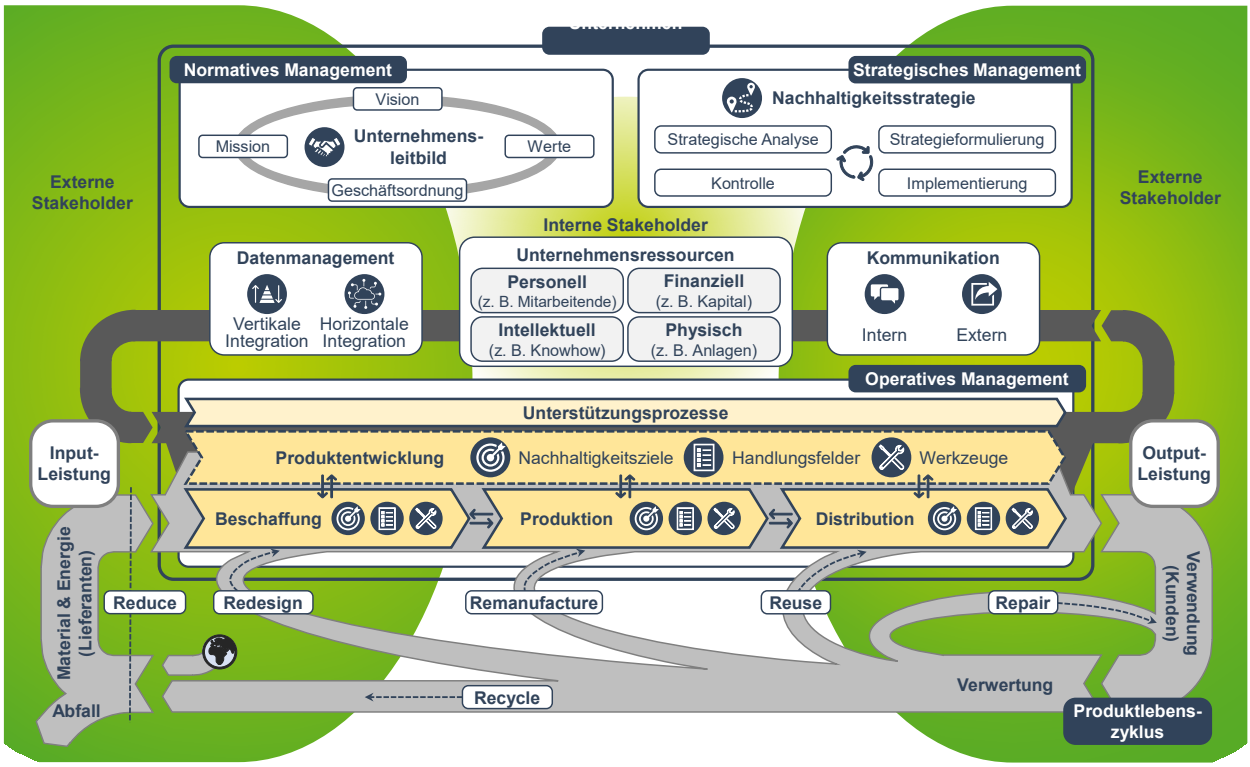

Abbildung 11: Inkorporation von Nachaltigkeitsstrategien ins Qualitätsmanagement im ACQMM [48]

Aus Sicht der Wissenspyramide ermöglicht die beschriebene Erweiterung des ACQMM, die Aktionsebene in den zuvor genannten Managementdimensionen abzubilden. Dennoch fordern die Komplexität der Lösungsmöglichkeiten sowie die Notwendigkeit einer objektiven Nachhaltigkeitsbewertung eine datengetriebene Entscheidungsfindung, um im Sinne der Life Cycle Sustainability zu agieren. BRIELE et al. konkretisieren diesen datengetriebenen Aspekt und unterstreichen die Bedeutung von Qualitäts- und Nachhaltigkeitsmanagement in der Weiterentwicklung des *Internet of Production* [49].

5 Ausblick

Daten sind ein zentraler Treiber vieler Technologien zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen in der Produktionstechnik. Dabei kommt es nicht nur auf die Erhebung der Daten selbst, sondern vor allem auf die Verarbeitung und Aggregation hin zu Wissen und Aktionen an. Dies wird in der vorgestellten Perspektive der Life Cycle Sustainability besonders fokussiert. Gleichzeitig nehmen die technologische Komplexität und Individualität der notwendigen Prozesse zu, sodass eine resiliente Gestaltung notwendig ist. Um dies zu verdeutlichen, wurde eine angepasste Definition des Resilienzbegriffs für die Life Cycle Sustainability vorgestellt. Insgesamt werden somit konkrete Anforderungen an die zu Grunde liegenden Datenstrukturen und damit verbundene Datenmanagement gestellt.

In der Disziplin des (Forschungs-)Datenmanagements werden die Nachhaltigkeit und Transparenz von Daten und Algorithmen bereits seit geraumer Zeit unter den Prinzipen FAIR (Findable, Accessible, Interpretable, Reusable) und FACT (Fairness, Accuracy, Confidentiality, Transparency) gefordert und untersucht. Diese müssen jedoch auf die Domäne der Produktionstechnik übertragen werden, wie am Beispiel der *SensOr Interfacing Language SOIL* illustriert wird. Das in SOIL verfolgte Prinzip, die domänenspezifische Modellierung von der Implementierung in standardisierten Datenstrukturen bzw. Kommunikationsprotokollen zu entkoppeln steht dabei stellvertretend für die Maxime, dass die domänenspezifische Adaption weit verbreiteter Standards wichtiger ist als die Initiierung einer großen Zahl spezifischer Einzelstandards – hierdurch profitieren nicht zuletzt auch Interoperabilität und Automatisierung.

Insgesamt kann das Produktionsdatenmanagement als neues Handlungsfeld für die erfolgreiche Gestaltung einer grünen Produktion festgehalten werden. Dieses steht jedoch nicht für sich, sondern muss eng mit den jeweiligen Domänen verbunden werden, wie für Qualitäts- und Informationsmanagement, Metrologie, Kommunikationsstechnologie, Automatisierung und Qualifikation von Mitarbeiter:innen skizziert wurde. Die Etablierung geeigneter Datenstrukturen orientiert sich dabei unter anderen an folgenden Leitfragen, die zur Übertragung der gezeigten Lösungsbausteine auf neue Anwendungen genutzt werden können:

- Welche konkreten Nachhaltigkeitsziele sollen verfolgt werden?
- Welche Strategien zur Erreichung dieser Ziele in den Dimensionen Mensch, Organisation und Technik sollen eingesetzt werden?
- Welche Daten und Informationen werden (voraussichtlich) benötigt werden?
- Welche Stakeholder sind über den gesamten Lebenszyklus beteiligt?
- Welche Standarddatenstrukturen können domänenspezifisch adaptiert werden?

Mit Hilfe eines starken Produktionsdatenmanagement kann es in Zukunft gelingen, die *Megatrends Nachhaltigkeit*, *Resilienz und Digitalisierung* in der Produktionstechnik synergetisch und gesellschaftlich gewinnbringend zu vereinen. Hierzu müssen in der technologischen Ausgestaltung sowie Forschung- und Entwicklung die Systemgrenzen des Datenmanagements aus dem gesamten Betrachtungshorizont der Life Cycle Sustainabi-lity abgeleitet werden. Dies bestärkt einen interdisziplinär und interoperabel vernetzten Ansatz, welcher sich in der Vision des *Internet of Sustainable Production* widerspiegelt.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2023 Internet of Production – 390621612.

6 Literatur

[1] R. H. Schmitt, N. König, S. Jung und M. Peterek, „Architektur einer vernetzten, adaptiven Produktion," in *Internet of Production - Turning Data into Sustainability: AWK'21,* T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2021, S. 31-48.

[2] E. Kristoffersen, F. Blomsma, P. Mikalef und J. Li, „The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies," *Journal of Business Research*, Jg. 120, S. 241–261, 2020, doi: 10.1016/j.jbusres.2020.07.044.

[3] European Commission. „European industrial strategy." commission.europa.eu. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_en (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[4] A. Nassehi, M. Colledani, B. Kádár und E. Lutters, „Daydreaming factories," *CIRP Annals*, Jg. 71, Nr. 2, S. 671–692, 2022, doi: 10.1016/j.cirp.2022.05.002.

[5] Statista Research Department. „CO2-Emissionen weltweit in den Jahren 2960 bis 2021 (in Millionen Tonnen)." de.statista.com. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/ (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[6] The Climate Pledge. „Be the planet's turning point." theclimatepledge.com. https://www.theclimatepledge.com/us/en (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[7] M. Benfer, B. Verhaelen, S. Peukert und G. Lanza, „Resilience Measures in Global Production Networks: A Literature Review and Conceptual Framework," *Die Unternehmung*, Jg. 75, Nr. 4, S. 491–520, 2021, doi: 10.5771/0042-059X-2021-4-491.

[8] A. Nowroth und D. Dittmer. „"Lieferketten werden sich nachhaltig verändern": Hohe Frachtpreise als "Bumerang"." n-tv.de. https://www.n-tv.de/wirtschaft/Made-in-Europe-wird-attraktiver-Hohe-Frachtpreise-veraendern-Lieferketten-article22974356.html (Zugriff am: 7. Feb. 2023).

[9] „Die Produktionswende - Turning Data into Sustainability: Durch das Internet of Production zu nachhaltiger Produktion und Betrieb," W. Boos, Aachen, 2021. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.wzl.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaabapamly&download=1

[10] M. Finkbeiner, E. M. Schau, A. Lehmann und M. Traverso, „Towards Life Cycle Sustainability Assessment," *Sustainability*, Jg. 2, Nr. 10, S. 3309–3322, 2010, doi: 10.3390/su2103309.

[11] „Integrated Product Policy: Building on Environmental Life-Cycle Thinking," Commission of the European Communities, Brüssel, 2003. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52003DC0302&from=EN

[12] „Towards a Life Cycle Sustainability Assessment," A. Ciroth *et al.*, Paris, 2011. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2012/12/2011%20-%20Towards%20LCSA.pdf

[13] S. Kara, M. Hauschild, J. Sutherland und T. McAloone, „Closed-loop systems to circular economy: A pathway to environmental sustainability?," *CIRP Annals*, Jg. 71, Nr. 2, S. 505–528, 2022, doi: 10.1016/j.cirp.2022.05.008.

[14] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions," *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 127, S. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

[15] A. Granskog, E. Hannon, S. Hieronimus, M. Klaeyle und A. Winkle. „How companies capture the value of sustainability: Survey findings." mckinsey.com. https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/how-companies-capture-the-value-of-sustainability-survey-findings#/download/%2F~%2Fmedia%2Fmckinsey%2Fbusiness%20functions%2Fsustainability%2Four%20insights%2Fhow%20companies%20capture%20the%20value%20of%20sustainabil-ity%20survey%20findings%2Fhow-companies-capture-the-value-of-sustainability-survey-findings-vf.pdf (Zugriff am: 2. Feb. 2023).

[16] F. Sohnius, M. Iglauer, L. C. Gussen und R. H. Schmitt, „Quantification of sustainability in production systems through a conceptual input-output model," *Procedia CIRP*, in Veröffentlichung.

[17] L. Hingst, Y.-B. Park und P. Nyhuis, „Life Cycle Oriented Planning Of Changeability In Factory Planning Under Uncertainty," in *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2021*, D. Herberger und M. Hübner, Hg., 2021, S. 11-22, doi: 10.15488/11276.

[18] A. Khan und K. Turowski, „A Survey of Current Challenges in Manufacturing Industry and Preparation for Industry 4.0," in *Proceedings of the First International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16)* (Advances in Intelligent Systems and Computing), 2016, S. 15–26, doi: 10.1007/978-3-319-33609-1_2.

[19] M. D. Wilkinson *et al.,* „The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship," *Scientific data*, Jg. 3, 2016, Art.-Nr. 160018, doi: 10.1038/sdata.2016.18.

[20] T. Tanhua *et al.,* „Ocean FAIR Data Services," *Frontiers in Marine Science*, Jg. 6, 2019, Art.-Nr. 440, doi: 10.3389/fmars.2019.00440.

[21] W. M. P. van der Aalst, M. Bichler und A. Heinzl, „Responsible Data Science," *Business & Informations Systems Engineering*, Jg. 59, Nr. 5, S. 311–313, 2017, doi: 10.1007/s12599-017-0487-z.

[22] M. M. Khan und J. Vice, „Toward Accountable and Explainable Artificial Intelligence Part One: Theory and Examples," *IEEE Access*, Jg. 10, S. 99686–99701, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3207812.

[23] M. Bodenbenner, B. Montavon und R. H. Schmitt, „Model-driven development of interoperable communication interfaces for FAIR sensor services," *Measurement: Sensors*, Jg. 24, Art.-Nr. 100442, 2022, doi: 10.1016/j.measen.2022.100442.

[24] M. Bodenbenner, B. Montavon und R. H. Schmitt, „FAIR sensor services - Towards sustainable sensor data management," *Measurement: Sensors*, Jg. 18, Art.-Nr. 100206, 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100206.

[25] P. Groth, H. Cousijn, T. Clark und C. Goble, „FAIR Data Reuse – the Path through Data Citation," *Data Intellegence*, Jg. 2, Nr. 1-2, S. 78–86, 2020, doi: 10.1162/dint_a_00030.

[26] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari und M. Ayyash, „Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Communnications Surveys & Tutorials*, Jg. 17, Nr. 4, S. 2347–2376, 2015, doi: 10.1109/comst.2015.2444095.

[27] „Industrie 4.0: Volks- und betriebswirtschaftliche Faktoren für den Standort Deutschland: Eine Studie im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm AUTONOMIK für Industrie 4.0," S. Wischmann, L. Wangler und A. Botthof, Berlin, 2015. Zugriff am: 6. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://vdivde-it.de/system/files/pdfs/industrie-4.0-volks-und-betriebswirtschaftliche-faktoren-fuer-den-standort-deutschland.pdf

[28] F. Liu, W. K. Ng und W. Zhang, „Encrypted SVM for Outsourced Data Mining," in *2015 IEEE 8th International Conference on Cloud Computing (CLOUD 2015): New York City, New York, USA, 27 June - 2 July 2015*, C. Pu, Hg., 2015, doi: 10.1109/cloud.2015.158.

[29] B. Otto, M. ten Hompel und S. Wrobel, „Industrial Data Space: Referenzarchitektur für die Digitalisierung der Wirtschaft," in *Digitalisierung: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft und Gesellschaft*, R. Neugebauer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018, S. 113–133.

[30] M. d. C. Silva, D. d. A. Santos, P. S. Carvas und C. F. S. Gomes, „Intellectual Property and Patenting Software Period 2012 - 2017," *International Journal of Human Capital and Information Technology Professionals*, Jg. 11, Nr. 2, S. 64–78, 2020, doi: 10.4018/IJHCITP.2020040105.

[31] J. Goldenfein, „Algorithmic Transparency and Decision-Making Accountability: Thoughts for Buying Machine Learning Algorithms," *SSRN,* 2019.

[32] JCGM. „Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement." bipm.org. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6 (Zugriff am: 2. Feb. 2023).

[33] R. Schmitt *et al.*, „Industrie 4.0: Konzept der resilienten Fabrik," in *Integrative Produktion: Industrie 4.0: Aachener Perspektiven,* C. Brecher, F. Klocke, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2014, S. 427-449.

[34] „VDE Positionspapier "Resiliente Netze mit Funkzugang"," G. P. Fettweis *et al.*, Frankfurt am Main, 2017. Zugriff am: 7. Feb. 2023. [Online]. Verfügbar unter: https://shop.vde.com/de/vde-positionspapier-resiliente-netze-mit-funkzugang

[35] P. Mohanram, A. Passarella, E. Zattoni, R. Padovani, N. König und R. H. Schmitt, „5G-Based Multi-Sensor Platform for Monitoring of Workpieces and Machines: Prototype Hardware Design and Firmware," *Electronics*, Jg. 11, Nr. 10, Art.-Nr. 1619, 2022, doi: 10.3390/electronics11101619.

[36] P. Kehl *et al.,* „Prototype of 5G Integrated with TSN for Edge-Controlled Mobile Robotics," *Electronics*, Jg. 11, Nr. 11, Art.-Nr. 1666, 2022, doi: 10.3390/electronics11111666.

[37] R. Kiesel *et al.,* „Techno-Economic Evaluation of 5G-NSA-NPN for Networked Control Systems," *Electronics*, Jg. 11, Nr. 11, Art.-Nr.. 1736, 2022, doi: 10.3390/electronics11111736.

[38] M. Bodenbenner, P. M. Sanders, B. Montavon und R. H. Schmitt, „Multiprotokollfähiges Meta-Datenmodell," *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 112, Nr. 11-12, S. 788-791, 2022, doi: 10.37544/1436-4980-2022-11-12-62.

[39] B. Montavon, M. Peterek und R. H. Schmitt, „Communication architecture for multiple distributed large volume metrology systems," in *2017 IEEE International Symposium on Systems Engineering: ISSE 2017: Vienna, Austria, October 11-13, 2017: 2017 symposium proceedings*, 2017, doi: 10.1109/SysEng.2017.8088326.

[40] B. Montavon, M. Peterek und R. H. Schmitt, „Model-based interfacing of large-scale metrology instruments," in *Multimodal Sensing: Technologies and Applications: 26-27 June 2019, Munich, Germany*, E. Stella, Hg., 2019, Art.-Nr. 10590C, doi: 10.1117/12.2527461.

[41] M. Bodenbenner, M. P. Sanders, B. Montavon und R. H. Schmitt, „Domain-Specific Language for Sensors in the Internet of Production," in *Production at the leading edge of technology: Proceedings of the 10th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Dresden, 23-24 September 2020* (Lecture Notes in Engineering), B.-A. Behrens, A. Brosius, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und J. P. Wulfsberg, Hg., Berlin, 2021, S. 448–456, doi: 10.1007/978-3-662-62138-7_45.

[42] N. Mehrabi, F. Morstatter, N. Saxena, K. Lerman und A. Galstyan, „A Survey on Bias and Fairness in Machine Learning," *ACM Computing Surveys*, Jg. 54, Nr. 6, Art.-Nr. 115, 2022, doi: 10.1145/3457607.

[43] A. Göppert, L. Grahn, J. Rachner, D. Grunert, S. Hort und R. H. Schmitt, „Pipeline for ontology-based modeling and automated deployment of digital twins for planning and control of manufacturing systems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Online first, 2021, doi: 10.1007/s10845-021-01860-6.

[44] L. Kaven, E. Abele, A. Göppert und R. H. Schmitt, „Digital Twin Pipeline zur VDA-5050-Integration: Ein standardisierter Ansatz für die automatisierte Implementie-rung der flexiblen Produktion," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 117, Nr. 5, S. 327–331, 2022, doi: 10.1515/zwf-2022-1057.

[45] R. H. Schmitt *et al.,* „Future Assembly - Automation Beyond Mass Production," in *Internet of Production - Turning Data into Sustainability: AWK'21,* T. Bergs, C. Brecher, R. Schmitt und G. Schuh, Hg., 2021, S. 176–199.

[46] C. Abegglen und K. Bleicher, *Das Konzept Integriertes Management: Visionen - Missionen - Programme,* 10. Aufl. Frankfurt am Main, New York: Campus, 2021.

[47] R. H. Schmitt, C. Lenkewitz und C. Behrens, „Unternehmerisch umgesetzt: das neue Aachener Qualitätsmanagement-Modell," *Management & Qualität*, Jg. 37, Nr. 11, S. 16–18, 2007.

[48] F. Sohnius, M. Iglauer und R. H. Schmitt, „Design model for the sustainability management of manufacturing companies," in *Proceedings of 18th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, in Veröffentlichung.

[49] K. Briele *et al.,* „Internet of Sustainability – Data-Driven Sustainability Management in Production," in *Production at the Leading Edge of Technology: Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Dresden, September 2021* (Lecture Notes in Production Engineering), B.-A. Behrens, A. Brosius, W.G. Drossel, W. Hintze, S. Ihlenfeldt und P. Nyhuis, Hg., 2022, S. 639–647, doi: 10.1007/978-3-030-78424-9.

Mitarbeitende der Arbeitsgruppe für den Vortrag 1.1:

Matthias Bodenbenner, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Hanna Brings, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Dr.-Ing. Benjamin Montavon, WZL | RWTH Aachen University, Aachen
Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt, WZL | RWTH Aachen University und Fraunhofer IPT, Aachen