

Skalierbare Dateninfrastruktur für industrielle Systeme der zirkulären Produktion

Das „Factory Data Logging and Visualization Network“

S. Süß, O. Wojahn, M. Mennenga, C. Herrmann

ZUSAMMENFASSUNG Industrielle cyber-physische Systeme steigern die Produktivität in der zirkulären Produktion. Bestehende Referenzarchitekturmodelle bilden deren logische Struktur ab, liefern jedoch nur bedingt Anhaltspunkte für die praxisnahe Implementierung. Dieser Beitrag stellt das Vorgehensmodell zur Entwicklung des „Factory Data Logging and Visualization Network“ (DaViN) und dessen Umsetzung vor. Die Vorteile des Ansatzes werden exemplarisch am Beispiel einer mechanischen Batterierecyclinganlage gezeigt.

STICHWÖRTER

Digitalisierung, Datentechnik, Betriebsdatenerfassung (BDE)

The factory data logging and visualization network

ABSTRACT Industrial cyber-physical systems increase productivity in circular production. Existing reference architecture models map their logical structure but provide limited practical implementation guidance. This paper presents the procedural model for the development of the “Factory Data Logging and Visualization Network” (DaViN) and its implementation. The advantages of the approach are demonstrated using the example of a mechanical battery recycling plant.

1 Einleitung

Das operative Produktionsmanagement handelt in einem Spannungsfeld aus den Marktzielen Liefertreue, Lieferzeit und Lieferfähigkeit sowie den Betriebszielen einer hohen Ressourcenproduktivität und niedriger Bestands- und Kapitalbindungskosten [1]. Diese Zielsetzung gilt nicht nur für die Transformationsprozesse der vorwärtsgerichteten Produktion, sondern findet auch in der rückwärtsgerichteten Umwandlung von ausgedienten Endprodukten zu nutzbaren Materialien und Rohstoffen Anwendung. Eine integrierte Betrachtung dieser vorwärts- und rückwärtsgerichteten Prozesse wird als zirkuläre Produktion bezeichnet [2, 3]. Diese Betrachtungsweise erlaubt es, etablierte Methoden und Technologien aus dem Produktionsmanagement für die Gestaltung der inhärenten industriellen Systeme anzuwenden. Das Ziel ist es, eine erhöhte Produktivität zu erreichen, um in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit positive Effekte zu erzielen.

Ein möglicher Ansatz zur Erhöhung der Produktivität ist die Verwendung von Technologien der Industrie 4.0. Hier werden Assets als cyber-physische Systeme befähigt, um die industrielle Wertschöpfung digital zu gestalten [4]. Die Umsetzung wird durch diverse Referenzarchitekturmodelle wie das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [4], die Industrial Internet Reference Architecture [5] oder die Internet-of-Things-Referenzarchitektur [6] beschrieben. Diese erfassen und strukturieren die grundsätzlichen logischen Elemente für die industrielle Digitalisierung, erleichtern durch die abstrakte Natur der Referenzmodelle die direkte praktische Anwendung jedoch nur bedingt.

Unterstützung findet sich teilweise in der Literatur. *Heinz et al.* beschreiben eine Infrastruktur zur flexiblen Verarbeitung von Datenströmen für deren kontinuierliche Verarbeitung und Verdichtung über eine Online-Aggregation. Das Vorgehen für die Datenerfassung wird dabei nicht explizit beschrieben.[7]

Einen hochflexiblen Ansatz stellen *Theorin et al.* vor, die auf Basis einer ereignisgesteuerten Architektur ein Informationssystem für die Aufnahme und Transformation einfacher Nachrichten von verteilten Geräten zu Wissen einführen [8]. *Thiede et al.* beschäftigen sich im Detail mit der Simulation von Informationsflüssen, ohne konkret auf die Anbindung von Assets einzugehen [9]. Eine spezielle Referenzarchitektur für die präskriptive Kontrolle eines Produktionsprozesses stellen *Vater et al.* vor. Die Datenerfassung erfolgt über Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) und MQ Telemetry Transport (MQTT) mithilfe eines an die Cloud gekoppelten Edge Devices mit operationaler Datenbank. Die Anforderungen an das Architekturmodell werden detailliert beschrieben, das Vorgehen zur Entwicklung und Implementierung der Architektur wird jedoch nicht ausgeführt. [10]

Einen stärkeren Fokus auf die Gestaltung der IT-Infrastruktur legen *Oluvisola et al.*, die einen Ansatz für Design und Entwicklung eines intelligenten Produktionsplanungs- und -steuerungssystems aufzeigen. Sie empfehlen eine modulare Struktur anhand von Mikroservices und betrachten mögliche Anwendungsfälle für die Datenverarbeitung und Datenanalyse [11]. Speziell mit der Planung von Edge-Systemen hat sich *Zietsch* beschäftigt. Für die Datenerfassung stellt die Dissertation ein digitales Fabrikmodell vor, mit dem die Datenquellen hierarchisch strukturiert und über Templates standardisiert werden. Die Arbeit fokussiert den Pla-

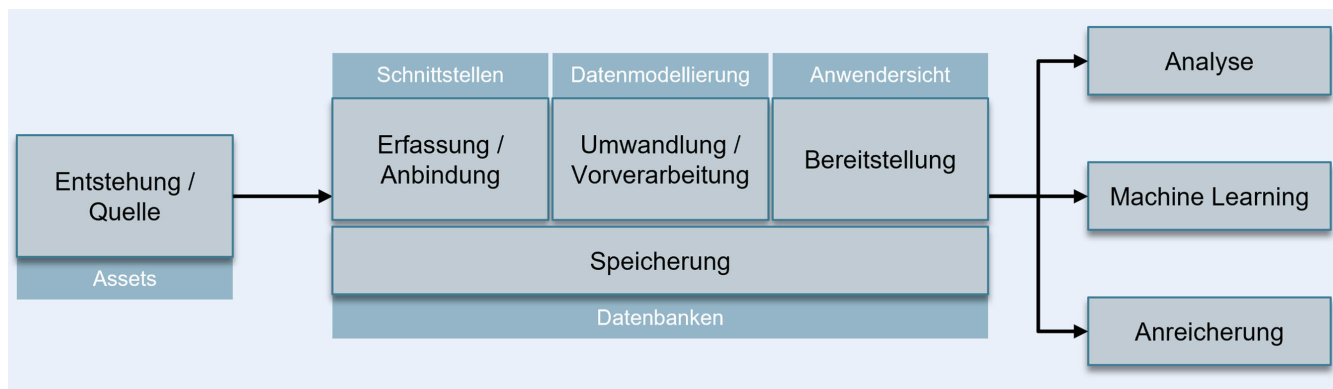


Bild 1. Data-Engineering-Lebenszyklus. Grafik: in Anlehnung an [13]

nungsprozess für die Edge-Infrastruktur, auf die dafür notwendige Dateninfrastruktur wird nicht praxisnah eingegangen [12].

Es zeigt sich, dass wenige Empfehlungen für die konkrete Implementierung einer Dateninfrastruktur zur Datenerfassung und Datenvisualisierung in industriellen Systemen existieren. Daher stellt dieser Beitrag ein Vorgehen auf Basis des Data Engineerings vor. Data Engineering beschreibt die Entwicklung, Implementierung und Pflege von Systemen und Prozessen, die aus Rohdaten hochqualitative und konsistente Informationen erzeugen [13]. Als Lösung für eine skalierbare Dateninfrastruktur für räumlich verteilte industrielle Systeme der zirkulären Produktion wird das entwickelte „Factory Data Logging and Visualization Network (DaViN)“ vorgestellt.

Das folgende Kapitel 2 gibt einen Überblick über industrielle cyber-physische Systeme und das Data Engineering. Aufbauend hierauf wird in Kapitel 3 ein Vorgehensmodell für das Data Engineering in industriellen Systemen der zirkulären Produktion vorgestellt. Kapitel 4 zeigt die konkrete Umsetzung in Form des Factory Data Logging and Visualization Network (DaViN). Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick.

2 Industrielle cyber-physische Systeme und Data Engineering

Industrielle cyber-physische Systeme beschreiben integrierte Systeme aus physischen und digitalen Elementen, die im Kontext der industriellen Wertschöpfung eingesetzt werden. Im Einklang mit dem Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 [4] bestehen diese Systeme aus flexiblen Assets, die unabhängig von konventionellen Hierarchiemodellen, wie der Automatisierungspyramide, vernetzt werden und kommunizieren. Dazu zählen neben cyber-physischen Produktionssystemen [14] auch cyber-physische Recyclingsysteme [15] oder cyber-physische Logistiksysteme [16].

Der grundlegende Aufbau ist in allen Systemen gleich. Die Informationen aus der physischen Welt mit den industriellen Systemen werden in einem Übergangsschritt in Echtzeit in die Cyberwelt übergeben. Dort können durch digitale Methoden wie Modellierung, Simulation und Machine Learning Erkenntnisse gewonnen werden. Am Übergang zurück in die physische Welt werden diese Erkenntnisse ausgegeben und für Entscheidungen, Optimierungen oder die Steuerung bereitgestellt. Den Übergängen zwischen der physischen und der digitalen Welt kommt eine besondere Rolle zu. Im Fokus dieser Arbeit steht der eingehende Übergang von der physischen Welt in die Cyberwelt, der anhand des Data-Engineering-Lebenszyklus (vergleiche [13]) beschrieben

werden kann. Ziel des Zyklus ist es, aus Rohdaten ein nutzbares Endprodukt für die Informationsgewinnung, wie etwa durch Analysen, maschinelles Lernen oder weitere Ansätze, zu erzeugen.

Die fünf Stufen des Data-Engineering-Lebenszyklus sind die Entstehung, Speicherung, Erfassung, Umwandlung und Bereitstellung von Daten [13], die im nachfolgenden Abschnitt in den Kontext industrieller Systeme eingeordnet werden. Bild 1 zeigt einen passenden Überblick.

2.1 Entstehung

Die Stufe „Datenentstehung“ beschreibt für industrielle Systeme die Quelle der Daten und damit verschiedene Assets wie Werkzeugmaschinen, Fertigungs- und Recyclinganlagen, Assets in der Fabrikinfrastruktur wie technische Gebäudeausrüstung und Intralogistik sowie Assets für die den Prozessen zugeführten Materialien, die Edukte und die Produkte.

Eine zentrale Rolle spielt die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) als Kontrollelement. Sie besteht aus einer Zentralbaugruppe zum Ausführen der Steuerungsprogramme und einer oder mehreren Peripheriebaugruppen zum Einlesen von Sensorwerten und zum Ausgeben von Befehlen an die Aktoren. [17]

2.2 Speicherung

Die Stufe „Speicherung“ beschreibt die Ablage der Daten in Datenbanken. Datenbanken werden je nach Anwendungsfall und Art der zu speichernden Daten kategorisiert. Transaktionale beziehungsweise operative Datenbanken fokussieren sich auf die aktuelle und konsistente Extraktion von Daten. Demgegenüber stehen leseorientierte analytische Datenbanken zur Gewinnung übergeordneter Erkenntnisse durch die Aggregation von Daten zu Informationen. Für die Ablage strukturierter Daten sind relationale Datenbanken weit verbreitet. Die Daten werden dabei in Tabellenstrukturen abgelegt und überwiegend mittels Structured Query Language (SQL) abgefragt. Datenbanken, die von dieser Struktur abweichen, werden als NoSQL-Datenbanken bezeichnet. Dazu zählen non-relationale Datenbanken wie Objekt-, Zeitreihen-, Dokumenten- oder Graphendatenbanken. [18, 19]

2.3 Erfassung

Mit der Stufe „Erfassung“ beginnt die Anbindung der Datenquellen. Ziel der Datenerfassung ist es, die Daten aus der durch

SPS geprägten Operational Technology (OT) in die Information Technology (IT) zu übertragen. Entscheidend ist der Aufbau einer Netzwerkstruktur mit physischen und virtuellen Schnittstellen. Die Netzwerkstruktur basiert auf den zu verbindenden Knoten, den Komponenten der Netzwerkinfrastruktur, der Verkabelung als physische Verbindung und dem Protokoll, mit dem die Regeln für den Nachrichtenaustausch im Netzwerk festgelegt werden. [20]

Je nach vorhandenem Asset werden die Knoten physisch über Ethernet oder serielle Schnittstellen wie RS232 verbunden. Netzwerkprotokolle lassen sich über das ISO/OSI-Modell [21] einordnen. Zu den weit verbreiteten industriellen Protokollen zählen OPC UA, MQTT, Modbus sowie proprietäre Protokolle wie das S7-Protokoll von Siemens [22].

2.4 Umwandlung

Im Anschluss an die erfolgreiche Anbindung eines Assets muss in der Stufe „Umwandlung“ die Struktur der Daten durch konzeptionelle, logische und physische Datenmodelle abgebildet werden. Datenmodelle beschreiben die Art und Weise wie die Daten in Beziehung zur echten Welt stehen. Sie helfen, die erfassten Prozesse, Definitionen, Arbeitsabläufe und Logik so abzubilden, dass die spätere Nutzbarkeit der Daten gegeben ist. [13]

Im Kontext industrieller Systeme zählt dazu die Ablage von Rohdaten in logisch strukturierten operativen Datenbanken. Für die meisten Assets bedeutet dies, Zeitreihendaten aufzuzeichnen und die einzelnen Werte eines Zeitpunkts als eine Zeile in eine relationale Datenbank zu schreiben. Für die Untersuchung von Kennzahlen auf der Analyseseite müssen die Daten der operativen Datenbank in einen Kontext gesetzt und für die entsprechenden Analysen vorbereitet werden. Die Umwandlungen finden gewöhnlich als Extract-Transform-Load (ETL) oder Extract-Load-Transform (ELT)-Prozess [13, 18] statt.

2.5 Bereitstellung

Die Stufe „Bereitstellung“ betrachtet das verlässliche Angebot vertrauenswürdiger Daten in nutzbarer Form für Anwender. Um dies leisten zu können, ist eine Berücksichtigung bereits in den vorgelagerten Stufen nötig. Dafür ist aus Sicht des Data Engineers ein Verständnis für das Vorgehen und die genutzten Methoden für die Datenanalyse, Machine-Learning-Ansätze oder Möglichkeiten zur Datenanreicherung durch die gewonnenen Erkenntnisse und damit den Anwender und Anwendungsfall notwendig. [13]

Für industrielle Systeme sind dafür die Interessen von Stakeholdern beispielsweise aus der Standort-, Werk- oder Geschäftsleitung, der Prozessplanung und -steuerung, dem Shopfloor sowie der IT-Abteilung und der Automatisierungstechnik zu berücksichtigen. Eine Steigerung des Mehrwerts der Daten kann durch Lösungen geschaffen werden, die sich synergetisch von mehreren Stakeholdern wertbringend einsetzen lassen.

3 Data Engineering in industriellen Systemen der zirkulären Produktion

Basierend auf der Verknüpfung des Data-Engineering-Lebenszyklus mit dem Konzept industrieller cyber-physischer Systeme wird hier ein Vorgehensmodell vorgestellt, das die Datenerfassung

und -bereitstellung in industriellen Systemen der zirkulären Produktion ermöglicht. Ziel des Vorgehensmodells ist der Aufbau einer Hardware- und Software-Infrastruktur mit dem primären Fokus der Datenerfassung in industriellen Systemen zur transparenten Visualisierung operativer Daten.

Die digitale Steuerung der industriellen Systeme steht dabei nicht im Vordergrund. Zudem ist aus IT-Sicherheitsgründen die Variante eines physisch von der allgemeinen IT-Infrastruktur getrennten Maschinennetzwerks im Zentrum der Betrachtung; auf alternative Lösungsmöglichkeiten wie cloudbasierte Datenerfassung oder Netzwerkkopplung wird ebenfalls eingegangen. Das Anwendungsgebiet der industriellen Systeme für die zirkuläre Produktion spiegelt die Übertragbarkeit des Ansatzes sowohl in eine Produktion als auch in die auf R-Strategien einzahlenden industriellen Systeme wie Recyclingsysteme wider. Außerdem lassen sich mit dem Ansatz verteilte industrielle Systeme, wie sie in der Kreislaufwirtschaft häufig vorkommen, miteinander digital koppeln. Zu Beginn wird das übergreifende Framework vorgestellt, um im Anschluss detailliert auf die einzelnen Elemente einzugehen. Das Vorgehensmodell gliedert sich in die in **Bild 2** dargestellten sechs Teilelemente, in denen sich Aspekte des Data-Engineering-Lebenszyklus wiederfinden.

Basis für das Gesamtverfahren sind die Zielsetzung und Ausgangssituation des betrachteten industriellen Systems. Die daraus resultierenden Anforderungen prägen wesentlich die Entscheidungen entlang des Hauptprozesses des Vorgehensmodells. Startpunkt ist der Aufbau einer digitalen Basisinfrastruktur bestehend aus Hardware, Software und Netzwerk. In diese Basis-Infrastruktur lassen sich Assets einbringen, die für die Anbindung anhand ihrer Eigenschaften und Anforderungen durch die Entwicklung eines Datenmodells vorbereitet werden. Die praktische Anbindung erfolgt durch die Umsetzung der Schnittstellen und Datenbanken. Anhand der Anforderungen des Anwendungsfalls werden die Daten in einem Datenumwandlungs- und Datenbereitstellungsschritt geeignet vorverarbeitet und mit bestehenden Strukturen verknüpft. Begleitet werden sämtliche Prozesse durch Tests und Dokumentationsprozesse.

3.1 Rahmenbedingungen des industriellen Systems

Zu Beginn des Vorgehens ist die übergreifende Zielsetzung im Kontext des betrachteten industriellen Systems zu klären. Dafür wird ein technisches Verständnis für das industrielle Gesamtsystem und die Mission und Vision der darüberliegenden Organisation vorausgesetzt. Möchte sich beispielsweise ein produzierendes Unternehmen darauf fokussieren, ökologisch nachhaltig zu wirtschaften und daraus abgeleitet seine Produktionsprozesse emissionsfrei gestalten, hat dies einen wesentlichen Einfluss auf die Zielstellung des betrieblichen Informationssystems und der Datenerfassung. Zudem ist die Frage zu klären, wer finaler Anwender des Systems ist und für welche Zwecke die Daten genutzt werden sollen. Daraus bestimmt sich die Art und Weise der Datenumwandlung und -bereitstellung.

Führt man die Zielsetzung einer emissionsfreien Produktion fort, braucht ein Produktionsvorstand andere Ergebnisse als ein Energiemanager. Auch wenn beiden Anwendungsfällen letztlich dieselben oder ähnliche Daten zugrunde liegen, generieren diese individuell ein unterschiedliches wertvolles Ergebnis. Genau dieser Wert sollte im Vorfeld ermittelt sein und kann sich durch die anhand der hinzugewonnenen Daten durchführbaren Verbes-

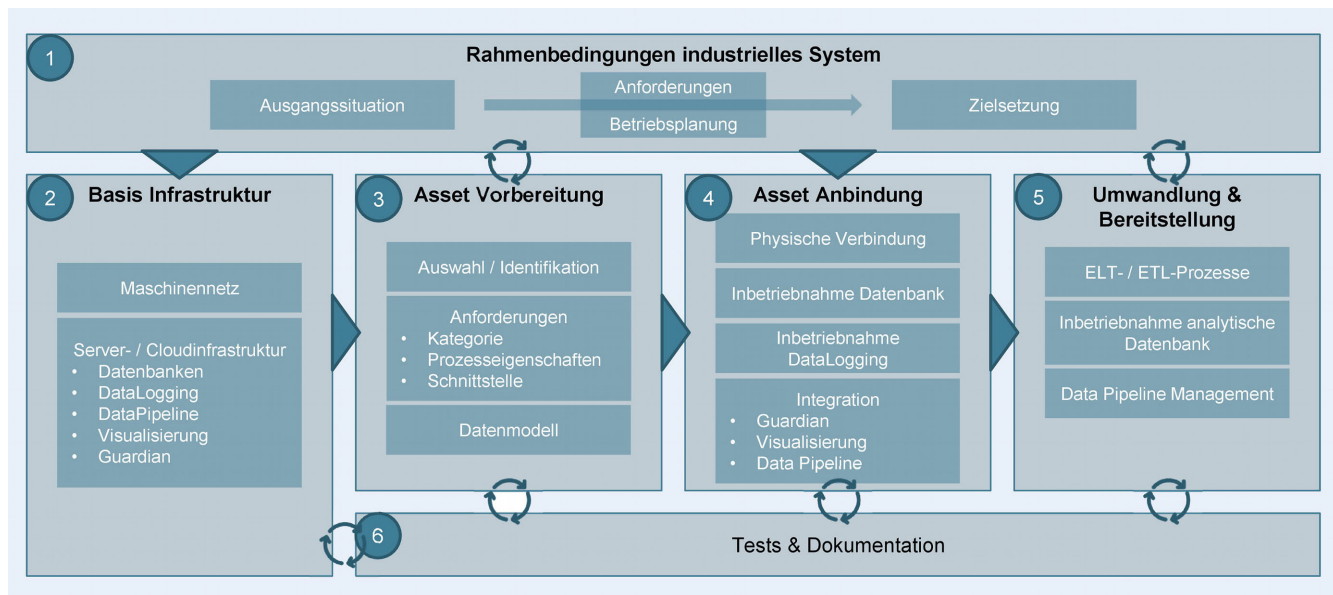


Bild 2. Vorgehensmodell für Data Engineering in industriellen Systemen der zirkulären Produktion. Grafik: TUBS, IWF

serungs- und Optimierungsmaßnahmen messen lassen. Zudem sollte geklärt sein, wer die Maßnahmen konkret umsetzen wird, um tatsächlich eine Verbesserung im industriellen System zu erreichen. Über die Rahmenbedingungen für den Anwendungsfall hinaus existieren meist Vorgaben zur IT- und Datensicherheit aus den darauf spezialisierten Gremien der Organisation, die zur Vorbeugung von Systemausfällen, Missbrauch oder Diebstahl unbedingt einzuhalten sind.

Ausgehend von den grundlegenden Rahmenbedingungen und der Zielsetzung für das industrielle cyber-physische System sollten die resultierenden Anforderungen in einem Anforderungskatalog zusammengetragen und dokumentiert werden. Zusätzliche Anforderungen ergeben sich aus den Eigenschaften der Prozesse und Prozessabläufe. Vor allem die durch die Daten abzubildenden Ereignisse und deren zeitliche Auflösung bilden die Basis für die gesamte Gestaltung des Datenerfassungssystems.

Teilweise ergeben sich weiterhin externe Anforderungen durch digitale Produkt-Service-Komponenten der physischen Infrastruktur. Moderne Maschinen-, Anlagen- und Sensorinfrastruktur unterliegt teilweise der externen Wartung und Pflege durch den Hersteller oder seiner assoziierten Servicepartner. Daraus können sich Anforderungen wie Möglichkeiten zur Fernwartung der Assets ergeben, die einen Einfluss auf Entscheidungen über die Asset-, Netzwerk- und Schnittstellenarchitektur haben.

Analog zu seinem physischen Pendant braucht auch das digitale System Pläne für Service und Wartung, Störungsfälle, Umstrukturierungen und Qualitätssicherung. Dazu zählen insbesondere angemessene Updatezyklen für genutzte Software-Distributionen sowie eigener, davon abhängiger Software, um Sicherheitslücken zu schließen und die allgemeine Betriebsfähigkeit zu erhalten. Veränderungen an den physischen Assets haben im Normalfall ebenfalls einen direkten Einfluss auf die digitalen Abbilder und die Datenerfassungsinfrastruktur und müssen über entsprechende Kommunikationsprozesse übermittelt werden.

Abschließend ist die Qualität der Daten ein wesentliches Merkmal für das Vertrauen der Organisation in die daraus abgeleiteten Analysen und Entscheidungsgrundlagen. Um Ausfälle

frühzeitig zu erkennen und beheben zu können, ist die kontinuierliche Überwachung des cyber-physischen Systems durch Funktionstests der Einzelelemente wie den Servern, Asset-Schnittstellen und Datenbanken notwendig. Weiterhin sollten die erfassten und gespeicherten Daten durch manuelle Stichprobenanalysen und automatisierte Plausibilitätsprüfungen regelmäßig kritisch hinterfragt werden, um fehlerhafte Daten zu detektieren, deren Ursache zu untersuchen und den Fehler zu beheben.

Zuletzt sind für die Inbetriebnahme und den Dauerbetrieb des Systems die Kosten abzuschätzen und in einer Budgetplanung zu integrieren.

3.2 Aufbau der digitalen Basisinfrastruktur

Ausgangspunkt für die Befähigung zur digitalen Anbindung von Assets ist eine digitale Basisinfrastruktur. Diese erfüllt die grundlegenden Anforderungen an das cyber-physische Gesamtsystem und ist aus der Serverinfrastruktur sowie dem Maschinennetz aufgebaut.

Wesentlich für die Gestaltung der Server- beziehungsweise Cloudinfrastruktur ist die Ausprägung des Maschinennetzes. Dieses kann entweder als physisch getrenntes lokales Netzwerk ausgeführt oder auch in das Internet eingebunden sein. Höhere Sicherheit kann das lokale, physisch getrennte Maschinennetz bieten, das nur an einzelnen Knotenpunkten limitierten Austausch mit anderen Netzwerken oder dem Internet aufbaut. Innerhalb des Maschinennetzes sind die Netzwerkrichtlinien festzulegen. Sinnvoll ist dabei der Einsatz fester IPs (Internet Protocols) für die eingebundenen Assets, um die volle Kontrolle im Netzwerk zu behalten und eine robuste und zuverlässige Kommunikation mit den Assets sicherzustellen. Weiterhin sind die eingesetzten Netzwerkprotokolle festzulegen.

Ist die Struktur des Maschinennetzes festgelegt, kann mit der Einrichtung der Server- beziehungsweise Cloudinfrastruktur und deren Installation begonnen werden. Die Systeme sollten sich dabei in die vorhandene IT-Umgebung einbetten. On-Premise müssen sich Administratoren zudem Gedanken zur Serverarchitektur und Gliederung in virtuelle Maschinen (KVM, englisch:

Kernel Virtual Machines) inklusive der Themen Ausfallsicherheit, Datenreplikation, IT-Sicherheit sowie Wartung und Pflege machen. Weitere Rahmenbedingungen für die Basis-Infrastruktur entstehen durch die vorhandenen personellen Entwicklungsressourcen und -kompetenzen. Diese entscheiden über die einsetzbaren Programmiersprachen und Technologien. Sind die organisatorischen und technischen Rahmenbedingungen geklärt, die Server beschafft und eingerichtet, benötigt die Basis-Infrastruktur fünf zentrale Software-Elemente.

Als Grundlage für die Basisinfrastruktur sind Möglichkeiten zur Datenablage erforderlich. Dafür muss aus den Rahmenbedingungen die Datenbank-Grundstruktur und -Technologie anhand der geforderten operativen und analytischen Datenbanken abgeleitet werden. Anhaltspunkte bieten die aus dem industriellen System erwarteten automatisiert erfassten Maschinen- und Anlagendaten sowie manuell ergänzte Prozessdokumentationen und Analyseergebnisse und deren Frequenz, Menge, Art und Variabilität. Feststehende Datenflüsse zwischen Datenbanken können bereits als Datenpipelines beschrieben werden. Im Anschluss an die Datenbankplanung erfolgt die Installation und Einrichtung der Datenbanken und Datenbankmanagementsysteme auf den Servern inklusiver der Zuweisung einer ausreichenden Speicher- menge sowie einer Nutzer- und Rechteverwaltung.

Kern der Datenerfassung ist ein DataLogging-Skript mit der Aufgabe, sich mit dem Datenstrom des Assets zu verbinden, diesen aufzunehmen und in eine Datenbank zu schreiben. Dabei ist die Implementierung abhängig von der Schnittstelle und dem Netzwerkprotokoll. Die Konfiguration des Skripts enthält die nötigen Informationen für die Kommunikation mit dem Asset, die Datenbank und die Datenaufnahmefrequenz. Für die vielfältigen industriellen Protokolle und Datenbanktypen können Standard-Skripte als Vorlage erstellt werden. Auf dem Server wird im Anschluss eine robuste Laufzeitumgebung für die Skripte eingerichtet.

Die Extraktion, Aggregation und Konsolidierung von Daten an der Schnittstelle zwischen operativen, analytischen und externen Datenbanken erfolgt mit DataPipeline-Skripten. Diese sichern zudem die Bereitstellung der Daten in der vom Anwender benötigten Form. Analog zum DataLogging benötigen die Skripte eine robuste Laufzeitumgebung, wodurch die Aktualität der Daten in den Datenbanken gewährleistet wird.

Ebenfalls Teil der Basisinfrastruktur ist ein System für die Datenvisualisierung. Konkret wird ein Webserver installiert und eingerichtet, auf dem mehrere Webseiten für die kontinuierliche Visualisierung der Daten aus der operativen Datenbank bereitgestellt werden. Diese werden über iFrames in eine übergreifende Dashboard-Webseite eingebunden. Die darzustellenden iFrames können modular über ein Einstellungsmenü ausgewählt werden. Häufig genutzte Darstellungen der Daten aus dem industriellen System wie Histogramme oder Zeitverläufe können über geeigneten Visualisierungsbibliotheken implementiert und als Standard-Vorlagen bereitgestellt werden.

Letzter Bestandteil der Basisinfrastruktur sind Skripte zur automatisierten Systemüberwachung, sogenannte Watchdogs oder Guardians. Diese prüfen das System kontinuierlich und versenden je nach Anwendung Warnungen etwa zu Systemausfällen, Plausibilität der erfassten Daten oder Sicherheitsverstößen.

3.3 Vorbereitung des Assets

Zur Anbindung des Assets sind einige Vorbereitungsschritte durchzuführen. Ausgehend von der übergreifenden Zielstellung der Datenerfassung müssen geeignete Assets ausgewählt werden. Lässt sich die Zielstellung nicht alleine anhand der vorhandenen Assets erreichen, ist bei Bedarf die Entwicklung von unterstützenden Assets notwendig.

Die Anforderungen für identifizierte Assets lassen sich anhand bekannter Informationen über das Asset beispielsweise aus der Betriebsanweisung, dem Handbuch oder anderer Dokumentation des Assets kategorisieren, um Standards für das Vorgehen anhand der Asset-Kategorie zu folgen.

Wesentlich ist zudem die Ermittlung der Prozesseigenschaften, die dem Asset zugrunde liegen. Aus dem Prozessverständnis und -kontext werden relevante Prozessparameter und deren minimale Abtastfrequenz sowie die Leistungskennzahlen der Assets abgeleitet.

Im Anschluss wird das Asset auf seine verfügbaren Schnittstellen untersucht. Für die praktische Anbindung der Datenquellen ist je nach verfügbarem Protokoll eine intensive Auseinandersetzung mit den daraus resultierenden Anforderungen an die Software zur Datenerfassung notwendig. Findet sich kein geeignetes verfügbares Protokoll ist eine technische Umrüstung des Assets denkbar, bei der aber mit zusätzlichen Kosten für die Umrüstung oder Freischaltung von Datenpunkten und Protokollen zu rechnen ist.

Anhand der eingesammelten Anforderungen und Informationen kann für das Asset nun ein Datenmodell definiert werden. Das Vorgehen ist individuell von Asset zu Asset unterschiedlich und orientiert sich allgemein an den zugrunde liegenden Prozesseigenschaften.

3.4 Anbindung des Assets

Im Anschluss an die Vorbereitung erfolgt die praktische Anbindung des Assets. Dabei wird in einem ersten Schritt über die identifizierte physische Schnittstelle eine Verbindung zwischen Asset und Server über das Maschinennetz hergestellt. Daraufhin wird das in der Vorbereitung entwickelte Datenmodell des Assets im Datenbankmanagementsystem umgesetzt. Nach der Auswahl eines in der Basis-Infrastruktur vorliegenden, für die Schnittstelle geeigneten DataLogging-Skripts wird dessen Konfiguration auf die Spezifikation des Assets und der Datenbank angepasst. Im Anschluss kann das DataLogging-Skript gestartet werden und die Daten des Assets werden in die Datenbank geschrieben.

Zur Integration in die weiteren Elemente der Basis-Infrastruktur erfolgt abschließend die Berücksichtigung des neuen Assets im Guardian sowie die Inbetriebnahme geeigneter Datenpipelines. Außerdem kann für die Visualisierung der erfassten Daten eine Darstellungsvariante ausgewählt und diese an die Datenbank angebunden werden.

3.5 Umwandlung und Bereitstellung

Die im Data-Engineering-Lebenszyklus getrennt betrachteten Schritte der Datenumwandlung und -bereitstellung sind in diesem Vorgehensmodell kombiniert. Neben der bereits bei der Datenerfassung durchgeführten Vorverarbeitung der Daten wird an diesem Punkt die zielgerichtete Bereitstellung der Daten für die

Endanwendung durchgeführt. Daten von verschiedenen Assets werden dabei nach dem Prinzip eines ETL- oder ELT-Prozesses extrahiert, logisch kombiniert und als gebündelte und verknüpfte Datensätze in analytischen Datenbankstrukturen abgelegt. Neben der Visualisierung der operativen Daten bilden die analytischen Datenbanken die Basis für strukturierte Datenanalyse, Machine Learning und Reporting, beispielsweise von Kennzahlen.

In diesem Schritt ist auch das Management von Datenpipelines verankert, um die Datenströme für zahlreiche Anwendungsfälle aus einer großen Menge an Assets zu überwachen und zu steuern.

3.6 Tests und Dokumentation

Als Begleitprozess über sämtliche Elemente des Vorgehensmodells dienen standardisierte Tests und die Dokumentation der entwickelten digitalen Systeme. Auf diese Weise kann die Entwicklung neuer Lösungen sowie die Stabilität des Gesamtsystems verbessert werden.

4 Factory Data Logging and Visualization Network (DaViN)

Die Umsetzung des Vorgehensmodells erfolgte am Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) an der Technischen Universität Braunschweig. Über die vergangenen Jahre wurden im Rahmen von Forschungsprojekten zahlreiche Lösungen zur Datenerfassung und -visualisierung in industriellen Systemen aufgebaut. Mit dem Ziel einer projektübergreifenden, robusten Datenerfassung und -visualisierung operativer Daten aus Fabriken wurde das „Factory Data Logging and Visualization Network“ (DaViN) entwickelt. Für einen verstetigten Betrieb abseits von Arbeiten in Projekten wurde der Aufwand für Wartung und Pflege durch Standardisierung und Normalisierung kontinuierlich reduziert. Entstanden ist eine schlanke und wartungsarme, aber gleichzeitig stabile und robuste Dateninfrastruktur, die im Sinne der standortübergreifenden Integration neuer Assets skalierbar bleibt. Ausgehend von den allgemeinen Rahmenbedingungen erfolgt die Vorstellung der Gesamtarchitektur und die Veranschaulichung anhand des Beispiels der Digitalisierung einer mechanischen Batterierecycling-Forschungsanlage.

4.1 Rahmenbedingungen

Das Institut bettet sich in ein kollaboratives universitäres Forschungsumfeld, das sich über mehrere Standorte in Braunschweig und Wolfsburg erstreckt. Aufgrund der übergreifend verfügbaren Netzwerkinfrastruktur der Universität ist eine Kopplung der Standorte möglich. Die konkreten Standorte sind das Institut selbst mit den beiden Teilsystemen Technikum und Lernfabrik, die Battery LabFactory (BLB) in Braunschweig mit den Standorten ProductionLab (PLB) und CircularLab (CLB) sowie die Open Hybrid LabFactory (OHLF) in Wolfsburg. Alle Standorte sind grundsätzlich durch die in Betrieb befindliche Basis-Infrastruktur befähigt. Innerhalb der Standorte befinden sich Systeme und Assets, die Prozesse für eine zirkuläre Produktion wie Fertigung, Montage, Demontage und Recycling bereitstellen.

Anwender des Systems sind primär wissenschaftliche und technische Fachkräfte, Studierende, die Professorenschaft und in Kooperationen eingebundene Mitarbeitende von Unternehmen. Aus den Daten sollen Informationen über den aktuellen Zustand

von Assets und deren Kontext abgeleitet werden. Konkret sollen die Daten aus Maschinen, Anlagen, Gebäudetechnik und weiterer Sensor- und Messtechnik erfasst und für den Anwender zugänglich auf einem Dashboard dargestellt werden. Zudem benötigen die Anwender Zugriff auf die erfassten Rohdaten, um ihre eigenen Forschungsanalysen zu hinterlegen und anzureichern. Ziel der Anwender ist der Zugang zu Rohdaten als Forschungsdatengrundlage für die operative Analyse industrieller Systeme. Hierzu zählen neben den reinen Zeitreihendaten auch die Identifikation von Zusammenhängen innerhalb des industriellen Systems.

Daraus ergibt sich als Zielsetzung von DaViN die Bereitstellung von Rohdaten für den Forschungsbetrieb sowie die Erzeugung von Sichtbarkeit und Transparenz aus den Daten der Maschinen und Anlagen sowie der lokalen Gebäude-, Klima-, Energie-, Mess- und Sensortechnik.

Die eingesetzten Technologien orientieren sich am Forschungsumfeld mit dem Ziel, die Architektur möglichst auf kostenloser Open-Source-Technologie aufzubauen sowie Anforderungen an die IT- und Datensicherheit zu erfüllen. Die Anbindung von Maschinen und Anlagen erfolgt bevorzugt über Ethernet mittels OPC UA. Steht diese Möglichkeit nicht zur Verfügung, werden bedarfsgerechte Individualösungen an der Schnittstelle zwischen IT und OT umgesetzt. Die Kommunikation erfolgt über – in Abstimmung mit der zentralen IT – freigeschaltete Ports in Teilnetzen des zentral verwalteten Universitätsnetz, um die Angriffsfläche für Cyberattacken gering zu halten. Die Hardware für Server und Rechner folgt Industriestandards. Als Server-Betriebssysteme kommen Linux-Distributionen wie openSuse-Server zum Einsatz. Die Software für DataLogging, DataPipelines und Guardians basiert auf JavaScript und Node.js. Als Basis-Datenbanktechnologie wird das relationale Datenbankmanagementsystem MariaDB genutzt. Der Webserver basiert auf Apache-Server und HTML. Eine Dashboard-Steile integriert einen Touchmonitor und einen Mini-PC zur Darstellung der Dashboard-Webseite.

4.2 Gesamtsystemarchitektur

Die räumlich verteilte Gesamtsystemarchitektur ist in **Bild 3** dargestellt und erstreckt sich über die beteiligten Standorte und dortigen Teilsysteme mit einem Hauptserververbund am Institut selbst.

Der Hauptserververbund betreibt die zentrale Datenbank, die Webserver für die Visualisierung, den Guardian zur Systemüberwachung, Backupsysteme und weitere zentral betriebene virtuelle Maschinen für projektbezogene Arbeiten. Dezentral verteilt ist die lokale Infrastruktur an den Standorten. Jeder Standort und teilweise auch jedes Teilsystem hat in der Minimalausstattung einen DataLogging-Server und eine Master-SPS, mit denen die Daten von den Assets innerhalb des Teilsystems akquiriert werden. An einigen Standorten existieren Stelen, in denen Hardware-Komponenten für die Bereitstellung der Datenvisualisierung als Gesamtlösung bereitgestellt werden. Der Datenfluss durch ein Minimalbeispiel der Systemarchitektur ist in **Bild 4** dargestellt.

Je nach verfügbarer Schnittstelle werden die Daten des Assets im lokalen Maschinennetz entweder direkt mit einem DataLogging-Server erfasst oder durch die Verwendung einer Master-SPS vorbereitet. Das DataLogging-Skript schreibt die Daten in eine geeignete Datenbank. Dort stehen die Daten für den Zugriff durch ein Anwender-Endgerät, DataPipeline-Skripte oder für den Abruf durch den Webserver zur Verfügung. Der Webserver nutzt

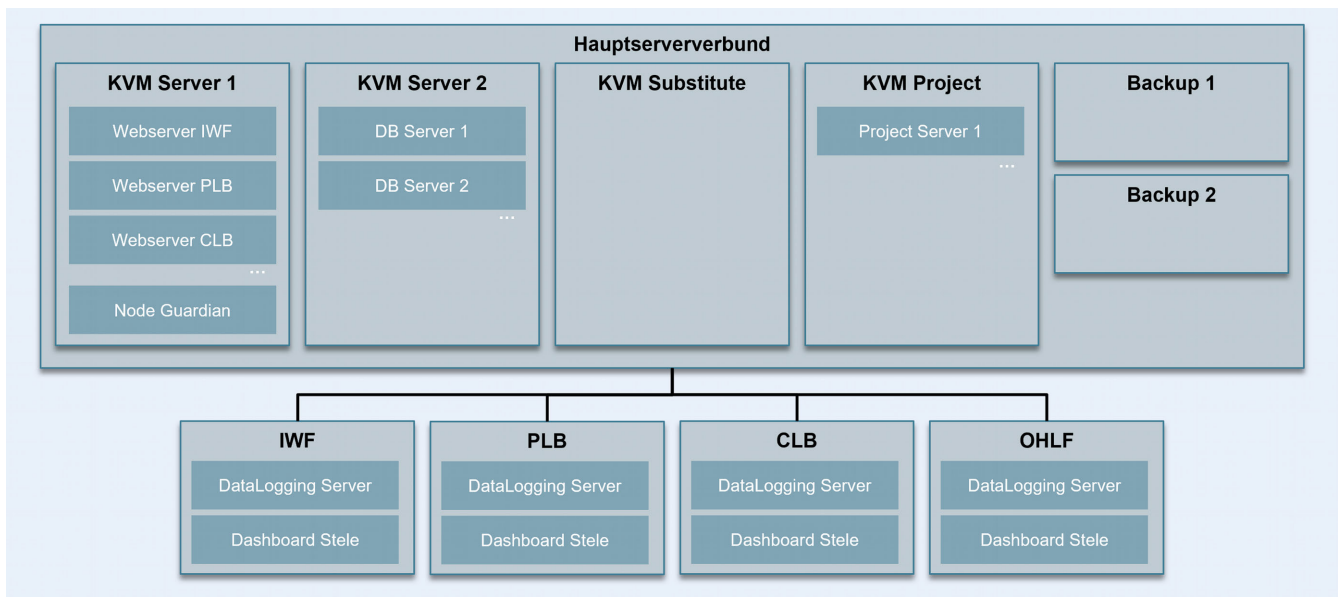


Bild 3. Gesamtarchitektur des „Factory Data logging and Visualization Network“ (DaViN). Grafik: TUBS, IWF

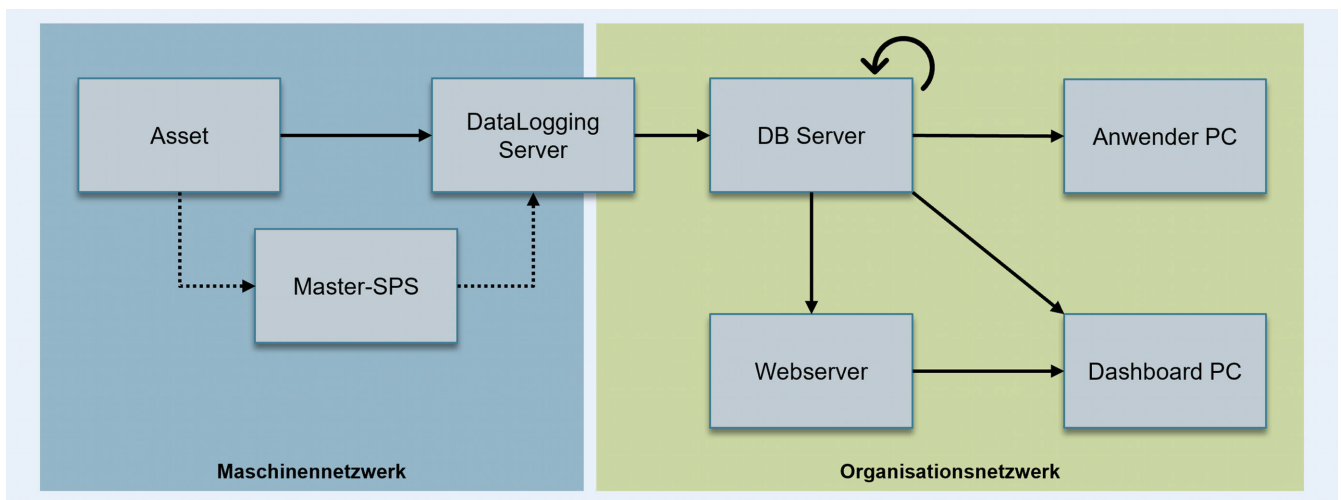


Bild 4. Darstellung des Datenflusses in einem Minimalbeispiel der Systemarchitektur. Grafik: TUBS, IWF

die Daten für die Bereitstellung eines webbasierten Dashboards, das im Anschluss an einem beliebigen Endgerät innerhalb des Netzwerks aufgerufen werden kann. Dazu zählt auch der Mini-PC in der Dashboard Stele.

Um die Fähigkeiten der Architektur beispielhaft zu zeigen, wird die Datenerfassung und -visualisierung für eine mechanische Recyclinganlage nachfolgend als konkreter Anwendungsfall beschrieben. Diese steht im CircularLab der BLB und bildet gemeinsam mit den Daten aus dem ProductionLab der BLB die digitale Kopplung einer zirkulären Batteriezellproduktion ab.

4.3 Anwendung an einer mechanischen Recyclinganlage

Die betrachtete Anlage dient zur mechanischen Verarbeitung von Batteriemodulen und kombiniert dafür eine 4-Wellen-Rotorschere, einen Intensivmischer, einen Zick-Zack-Sichter, ein Luftstrahl-Taumelsieb und eine Vakuumpumpe. Die Batteriemodule werden durch ein Schleusensystem der Anlage von oben zugeführt und im ersten Schritt durch die Rotorschere zerkleinert.

Die zerkleinerten Bestandteile fallen durch ein Gitter direkt in den Intensivmischer und werden dort umgewälzt und getrocknet. Ist das Trocknungskriterium erreicht, werden die Bestandteile durch Sieb und Sichter mechanisch in verschiedene Fraktionen für die weitere Aufbereitung aufgetrennt. Durch die Vakuumpumpe wird die Druckkammer, in der Rotorschere und Mischer untergebracht sind, in einen Niederdruckbereich gebracht.

In Abstimmung mit dem Anlagenhersteller wurde OPC UA als Kommunikationsprotokoll vereinbart, sodass Prozess- und Betriebsparameter sowie der Leistungsbedarf der Anlagenkomponenten zentral über eine Schnittstelle übergeben werden. Im CircularLab wurde ein DataLogging-Server eingerichtet, eine Datenbank für die bereitgestellten Werte erstellt und die Skripte zur Datenerfassung so angepasst, dass die Werte der Anlage in die Datenbank geschrieben werden können. Zur Darstellung der Messwerte wurde zentral in der Halle eine Dashboard-Stele mit Touchmonitor und Tablets aufgebaut (Bild 5), um dort die Live-Werte der Anlage anzeigen zu können. Der Webserver für das Dashboard wurde eingerichtet und der Mini-PC der Stele so



Bild 5. Dashboard-Stele am CircularLab der „Battery LabFactory Braunschweig“. Foto: TUBS, IWF

konfiguriert, dass die Webseite für das Dashboard durchgehend angezeigt wird.

Über die Visualisierung der operativen Daten hinaus können Daten forschungsorientiert für die Prozessoptimierung im Recycling, die automatische Identifikation von Maschinenzuständen sowie die Analyse von Material-Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen (vergleiche [23]) genutzt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellt anhand des Factory Data Logging and Visualization Network (DaViN) eine Lösung für die Datenerfassung und -visualisierung in industriellen Systemen vor. Aufgrund der generellen Einsatzfähigkeit in industriellen Systemen der zirkulären Produktion eignet sich der Ansatz als technologische Lösung für die Kreislaufwirtschaft. Verteilte industrielle Systeme lassen sich digital koppeln, um die integrierte Betrachtung vorwärts- und rückwärtsgerichteter Prozesse standortübergreifend zu ermöglichen. Durch die konsequente Standardisierung in der Architektur ist die Vielfalt von Wartung und Systempflegeprozessen gering und auch für das universitäre Forschungsumfeld beherrschbar. Neben der gewöhnlichen Anbindung von Werkzeugmaschinen ist mit der Anbindung einer mechanischen Batterierecyclingsanlage ein wichtiger Anwendungsfall für die Batteriekreislaufführung aufgezeigt. Das allgemeine Vorgehen für die Umsetzung industrieller cyber-physischer Systeme auf Basis des Data Engineerings wurde ausführlich beschrieben.

Aufgrund der limitierten Ressourcen für Cybersicherheit sind in der aktuellen Architektur die Assets in einem physisch getrennten Maschinennetz untergebracht. Aus diesem Grund ist eine Cloudanbindung derzeit nicht möglich, jedoch bei Bedarf unter Berücksichtigung der Sicherheitsrisiken denkbar. Eine weitere Beschränkung ergibt sich aus dem Bedarf einer flexiblen

Anlagennutzung im universitären Forschungsumfeld und der damit getroffenen Entscheidung allgemein keine direkte Steuerung der Assets zu implementieren. Für die Zukunft ist dies im Rahmen einzelner kontrollierter Anwendungsfälle denkbar.

Weiterhin bietet das aktuell umgesetzte System die Grundlage für datenbasierte Forschungsarbeiten. Die Potenziale für Modellierung, Simulation oder Machine Learning sind dabei noch nicht vollständig ausgeschöpft. Konkrete Bedarfe von Stakeholdern der zirkulären Produktion können wesentliche Anreize für die zukünftigen Anwendungsfälle und daraus resultierende datenbasierte Analysen und Modelle liefern.

FÖRDERHINWEIS


Diese Arbeit wurde über die folgenden Projekte gefördert: „DiRection“ durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Dachkonzepts Batterieforschung im Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ (Förderkennzeichen 03XP0358A) und vom Projektträger Jülich (PTJ) betreut. „NextGenPV“ durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) aus Mitteln des Programms „zukunft.niedersachsen“ (Förderkennzeichen ZN4271).

Literatur

- [1] Schuh, G.; Schmidt, C. (Hrsg.): Produktionsmanagement: Handbuch Produktion und Management 5. Heidelberg: Springer Verlag 2014. DOI: doi.org/10.1007/978-3-642-54288-6

- [2] Kara, S.; Hauschild, M.; Sutherland, J. et al.: Closed-loop systems to circular economy: A pathway to environmental sustainability? CIRP Annals 71 (2022) 2, pp. 505–528
- [3] Cerdas, F.; Kurle, D.; Andrew, S. et al.: Defining Circulation Factories – A Pathway towards Factories of the Future. Procedia CIRP 29 (2015), pp. 627–632
- [4] DIN SPEC 91345: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) Ausgabe April 2016
- [5] Industry IoT Consortium: The Industrial Internet Reference Architecture. Stand: 2022. Internet: www.iiconsortium.org/iira/. Zugriff am 14.03.2025
- [6] ISO/IEC 30141: Internet of things (IoT) – Reference architecture. Ausgabe August 2024
- [7] Heinz, C.; Krämer, J.; Riemenschneider, T. et al.: Auf dem Weg zur allwissenden Fabrik – Vertikale Integration auf Basis kontinuierlicher Datenverarbeitung. Workshop „Die allwissende Fabrik – Informatik in der Produktion“, INFORMATIK 2007, Informatik trifft Logistik, Lecture Notes in Informatics (LNI), P-110, 2007, S. 339–344
- [8] Theorin, A.; Bengtsson, K.; Provost, J. et al.: An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. International Journal of Production Research 55 (2017) 5, pp. 1297–1311
- [9] Thiede, S.; Marc-André, F.; Thiede, B. et al.: Integrative simulation of information flows in manufacturing systems. Procedia CIRP 81 (2019), pp. 647–652
- [10] Vater, J.; Harscheidt, L.; Knoll, A.: A Reference Architecture Based on Edge and Cloud Computing for Smart Manufacturing. 2019 28th International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN), Valencia, Spain, 2019, pp. 1–7
- [11] Oluyisola, O. E.; Bhalla, S.; Sgarbossa, F. et al.: Designing and developing smart production planning and control systems in the industry 4.0 era: a methodology and case study. Journal of Intelligent Manufacturing 33 (2022) 1, pp. 311–332
- [12] Zietsch, J.: Planning of Edge Computing for Factories. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2023
- [13] Reis, J.; Housley, M.: Fundamentals of Data Engineering: Plan and Build Robust Data Systems. Sebastopol, CA: O'Reilly Media 2022
- [14] Thiede, S.; Juraschek, M.; Herrmann, C.: Implementing Cyber-physical Production Systems in Learning Factories. Procedia CIRP 54 (2016), pp. 7–12
- [15] Blömeke, S.; Mennenga, M.; Herrmann, C. et al.: Recycling 4.0: An Integrated Approach Towards an Advanced Circular Economy. ICT4S2020: Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability, 2020, pp. 66–76
- [16] Oks, S. J.; Fritzsche, A.; Möslin, K. M.: An Application Map for Industrial Cyber-Physical Systems. In: Jeschke, S.; Brecher, C.; Song, H. et al. (Hrsg.): Industrial Internet of Things. Cham: Springer International Publishing 2017, S. 21–46
- [17] Seitz, M.: Speicherprogrammierbare Steuerungen im Industrial IoT: Objektorientierter System- und Programmentwurf, Motion Control, Sicherheit, Digital Engineering. München: Carl Hanser Verlag 2025
- [18] Munro, K.; Papp, S.; Toth, Z. et al.: Handbuch Data Science und KI: Mit Machine Learning und Datenanalyse Wert aus Daten generieren. München: Carl Hanser Verlag 2025
- [19] Beims, M.; Bischof, C.; Hengstberger, W.: Handbuch IT-System- und Plattformmanagement. München: Carl Hanser Verlag 2025
- [20] Riggert, W.; Lübken, R.: Rechnernetze: ein einführendes Lehrbuch. München: Carl Hanser Verlag 2020
- [21] ISO/IEC 7498–1: Information technology – Open Systems Interconnection – Basic reference model: The basic model. Ausgabe November 1994
- [22] IPCOMM GmbH: Standardprotokolle. Stand: 2025. Internet: www.ipcomm.de/protocols_de.html. Zugriff am 14.03.2025
- [23] Bockholt, H.; Indrikova, M.; Netz, A. et al.: The interaction of consecutive process steps in the manufacturing of lithium-ion battery electrodes with regard to structural and electrochemical properties. Journal of Power Sources 325 (2016), pp. 140–151




Sandro Süß, M.Sc. 

s.suess@tu-braunschweig.de


Tel. +49 531 / 391-7159

Foto: Martin David/TU Braunschweig

Olaf Wojahn, Staatlich geprüfter Techniker

Dr.-Ing. Mark Mennenga 

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann 

Technische Universität Braunschweig 
Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig
www.tu-braunschweig.de/iwf

LIZENZ



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