Industry SCIENCE 4.0

2/2025 April 2025 Preis € 59,-ISSN 2942-6154

Die Zukunft der Produktion mit KI, Cobots und virtuellen Welten

Datenqualität in der Entwicklung kreislauffähiger Produkte

Digitaler Zwilling mittels semantischer Modellierung und KI

Fehlermanagement in der Produktion

Die Lernfabrik "InTraLab"

Mit Digitalen Zwillingen den Budgetierungsprozess optimieren

Die Produktion von Kleinserien wettbewerbsfähiger machen

Intelligentes Ladungsträgermanagement

Cyber-Sicherheit in der Prozessindustrie

Kollaborative Drohneninspektion











Preisverleihung Factory Innovation Awards 2025

Hannover Messe, 2. April um 16:30 Uhr Halle 17

Live dabei sein! Auf der Hannover Messe oder im Stream via Instagram



Preiskategorien 2025

Industrie 4.0 in der Praxis · Künstliche Intelligenz in der Fabrik

Digitale Transformation der Fabrik · Plattformen für die vernetzte Fabrik

Konnektivität · Schulung und Weiterbildung · Nachhaltige Fabrik · Publikumspreis

Finalisten

Anderson Europe GmbH • EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG
EVO Informationssysteme GmbH • Fraunhofer IOSB-INA • SmartFactoryOWL
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. • I-Care Deutschland GmbH
Industrial Application Software GmbH• Institut für Innovation und Industrie Management (IIM)
TU Graz • Institut für Wirtschaftsinformatik und Digitale Gesellschaft e.V. • InTraLab
ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH • Johann Hofmann • Industrie 4.0 Experte und
strategischer Berater • Monitor ERP GmbH • PSI Software SE
Business Unit Discrete Manufacturing • software4production GmbH • SOFTWBAUWARE GmbH
SYNERPY GmbH • T.CON GmbH & Co. KG • tesa Werk Hamburg GmbH



Editorial

Technologie braucht wertschöpfende Geschäftsmodelle

Kürzlich nahm ich als eingeladener Experte für plattformbasierte Wertschöpfung an einer Sitzung des Forschungsbeirats Industrie 4.0 teil. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hatte eingeladen. 20 Expertinnen und Experten diskutierten zwei Tage lang, wo weiterer Forschungsbedarf zur Realisierung von Industrie 40 besteht.

Die Antworten waren äußerst vielfältig. Prominent wurde darauf hingewiesen, dass zunächst die Produktivität von End-to-End-Prozessen von Industrieunternehmen verbessert werden müsse. Das stellt ein großes, noch unrealisiertes Potenzial dar. "Everythingas-a-Service" war ebenfalls ein viel diskutiertes, aber bis jetzt nicht in der Praxis realisiertes Konzept. Einig war sich der Teilnehmerkreis, dass eine gemeinsame Anstrengung von Praxis und Wissenschaft notwendig ist, um die technologischen Möglichkeiten auch in Standortvorteile für Deutschland umzusetzen. Konkret müssen Ingenieurwissenschaften und Informatik, in Teilen ergänzt um weitere Wissenschaften, eng mit der Industrie kooperieren, um kluge Ideen in die Praxis zu übertragen.

Was im Labor funktioniert, wird in die Praxis übernommen. Nun zu meinen Aussagen: ich sprach darüber, warum die bei B2C notwendige Skalierung bei B2B auf einfache Weise nicht erreicht werden kann. Hindernisse für die Skalierung liegen zum Beispiel in den äußerst komplexen Wertschöpfungsnetzwerken, die in großen Teilen der deutschen Industrie vorherrschen. Hier müssen neue Systemarchitekturen für Plattformen entwickelt werden, damit die Skalierung wenigstens auf der Ebene der Komponenten dieser Plattform funktionieren kann. Ebenso müssen die Dimensionen Zeit, räumliche Geltung und Dezentralität beziehungsweise Autorität berücksichtigt werden.

Wenn Sie diese Ausgabe aufschlagen, finden Sie eine große Zahl innovativer Forschungsideen rund um die Technologien KI, Robotik und virtuelle Welten, wie immer bei Industry 4.0 Science doppelt blind begutachtet und daher qualitätsgesichert.

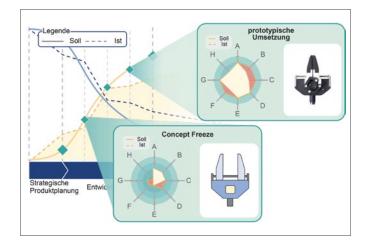
Prof. Norbert Gronau Herausgeber ngronau@industry-science.com



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Norbert Gronau ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik, insb. Systeme und Prozesse, an der Universität Potsdam sowie Herausgeber von Industry 4.0 Science und Factory Innovation.



Inhalt





Datenqualität in der Entwicklung kreislauffähiger Produkte: Entscheidungsunterstützung für die zirkuläre Wertschöpfung durch Datenökosysteme

Wie nachhaltig ein Produkt tatsächlich wird, entscheidet sich bereits in der Entwicklung. Damit die Kreislaufwirtschaft gelingen kann, muss die Datenqualität gezielt bewertet und gemanagt werden. Denn ohne verlässliche Daten bleiben viele Annahmen spekulativ.

Weiterlesen auf Seite 12

Digitaler Zwilling mittels semantischer Modellierung und KI: Selbstlernende Entwicklung und Simulation industrieller Produktionsanlagen

Digitale Zwillinge verhalten sich oft statisch und müssen aufwendig modelliert werden. Hier schafft der Einsatz von KI Abhilfe. Denn ein KI-basierter Digitaler Zwilling erlernt das Systemverhalten eigenständig und liefert somit jederzeit das optimale Abbild des Produktionsprozesses.

Weiterlesen auf Seite 30

QUALITÄT

12
I. Gräßler, S. Rarbach, J. Pottebaum
Datenqualität in der Entwicklung
kreislauffähiger Produkte:
Entscheidungsunterstützung für die zirkuläre
Wertschöpfung durch Datenökosysteme

38 J. Prior, M. Brisse, N. Govorov, R. Egel, B. Kuhlenkötter

Fehlermanagement in der Produktion: Aktuelle Gegebenheiten und Herausforderungen in der Industrie

68 R. T. Kreutzer

Warum der Einstieg in die Kreislaufwirtschaft gelingen muss: Die zehn R-Regeln der nachhaltigen Unternehmensführung

78
D. Augenstein, L. Basler
Intelligentes Ladungsträgermanagement: Klgestützte Überwachung und Reduktion von Verlusten in der Logistik

VIRTUELLE WELTEN

W. Höpken, R. Stetter, M. Pfeil, T. Bayer, B. Michelberger, M. Till, T. Schuchter, A. Lohr Digitaler Zwilling mittels semantischer Modellierung und KI: Selbstlernende Entwicklung und Simulation industrieller Produktionsanlagen

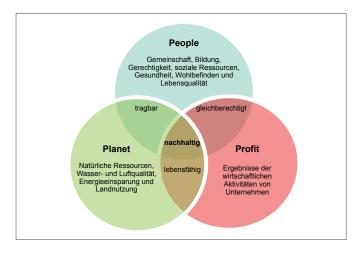
N. Gronau, M. R. Teichmann
Die Lernfabrik "InTraLab": Digital
transformierte Arbeit erfahren und lernen

T. Kugele, C. Nowak, A. Götz, A. Lawall
Funktionale Sicherheit und Cyber-Sicherheit
in der Prozessindustrie: Ein Spannungsfeld
zwischen Stabilität und Agilität

102 L. Schellhammer, L. Waag, M. Cumert, D. Uckelmann

Schulungen im Industrial Metaverse: Buzzword oder Chance?







Warum der Einstieg in die Kreislaufwirtschaft gelingen muss: Die zehn R-Regeln der nachhaltigen Unternehmensführung

Angesichts der steigenden Ressourcenknappheit hat sich die Kreislaufwirtschaft als unverzichtbares Konzept etabliert, das sich an den zehn R-Regeln orientiert. Unternehmen müssen evaluieren, welche dieser Prinzipien rasch umsetzbar sind und den größten Effekt erzielen.

Weiterlesen auf Seite 68

Intelligentes Ladungsträgermanagement: KI-gestützte Überwachung und Reduktion von Verlusten in der Logistik

Damit Ladungsträger beim Transport von Bauteilen nicht verloren gehen, werden sie traditionell mit GPS-Tracking verfolgt. Eine Alternative dazu besteht in ihrer Bündelung in Clustern, die eine gemeinsame Überwachung ermöglicht und dabei den Datenschutz nicht verletzt.

Weiterlesen auf Seite 78

ASSISTENZSYSTEME

20 K. Warnhoff

Arbeitsintegriertes Lernen in der Industrie 4.0: Eine qualitative Analyse verschiedener Assistenzsysteme in der Montage

52 B. C. K. Binder, F. Morelli

Mit Digitalen Zwillingen den Budgetierungsprozess optimieren: Dashboards und Process Mining für ein prozessorientiertes Performance Measurement

60 W. Elleuch, T. B. Tuli, M. Manns

Mehr Wettbewerbsfähigkeit für die Kleinserienproduktion: Skalierbare und flexible Rohkarosserie-Fertigungslinie mit kollaborativen mobilen Robotern

94 T. Becker, A. Neziraj

Kollaborative Drohneninspektion: Ein neuer Ansatz für die Inspektionsarbeit mit KI-Unterstützung

SERVICE

3 Editorial

8 Danksagung an unsere Reviewer 2024

10 Wissensquiz

110 Vorschau auf Industry 4.0 Science 3/2025

110 Impressum

EVENTS

6 Highlights auf der Hannover Messe

11 ERP Lounge

77 We.CONECT Events 2025

101 Maindays 2025

ENERGIZING A
SUSTAINABLE
INDUSTRY





WORLD. LEADING. INDUSTRYSHOW.

HIGHLIGHTS der HANNOVER MESSE 2025

02. April um 12:00 Uhr

ERP Anwender Lounge

Digital Transformation Lounge – Halle 17 E44

Sie haben Fragen zu aktuellen ERP-Trends und zum eigenen ERP-System und möchten diese in entspannter Lounge-Atmosphäre mit renommierten Experten im exklusiven Kreis diskutieren? Die ERP Anwender Lounge macht es möglich!



02. April um 16:30 Uhr

Factory Innovation Award

Digital Transformation Stage – Halle 17 E44

Kennen Sie die innovativsten Smart-Factory-Lösungen? Ist Ihre Fertigung up to date? Seien Sie bei der Preisverleihung der besten Anbieter und Anwender Lösungen live dabei! Auf der Digital Transformation Stage werden die besten in verschiedenen Kategorien ausgezeichnet.



Digital Business & Operations – Halle 15 A18

Der Gemeinschaftsstand "Digital Business & Operations for Manufacturing" im Bereich Digital Ecosystems informiert die Besucher umfassend zu MES, ERP, CRM und PLM/ PDM.



Digital Transformation Stage – Halle 17 E44

Die Bühne für den technologie- und branchenübergreifenden Austausch. Hier erhalten Sie Einblicke in die Bereiche Produktion und Digitalisierung, künstliche Intelligenz, Energie und Nachhaltigkeit.



Industrial Security Circus & Stage – Halle 16

Erleben Sie spannende Vorträge sowie Showcases rund um IT/OT Security. Manege frei für innovative Produkte und Dienstleistungen, die Sie im Circus live entdecken können!



5G & Industrial Wireless Arena & Stage - Halle 14 H06

Die Zukunft der industriellen Fertigung steckt in Industrie 4.0 mit der intelligenten Fabrik und dem Industrial Internet of Things (IIoT). Tägliche Events informieren Sie über brandneue Trends.



Sustainable Supply Forum – Halle 3 C71

Das Forum der Engineered Parts & Solutions deckt alle Trends der Zulieferindustrie von Metallbearbeitung bis Kreislaufwirtschaft ab und bietet tägliche Fachvorträge. Ein Höhepunkt ist der traditionelle Einkäufertag am Messe-Mittwoch.



Masterclasses – Halle 17 E44

Im Mittelpunkt steht der Workshop-Charakter, der Sie aktiv einbindet und einen intensiven Austausch mit Experten und Gleichgesinnten ermöglicht. Profitieren Sie von neuen Impulsen!



Application Park – Halle 6 D51

Die Bühne für den technologie- und branchenübergreifenden Austausch. Hier erhalten Sie Einblicke in die Bereiche Produktion und Digitalisierung, künstliche Intelligenz, Energie und Nachhaltigkeit.





HERZLICHEN DANK

Die Redaktion bedankt sich herzlich bei allen Gutachterinnen und Gutachtern, die mit ihrem kenntnisreichen Urteil an den Ausgaben des Jahres 2024 mitgewirkt haben. Wer von ihnen der Veröffentlichung ihres oder seines Namens zugestimmt hat, wird nachstehend genannt:

- Dr. Sebastian Anselmann, Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd
- Prof. Dr. Sabine Baumann, Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin (HWR)
- Prof. Dr. Andreas Besse, Westfälische Hochschule
- Dr. Claas Bierwisch, Fraunhofer IWM
- **Prof. Dr. sc. math. Roman Boutellier,** ETH Zürich
- Prof. Dr.-Ing. Lennart Brumby, Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Mannheim
- Prof. Dr. rer. pol. Wolfgang Buchholz, Fachhochschule Münster
- Prof. Dr.-Ing. habil. Catherina Burghart, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft
- Prof. Dr. Peter Dehnbostel, Technische Universität Dortmund
- Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse, Technische Universität Dortmund
- Dr. Bastien Dietemann, Fraunhofer IWM
- Dr.-Ing. Fabian Dillenhöfer, Technische Universität Dortmund
- **Prof. Dr. Michael Dowling,** Universität Regensburg
- Prof. Dr. Swetlana Franken, Hochschule Bielefeld
- **Prof. Dr. Stephan Freichel,** Technische Hochschule Köln
- Dr.-Ing. Andreas Friedel, Hochschule Offenburg
- Prof. Dr. Andreas Gadatsch, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
- Prof. Dr.-Ing. Ulrich Gengenbach, Karlsruher Institut für Technologie
- Prof. Dr.-Ing. Klaus-Uwe Gollmer, Hochschule Trier Umwelt-Campus Birkenfeld
- Dr.-Ing. Tobias Grimm, Ruhr-Universität Bochum
- **Prof. Dr.-Ing. Marcus Grum,** Universität Potsdam
- Prof. Dr.-Ing. Lisa Gunnemann, Fachhochschule Dortmund
- **Prof. Dr. Wilhelm Hasselbring,** Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- **Prof. Dr. Claudia Heß**, IU Internationale Hochschule Erfurt
- Prof. Dr.-Ing. Sven Hinrichsen, Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe
- **Prof. Dr. Günter Hofbauer,** Technische Hochschule Ingolstadt
- **Dr. Norbert Huchler,** ISF München
- **Prof. Dr. Ernst Huenges**, Helmholtz-Zentrum Potsdam

- Prof. Dr. Michael Huth, Hochschule Fulda
- **Prof. Dr. Ingmar Ickerott**, Hochschule Osnabrück
- **Prof. Dr.-Ing. Max Juraschek,** Technische Universität Braunschweig
- **Prof. Dr.-Ing. Frank Kameier,** Hochschule Düsseldorf, University of Applied Sciences
- **Prof. Dr. Uwe Kenntner,** Hochschule Furtwangen
- Prof. Dr. Florian Kerber, Hochschule Augsburg Fakultät Informatik
- **Prof. Dr. Florian Kleemann,** Hochschule München
- Prof. Dr.-Ing. Christian Köhler, Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlandes
- **Dr.-Ing. Jörn Kohlhammer,** Fraunhofer IGD
- Prof. Dr. Christian Kuhn, Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Mosbach
- **Prof. Dr.-Ing. Carsten Lanquillon**, Hochschule Heilbronn
- Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, Karlsruher Institut für Technologie
- **Prof. Torsten Lehnguth**, Duale Hochschule Sachsen
- Prof. Dr. Jan Marco Leimeister, Universität Kassel
- Prof. Dr. Olga Levina, Technische Hochschule Brandenburg
- **Prof. Dr. Bert Leyendecker,** Hochschule Koblenz
- Dr.-Ing. Kai Lindow, Fraunhofer IPK
- Prof. Dr. Claudia Loebbecke. Universität zu Köln
- **Prof. Dr. Ulf Lorenz**, Universität Siegen
- **Prof. Dr. Peter Mandl**, Hochschule München
- **Prof. Dr.-Ing. Martin Manns,** Universität Siegen
- **Prof. Dr.-Ing. Tobias Meisen,** Bergische Universität Wuppertal
- **Dr.-Ing. Mark Mennenga**, Technische Universität Braunschweig
- Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich, Technische Universität Darmstadt
- **Prof. Dr.-Ing. Andreas Mockenhaupt**, Hochschule Albstadt-Sigmaringen
- **Prof. Dr. rer. pol. Elisabeth Müller,** Universität der Bundeswehr München
- **Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller,** Universität des Saarlandes
- **Prof. Dr. Sabine Pfeiffer,** Friedrich Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- **Prof. Dr. Markus Pfuhl**, Technische Hochschule Mittelhessen
- Prof. Dr. Norbert Pohlmann, Westfälische Hochschule
- **Prof. Dr.-Ing. Thomas Preuß,** Technische Hochschule Brandenburg
- Prof. Dr.-Ing. Stephan Ramesohl, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH
- **Prof. Dr. Kai Reinhardt**, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin HTW
- **Prof. Dr.-Ing. Patrick Ruediger-Flore,** Technische Universität Kaiserslautern
- **Prof. Dr. Reinhard Rupp**, Hochschule Pforzheim
- **Prof. Dr. Falk Salewski**, Fachhochschule Münster
- **Prof. Dr.-Ing. Jürgen Sauer**, Universität Oldenburg
- Dr. Jochen Schlick, NEONEX Industry Performance GmbH
- **Dr. Hannah Schlott,** Universitätsklinikum Mannheim GmbH
- **Prof. Dr.-Ing. Matthias Schmidt**, Leibniz Universität Hannover
- **Prof. Dr. Andreas Schmietendorf,** Hochschule für Wirtschaft und Recht Berlin
- Prof. Dr.-Ing. Hon. Dr. Thorsten Schöler, Technische Hochschule Augsburg
- **Prof. Dr.-Ing. Wilfried Sihn,** Technische Universität Wien
- **Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Steglich**, Hochschule Mannheim
- Prof. Dr.-Ing. Falk Uebernickel, Hasso-Plattner-Institut
- Prof. Dr. Ir. Wil van der Aalst, RWTH Aachen
- **Prof. Dr.-Ing. Matthias Vette-Steinkamp**, Umweltcampus Birkenfeld
- **Prof. Dr.-Ing. Michael Wahl**, Hochschule Trier Umwelt-Campus Birkenfeld
- Dr. oec. Peter M. Wald, HTWK Leipzig
- Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel, Universität Kassel
- **Prof. Dr. Lars Windelband**, Karlsruher Institut für Technologie
- Prof. Dr. Herwig Winkler, Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg
- **Dr. Clemens Wolf,** Rothbaum Consulting Engineers GmbH
- Prof. Dr.-Ing. Frederik Zanger, Karlsruher Institut für Technologie



1. Was ist der Hauptunterschied zwischen dem Industrial Internet of Things (IIoT) und herkömmlichen Automatisierungssystemen?

- A) Das IIoT konzentriert sich auf die Verbindung von Geräten und die Nutzung von Echtzeitdaten zur Leistungsoptimierung, während herkömmliche Automatisierungssysteme mit vordefinierten Workflows und nur begrenzt mit Konnektivität arbeiten.
- B) Herkömmliche Automatisierungssysteme verwenden drahtlose Sensoren für eine nahtlose Integration, während das IIoT aus Sicherheitsgründen auf kabelgebundene Systeme beschränkt ist.
- C) IIoT ist ausschließlich auf neue Fabriken anwendbar, während traditionelle Automatisierungssysteme flexibler sind.
- D) Sowohl IIoT- als auch herkömmliche Automatisierungssysteme stützen sich bei der Entscheidungsfindung auf Cloud Computing, wobei es keinen eindeutigen Unterschied bei der Konnektivität gibt.

2. Was sind die Herausforderungen bei der Implementierung von Robotik in IIoT-Systemen?

- A) Die Entwicklung von Robotern, die ohne Software-Updates in IIoT-Umgebungen funktionieren können.
- B) Gewährleistung einer sicheren und zuverlässigen Kommunikation zwischen Robotern, Sensoren und zentralen Systemen in Echtzeit.
- C) Vollständige Eliminierung menschlicher Eingriffe bei vollautonomen Robotersystemen.
- D) Entwicklung von IIoT-kompatiblen Robotern, die ausschließlich mit erneuerbaren Energiequellen betrieben werden.

3. Wie tragen autonome Roboter zur IIoT-fähigen Fertigung bei?

- A) Roboter in IIoT-Umgebungen dienen lediglich als Datensammler, ohne die Produktionsprozesse direkt zu beeinflussen.
- B) IIoT-fähige Roboter senken die Betriebskosten, indem sie alle menschlichen Arbeitskräfte in der Fabrikhalle ersetzen.

- C) Autonome Roboter verbessern IIoT-Systeme, indem sie Echtzeitdaten generieren, diese lokal analysieren und autonome Entscheidungen zur Optimierung der Produktion treffen.
- D) Roboter in IIoT-Systemen funktionieren unabhängig und sind nicht auf Daten von anderen angeschlossenen Geräten angewiesen.

4. Welche Faktoren sind entscheidend für die Gewährleistung der Interoperabilität in einer intelligenten, IloT-fähigen Fabrik?

- A) Abhängigkeit von einem einzigen Hersteller für alle IIoT-Komponenten und Robotik.
- B) Entwicklung proprietärer Software zur Gewährleistung der Sicherheit, auch wenn dadurch die Kompatibilität eingeschränkt wird.
- C) Verzicht auf Cloud Computing zugunsten isolierter lokaler Systeme für einen besseren Schutz der Daten.
- Standardisierte Kommunikationsprotokolle, nahtlose Datenintegration und systemübergreifende Gerätekompatibilität.

5. Wie verbessern Robotik und IIoT die vorausschauende Wartung in der Fertigung?

- A) Roboter, die mit IIoT-fähigen Sensoren ausgestattet sind, sammeln Echtzeitdaten und ermöglichen fortschrittliche Analysen, um Muster zu erkennen, Ausfälle vorherzusagen und Wartungsarbeiten proaktiv zu planen.
- B) Die Robotik in IIoT-Systemen wird in erster Linie für die Reparatur von Geräten nach dem Auftreten von Fehlern eingesetzt, wobei die Vorhersagefähigkeiten begrenzt sind.
- C) IIoT mit Robotik macht die Wartung komplett überflüssig, da sichergestellt wird, dass die Maschinen niemals verfallen.
- D) Die vorausschauende Wartung mit IIoT konzentriert sich ausschließlich auf die Software-Optimierung und bezieht die Robotik nicht mit ein.





Treffen Sie in entspannter Lounge-Atmosphäre ausgewiesene Experten, die im kleinen Kreis Ihre Fragen rund um ERP-Systeme beantworten.

- Wo kann ich sofort mit KI meine Abläufe verbessern?
- Ist mein ERP-System zu alt, brauche ich ein Upgrade?
- Muss ich meinem Anbieter in die Cloud folgen?
- Wie sollte meine IT-Landschaft in Zukunft aussehen?
- Kann mein ERP-Anbieter noch mit den neuen Technologien mithalten?
- Welches sind die besten ERP-Systeme für meine Branche?
- Soll ich auch die nötigen Umsysteme von meinem Anbieter kaufen oder lieber frei am Markt?
- Wie kann ich mein teures kompliziertes ERP-System durch eine bessere Alternative ablösen?
- Brauche ich für die Digitale Transformation ein neues ERP-System?

Zielgruppe: ERP-Anwender auf C-Level

Im Anschluss: informeller Austausch, Snacks und Drinks



powered by

GITO EVENTS







Datenqualität in der Entwicklung kreislauffähiger Produkte

Wie nachhaltig ein Produkt tatsächlich wird, entscheidet sich bereits in der Entwicklung. Doch damit die Kreislaufwirtschaft gelingen kann, muss die Datenqualität gezielt bewertet und gemanagt werden. Denn ohne verlässliche Daten bleiben viele Annahmen spekulativ. Zwar steigt ihre Qualität entlang des Produktlebenszyklus, doch erst Datenökosysteme wie Gaia-X und Catena-X ermöglichen ihren sicheren Austausch und damit ihre Validität.

Schlüsselwörter

Datenqualität, Produktentwicklung, Kreislaufwirtschaft, Ökobilanzierung, Datenraum, Robotik, Entscheidungsunterstützung, Decision Support, Datenökosystem



Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler leitet den Lehrstuhl für Produktentstehung im Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn.



Sven Rarbach, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung im Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn.



Dr.-Ing. Jens Pottebaum ist Oberingenieur am Lehrstuhl für Produktentstehung im Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn.

Kontakt

sven.rarbach@hni.upb.de www.hni.upb.de

DOI: 10.30844/I4SD.25.2.12



Datenqualität in der Entwicklung kreislauffähiger Produkte

Entscheidungsunterstützung für die zirkuläre Wertschöpfung durch Datenökosysteme

Iris Gräßler, Sven Rarbach und Jens Pottebaum, Universität Paderborn

Im Entwicklungsprozess werden Entscheidungen mit Wirkung auf die Nachhaltigkeit von Produkten getroffen. Mit zunehmendem Entwicklungsfortschritt können auch Aussagen zur Nachhaltigkeit konkretisiert werden. Während zunächst nur Abschätzungen anhand von verwandten Produkten und Prozessen möglich sind, können später etwa Betriebs- und Maschinendaten genutzt werden. Werden Metriken für Kennzahlen verwendet, sollte die Qualität der verwendeten Daten nachvollziehbar sein. Dazu werden relevante Datenqualitätskriterien und -indikatoren ausgewählt und in Bezug gesetzt. Die Verfügbarkeit von Daten kann gesteigert werden, indem die Produktentwicklung auf Partner in Datenökosystemen zurückgreift. Die Grundlage bilden Datenräume wie Gaia-X, Catena-X und Manufacturing-X.

Die Festlegung der Produkteigenschaften und der damit verbundenen Umweltauswirkungen erfolgt in den frühen Phasen des Produktlebenslaufs. Im Entwicklungsprozess werden Entscheidungen mit Wirkung auf die Nachhaltigkeit von Produkten getroffen. Grundlagen liefern Methoden, Modelle und Hilfsmittel der Produktentwicklung [1, 2]. Diese werden unternehmensspezifisch in Prozessen abgebildet, um beispielsweise branchenbezogene Besonderheiten oder Abhängigkeiten zu Kundenprozessen effizient umzusetzen. Beispiele sind in den Produktentwicklungsprozessen von Automobilherstellern [3] oder Zulieferern wie Bosch [4] dokumentiert.

Dabei müssen insbesondere Wechselwirkungen in den Wertschöpfungsnetzwerken sowie veränderliche regulatorische und politische Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Einen Eindruck vermittelt beispielsweise CircuLaw mit einer Übersicht der Regularien im Kontext des Green Deal der EU [5]. Die Produktplanung und-entwicklung muss dabei das gesamte Produktleben vorausschauend einbeziehen. Eine besondere Herausforderung ergibt sich in der Entwicklung zirkulärer Produkte: Zirkularitätsstrategien müssen im Sinne der Kreislaufwirt-



Die ORCID-Identifizierungsnummern der Autoren dieses Beitrags sind einsehbar unter https://doi.org/10.30844/I4SD.25.2.12

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die die Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird. schaft im Geschäftsmodell verankert werden [6].

Dadurch ergeben sich neben der Berücksichtigung von Produktion und Betrieb eines Produkts enorme Zusatzbedarfe in Bezug auf Daten: Ein solches Geschäftsmodell kann sich nur dann durchsetzen, wenn die Vorteile nachweisbar sind, die sich in den Schritten der Außerbetriebnahme

und Rückführung ergeben. Das generische Produktlebenszyklusmodell sieht deshalb einen hohen Bedarf an Informationszirkularität [6]. Zirkularität erweitert Abhängigkeiten von Zulieferern und Energielieferanten beispielsweise um die Logistik zur Sammlung und Inspektion sowie die Aufarbeitung von gebrauchten Materialien [7]. Dadurch erlangt der unternehmensübergreifende Datenaustausch eine große Bedeutung. Die Grundlage bilden Datenräume wie Gaia-X, Catena-X und Manufacturing-X [8].

Datenökosysteme ermöglichen Nachhaltigkeitsbewertung

Daten aus dem gesamten Produktlebenslauf, einschließlich interner Entwicklungsdaten und Daten der Wertschöpfungspartner, werden mittels verschiedener Nachhaltigkeitsmetriken zusammengeführt. Dazu werden Daten mit sehr unterschiedlicher Datenqualität verwendet: In sehr frühen Phasen ermöglichen Katalogdaten von kommerziellen Anbietern zwar erste Abschätzungen. Diese leiden jedoch unter vagen Annahmen und Lücken in den Datenbanken. Die Datenqualität ist entsprechend zu Beginn des Produktlebens gering und die Unsicherheit hoch (Bild 1, vgl. [9]). In der Entwicklung können initiale Annahmen beispielsweise durch Daten aus der Produktion jeweils aktuell laufender Produkte sowie im späteren Verlauf durch Betriebsdaten ersetzt werden. So wird die tatsächliche Datenqualität sukzessive gesteigert [10] (gestrichelte Pfade in Bild 1).

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit sollte die Qualität der erhobenen Daten explizit und nachvollziehbar be-



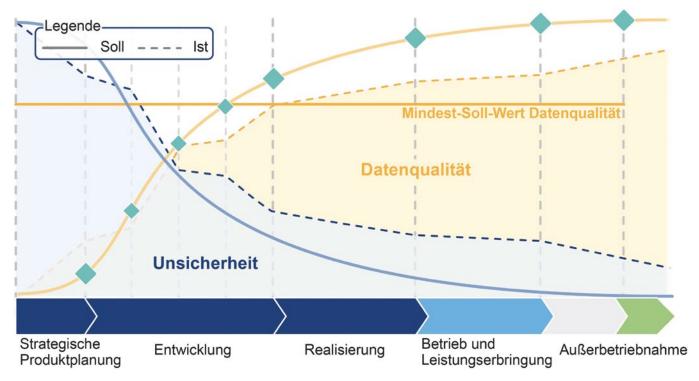


Bild 1: Datenqualität in der Entwicklung kreislauffähiger Produkte aufbauend auf [6, 11, 12].

rücksichtigt werden, um u. a. Nachhaltigkeitsmetriken, entsprechende Indikatoren und sonstige Metriken mit für die jeweiligen Freigabeprozesse ausreichender Aussagekraft implementieren zu können. Eine umfassende Bewertung der Datenqualität erfordert die Identifikation relevanter Datenqualitätskriterien und -indikatoren. Zielsetzung ist in jeder Entwicklungsiteration bzw. im Lebensfortschritt, die jeweils erforderliche Datenqualität im Produkt- und Prozessmodell zu gewährleisten.

Datenqualität steigt entlang des Produktlebenslaufs

Die Aussagekraft der Nachhaltigkeitsbewertung wird durch die Qualität der verwendeten Daten bestimmt. Zur Bewertung der Datenqualität der Prozesse und aller Datensätze werden Datenqualitätskriterien angewendet [13]. Im Kontext der entwicklungsbegleitenden Bewertung der Umweltwirkungen von Produkten sind dynamische Ökobilanzen erforderlich. Diese Bilanzen bieten die Möglichkeit, zeitliche und prozessuale Veränderungen während des Produktlebenslaufs abzubilden [14]. Für eine effektive Bewertung müssen spezifische Datenqualitätskriterien mit entsprechenden Ausprägungen entlang des gesamten Lebenslaufs definiert werden. Die notwendigen Ausprägungen von Datenqualitätskriterien für die Nachhaltigkeitsbewertung sind Gegenstand verschiedener Übersichtsarbeiten.

Als Grundlage für die Definition und Anwendung dieser Kriterien dient insbesondere die ISO 14000er Normenreihe. Innerhalb dieser Normenreihe existieren unterschiedliche Ausprägungen und Detaillierungsgrade [15]. Aufgrund der industriellen Relevanz der ISO 14040/14044 werden meist die dort genannten Kriterien zeitlicher Erfassungsgrad, räumlicher Erfassungsgrad, technologischer Erfassungsgrad, Genauigkeit, Vollständigkeit, Repräsentativität, Konsistenz, Vergleichsgenauigkeit, Unsicherheit und Datenquelle verwendet [16, 17].

Obwohl diese Kriterien in der Norm beschrieben sind, fehlt eine konkrete Ausgestaltung für ihre praktische Anwendung. Durch die Bewertung dieser Kriterien in spezifischen Ausprägungen lassen sich jedoch übertragbare Aussagen zur Datenqualität treffen, Verbesserungspotenziale identifizieren und Unsicherheiten analysieren [18].

Ein etabliertes Werkzeug zur Bewertung der Datenqualität ist die Pedigree-Matrix. In der Matrix erfolgt die Definition einer Auswahl von Datenqualitätskriterien sowie dazugehörigen semi-quantitativen Bewertungsansätzen. Hierbei wird eine Teilmenge der in der ISO 14044 präsentierten Datenqualitätskriterien aufgegriffen. Die in der Matrix charakterisierten Kriterien erlauben jedoch keine qualitative Bewertung aller Bereiche der Datenqualität, sondern lediglich die Auswahl semi-quantitativer Kriterien [19]. Verschiedene Ansätze erweitern das Konzept der Matrix, indem sie Flüsse und Prozesse integrieren [19],



	Index	Datenqualitäts- kriterien	Definition	Quelle
		Repräsentativität		
	Α	Technologisch	Grad der Repräsentation der Datenquellen und dem tatsächlichen Technologieumfang	[10]
inhärent	В	Geografisch	Grad der Repräsentation der Beispielregion im Verhältnis zu der Modellregion	[10]
inhä	С	Zeitbezogen	Grad der Repräsentation zwischen Referenzzeit der Dokumentation und der tatsächlichen Zeit	[10]
	D	Genauigkeit	Variabilität des Datenwerts für die aufgenommenen Werte	[10]
	E	Verlässlichkeit	Grad der Reproduzierbarkeit und Vertrauenswürdigkeit der Datenquelle	[20]
System	F	Konsistenz	Übereinstimmung von Input- und Output- Flüssen und Metadaten	[20]
	G	Vollständigkeit	Grad der Abdeckung des betrachteten Systems durch die einbezogenen Flüsse in Bezug auf die Bewertbarkeit aller relevanten Umweltwirkungen	[19]
	Н	Überprüfung	Grad der Überprüfung der Prozesse	[19]

Bild 2: Datenqualitätskriterien für die Nachhaltigkeitsbewertung entlang des Lebenslaufs.

qualitative Aussagen einbeziehen [20] oder die Dokumentation und Verfahren der Erhebung berücksichtigen [10]. Diese Erweiterungen dienen dazu, die Aussagekraft der Matrix zu steigern und eine flexiblere Anwendung entlang des gesamten Produktlebenslaufs zu ermöglichen.

Auf Grundlage der etablierten Standards und der unterschiedlichen Ansätze ergibt sich ein Satz von Datenqualitätskriterien für die Nachhaltigkeitsbewertung im gesamten Produktlebenslauf (**Bild 2**). Diese Kriterien lassen sich in inhärente und systembezogene Kriterien

unterteilen [21]. Die inhärenten Kriterien bewerten die Qualität der Daten anhand ihrer Domäne, der Beziehungen zwischen den Werten und den Metadaten selbst. Systembezogene Kriterien beziehen sich auf den gesamten Datensatz und ermöglichen eine übergreifende Analyse.

Diese Unterscheidung erlaubt eine umfassendere Bewertung der Datenqualität und bietet die Grundlage für die Identifikation von Verbesserungspotenzialen und Unsicherheiten.

Bild 3: Exemplarische Ausprägungen der identifizierten Kriterien in Anlehnung an [10, 18].

Indikator / Wert	4	3	2	1	0
C) Zeitbezogene Repräsentativität (Indikator: Unterschied zum Studienjahr)	Weniger als drei Jahre Unterschied zum Studienjahr	Weniger als sechs Jahre Unterschied zum Studienjahr	Weniger als zehn Jahre Unterschied zum Studienjahr	Weniger als 15 Jahre Unterschied zum Studienjahr	Alter der Daten unbekannt oder mehr als 15 Jahre
G) Vollständigkeit (Indikator: Anteil bewerteter und quantifizierte Flüsse)	> 80 % der de- terminierten Flüsse wurden bewertet und quantifiziert	60-79 % der determinierten Flüsse wurden bewertet und quantifiziert	40-59 % der determinierten Flüsse wurden bewertet und quantifiziert	< 40 % der de- terminierten Flüsse wurden bewertet und quantifiziert	Vollständigkeit der Prozesse nicht bewertet



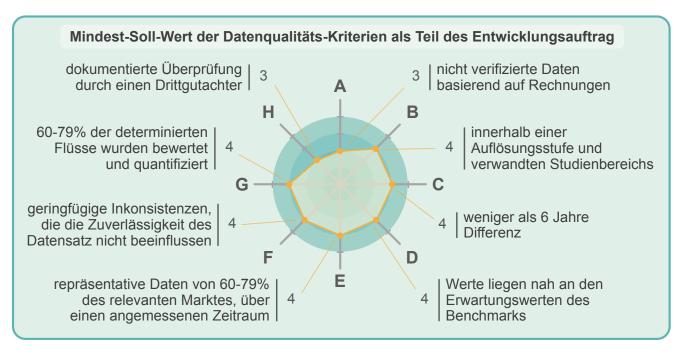


Bild 4: Mindest-Soll-Werte der Datenqualitäts-Kriterien als Teil des Entwicklungsauftrags.

Datenqualität in der Entwicklung bewusst handhaben

Umweltauswirkungen müssen während der Gesamtentwicklung in jeder Phase des Produktlebenslaufs bewertbar sein. Dazu ist eine Bewertung der Umweltauswirkung nötig, die mit dem Entwicklungsstand des Produkts nachvollziehbar gesteigert wird. Dies ermöglicht es, an zentralen Entscheidungspunkten im Entwicklungsprozess das Produkt hinsichtlich der geforderten Anforderungen auszulegen. Dabei sollte die Qualität der erhobenen Daten explizit und nachvollziehbar berücksichtigt werden, um Nachhaltigkeitsmetriken und Indikatoren mit ausreichend Aussagekraft für die jeweiligen Freigabeprozesse zu implementieren. Semi-quantitative Ausprägungen der Datenqualitätskriterien (Bild 2) bieten eine praktikable Grundlage für die Handhabbarkeit dieser Kriterien. Die Ausprägungen ermöglichen eine Charakterisierung der Datenqualität zu einem spezifischen Zeitpunkt und erleichtern so eine Überprüfung der Datenqualität. Basierend auf den Ausprägungen der Pedigree-Matrix wird eine Auswahl von semi-quantitativen Ausprägungen exemplarisch in Bild 3 dargestellt [18]. Dabei entspricht die höchstmögliche Ausprägung eines Kriteriums einem Wert von "4", der für eine optimale Datenqualität steht. In dieser Umsetzung des Modells spiegeln niedrigere Werte bis hin zur "0" im Gegensatz zur ursprünglichen Pedigree-Matrix eine geringere Qualität wider.

Indikatoren mit relativer Bewertung – wie die Vollständigkeit – erfordern die Definition des entsprechenden Bezugssystems. Für die Produktentwicklung insgesamt muss dieses mit dem Mindest-Soll-Wert der Datenqualität korrelieren (**Bild 1**). In frühen Entwicklungsphasen können Katalogdaten von Anbietern wie Sphera erste Abschätzungen zu übergeordneten Prozessen liefern. Diese werden im Verlauf der Entwicklung durch Daten aus der Produktion aktuell laufender Produkte verfeinert. Die Machbarkeit setzt entsprechend die Randbedingungen für die Handhabung der Datenqualität: Einerseits die Erhebung von Daten, aber auch die Definition von sukzessive steigenden Soll-Werten entlang des Produktlebens und entlang von Iterationen innerhalb der Produktentwicklung. Die konzeptionelle Umsetzung des Modells wird am Beispiel der minimalen Zielwerte der Datenqualitätskriterien für die Produktentwicklung veranschaulicht.

In **Bild 4** werden die minimalen Zielwerte der Kriterien in einem Netzdiagramm visualisiert. Die Vorgabe von Soll-Werten wird unternehmensspezifisch, aber produktübergreifend empfohlen: Wenn im Unternehmen ein Produktentstehungssystem bzw. ein Produktentwicklungsprozess etabliert ist, kann für darin enthaltene Entwicklungsiterationen jeweils ein Datenqualitäts-Sollwert definiert werden. So werden Vorgaben aus der großen Vielfalt an Regularien und Standards im Unternehmen handhabbar, und gleichzeitig interne Standards aus der strategischen Planung systematisch in Entwicklungsprojekten umgesetzt. Durch die schrittweise Steigerung der Sollwerte wird eine kontinuierliche Verbesserung der Datenqualität entlang des Produktlebenslaufs erreicht.

Die Sollwerte als Teil des Entwicklungsauftrags stellen sicher, dass die Analysen ausreichend genau, konsistent



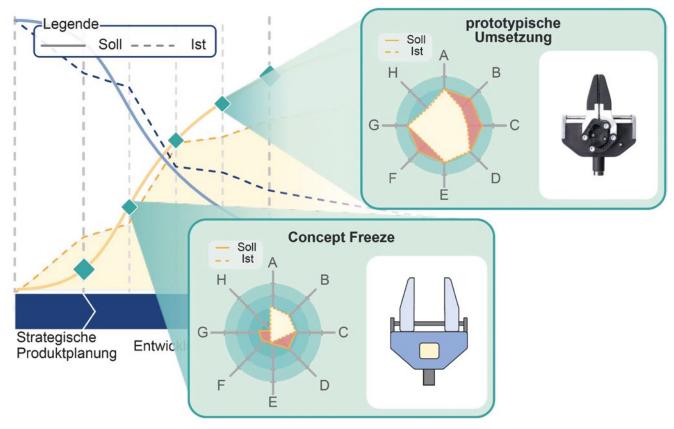


Bild 5: Exemplarische Anwendung des Modells am Beispiel eines Robotik-Greifers.

und repräsentativ sind. Der Fokus liegt darauf, bereits in der Entwicklungsphase eine fundierte Basis für Nachhaltigkeitsbewertungen zu schaffen, auch wenn Daten noch unvollständig, nicht verifiziert oder approximativ sind. Im Produktlebenszyklus-Management sollte die Datenqualität während der Nutzung und Produktion des Produkts weiter gesteigert werden. Für die Repräsentativität müssen technologiebezogene Aussagen dokumentiert und durch Berechnungen gestützt sein (Kriterium A → Wert 3). Aufgrund der Abhängigkeit von bereits erhobenen Daten muss die geografische Repräsentation innerhalb einer Auflösungsstufe bleiben und sich auf einen verwandten Studienbereich beziehen (B \rightarrow 4). Die zeitliche Aktualität der Daten sollte eine Differenz von weniger als sechs Jahren aufweisen (C → 4). Die Genauigkeit der Daten sollte mit zuvor erstellten Benchmarks übereinstimmen (D → 4). Zudem muss die Datensammlungsmethode sicherstellen, dass mindestens 60-79 % des relevanten Marktes innerhalb eines angemessenen Zeitraums bewertet und repräsentiert werden (E \rightarrow 4). Der Datensatz muss belastbar sein, was bedeutet, dass nur geringfügige Inkonsistenzen auftreten dürfen, die die Zuverlässigkeit der identifizierten Daten nicht beeinträchtigen (F \rightarrow 4). Mindestens 60-79 % der relevanten Flüsse sollten vollständig bewertet und quantifiziert sein (G \rightarrow 4). Durch die Freigabe des Prozesses an weitere Abteilungen und Phasen ist eine Überprüfung der Daten durch mindestens

einen Drittgutachter erforderlich (H \rightarrow 3). Die relativen Annahmen, beispielsweise in den Datensammlungsmethoden, werden durch die Spezifizierung des Ziels und Umfangs der Ökobilanzierung bestimmt. Durch die Vorgabe von Datenqualitätskriterien mit Empfehlungen für Indikatoren und anzustrebende Ausprägungen werden Entwickler bei einer nachvollziehbaren und vergleichbaren Bewertung der Datenqualität unterstützt.

Anwendung des Modells am Beispiel eines Robotik-Greifers

Die Anwendung des entwickelten Modells erfolgt anhand eines Fallbeispiels eines Robotik-Greifers. Das Produktionssystem ist in diesem Fallbeispiel mit dem "Smart Automation Labor" gegeben, einer Forschungsumgebung für Cyber-Physische Produktionssysteme (CPS) [22]. In **Bild 5** werden zwei konkrete Entscheidungspunkte im Entwicklungsprozess sowie die Ausprägungen der Datenqualitätskriterien visualisiert. Zu diesem Zweck erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Datenqualität in den Phasen der konzeptionellen Festlegung der Produkteigenschaften im Concept Freeze sowie der prototypischen Umsetzung vor einer finalen Entwicklungsiteration. Bis zum Concept Freeze stehen einerseits nur Konzeptskizzen,



andererseits nur wenige Daten für eine Ökobilanz zur Verfügung. Die Festlegung des angestrebten Wirkprinzips hat aber bereits einen erheblichen Einfluss auf die späteren Umweltauswirkungen und ermöglicht eine erste nützliche Bilanzierung. In dem betrachteten Anwendungsbeispiel lassen sich auf Grundlage existierender Dokumentationen einzelne Aspekte spezifisch repräsentieren. Gleichzeitig können bereits erstellte Prozessmodelle von Altprodukten teilweise auf den neuen Greifer übertragen werden. Allerdings beeinträchtigen die Inkonsistenz und die unterschiedlichen Detaillierungsebenen der Daten die Qualität des Gesamtdatensatzes. Diese Aspekte betreffen insbesondere die Kriterien Vollständigkeit und Konsistenz (Bild 3). In Bild 5 wird visualisiert, wie die definierten Kriterien bei den Entscheidungspunkten Anwendung finden. Für die "prototypische Umsetzung" werden die Soll-Werte im Vergleich zum Concept Freeze in allen Kriterien an den Mindest-Soll-Wert für die gesamte Entwicklung (Bild 4) angenähert. Die Laborumgebung bietet den Vorteil, dass umfangreiche Daten aus der Fertigungsinfrastruktur entnommen werden können.

Datenqualität befähigt fundierte Entscheidungen

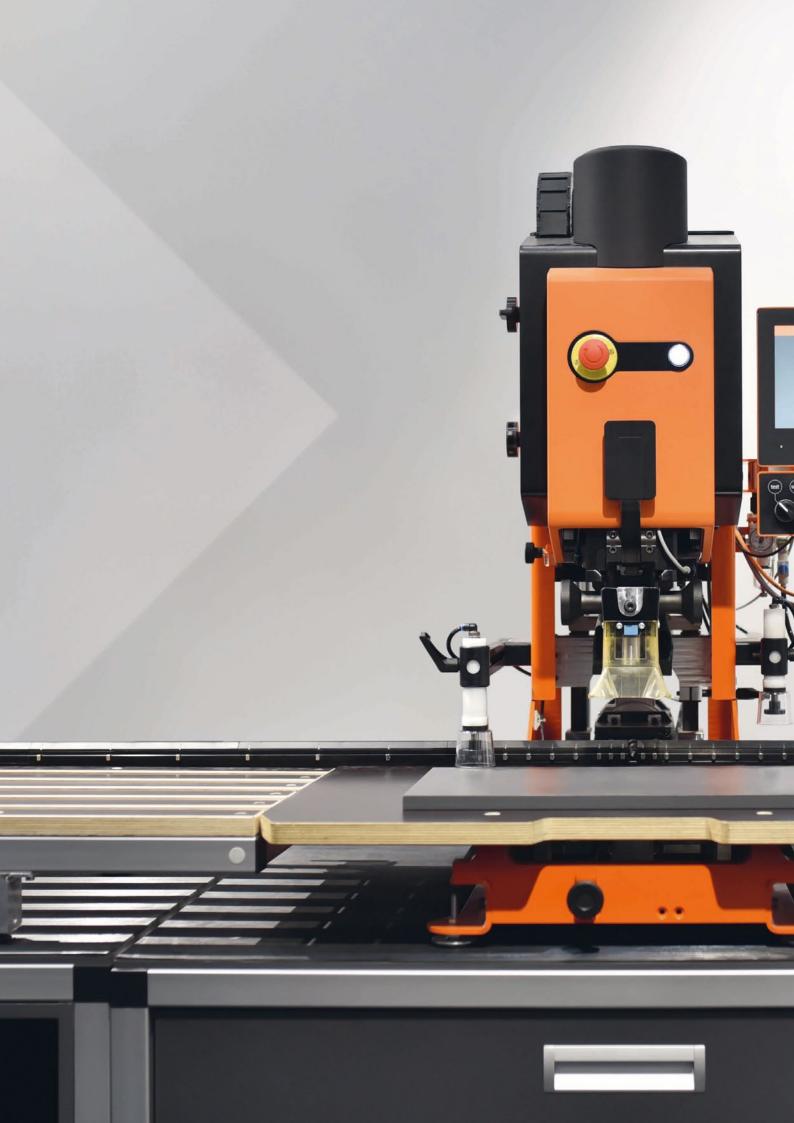
Das entwickelte Modell bietet einen systematischen Ansatz zur Bewertung und gezielten Verbesserung der Datenqualität in der nachhaltigkeitsgerechten Produktentwicklung. Durch die Vorgabe von Datenqualitätskriterien - unter anderem Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit und Aktualität – mit Empfehlung von Indikatoren und anzustrebenden Ausprägungen wird die Entwicklung bei einer nachvollziehbaren und vergleichbaren Bewertung unterstützt. Die Qualität der erhobenen Daten wird explizit und nachvollziehbar berücksichtigt, um u. a. Nachhaltigkeitsmetriken an den jeweiligen Entscheidungspunkten des Produktentwicklungsprozesses mit ausreichender Aussagekraft implementieren zu können. Die Spezifikation konkreter Entscheidungspunkte kann durch die Ausrichtung auf konkrete Nachhaltigkeitsmetriken, Methoden und Algorithmen sowie auf Meilensteine in unternehmensspezifischen Entwicklungsprozessen erweitert werden.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts "Decide4ECO", das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Kennzeichen 13MX002G gefördert wird.

Literatur

- [1] Gräßler, I.; Oleff, C.: Systems Engineering. Verstehen und industriell umsetzen. Berlin Heidelberg 2022.
- [2] VDI/VDE 2206:2021. VDI 2206 Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme.
- [3] Gräßler, I.; Thiele, H.; Grewe, B.; Hieb, M.: Responsibility Assignment in Systems Engineering. In: Proceedings of the Design Society 2 (2022), S. 1875–1884.

- [4] Gräßler, I.: Kundenindividuelle Massenproduktion. Entwicklung, Vorbereitung der Herstellung, Veränderungsmanagement. Berlin Heidelberg 2004.
- [5] EU-Gesetzgebung und -Vorschriften für eine Kreislaufwirtschaft, CircuLaw, 2024
- [6] Gräßler, I.; Pottebaum, J.: Generic Product Lifecycle Model: A Holistic and Adaptable Approach for Multi-Disciplinary Product-Service Systems. In: Applied Sciences 11 (2021) 10, S. 4516.
- [7] Gräßler, I.; Hesse, P.: Approach to Sustainability-Based Assessment of Solution Alternatives in Early Stages of Product Engineering. Proceedings of the Design Society. 17th International Design Conference. Design Conference, Bd. 17. Cambridge, UK 2022, S. 1001–1010.
- [8] Graessler, I.; Pottebaum, J.; Holland, M.; Wiechel, D.; Dickopf, T.; Stjepandić, J.: Leveraging Data Ecosystems in Model-Based Systems Engineering for Ecological, Circular Added Value. In: Cooper, A.; Trigos, F.; Stjepandić, J.; Curran, R.; Lazar, I. (Hrsg): Engineering For Social Change. Advances in Transdisciplinary Engineering. IOS Press 2024, S. 175–184.
- [9] Pottebaum, J.; Gräßler, I.: Informationsqualität in der Produktentwicklung: Modellbasiertes Systems Engineering mit expliziter Berücksichtigung von Unsicherheit. In: Konstruktion 2020 (2020) 11-20, S. 76–83.
- [10] Wolf, M.; Chomkhamsri, K.; Brandao, M.; Pant, R.; Ardente, F.; Pennington, D.; Manfredi, S.; De Camillis, C.; Goralczyk, M.: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook General guide for Life Cycle Assessment Detailed guidance. EUR 24708 EN (2010).
- [11] Villares, M.; Işıldar, A.; van der Giesen, C.; Guinée, J.: Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on an emerging technology for metal recovery from e-waste. In: The International Journal of Life Cycle Assessment 22 (2017) 10, S. 1618–1633.
- [12] Fernandes, G.; Eduardo Teixeira Brandão, L.: Managing uncertainty in product innovaion using marketing strategies. Journal of Information Systems and Technology Management 13 (2016) 2, S. 219–240.
- [13] Weidema, B. P.: Multi-user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data (1998).
- [14] Miller, S. A.; Keoleian, G. A.: Framework for analyzing transformative technologies in life cycle assessment. In: Environmental science & technology 49 (2015) 5, S. 3067–3075.
- [15] Pålsson, AC.; Flemström, F.: Gap analysis of the documents in the ISO 14000-series with regard to quality management of environmental data and information. Chalmers University of Technology. 2004.
- [16] DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement Ökobilanz Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- [17] DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement Ökobilanz Anforderungen und Anleitungen.
- [18] Weideman, B. P.; Wesnaes, M. S.: Data quality management for life cycle inventories an exmaple of using data quality indicators (1996).
- [19] Edelen, A.: Guidance on Data Quality Assessment for Life Cycle Inventory Data.
- [20] Ciroth, A.; Foster, C.; Hildenbrand, J.; Zamagni, A.: Life cycle inventory dataset review criteria—a new proposal. In: International Journal of Life Cycle Assessment 25 (2020) 3, S. 483–494.
- [21] ISO-IEC 25024-2015.
- [22] Grässler, I.; Pottebaum, J.; Grewe, B.: Forschen für die Zukunft der Produktentstehung. Innovation erleben und validieren. In: Konstruktion (2024) 76, S. 60–61.





Arbeitsintegriertes Lernen in der Industrie 4.0

Weiterentwicklungen im Kontext der Industrie 4.0 veranlassen viele Betriebe zu umfangreichen Maßnahmen. Daraus resultieren neue, vielfältige Anforderungen an die Beschäftigten. Wie lässt sich Technik bedarfsgerecht gestalten? Und warum sollten die Beschäftigten in das Design lernförderlicher Technik eingebunden werden? Antworten liefert eine qualitative Studie aus der Metall- und Elektroindustrie am Beispiel dreier kognitionsunterstützender Montageassistenzsysteme.

Schlüsselwörter

Digitale Transformation, Industrie 4.0, Assistenzsysteme, arbeitsintegriertes Lernen, Arbeitssoziologie, Digitalisierung, Technikgestaltung, Montage, Montageassistenz



Dr. Kathleen Warnhoff ist Geschäftsführerin im Kompetenzverbund lernen:digital an der Universität Potsdam und hat zuvor als wissenschaftliche Mitarbeiterin arbeitsbezogene Bildungsprozesse in neuen Technologieumgebungen erforscht.

Kontakt

kathleen.warnhoff@uni-potsdam.de cms.wzb.eu/en

DOI: 10.30844/I4SD.25.2.20



Arbeitsintegriertes Lernen in der Industrie 4.0

Eine qualitative Analyse verschiedener Assistenzsysteme in der Montage

Kathleen Warnhoff, Universität Potsdam

Mit Industrie 4.0 stehen viele Industriebetriebe erneut umfassenden Transformationsdynamiken gegenüber. In Digitalisierungsprojekten greifen die Werks- bzw. Betriebsleitungen neuere technische Entwicklungen wie etwa kognitionsunterstützende Assistenzsysteme auf. Mit Blick auf die industrielle Montage in der Metall- und Elektroindustrie führt dies zu veränderten Arbeitsprozessen, bei denen oft noch unklar ist, inwieweit aus Beschäftigtensicht arbeitsintegriertes Lernen stattfindet. Gegenstand dieses Beitrages ist eine qualitative Analyse, mit der die Sicht von Beschäftigten auf die Chancen und Risiken von drei kognitionsunterstützenden Assistenzsystemen nachgezeichnet wird. Das Ergebnis: nicht alle Beschäftigten in der Montage scheinen gleichermaßen von den neuen Entwicklungen zu profitieren.

Mit der voranschreitenden Entwicklung von Assistenzsystemen (AS) erkennen Unternehmen zunehmend neue Potenziale für die Rationalisierung. Informationen in Echtzeit sollen etwa bestehende Produktionsprozesse optimieren, Personaleinsatzplanungen vereinfachen und Einarbeitungszeiten verkürzen [1, 2, 3]. Gleichzeitig sollen sich mit Assistenzsystemen Potenziale für eine Humanisierung der Arbeit auf der physiologischen und auf der kognitiven Ebene eröffnen, die dem Erhalt und der Erweiterung von Fähigkeiten dienen bzw. fehlende Fähigkeiten kompensieren [1-7].

In der Debatte über die sozialen Folgen von Industrie 4.0 bilden sich im Hinblick auf kognitive Anforderungen in Arbeitsprozessen zwei konträre Szenarien heraus: Mit der Einführung neuer Technologien am Arbeitsplatz sind entweder steigende Anforderungen an die Beschäftigten v. a. in der Facharbeit erwartbar oder sinkende Anforderungen an die Beschäftigten v. a. im Bereich der Einfacharbeit [4-7]. Vor dem Hintergrund der skizzierten Ausgangslage nimmt dieser Beitrag kognitionsunterstützende Assistenzsysteme analytisch in den Blick und geht der folgenden Frage nach: Inwieweit tragen kognitionsunterstützende AS aus Beschäftigtensicht zum arbeitsintegrierten Lernen bei? Die rekonstruierten



Die ORCID-Identifizierungsnummern der Autoren dieses Beitrags sind einsehbar unter https://doi.org/10.30844/I4SD.25.2.20

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die die Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird. Sichtweisen auf implementierte AS geben Einblicke in die Chancen und Risiken.

Konzeptionelle Herangehensweise

Gegenstand der Studie ist die empirische Beschreibung und kritische Reflexion des arbeitsintegrierten Lernens mit kognitions-

unterstützenden Assistenzsystemen. Verortet in der Arbeitssoziologie, bildet das grundlegende Verständnis von Arbeit den Ausgangspunkt: Arbeit als "Grundlage für die zentrale Entwicklung individueller Fähigkeiten des Menschen" [15] beruht auf Handlungen, die sich wiederum theoretisch unterscheiden in: instrumentell-gegenstandsbezogenes und planmäßiges-rationales Handeln sowie erfahrungsgeleitet-subjektivierendes Handeln [15, 16]. Diese Unterscheidung verdeutlicht das abgebildete Modell.

Dieses Modell stützt sich auf zahlreiche empirische Studien, die seit den 1950er Jahren zeigen, dass gerade in der Industrie Arbeitsprozesse nicht vollständig beherrschbar sind und neben rationalen Handlungen implizites Erfahrungswissen erforderlich ist. Lernen als Erwerb expliziter und impliziter Wissensbestände wird damit zum integralen Bestandteil der Arbeit mit Begriffen wie "erfahrungsgeleitetes Lernen" [15, 16] oder "arbeitsintegriertes Lernen". [20]

Arbeitsintergiertes Lernen, das wiederum durch formale und informelle Mechanismen in Betrieben strukturiert ist, findet an Arbeitsplätzen und in der Auseinandersetzung mit Arbeitsmitteln statt. Lerngegenstand können somit technische Artefakte in Form von Werkzeugen und Maschinen sein. In Industriebetrieben sind in der Praxis zwar vielfältig, aber mit Blick auf Industrie 4.0 nehmen kognitionsunterstützende Assistenzsysteme eine Schlüsselrolle in Produktionsbetrieben ein. Sie lassen sich einteilen in: (a) vorstrukturierte, (b) adaptive und (c) tutorielle AS [2].

Ausgehend von dieser Einteilung sind unterschiedliche Folgen auf die Anforderungen zu erwarten. Ob Assistenzsysteme zur Entwicklung des menschlichen Arbeitsvermögens [16, 17, 28] oder zum selbstbestimmten Arbeits-



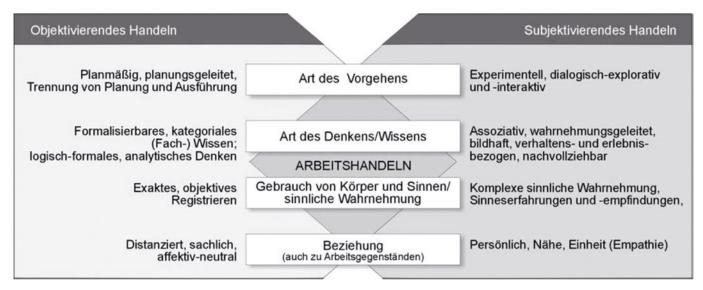


Bild 1: Modell des Arbeitshandelns nach Böhle [15, 16].

handeln beitragen [20], hängt stark von Leitbildern in der Technikgenese ab [13, 14, 29a, b].

Fallstudien in der Montage deuten etwa darauf hin, dass in der Einfacharbeit kaum nennenswerte Veränderungen erkennbar sind, während sich in der Facharbeit durchaus gegenläufige Tendenzen zeigen. Gerade in der flexibilisierten Arbeitsorganisation mit häufig wechselnden Abläufen ergeben sich entlastende Effekte für die psychische Gesundheit. Zudem reduzieren sich manuelle Eingriffe durch eine höhere Prozessstabilität in die Steuerung, was die Entwicklung von Erfahrungswissen durch eine abnehmende Auseinandersetzung mit der Technik gefährdet. Gleichzeitig bleiben die komplexen Produktionsprozesse erhalten. Zudem zeigen sich mit der Vernetzung der AS neue Kontrollpotenziale in der Produktion, die für steigende Anforderungen in der Prozessgestaltung wichtig sind. Jene Studien unterstreichen, dass beruflich verfasste Kompetenzen aus der dualen Ausbildung sowie beruflich strukturiertes Erfahrungswissen weiterhin relevant für die Beurteilung möglicher Störungen im Produktionsprozess und die

Einleitung geeigneter Maßnahmen zur Störungsbeseitigung bleiben [8-10, 19].

Es deutet sich im Kontext von Industrie 4.0 aber auch eine "fortschreitende Polarisierung von Arbeit" [6] an, und Gründe könnten in der Technikgenese liegen. Im sozialen Interaktionsprozess können sich vorherrschende Leitbilder als verdinglichtes Interesse in Arbeitsmitteln strukturierend auf konkrete Arbeitshandlungen von Beschäftigten auswirken [13, 14] und darüber entscheiden, "wer die Last der Arbeit hat, [...] wer die Möglichkeit zur Intervention [...] oder wer Zugang zu welchen Informationen bekommt." [27 a, b]. Im Anschluss an bestehende Forschung ist es daher das Ziel, subjektive Sichtweisen in der Technikentwicklung und der Techniknutzung nachzuzeichnen.

Methodische Herangehensweise

Methodisch basiert die Studie auf einem qualitativen Forschungsdesign, das subjektorientierte und prozesso-

Bild 2: Datenbasis der Studie.

	Fall 1 bis 4 2027-2021	Fall 5 bis 8 2022 bis 2024	Gesamt
	Großbetriebe der M+E Industrie	KMU der M+E Industrie	
Interviews mit Montagebeschäftigten	22	8	30
Interviews mit Mitgliedern des Betriebsrates	16	2	18
Interviews mit Expert*innen	13	4	17



rientierte Aspekte miteinander verbindet [21, 22, 23]. Im Rahmen der Fallstudienstrategie wurden acht Betriebsfälle nach festgelegten Merkmalen ausgewählt, bei denen es sich um etablierte Produktionsbetriebe der Metall- und Elektroindustrie (M+E Industrie) handelt, die global agierenden Unternehmen angehören und in Deutschland ansässig sind. Die Betriebe unterscheiden sich insofern, als dass es sich um vier Großbetriebe mit etablierten Mitbestimmungsstrukturen und je über 1000 Beschäftigten sowie um vier kleine und mittlere Betriebe (KMU), mit je ca. 300 Beschäftigten teils ohne Mitbestimmungsstrukturen, handelt. Alle acht Betriebe haben im Kontext von Industrie 4.0 sukzessive neue Assistenzsysteme implementiert, sodass arbeitsintegriertes Lernen für Beschäftigte anzunehmen ist.

Die Datenerhebung ist als qualitative Längsschnitterhebung konzipiert, um Änderungen subjektiver Deutungen zu berücksichtigen. Eine erste größere Phase bezieht sich auf den Zeitraum von 2017 bis 2021 in den vier Großbetrieben. Ergänzend dazu bezieht sich die zweite Phase auf den Zeitraum von 2022 bis 2024 mit vier KMU. Zur Datenerhebung kamen Instrumente wie teilnehmende Beobachtung und leitfadengestützte Interviews zum Einsatz.

Die Auswertung der Daten erfolgte rekonstruktiv mittels qualitativer Inhaltsanalyse [24] im Hinblick auf arbeitsintegriertes Lernen mit kognitionsunterstützenden Assistenzsystemen in der Montage. Die Analyse beinhaltet Interviews mit drei Beschäftigtengruppen in den jeweiligen Betrieben: (1) Montagebeschäftigte, die zu ihren arbeitsintegrierten Lernprozessen vor, während und nach der Implementierung von AS befragt wurden; (2) Interviews mit Mitgliedern des Betriebsrates und (3) Expertinnen, die an der Entwicklung, Planung und Umsetzung betrieblicher Digitalisierungsprojekte beteiligt sind. Zur Kontextualisierung der Ergebnisse wurden betriebsinterne Dokumente integriert.

Sichtweisen auf Assistenzen

Kognitionsunterstützende Assistenzsysteme sind im Kontext von Industrie 4.0 in Betrieben in umfangreiche Digitalisierungsprojekte eingebettet. Dabei sind unterschiedliche Formen mit abweichenden Verbreitungsgraden auszumachen. In den acht untersuchten Betrieben sind (a) vorstrukturierte Formen v. a. in der manuellen Montage und (b) adaptive Formen v. a. in der automatisierten Montage anzutreffen. Nur vereinzelt sind Pilotprojekte mit (c) tutoriellen AS erkennbar.

Vorstrukturierte Assistenz

Ein typisches Assistenzsystem, das in allen untersuchten Betrieben zum Einsatz kommt, ist die vorstrukturierte Assistenz. Es ist speziell für repetitive Arbeitsprozesse konzipiert und wird in der manuellen Montage implementiert. Bekannt als sogenannte **digitale Werkerführung** wird das Arbeitshandeln im Montageprozess eng angeleitet. Zentral ist die Abbildung linearer Handlungsverläufe in Form von digitalen Handbuchformaten mit festgelegten Schritt-für-Schritt-Anweisungen mit Bildern oder Filmsequenzen und meist in Kombination mit Pick-by-Light oder Pick-by-Voice-Systemen.

Zum Anwenderkreis gehören vorrangig angelernte Beschäftigte, die manuelle Tätigkeiten ausführen für die sie keine formale Berufsausbildung benötigen. Die Aufgaben bestehen v. a. darin, sehr kleine Teile auf Leierplatten zu montieren, was u. a. viel Fingerspitzengefühl erfordert, während für das Erlernen der Aufgaben nur kurze Einarbeitungszeiten vorgesehen sind. Die Beschäftigten in den untersuchten Betrieben sind meist über 20 Jahre in der manuellen Montage tätig und konnten durch regelmäßige Rotationen an Montagestationen, über viele Jahre ihr Erfahrungswissen entwickeln.

Sichtweisen in der Technikgenese

Aus Sicht der befragten Managementvertreter soll die Arbeit in der manuellen Montage möglichst eng strukturiert werden, um die Ausführung der Aufgaben zu beschleunigen und Produktionsstabilität zu erlangen. Die minutiöse Anleitung soll mögliche Fehler in der Auswahl von Komponenten vermeiden und die Einarbeitungszeiten bei Produktionsspitzen verkürzen, um auch ungeschultes Personal wie etwa Leihkräfte schneller zu integrieren. Einige der befragten Führungskräfte betonen, dass der Einsatz vorstrukturierter Assistenzsysteme eine größere Aufgabenvielfalt ermögliche und für mehr Abwechslungsreichtum sorge.

Diese Sichtweisen werden in der Technikentwicklung aufgegriffen. Die Technikkonzeption vorstrukturierter Assistenzsysteme folgt primär der Vorstellung einer Standardisierung der Abläufe. Alle befragten Entwicklerinnen berichten, dass die digitale Werkerführung für viele Unternehmen aufgrund niedriger Einstiegshürden interessant ist und Beschäftigte den Einsatz von AS in Pilotphasen größtenteils positiv wahrnehmen.

Sichtweisen in der Technikanwendung

Aus Sicht der befragten Beschäftigten der manuellen Montage ist der Umgang mit vorstrukturierten Assistenzsystemen leicht zu erlernen. Gerade in Pilotprojekten und auch zu Beginn der Einführung befürworten sie die AS und betonen ihre Bereitschaft, sich erste IT-Bedienkenntnisse anzueignen.

Nach der Implementierung verfügen die Beschäftigten über einen Montageplatz mit fest installierten Assistenzsystemen, die zu Beginn der Schicht von den Beschäftigten zu aktivieren sind. Zum aktuellen Auftrag öffnet sich



eine visuelle Arbeitsanweisung auf einem Monitor, der eine detaillierte Schritt-für-Schritt-Anleitung abbildet. Während der Ausführung laufen im Hintergrund mehrere Programme, die zum passenden Zeitpunkt Licht- bzw. Tonsignale geben, welche Komponenten für den nächsten Produktionsschritt benötigt werden. Zusätzlich erfasst Sensorik, welches Produkt von wem zu welchem Zeitpunkt bearbeitet wird, wobei die Beschäftigten auf einem weiteren Monitor die ausstehenden Aufträge sehen.

Am Ende bestätigen sie die Bearbeitung ihres Auftrages und erhalten ein automatisiertes Feedback u. a. mittels Smileys, was wohl die Motivation stimulieren sollte. Für die jeweilige Tätigkeit steht nur selektives Anwenderwissen bereit.

Die Bereitschaft für eine regelmäßige Nutzung verändert sich, als die befragten Beschäftigten in der manuellen Montage bemerken, dass ihr Erfahrungswissen aufgrund der Systeme weitestgehend obsolet wird und kaum noch ein Mitdenken erforderlich ist. Durch die obligatorische Nutzung und die starke Vorstrukturierung der Arbeitsschritte haben Beschäftigte das subjektive Gefühl geäußert, dass sie sich nicht mehr für die von ihnen durchgeführten Montagearbeiten verantwortlich fühlen:

"Wir sind nur noch für die Hände und nicht für ihren Kopf da. Du siehst alles auf dem Bildschirm hier [...] jeden Schritt. Ich kenne das alles in- und auswendig. Das Licht blinkt nun und zeigt, welches Material du benötigst und wohin es gehen wird. Hier hast du die Zahlen und der Computer zeigt, wo du das Material finden kannst. [...] Der andere Bildschirm ruft automatisch die Anweisungen auf, man muss nichts mehr denken, nur noch befolgen [..] es gibt keine weiteren Inhalte."

Besonders erfahrene Beschäftigte empfinden die Assistenzsysteme durch das permanent erforderliche Bestätigen der durchgeführten Schritte als Unterforderung und sogar als Störung ihrer eigens aufgebauten Arbeitsroutinen, die häufig die Arbeit verlangsamen, während das Management davon ausgeht, dass die AS zu mehr Effizienz führen.

Die Befragten weisen wiederholt darauf hin, dass ihnen zuvor mehr vertraut wurde, die richtigen Montageschritte ohne permanente Anleitung korrekt auszuführen. Vor der Implementierung waren die Aufgaben in der manuellen Montage stark vorstrukturiert und in eng getaktete Produktionsprozesse eingebunden. Die Beschäftigten erhielten in der Regel ein papierbasiertes Handbuch mit Montageanleitungen und papierbasierte Listen zur Auswahl der passenden Komponenten. Dies sehen die Befragten rückblickend als ein zusätzliches Hilfsmittel an, das sie nur bei Bedarf verwendet haben, und wünschen sich adaptive AS.

Adaptive Assistenz

Ein weiteres typisches Assistenzsystem in der Montage, das in vielen untersuchten Betrieben zum Einsatz kommt, ist das adaptive AS. Konzipiert ist es speziell für die automatisierte Montage, um relevante Maschinendaten aus automatisierten Montagelinien zu erfassen und abzubilden. Bekannt als sogenanntes **Decision Support System** dient es dem problembasierten Lernen in unwägbaren Arbeitssituationen für ununterbrochene und fehlerfreie automatisierte Montageprozesse, weil für situative Lösungsansätze bei Störungen dynamische Produktionsabläufe nicht einfach unterbrochen werden können.

Zum Anwenderkreis gehören Fachkräfte mit einer hinreichenden Betriebszugehörigkeit und einer formalen Berufsausbildung bspw. als Maschinen- und Anlagenführer. Die Aufgabe besteht in der Steuerung und Umrüstung automatisierter Montagelinien, wobei mehrmals am Tag kleinere Programmierschritte vorzunehmen sind, um bestimmte Parameter anzupassen. Auch Instandhaltungsaufgaben gehören dazu. Diese Aufgaben erfordern neben technischem Fachwissen und Programmierkenntnissen prozessuales Erfahrungswissen, um etwa das Ausmaß von Störungen einzuschätzen. Die Tätigkeiten gelten als "wissens- und technologieintensiv" und als "anspruchsvoll" und erfordern eine längere Einarbeitung.

Sichtweisen in der Technikgenese

Aus Sicht der befragten Managementvertreterinnen geht es in der automatisierten Montage um mehr Prozessstabilität und um eine flexibilisierte Anpassung hochstandardisierter Prozesse an die jeweilige Auftragslage. Adaptive AS sollen demnach die Entscheidungsfindung von Beschäftigten mit visualisierten echtzeitnahen Daten von Maschinenzuständen vereinfachen, sodass sie möglichst ohne Stillstand der Anlagen Problembereiche früh erkennen und passende Lösungen entwickeln.

Diese Sichtweisen werden in der Technikentwicklung ebenso aufgegriffen und entsprechend folgen die Konzeptionen für adaptive AS in der automatisierten Montage der Vorstellung, bereits hochstandardisierte Prozesse stärker zu flexibilisieren. Echtzeitbasierte Informationen in adaptiven Systemen sorgen aus Sicht der Entwicklung v. a. für eine Reduzierung der Komplexität bei Entscheidungen.

Sichtweisen in der Techniknutzung

Aus Sicht der befragten Beschäftigten in der automatisierten Montage wird gerade zu Beginn der Umgang mit adaptiven Assistenzsystemen als aufwändig und kaum als Entlastung wahrgenommen. Eine regelmäßige Nutzung führte dazu, dass sich die Befragten sicherer im Umgang mit AS fühlten. Gerade im komplexen und von Zeitdruck geprägten Produktionsalltag nehmen sie eine Verringerung situativer Stressmomente etwa bei Umrüstungen und



Störungen wahr und fühlen sich durch eine technikgestützte Entscheidungshilfe sicherer in der Ergreifung adäquater Maßnahmen. Besonders während hoher Produktionsspitzen haben die befragten Beschäftigten adaptive AS als besonders nützliche Entlastung wahrgenommen durch die Vernetzung zwischen den automatisierten Montagelinien mit mobilen Endgeräten.

"Wir müssen nun keine weiten Wege an der Linie zurücklegen, um das Problem zu lösen, und auch die Verständigung im Team ist viel leichter als vorher. Das war umständlich und zeitaufwändig."

Vor der Implementierung haben Beschäftigte Excel-Tabellen als Entscheidungshilfe genutzt. Nach der Implementierung ist nahezu in Echtzeit der Abruf relevanter Maschinen- und Prozessdaten möglich und verhindert unwägbare Situationen im Produktionsprozess. Im Falle von Störungen stellt das Assistenzsystem detaillierte Lösungsbeschreibungen als Schritt-für-Schritt-Anweisungen bereit, die von Beschäftigten als "sehr hilfreich" angesehen werden. Besonders erfahrene Beschäftigte unterstreichen, dass sich mit der Einführung adaptiver AS die Flexibilität in der Produktion erhöht, weil etwa ein Umrüstungenöfter als zuvor stattfinden, da diese Aufwand erfordern . Währenddessen laufen algorithmische Programme zur Analyse der Produktion im Hintergrund, auf die Dritte jederzeit Zugriff haben.

Tutorielle Assistenz

Vereinzelt kommen tutorielle AS zum Einsatz, die vergleichsweise neu sind. Sie ähneln teilweise adaptiven AS durch permanente Anpassungsmöglichkeiten. Sie unterscheiden sich aber dadurch, dass sie nicht für die direkte Bewältigung von Arbeitshandlungen konzipiert sind, sondern als reine Lernunterstützung. In dafür vorgesehenen Räumen gehen ausgewählte Beschäftigte in simulierte Arbeitssituationen und testen geschützt neue Anwendungen aus, um aus Fehlern zu lernen.

Hierbei werden individuelle Arbeits- und Lernhandlungen sowie deren Ausführungsfrequenz durch Sensoren erfasst und dokumentiert, die algorithmisch mit hinterlegten Erfahrungsportfolios bzw. didaktischen Konzepten verknüpft werden.

Zum Anwenderkreis gehören im Wesentlichen jüngere Beschäftigte, die nicht nur in der Montage tätig sind und denen besonders von Führungskräften eine erhöhte Technikaffinität und Lernbereitschaft zugeschrieben wird. Beschäftigte, die über längere Betriebszugehörigkeiten und über umfassendes Erfahrungswissen verfügen, haben oft (noch) keinen Zugang zu diesem Assistenzsystem. Der Verbreitungsgrad erscheint noch sehr niedrig. Von den acht untersuchten Betrieben hatten nur drei Betriebe ein tutorielles AS.

Sichtweisen in der Technikgenese

Aus Sicht der befragten Managementvertreter sind tutorielle Assistenzsysteme speziell für die Aus- und Weiterbildung konzipiert. Sie sollen bei Industriebeschäftigten den gezielten Aufbau eines neuen Prozesswissens fördern auch unabhängig von derlaufenden Produktion. Darüber hinaus soll es die betriebliche Organisation neuer Lernanlässe im Kontext von Industrie 4.0 unterstützen.

Aus Sicht der befragten Entwicklerinnen basieren tutorielle Assistenzsysteme auf KI und unterstützen anlassbezogen das Einüben neuer Arbeitsabläufe und den Erwerb neuer Kompetenzen. Die Befragten weisen auf erhöhte Lerneffekte hin. Vorgesehen ist ein situatives Anpassen an verfügbares Wissen und eine selbstbestimmte Individualisierung des Lernens.

Für die betriebliche Organisation des Lernens wird der individuelle Lernbedarf von Beschäftigten über vernetzte Systeme wie Learning Analytics visualisiert. Daten aus der Vernetzung mit verschiedenen Artefakten wie mobilen Endgeräten werden mit sensorischen Kamerasystemen und Plattformen erfasst.

Sichtweisen in der Techniknutzung

Aus Sicht der befragten Beschäftigten in der Montage ermöglichen tutorielle Assistenzsysteme ein bedarfsgerechtes Erlernen einfacher Montagevorgänge und komplexer Steuerungen in der automatisierten Montage. In Pilotprojekten haben ausgewählte Beschäftigte tutorielle AS in speziell dafür abgegrenzten Bereichen auf dem Shopfloor oder separaten Räumen kennengelernt. Zum Beispiel haben sie neue Funktionsweisen von Maschinen und Anlagen ausprobiert. Gleichzeitig wurden mögliche Auswirkungen bei verschiedenen Parametern simuliert, um etwa die Folgen einer (teils) ausfallenden Anlage abzuschätzen.

Die befragten Beschäftigten in der automatisierten Montage beschreiben dies als ein neues und praxisorientiertes Lernerlebnis. Sie heben hervor, dass dieses AS wichtig für den Aufbau neuer Erfahrungen im Umgang mit anderen neuen Technologien seien:

"Für die Suche nach neuen und unbekannten Problemlösungen ist das System sinnvoll. Durch das Interagieren und das Experimentieren können wir die Bedienung neuer Maschinen und Anlagen in der Automatisierung außerhalb der laufenden Produktion trainieren, und das ist sinnvoll. [...] Das vom AS eingeblendete Echtzeit-Feedback ist wichtig für den Austausch unter Kollegen."

Demgegenüber kommen in der manuellen Montage tutorielle AS als Hilfestellung zur Strukturierung des Arbeitsprozesses zum Einsatz. Das System gibt bspw. Hinweise, wenn bestimmte Einstellungen am Arbeitsplatz mögli-



	Assistenzsystem 1	Assistenzsystem 2	Assistenzsystem 3
Chancen	Nicht adaptiv und Arbeitsablauf stark vorstrukturiert für An- und Ungelernte	Adaptiv und wenig vorstrukturiert für technisch-ausgebildete Fach- und Führungskräfte	Adaptive Simulation für jüngere Angelernte und Fachkräfte der Montage
Subjektive Einschätzung bzgl. des Arbeitshandelns	Entlastung im Arbeitsprozess, kaum selbstbestimmtes Arbeitshandeln	Entlastung im Arbeitsprozess und eher selbstbestimmtes Arbeitshandeln	Indirekter Bezug zum Arbeitsprozess selbstbestimmtes Lernen durch Simulationen
Subjektive Einschätzung bzgl. des Lernens t=1	Anfangs willkommen und förderlich für Lernen	Anfangs wenig willkommen für kollektives Lernen	Anfangs förderlich für selbstbestimmtes Lernen Erweiterung der
	Verengung der Handlungsspielräume mit Kontrollinstanz	Erweiterung der Handlungsspielräume ohne Schulungen mit Kontrollinstanz	Handlungsspielräume nach Schulungen mit Kontrollinstanz
Subjektive Einschätzung bzgl. des Lernens t=2	Im Verlauf hinderlich für Entwicklung impliziten Erfahrungswissens	Im Verlauf förderlich für Entwicklung impliziten Erfahrungswissens	Im Verlauf ambivalent Datenerfassung ist motivierend und problematisch

Bild 3: Vergleichende Analyse.

cherweise nicht gesundheitsförderlich sind oder Pausen eingelegt werden sollten.

Einige der befragten Beschäftigten würdigen die gestiegene Anpassungsfähigkeit der Systeme und nehmen das Feedback beim Erreichen eines bestimmten Ziels als positives Signal wahr. Nach mehrmaligem Gebrauch verblasst der motivierende Effekt und erzeugt Widerstände. Reflektierend bemerken sie, dass individuelle Lernempfehlungen und visuelle Rückmeldungen zum Lernfortschritt aus der Erfassung ihrer Handlungsdaten entstanden sind und kritisieren dies.

Im Vergleich stellen sich die Assistenzsysteme wie in **Bild 3** dar.

Ungelöste Spannungsfelder

Bei kognitionsunterstützemden Assistenzsystemen in der Montage lassen sich Chancen zum **Upskilling** nachzeichnen, etwa beim Erlernen neuer Aufgaben, die entweder durch andere neue Technologien oder durch veränderte Prozesse entstehen, sowie in der Bewältigung komplexer Arbeitsanforderungen. Adaptive und tutorielle AS stellen sich im Vergleich zu stark vorstrukturierten AS als bedarfsgerechter dar, da sie individuelles Vorwissen der Beschäftigten berücksichtigen und eine Weiterentwicklung von Erfahrungswissen begünstigen.

Trotz der entlastenden Effekte greift aber eine allzu optimistische Sicht auf Assistenzsysteme zu kurz. Betriebsräte weisen auf Herausforderungen hin:

"Technische Unterstützung kann vielleicht einer Dequalifizierung vorbeugen und ein Lernen aus Fehlern ermöglichen. Personalisiertes Lernen, das außerhalb der täglichen Arbeit und in extra dafür vorgesehenen Räumen stattfindet, kostet den Betrieb und erfordert eine Freistellung. Das müssen wir noch aushandeln."

Bereits in der Technikgenese folgt die Entwicklung überwiegend einem Managementideal, das sich primär an Effizienzsteigerung mit einer möglichst störungsfreien Produktion mit einer Null-Fehler-Politik orientiert. In der Folge entstehen standardisierte Prozesse und eine Vernetzung mit algorithmischen Systemen, die meist im Verborgenen bleibt, aber langfristig ein Risiko zur "Vermessung der Arbeit" [26] beinhaltet. Aus Sicht der befragten Betriebsräte liege v. a. in adaptiven AS ein Spannungsfeld zwischen Lernförderlichkeit und Kontrollmechanismen:

"Es ergeben sich auch problematische Kontrollpotenziale, da Assistenzsysteme die Geschwindigkeit der ausgeführten Handlungen mit Sensoren erfassen und die Daten wiederum als verfügbare Information in die Produktionsplanung zur Effizienzsteigerung in der Produktion einfließen. Wir müssen die Belegschaft da auch sensibilisieren."



Die bisherigen Assistenzsysteme in der Einfacharbeit gefährden – als "komplementärer Technikeinsatz zur **Prozessrationalisierung**" [29b] – eine Aufwertung von Arbeit. Im Gegenteil: permanentes Befolgen allzu konkreter Handlungsanweisungen erzeugt subjektive Entwertungserfahrungen mit einem Bedeutungsverlust des erworbenen Erfahrungswissens, was eine sinkende Technikakzeptanz und sinkende Lernbereitschaft zur Folge hat. Auf lange Sicht ist durch eine kognitive Unterbeanspruchung das Risiko zum **Deskilling** mit manifestierten Ungerechtigkeitsgefühlen nicht auszuschließen, während technische Potenziale zur eigenständigen Anpassung an vorhandenes Wissen unausgeschöpft bleiben. Wichtig wären AS mit zusätzlich integrierten Lerninhalten, die sich nicht nur an funktionalistischen Lernzielen des gegenwärtigen Arbeitsplatzes orientiere, sowie betriebliche Lernangebote, die eine Teilnahme trotz enger Produktionstaktungen ermöglichen. [10]

Beim Lernen mit Assistenzsystemen weisen die befragten Betriebsräte auf einen Regulierungsbedarf hin und unterstreichen die weitreichenden Folgen zu eng strukturierter AS. Demnach schaffe die Aussicht auf eine potenzielle Verkürzung von Ausbildungs- und Anlernzeiten mit AS ungünstige Anreize für Unternehmen, sich zukünftig unter Effizienzgesichtspunkten noch mehr auf Leiharbeit zu verlassen mit der Gefahr sinkender Lohnstandards:

"Eine Standardisierung der Montage mit ständigen Handlungsanleitungen kann den Verlust kognitiver Fähigkeiten fördern und langfristig das Lohnniveau absenken. Das wird oft nicht bedacht".

Demgegenüber weisen andere Betriebsräte auf stabile Lohnniveaus in der Industrie hin und betonen, dass sie zwar mögliche Gehaltskürzungen für bestehendes Personal verhindern können, aber zukünftige Lohnkürzungen nicht auszuschließen seien:

"Man sieht, die Komplexität bleibt bestehen und auch die Gehaltsgruppe. [...]. Wir wollen, dass unsere Kollegen ihr Geld behalten [...]. Aber wer weiß: wenn neue Leute eingestellt werden, sieht die Welt oft ganz anders aus."

Die Risiken zum Deskilling sind nicht allein auf vorherrschende Leitbilder in der Technikgenese oder die Vorstrukturiertheit bisheriger Assistenzsysteme zurückzuführen. Vielmehr kommt es beim individuellen Lernen und der Organisation des Lernens auch auf eine funktionierende Mitbestimmung an. Zum Beispiel haben Angelernte eine Unterforderung in KMU ebenso wie in Großbetrieben thematisiert, die aber in sozialen Interaktionen kaum aufgegriffen wurde, da der Austausch vorwiegend durch technikaffine Beschäftigte bestimmt war und erwartungsgemäß kaum Betriebsräte eingebunden waren.

Allerdings sind sich die befragten Betriebsräte uneinig, wenn es um die Einbindung geht. Viele berichten über ihre zunehmende Einbindung in Pilotprojekten und befürworten spezielle Austauschformate zur bedarfsgerechten Technikgestaltung. Zugleich erschwere die iterative Logik in Projekten oft die Entwicklung passender Regularien bzgl. der Lernzeiten und der Vermeidung einer technisch-gestützten Leistungskontrolle, die sich am tatsächlichen Stand der Technologie orientieren.

Außerdem kritisieren sie die fehlende Einsicht seitens des Managements bzgl. des Umgangs mit einer inhaltlichen Entleerung von Arbeit bei Angelernten, die trotz vieler Austauschprozesse kaum Einzug in die Technikentwicklung hält. Einer frühzeitigen Einbindung von Beschäftigten stehen sie kritisch gegenüber, da die Gefahr bestehe, dass Beschäftigte an einer Abwertung ihrer eigenen Fähigkeiten mitwirken würden.

Die vorliegenden Ergebnisse tragen zu einer empirischen Standortbestimmung in der fortlaufenden Transformation bei. Die vorliegende Analyse mit unterschiedlichen Sichtweisen auf konkrete Formen von Assistenzsystemen in der Montage verweist auf eine kritische Reflexion bisheriger Standards in der Technikentwicklung, selbst wenn sich aufgrund der fallspezifischen Daten keineswegs universelle Entwicklungen ableiten lassen. Festzuhalten bleibt, dass es zukünftig auf eine verantwortungsvolle Technikentwicklung mit humanzentrierten Leitbildern ankommt sowie auf Lernangebote, die das Erfahrungswissen bei allen Beschäftigten ohne unnötige Kontrollmechanismen berücksichtigen. Auf diese Weise kann einer finanziellen Entwertung von Arbeit entgegengewirkt werden.

Literatur

- [1] Apt, W.; Schubert, M.; Wischmann, S.: Digitale Assistenzsysteme. Perspektiven und Herausforderungen für den Einsatz in Industrie und Dienstleistungen. iit Institut für Innovation und Technik. Berlin 2018.
- [2] Apt, W.; Bovenschulte, M.; Priesack, K.; Hartmann, E. A.; Weiß, C.: Einsatz von digitalen Assistenzsystemen im Betrieb. iit – Institut für Innovation und Technik. Berlin 2018.
- [3] Stich, V.; Gudergan, G.; Senderek, R.: Arbeiten und Lernen in der digitalisierten Welt. In: Hirsch-Kreinsen, H.; Ittermann, P. (Hrsg): Digitalisierung industrieller Arbeit. BadenBaden 2015, S. 109–130
- [4] Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Fraunhofer IAO. 2013.
- [5] Ittermann, P.; J. Niehaus, 2018: Industrie 4.0 und Wandel von Industriearbeit - revisited. Forschungsstand und Trendbestimmungen. In: H. Hirsch-Kreinsen, P. Ittermann, J. Niehaus (Hrsg.) Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen, Baden-Baden: Nomos, S. 33–60.



- [6] Hirsch-Kreinsen, H.: Einleitung: Digitalisierung industrieller Arbeit. In: Hirsch-Kreinsen, H.; Ittermann, P.; Niehaus, J. (Hrsg): Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Baden-Baden 2018, S. 13–32.
- [7] Hirsch-Kreinsen, H.: Digitalisierung industrieller Einfacharbeit. Entwicklungspfade und arbeitspolitische Konsequenzen. In: Arbeit 26 (2017) 1, S. 7–32.
- [7a] Hirsch-Kreinsen, H.; Ittermann, P.; Falkenberg, J.: Szenarien digitalisierter Einfacharbeit: Konzeptionelle Überlegungen und empirische Befunde aus Produktion und Logistik. Baden-Baden 2019.
- [7b] Ittermann, P.; Ortmann, U.; Virgillito, A.; Walker, E.: Hat die Digitalisierung disruptive Folgen für Einfacharbeit? Kritische Reflexion und empirische Befunde aus Produktion und Logistik. In: Industrielle Beziehungen. Zeitschrift für Arbeit, Organisation und Management 26 (2019) 2, S. 150–168.
- [8] Kuhlmann, M.; Splett, B.; Wiegrefe, S.: Montagearbeit 4.0? Eine Fallstudie zu Arbeitswirkungen und Gestaltungsperspektiven digitaler Werkerführung. In: WSI Mitteilungen (2018), S. 182–188.
- [9] Baethge-Kinsky, V.; Kuhlmann, M.; Tullius, K.: Technik und Arbeit in der Arbeitssoziologie - Konzepte für die Analyse des Zusammenhangs von Digitalisierung und Arbeit. In: AIS-Studien 11 (2018) 2, S. 91–106.
- [10] Warnhoff, K.; De Paiva Lareiro, P.: Skill Development on the Shop Floor - Heading to a Digital Divide? In: Proceedings of the Weizenbaum Conference 2019 "Challenges of Digital Inequality - Digital Education, Digital Work, Digital Life", S. 1–10.
- [11] Vladova, G.; Wotschack, P.; de Paiva Lareiro, P.; Gronau, N.; Thim, C.: Lernen mit Assistenzsystemen. Vor lauter Aufgaben den Prozess nicht sehen?" In: Industrie 4.0 Management 36 (2020) 3, S. 16–20.
- [12a]Schröder, C.: Herausforderungen von Industrie 4.0 für den Mittelstand. Bonn 2016.
- [13] MacKenzie, D.; Wajcman, J.: The Social Shaping of Technology. In: MacKenzie, D.; Wajcman, J. (Hrsg): The Social Shaping of Technology (1985), S. 2–25.
- [14] Rammert, W.: Die technische Konstruktion als Teil der gesellschaftlichen Konstruktion der Wirklichkeit. In: Technik - Handeln - Wissen. Wiesbaden 2016.
- [15] Böhle, F.; Bolte, A.; Neumer, J.; Pfeiffer, S.; Porschen, S.; Ritter, T.; Sauer, S.; Wühr, D.: Subjektivierendes Arbeitshandeln "Nice to have" oder ein gesellschaftskritischer Blick auf "das Andere" der Verwertung? In: Arbeit als Subjektivierendes Handeln 4 (2011) 2, S. 16–26.
- [16] Böhle, F.: Arbeit als Handeln. In: Böhle, F.; Voß, G. G.; Wachtler, G. (Hrsg): Handbuch Arbeitssoziologie. Wiesbaden 2018.
- [17] Niehaus, J.: Mobile Assistenzsysteme für Industrie 4.0: Gestaltungsoptionen zwischen Autonomie und Kontrolle. (FGW-Studie Digitalisierung von Arbeit, 4). Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung e.V. (FGW). Düsseldorf 2017.
- [18] Falkenberg, J.: Mobile Kontrolleure. Eine arbeitssoziologische Analyse digitaler Assistenzsysteme in der Logistik 4.0. In: Hirsch-Kreinsen, H.; Karacic, A. (Hrsg): Logistikarbeit in der digitalen Wertschöpfung. Perspektiven und Herausforderungen für Arbeit durch technologische Entwicklungen. Düsseldorf 2018, S. 37–56.

- [19] Backhaus, N.: Kontextsensitive Assistenzsysteme und Überwachung am Arbeitsplatz: Ein meta-analytisches Review zur Auswirkung elektronischer Überwachung auf Beschäftigte. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 73 (2019) 1, S. 2–22.
- [20] Dehnbostel, P.: Betriebliche Lernorte, Lernräume und Selbstlernarchitekturen. In der digitalisierten Arbeitswelt. In: Magazin Erwachsenenbildung (2019), S. 35–36.
- [21] Kelle, U.; Kluge, S.: Vom Einzelfall zum Typus: Fallvergleich und Fallkontrastierung in der qualitativen Sozialforschung. Wiesbaden 2010.
- [22] Pflüger, J.; Pongratz, H.; Trinczek, R.: Fallstudien in der deutschen Arbeits- und Industriesoziologie. Eine Bestandsaufnahme. In: Industriesoziologische Fallstudien: Entwicklungspotenziale einer Forschungsstrategie. Berlin 2010, S. 22–71.
- [23] Yin, R. K.: Case study research and applications. Design and methods. Los Angeles 2018.
- [24] Gläser, J.; Laudel, G.: Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen. Wiesbaden 2010.
- [25] Huchler, N.: Grenzen der Digitalisierung von Arbeit Die Nicht-Digitalisierbarkeit und Notwendigkeit impliziten Erfahrungswissens und informellen Handelns. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 71 (2017) 4, S. 215–223.
- [26] Krzywdzinski, M.; Pfeiffer, S.; Evers, M.; Gerber, C.: Measuring Work and Workers. Wearables and Digital Assistance Systems in Manufacturing and Logistics. In: WZB Discussion Paper SP III 2022-301. Berlin 2022.
- [27a] Rammert, W.: Prozesse der Technikgenese und der Stellenwert von Leitbildern der Technikentwicklung. In: E. Fricke (Hrsg): Zur Zukunftsorientierung von Ingenieuren und Naturwissenschaftlern. Friedrich-Ebert-Stiftung. Bonn 1994, S. 15.
- [27b]Rammert, W.: Die technische Konstruktion als Teil der gesellschaftlichen Konstruktion der Wirklichkeit. In: Technik - Handeln - Wissen. Wiesbaden 2016.
- [28] Pfeiffer, S.; Suphan, A.: Industrie 4.0 und Erfahrung das Gestaltungspotenzial der Beschäftigten anerkennen und nutzen. In: Hirsch-Kreinsen, H.; Ittermann, P.; Niehaus, J. (Hrsg): Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. Baden-Baden 2018, S. 205–230.
- [29a] Huchler, N.: Die ,Rolle des Menschen' in der Industrie 4.0: Technikzentrierter vs. humanzentrierter Ansatz. In: Arbeits- und Industriesoziologische Studien 9 (2016), S. 57–79.
- [29b]Huchler, N.: Komplementäre Arbeitsgestaltung. Grundrisse eines Konzepts zur Humanisierung der Arbeit mit Kl. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 76 (2022) 2, 158–175.
- [30] Kuhlenkötter, B. u. a.: Mitbestimmung und Partizipation im Transformationsprozess zur Industrie 4.0. In: Arbeit 28 (2019), S. 401–422.





Digitaler Zwilling mittels semantischer Modellierung und KI

Digitale Zwillinge verhalten sich oft statisch und müssen aufwendig modelliert werden. Hier schafft der Einsatz von Künstlicher Intelligenz Abhilfe. Ein Klbasierter Digitaler Zwilling erlernt das Systemverhalten eigenständig und liefert somit jederzeit das optimale Abbild des Produktionsprozesses. Das ermöglicht die automatische Erklärung und Simulation in einem ausdrucksstarken Gesamtmodell – ein selbstlernender und sich selbst erklärender Digitaler Zwilling.

Schlüsselwörter

Digitaler Zwilling, Künstliche Intelligenz, eXplainable AI, Large Language Models, Digital Engineering, Anomalie-Detektion, Predictive Maintenance, Simulation

Prof. Dr. Wolfram Höpken ist Professor für Business Intelligence und Data Science und leitet das Institut für digitalen Wandel an der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Prof. Dr. Ralf Stetter ist Professor für Konstruktion und Entwicklung in der Kraftfahrzeugtechnik an der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Prof. Dr. Markus Pfeil ist Professor für Embedded Systems und leitet die Forschungsgruppe Smart Factory innerhalb des Instituts für digitalen Wandel an der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Prof. Dr. Thomas Bayer ist Professor für ERP-Systeme, Cloud Computing und Data Science an der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Prof. Dr. Bernd Michelberger ist Professor für Data Science, Digital Business, Geschäftsprozesse, Künstliche Intelligenz und Machine Learning an der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Prof. Dr. Markus Till ist Professor für Modellierung und Simulation sowie Digital Engineering und leitet die Forschungsgruppe Digital Engineering innerhalb des Instituts für digitalen Wandel an der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Timo Schuchter, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Maschinenbau der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Alexander Lohr, M. Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der Hochschule Ravensburg-Weingarten.

Kontakt

wolfram.hoepken@rwu.de www.rwu.de/idw

DOI: 10.30844/I4SD.25.2.30



Digitaler Zwilling mittels semantischer Modellierung und KI

Selbstlernende Entwicklung und Simulation industrieller Produktionsanlagen

Wolfram Höpken, Ralf Stetter, Markus Pfeil, Thomas Bayer, Bernd Michelberger, Markus Till, Timo Schuchter und Alexander Lohr, Hochschule Ravensburg-Weingarten

Der KI-basierte selbstlernende Digitale Zwilling passt sich automatisch an das reale Systemverhalten an und stellt jederzeit ein optimales Abbild eines Produktionsprozesses dar. Ein ausdrucksstarkes, semantisches Gesamtmodell dient als Basis für neuartige Ansätze der künstlichen Intelligenz (KI). Die mittels Methoden der KI gewonnenen Erkenntnisse werden in das Gesamtmodell integriert und so die Interpretierbarkeit und Erklärbarkeit der KI-Modelle verbessert. Methoden aus dem Bereich der eXplainable AI ermöglichen die automatische Beschreibung von KI-Modellen und deren Erkenntnisse sowie den Aufbau selbsterklärender Modelle.

Der Ansatz des Digitalen Zwillings findet seit einigen Jahren zunehmend Anwendung insbesondere im Bereich der industriellen Produktion [1] und ermöglicht das Monitoring und die Simulation des Verhaltens eines physikalischen Systems sowie die Vorhersage kritischer Systemzustände. Hierbei finden zunehmend Techniken aus dem Bereich der KI bzw. konkret des maschinellen Lernens Anwendung, um das Systemverhalten automatisch zu erfassen. Mittels KI gewonnene Erkenntnisse liegen im Anwendungsfeld Industrie 4.0 jedoch oftmals lediglich isoliert für Teilaspekte eines Produktionsprozesses vor. Die Erkennung übergreifender Muster für einen gesamten Produktionsprozess und Produktlebenszyklus scheitert in der Regel an einem fehlenden Gesamtmodell zur semantischen und ontologischen Einordnung der Erkenntnisse.

Aus statistischer Sicht liefern typische Verfahren der KI und des maschinellen Lernens (ML) lediglich Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter Muster oder Zusammenhänge. Kausale Zusammenhänge können nicht erkannt werden. Die hieraus resultierende Unsicherheit stellt insb. in komplexen und kritischen Anwendungsgebieten wie der Produktion ein grundsätzliches Problem dar. Abhilfe schaffen hier Ansätze aus dem Bereich der eXplainable AI (XAI), d. h. der automatischen Beschreibung und Erklärung von ML-Modellen [2] – etwa die Erläuterung,



Die ORCID-Identifizierungsnummern der Autoren dieses Beitrags sind einsehbar unter https://doi.org/10.30844/I4SD.25.2.30

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die die Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird. warum und anhand welcher Eingangsparameter das Modell einen Maschinenausfall vorhersagt.

Aber auch eine derartige Erklärung und Interpretation gewonnener Erkenntnisse profitieren von semantisch reichhaltigen Modellen. Die Erkenntnisse

der KI können folglich nur dann komplett im Umfeld der Industrie 4.0 genutzt werden, wenn sie in Gesamtmodelle eingebracht werden, die u. a. Funktion, Verhalten, Struktur und Geometrie verbinden und so die Erklärung und nachvollziehbare Prognose des Systemverhaltens erlauben.

Zielsetzung des Projekts ist die Konzeption eines KI-basierten, selbstlernenden und selbsterklärenden Digitalen Zwillings, der sich automatisch an das reale Systemverhalten anpasst und jederzeit ein optimales Abbild des Produktionsprozesses darstellt. Die mittels Methoden der KI gewonnenen Erkenntnisse werden in ein semantisch reichhaltiges Gesamtmodell integriert und so die Interpretierbarkeit und Erklärbarkeit der KI-Modelle und komplexe Analysen und Prognosen auch mittels Techniken der Simulation ermöglicht.

Digitaler Zwilling und KI in der Produktion

Das Konzept des Digitalen Zwillings wurde von [1] im Jahr 2003 zuerst erwähnt. War diese Technologie zunächst ein Konzept zum einfachen Monitoring eines Produkts oder einer Produktionsanlage, so stellen Digitale Zwillinge heutzutage eine dynamische, virtuelle Entität als digitales Abbild eines Ausschnitts der physischen Realität dar und ermöglichen komplexe Simulationen und Analysen bzw. Vorhersagen von Zuständen des physischen Systems.

Für die Weiterverarbeitung und Analyse der gesammelten Leistungs- und Ausführungsdaten kommen zunehmend Techniken aus dem Bereich des maschinellen Lernens zum Einsatz, wie z. B. Artificial Neural Networks, Deep Neural Networks oder Hidden Markov Models, oder



Produkt-/Produktions-Design (Design Cockpit 43) Produkt- und Produktionsmodellierung (Geometrie/Produkteigenschaften, Fertigungstoleranzen) Simulationsarchitektur/Verhaltensmodellierung (Physikalische Modellierung) Produkt-/Produktionsmodelle - Ontologie (XMI) - Geometrie (GraphML) Simulations-/Verhaltensmodelle **PPS-Systeme** Produkt-/Produktionsmodelle Ausführungs-/ Ausführungs-/Leistungsdaten Leistungsdaten **SPS-Systeme** Knowledge Graph Machine Learning / (GraphDB/OWL) XAI Sensorik (auch ML-Modelle + Erklärungen (ML-Schema+) optisch und 3D) Produkt-/Produktionsmodelle Simulations- und Verhaltensmodelle Legende ML-Modelle + Erklärungen FMU = Functional Mockup Unit GraphDB = Graph Database GraphML = Graph Description XML Co-Simulation (INTO-CPS) ML = Machine Learning OWL = Web Ontology Language Ganzheitliche simulative Abbildung PPS = Produktionsplanung und Steuerung FMUs (ML-basiert) SPS = Speicherprogrammierbare Steuerung 3D-Ansicht Produkt/Produktion XAI = eXplainable AI XMI = XML Metadata Interchange

Bild 1: Architektur eines KI-basierten Digitalen Zwillings.

auch Ansätze aus dem Bereich des Physics-Informed Machine Learning, um typische Ausführungsmuster und Zusammenhänge automatisch zu erkennen und zukünftige Systemzustände besser vorhersagen zu können [3-7].

Im Bereich der Modellierung des physischen Systems und der Repräsentation von Ausführungs- und Leistungsdaten befassen sich neuere Forschungsarbeiten und Entwicklungen mit dem Einsatz von Semantic-Web-Technologien (z. B. Ontologien oder Knowledge Graphen), um ausdrucksstarke Produkt- und Produktionsmodelle bereitstellen zu können [8, 9].

Anwendungsfälle Künstlicher Intelligenz leiden insbesondere dann unter dem Problem der Unsicherheit, wenn das zugrunde liegende Modell den betrachteten Ausschnitt der Wirklichkeit nur unvollständig abbildet. Gerade in kritischen Anwendungsbereichen wie der Produktion ist daher die Erklärbarkeit von KI-Modellen eine wichtige Voraussetzung für deren Verlässlichkeit und Akzeptanz [2]. Der Begriff eXplainable AI wurde 2017 von der DARPA ins Leben gerufen und beschreibt Methoden zur automatischen Erklärung von KI-Modellen. Hierbei gibt es Ansätze, das Modell als Ganzes zu erklären oder dieses durch ein verständlicheres Modell (ein Surrogate-Modell) zu ersetzen [10]. Auch im Anwendungsgebiet Industrie 4.0 kommen Ansätze der eXplainable AI (XAI) zunehmend zum Einsatz [11, 12].

Architektur eines KI-basierten Digitalen Zwillings

Kernelement des KI-basierten Digitalen Zwillings ist ein neuartiges, selbstlernendes Engineering-Modell. Ausgangsbasis hierfür ist ein Produkt- und Produktionsmodell, das Funktion, Verhalten und Produktgeometrie abbildet. Zum Einsatz kommen graphenbasierte Entwurfssprachen unter Einsatz der Unified Modeling Language [13, 14] und des Design Cockpit 43 [15] (Bild 1 oben). Der hier vorgestellte Ansatz ergänzt nun obige Produkt- und Produktionsmodelle um eine semantische Modellierung. Diese ermöglicht die ontologische Einordnung der Begriffe und Entitäten in den Gesamtkontext der Domäne und die Abbildung von Beziehungen und Wirkungszusammenhängen. Im Gegensatz zu klassischen Produkt- und Produktionsmodellen dient das semantisch reichhaltige Gesamtmodell nicht nur als ausdrucksstarker Input für Verfahren der künstlichen Intelligenz und des maschinellen Lernens, sondern auch zur Ablage der mittels KI gewonnenen Erkenntnisse über Wirkungszusammenhänge und Einflussfaktoren (Bild 1 rechts).

Das semantisch reichhaltige Modell als zentrales Element der Architektur wird technisch umgesetzt als Knowledge Graph, modelliert mittels der Web Ontology Language (OWL) und persistiert in der graphbasierten Datenbank GraphDB (**Bild 1** mitte). Dieser Knowledge Graph dient



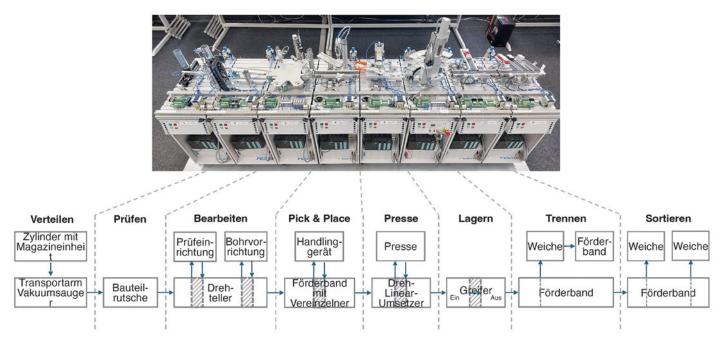


Bild 2: FESTO-Laboranlage mit Functional Mockup Units (FMUs).

als zentrale Wissensbasis für alle für den KI-basierten Digitalen Zwilling relevanten bzw. generierten Informationen.

Dieses Framework eignet sich zur integrierten, den Lebenszyklus überspannenden Abbildung von domainenübergreifenden Produkt- und Prozessdaten in den Bereichen Funktion, Verhalten, Struktur und Geometrie. Mittels Sensoren und Aktoren (beispielsweise eingebunden über ein Produktionsplanungs- und Steuerungssystem) werden Leistungsund Ausführungsdaten des Produktionsprozesses erhoben und im Sinne einer semantischen Annotation mit dem Produkt- und Produktionsmodell verknüpft. Mittels KI-Techniken aus dem Bereich des maschinellen Lernens werden die Leistungs- und Ausführungsdaten unter Zuhilfenahme des semantischen Modells ausgewertet und Erkenntnisse über Wirkungszusammenhänge und Ablaufmuster in Form von KI-Modellen generiert. Diese werden anschließend wiederum im Sinne eines selbstlernenden Digitalen Zwillings in das Gesamtmodell integriert und dienen als Input für die Simulation von Produktionsabläufen.

Mittels Techniken aus dem Bereich XAI erfolgt eine automatische Erklärung und Beschreibung der KI-Modelle, z. B. durch die Charakterisierung einflussreicher Features oder eine Layerwise Relevance Propagation. Die Simulation des Systemverhaltens und die Erklärung der zugrundeliegenden KI-Modelle stellen dann die Schnittstelle des Digitalen Zwillings zum Endnutzer, z. B. Produktionsleiter oder -mitarbeiter, dar.

Ein zentrales Konzept des vorgestellten Ansatzes ist die Zerlegung des Gesamtsystems in Functional Mockup Units (FMUs) [14, 16], die jeweils eine eigenständige Dynamik und ein eigenständiges Verhalten aufweisen. Das gesamte Systemverhalten ergibt sich dann aus dem Zusammenspiel aller durch Output/Input-Beziehungen verknüpften Functional Mockup Units (FMUs).

Die Zerlegung des Gesamtsystems in Functional Mockup Units wird hierbei bereits im Design Cockpit 43 modelliert. Ein zentrales Konzept der vorliegenden Architektur ist nun, das dynamische Verhalten der einzelnen FMUs nicht nur mittels fester Regeln oder mathematischer Gleichungen zu beschreiben (d. h. klassischer Verhaltensmodelle), sondern auf Basis der Ausführungs- und Leistungsdaten mittels ML-Verfahren automatisch und dynamisch zu erlernen. Für die im Design Cockpit 43 definierten FMUs und ihren Input und Output können entsprechende ML-Modelle gelernt und im KG bereitgestellt werden.

Alle relevanten Aspekte der Produkt- und Produktionsmodelle, d. h. vor allem die FMU-Definitionen und die Produkt- und Produktionsgeometrien, sowie neben den klassischen Simulations- und Verhaltensmodellen auch die ML-Modelle und Erklärungen werden der auf INTO-CPS (Integrated Tool Chain for Model-based Design of Cyber-Physical Systems) [16] basierenden Co-Simulation übergeben. Im Rahmen der Simulation des Systemverhaltens besteht die Möglichkeit, unterschiedliche ML-Modelle für die Berechnung des FMU-Outputs einzusetzen bzw. für den auf Basis des ML-Modells berechneten Output Erklärungen bereitzustellen. **Bild 1** zeigt die Gesamtarchitektur des Digitalen Zwillings mit allen Komponenten und deren Zusammenspiel.



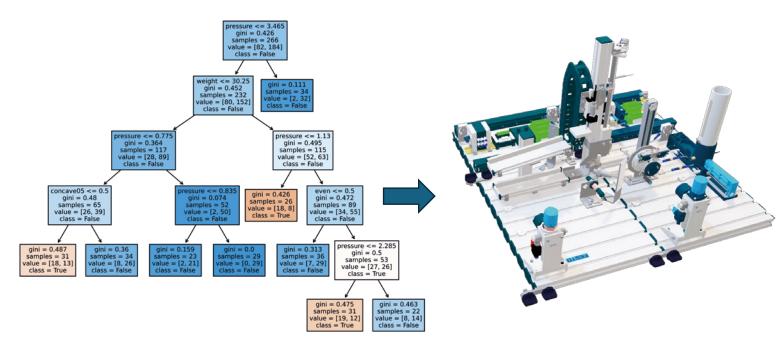


Bild 3: Entscheidungsbaum und graphische Simulation für die Functional Mockup Unit Bauteilrutsche.

Validierung anhand einer FESTO-Laboranlage

Als konkreter Anwendungsfall zur exemplarischen Umsetzung und Validierung dient in dieser Studie eine FESTO-Laboranlage. **Bild 2** (oben) zeigt die unterschiedlichen Module der FESTO-Laboranlage. Gemäß des oben vorgestellten Konzepts der Co-Simulation werden die Module der Anlage zunächst in einzelne Functional Mockup Units (FMUs) zerlegt und deren Output-Input-Zusammenspiel festgelegt (**Bild 2** unten).

Die Validierung wird exemplarisch gezeigt anhand der Functional Mockup Unit Bauteilrutsche im Modul "Prüfen". Um das Konzept des ML-basierten, selbstlernenden Digitalen Zwillings zu validieren, wurden für die FMU Bauteilrutsche für den erfolgreichen Rutschvorgang relevante Inputparameter festgelegt (Luftdruck Rutsche, Gewicht Bauteil, Krümmung Unterseite Bauteil etc.). Output der FMU ist die benötigte Zeit für den Rutschvorgang bzw. der Erfolg des Rutschvorgangs.

Zur Validierung des vorgestellten Ansatzes wurden alle Komponenten der Architektur für den Anwendungsfall Bauteilrutsche prototypisch umgesetzt, Ausführungsdaten mittels der Durchführung von Testdurchläufen generiert, auf diesen Ausführungsdaten das Systemverhalten gelernt und schließlich in der Co-Simulation im Sinne eines Digitalen Zwillings simuliert. **Bild 3** (links) zeigt ein Surrogate-Modell (d. h. ein Ersatzmodell zur Erklärung beliebiger Black-Box-Modelle wie Artificial Neural Networks) in Form eines Entscheidungsbaums, das auf Basis der erstellten

Ausführungsdaten das gelernte Systemverhalten der Bauteilrutsche repräsentiert. **Bild 3** (rechts) zeigt einen Ausschnitt der graphischen Simulation des Digitalen Zwillings mit der FMU Bauteilrutsche. Der Entscheidungsbaum dient als Basis für die Simulation des Systemverhaltens und dieses kann so für unterschiedliche Inputparameter vorhergesagt und simuliert werden.

Die FESTO-Laboranlage bildet einen gesamten Produktionsprozess ab, bestehend aus einer Vielzahl an Produktionsschritten und Bearbeitungsvorgängen. Sie eignet sich daher sehr gut für die Validierung des Konzepts der Co-Simulation, bei welcher der Gesamtprozess in Teileinheiten, sog. Functional Mockup Units (FMUs) zerlegt wird. Darüber hinaus wird jedes Modul der Anlage über eine speicherprogrammierte Steuerung (SPS) angesteuert und überwacht. Die generierten Ausführungs- und Leistungsdaten haben somit Realanlagencharakter.

Das vorgestellte Konzept der Co-Simuation ermöglicht nicht nur eine komplexe Modellierung einzelner FMUs, wahlweise mathematisch/physikalisch oder KI-basiert, sondern auch die Abbildung komplexer nebenläufiger Prozesse. Allerdings ist an dieser Stelle einschränkend festzuhalten, dass die im Rahmen der Validierung modellierten FMUs lediglich sequentiell verknüpft waren. Komplexe und nebenläufige Verknüpfungen von FMUs und die KI-basierte Modellierung deren Zusammenspiels war nicht Gegenstand der vorliegenden Validierung.



Neuartiges Konzept für einen KI-basierten, selbstlernenden Digitalen Zwilling

Gemäß der Idee der Co-Simulation wird das Gesamtsystem in Teilkomponenten zerlegt, sog. Functional Mockup Units (FMUs). Statt der klassischen physikalisch bzw. mathematischen Simulation des Verhaltens einer FMU wird dieses nun KI-basiert gelernt, während die oftmals aufwendige Bestimmung der Simulationsparameter entfällt. Techniken aus dem Bereich des eXplainable AI (XAI) ermöglichen die Beschreibung und Erklärung der ML-Modelle. Als zentrales Element der Architektur wurde das Konzept eines semantisch reichhaltigen Modells vorgestellt, das typische Produkt- und Produktionsdatenmodelle um eine semantische Modellierung erweitert und semantisch reichhaltige Informationen und Wissen als Input für bzw. Ergebnis von ML- und XAI-Verfahren repräsentiert. Prototypisch umgesetzt und validiert wurde der Gesamtansatz für eine FESTO-Laboranlage, wobei ausgewählte Stationen der Anlage als FMUs modelliert, analysiert und simuliert wurden. Hierbei konnte die Funktionsweise aller Komponenten aber auch der Gesamtarchitektur nachgewiesen werden.

Als nächste Schritte der laufenden Forschungsarbeit ist der Einsatz weiterer XAl-Techniken und insbesondere die natürlichsprachliche Beschreibung von ML-Modellen mittels Large Language Models (LLMs) und Retrieval Augmented Generation (RAG) geplant [17], sowie die Erprobung des Gesamtansatzes auf einer Realanlage. Die Anwendung des beschriebenen Ansatzes auf synthetische Simulationsdaten, generiert aus den im Design Cockpit 43 erstellten Ablaufmodellen, stellt ein weiteres vielversprechendes Einsatzgebiet dar.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts "KIDZ – KI-basierter digitaler Zwilling", gefördert von der Carl-Zeiss-Stiftung im Förderprogramm "Durchbrüche der KI".

Literatur

- [1] Grieves, M.: Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. White Paper. 2014. URL: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0,5&cluster=15300272734769108202, Abrufdatum 09.01.2025.
- [2] Burkhart, N.; Huber, M. F.: A Survey on the Explainability of Supervised Machine Learning. In: Journal of Artificial Intelligence Research 70 (2021), S. 245-317.
- [3] Anastasi, S.; Madonna, M.; Monica, L.: Implications of embedded artificial intelligence - machine learning on safety of machinery. In: Procedia Computer Science 180 (2021), S. 338-343, ISSN 1877-0509. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.171.
- [4] Rodrigues, J. F.; Florea, L.; Oliveira, M. C. F.; Diamond, D.; Oliveira, O. N.: Big data and machine learning for materials science. In: Discov Mater 1 (2021) 12, DOI: 10.1007/s43939-021-00012-0.

- [5] Toorajipour, R.; Sohrabpour, V.; Nazarpour, A.; Oghazi, P.; Fischl, M.: Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review. In: Journal of Business Research 122 (2021), S. 502-517. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.09.009.
- [6] Daniyan, I.; Muvunzi, R.; Mpofu, K.: Artificial intelligence system for enhancing product's performance during its life cycle in a railcar industry. In: Procedia CIRP 98 (2021), S. 482-487. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.138.
- [7] Arff, B.; Haasis, J.; Thomas, J.; Bonenberger, C.; Höpken, W.; Stetter, R.: Analysis and Visualization of Production Bottlenecks as Part of a Digital Twin in Industrial IoT. In: Applied Sciences 13 (2023) 6, S. 3525. DOI: https://doi.org/10.3390/app13063525.
- [8] Gräßler, I.; Wiechel, D.; Pottebaum, J.: Role model of model-based systems engineering application. In: IOP Conference Series Material Science and Engineering 1097 (2021) 012003. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/1097/1/012003.
- [9] Shaked, A.; Reich, Y.: Using Domain-Specific Models to Facilitate Model-Based Systems-Engineering: Development Process Design Modeling with OPM and PROVE. In: Applied Sciences 11 (2021) 1532. DOI: https://doi.org/10.3390/app1104153.
- [10] Lécué, F.: On the role of knowledge graphs in explainable Al. In: Semantic Web 11 (2020) 1, S. 41-51.
- [11] Christou, I. T.; Kefalakis, N.; Zalonis, A.; Soldatos, J.: Predictive and Explainable Machine Learning for Industrial Internet of Things Applications. In: 16th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS) 2020, Marina del Rey, CA, USA, S. 213-218.
- [12] Pilania, G.: Machine learning in materials science: From explainable predictions to autonomous design. In: Computational Materials Science 193 (2021), DOI: https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110360.
- [13] Grüble, T.; Stetter, R.; Schuchter, T.; Till, M.; Rudolph, S.: Combined Geometric and Kinetic Data Model in Model-Based Systems Engineering of Robotic Cells. In: Procedia CIRP 128 (2024), S. 156-161. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.005.
- [14] Saft, P.; Pfeil, M.; Stetter, R.; Till, M.; Rudolph, S.: Integration of geometry modelling and behaviour simulation based on graph-based design languages and functional mockup units. In: Procedia CIRP 128 (2024), S. 310-315. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.06.025.
- [15] IILS Ingenieurgesellschaft für Intelligente Lösungen und Systeme mbH. URL: https://www.iils.de, Abrufdatum 07.02.2025.
- [16] Larsen, P. G.; Fitzgerald, J.; Woodcock, J.; Fritzson, P.; Brauer, J.; Kleijn, Ch.; Lecomte, Th.; Pfeil, M.; Green, O.; Basagiannis, St.; Sadovykh, A.: Integrated tool chain for model-based design of Cyber-Physical Systems: The INTO-CPS project. In: 2nd International Workshop on Modelling, Analysis, and Control of Complex CPS (CPS Data) 2016, S. 1-6. DOI: https://doi.org/10.1109/ CPSData.2016.7496424.
- [17] Pan, S.; Luo, L.; Wang, Y.; Chen, C.; J. Wang, J.; Wu, X.: Unifying Large Language Models and Knowledge Graphs: A Roadmap. In: IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 36(7) (2024), S. 3580-3599, DOI: https://doi.org/10.1109/ TKDE.2024.3352100.









Fehlermanagement in der Produktion

Fehler in Produktionssystemen führen häufig zu Nacharbeiten oder Ausschuss, bergen jedoch wertvolle Lernpotenziale. Trotz Fehlermanagementsystemen ist die gewonnene Erfahrung häufig unzureichend strukturiert, insbesondere mit Blick auf vorhandenes Wissen. Eine Umfrage unter Fachkräften soll zeigen, wie sich Defizite im erfahrungsbasierten Fehlermanagement analysieren und Ansätze für eine effektivere Nutzung von Erfahrungswissen entwickeln lassen.

Schlüsselwörter

Fehlermanagement, Qualitätsmanagement, Erfahrungsbasierte Methoden, Produktion

Johannes Prior, M. Sc. arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme in der Arbeitsgruppe der Produktionsautomatisierung.

Milan Brisse, M. Sc. arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme in der Arbeitsgruppe der Produktionsautomatisierung.

Nikita Govorov, M. Sc. ist Student im Studiengang Sales Engineering and Product Management (SEPM) an der Ruhr-Universität Bochum.

Robert Egel, M. Sc. arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme in der Arbeitsgruppe der Produktionsautomatisierung.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter leitet den Lehrstuhl für Produktionssysteme an der Ruhr-Universität Bochum.

Kontakt

prior@lps.rub.de www.lps.ruhr-uni-bochum.de

DOI: 10.30844/I4SD.25.2.38



Fehlermanagement in der Produktion

Aktuelle Gegebenheiten und Herausforderungen in der Industrie

Johannes Prior, Milan Brisse, Nikita Govorov, Robert Egel und Bernd Kuhlenkötter, Ruhr-Universität Bochum

Die vorliegende Studie untersucht unter Teilnahme von 23 Unternehmen die Praxis des erfahrungsbasierten Fehlermanagements. Ziel dieser Untersuchung ist es, zentrale Kriterien für ein effektives Fehlermanagement in der Produktion zu identifizieren. Hierzu wurde ein Fragebogen mit 77 Fragen zu acht Themenbereichen entwickelt, darunter Fehlerkultur, Dokumentation, Ursachenforschung und softwaregestütztes Wissensmanagement. In der anschließenden Analyse werden positive und negative Maßnahmen herausgearbeitet, um daraus konkrete Handlungsempfehlungen zur Optimierung des erfahrungsbasierten Fehlermanagements abzuleiten.

Fertigungsunternehmen stehen vor zunehmend komplexen Herausforderungen, die insbesondere durch eine wachsende Vielfalt an Produktvarianten geprägt sind. Diese Entwicklung führt zu einer Reduktion der Losgrößen und erschwert die Produktionsprozesse aufgrund der erforderlichen Flexibilitätsanpassungen [1]. Die steigenden Anforderungen an Flexibilität sowie die zunehmende Komplexität der Produktionsabläufe erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Fehlern und Störungen maßgeblich. Störungen in vernetzten Produktionsabläufen können sich auf nachgelagerte Prozesse auswirken und die Leistungsfähigkeit der Systeme beeinträchtigen. Vor diesem Hintergrund wird es für Unternehmen immer wichtiger, geeignete Methoden zur schnellen Fehlererkennung und langfristigen Behebung von Ausfällen zu entwickeln, um die Effizienz ihrer Produktionssysteme nachhaltig zu sichern. [2]

Basierend auf einer Befragung von 23 Unternehmen untersucht diese Studie das erfahrungsbasierte Fehlermanagement in der Produktion.

Die Umfrage bietet ein aktuelles, branchenübergreifendes Bild des Fehlermanagements in der Produktion und berücksichtigt Herausforderungen sowie Ansätze als Grundlage für vertiefende Analysen.



Die ORCID-Identifizierungsnummern der Autoren dieses Beitrags sind einsehbar unter https://doi.org/10.30844/I4SD.25.2.38

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die die Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird.

Aktueller Stand der Forschung

Das Fehlermanagement in der Produktion stellt ein zentrales Element der Prozessoptimierung und Qualitätssicherung dar. In der Forschung wurden vielfältige Ansätze zur Fehlererkennung, -analyse und

-bewältigung entwickelt, die die Bedeutung einer systematischen Vorgehensweise zur Fehlervermeidung und zur kontinuierlichen Verbesserung hervorheben. Für die eigentliche Fehlerbearbeitung kommen etablierte Methoden, wie der 8D-Report, die 5W-Methode und die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), häufig kombiniert, zum Einsatz. So kann eine umfassende und effektive Problemlösung gewährleistet werden.

Ein anerkanntes Modell in diesem Bereich ist das Aachener Complaint and Failure Management Modell (CFM-Modell), welches einen umfassenden und datenbasierten Referenzprozess für ein integriertes Beschwerde- und Fehlermanagement bereitstellt. Dieses Modell gliedert sich in drei Ebenen: die operative Ebene zur Fehlererfassung und -behebung, die Führungsebene zur Koordination und Steuerung sowie die Supportebene zur Unterstützung durch Schulungen und IT-Infrastruktur. Ziel ist es, die Ursachen von Fehlern zu ermitteln, geeignete Maßnahmen zu entwickeln und deren Wirksamkeit zu überprüfen, um die Effizienz des Fehlermanagements langfristig zu verbessern [3]. Das Aachener Modell zielt darauf ab, eine strukturierte Vorgehensweise bereitzustellen, die diese Aufgaben systematisch unterstützt und eine konsistente Basis für Fehleranalysen und -lösungen schafft. [3]

Rüßmann et al. stellen dar, wie ein smartes Fehlermanagement, unterstützt durch Digitalisierung und Vernetzung, in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) implementiert werden kann. Dies beinhaltet die Nutzung einer mobilen App zur Erfassung von Fehlern und einer zentralen Managementkonsole zur Verwaltung der Daten. Die Implementierung solcher Systeme kann die Fehlerkultur verbessern und zu einer höheren Transparenz sowie einer optimierten Prozessgestaltung beitragen. [4]



Kriterium	Schätzwert	p-Wert	Mittelwert
Offene und häufige Kommunikation über Fehler	0.29	0.49	4,52
Nutzung von Fehlern als eine Verbesserungschance und einen Lernprozess	0,00	1.00	3,65
Unterstützung und Lösungsorientierung durch die Organisation	0.31	0.42	4,13
Ständige Durchführung von Schulungen	0.32	0.16	3,83
Systematische Erfassung und Dokumentation von Fehlern	0.38	0.14	3,74
Klare Richtlinien und Verfahren für die Erfassung von Fehlern	0.09	0.75	4,26
Zugänglichkeit der Dokumentation	0.34	0.31	3,83
Anwendung von spezifischen Geräten und Software zur Fehlererfassung	-0.24	0.25	3,91
Durchführung systematischer Fehleranalysen	0.31	0.26	3,83
Unverzügliche Durchführung von Fehleranalysen nach dem Auftreten des Fehlers	-0.15	0.58	3,91
Berücksichtigung aller fehlerbezogenen Daten	-0.35	0.17	4
Transparenz und Zugänglichkeiten von Fehleranalysen	0.38	0.07	3,57
Anwendung verschiedener etablierter Methoden zur Durchführung von Fehleranalysen	-0.05	0.64	3,57
Durchführung eingehender Fehleranalysen bei Wiederholung desselben Fehlers	-0.20	0.45	3,91
Suche nach ähnlichem Fall und Anpassung der alten Lösung an das aktuelle Problem	0.30	0.05	3,04
Kontinuierliche Umsetzung der Erkenntnisse in Verbesserungsmaßnahmen	0.56	0,01	3,48

Bild 1: Kommunikation und Fehlerkultur, Fehlererfassung und -dokumentation und Fehleranalyse und Ursachenfindung.

Bechschulte et al. entwickelten ein Prozessmodell, dass die manuelle Fehlererfassung in der Montage von Nutzfahrzeugen strukturiert. In Anbetracht der höheren Komplexität und Fehleranfälligkeit bei der kundenindividuellen Massenproduktion wurde ein fünfstufiges Modell konzipiert, welches alle Schritte von der Erfassung des Fehlerobjekts bis zur Ergänzung durch Freitextinformationen umfasst. Dieses Modell ermöglicht eine verbesserte Datenqualität sowie die Anwendung von Data-Analytics-Ansätzen zur Prozessoptimierung. [5]

Günther et al. beschrieben ein KI-gestütztes Decision Support System (DSS), das Daten aus der gesamten Wertschöpfungskette zur proaktiven Fehlererkennung und -vermeidung nutzt. Das System umfasst eine Dialogschnittstelle, eine Wissensdatenbank und einen Inferenzmechanismus, der auf evidenzbasierter Entscheidungsfindung basiert, um die Produktion und Wartung zu unterstützen. Darüber hinaus verwendet das DSS ein Expertensystem, das Unsicherheiten durch Wahrscheinlichkeiten modelliert und eine fundierte Entscheidungsfindung ermöglicht. [6]

Hellebrandt et al. entwickelten ein Modell für das Beschwerdemanagement in der Produktentwicklung, welches auf dem Analytischen Netzwerkprozess (ANP) basiert. Ziel ist es, Wissen aus technischen Beschwerden systematisch zu erfassen und in die Produktentwicklung zu integrieren. Das Modell besteht aus drei Modulen: Akquisition (Sammlung relevanter Informationen), Analyse (spezifische Fallanalysen und umfassende Fehlerdatenanalysen) und Verteilung und Nutzung (Transfer des gewonnenen Wissens in die Entwicklung). Die Ergebnisse zeigen, dass verschiedene Wissensmanagement-Lösungen je nach Phase der Wissensübertragung am effektivsten sind, und betonen die Relevanz strukturierter Ansätze zur Nutzung von Beschwerden als Wissensquelle. [7]

Methodischer Aufbau der Umfrage

Im Rahmen dieser Publikation wurde eine Umfrage durchgeführt, um die wesentlichen Kriterien für ein effektives, erfahrungsbasiertes Fehlermanagement in der Produktion zu identifizieren. Die Zielgruppe umfasste ausschließlich produzierende Unternehmen in



Kriterium	Schätzwert	p-Wert	Mittelwert	
Einsatz standardisierter Methoden und Prozesse zur Fehlerbehebung	0.28	0.15	3,65	
			0,00	
Nichtdurchführbarkeit/Durchführung von Maßnahmen zur Fehlerbehebung	-0.17	0.72	3,83	
Einsatz flexibler und anpassungsfähiger Methoden zur Fehlerbehebung	-0.07	0.73	3,43	
Nachhaltige Fehlerbehebung und -vermeidung als Ziel	0.24	0.24	4,26	
<u> </u>				
Regelmäßige Kontrolle von implementierten Maßnahmen	-0.14	0.63	3,39	
	•			
Kontinuierliche und ausführliche Dokumentation der Ergebnisse der Fehlerbehebung	0.41	0.08	3,48	
		0.44		
Transparenz und Zugänglichkeit der Ergebnisse der Fehlerbehebung	0.19	0.44	3,43	
	0.16	0.30	3,39	
Definierte Standards zur Wissenserfassung	0.16	0.30		
	0.33	0.06	3,74	
Systematische Speicherung von Daten in einer zentralen Fehlerdatenbank	0.55	0.06		
	-0.11	0.53		
Tranparenz und Zugänglichkeit der Fehlerdaten in der Fehlerdatenbank			3,3	
Paralmätina Internation des anuarhanen Kanntniasa in dia Braduktion	0.29	0.08	3,22	
Regelmäßige Integration der erworbenen Kenntnisse in die Produktion				
Ermutigung der Mitarbeitenden, ihre Erfahrungen zu dokumentieren	0.17	0.25	3	
Emuligung der milarbeitenden, inne Enamungen zu dokumentieren			3	
Überprüfen der Qualität der dokumentierten Fehlerberichte	0.11	0.50	2,96	
oberprüfert der Qualität der dokumentierterr i enlerbendite				

Bild 2: Fehlerbehebung und Wissensmanagement.

Deutschland, darunter Akteure aus der Automobil-, Pharma-, Nahrungsmittel- und Bauindustrie.

Die Mehrheit der Fragen wurde mittels einer Likert-Skala formuliert, um den Befragten die Möglichkeit zu geben, ihre Zustimmung oder Ablehnung differenziert auszudrücken. Diese Skala ermöglicht eine quantitative Analyse, indem sie qualitative Daten in messbare Werte transformiert [8]. Die Teilnehmenden auf einer abgestuften Skala folgende Optionen auswählen: "trifft gar nicht zu", "trifft eher nicht zu", "unentschieden", "trifft eher zu" und "trifft voll zu".

Die Likert-Skala ermöglicht eine differenzierte Erfassung von Meinungsnuancen und bietet gegenüber einfachen Ja-Nein-Fragen eine höhere Präzision. Sie generiert ordinalskalierte Daten, die einer statistischen Auswertung zugänglich sind, wodurch Mittelwerte, Standardabweichungen und Trends berechnet, sowie Antwortmuster identifiziert werden können. [9]

Ergänzend wurden optionale Freitextfelder eingefügt, um subjektive Perspektiven der Teilnehmenden zu erfassen.

Die Umfrage besteht aus acht Hauptkategorien, die eine umfassende Analyse der verschiedenen Aspekte des Fehlermanagements ermöglichen:

- 1. Kommunikation und Fehlerkultur
- 2. Fehlererfassung und -dokumentation
- 3. Fehleranalyse und Ursachenfindung
- 4. Fehlerbehebung
- 5. Wissensmanagement
- 6. IT-Systeme und technologische Unterstützung
- 7. Einsatz von KPIs
- 8. Unterstützung durch das Management

Jedes Thema wurde anhand ausgewählter Items operationalisiert. Die Auswahl erfolgte unter Berücksichtigung einer maximalen Umfragedauer von 15 Minuten.

Die Fragen zur Kommunikation und Fehlerkultur beinhalteten Aspekte wie die Offenheit der Kommunikation und die Wahrnehmung von Fehlern als Lernchancen. In der Kategorie Fehlererfassung und -dokumentation lag der Fokus auf Erfassungshäufigkeit, Dokumentationsrichtlinien und Zugänglichkeit der Dokumente. Fehleranalysen und Ursachenfindung beinhalteten Items zu Analyseprozessen, Dateneinbeziehung und Umsetzung der Ergebnisse. Die Fragen zur Fehlerbehebung betrachteten standardisierte Prozesse, Flexibilität und kontinuierliche Qualitätskontrollen. Wissensmanagementfragen betrafen Standards zur Wissensspeicherung, Datenzugänglichkeit und Integration von Erfahrungen in Produktionsprozesse. IT-gestützte Fragen umfassten den Einsatz spezifischer Software und von Geräten zur Fehlererkennung und



Kriterium	Schätzwert	p-Wert	Mittelwert
Automatisierte Fehlererkennung durch Geräte/Software	-0.59	0.31	3,17
Schnelle und einfache manuelle Fehlermeldung über Geräte/Software	0.27	0.27	2,7
Einsatz spezieller Geräte/Software zur Unterstützung der Fehleranalyse	0.35	0.43	3,22
Einsatz spezieller Geräte/Software zur Unterstützung der Fehlerbehebung	0.25	0.29	2,52
Sammeln und Analysieren von Mascinendaten durch Geräte/Software	0.52	0.12	2,74
Integration der Geräte/Software mit anderen Unternehmenssystemen	0.36	0.55	2,61
Intuitive und einfache Bedienung von Geräten/Software	0.76	0.23	2,65
Einsatz klar definierter KPIs	-0.50	0.17	4,09
Regelmäßige Überprüfung und Anpassung von KPIs an die aktuellen Produktionsanforderungen	-0.05	0.92	3,87
Regelmäßige Analyse von KPIs für die Mustererkennung	0.51	0.24	3,91
Nutzung der Ergebnisse von KPI-Analysen zur Fehlerbehandlung	0,04	0.91	3,65
Zugänglichkeit und Transparenz der KPI-Daten	0.19	0.54	3,43
Einsatz der KPIs zur Bewertung des Erfolgs der ergriffenen Maßnahmen	0.43	0,03	3,65
Ausreichende finanzielle Ressourcen	0.38	0.18	3,7
Ausreichende personelle Ressourcen	-0.17	0.58	3,3
Ausreichende Zeitressourcen	0.52	0,04	3,13
		1	

Bild 3: IT-Systeme und technologische Unterstützung, Einsatz von KPIs und Unterstützung durch das Management.

-analyse. Fragen zu Kennzahlen und KPIs beinhalteten deren Einsatz, Analyse und die Auswirkung auf die Effektivität der Maßnahmen. Der Abschnitt zum Management fokussierte sich auf die Bereitstellung von finanziellen, personellen und zeitlichen Ressourcen.

Die Umfrage wurde mithilfe des Online-Tools Sosci Survey (soscisurvey.de) erstellt, welches in Deutschland gehostet wird und kostenfrei für wissenschaftliche Zwecke genutzt werden kann. Rückschlüsse auf einzelne Unternehmen wurden durch die Anonymität der Teilnehmenden verhindert.

Um die Güte der erhobenen Daten zu überprüfen und Zusammenhänge zwischen den Variablen zu untersuchen, wurden Reliabilitätsanalysen und lineare Regressionsanalysen durchgeführt.

Die Reliabilitätsanalyse dient zur Prüfung der internen Konsistenz für die verwendeten Skalen. Damit wird ermittelt, ob die Antworten auf eine Gruppe von Fragen (sogenannte Items), die ein gemeinsames Thema messen sollen, untereinander gut zusammenpassen. Ein hoher Konsistenzwert zeigt an, dass die Skala verlässlich ist und ein

Konstrukt – also einen theoretischen Begriff wie "Mitarbeiterzufriedenheit" – einheitlich abbildet. [9]

Mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse wurde untersucht, wie unabhängige Variablen – sogenannte Prädiktoren – mit einer abhängigen Variable zusammenhängen. Die abhängige Variable ist in diesem Fall die abschließende Kontrollfrage: "Würden Sie sagen, dass das Fehlermanagement in Ihrer Produktion erfolgreich ist und die bisherigen Erfahrungen effektiv nutzt?" (die Beantwortung erfolgte anhand einer Likert-Skala). Als Beispiel könnte untersucht werden, inwiefern die Anzahl der Weiterbildungsmaßnahmen (Prädiktor) die Produktivität (Zielvariable) beeinflusst. Diese Methode ermöglicht es, den Einfluss einzelner Prädiktoren zu quantifizieren und in messbaren Zahlen darzustellen. [8]

Verlauf und Ergebnisse

Im Rahmen der durchgeführten Umfrage wurden mehr als 730 Unternehmen kontaktiert, von denen 23 die Umfrage vollständig ausgefüllt haben.



Die geringe Anzahl vollständig ausgefüllter Umfragen stellt eine Einschränkung hinsichtlich der statistischen Aussagekraft dar. Für eine fundierte Analyse wäre eine Mindeststichprobengröße von über 100 vollständigen Rückmeldungen erforderlich. Angesichts der begrenzten Stichprobengröße ist die Interpretation von p-Werten, die zur Bestimmung der statistischen Signifikanz herangezogen werden, nur bedingt möglich.

Auch bei einem hohen p-Wert bleibt die Aussagekraft der Ergebnisse fraglich, da die geringe Fallzahl die zuverlässige Schätzung der zugrunde liegenden Zusammenhänge beeinträchtigt. Der p-Wert gibt Die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass ein beobachteter Effekt oder Unterschied in den Daten rein zufällig auftritt, sofern die Nullhypothese zutrifft. [8]

Dennoch ermöglichen die vorliegenden Daten einen ersten qualitativen Überblick über potenzielle Trends und Muster innerhalb der untersuchten Themenbereiche. Die Erkenntnisse können als Ausgangspunkt für weiterführende Untersuchungen dienen und erste Hinweise auf Zusammenhänge und Einflussfaktoren liefern.

Die nachfolgenden Auswertungen der erhobenen Daten geben zunächst einen Überblick über die demographischen und beruflichen Merkmale der Teilnehmenden: Die Altersverteilung reicht von unter 25 bis über 65 Jahre, wobei die Altersgruppe 25–38 Jahre mit 34,8 % die größte Gruppe darstellte. Weitere 26,1 % waren zwischen 35 und 44 Jahre alt, während kleinere Anteile in den Altersgruppen 45–53 Jahre (8,7 %), 55–64 Jahre (26,1 %) und über 65 Jahre (4,3 %) verzeichnet wurden. Der Großteil der Befragten (87 %) war in Vollzeit beschäftigt.

Die Teilnehmenden nahmen unterschiedliche Positionen ein. Die häufigste Position war die des Qualitätsmanagers (34,8 %). Weitere Positionen umfassten Produktionsleitung (17,4 %), Qualitätsprüfung (8,7 %), Qualitätsingenieur (8,7 %) und Fehlerverantwortliche (4,3 %).

Die Dauer der Betriebszugehörigkeit variiert, wobei die größte Gruppe (65,2 %) seit mehr als 6 Jahren im Unternehmen tätig ist. Weitere 21,7 % arbeiten seit 3 bis 4 Jahren im selben Unternehmen.

Eine Aufschlüsselung der befragten Unternehmen nach ihrer Branche erfolgt nicht, da die Branchenzugehörigkeit nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Ergebnisse hatte.

Im Folgenden werden die verbleibenden Fragen, mit Ausnahme der Freitext- und Kontrollfragen, ihrer jeweiligen Kategorie zugeordnet und vorgestellt. Die zugehörigen Umfrageergebnisse werden durch den Mittelwert, den Schätzwert sowie den p-Wert ergänzt.

Der Mittelwert basiert auf der Likert-Skala, die von 1 bis 5 reicht und angibt, inwieweit das jeweilige Kriterium im Unternehmen vorhanden ist.

Der Schätzwert beschreibt den Einfluss der unabhängigen Variablen auf die abhängige Variable und quantifiziert, wie stark eine Änderung in der unabhängigen Variable (ebenfalls gemessen auf der Likert-Skala) die abhängige Variable beeinflusst. Er zeigt somit, ob und in welchem Umfang eine positive oder negative Beziehung zwischen den Variablen besteht.

Analyse der Ergebnisse

Die Untersuchung identifizierte zentrale Faktoren, welche die Effektivität und den Erfolg des Fehlermanagements in der Produktion beeinflussen.

Eine offene und regelmäßige Kommunikation zu Fehlern sowie eine umfassende Unterstützung und Lösungsorientierung seitens der Organisation sind entscheidend. Regelmäßige Schulungen und Workshops tragen ebenfalls zur Verbesserung bei, indem sie die Mitarbeitenden in der Fehlerbewältigung und einer konstruktiven Fehlerkultur schulen. Die qualitative Analyse betont die Notwendigkeit für persönliche Gespräche und transparente Darstellung von Fehlern und Maßnahmen für ein wirksames Fehlermanagement. Ebenso wichtig ist die Förderung einer positiven Einstellung zur Fehlerbetrachtung als Chance zur Verbesserung.

Für die Fehlererfassung und -dokumentation zeigen die Ergebnisse, dass die systematische Erfassung und Dokumentation von Fehlern den höchsten positiven Einfluss auf die abhängige Variable ausüben. An zweiter Stelle steht die Zugänglichkeit der Dokumentation. Klare Richtlinien und Verfahren zur Fehlererfassung weisen hingegen einen vergleichsweise geringeren Effekt auf die abhängige Variable auf. Den Ergebnissen zufolge hat die Nutzung spezifischer Geräte und Software zur Fehlererfassung sogar einen negativen Einfluss auf das Fehlermanagement.

Im Bereich der Fehlererfassung und Ursachenfindung zeigt sich, dass die kontinuierliche Umsetzung von Erkenntnissen aus Fehleranalysen den stärksten positiven Einfluss hat, gefolgt von Transparenz, systematischen Analysen und der fallbezogenen Anpassung von Lösungen. Negativ wirken sich die Anwendung etablierter Methoden, unverzügliche Analysen, Wiederholungsanalysen und besonders die Berücksichtigung aller fehlerbezogenen Daten aus. Die Ergebnisse betonen die Notwendigkeit einer kontextabhängigen Bewertung der Maßnahmen.

Die Ergebnisse im Bereich der Fehlerbehebung deuten darauf hin, dass eine kontinuierliche und ausführliche



Dokumentation der Ergebnisse den stärksten positiven Einfluss hat, gefolgt vom Einsatz standardisierter Methoden, dem Ziel einer nachhaltigen Fehlervermeidung und der Transparenz der Ergebnisse. Negativ beeinflussen hingegen flexible Methoden, unverzügliche Maßnahmen und die regelmäßige Kontrolle implementierter Maßnahmen, wobei letzteres den stärksten negativen Effekt aufweist. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer gezielten Auswahl von Methoden und Prozessen im Fehlermanagement.

Im Bereich des Wissensmanagements zeigen die Ergebnisse, dass die systematische Speicherung von Daten in einer zentralen Fehlerdatenbank den größten positiven Einfluss hat, gefolgt von der regelmäßigen Integration der erworbenen Kenntnisse in die Produktion und der Ermutigung der Mitarbeitenden zur Dokumentation ihrer Erfahrungen. Weniger ausgeprägt, aber dennoch positiv, wirken definierte Standards zur Wissenserfassung und das Überprüfen der Qualität der dokumentierten Fehlerberichte. Ein negativer Einfluss wird einzig bei der Transparenz und Zugänglichkeit der Fehlerdaten in der Fehlerdatenbank festgestellt.

Die Auswertungen im Bereich der IT-Systeme und technologischen Unterstützungverdeutlichen, dass das Sammeln und Analysieren von Maschinendaten durch Geräte und Software sowie die intuitive Bedienung von Geräten und Software den stärksten positiven Einfluss haben, gefolgt von der Integration dieser Systeme mit anderen Unternehmenssystemen.

Der Einsatz spezieller Geräte und Software zur Unterstützung der Fehleranalyse und die schnelle und einfache manuelle Fehlermeldung haben ebenfalls einen positiven Einfluss, während der Einsatz spezieller Geräte zur Fehlerbehebung einen geringeren positiven Effekt aufweist. Negativ wirken hingegen die automatisierte Fehlererkennung durch Geräte/Software an Produktionsanlagen.

Im Bereich des Einsatzes von KPIs zeigt sich, dass die regelmäßige Analyse von KPIs zur Mustererkennung den größten positiven Einfluss hat, gefolgt vom Einsatz der KPIs zur Bewertung des Erfolgs ergriffener Maßnahmen. Auch die Zugänglichkeit und Transparenz der KPI-Daten sowie die Nutzung der Ergebnisse von KPI-Analysen zur Fehlerbehandlung haben einen positiven Einfluss. Negativ wirken hingegen die regelmäßige Überprüfung und Anpassung von KPIs an aktuelle Produktionsanforderungen sowie der Einsatz klar definierter KPIs.

Im Bereich der Unterstützung durch das Management wird deutlich, dass ausreichende finanzielle Ressourcen den größten positiven Einfluss haben, gefolgt von ausreichenden Zeitressourcen. Ausreichend personellen Ressourcen im Bereich der Fehlermanagements üben jedoch einen leicht negativen Einfluss aus.

Systematische Fehleranalyse für mehr Produktionsleistung

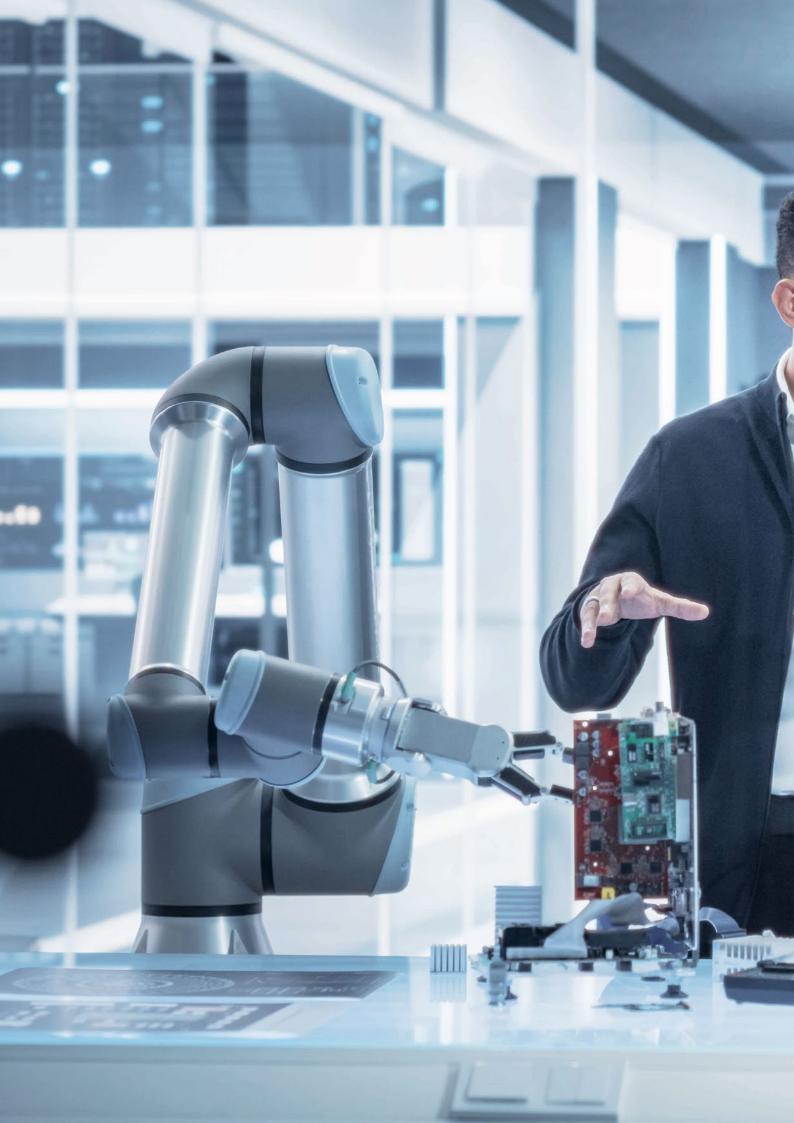
Die vorliegende Studie untersucht das erfahrungsbasierte Fehlermanagement in der Produktion. Durch eine Befragung von 23 produzierenden Unternehmen in Deutschland wurden Aspekte wie Fehlererkennung, -dokumentation, -analyse und -behebung untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine systematische Fehleranalyse sowie die Integration der Analyseergebnisse in die Produktionsprozesse entscheidend für eine nachhaltige Verbesserung der Produktionsleistung sind.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird weiterführend eine Methodik entwickelt, die darauf abzielt, ein verbessertes erfahrungsbasiertes Fehlermanagement in Unternehmen zu etablieren. Diese Methodik stützt sich auf einen Kriterienkatalog, der spezifischen Fehlerbildern zugeordnet ist.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts "erFeMa – Erfahrungsbasiertes Fehlermanagement im Kontext der Produktion", das von dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Kennzeichen 03SF0758 gefördert wird.

Literatur

- [1] Goldszmidt, M. et al.: Towards a Holistic Approach to Fault Management. In: Dependability and Computer Engineering: Concepts for Software-Intensive Systems. Hershey, PA 2012, S. 1–10.
- [2] Knüppel, K.; Meyer, G.; Nyhuis, P.: A universal approach to categorize failures in production. In: World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering 8 (2014) 2, S. 240.
- [3] Tuertmann, R. et al.: Conceptual modelling of the Failure management process in the manufacturing industry. In: Total Quality Management & Business Excellence 28 (2017) 9-10, S. 1041–1053.
- [4] Bosse, C. K.; Zink, K. J. (Hrsg): Arbeit 4.0 im Mittelstand. Berlin Heidelberg 2019, S. 267–273.
- [5] Beckschulte, S. et al.: Manuelle Fehleraufnahme bei Mass Customization. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (2021) 4, S. 188–192.
- [6] Guenther, R. et al.: Al-Based Failure Management: Value Chain Approach in Commercial Vehicle Industry. In: Procedia CIRP 109 (2022), S. 251–256.
- [7] Hellebrandt, T. et al.: Knowledge management framework for complaint knowledge transfer to product development. In: Procedia Manufacturing 21 (2018), S. 173–180.
- [8] Fromm, S.: Datenanalyse mit SPSS für Fortgeschrittene 2: Multivariate Verfahren für Querschnittsdaten. Wiesbaden 2012, S.397–402.
- [9] Willits, F. K. et al.: Another look at Likert scales. In: Journal of Rural Social Sciences 31 (2016) 3, S. 126–135. URL: https:// egrove.olemiss.edu/jrss/vol31/iss3/6, Abrufdatum 10.01.2025.





Die Lernfabrik "InTraLab"

Lernfabriken schaffen ein realistisches Umfeld, in dem Auszubildende Produktionsabläufe hautnah erleben und moderne Technologien zur Entwicklung praxisrelevanter Kompetenzen einsetzen können. Das Industrial Transformation Lab (InTraLab) vereint dabei reale Demonstratoren mit virtuellen Simulationen und bildet damit eine zukunftsweisende Lernplattform, die Teilnehmende beim Erwerb essenzieller Fertigkeiten für die Anforderungen der digitalisierten Arbeitswelt unterstützt.



Prof. Dr. Norbert Gronau ist Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls Wirtschaftsinformatik, insb. Prozesse und Systeme an der Universität Potsdam und Principal Investigator der Forschungsgruppe "Bildung für die digitale Welt" am Weizenbaum-Institut Berlin.



Schlüsselwörter

Lernfabrik, InTraLab, Kompetenzentwicklung, Didaktik, didaktisches Konzept, Gamification, Serious Games, Augmented Reality, AR, Virtual Reality, VR

Kontakt

malte.teichmann@wi.uni-potsdam.de www.lswi.de



Die Lernfabrik "InTraLab"

Digital transformierte Arbeit erfahren und lernen

Norbert Gronau und Malte Rolf Teichmann, Universität Potsdam

Lernfabriken bieten eine praxisnahe Umgebung zur Simulation von Produktionsprozessen, in der Lernende Kompetenzen durch direkte Anwendung neuer Technologien erwerben können. Das Industrial Transformation Lab (InTraLab) simuliert hybride Produktionspro-zesse und integriert reale Demonstratoren sowie virtuelle Simulationen. Dies ermöglicht Lernenden den Erwerb von Handlungskompetenzen und Fähigkeiten, die für die digital transformierte Arbeitswelt entscheidend sind.

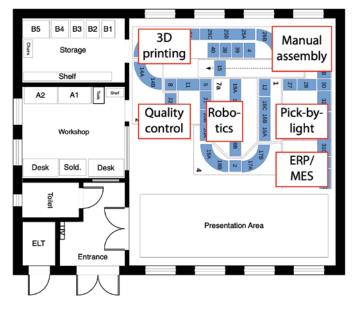
der menschlichen Arbeit umgeben von digitalen Artefakten (z.B. Assistenzsysteme, Roboter, 3D-Druck etc.) erlernt werden können. Hierfür werden Produktionsprozesse hybride simuliert. **Bild 1** zeigt den Grundriss des InTraLab.

Das InTraLab

Lernfabriken ermöglichen Simulationen von Produkten, Prozessen und Ressourcen in einer erlebnisorientierten Lernumgebung. Darin abgebildete interdisziplinäre sowie mehrdimensionale Lernsituationen ermöglichen es, Lernende bei der Entwicklung notwendiger Kompetenzen durch die direkte Anwendung von Lerninhalten zu unterstützen. Hierbei sind auch neue Technologien und verbundene Abläufe experimentierbar. Die Möglichkeit der passgenauen Konfiguration an die Erfahrungen der Lernenden sowie praxisorientierte Lerninhalte machen Lernfabriken zu einem didaktischen Instrument, das sowohl individuelle Interessen als auch unternehmerische Bedürfnisse in den Blick nimmt [1, 2].

Die Lernfabrik im Industrial Transformation Lab (InTraLab) am Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. Prozesse und Systeme bietet einen Lernort, in dem die Veränderungen

Bild 1: Grundriss InTraLab.



Lernen in hybriden Simulationsumgebungen

Die Simulationsumgebung des InTraLab basiert auf einem hybriden Ansatz zur Fabrikmodellierung, der eine physische Modellfabrik mit computergestützter Simulation kombiniert. Dabei kann für jede Komponente der Simulation die jeweils optimal geeignete Umsetzungsform gewählt werden. Dies erlaubt die Konfiguration notwendiger Produktionsobjekte (wie Maschinen, Werkstückträger etc.), die flexibel in die gewünschte Variante des Produktionsprozesses integriert werden können – und das unabhängig davon, ob sie als physisches Original, physisches Modell oder in virtueller Form realisiert sind. Dadurch kann eine Abbildung des benötigten Szenarios in der Modellfabrik entstehen.

Die praktische Umsetzung dieses hybriden Konzepts erfolgt durch eine Kombination aus physischen und virtuellen Modellen, die die zentralen Elemente der Simulationsumgebung, die sogenannten Demonstratoren, darstellen. Diese Demonstratoren ermöglichen in ihrem Zusammenspiel die Darstellung und Simulation vollständiger Produktionsprozesse [3]. Die Demonstratoren sind sowohl in stationären als auch in mobilen Ausführungen verfügbar (Bild 2.).

Jeder Demonstrator ist eine modulare Einheit, die in einer Box die Parameter eines spezifischen Produktionsobjekts konfiguriert. Durch Schnittstellen- und Kommunikationsmodule können die Demonstratoren mit anderen Komponenten interagieren (z. B. Robotern) und flexibel erweitert werden, beispielsweise durch zusätzliche Sensorik (z. B. Augmented-Reality-Brillen) oder Aktorik (z. B. einer Nebelmaschine).

Der Bearbeitungsvorgang wird sowohl auf der Vorder- als auch auf der Rückseite der Demonstratoren visualisiert. Die Bedienoberfläche zur Mensch-Maschine-Interaktion





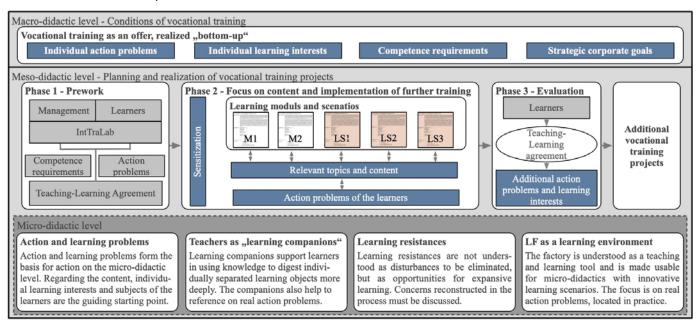
Bild 2: Übersicht Demonstratoren im InTraLab.

befindet sich auf der Oberseite der Demonstratoren und liefert relevante Informationen zu Produkt, Prozess und Auftrag [3]. Durch die Annäherung an die reale Produktion unterstützt die Simulation bei der Entwicklung von Handlungskompetenzen, die in digital transformierter Arbeit von Bedeutung sind [2, 4].

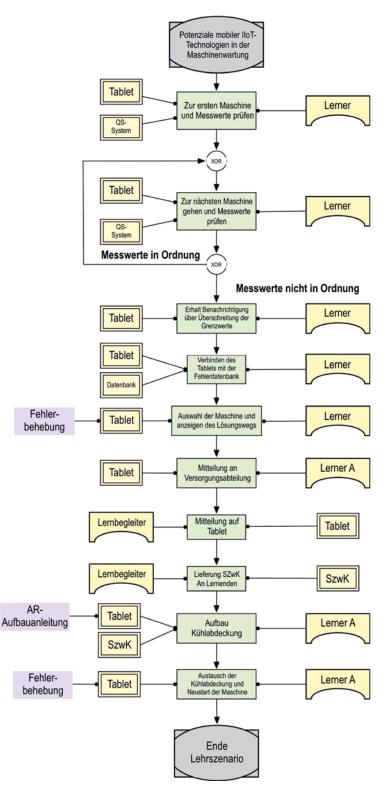
Das didaktische Konzept

Das didaktische Angebot des InTraLab umfasst eine zielgerichtete Programmplanung (z. B. die Erhebung von Lerninteressen) auf Ebene der Makrodidaktik. Die Ebene der Mesodidaktik beschreibt die Konzeption (z. B. die Auswahl geeigneter Themenbereiche, die auf die identifizierten Bedürfnisse eingehen) und die Umsetzung (z. B. die Aufbereitung der Inhalte in geeigneter Form) von

Bild 3: Didaktisches Konzept InTraLab.







Weiterbildungsprojekten. Auf Ebene der Mikrodidaktik wird die Gestaltung konkreter Lehr- und Lernsituationen beschrieben (**Bild 3**) [4].

Ein besonderes Merkmal des InTraLab ist dessen Flexibilität: in der Anlage lassen sich reale Produktionsprozesse simulieren, die Teilnehmenden eine Interaktion mit Werkstücken und Maschinen live ermöglichen. Mit Lernmöglichkeiten angereicherte Prozesse sind als Lernszenarien definiert. Neben individueller Handlungskompetenz sind spezifische Fähigkeiten (z. B. Programmieren) oder Softskills (z. B. Kommunikationsfähigkeit) schulbar.

Lernen in Lernszenarien

Die didaktische Struktur des Beispielszenarios "Potenziale mobiler IIoT-Technologien in der Maschinenwartung" ist in **Bild 3** dargestellt. Hier übernehmen die Teilnehmenden die Rolle einer Person, die für die Wartung der Maschinen zuständig ist. In dieser Rolle kann der gesamte Prozess der Qualitätssicherung erlebt werden, von der Prüfung eines Werkstücks bis hin zur Entscheidung über das weitere Vorgehen. Im Lernszenario werden die Lernenden mit den Herausforderungen digital transformierter Arbeit konfrontiert und lernen, wie diese durch den Einsatz von IIoT-Technologien bewältigt werden können [1].

Neben Lernszenarien kommen ebenfalls Lernbausteine zum Einsatz, die zielgerichtet basierend auf den Lerninteressen der Teilnehmenden eingesetzt werden können

Lernbausteine im Überblick

Die Lernbausteine sind ein zentrales Element des didaktischen Konzepts des InTraLabs. Sie ermögliche eine strukturierte, dabei aber auch ausreichend flexible Gestaltung von Weiterbildungsprojekten. Ausgangspunkt für Weiterbildungsprojekte ist immer eine Lehr- und Lernvereinbarung, die sowohl Lernziele der Teilnehmenden als auch Kompetenzbedarfe des Unternehmens adressiert. Tages- und Mehrtagesschulungen werden entsprechend der identifizierten und formalisierten Bedürfnisse auf Basis des vorliegenden Bausteinkataloges zusammengestellt.

Hier ist eine Mischung aus theoretisch-konzeptionellen Bausteinen und praxisorientierten Bausteinen angestrebt. Die Dauer der so erstellten Schulungen ist variabel. Tabelle 1 gibt einen Überblick über verschiedene Bausteine.

Bild 4: Didaktische Grundstruktur des Lernszenarios.



Nr.	Baustein	Beschreibung	Le	ernziele
1	Creative Thinking im WI-Thinking-Lab	FabLab, das komplementär zum InTraLab genutzt wird, um	•	Kennenlernen und Anwendung von Kreativitätstechniken
		verschiedene Kreativitätstechniken zu trainieren.		Erlernen von z.B. 3D-Druck und CAD Modellierung
2	ESCAPE-ZI4.0!	Innovatives EscapeGame, das Elemente von Serious Games	•	Verständnis für die Arbeit in der digital transformierten Produktion
		und Gamification nutzt, um die Grundlagen von digital transformatierter Arbeit im InTraLab zu erlernen.		Fähigkeit zur Problemlösung, Teamarbeit und kreatives Denken fördern
3	KI im Blick - unsichtbare Verzerrungen erkennen	•	•	Grundlagen für kritischen Umgang mit KI - Grundkenntnisse zum Konzept Bias (Verzerrung)
4	KI im Blick - Verzerrungen erkennen und Fairness gestalten	Ein Baustein, der aufbauend auf dem Grundlagenwissen zu KI deren Nutzung adressiert, wobei primär die Liquidierung von Bias im Fokus steht.	•	Erweiterter Kenntnisse zum Konzept Bias (Verzerrung)
			•	Entschärfung von Bias
5	Prozesspoker - Grundlagen der Prozessmodellierung	Ein SeriousGame, das die Grundlagen der Geschäfts-prozessmodellierung unter Zuhilfenahme von Pokerelementen spielerisch vermittelt.	•	Spielerisches Erlernen von KMDL und BPMN
			•	Grundlagen der Wertstromanalyse
6	Push-Pull Spiel	Spielerische Vermittlung zu Kenntnissen der Produktions- und	•	Grundlagen der Produktionsplanung
		Fertigungsplanung.	•	Veränderung der Produktion
7	Roboter Teach-In	Anwendungsorientierte Roboter Programmierung, wobei neben klassischen Konsolen auch Augmented- Reality genutzt wird.	•	Akzeptanz im Umgang mit Robotern
				Grundlagen der Roboterprogrammierung und -steuerung
8	Visualisierung von Kennzahlen in Dashboards	Vermittlung der Grundlagen von Produktionskennzahlen und Anwendung in Fallstudien.	•	Grundlagen der Dash-Board Programmierung
0	Auswahl von	<u> </u>		Interpretation von Kennzahlen Seminarreihe zum Thema
9	Standardsoftware	Vermittlung der Geschäfts- prozessdigitalisierung in sechs Workshops.		"Digitalisierung von Geschäftsprozessen"

Bild 5: Lernbausteine des InTraLab.

Maximale Immersion für Lernende im InTraLab

Zusammengefasst ermöglicht das InTraLab, moderne Technologien wie Augmented- und Virtual-Reality, kollaborative Roboter (Cobots), vernetzte Maschinen und intelligente Assistenzsysteme praxisnah zu erproben und im Handlungsvollzug eigenständig notwendige Kompetenzen aufzubauen. Durch die Kombination von realen und simulierten Produktionsentitäten wird ein hoher Grad an Immersion für die Lernenden erreicht. Der didaktische Ansatz ermöglicht es, individuelle Lerninteressen und betriebliche Kompetenzanforderungen mithilfe eines Bausteinsystems und von Lernszenarien zu adressieren.

Literatur

- [1] Gronau, N.; Teichmann, M.; Ullrich, A.: Development of the Industrial IoT Competences in the Areas of Organization, Process, and Interaction Based on the Learning Factory Concept. In: Procedia Manufacturing 2017, S. 8.
- [2] Teichmann, M.; Lettkemann, V.; Gronau, N.: Digitalization, Demographic Change and Decarbonization: Eight Pivotal Competencies for Learning Factories. Twente 2024.
- [3] Lass, S.: Simulationskonzept zur Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen. Potsdam 2017.
- [4] Teichmann, M.; Vladova, G.; Gronau, N.: Putting Subject-Oriented Learning into Practice A mesodidactic design framework for learning scenarios for manufacturing. In: SSRN Electronic Journal (2023).





Mit Digitalen Zwillingen den Budgetierungsprozess optimieren

Schluss mit Excel-Chaos und endlosen Abstimmungen! Denn Moderne Technologien helfen bei der Optimierung des traditionellen Budgetierungsprozesses: Digitale Zwillinge erlauben Simulationen verschiedener Budgetierungsszenarien. Zudem visualisieren Dashboards komplexe Daten und Zusammenhänge und ermöglichen die Integration von Voraussagen, während Process Mining sich zur automatisierten Analyse von Prozessvarianten und deren Effizienzmessung einsetzen lässt.



Prof. Dr. Bettina C. K. Binder ist Professorin für Controlling, Prozessmanagement und Strategische Unternehmensführung im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen an der Hochschule Pforzheim und seit 2011 AACSB akkreditiert.



Prof. Dr. Frank Morelli ist Professor für Wirtschaftsinformatik an der Hochschule Pforzheim. Er ist Ansprechpartner für das Celonis Academic Center of Excellence sowie für die SAP-University Alliances an der Hochschule Pforzheim.

Schlüsselwörter

Budgetierung, Digitale Zwillinge, Controlling, Dashboards, Process Mining

Kontakt

bettina.binder@hs-pforzheim.de www.hs-pforzheim.de



Mit Digitalen Zwillingen den Budgetierungsprozess optimieren

Dashboards und Process Mining für ein prozessorientiertes Performance Measurement

Bettina C. K. Binder und Frank Morelli, Hochschule Pforzheim

Die traditionelle Budgetierung gleicht oft einem mühsamen Marathonlauf voller Excel-Tabellen, manueller Abstimmungen und zeitaufwändiger Datensammlung. Moderne Unternehmen benötigen jedoch agile, datengetriebene Lösungen, die Transparenz, Effizienz und strategische Vorausschau ermöglichen. Digitale Technologien wie Digitale Zwillinge, Dashboards und Process Mining eröffnen diese Möglichkeit: Sie transformieren den Budgetierungsprozess von einem statischen Zahlenwerk zu einem dynamischen, simulationsfähigen Steuerungsinstrument. Statt sich in Detailarbeit zu verlieren, können Unternehmen hiermit Prozesse in Echtzeit analysieren, Szenarien durchspielen und fundierte Entscheidungen treffen.

Die Budgetierung startet typischerweise im Vertriebsbereich. Gerade die frühzeitige Absatzprognose pro Produktgruppe stellt oft eine große Herausforderung dar, da das bestehende Geschäftsjahr und dessen Verkaufszahlen häufig noch nicht im Controlling abgebildet sind.

Digitalisierung für eine bessere Voraussagbarkeit im Budgetierungsprozess

Integrierte IT-Systeme und durch Workflows automatisierte Prozesse verbessern die Voraussagbarkeit von Plandaten im Unternehmen. Der traditionelle Planungsund Budgetierungsprozess bindet im Controlling-Bereich häufig viele Kapazitäten. Digitale Zwillinge in Kombination mit Dashboards und Process Mining können Unternehmen darüber hinaus unterstützen, sowohl den Ist-Zustand des Budgetierungsprozesses zu visualisieren als auch mögliche Soll-Zustände über Prozesssimulationen aufzuzeigen und diese zu bewerten.

Der Planungs- und Budgetierungsprozess - traditionell und digitalisiert

Ein Budget ist ein formalzielorientierter, in wertmäßigen Größen formulierter Plan, der einer Entscheidungseinheit für eine bestimmte Zielperiode mit einem bestimmten Verbindlichkeitsgrad vorgegeben wird. Die sich daraus ergebende Budgetierung für das nächste Geschäftsjahr umfasst die Konkretisierung, Vorgabe sowie Kontrolle von Formalzielen. Sie bezieht sich auf die finanziellen Auswirkungen von Handlungen und dient der Erreichung wertmäßiger Ergebnisse [1].

Traditionelle Budgetierung

Traditionell besteht der Planungs- und Budgetierungsprozess nach Horváth aus 5 Bestandteilen wie in **Bild 1** dargestellt.

Daran anknüpfend wird im Logistik- und Produktionsbereich der Bestand inkl. des Sicherheitsbestands festgelegt. Darüber hinaus ist i. d. R. die Anzahl der aktiven Produktionsstandorte festzulegen. Ferner muss geklärt werden, welche Anlagen vorhanden sind bzw. welche Investitionen in neue Maschinen zu tätigen sind.

Eine wesentliche Planungsgröße für das Budget des nächsten Geschäftsjahres stellt die Personalplanung dar. Dabei werden die Köpfe ("Headcounts") und die Kapazitäten ("Full Time Equivalents") in den einzelnen Fachbereichen des Unternehmens festgelegt.

Daran anknüpfend erfolgt im Beschaffungsbereich die Festlegung des Materials der einzelnen Materialgruppen A, B und C, sowie der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (RHB), die man im Produktionsgeschäft benötigt. Damit können die einzelnen Lieferanten angesprochen werden, welche Artikel voraussichtlich im neuen Geschäftsjahr in welcher Menge und zu welchem Zeitpunkt bestellt werden. Mit dem Materialeinkauf auf der einen Seite ist auch die Bevorratung in Kommissions- und Zentrallagern auf der anderen Seite verbunden. Damit kann man den Bestand planen, der sich in Summe über alle RHB-Stoffe, Fertigprodukte und sonstige Hilfs- und Betriebsstoffe in der Position Vorräte in der Bilanz wiederfindet.

Der erste Abschnitt der Aktions- und Mengenplanung ist damit beendet, indem verschiedene Mengen wie die Anzahl der zu produzierenden Artikel, die Anzahl der beschäftigten Personalkapazitäten und die Anzahl der bestehenden und neuen Maschinen geplant wurden.

Der Budgetierungsprozess wird im zweiten Abschnitt im Controlling finalisiert und nach der endgültigen Abstimmung des Budgets mit der Geschäftsführung zusammen-



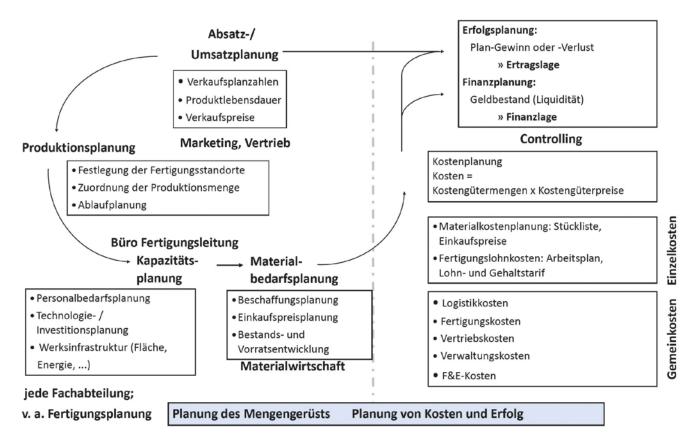


Bild 1: Planungs- und Budgetierungsprozess [2].

geführt. Dabei werden alle ausgefüllten Planungstemplates der Fachbereiche ins System eingelesen, sodass die Basisinstrumente der Gewinn- und Verlustrechnung (G&V) des Cash-Flow-Statements und der Bilanz ausgefüllt vorliegen. Viele Unternehmen führen den jährlichen Budgetierungsprozess auf Basis historischer Daten durch, z.B. mit Hilfe von Excel, da soviele unterschiedliche Daten benötigt werden. Die wenigsten Firmen verwenden dazu bereits digitale Zwillinge die den Budgetierungsprozess abbilden und detaillierter beschreiben könnten.

Innovative Technologien zur Optimierung des Budgetierungsprozesses

Um schneller im Budgetierungsprozess zu werden und eine bessere Voraussagbarkeit der Planungsdaten zu erhalten, bietet es sich an, neue Technologien zu nutzen.

Digitale Zwillinge ("Digital Twins") lassen sich als virtuelle Abbildung eines realen Produktes oder Prozesses beschreiben. Diese innovative Technologie basiert im Unterschied zu digitalen Modellen ("Digital Models") und digitalen Schatten ("Digital Shadows") auf einem vollständig automatisierten, beidseitigen Datenaustausch zwischen realem und digitalem Objekt (siehe **Bild 2**).

In der zugehörigen Fachliteratur bestehen erhebliche Unterschiede im Hinblick auf die Definition [4]. Zum Grundkonsens gehört allerdings, dass die Simulation und die Entwicklung infrastruktureller Voraussetzungen im Mittelpunkt stehen. Dabei gilt es Standards zu schaffen.

Betrachtet man den traditionellen Budgetierungsprozess als Modellansatz, lässt sich durch Digitale Zwillinge eine Erweiterung erzielen: So kann die digitale Budgetierung als "single source of truth" Daten zusammenführen und im gesamten Lebenszyklus verwenden. Ist-, Plan- und Soll-Daten lassen sich um synthetische Daten für Simulationen ergänzen. Die künstlich erzeugten Datensätze können für Szenarien genutzt werden, um Risiken zu evaluieren. Dies erleichtert die Ausgestaltung von Was-wäre-wenn-Untersuchungen. Ferner können sie für die Generierung von Prognose- und Forecastwerten eingesetzt werden [5]. Ein Digitaler Zwilling lässt sich als übergreifender Ansatz für die nachfolgenden innovativen Technologien verstehen, um eine Prozessoptimierung und eine datenbasierte Unternehmenssteuerung zu ermöglichen.

Moderne BI-Tools mit zugehörigen Dashboards bieten integrierte und kollaborative Lösungen für Planung, Simulation und Forecasting. Ferner ist es möglich, mit ihnen Workflow-, Sicherheits- und Versionierungsmechanismen einzubinden. Zugehörige Plattformen vereinen Daten aus unterschiedlichen Quellen und heben die Trennung zwischen Reporting und Planung auf. Dashboards sind ge-



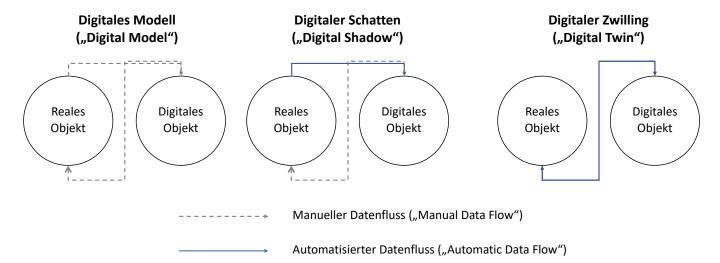


Bild 2: Digital Models - Digital Shadows - Digital Twins [3].

eignet, um Daten und deren Zusammenhänge durch ihre Visualisierung zu verstehen und zu nutzen [6]. Sie werden in verschiedenen Bereichen, etwa der Business Intelligence, eingesetzt und verwenden verschiedene visuelle Elemente wie Grafiken, Diagramme und Charts, um Informationen leicht erfassbar zu machen. Ein effektives Dashboard-Design ist entscheidend für die klare und effiziente Vermittlung von Informationen und ermöglicht es den Benutzern, fundierte Entscheidungen zu treffen und wertvolle Erkenntnisse aus Daten zu gewinnen. Sie lassen sich aufgrund von Designprinzipien wie den "International Business Communication Standards" generieren [7]. In Verbindung mit Kennzahlen ermöglichen sie eine Entscheidungsunterstützung im Prozess.

Process Mining hat sich in den letzten Jahren als erfolgreiches Hilfsmittel für Prozessanalysen etabliert [8]. Während die Budgetierung sich auf die inhaltliche finanzielle Planung und Steuerung konzentriert, lassen sich mit Hilfe von Process Mining generell Prozessabläufe untersuchen. Dieser Ansatz ist geeignet, um bestehende Geschäftsprozesse automatisiert auf Varianten und deren Effizenz zu untersuchen (siehe **Bild 3**). Process Mining erweist sich deshalb als geeignet, um Automatisierungspotenziale für Planungs- und Budgetierungsprozesse zu nutzen sowie für eine verbesserte Transparenz bei der Entscheidungsfindung zu sorgen.

Process Mining stützt sich auf Ereignisprotokolle ("Event Logs"), die Informationen über Prozessaktivitäten, Zeitstempel und beteiligte Akteure in Kombination mit Stammdaten aus vorgelagerten IT-Systemen erfassen. Mit geeigneten KPIs lassen sich Ereignisprotokolle mit relevanten Attributen generieren. Automatisch erzeugte Ist-Prozessmodelle ermöglichen es im Rahmen der Prozessentdeckung ("Discovery"), Diskrepanzen, Engpässe und Abweichungen vom beabsichtigten Ablauf zu erkennen. Mithil-

fe der Übereinstimmungsprüfung ("Conformance Checking") mit einem Soll-Prozess bzw. erlaubten Aktivitäten kann man interne Kontrollen unterstützen. Process-Mining-Dashboards und die Verknüpfung mit weiteren digitalen Technologien (z. B. Machine Learning) können dabei helfen, die Ursachen für Prozessineffizienzen oder -abweichungen zu ermitteln. Weiterhin lassen sich Budgetprozess-Analysen in Echtzeit durchführen, um die Prozesseffizienz zu überwachen und Bereiche mit Verbesserungsbedarf zu identifizieren.

Insgesamt kann man die Automatisierungsmöglichkeiten des Process Mining dazu nutzen, um die Prozesstransparenz zu erhöhen, Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren und die Ressourcenzuweisung zu optimieren. Fortschrittliche Process-Mining-Tools sind darüber hinaus in der Lage, Simulationsfunktionen zur Messung potenzieller Auswirkungen von Änderungen zur Verfügung zu stellen.

Digitalisierte Budgetierung

Wie und welche Instrumente innerhalb des oben beschriebenen traditionellen Budgetierungsprozesses angewandt werden können, kann in einem integrierten Konzept aus einem Digitalen Zwilling in Kombination mit einem Bl- und Process-Mining-Dashboard wie folgt aussehen:

Die Meldung der Absatzzahlen für das folgende Geschäftsjahr stellt den Vertriebsbereich alljährlich vor Probleme. Nicht alle Messen sind bereits abgelaufen, Berichte zu Absatzzahlen von Neuprodukten des Außendienstes sind subjektiv und Absatzprognosen für die einzelnen Vertriebsregionen unterscheiden sich stark. Eine grundsätzliche digitale Schnittstelle des Vertriebssystems über die abgesetzten Artikel in den letzten 5 Jahren schafft Klarheit und kann als Planungsgrundlage für den Budgetierungsprozess im nächsten Jahr herangezogen werden. Das



manuelle zeitaufwändige Abfragen der Planungsdaten der einzelnen Vertriebsbereiche entfällt. Der Vertriebsleiter gewinnt mehr Zeit für die Erhöhung des Umsatzes im letzten Halbjahr. Die Vertriebsplandaten für die Absätze im nächsten Jahr werden automatisch extrahiert und mithilfe einer Process-Mining-Software mit dem Konzept des Digitalen Zwillings verknüpft.

Gerade im Logistik- und Produktionsbereich ist eine automatisierte Visualisierung der Ist-Prozessstrukturen mithilfe von Process Mining hilfreich.

Die Prozessvisualisierung kann als Grundlage für ein ganzheitliches Geschäftsprozessmanagement dienen: Soll-Aktivitäten, -Teilprozesse und -Hauptprozesse lassen sich modellieren und für ein Process Performance Measurement als innovatives Controlling-Instrument einsetzen [10]. Entsprechende Ergebnisse lassen sich für die Budgetierung nutzen.

Mit der Personalplanung über das Gesamtunternehmen werden die Prozessstrukturen der einzelnen Fachbereiche mit den geplanten Kapazitäten verknüpft. Gerade die teuren Personalkosten liefern als Ergebnis einer Analyse Anhaltspunkte, wo Optimierungspotenziale bestehen, die sich idealerweise als Challenge in den Budgetierungsprozess des nächsten Geschäftsjahres integrieren lassen. Hier bietet sich eine Abbildung des Personalplanungsprozesses über einen Digitalen Zwilling an.

Beim Einkauf des Materials können in einer prozessbasierten Digital-Twin-Strategie sehr gut Soll-Ist-Abgleiche der Materialmenge und des Preises im Vergleich zu den Vorjahren durchgeführt werden. Kritische Prozessabweichungen werden durch Simulationen sichtbar [11], wenn z. B. ein Lieferant krisenbedingt nicht liefern kann und zu einem höheren Einkaufspreis auf einen anderen Lieferanten umgestellt werden muss, was in der Budgetierung zu höheren Plankosten führt.

Verbesserungen durch Process Mining lassen sich gerade am Ende des Budgetierungsprozesses erzielen, wenn die Controlling-Abteilung die Plandaten transparent machen muss

Herausforderungen für die digitale Budgetierung

Digitale Zwillinge lassen sich als Abbild realer Produkte oder Prozesse charakterisieren und bilden den konzeptionellen Ausgangspunkt für den Einsatz von Business-Intelligence- und Process-Mining-Lösungen. Im vorliegenden Modellfall ist der Budgetierungsprozess vollständig in das Event Log eines Process-Mining-Tools zu überführen. Hierzu eignet sich der sogenannte "Extraction-Transformation-Loading (ETL)"-Ansatz: Der ETL-Prozess ermöglicht es Unternehmen, Daten aus heterogenen Quellen zu konsolidieren, zu vereinheitlichen sowie für Analysen und Berichterstattung nutzbar zu machen. Um dies zu realisieren, müssen relevante Datenquellen identifiziert und zugehörige IT-Schnittstellen ("Application Programming Interfaces – APIs") geschaffen werden.

Der Process-Mining-Ansatz erfordert es, dass Prozessschritte mit einem Zeitstempel protokolliert werden. Generell basiert er auf sogenannten "Process-Aware Information Systems" (PAIS). Dabei handelt es sich um Softwaresysteme, die operative Geschäftsprozesse auf Basis von Prozessmodellen verwalten und ausführen [12].

Bild 3: Process Mining Konzept [9].

Stammdaten **Event Log** Benutzer Aktivität 01-01-2009, 8:35 am Sara Iones Bestellung anlegen 10001 estellung drucken und senden 03-01-2009, 12:13 am ara Jones 10001 Wareneingang 07-01-2009, 07:01 Uhr ete Scott 10001 ara Jones Rechnung scanner 10001 10-01-2009, 10:30 Uhr 10002 Bestellanforderung erstelle 02-02-2009, 13:17 Uhr ohn Farme 10002 Bestellung anlegen 02.04.2009, 9:15 Uh ara Jones 10002 27-02-2009, 6:53 am rank Mille Wareneingang 10002 28-02-2009. 13:00 Uhr Sara Jones 10002 chnung buchen 13-03-2009, 11:59 Uhr Carol Hope 10003 Rechnung scannen 13-04-2009, 10:00 Uhr ara Jones 17-04-2009, 17:30 Uhr 10003 Bestellung drucken und sende Carol Jope 10003 27-04-2009, 16:23 Uhr

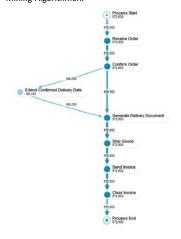
30-04-2009, 8:50 am

ara Jones

Datenmodell

Prozessmodell

Generierung eines (formalen) Prozessmodells aus den Prozessdaten mit Hilfe von Process-Mining-Algorithmen.



Prozessanalyse und -verbesserung

Prozess Performance

Warum sind diese Fälle verspätet? Wo gibt es Engpässe? Welche Ressourcen sind überlastet?

Prozess-Conformance

Wie oft wird gegen das Vier-Augen-Prinzip verstoßen? Welche Aktivitäten werden häufig übersprungen? Welche Ressourcen verursachen eine Abweichung?

Prozess-Verbesserung

Wo sollen die Aktivitäten geändert werden? Wie sollte der Prozess umgestaltet werden? Welche Aktivitäten könnten automatisiert werden?

Rechnung bucher



Für die Konzeption eines Business-Intelligence-Dashboards ist die Auswahl geeigneter Kennzahlen unabdingbar. Ferner spielen standardisiertes Design, funktionale Anforderungen und Usability eine wichtige Rolle. Hierzu zählt u. a. das sogenannte "Responsive Design", d. h. die automatisierte Anpassungsmöglichkeit an verschiedene Geräte und Bildschirmgrößen.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht müssen Plandaten für die Budgetierung generiert werden, um Soll-Ist-Abgleiche realisieren zu können. Es benötigt Szenario-basierte Simulationsdaten, um zukunftsorientierte Perspektiven wie etwa Risikoaspekte besser evaluieren zu können.

Erfolgsmessung bei digitalen Budgetierungsprozessen

Die Festlegung von qualitativen und quantitativen Key Performance Indicators (KPIs) wird v. a. für Dashboards relevant, in denen diese Kennzahlen sich als Wert bzw. als Grafik integrieren lassen. Neben der Auftragsbearbeitungs- und Produktionszeit kann die Forderungslaufzeit bzw. die Budgeteingabezeit im System gemessen und optimiert werden. Kostenmäßig interessant sind Kennzahlen wie die Personalkosten, Kosten der einzelnen Prozesse wie die Einkaufskosten oder Produktions- und Vertriebskosten, die idealerweise mit dem Vorjahr bzw. dem Trend verglichen werden können. Auch qualitative Kennzahlen wie die Reklamationsquote oder die Weiterbildungsrate spielen innerhalb einer Simulation für das Budget des nächsten Geschäftsjahres eine Rolle, da Maßnahmen zur Senkung der Reklamationsquote und Erhöhung der Weiterbildungsrate kostenmäßig verabschiedet und in den Budgetierungsprozess aufgenommen werden müssen.

Digitale Zwillinge, Dashboards und Process Mining setzen Prozessverständnis voraus

Die Abbildung und das Controlling von Unternehmens- und Auftragsabwicklungsprozessen helfen generell, eine bessere Transparenz im Unternehmen zu schaffen. Darüber hinaus schafft ein integriertes Konzept aus Digitalem Zwilling, Dashboarding und Process Mining im Budgetierungsprozess erhebliche Verbesserungspotenziale [13]. Die Vorarbeiten dazu im Controllingbereich sind zahlreich, wie etwa die Prozessvisualisierung mit geeigneten Visualisierungstools zu erstellen und geeignete Steuerungskennzahlen innerhalb von Dashboards anzulegen. Grundsätzlich muss ein weitreichender Einblick in die Ist-Prozesse gewährleistet sein. Das bedeutet, dass Controller Kennzahlen- und Prozessverständnis benötigen.

Literatur

- [1] Hauer, G.; Ultsch, M.: Unternehmensführung kompakt. München 2010.
- [2] Horvath, P.; Gleich, R.; Seiter, M.: Controlling, 15. Auflage. München 2024.
- [3] Singh, M.; Fuenmayor, E.; Hinchy, E. P.; Qiao, Y.; Murray, N.; Devine, D. M.: Digital Twin: Origin to Future. In: Applied System Innovation (2021) 4, DOI: https://doi.org/10.3390/asi4020036.
- [4] Klostermeier, R.; Haag, S.; Benlian, A.: Digitale Zwillinge. In: Meinhardt S.; Pflaum A. (Hrsg): Digitale Geschäftsmodelle Band 1. Wiesbaden 2019, S. 255–270.
- [5] Morelli, F.; Schnabel, K.: Controlling: Predictive Analytics und Forecasting. In: WISU – Das Wirtschaftsstudium 51 (2022) 1, S. 77-83, 111.
- [6] Baars, H.; Kemper, H.-G.: Business Intelligence & Analytics, 4. Auflage. Wiesbaden 2021.
- [7] International Business Communication Standards. URL: https:// www.ibcs.com/ibcs-standards-1-2/, Abrufdatum 08.01.2025.
- [8] Morelli, F.; Noé, F.: Process Mining. In: WISU Das Wirtschaftsstudium 10/2024, S. 921–926, 942–943.
- [9] Celonis SE: Einführung zu Process Mining (EMS). In: Präsentationsunterlagen "8c) Einführung zu Process Mining (EMS)",Celonis Academic Alliance, 41 Seiten, München 2023
- [10] Binder, B. C. K.; Morelli, F.: Innovative Controlling-Instrumente – agil und stimmig eingesetzt. In: Controller-Magazin 1 (2024), S. 70–76.
- [11] Nasca, D.; Munck, J. C.: Controlling-Hauptprozesse: Einfluss der digitalen Transformation, Zukunft vs. Vergangenheit: Planung, Budgetierung und Forecast in Zeiten der digitalen Transformation. URL: https://www.haufe.de/finance/haufefinance-office-premium/controlling-hauptprozesse-einflussder-digitalen-transformation_idesk_PI20354_HI12076805.html, Abrufdatum 08.01.25.
- [12] Van der Aalst, W. M. P.: Process-Aware Information Systems: Lessons to Be Learned from Process Mining. In: Jensen, K.; van der Aalst, W. M. P. (Hrsg): Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. Lecture Notes in Computer Science, Bd. 5460. Berlin Heidelberg 2009.
- [13] Ehrich, J.: 4 Schritte: Erstellen Sie Ihren digitalen Zwilling mit Process Mining. 2010. URL: https://der-prozessmanager.de/aktuell/news/process-mining-4-schritte-zum-digital-twin, Abrufdatum 27.12.2024.



Sie haben ein Problem mit Ihrem ERP-System?

Wir lösen es!

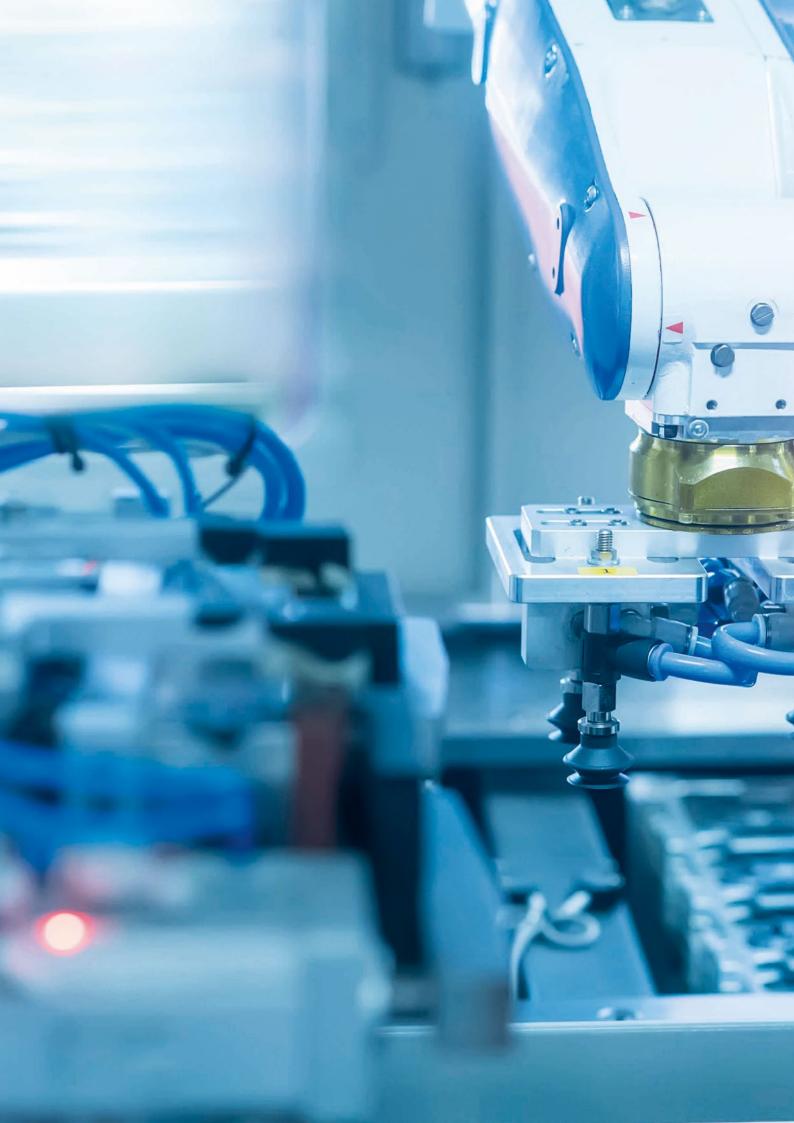
Als Spezialist für Wertschöpfung durch Informationssysteme verfügt PCG über 25-jährige Expertise in den Bereichen Strategie, Wachstum, IS-Integration, IS-Upgrade, Prozesseffizienz, Post-Merger-Integration und Business-IS-Alignment.

National. International. Cross-Border.

IT-Advisory at the highest Level



Potsdam Consulting Advisory GmbH www.potsdam-consulting.com





Mehr Wettbewerbsfähigkeit für die Kleinserienproduktion

Die Zeit der festen Produktionsprozesse ist vorbei. Heutzutage verlangen Kunden eine stärkere Anpassung der Produkte an ihre Bedürfnisse, was automatisierte Produktionssysteme zu mehr Flexibilität hinsichtlich der Produkteigenschaften zwingt. Doch wie lassen sich Stückkosten auch in Kleinserien gering halten und diese somit wettbewerbsfähig gestalten? Eine Studie an einem durch autonome Robotersysteme erweiterten Blechproduktionssystem gibt Aufschluss.

Schlüsselwörter

kollaborative Roboter, Cobots, Bahnplanung, Fertigungsprozess, digitale Fertigung, Montageprozesse, Cyber-Physische Systeme, CPS, Industrie 5.0, Industrie 4.0



Walid Elleuch, M. Sc. MBA arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Siegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Montage. Er beschäftigt sich mit kollaborativen mobilen Robotern für flexible Produktionssysteme.



Dr.-Ing. Tadele Belay Tuli arbeitet als Oberingenieur an der Universität Siegen am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Montage. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Mensch-Roboter-Kollaboration für flexible Produktionssysteme.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Manns ist Leiter des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Montage an der Universität Siegen. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Modellierung und Simulation manueller Montageprozesse und die Kollaborative Robotik

Kontakt

walid.elleuch@uni-siegen.de protech.mb.uni-siegen.de/fams



Mehr Wettbewerbsfähigkeit für die Kleinserienproduktion

Skalierbare und flexible Rohkarosserie-Fertigungslinie mit kollaborativen mobilen Robotern

Walid Elleuch, Tadele Belay Tuli und Martin Manns, PROTECH - Institut für Produktionstechnik, Universität Siegen

Durch den höheren Bedarf für eine Anpassung von Produkten an Kundengruppen und -bedürfnisse sind Body-In-White produzierende Unternehmen mit einer höheren Variantenmontage in den späteren Phasen der Produktionslinie konfrontiert, wodurch die Produktionskosten pro Einheit steigen. Flexible Produktionsprozesse mit flexiblen Materialflüssen und Fertigungsabläufen sowie der automatischen Rekonfiguration von Werkzeugen sind die Säulen eines resilienten Produktionssystems. In diesem Artikel wird eine konzeptionelle Lösung für die flexible Karosserierohbau-Blechfertigung mit autonomen kollaborativen Robotersystemen vorgestellt, um die Produktkosten für einen höheren Wettbewerbsvorteil zu senken.

Herausforderungen in der skalierbaren und flexiblen Produktionslinie

Angesichts kürzerer Lebenszyklen und einer größeren Produktvielfalt muss die Automobilindustrie ihre Produktionssysteme flexibel und rekonfigurierbar gestalten, um mit den Marktentwicklungen Schritt zu halten. Die Herstellung von Blechen im Rohbau im Automobilbau findet meistens vor der Lackierung und der Integration von Elementen wie Motor und Fahrwerk in die Gesamtstruktur statt [1]. In jedem Rohbaufertigungsschritt definieren die Fertigungsprozesse die Geometrie und Struktur des Fahrzeugs [2]. Nach [2] handelt es sich bei solchen Rohbaufertigungsschritten um Hunderte von Einzelteilen, die zeit- und arbeitsintensiv – manuell – zu einem einzigen Produkt zusammengesetzt werden müssen. Dies macht solche Prozesse von hochqualifizierten Arbeitskräften abhängig und verursacht hohe Produktionskosten.

Auch in der Automobilindustrie übertragen die OEMs häufig Bauteile oder Teilkomponenten zur Produktion an die Zulieferer. Ein übertragenes Produktportfolio erfordert meist eine breite Palette von Rohbaukomponenten. Diese sind für mittelständische Zulieferer aufgrund der hohen Variantenvielfalt in kleinen Losgrößen mit den heutigen Fertigungstechnologien kaum wirtschaftlich zu produzieren. Statt solche Teile in großen Stückzahlen teuer und unrentabel herzustellen, könnte eine flexiblere, auf Varianten und Kapazität abgestimmte Produktion von geometrisch angepassten Bauteilen diese für mittelständische Zulieferer attraktiv und profitabel machen [3]. Bei diesem Ansatz erweisen sich Rohbaufertigungslinien als effektiv, indem weniger variantenreiche Montagesequenzen auf

frühere Stufen verlagert und variantenreiche Montage für spätere Stufen reserviert werden.

Laut einer 2021 durchgeführten Umfrage bei neun mittelständischen deutschen Unternehmen [4] liegt die durchschnittliche jährliche Losgröße bei rund 100 000 Stück. Bei flexiblen Produktionslinien für Seri-

enfertigungslinien können Markt- und technologische Herausforderungen aufgrund von Gestaltungsvariabilität, Produktionsvielfalt und -menge sowie Ressourcen- und Technologieknappheit auftreten. Viele Komponenten für die Serienfertigung werden in kleinen Stückzahlen produziert, was sie für mittelständische Zulieferer aufgrund erheblicher Rüstzeiten und Produktionsgemeinkosten unwirtschaftlich macht. Der Mangel an ausreichenden Ressourcen für die Aufrüstung der bestehenden Technologie und die weitere Automatisierung der Prozesse stellt eine große Herausforderung dar [5].

Es ist daher notwendig, neue Wege zur Kostensenkung und zur Erhöhung der Produktionsflexibilität zu erforschen [6].

Eine Lösung könnten rekonfigurierbare Produktionssysteme sein, denn diese vereinen die Reaktionsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit flexibler Produktionssysteme mit der hohen Produktionsrate dedizierter Produktionssysteme. Dies wird durch die sechs Hauptprinzipien erreicht: Personalisierung (Anpassung), Konvertibilität, Skalierbarkeit, Integrität, Modularität und Diagnostizierbarkeit [7].

Im Rahmen des SkaLaB-Projekts wird ein innovativer Ansatz einer rekonfigurierbaren Fertigungszelle vorgeschlagen, der durch die Verwendung von kollaborativen mobilen Robotern, von rekonfigurierbaren Fixier-und Spannvorrichtungen und additiven Fertigungstechnologien bei einer kundenindividuellen Massenproduktion einen Kostenvorteil für Produktionen mit kleinen Losgrößen bietet.





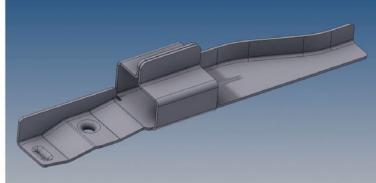


Bild 1: Beispielprodukt für das SkaLaB-Projekt.

Die SkaLaB-Lösung für eine rekonfigurierbare skalierbare Produktion mit kollaborativen mobilen Robotersystemen

Die mit montierten Armen und Regalsystemen ausgestatteten fahrerlosen Transportsysteme – auch mobile Manipulatoren genannt – spielen eine zentrale Rolle für die Flexibilität des Materialflusses in den Fertigungsabläufen. Darüber hinaus sind diese auch für die Rekonfigurierbarkeit der Werkstückbefestigungen und Fixier- und Spannvorrichtungen zuständig, was die Resilienz eines Produktionssystems erhöht.

Nach Angaben der International Federation of Robotics (IFR) gehören mobile Manipulatoren (MoMas) zu den drei wichtigsten Robotik-Trends im Jahr 2024 [8]. Der Markttrend zeigt auch eine Prognose eines jährlichen Wachstums von 16,8 % (CAGR), das von 513 Mrd. USD im Jahr 2024 auf 1208 Mrd. USD im Jahr 2030 ansteigen wird [9]. Ihre Fähigkeit, die Mobilität der Basis mit der Geschicklichkeit von Manipulatorarmen zu kombinieren, ermöglicht es

ihnen, in komplexen Umgebungen zu navigieren und gleichzeitig Objekte zu manipulieren, um Fertigungsaufgaben zu erledigen [10].

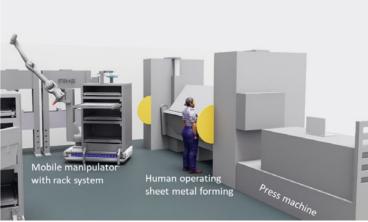
Darüber hinaus verbessern MoMas als Teil flexibler Produktionszellen die Anpassungsfähigkeit, sodass sich die Zelle für Produktanpassungen und Just-in-Time-Fertigung eignet. Die Bahnplanungsmethoden für die autonome Navigation ermöglichen es MoMas, problemlos zwischen Produktionszellen oder Werkshallen zu navigieren und schneller auf Änderungen der Produktionsabläufe oder Prozesse zu reagieren [11].

Die Aufgabe der SkaLaB-Zelle ist es, Karosseriebleche für Automobilhersteller herzustellen und die Stückkosten des Beispielprodukts (**Bild 1**) mit herkömmlichen Folgeverbundverfahren zu vergleichen.

Die SkaLaB-Fertigungszelle verfügt über Fertigungstechnologien wie Additive Fertigung (Laser Metal Deposition, 3D-Druck), Subtraktive Fertigung (Laserschneiden) und Deformation (Biegen und Pressen) und Fügen (Punkt-

Bild 2: Aufbau der SkaLaB-Produktionszelle: (links) Layout in der Draufsicht und (rechts) Frontansicht.







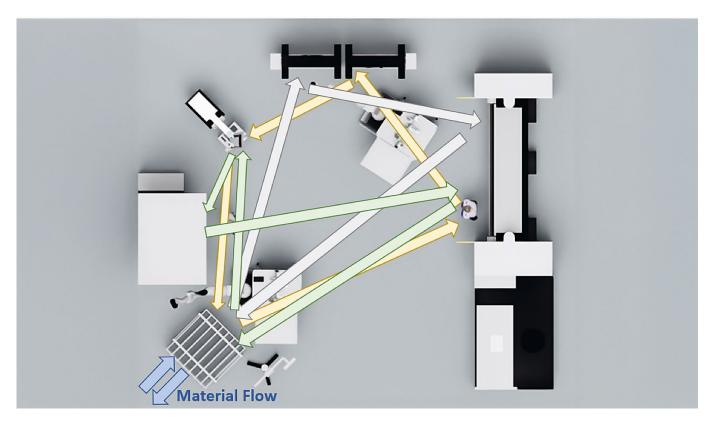


Bild 3: Reihenfolgeflexibilität des Herstellungsprozesses in der SkaLaB-Zelle.

schweißen), um das Beispielprodukt zu bearbeiten. In der Produktionszelle gibt es auch ein Schwerkraftregal als Schnittstelle für die Mitarbeiter außerhalb der Zelle, um die unbearbeiteten und bearbeiteten Bleche ein- bzw. auszuladen.

Der Materialfluss und die Handhabung werden von Roboterarmen durchgeführt, die mit verschiedenen Instrumenten – z. B. Fingergreifern, Vakuumgreifern und Schraubenziehern – ausgestattet sind. Diese Instrumente können auch neben der Produktlogistik die Rekonfiguration von Produktionsmaschinen.

Der Produktionsprozess wird durch einen Prozessgenerator definiert, der auf jedes Maschinensystem, die Arbeitslast und die Funktionalität in der Zelle zugreifen kann. Dieser Prozess wird auf Basis des CAD des Zielprodukts definiert. Ein Prozessorgenerator (genannt ProGen) ist ein Planungswerkzeug mit grafischer Benutzeroberfläche (GUI), das im Rahmen des SkalaB-Projekts entwickelt wurde. Sobald der Benutzer die CAD-Datei eines Blechteils über die GUI hochgeladen hat, werden die Fertigungsschritte aus den Produktmerkmalen extrahiert. Auf der Grundlage dieser Merkmale erstellt der ProGen unabhängig von den verfügbaren Maschinen ein Produktionsablaufszenario, das später an die vorhandenen und verfügbaren Maschinen in der Zelle angepasst wird.

Im nächsten Schritt wird eine Simulation der Fertigungsprozesse mit unterschiedlichen Schrittfolgen durchgeführt, gefolgt von Optimierungen und Verfeinerungen mit dem Ziel, einen schnelleren, kostengünstigeren oder umweltfreundlicheren Prozess zu erreichen. Der Prozess wird anschließend an die beiden hybriden Robotersysteme gesendet. Jeder Roboter besteht aus dem autonomen mobilen Roboter MAV® und dem 7-gelenkigen Roboterarm MAiRA®, der auf einer Z-Phi-Achse montiert ist, um Translations- und Rotationsbewegungen des gesamten Roboterarms zu ermöglichen. Neben den Komponenten des Roboterherstellers NEURA Robotics® wird auf dem MAV® ein neuartiges automatisches Regalsystem montiert, das die autonome Organisation und Montage der rohen und bearbeiteten Bleche ermöglicht.

Es verfügt über vier gesteuerte Schubladen für Lagerzwecke. Über dem Regalsystem befindet sich ein Schnellwechselsystem für die Werkzeuge, sodass der MAiRA®-Roboterarm das Werkzeug bei Bedarf leicht wechseln kann. In ähnlicher Weise ermöglichen die kollaborativen mobilen Roboter des SkaLaB (**Bild 2**) den Materialfluss zwischen verschiedenen Arbeitsstationen oder Zellen, wobei sie Hindernissen ausweichen und ihre Wege in Echtzeit optimieren. Diese Roboter sind mit einer Reihe von Greifern ausgestattet, die es ihnen ermöglichen, verschiedene Aufgaben wie Montage, Verpackung, Inspektion, menschliche Anwesenheit oder Hinderniserkennung zu überneh-



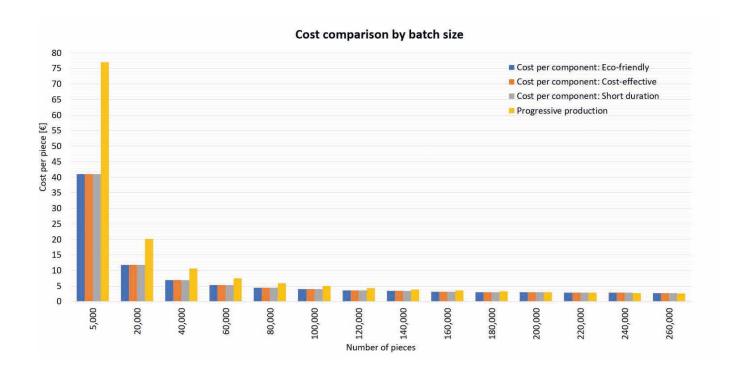


Bild 4: SkaLaB-Produktkostenvergleich nach Losgröße.

men. Diese Vielseitigkeit ermöglicht es dem Roboter, mehrere Aufgaben zu übernehmen und gleichzeitig einen schlankeren Betrieb zu gewährleisten.

Die zentrale Flexibilität des SkaLaB-Produktionskonzepts, die in **Bild 3** anhand mehrerer realisierbaren Szenarien dargestellt ist, liegt in der Sequenzgenerierung durch den Prozessgenerator ProGen. Es gibt keine vordefinierte Reihenfolge der Fertigungsschritte, da jede neue Produktion unterschiedliche Merkmale aufweist, die unterschiedliche Maschinen, Werkzeuge und Fertigungsabläufe erfordern. ProGen - das Gehirn der SkaLaB-Zelle - generiert zunächst den Fertigungsprozess unabhängig von den Maschinen, d. h. vollständig auf der Grundlage der Produktmerkmale, und passt dann die Prozessschritte an die in der Zelle verfügbaren Maschinen an. Im nächsten Schritt vergleicht sie die Szenarien verschiedener Modi wie "umweltfreundlich", "kostengünstig" und "schnelle Produktion". Basierend auf der Benutzerkonfiguration übernimmt der Master Controller die Führung von ProGen und beginnt mit der Orchestrierung der CNC-Maschinen mit dem automatischen Regalsystem und den mobilen Manipulatoren, um den Auftrag zu erfüllen und auszuliefern.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass SkaLaB ein flexibles Produktionskonzept ist, das sich an jedes Produkt und jedes Produktionszellen-Layout anpassen kann, solange die erforderlichen Maschinen und Prozesse den

SkaLaB-Standards entsprechen – einschließlich geometrischer Abmessungen, Toleranzen und Funktionalität.

Der Entwurf der SkaLaB-Produktionszelle ist in **Bild 2** dargestellt, wobei die Simulationsumgebung Nvidia® Omniverse Isaac Sim verwendet wird. Diese Umgebung simuliert den Herstellungsprozess und trainiert gleichzeitig die KI-Modelle anhand realistischer synthetischer Daten.

Diese Art von virtueller Umgebung und Digitalen Zwillingen steht im Einklang mit der zunehmenden Bedeutung der virtuellen Inbetriebnahme im Maschinen- und Anlagenbau in den letzten Jahren, da sie dazu beiträgt, Kosten zu senken und Probleme in frühen Phasen zu erkennen [12].

Demonstration und Validierung des Konzepts

Der innovative Teil des SkaLaB-Projektes liegt nicht nur in der Flexibilität des Produktionsprozesses, sondern auch in der autonomen Rekonfiguration der Spann- und Fixiervorrichtungen sowie in der Werkstückaufnahmen. Mit zwei autonomen fahrerlosen mobilen Manipulatoren werden diese Vorrichtungen autonom rekonfiguriert, was die Effizienz der Produktion erhöht. Diese Fixier- und Spannvorrichtungen sind auch derart konzipiert, dass sie



mit zwei Roboterarmen einfach für jede Produktgeometrie umzugestalten und zu rekonfigurieren sind. Für die Montage und Demontage dieser Aggregate können die Roboterarme ihre Endeffektoren wie Fingergreifer, Sauger und Schrauber je nach Bedarf für die Rekonfigurierung tauschen, wie im Beispiel der Punktschweißmaschine.

Somit schiebt die SkaLaB-Zelle die variantenbestimmenden Prozessschritte in Richtung des Prozesskettenendes. Dies hat den Vorteil, dass die Dauer der Produkteinführung gekürzt wird, denn der Produktionsprozess wird anpassungsfähig in Bezug auf unterschiedliche Produktgestaltungen und -Varianten.

Hinter der autonomen Handhabung und Rekonfiguration der Aggregate und Vorrichtungen mit den 7-Gelenken-Roboterarmen steckt eine agile Produktionsplanung, die je nach Produkt die Reihenfolge der Produktionsprozessabläufe anpasst. Während des Betriebs unterstützen zwei Digitale Zwillinge die Operationen der mobilen Manipulatoren. Einer läuft parallel zum echten Robotersystem in Echtzeit, während der zweite simuliert, was in den nächsten Sekunden stattfinden wird.

Dezentrale Steuerung

Die Verwaltung gleichzeitiger Produktionsaufträge verschiedener Blechgeometrien in derselben Zelle benötigt eine präzise und komplexe Steuerung, um die Wünsche des Benutzers mit den verfügbaren Ressourcen an Maschinen, Werkzeugen und rekonfigurierbaren Fixier- und Spannvorrichtungen zu erfüllen.

Nach der Generierung des Produktionsablaufs werden die entsprechenden Arbeitsschritte unter den CNC-Maschinen und den mobilen Manipulatoren aufgeteilt. Auf der Seite der CNC-Maschinen übernimmt eine Kopfsteuerung die Zuweisung der Arbeitsschritte an die Maschinen mit spezifischen Daten zu den für das zu bearbeitende Produkt passenden Werkzeugen und Fertigungsparametern. Die Steuerung der parallel agierenden mobilen Robotersysteme übernimmt die Handhabung der Produkte zwischen dem Schwerkraftregal und den einzelnen Maschinen wie Schwenkbiege-, Punktschweiß- und Pressmaschinen sowie die Rekonfiguration der Fixier- und Spannvorrichtungen.

Diese Tätigkeiten werden durch den Master Controller gesteuert, der über eine auf ProfiNet basierte OPC-UA Kommunikation zur Machine State die Befehle weiterleitet. Mit demselben Kommunikationsprotokoll gibt die Steuerung Befehle an die Robotersysteme über mit ROS2 programmierte Services, die für Roboter States, AMR Pfadplanung und, Roboterarmtrajektorienplanung, Kollisionserkennung, Sensorenschnittstellen und weitere zuständig sind. Parallel dazu findet eine Echtzeitsimulation

mit einem Digitalen Zwilling der kompletten SkaLaB-Zelle in der realitätsnahen Nvidia-Simulationsumgebung statt. Ein weiterer Digitaler Zwilling simuliert die in den nächsten Sekunden stattfindenden Schritte der SkaLaB-Zelle, um jede mögliche Herausforderung in der Intralogistik oder Auftragsabwicklung im Voraus zu erkennen und die Probleme zu bewerkstelligen.

Die Wettbewerbsfähigkeit der Kleinserienproduktion verbessern

Das Skalab-Konzept stellt eine neue Methode der Blechfertigung mit hoher Flexibilität und Autonomie dar, die neue Herausforderungen mit sich bringt, wenn es darum geht, eine höhere Produktvielfalt in derselben Produktionslinie oder -zelle zu gewährleisten. Es werden mehr Maschinen mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren, ein verbessertes Ressourcenmanagement sowie komplexere Bahnplanungsalgorithmen für mobile Manipulatoren benötigt.

Auf der anderen Seite werden sich neue Möglichkeiten ergeben, um die Wettbewerbsfähigkeit der Kleinserienproduktion zu verbessern, während sich für Metallhersteller, die autonome Produktionszentren mit höherer Rentabilität und kürzeren Lieferzeiten einrichten wollen, neue Geschäftsmöglichkeiten ergeben.

Abschließend bleiben noch einige Forschungsfragen hinsichtlich der Genauigkeit der Merkmalserkennung und der Optimierung der Bahnplanungsalgorithmen offen. Diese Fragen sollten in weiteren Forschungsprojekten untersucht werden. Ziel sollte es dann sein, das Konzept von SkaLaB zu verfeinern, bevor es bis zur Marktreife hochskaliert wird.

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des Programms "Zukunftsinvestitionen für Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie" (KoPa 35c) für das Projekt SkaLaB (Förderkennzeichen: 13IK025B).

Literatur

- [1] How Porsche ensures the quality. Porsche Newsroom 2016. URL: newsroom.porsche.com/en/company/porsche-quality-production-workshop-12502.html, Abrufdatum 28.02.2025.
- [2] Schützenberger, J.; Brandlhuber, F.; Reiniger, C.-D.; Manns, M.: Predictive model-based geometry adjustments of automotive body-in-white subassemblies. In: Procedia CIRP (2024), 128:90-5. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.05.094.
- [3] Giampieri A.; Ling-Chin, J.; Ma, Z.; Smallbone, A.; Roskilly, A. P.: Ein Überblick über die derzeitige Praxis der Automobilherstellung aus der Energieperspektive. In: Angewandte Energie (2020), 261:114074. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114074.



- [4] Schiller, M.; Frohn-Sörensen, P.; Engel, B.: 3D-Swivel-Bending-A Flexible and Scalable Forming Technology. In: Inal, K.; Levesque, J.; Worswick, M.; Butcher, C. (Hrsg): NUMISHEET. Cham 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06212-4_12.
- [5] ElMaraghy, H.; Schuh, G.; ElMaraghy, W.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M. u. a.: Produktvielfalt-Management. In: CIRP Annals 2013, 62:629-52. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.007.
- [6] Andersen, A.-L.; Brunoe, T. D.; Nielsen, K.: Reconfigurable Manufacturing on Multiple Levels: Literaturübersicht und Forschungsrichtungen. In: Umeda, S.; Nakano, M.; Mizuyama, H.; Hibino, N.; Kiritsis, D.; von Cieminski, G. (Hrsg): Fortschritte bei Produktionsmanagementsystemen: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth. Cham 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-22756-6_33.
- [7] Benyoucef, L.: Reconfigurable manufacturing systems: from design to implementation. In: Springer series in advanced manufacturing (2019). DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-28782-5.
- [8] Robotics IIF von. Top 5 Roboter Trends 2024. IFR International Federation of Robotics n.d. https://ifr.org/ifr-press-releases/ news/top-5-robot-trends-2024, Abrufdatum 11.01.2024.

- [9] Mobile Manipulator Market Revenue Trends and Growth Drivers. Markets and Markets n.d. URL: https://www.marketsandmarkets. com/Market-Reports/mobile-manipulator-market-167435958. html, Abrufdatum 11.01.2024.
- [10] Buerkle, A.; Eaton, W.; Al-Yacoub, A. u. a.: Auf dem Weg zu Industrierobotern als Dienstleistung (IRaaS): Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit, Sicherheit und Geschäftsmodelle. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (2023), 81:102484. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102484.
- [11] Ghodsian, N.; Benfriha, K.; Olabi, A. u. a.: Mobile Manipulatoren in der Industrie 4.0: A Review of Developments for Industrial Applications. In: Sensors (2023), 23:8026. DOI: https://doi. org/10.3390/s23198026.
- [12] Hale, K. S.; Stanney K. M. (Hrsg): Handbook of Virtual Environments: Design, Implementation, and Applications, 2nd Edition. Boca Raton 2014. DOI: https://doi.org/10.1201/b17360.





Warum der Einstieg in die Kreislaufwirtschaft gelingen muss

Angesichts der steigenden Ressourcenknappheit hat sich die Kreislaufwirtschaft als unverzichtbares Konzept etabliert. Anders als die traditionelle Linearwirtschaft orientiert sie sich an den zehn R-Regeln der Nachhaltigkeit, die von Vermeidung (Refuse) und Verringerung (Reduce) bis zu Recycling und Umnutzung (Repurpose) reichen. Unternehmen müssen evaluieren, welche dieser Prinzipien rasch umsetzbar sind und den größten Effekt erzielen.

Schlüsselwörter

Kreislaufwirtschaft, Klimaschutz, Ressourcenknappheit, Earth Overshoot Day, Nachhaltigkeitsgesetzgebung, wirtschaftliche Resilienz, Triple Bottom Line, Cradle to Cradle, R-Strategien, unternehmerische Nachhaltigkeit,



Prof. Dr. Ralf T. Kreutzer war von 2005 bis 2023 Professor für Marketing an der Hochschule für Wirtschaft und Recht/Berlin School of Economics and Law. Aktuell agiert er als Professor für Marketing, Trainer, Coach und Marketing-/Management-Consultant.

Kontakt

kreutzer.r@t-online.de www.ralf-kreutzer.de



Warum der Einstieg in die Kreislaufwirtschaft gelingen muss

Die zehn R-Regeln der nachhaltigen Unternehmensführung

Ralf T. Kreutzer, Hochschule für Wirtschaft und Recht (HWR) Berlin

Die Kreislaufwirtschaft ist aufgrund ökologischer Dringlichkeiten wie Klimawandel und Ressourcenknappheit unverzichtbar geworden, wobei der Earth Overshoot Day die Übernutzung verdeutlicht. Gesetze auf nationaler und EU-Ebene verpflichten Unternehmen zu mehr Nachhaltigkeit, während die Kreislaufwirtschaft auch die wirtschaftliche Resilienz stärkt, Innovationen fördert und Wettbewerbsvorteile schafft. Die Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt sind jedoch umstritten, da weniger Primärressourcen und neue Produkte benötigt werden. Eine nachhaltige Unternehmensführung sollte sich an der Triple Bottom Line orientieren: Planet, People und Profit. Im Gegensatz zur Linearwirtschaft verfolgt die Kreislaufwirtschaft das Prinzip "Cradle to Cradle" und integriert die zehn R-Regeln der Nachhaltigkeit. Diese Regeln reichen von Refuse (Vermeidung) und Reduce (Verringerung) bis hin zu Recycling und Repurpose (Umnutzung). Unternehmen müssen analysieren, welche Regeln schnell umsetzbar sind und den größten Einfluss haben, Verantwortlichkeiten festlegen und die Nachhaltigkeit in ihre Unternehmensstrategie integrieren. Recycling sollte dabei nur die letzte Option sein, da es das Ursprungsprodukt meist zerstört.

Global Footprint Network ermittelt diesen Tag jedes Jahr neu, basierend auf Faktoren wie Treibhausgasemissionen, Holzverbrauch und Abfallproduktion. Der Trend zeigt, dass der Erdüberlastungstag jedes Jahr früher eintritt: Während 1970 Verbrauch und Regeneration der Ressourcen noch weitgehend ausgeglichen waren, wurde der globale Erdüberlastungstag im Jahr 2024 bereits am 1. August erreicht (Bild 1). In Deutschland lag dieser Tag sogar noch früher, nämlich am 2. Mai 2024 [3].

Warum eine Kreislaufwirtschaft unverzichtbar ist

Die Einführung der Kreislaufwirtschaft wird heute als unumgänglich betrachtet. Da die Erde ein geschlossenes System ist, gibt es keine andere Möglichkeit für einen verantwortungsvolleren Umgang mit unseren begrenzten Ressourcen. Ökologische Gründe sind primäre Treiber für den Schritt in die Kreislaufwirtschaft. Der schnelle Verlust der biologischen Vielfalt und die fortschreitende Klimakrise machen eine Umstellung auf nachhaltigere Produktions- und Konsummuster unausweichlich.

Wissenschaftliche Berichte und Studien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), einer Institution der Vereinten Nationen, bestätigen die beschleunigte globale Erwärmung und betonen regelmäßig die Notwendigkeit, gegen diese verheerende Entwicklung anzugehen [6]. Der Anstieg des Meeresspiegels, das Schmelzen der Eisberge und die Zunahme extremer Wetterereignisse, wie Hitzewellen und Waldbrände, sind alarmierende Anzeichen dieses Trends.

Der Earth Overshoot Day, auch als Erdüberlastungstag bekannt, veranschaulicht deutlich die Übernutzung natürlicher Ressourcen. Dieser Tag definiert den Zeitpunkt im Jahr, an dem die Menschheit mehr natürliche Ressourcen verbraucht hat, als die Erde im gleichen Zeitraum regenerieren kann. Von diesem Zeitpunkt an verbrauchen wir Ressourcen auf Kosten zukünftiger Generationen. Das

Die Kreislaufwirtschaft kann wesentlich dazu beitragen, den ökologischen Fußabdruck der Menschheit zu reduzieren. Durch das Schließen von Kreisläufen lassen sich der Ressourcenverbrauch sowie die Entstehung von Abfall und Emissionen verringern. Dies ist angesichts der durch die vorherrschende Linearwirtschaft verursachte Ressourcenknappheit von großer Bedeutung. Die Kreislaufwirtschaft spielt eine entscheidende Rolle bei der Überwindung dieser Problematik. Vor diesem Hintergrund werden sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene vermehrt Gesetze verabschiedet, die Unternehmen zu mehr Nachhaltigkeit verpflichten.

Zudem fördert die Einführung der Kreislaufwirtschaft die wirtschaftliche Resilienz. Eine längere und wiederholte Nutzung von Ressourcen mindert die Abhängigkeit von den schwankungsanfälligen Rohstoffmärkten und erhöht die Widerstandsfähigkeit der Unternehmen gegenüber instabilen Lieferketten. Die Corona-Pandemie hat vielen Unternehmen schmerzhaft die Risiken aufgezeigt, die mit der Abhängigkeit von einzelnen Lieferanten und Ländern einhergehen. Auch der Preissteigerung bei Rohstoffen kann zumindest partiell entgegengewirkt werden, wenn Rohstoffe länger im Nutzungskreislauf gehalten werden.

Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft kann auch als Katalysator für Innovationen dienen. Neue Technologien und Geschäftsmodelle können die Basis für eine nachhaltigere Wirtschaftsweise bilden. Zudem können Unternehmen, die kreislauforientierte Lösungen implemen-



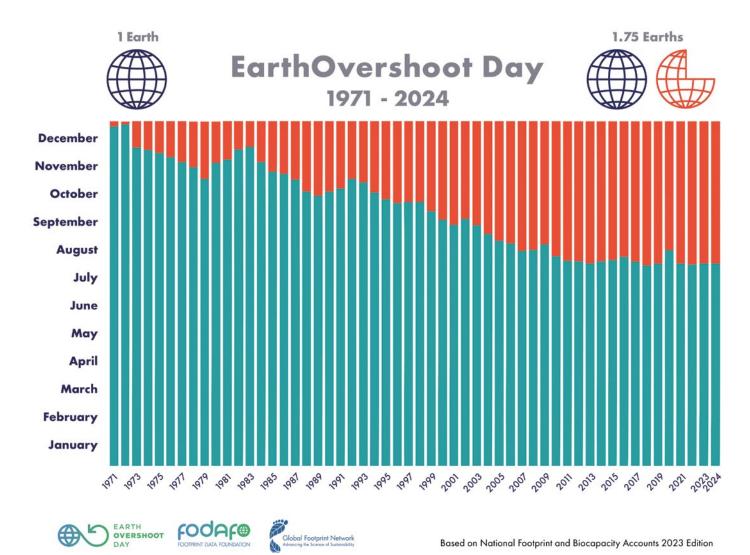


Bild 1: Past Earth Overshoot Days © Global Footprint Network, www.footprintnetwork.org.

tieren, Wettbewerbsvorteile bei Investoren, Mitarbeitern und Kunden erzielen, sofern sie ihre Versprechen durch konkrete Maßnahmen untermauern, diese überzeugend kommunizieren und die Kunden bereit sind, nachhaltigere Lösungen zu unterstützen.

Die Auswirkung der Kreislaufwirtschaft auf den Arbeitsmarkt sind Gegenstand kontroverser Debatten. Die Rückgewinnung von Rohstoffen führt dazu, dass weniger Primärressourcen wie Erze, Wasser, Luft etc. benötigt werden, was wiederrum Arbeitsplätze kosten wird. Ob und in welchem Maße diese durch neue Stellen ersetzt werden können, etwa in der Recyclingbranche, bleibt abzuwarten. Außerdem führt die längere Nutzung von Produkten dazu, dass insgesamt weniger neue Produkte produziert, verkauft und transportiert werden müssen. Dies wird ebenfalls negative Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt haben. Allerdings sind die langfristigen Effekte dieser Entwicklungen auf das Wirtschaftswachstum derzeit nicht vollständig abschätzbar. Gleichzeitig könn-

te die Kreislaufwirtschaft zur (partiellen) Bewältigung des Fachkräftemangels beitragen, wenn insgesamt weniger Arbeitskräfte benötigt werden. Wie sich diese Entwicklungen insgesamt auf das Wirtschaftswachstum von Ländern auswirken wird, kann heute noch nicht konsistent prognostiziert werden. Die Ergebnisse einschlägiger Studien kommen hier zu gegenläufigen Ergebnissen – teilweise abhängig vom jeweiligen Studien-Initiator [12, 14, 15].

Die Relevanz der Triple Bottom Line

Um nicht nur die Kreislaufwirtschaft, sondern eine nachhaltige Unternehmensführung zu fördern, empfiehlt sich eine Ausrichtung am Konzept der Triple Bottom Line [2, 9, 10]. Dieser Ansatz fordert Unternehmen auf, beim Management drei Dimensionen gleichzeitig und gleichberechtigt zu berücksichtigen:



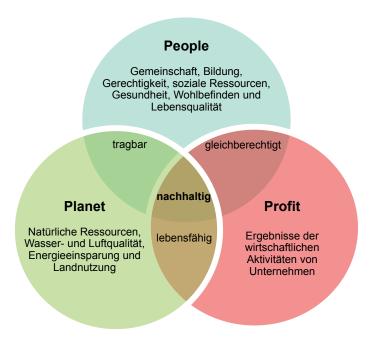


Bild 2: Triple-Bottom-Line-Konzept.

- Planet: Die ökologische Nachhaltigkeit bezieht sich auf die Umweltauswirkungen eines Unternehmens während der gesamten Wertschöpfungskette. Ziel ist es, Umweltbelastungen zu minimieren, was den verantwortungsbewussten Umgang mit natürlichen Ressourcen, die Reduktion von Abfall und Emissionen sowie die Berücksichtigung ökologische Auswirkungen bei der Produkt- und Dienstleistungsentwicklung einschließt.
- People: Die soziale Nachhaltigkeit betrifft die sozialen Auswirkungen und Verantwortlichkeiten eines Unternehmens, einschließlich des Schutzes der Menschenrechte, der Gewährleistung fairer Arbeitsbedingungen und der Investition in die Gesellschaft.
- Profit: Die ökonomische Nachhaltigkeit konzentriert sich auf die finanzielle Lebensfähigkeit eines Unternehmens. Die Erhaltung der Profitabilität ist essentiell, da ohne finanziellen Erfolg ein kommerzielles Unternehmen nicht bestehen kann.

Das Triple-Bottom-Line-Konzept motiviert Unternehmen und Manager dazu, ihre Leistungen auf eine umfassendere und ausgewogenere Weise zu erfassen und zu belohnen (**Bild 2**). Dieses Konzept verdeutlicht, dass Unternehmen ein integraler Bestandteil von Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt sind, und daher eine umfassende Verantwortung für deren Entwicklung und deren Erhalt tragen.

Von der Linear- zur Kreislaufwirtschaft

Die traditionellen Wachstumsstrategien basieren auf dem Konzept der Linearwirtschaft. In diesem System werden Ressourcen lediglich für eine einmalige Nutzung verbraucht, was oft als Wegwerfwirtschaft beschrieben wird. Das Motto "Cradle to Grave" – von der Wiege bis zur Bahre – veranschaulicht diese Herangehensweise.

Das grundlegende Prinzip der linearen Wirtschaft lässt sich durch die Schritte Take, Make, Use, Dispose zusammenfassen (**Bild 3**). Dieses Prinzip hat lange Zeit das menschliche und unternehmerische Handeln geprägt und zu einem extensiven Raubbau an Umwelt und Ressourcen geführt. Die Linearwirtschaft agiert unter dem Vorsatz unendlich verfügbarer und erneuerbarer Ressourcen. Dies ist allerdings bei Kohle, Erdöl, Erdgas, seltenen Erden etc. nicht der Fall!

Die Kreislaufwirtschaft, auch bekannt als Circular Economy, verfolgt das Prinzip "Cradle to Cradle" – von der Wiege zur Wiege [1, 5, 7, 11]. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, Ressourcen so lange wie möglich im Nutzungskreislauf zu halten, um deren Verbrauch zu minimieren. Einschlägige rechtlichen Regelungen definiert das Kreislaufwirtschaftsgesetz [8].

Die zehn R-Regeln der nachhaltigen Unternehmensführung

Die Kreislaufwirtschaft ist in die nachhaltige Unternehmensführung zu integrieren. Unternehmen sollten sich hierbei an den zehn R-Regeln orientieren. Die ersten drei Handlungsfelder gehören zwar noch nicht zur Kreislaufwirtschaft, sind aber ein wichtiger Bestandteilnachhaltiger Unternehmensführung (**Bild 4**).

1. Refuse

Refuse zielt darauf ab, den Einsatz bestimmter Rohstoffe, Produkte, Prozesse oder Geschäftsmodelle vollständig zu vermeiden, wenn diese nicht nachhaltig gewonnen, hergestellt oder gestaltet werden können. Unternehmen sollten auf nicht erneuerbare Ressourcen sowie auf Rohstoffe und Produkte aus nicht nachhaltiger Produktion verzichten. Dies schließt auch den Verzicht auf Prozesse ein, die Umwelt und Gesellschaft negativ beeinflussen. Refuse kann auch zur Aufgabe ganzer Geschäftsmodelle führen, wenn diese nicht nachhaltig gestaltet werden können.

Meist ist es für die Umwelt am besten, wenn Unternehmen durch Refuse auf die Verwendung von (endlichen) Rohstoffen und/oder die Freisetzung schädlicher Emissionen ganz verzichten.



Take Make Use Dispose Rohstoffe Herstellung von Produkten - Verbrauchen Deponieren

- Luft
- Wasser
- Landschaft
- Energie
- Arbeitskraft
- Erbringung von Dienstleistungen
- Gebrauchen
- Verbrennen
- Verklappen
- Vergessen

Bild 3: Konzept der Linearwirtschaft – Linear Economy.

2. Reduce

Reduce zielt darauf ab, den Ressourcenverbrauch zu minimieren und Abfall zu vermeiden, der aus unternehmerischen Aktivitäten resultiert. Folgende Maßnahmen können zur Umsetzung dieses Ansatzes beitragen:

- Optimierung von Prozessen entlang der Lieferkette: Reduzierung des Ressourceneinsatzes für die Gewinnung und den Transport von Rohstoffen, Teilen und Anlagen. KI-basierte Routenoptimierung und die Einbindung lokaler Zulieferer können helfen, Transportwege zu verkürzen.
- Optimierung von Prozessen entlang der eigenen Wertschöpfungskette: Verringerung des Einsatzes von Rohstoffen sowie von Energie, Wasser und Luft durch die Steigerung der Energieeffizienz und der Gesamtanlageneffektivität (Overall Equipment Effectiveness). Reduzierung der Erzeugung von Abfällen aller Art, etwa durch die Implementierung eines papierlosen Büros, die Reduzierung von Verpackungsmaterialien und den Einsatz von nachhaltig produzierten und/oder wiederverwendbaren Verpackungen.
- Optimierung entlang der gesamten Nutzungskette: Reduzierung des Ressourcenverbrauchs in der Nutzungsphase – bei der Auslieferung, dem Einsatz sowie der späteren Entsorgung.

Nach Refuse ist Reduce die zweitbeste Lösung, um den Ressourcenverbrauch und den Eintrag schädlicher Emissionen zu reduzieren.

3. Rethink

Rethink bedeutet, Produkte, Dienstleistungen und Prozesse neu zu denken oder grundlegend zu überarbeiten. Ziel des Rethink-Ansatzes ist es, bestehende Lösungen nicht nur leicht zu verbessern, sondern sie von Grund auf neu zu gestalten. Möglichkeiten für Rethink beinhalten:

 Umweltfreundliche Neugestaltung von Produkten und Dienstleistungen: Zum Beispiel der Ersatz von Plastikverpackungen durch kompostierbare Alternativen.

- Einführung von Leasing- oder Mietmodellen (Product as a Service): Anstelle des Verkaufs von Produkten erwerben die Nutzer hier kein Eigentum, sondern werden nur Besitzer. Die Produkte werden am Ende ihrer Nutzungsdauer zurückgegeben, weiterverwendet, aufbereitet oder recycelt und so länger im Nutzungskreislauf gehalten.
- Neugestaltung ganzer Geschäftsmodelle: Einige Energieunternehmen wechseln beispielsweise. von fossilen zu erneuerbaren Energien, während andere ihre linearen Modelle durch Kreislaufmodelle ersetzen.

Bei Rethink sind Lösungen ganz neu zu denken. Angebote sollen nicht nur 10 % besser werden, sondern zehnmal so gut.

Die obigen Maßnahmen zählen nicht zur Kreislaufwirtschaft – sind aber für eine nachhaltige Unternehmensverführung unverzichtbar. Für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft sind in jedem Unternehmen folgende Handlungsfelder auf ihre jeweilige Relevanz abzuklopfen:

4. Redesign

Redesign beschreibt die Überarbeitung oder Neugestaltung von Produkten, Dienstleistungen, Prozessen oder sogar ganzen Geschäftsmodellen, um diese sozial und ökologisch nachhaltiger zu gestalten. Im Gegensatz zum umfassenderen Rethink-Ansatz ist das Redesign weniger radikal [13].

Beim Redesign werden Produkte und Dienstleistungen so gestaltet, dass sie in der Herstellungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase weniger Ressourcen verbrauchen, weniger schädliche Emissionen freisetzen und weniger Abfall erzeugen. Außerdem wird das Produktdesign so angepasst, dass eine längere Lebensdauer der Produkte gewährleistet ist. Dies kann etwa durch den Verzicht auf eingebaute Veralterung wie bei Akkus mit begrenzter Lebensdauer in Smartphones geschehen. Außerdem werden Produkte so entworfen, dass sie leicht zu reparieren und aufzubereiten sind. Die verwendeten Materialien und Komponenten sind so gewählt, dass sie leicht demontierbar und recycelbar sind.



Refuse Reduce Rethink Redesign Reuse Repair Kreislauf-wirtschaft Refabrication/Remanufacturing Repurpose Recycle

Bild 4: Zehn R-Regeln der nachhaltigen Unternehmensführung.

Das Ziel von Redesign besteht darin, vorhandene Produkte, Dienstleistungen, Prozesse und/oder Geschäftsmodelle so umzugestalten, dass weniger Ressourcen verbraucht und weniger schädliche Emissionen freigesetzt werden.

5. Reuse

Reuse, d. h. die Wieder- bzw. Weiterverwendung, zielt darauf ab, die Nutzungsdauer von Produkten und Materialien zu verlängern, bevor sie recycelt oder entsorgt werden. Produkte und Materialien, die für Reuse in Frage kommen, werden häufig als "gebraucht", "Second Hand", "pre-used" oder "pre-owned" gekennzeichnet. Durch die Wiederverwendung von Produkten und Materialien werden nicht nur Ressourcen eingespart, sondern auch Abfallmengen reduziert.

Reuse kann auf verschiedene Arten umgesetzt werden:

- Wiederverwendung des gesamten Produkts: Beispiele hierfür sind Mehrwegflaschen, die immer wieder neu befüllt werden. Auch Bücher, Kleidung, Möbel, Fahrräder und Autos können neue Nutzer finden, wenn die bisherigen Nutzer sie nicht mehr benötigen.
- Erneuter Einsatz von Produktkomponenten: Einem Reuse können auch Komponenten zugeführt werden. Das ist bspw. bei elektronischen Bausteilen oder bei Autoteilen der Fall.

Zur Unterstützung des Reuse-Prozesses haben sich diverse Second-Hand-Läden und Plattformen etabliert, die den Weiterverkauf von gebrauchten Produkten ermöglichen. Zu den bekanntesten Anbietern zählen Amazon Marketplace, das Apple Trade-in-Programm, eBay, IKEA Zweite Chance, Rebuy und Zalando Pre-owned.

Reuse trägt besonders zur Ressourceneinsparung bei. Schließlich werden bereits hergestellte Produkte länger verwendet. Allerdings ist zu prüfen, wie deren Ressourcenverbrauch und deren Emissionen im Vergleich zu neuen Produkten zu bewerten sind (etwa bei Autos und Flugzeugen).

6. Repair

Repair, also die Reparatur von Produkten, zielt darauf ab, den Lebenszyklus von Produkten zu verlängern und Abfall zu reduzieren. Anstatt defekte oder veraltete Produkte zu ersetzen, wird durch Wartung und Instandsetzung deren Funktionalität erhalten oder wiederhergestellt. Hierdurch werden Primärressourcen geschont und Abfälle vermieden.

Heute sind Reparaturen oft noch aufwendiger und manchmal auch teurer als der Kauf eines neuen Produktes. Hersteller erschweren Reparaturen gelegentlich, indem sie Produkte "reparaturfeindlich" gestalten, etwa durch das Einkleben von Komponenten bei Smartphones. Das soll den Neukauf fördern.

Das EU-weite Recht auf Reparatur, das im Juli 2024 in Kraft getreten ist, markiert einen bedeutenden Meilenstein in der europäischen Verbraucherschutz- und Nachhaltigkeitspolitik. Die Richtlinie verpflichtet Hersteller bestimmter Haushalts- und Elektrogeräte, Ersatzteile zu angemessenen Preisen bereitzuhalten und defekte Geräte zu reparieren, wobei die Kosten und Dauer der Reparatur vorab transparent kommuniziert werden müssen. Ein zentrales Element der Richtlinie ist die Einrichtung einer europäischen Reparaturplattform, die Verbrauchern die Suche nach geeigneten Reparaturwerkstätten erleichtern soll. Die EU-Mitgliedstaaten haben bis Ende Juni 2026 Zeit, die Richtlinie in nationales Recht umzusetzen, wobei eini-



ge Länder bereits Maßnahmen wie Reparaturgutscheine oder Reparaturfonds eingeführt haben. Besonders innovativ ist die Verlängerung der gesetzlichen Gewährleistungsfrist um ein Jahr, wenn sich Verbraucher für eine Reparatur entscheiden, sowie die Verpflichtung der Hersteller, Produkte auch nach Ablauf der Gewährleistungsfrist zu reparieren. Die Diskussion auf EU-Ebene konzentriert sich nun auf die effektive Umsetzung der Richtlinie und mögliche Erweiterungen der Liste der betroffenen Produkte, um den Übergang zu einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft weiter zu beschleunigen [4].

Repair verlängert den Nutzungszyklus von Produkten. Auch hierbei ist zu prüfen, ob neue Produkte nicht doch umweltfreundlicher wären.

7. Refurbishing

Refurbishing beziehungsweise die Aufbereitung von Produkten umfasst deren qualitätsgesicherte Wiederherstellung und Verbesserung. Gebrauchte oder beschädigte Produkte werden nicht nur repariert, sondern oft auch durch das Upgrade von Komponenten und eine gründliche Reinigung verbessert. Diese Aufbereitung ermöglicht eine verlängerte Nutzung von Produkten und trägt dazu bei, den Wert vorhandener Produkte zu erhalten. Hersteller und Händler bieten aufbereitete, also "refurbished" Produkte in verschiedenen Kategorien an. Dazu zählen u. a. Anlagen und Maschinen, Gebrauchtwagen, Möbel und runderneuerte Reifen.

Refurbishing verlängert die Nutzungsphase von Produkten und schont damit Ressourcen.

8. Refabrication oder Remanufacturing

Refabrication oder Remanufacturing bezieht sich auf die umfassende Überholung von gebrauchten Produkten, Maschinen und Anlagen. Hierdurch werden diese in einen Zustand versetzt, der dem einer Neuprodukten gleichkommt. Dieser Prozess geht über einfache Reparaturen oder Refurbishing hinaus und kann die vollständige Demontage des Produkts oder der Anlage beinhalten.

Remanufacturing findet Anwendung in verschiedenen Bereichen, wie etwa bei Anlagen (Fertigungsstraßen und Druckmaschinen), bei Computern und Druckerpatronen, Eisenbahnwagen (Flixtrain), Getrieben und Motoren, Maschinen und medizinischen Geräten sowie bei Pumpen und Robotern.

Durch Remanufacturing werden wertvolle Ressourcen effektiv genutzt und die Lebensdauer von Produkten signifikant verlängert.

9. Repurpose

Repurpose bezeichnet die Umnutzung von Produkten, Materialien oder Gebäuden, indem diesen ein neuer Verwendungszweck zugeführt wird, anstatt sie zu Abfall zu machen oder abzureißen. Den Produkten, Materialien oder Gebäuden eröffnet sich eine zweite Lebensphase in einem neuen Kontext.

Beispiele für eine solche Umnutzung sind ausgediente Kaufhäuser sowie Industrie- und Gewerbegebäude, die zu Wohnungen, Büros oder kulturellen Einrichtungen umfunktioniert werden. Alltagsgegenstände wie Glasflaschen, Holzkisten und Konservendosen können kreativ wiederverwendet werden, etwa als Vasen, Regale oder Blumentöpfe.

Durch Repurpose wird nicht nur die Umweltbelastung minimiert, sondern es werden auch innovative und kreative Nutzungsmöglichkeiten für vorhandene Ressourcen erschlossen.

10. Recycle

Recycling trägt zur Schonung von Primärressourcen und zur Reduzierung von Abfall bei. Upcycling transformiert Abfallstoffe oder unbrauchbare Produkte in neuwertige Materialien oder Gegenstände von höherer Qualität oder höherem Wert. So werden aus alten Holzpaletten neuer Möbelstücke oder aus alten LKW-Planen neue Handtaschen. Schmuck wird aus altem Besteck und alten Münzen hergestellt, Teddybären aus Stoffresten und Flip-Flops aus Autoreifen. Manche Upcycling-Methoden lassen das Originalprodukt unverändert und ihm lediglich eine neue Funktion zu. So werden Autoreifen zu Schaukeln oder zu Fendern bei Schiffen.

Upcycling führt Materialien, die sonst entsorgt werden würden, einer höherwertigen Verwendung zu.

Beim Downcycling werden Objekte in andere Materialien zerlegt oder in Produkte von geringerer Qualität umgewandelt. Das daraus resultierende recycelte Material weist eine niedrigere Qualität und Funktionalität auf als das Ausgangsmaterial. Die so gewonnenen Ressourcen sind oft nur noch für die Herstellung minderwertiger Produkte geeignet.

So werden aus recyceltem Plastik Plastiktüten, Blumentöpfe, Parkbänke oder Zäune hergestellt. Stoffreste werden zu Putzlappen oder zu Füllmaterial für Matratzen und Sitzmöbel. Aus Altreifen – zu Gummigranulat verarbeitet – werden Straßenbeläge, Dämmstoffe oder Gummimatten hergestellt. Mehrmals recyceltes Papier kann nur noch zu Toilettenpapier, Eierkartons oder Zeitungspapier verarbeitet werden. Diese Praxis hilft zwar dabei, Abfallmengen zu reduzieren und Ressourcen zu schonen, führt jedoch zu einer sukzessiven Verringerung der Materialqualität mit jeder Recyclingrunde.

Downcycling führt Material, das normalerweise entsorgt werden würde, einer niederwertigeren weiteren Nutzung zu. Auch das trägt zur Kreislaufwirtschaft bei.



Es existieren allerdings auch Recycling-Verfahren, die hochwertige Sekundärrohstoffe ohne Qualitätsverluste generieren können. Ein markantes Beispiel ist die Rückgewinnung von Gold oder seltenen Erden aus alten Mobiltelefonen oder Computern. Ein weiteres fortschrittliches Verfahren ist das chemische Recycling, das insbesondere bei Kunststoffen angewendet wird. Dabei werden Abfälle durch chemische Prozesse in ihre molekularen Bestandteile zerlegt, die dann zur Herstellung neuer Kunststoffe oder anderer chemischer Produkte verwendet werden können. Dieses chemische Recycling hat das Potenzial, die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen zur Kunststoffproduktion zu verringern und somit den Kohlenstoff-Fußabdruck der Kunststoffindustrie zu reduzieren. Allerdings ist das Verfahren technisch anspruchsvoll und aktuell noch kostenintensiv. Daher wird es gegenwärtig eher als Ergänzung denn als vollständiger Ersatz anderer Recyclingformen angesehen.

Recycling sollte immer nur die letzte Alternative in der Kreislaufwirtschaft sein, weil das Ursprungsprodukt im Rahmen des Recyclingprozesses meist zerstört wird.

Der Weg zur Kreislaufwirtschaft - die ersten Schritte für Unternehmen

Jedes Unternehmen steht vor der Herausforderung, die Implementierung der zehn R-Regeln zur Nachhaltigkeit in seine Betriebsabläufe zu integrieren. Diese umfassende Überprüfung verlangt zunächst eine Analyse, welche der Regeln am schnellsten umgesetzt werden können. Hierbei sollten Führungskräfte prüfen, wo die sogenannten "Low-hanging Fruits" liegen. Dies sind Bereiche, in denen mit relativ geringem Aufwand schnell spürbare Verbesserungen erzielt werden können. Dieser Ansatz ermöglicht es, kurzfristige Erfolge zu generieren. Darüber hinaus ist zu analysieren, welche der zehn Regeln den größten Einfluss auf die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele haben.

Entscheidend ist auch die Bestimmung von Verantwortlichkeiten: Wer innerhalb des Unternehmens wird die Initiierung und Umsetzung der ausgewählten Maßnahmen übernehmen? Wird hierfür bspw. ein Chief Sustainability Officer berufen [10]? Die nachhaltige Unternehmensführung sowie die Konzepte der Kreislaufwirtschaft müssen sich in der Unternehmensstrategie niederschlagen, um die gewünschten Effekte zu erzielen. Ohne Top Management Support wird dies nicht gelingen.

Literatur

- Baumgart, M.; McDonough, W.: Cradle to Cradle: Einfach intelligent produzieren, 5. Auflage. München 2019.
- Elkington, J.: Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business. 1999.
- Global Footprint Network (2023): Earth Overshoot Day 2023. URL: www.footprintnetwork.org, Abrufdatum 05.05.2024.
- Haufe: EU-Parlament beschließt Recht auf Reparatur. 2024. URL: https://www.haufe.de/recht/weitere-rechtsgebiete/allg-zivilrecht/eu-recht-auf-reparatur_208_625194.html, Abrufdatum 11.02.2025.
- [5] Von Hauff, M.: Grundwissen Circular Economy, München 2023.
- IPCC (2024): The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: https://www.ipcc.ch/, Abrufdatum 08.05.2024.
- Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: Resources, Conservation & Recycling 127 (2017), S. 221-232.
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (2021): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BJNR021210012.html, Abrufdatum 24.07.2023.
- Kreutzer, R.: Der Weg zur nachhaltigen Unternehmensführung. Wieshaden 2023.
- [10] Kreutzer, R.: Chief Sustainability Officer. Wiesbaden 2023.
- [11] Kreutzer, R.: Kreislaufwirtschaft. Wiesbaden 2023.
- [12] Prognos AG: Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft. Düsseldorf 2024.
- [13] Stahel, W. R.: The Circular Economy: A User's Guide. Oxfordshire 2019.
- [14] Thieß, P.: Wachstum oder Schrumpfung? Eine Frage der Entkopplung. 2024. URL: https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/ jahr/2023/heft/7/beitrag/wachstum-oder-schrumpfung-eine-frage-der-entkopplung.html, Abrufdatum 11.2.2025.
- [15] WWF: Neue Studie: Zukunft zirkulär gestalten und Rohstoffe sichern. 2023. URL: https://www.wwf.de/2023/juni/neue-studie-zukunft-zirkulaer-gestalten-und-rohstoffe-sichern, Abrufdatum 11.02.2025.



Preisverleihung Hannover Messe,

2. April um 16:30 Uhr, Halle 17





intelligent-automation-summit.eu

23. - 24. Jun. 2025 Radisson Blu Hotel **Frankfurt**



bpm-summit.eu

23. - 24. Jun. 2025 Radisson Blu Hotel **Frankfurt**



sam-strategies.eu

06. - 07. Okt. 2025 **Hotel Okura Amsterdam**



it-procurement-summit.eu

06. - 07. Okt. 2025 Hotel Okura **Amsterdam**



intelligent-automation-summit.de

26. - 28. Nov. 2025 **Hotel Palace** Berlin



bpm-summit.de

26. - 28. November 2024 Hotel Palace, Berlin



sam-strategies.de

24. - 25. Mrz. 2025 **Hotel Titanic Chaussee** Berlin



it-procurement-summit.de

24. - 25. Mrz. 2025 **Hotel Titanic Chaussee** Berlin



business-data-intelligence-minds.eu

09. - 11. Mrz. 2025 Holiday Inn City Center München

Über den Veranstalter:

we.CONECT Global Leaders ist ein internationales Medienunternehmen, das virtuelle B2B Konferenzen, B2B Live-Konferenzen, digitale & live-Entscheider Netzwerke mit den Schwerpunkten IT, Engineering und Digitale Transformation seinen Kunden bereitstellt. 80+ Live Konferenzen, über 5000 Unternehmen und 1,5 Millionen Business Kontakte. Wir verbinden Führungskräfte, Trendsetter, Visionäre und Entscheider.



Für mehr Info scannen







Intelligentes Ladungsträgermanagement

Beim Transport von Bauteilen kommen häufig Ladungsträger zum Einsatz. Damit diese nicht verloren gehen, werden sie etwa mit GPS-Tracking verfolgt. Eine Alternative dazu besteht in ihrer Bündelung in Clustern, die eine gemeinsame Überwachung ermöglicht und dabei den Datenschutz nicht verletzt. Künstliche Intelligenz kann diesen Prozess weiter optimieren und gleichzeitig als wirksame Abschreckung gegen Diebstahl fungieren.

Schlüsselwörter

Intelligente Logistik, Echtzeitüberwachung, KI-Trackingverfahren, Internet der Dinge, Internet of Things, IoT, Smart Logistics



Dr. Dominik Augenstein arbeitet an der FAU Erlangen-Nürnberg und an der Hochschule Karlsruhe. Als Teamleiter eines großen Automobilherstellers fokussiert er sich auf Digitale Zwillinge in der Produktion und ihre Realisierung im Metaverse.



Lea Basler ist Business Analystin in einer großen IT-Beratung im Bereich Automotive und gestaltet Prozesse und Systeme. Als Teamkoordinatorin bewertet sie Geschäftsmodelle und untersucht deren Rolle für die Digitale Transformation.

Kontakt

dominik.augenstein@h-ka.de www.h-ka.de



Intelligentes Ladungsträgermanagement

KI-gestützte Überwachung und Reduktion von Verlusten in der Logistik

Dominik Augenstein und Lea Basler, Hochschule Karlsruhe

Ladungsträger sind in Fertigungsunternehmen unverzichtbar für den Transport produzierter Teile. Meist sind diese trotz ihrer "Einfachheit" teuer in der Anschaffung, da sie passgenau für den Zweck hergestellt werden. Zur Vermeidung des Verlusts der Ladungsträger können Trackingverfahren wie GPS-Tracking eingesetzt werden, was jedoch mit Überwachungsaufwand einhergeht und den Datenschutz herausfordert, sobald die Arbeitsleistungen der Mitarbeiter in der Intralogistik überwacht werden. Die Zuordnung von Ladungsträgern zu sogenannten Clustern und ihre gemeinsame Kontrolle bietet hierbei eine Lösung – ohne die Möglichkeit von Rückschlüssen auf die Leistung der Mitarbeiter. Und nicht nur das: Künstliche Intelligenz kann diesen Ansatz optimieren und gleichzeitig vor einem Diebstahl der Ladungsträger abschrecken.

Im globalen Wettbewerb und einem sich schnell verändernden Marktumfeld müssen produzierende Unternehmen ihre Ware in immer kürzeren Zeiträumen entlang der Supply Chain bewegen [1]. Längst hat hier die Digitale Transformation angesetzt, die auch Dinge, wie beispielweise Ladungsträger, digital miteinander vernetzt, was eine intelligente Supply Chain ermöglicht. Mittels GPS oder neuerdings auch Bluetooth-Verbindungen zu Satelliten [2] lassen sich leicht die Positionen von Objekten sowie ihren zurückgelegten Weg tracken.

Was für Objekte wünschenswert ist, stellt bei Mitarbeitern jedoch eine Herausforderung dar, da hier Rückschlüsse auf ihre Arbeitsleistungen möglich sind, was in einigen Ländern wie Deutschland gesetzlich verboten ist. Werden nun intelligente Objekte wie Ladungsträger von einem Mitarbeiter in der Logistik transportiert, so kann man indirekt, aber ohne großen Aufwand, auch Rückschlüsse auf die Arbeitsleistung ziehen, was die lückenlose Überwachung der Ladungsträger datenschutzrechtlich einschränkt. Gleichzeitig kann die Zahl der Ladungsträger enorm hoch sein, sodass eine lückenlose Überwachung aller Ladungsträger einen sehr hohen Aufwand darstellt.

Eine Lösung wäre es, diese Träger sinnvoll zu gruppieren, um diese als Gruppe überwachen zu können. Dies kann dennoch mit einem hohen Aufwand verbunden oder teilweise unmöglich sein, denkt man an Wasser- oder Bierkisten, die schließlich beim Endkunden weit verstreut lagern können. Bei diesem Beispiel wird auch noch einmal die Herausforderung klar: Ein Tracking ist einerseits nicht möglich, da der Kunde sicherlich nicht möchte, dass er von einem Getränkehersteller indirekt überwacht werden kann. Andererseits wären die Kosten eines Trackings überproportional hoch zu dem Nutzen eines verlorenen Kastens. Wie eingangs erwähnt existieren

aber auch Ladungsträger, die passgenau und aufwendig hergestellt werden oder schwere Teile transportieren müssen. Teilweise haben sie auch einen hohen Ressourcenbedarf und Kosten von mehreren Tausend Euro pro Stück, wie Ladungsträger in der Automobilindustrie. Um den Verlust solcher Ladungsträger zu verhindern und damit auch entstehende

Kosten zu senken, können anonymisierte Trackingverfahren eingesetzt werden, die auf etablierte und breit verfügbare Technologien zurückgreifen und dem Grundgedanken des "Internets der Dinge" entsprechen: Objekte selbst können miteinander kommunizieren, durch die Vernetzung und Integration von Objekten durch (Internet-) Technologien [3].

Standortbestimmung von Ladungsträgern mittels Bluetooth

Durch eine andere Art der "Vernetzung", nämlich mit Satelliten, funktioniert die Standortbestimmung: Es gibt viele Satelliten im Weltall, die dauerhaft ihre Position und Uhrzeit auf die Erde senden. Auf der Erde werden sie dann von einem Empfänger wie Smartphones oder Navigationsgeräte empfangen. Dieser Empfänger erhält von mindestens drei unterschiedlichen Satelliten ein Signal und berechnet, wie lange es dauert, bis das Signal von jedem Satelliten zu ihm gelangt. Da Satelliten ihre Position genau kennen, kann das Empfangsgerät die genaue Position bestimmen. Diese Standortbestimmung mittels Entfernungen nennt man auch Trilateration. Der Standort kann danach an eine zentrale Stelle übertragen werden, die dann eine Positionsverfolgung ermöglicht [4].

Weltweit verbreitet ist für diese Positionsbestimmung das globale Positionierungssystem GPS (Global Positioning System), das für die Positionsbestimmung in Breiten- und Längengraden eines Objektes in vielen Anwendungen wie die Navigation in Autos, Flugzeugen, Schiffen usw. verwendet wird. Hierbei werden hochfrequente Funk-/Radiowellen verwendet, und prinzipiell lässt sich damit auch die Position von Ladungsträgern bestimmen. Leider sind



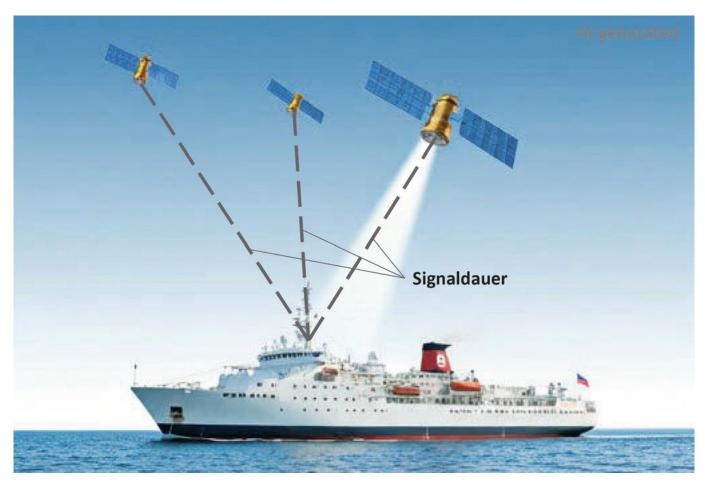


Bild 1: *Positionsbestimmung mittels Trilateration.*

diese Wellen sehr störanfällig: Schlechtes Wetter, Signalreflexionen und die Verfügbarkeit von Satelliten beeinträchtigen eine dauerhafte Positionsbestimmung sehr stark und beispielsweise in Waldgebieten oder dicht bebauten Städten kommt es immer wieder zu Herausforderungen [5].

Diverse Anbieter wie "BlackSky", "Stellar" oder "Hubble Network" haben dies erkannt und bieten alternative Lösungen an, die eine bessere Positionsbestimmung und -überwachung ermöglichen. Hubble Network hat hierfür diverse Patente angemeldet und sie können als erstes via Bluetooth eine Verbindung zu Satelliten herstellen. Dafür können sie sich unterschiedlicher Satellitennetzwerke bedienen und auch zu terrestrischen Netzwerken eine Verbindung herstellen [6]. Prinzipiell funktioniert die Standortbestimmung wie bei GPS, jedoch mit Bluetooth anstatt Funkwellen. Die Zuverlässigkeit der Standortbestimmung ist aber höher, unabhängig vom Wetter oder von Signalreflexionen.

Für Ladungsträger bedeutet dies, dass sie mit Bluetooth zu jeder Zeit und an jedem Ort (sogar unter Wasser) nachverfolgt werden können. Leider löst dies noch nicht die Herausforderungen des Datenschutzes und die Überwachung großer Mengen an Ladungsträgern.

Kommunikation von Ladungsträgern oder "der nächste Nachbar"

Woher weiß man nun also, ob ein Ladungsträger nicht verloren gegangen ist, ohne dass man seine genaue Position kennt oder aus Datenschutzgründen kennen darf? Man verwendet ein Prinzip, das man aus dem Kindergarten oder von Gruppenreisen kennt: "Vermisst jemand seinen Nachbarn?". Bei Ausflügen wird man oftmals in Zweiergruppen eingeteilt, beispielsweise der Sitznachbar im Bus, und regelmäßig wird abgefragt, ob jemand seinen Nachbarn vermisst. Dieses Prinzip lässt sich auch auf unsere Herausforderung anwenden, denn sollte jemand seinen zugeteilten Nachbarn vermissen, so lässt sich leicht 1) herausfinden, wer dieser Nachbar war, und 2) ihn (in unserem Fall durch ein gezieltes Tracking) wiederfinden.

Dies hat mehrere Vorteile: Einerseits muss man nicht dauerhaft die Position aller Ladungsträger überwachen,



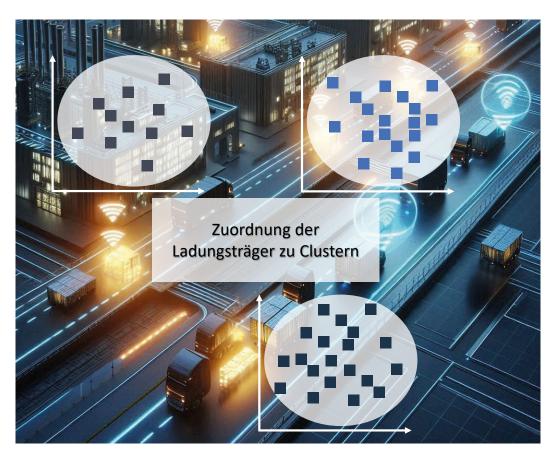


Bild 2: Schematische Darstellung des Warenträger-Clusterns.

sondern nur in regelmäßigen Abständen abfragen, ob ein Ladungsträger seinen "Nachbarn" vermisst. Andererseits bleibt der Datenschutz gewahrt, weil nicht dauerhaft die Position von Ladungsträgern abgefragt wird, was somit keine Rückschlüsse auf einen Mitarbeiter und seine Arbeitsleistung ermöglicht. Vielmehr wird nur im Bedarfsfall die Position eines Ladungsträgers abgefragt, jedoch mit der Bluetooth-Technologie dann zuverlässig und mit einer hohen Genauigkeit.

Klar ist aber auch: Diese Lösung funktioniert nur, wenn einzelne Ladungsträger verschwinden und nicht eine ganze Charge. Allerdings würde der Verlust einer ganzen Charge ebenso auffallen wie das Verschwinden einer ganzen Reisegruppe.

Darüber hinaus muss auch berücksichtigt werden, dass Ladungsträger (beispielsweise in der Intralogistik) "allein" unterwegs sein können. Dies lässt sich leicht in einen entsprechenden Algorithmus implementieren, indem man Gebiete wie das Werksgelände festlegt, in dem sich die Ladungsträger frei bewegen.

Dies nennt man "Geofencing" und hierfür existieren schon diverse Ansätze zum Tracken von Objekten wie Ladungsträgern [7], ohne dass jedoch die Grundsätze des Datenschutzes verletzt werden – und das Ganze innerhalb der oben genannten Grenzen von Funkwellen. Man könnte den Ansatz des Geofencings aber beispielsweise dafür benutzen, dass man Ladungsträger nur außerhalb festgelegter Marken nach seinem "Nachbarn" fragt.

Technisch gesehen funktioniert die Kommunikation zwischen den Ladungsträgern per Bluetooth analog zu Smartphones. Da die Ladungsträger das System zur Kommunikation mit den Satelliten schon integriert haben, kann man das System auch zur "Kopplung", also Verbindung, von zwei Ladungsträgern nutzen und zur Abfrage, ob sie den gekoppelten Nachbarn an einem gewissen Zeitpunkt vermissen. Prinzipiell kann man so mit jeder Abfrage herausfinden, ob ein Ladungsträger seinen Nachbarn vermisst und somit ein Ladungsträger verloren ist.

Die Herausforderung hierbei ist aber, dass jeder Ladungsträger einen Nachbarn benötigt, den es noch zu bestimmen gilt und dass, entgegen dem Beispiel des Ausflugs, Ladungsträger unterschiedliche Ziele haben können und nur gewisse Transportschritte gemeinsam durchlaufen. Wie entsprechende Gruppen erstellt werden, wird im Folgenden beschrieben.



Kombination Künstlicher Intelligenz mit Ladungsträger-Clustern

Mit dem sogenannten "Clustern" wird eine Menge von Objekten in Gruppen unterteilt. Diese Gruppen bilden eng verbundene oder kooperierende Einheiten, wie Computer in einem Netzwerk oder geografisch benachbarte Unternehmen derselben Branche. Objekte innerhalb eines Clusters sind einander ähnlicher als Objekte in verschiedenen Clustern, was es ermöglicht, Abfragen auf Cluster statt auf Objektebene durchzuführen [8]: Verfolgt man in unserem Fall das Verfahren des "nächsten Nachbarn" von oben, so bilden beispielsweise zwei oder mehr Ladungsträger ein Cluster, wenn sie einander positionstechnisch sehr nah sind und sich entweder nicht oder (bei einem Transport) in dieselbe Richtung bewegen. Sie können sich also selbstständig zu Clustern zusammenfinden: Mittels Bluetooth versucht ein Ladungsträger dauerhaft sich selbst mit anderen in seiner Nähe zu verbinden. Dies ist unkompliziert, da die einzelnen Ladungsträger ja ihre Position und Richtung kennen. Die Ladungsträger finden also selbst zu Cluster zusammen, kennen die Anzahl der Elemente in dem Cluster, und man muss nur noch einen Ladungsträger im Cluster abfragen, ob noch alle da sind.

Wie bereits beschrieben wird jedoch der Zeitpunkt kommen, an dem Ladungsträger dieses Cluster verlassen, weil sie an ihrem Bestimmungsort angekommen sind oder weil sie verloren gehen oder weil vergessen wurde, sie auszuladen. In beiden Fällen meldet das betroffene Cluster, dass ein oder mehrere Ladungsträger dieses verlassen haben. Nun muss entschieden werden, ob es sich um ein "gewünschtes" Verlassen handelt oder ob sie tatsächlich "unerwünscht" das Cluster verlassen haben. Entscheidungshilfen für ein "gewünschtes" Verlassen können sein: Man befindet sich im eigenen Werk, beim Kunden oder Zulieferer, also an einem Ort, an dem er zwar nicht mehr im Verbund unterwegs, jedoch einem zweckmäßigen Ort zugeordnet ist (z. B. durch Geofencing). Eine andere Möglichkeit ist, dass der Ladungsträger umgeladen wurde und sich einem neuen Cluster zugeordnet hat. Am Ende muss aber immer entschieden werden, ob ein Ladungsträger verloren ist oder nicht.

Wie bereits beschrieben erzeugt hierbei eine manuelle Ausführung hohe Kosten und ist bei großer Zahl an Ladungsträgern kaum zu bewältigen. Abhilfe kann jedoch ein Ansatz mit Künstlicher Intelligenz schaffen, die selbstständig bestimmt, wann und ob ein Ladungsträger "verloren" gegangen ist oder nicht. Voraussetzung ist, dass ein Ladungsträger sein Cluster verlassen hat, was ein anderer Ladungsträger aus dem Cluster dem Entscheidungssystem meldet. Der Entscheidungsalgorithmus entscheidet nun, ob der Ladungsträger als "verloren" klassifiziert wird oder nicht. Dazu verwendet er die Position des Ladungsträgers und gleicht diese mit "erlaubten"

Orten ab. Vorteil ist hierbei, dass der Algorithmus zwar den Standort verwendet, ihn aber "geheim" hält, also Außenstehenden den Standort zunächst nicht teilt, um den Datenschutz zu wahren. Erst wenn der Algorithmus entscheidet, dass ein Ladungsträger verloren gegangen ist, teilt er die Position dem zuständigen Mitarbeiter mit, der sich dann um die Wiederbeschaffung kümmert. Anzumerken ist, dass dieser Teil des Algorithmus noch nicht die Notwendigkeit der Nutzung einer Künstlichen Intelligenz bedingt, sondern er lässt sich zudem leicht in einem etablierten System abbilden.

Durch den zweiten Teil, den Lern-Algorithmus, können die Vorteile der Künstlichen Intelligenz genutzt werden. Dieser Lern-Algorithmus nutzt sowohl die Tracking-Daten, als auch ihre Historie und das Feedback aus vorigen Entscheidungen und überprüft die Aktualität der Geofencing-Daten, also die zulässigen Orte, an denen Ladungsträger als "nicht-verloren" gelten. Kommen beispielsweise neue Werke oder Zulieferer hinzu, oder ein Zulieferer ändert seinen Standort, so kann der Algorithmus dies automatisch erkennen und die Daten aktualisieren. Der Algorithmus "lernt" sozusagen und wird immer präziser hinsichtlich der Frage, wann ein Ladungsträger verloren gegangen ist und wann nicht. Auch die umgekehrte Frage: "Wo gehen Ladungsträger oftmals verloren?", lässt sich daraus automatisiert ableiten. Zur Implementierung solcher Lernalgorithmen existieren heute schon zunehmend viele Ansätze: Beispielsweise "deep belief networks (DBN)" ermöglichen die Erstellung spezifischer Muster, in unserem Fall erlaubte Orte und Positionen, an denen häufig Ladungsträger verloren gehen, und ermöglichen damit die Verbesserung von Lernmodellen [9]. Auch "deep extreme learning machines (ELM)" für Zeitreihenanalysen (etwa der Tracking-Daten) und daraus abgeleitete Vorhersagen können Grundlage für einen effektiven Lernalgorithmus sein [10].

Langfristige Vorteile und Ausblick

Mittels KI-gestütztem Entscheidungssystem lässt sich die Zahl der verloren gegangenen Ladungsträger reduzieren - bei gleichzeitiger Wahrung des Datenschutzes. Die Ausrüstung eines Ladungsträgers mit der entsprechenden Technologie liegt im unteren dreistelligen Bereich und die Erstellung eines Systems zur Abfrage der Cluster sind zu marktüblichen Preisen relativ leicht zu erhalten. Eine Abwägung zwischen den Kosten für das KI-gestützte Entscheidungssystem und den Kosten für verloren gegangene Ladungsträger ist sicherlich sinnvoll. Kostentreiber sind dabei die Entwicklung, Datenaufbereitung und Integration für die KI. Allerdings sind die hier verwendeten Daten, z. B. Positionsdaten der Ladungsträger, qualitativ sehr hochwertig, weshalb die Kosten auch hier im Rahmen eines klassischen IT-Projekts bei einem mittleren fünfstelligen Betrag liegen. Gleichzeitig lässt sich der manuelle



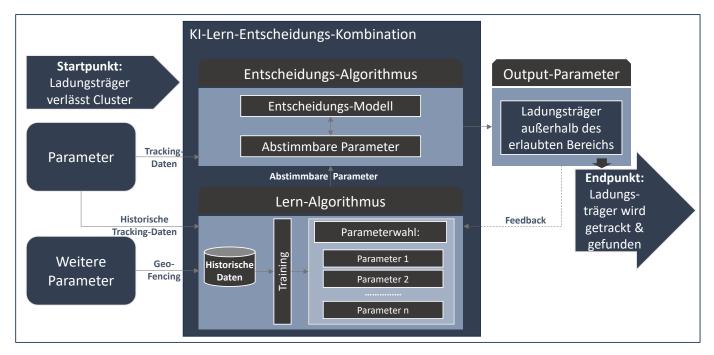


Bild 3: Symbolische Darstellung eines KI-gestützten Entscheidungssystems.

Aufwand einer Überwachung und Suche deutlich reduzieren und auch die Prävention von Diebstahl ist gegeben, da die Bluetooth-Technologie ein Tracking an nahezu jedem Ort ermöglicht, was Täter abschrecken dürfte. Herausforderung bei der Umsetzung spielt vor allem die KI-Implementierung. Die Integration in ein bestehendes System oder die dazu parallele Entwicklung eines Systems erfordert ein umfassenderes Wissen als bei einer klassischen Softwareentwicklung. Zudem müssen die Trainingsdaten vorliegen, was zunächst das Entwickeln des Ladungsträgermanagementsystems erforderlich macht, unter Berücksichtigung einer möglichen Erweiterung in Richtung KI.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entwicklungen zu einem intelligenten Ladungsträgermanagement, gestützt durch KI und weiteren, aktuellen Technologien, immer schneller vonstattengeht. Langfristig wird jedes Unternehmen von solchen technologischen Entwicklungen betroffen sein, weshalb es Sinn macht, sich frühzeitig damit auseinanderzusetzen und heute schon die Vorteile davon zu nutzen.

Literatur

- 1] Helmold, M: Wettbewerbsvorteile entlang der Supply Chain sichern. Wiesbaden 2023.
- [2] Rondón, R; Gidlund, M.; Landernäs, K.: Evaluating Bluetooth Low Energy Suitability for Time-Critical Industrial IoT Applications, 2017, International Journal of Wireless Information Networks 24, 278–290. DOI: https://doi.org/10.1007/s10776-017-0357-
- [3] Gilchrist, A.: Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Berlin 2016.
- [4] Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E.: GNSS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Berlin 2008.
- [5] Kaplan, E. D.; Hegarty, C. J.: Understanding GPS: Principles and Applications. Boston London 2005.
- [6] LeGrand, L; Wild, B. J.: Communication with multiple satellite networks. 2024. U.S. Patent No. 12,028,151.
- [7] Rodrigo, O. u. a: An intelligent model for logistics management based on geofencing algorithms and RFID technology. In: Expert Systems with Applications 42 (2015) 15-16, 6082-6097.
- [8] Kamalpreet, B.; Mishra, A.: A detailed study of clustering algorithms. In: 6th international conference on reliability, infocom technologies and optimization (2017), IEEE.
- [9] Phyo, P. P.; Jeenanunta, C.: Daily Load Forecasting Based on a Combination of Classification and Regression Tree and Deep Belief Network. In: IEEE Access 9 (2021), S. 152226–152242.
- [10] Fayaz, M.; Kim, D.: A Prediction Methodology of Energy Consumption Based on Deep Extreme Learning Machine and Comparative Analysis in Residential Buildings. In: Electronics 7 (2018), S. 222.









Preisverleihung Factory Innovation Awards 2025

Hannover Messe, 2. April um 16:30 Uhr Halle 17

Live dabei sein! Auf der Hannover Messe oder im Stream via Instagram



Preiskategorien 2025

Industrie 4.0 in der Praxis · Künstliche Intelligenz in der Fabrik

Digitale Transformation der Fabrik · Plattformen für die vernetzte Fabrik

Konnektivität · Schulung und Weiterbildung · Nachhaltige Fabrik · Publikumspreis

Finalisten

Anderson Europe GmbH • EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG
EVO Informationssysteme GmbH • Fraunhofer IOSB-INA • SmartFactoryOWL
Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e. V. • I-Care Deutschland GmbH
Industrial Application Software GmbH• Institut für Innovation und Industrie Management (IIM)
TU Graz • Institut für Wirtschaftsinformatik und Digitale Gesellschaft e.V. • InTraLab
ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH • Johann Hofmann • Industrie 4.0 Experte und
strategischer Berater • Monitor ERP GmbH • PSI Software SE
Business Unit Discrete Manufacturing • software4production GmbH • SOFTWBAUWARE GmbH
SYNERPY GmbH • T.CON GmbH & Co. KG • tesa Werk Hamburg GmbH





Funktionale Sicherheit und Cyber-Sicherheit in der Prozessindustrie

Für den reibungslosen Betrieb moderner industrieller Anwendungen sind funktionale Sicherheit (Safety) und Cyber-Sicherheit (Security) unabdingbar. Während Safety Risiken durch Systemfehler minimiert, soll Security vor digitalen Angriffen schützen. Damit sich beide Sicherheitsdimensionen bei ihrer gleichzeitigen Optimierung nicht in die Quere kommen, müssen sie parallel betrachtet und im Kontext relevanter Normen und gesetzlicher Vorgaben evaluiert werden.

Schlüsselwörter

Funktionale Sicherheit, Cybersicherheit, IEC 61508, IEC 62443, Prozessindustrie, CRA, NIS-2, Cyberrisiken, Prozessverbesserung

Thimmo Kugele ist Qualitätsmanager in den Bereichen Safety und Security bei Endress+Hauser. Seine Kernaufgaben umfassen die funktionale Sicherheit und die OT-Security innerhalb von Entwicklungsprojekten.

Dr. Claudia Nowak ist Expertin für Safety und Security bei Endress+Hauser. Ihre Haupttätigkeiten sind die Prozesse für Funktionale Sicherheit und OT-Security in der Produktentwicklung.

Dr. Arno Götz arbeitet seit 24 Jahren in der Produktsicherheit bei Endress+Hauser. Seine Schwerpunkte als Senior Experte sind Explosionsschutz, Funktionale Sicherheit und Product Compliance.

Prof. Dr. Alexander Lawall ist Professor und Studiengangleiter für Cyber Security an der IU Internationale Hochschule. Seine Schwerpunkte liegen in der System- und Netzwerksicherheit sowie in der Sicherheit von Web- und Cloud-Anwendungen, IoT und industrieller Informationstechnologie.

Kontakt

alexander.lawall@iu.org www.iu.de



Funktionale Sicherheit und Cyber-Sicherheit in der Prozessindustrie

Ein Spannungsfeld zwischen Stabilität und Agilität

Thimmo Kugele, Claudia Nowak und Arno Götz, Endress+Hauser Group Services AG, Alexander Lawall, IU Internationale Hochschule GmbH

Funktionale Sicherheit (Safety) und Cyber-Sicherheit (Security) sind zentrale Aspekte in der modernen Industrie. Safety zielt auf die Minimierung von Risiken durch Fehlfunktionen ab, während sich Security um den Schutz vor digitalen Angriffen dreht. Beide sind aus der Prozessindustrie nicht mehr wegzudenken, da sowohl die physische Sicherheit als auch die digitale Integrität moderner Systeme gewährleistet werden muss. Doch weil die Erhöhung von Security eine Schwächung von Safety bedeuten kann – und umgekehrt –, entsteht in der industriellen Praxis ein Spannungsfeld zwischen beiden. In diesem Artikel werden zu diesem Zweck relevante Normen und Gesetze analysiert, wichtige Ansätze für die gemeinsame Betrachtung der Safety und Security vorgestellt und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

1. Sicherheitsmaßnahmen vs. Anlagenverfügbarkeit: Maßnahmen zur Erhöhung der Security (z. B. strenge Zugriffskontrollen) können die Verfügbarkeit und damit die Safety beeinträchtigen. Die Verfügbarkeit könnte somit durch Maßnahmen für die Security reduziert werden.

Stabilität vs. Agilität - ein Widerspruch?

In industriellen Anlagen kommen elektrische und elektronische Systeme zum Einsatz, um sicherheitsrelevante Funktionen auszuführen und somit einen sicheren sowie unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Eine hohe Anlagenverfügbarkeit kann nur sichergestellt werden, wenn die funktionale Sicherheit (Safety) gewährleistet ist. Sicherheitskritische Ausfälle beeinträchtigen nicht nur die Verfügbarkeit der Anlage, sondern können auch schwerwiegende Unfälle nach sich ziehen.

Ein Cyber-Angriff auf sicherheitskritische Systeme kann deren Funktionalität erheblich beeinträchtigen und stellt somit ein potenzielles Risiko dar. Gleichzeitig können Maßnahmen zur Cyber-Sicherheit (Security) den Zugriff auf Systeme einschränken. Beispielsweise kann ein Sicherheitsupdate die Verfügbarkeit sicherheitsrelevanter Einrichtungen beeinflussen und dadurch die funktionale Sicherheit beeinträchtigen.

Bild 1 stellt die Schutzziele von Safety und Security gegenüber, um die potenziellen Wechselwirkungen zwischen beiden Aspekten zu verdeutlichen.

Unternehmen der Prozessindustrie müssen ein Gleichgewicht zwischen den Schutzzielen finden, um diese gleichermaßen zu berücksichtigen. Dies erfordert eine interdisziplinäre Zusammenarbeit für die Konfliktfreiheit der Maßnahmen für die Security und der Betriebssicherheit.

Durch die teils unterschiedlichen und miteinander verbundenen Schutzziele von Safety und Security entsteht ein Dilemma. Das Konfliktpotenzial wird folgt zusammenfasst:

- 2. Regelmäßige Updates: Security erfordert regelmäßige Updates (u. a. Betriebssystem und Software), die jedoch Sicherheitsfunktionen beeinträchtigen können und damit die Stabilität gefährden.
- 3. Komplexität und Kosten: Die Implementierung der Sicherheitsmaßnahmen für beide Bereiche kann komplex und kostenintensiv sein. Dies kann zu Ressourcenkonflikten führen.

Dieses Dilemma erfordert eine sorgfältige Abwägung und kontinuierliche Anpassung der Sicherheitsstrategien von Unternehmen für die Gewährleistung der physischen Sicherheit als auch digitalen Integrität moderner Systeme. Dies wird durch verbundene Risikoanalysen und abgestimmte Sicherheitskonzepte erreicht. Der vorliegende Artikel beleuchtet das erwähnte Spannungsfeld und liefert konkrete Lösungsansätze. Diese helfen Unternehmen bei der Bewältigung der Herausforderungen für Safety und Security.

Normendschungel als Herausforderung für die Prozessindustrie

In der Prozessindustrie ist Safety seit zwei Jahrzehnten eingeführt und anerkannt. Die zugehörige Basisnorm IEC 61508 [1] und ihre abgeleiteten sektorspezifischen Normen finden verbreitet Anwendung. Die Norm IEC 61511 [3] legt die notwendigen Vorgaben für den gesamten Lebenszyklus für Anlagenbetreiber fest. Bei Änderungen an Systemkomponenten ist eine sorgfältige Planung, Prüfung, Genehmigung und Dokumentation nötig. Dies ist in der



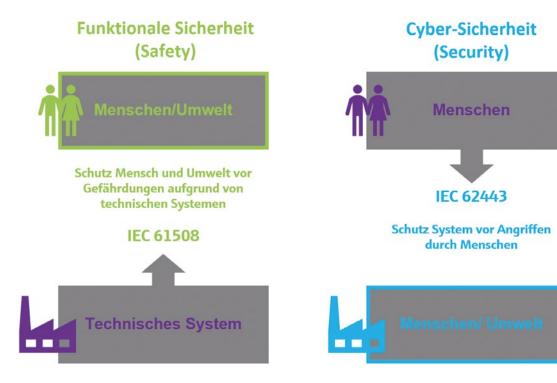


Bild 1: Schutzziele der Safety und Security [1, 2].

Regel aufwendig und teuer. Ausfälle können etwa in der Öl- und Gasindustrie bis zu 500 000 Dollar pro Stunde kosten [4] und Anlagenänderungen die Sicherheit von Menschen und Umwelt gefährden [5]. Daher wird versucht, die Anzahl der Änderungen (z. B. Softwareupdates) zu minimieren. Für die Normen der Safety existieren keine direkten gesetzlichen Anforderungen. Diese ergeben sich lediglich aufgrund der geforderten Einhaltung des Stands der Technik beispielsweise aus der Störfall- oder Maschinen-Verordnung.

In dem Gebiet Security existieren schon heute gesetzliche Anforderungen. Neben dem IT-Sicherheitsgesetz 2.0 [6] ist der Cyber Resilience Act (CRA) [7] der Europäischen Union (EU) die Verordnung, die ab dem 11. Dezember 2027 verpflichtend sein wird. Sie gilt für Produkte mit digitalen Elementen die in der EU in Verkehr gebracht werden. Eine wichtige Anforderung im CRA ist unter anderem die Bereitstellung von Sicherheitsaktualisierungen zur Behebung von Schwachstellen [7].

Bei Nichteinhaltung der Anforderungen können hohe Bußgelder verhängt werden. Gleichzeitig muss die NIS-2-Richtlinie [8] der EU umgesetzt werden, die Anforderungen an wesentliche und wichtige Einrichtungen stellt. Mit der IEC 62443 [2] ist eine sehr umfassende Norm für Betreiber als auch Hersteller von Komponenten für Security in den letzten 5 bis 10 Jahren entstanden. Aktuell ist diese Norm noch keine harmonisierte Norm zu den gesetzlichen Anforderungen (z.B. CRA).

Mit der IEC 61508 [1] und der IEC 62443 [2] existieren somit zwei Normen für Safety und Security für die Prozessindustrie, die wenig Bezug zueinander aufweisen. Die IEC 61508 [1] verweist auf die Betrachtung von Aspekten der Security, ohne dabei konkrete Maßnahmen zu benennen. Die IEC 62443 [2] dagegen trifft keine Aussage zur Safety. Die Vereinbarkeit von Safety und Security ist somit noch weitgehend ungeregelt. **Bild 2** zeigt die aktuellen Normen und Gesetzeslage für Safety und Security.

Die Brücke zwischen Safety und Security

Die Vereinbarkeit von Safety und Security stellt eine Herausforderung für die Prozessindustrie dar. Unterstützung können hierbei neue Regelwerke wie die IEC TR 63069 [9] und das NAMUR-Arbeitsblatt NA 163 [10] geben. Beide Dokumente zielen auf die Erhöhung der Sicherheit in industriellen Umgebungen ab, indem sie sowohl Risiken von Safety als auch Security adressieren.

Die IEC TR 63069 [9] bietet einen Rahmen für die Integration der IEC 61508 [1] und IEC 62443 [2] im Bereich der Industrieprozesse. Dies wurde als erforderlich erachtet, da etwa Begrifflichkeiten wie Risiko in beiden Normen teils unterschiedlich verwendet werden. Mit der IEC TR 63069 [9] wird eine Schnittstelle zwischen den Normen geschaffen. Es wird empfohlen, eine gemeinsame Risikobewertung von Safety und Security durchzuführen. Zum Beispiel dürfen sich die Gegenmaßnahmen der Security



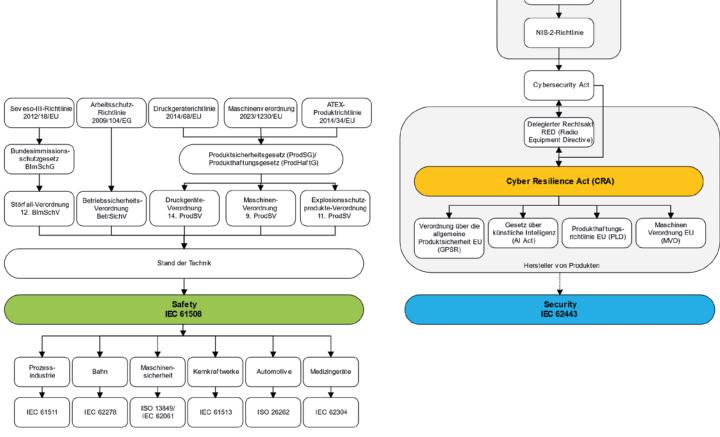


Bild 2: Überblick über die Normen und Gesetzeslage für Safety und Security [1, 2, 3, 6, 7, 8].

nicht negativ auf die Wirksamkeit der Maßnahmen der Safety auswirken. Ein weiterer Fokus ist die Vorgehensweise zur gemeinsamen Entwicklung von Komponenten der Safety und Security für jede Phase des Lebenszyklus.

Die NA 163 [10] ist ein Arbeitsblatt für die Durchführung einer Risikobeurteilung für Security in Anlehnung an die IEC 62443 [2]. Es richtet sich an Ersteller von Sicherheitseinrichtungen und soll damit die Anforderung einer IT-Risikoanalyse aus der IEC 61511 [3] abdecken. Dabei werden Prinzipien und die Durchführung der IT-Risikobeurteilung erläutert. Unterstützend wird eine Checkliste für die Maßnahmen innerhalb der Risikoanalyse für die Prozessindustrie bereitgestellt.

Bild 3 stellt eine Übersicht der relevanten Regelwerke dar.

Mögliche Wechselwirkungen der in **Bild 3** gelisteten Regelwerke und damit die gemeinsame Betrachtung der Safety und Security sind in **Bild 4** dargestellt.

Proaktives Risikomanagement

Eine Möglichkeit Safety und Security sinnvoll gemeinsam zu betrachten, besteht in der Wahl eines risikobasierten Ansatzes aus den Normen IEC 61508 [1] und IEC 62443 [2]. Somit findet die Umsetzung der Maßnahmen anhand der Höhe eines Risikos statt. Hier ist zu beachten, dass Safety und Security Risiko unterschiedlich definieren. Safety versteht unter Risiko die Kombination aus der Wahrscheinlichkeit des Auftretens und der Schwere eines Schadens. Der Fokus liegt auf einem physischen Schaden an Menschen oder der Umwelt.

Betreiber kritischer Infrastrukturei

Security hingegen sieht im Risiko die Wahrscheinlichkeit für das Ausnutzen einer Schwachstelle durch eine Bedrohung inklusive eines Schadenausmaßes. Dabei stehen die Auswirkungen auf den Betrieb und die Finanzen im Fokus, beispielsweise der Ausfall einer Produktionsanlage.

Nach IEC TR 63069 [9] wird empfohlen, eine Risikoanalyse für Security und eine für Safety durchzuführen. Durch den differierenden Fokus sollten diese getrennt durchgeführt werden und die daraus abgeleiteten Maßnahmen jedoch gemeinsam abgestimmt und verfolgt werden. Dieses Vorgehen trägt zur Vermeidung der Beeinträchtigung einer Maßnahme aus der Security für die Safety bei und vice versa. Experten aus beiden Domänen tragen somit zu einem gemeinsamen Verständnis für die gegenseitigen Anforderungen bei. Dabei müssen Konflikte gelöst und Kompromisse zwischen den unterschiedlichen Risiken und den abgeleiteten, sich ggf. gegenseitig beeinflussenden Maßnahmen gefunden werden. Dies geschieht unter dem Stichwort Kompromissanalyse. Vorab sollte daher ein Prozess für die Vorgehensweise und Verantwortlichkeiten



Norm	Titel	Hauptziel	Schlüsselelemente
IEC 61508	Functional safety of electrical/ electronic/programmable electronic safety-related systems	Sicherstellung der funktionalen Sicherheit durch Risikobewertung und -minderung	Sicherheitsintegritätslevel (SIL), Risikoanalysen, Lebenszyklusmodell
IEC 61511	Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry	Sicherstellung der funktionalen Sicherheit in der Prozessindustrie	Sicherheitsintegritätslevel (SIL), Gefährdungs- und Risikoanalyse, Sicherheitslebenszyklus
IEC 62443	Industrial communication networks – Network and system security	Schutz vor Cyberangriffen, Sicherstellung der Verfügbarkeit, Integrität und Vertraulichkeit	Sicherheitsstufen, Sicherheitszonen, Defense in Depth, Risikobewertung, Bedrohungsmodell, Sicherheitslebenszyklus
IEC TR 63069	Industrial-process measurement, control and automation – Framework for functional safety and security	Gemeinsame Anwendung der IEC 61508 und IEC 62443 im Bereich der industriellen Prozessmessung, -steuerung und -automatisierung	Leitgedanken, Überlegungen zur Risikobewertung, Lebenszyklus-Empfehlungen
NA 163	IT-Risikobeurteilung von PLT- Sicherheitseinrichtungen	Praxistaugliche IT- Risikobeurteilungsmethode für PLT-Ingenieure, Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen IT-Bedrohungen	IT-Risikobeurteilung, Bedrohungsbewertung, Maßnahmen zur Bedrohungsabwehr, Überprüfung der Maßnahmen, Maßnahmen-Checkliste,

Bild 3: Übersicht der relevanten Regelwerke [1, 2, 3, 9, 10].

beschrieben werden. Wobei die Kommunikation und das Zusammenspiel zwischen den Bereichen Safety und Security über den Lebenszyklus hinweg hervorgehoben werden.

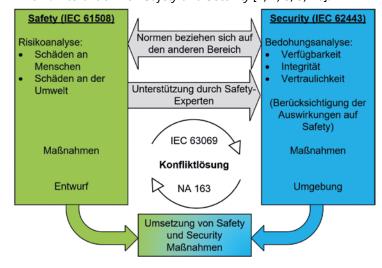
Der risikobasierte Ansatz hilft Anlagenbetreibern, die notwendigen Updates durchzuführen. Damit können Aufwände für Softwareaktualisierungen mit geringem Risiko vermieden werden. Auf diese Weise wird eine nutzen- und sicherheitsbasierte Abwägung hinsichtlich eines akzeptablen Restrisikos bei vertretbarem Aufwand ermöglicht.

Paradigmenwechsel in der Softwarearchitektur – von Monolithen zu Modulen

Für die Hersteller von Safety-Komponenten kann eine Modularisierung der Software dazu beitragen, die Aktualisierung der Software zu erleichtern und den Aufwand für Nachreichungen bei den Zertifizierungsstellen zu verringern [11]. Modularisierung bedeutet in dem Kontext die Trennung von Safety- und Nicht-Safety-relevanten Komponenten. Das Konzept der unabhängigen Ausführung verschiedener Softwarekomponenten ist in der IEC 61508-3 [12] beschrieben.

Dies ermöglicht die Durchführung von Softwareaktualisierungen im laufenden Anlagenbetrieb und die Vermeidung von Stillstandszeiten. In Fallstudien ist auch die Möglichkeit von Over-The-Air-Softwareupdates für Anwendungen der Safety beschrieben [14]. Damit eröffnet sich die Möglichkeit von Aktualisierungen mit nur minimalen Auswirkungen auf den Rest der Software sowie eine Teil-Zertifizierung.

Bild 4: Interaktion von Safety und Security [1, 2, 3, 9, 10].





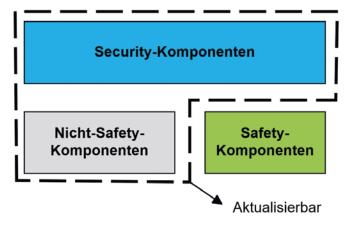


Bild 5: Modularität von Software [13].

Das könnte die Akzeptanz der Durchführung von häufigeren Softwareaktualisierungen bei den Anlagenbetreibern erhöhen, die generell unbeliebt sind. Der Aufwand bei den Zertifizierungsstellen wird verringert, da nur die Safety-relevanten Komponenten begutachtet und Re-zertifiziert werden müssen.

Leider sind gerade in der Prozessindustrie viele historisch gewachsene Softwarearchitekturen vorhanden. Diese sind oft als monolithischer Block aufgebaut und lassen sich nur mit viel Aufwand getrennt aktualisieren. Für diese Architekturen kommen die oben genannten Vorteile nicht infrage.

Bild 6 stellt die Vor- und Nachteile des proaktiven Risikomanagements und der Modularisierung gegenüber.

Stabilität und Agilität in sicherheitskritischen Infrastrukturen gewährleisten

Die fortschreitende Digitalisierung und Vernetzung industrieller Systeme verstärken die Notwendigkeit, Safety und Security in Einklang zu bringen. Diese Integration stellt Hersteller, Zertifizierungsstellen und Anlagenbetreiber vor erhebliche Herausforderungen [15]. Ein ganzheitlicher, resilienzbasierter Ansatz ist erforderlich, um diese Herausforderungen zu bewältigen. Dies setzt neue Formen der Zusammenarbeit, die intensive Auseinandersetzung mit der Thematik und die Entwicklung gemeinsamer Lösungsansätze bei Herstellern, Zertifizierern und Anlagenbetreibern voraus [16].

Insbesondere wurden drei Ansätze näher betrachtet: die gemeinsame Risikobetrachtung von Safety und Security, ein risikobasierter Ansatz in Bezug auf die Durchführung von Softwareaktualisierungen, der Nutzen der Modularisierung von Software.

Eine umfassende Systemänderung und ein Paradigmenwechsel erfordern jahrelange Anpassungsprozesse. Gerade in der rasanten Entwicklung digitaler Technologien ist ein proaktives Handeln entscheidend. Angesichts der wachsenden Bedrohungen im Cyberraum ist der frühzeitige Beginn dieser Prozesse unerlässlich [17].

Trotz der bereits existierenden Normen wie IEC 61508 [1] für funktionale Sicherheit und IEC 62443 [2] für Cyber-Sicherheit fehlt es an einem konsolidierten Rahmen, der beide Disziplinen ganzheitlich betrachtet und integriert.

Bild 6: Lösungsansätze für die Softwareaktualisierung.

Lösungsansatz für Softwareaktualisierung	Vorteile	Nachteile	
Proaktives	Anlagenstabilität gewährleistet.	Keine zeitnahe Behebung bekannter	
Risikomanagement	Für einfache Architekturen geeignet (z. B. Bestandsgeräte).	Schwachstellen. Risiko des externen Zugriffs erhöht.	
	Kostenoptimiert		
Modularisierung	Zeitnahe Behebung bekannter Schwachstellen.	Risiken für Anlagenstabilität durch ständige Softwareaktualisierungen.	
	Risiko des externen Zugriffs reduziert. Minimierung von Rückwirkungen auf andere Gerätekomponenten bei Aktualisierungen.	Muss zu Beginn der Entwicklung berücksichtigt werden.	
		Nicht geeignet für Bestandsgeräte. Benötigt komplexere Architekturen, hohe	
	Einfachere Updates von Zertifizierungen bei häufigen	Rechenleistung und Speicherplatz.	
		Hohe Kosten und hoher	
	Softwareaktualisierungen.	Entwicklungsaufwand.	



Insbesondere bestehen Forschungsbedarfe in folgenden Bereichen:

- Integrierte Risikoanalysemethoden: Während Safety und Security jeweils eigene Risikoanalysen erfordern, fehlt bislang eine standardisierte Methodik zur gemeinsamen Bewertung von Bedrohungen und deren Wechselwirkungen. Weitere Forschung ist erforderlich, um Methoden zur ganzheitlichen Risikoabschätzung zu entwickeln, die sowohl Safety- als auch Security-Aspekte berücksichtigen und priorisieren [15].
- Automatisierte Sicherheitsbewertungen: Die Entwicklung von teilautomatisierten oder KI-gestützten Sicherheitsbewertungen für modulare Systeme könnte die Effizienz der Sicherheitsprozesse erheblich steigern. Forschungsarbeiten sollten sich mit der Formalisierung von Informationsmodellen und deren Integration in Sicherheitsmanagementsysteme beschäftigen, um den manuellen Aufwand in der Sicherheitsbewertung zu minimieren [16, 18].
- Harmonisierung regulatorischer Anforderungen: Aktuelle Normen und gesetzliche Vorgaben, insbesondere der Cyber Resilience Act (CRA) und die NIS-2-Richtlinie, erfordern eine stärkere Verzahnung mit bestehenden Sicherheitsnormen. Die Forschung sollte untersuchen, wie ein normenkonformer, aber dennoch agiler Sicherheitsansatz umgesetzt werden kann, ohne dass Unternehmen in einen regulatorischen Zielkonflikt geraten [17].
- Technische Lösungsansätze zur Konfliktvermeidung: Die Implementierung von Security-Maßnahmen darf die funktionale Sicherheit nicht beeinträchtigen und umgekehrt. Es bedarf weiterer Untersuchungen zu Sicherheitsarchitekturen, die eine isolierte und dennoch kompatible Implementierung ermöglichen. Insbesondere die Modularisierung von Softwarearchitekturen könnte hier einen vielversprechenden Ansatz darstellen, um Updates flexibler zu gestalten, ohne den Sicherheitsnachweis der Gesamtanlage infrage zu stellen.

Diese Forschungsfelder sind entscheidend, um die Balance zwischen Stabilität und Agilität in sicherheitskritischen Infrastrukturen zu gewährleisten und die Resilienz industrieller Systeme gegenüber Cyber-Bedrohungen zu stärken.

Literatur

- [1] International Electrotechnical Commission: IEC 61508-1:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. URL: www.vde-verlag.de/iec-normen/217177/iec-61508-1-2010, Abrufdatum: 11.10.2024.
- [2] International Electrotechnical Commission: IEC 62443-4-1:2018. Security for industrial automation and control systems. URL: vde-verlag.de/normen/0800517/din-en-iec-62443-4-1-vde-0802-4-1-2018-10, Abrufdatum: 11.10.2024.

- [3] International Electrotechnical Commission: IEC 61511-1:2016 Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector. URL: https://www.vde-verlag.de/iec-normen/222577/iec-61511-1-2016.html, Abrufdatum: 13.02.2025.
- [4] Siemens AG. The True Cost of Downtime 2022—How much do leading manufacturers lose through inefficient maintenance?. URL: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:3d606495-dbe0-43e4-80b1-d04e27ada920/dics-b10153-00-7600truecostofdowntime2022-144.pdf, Abrufdatum: 10.02.2025.
- [5] Liedtke, T.: Informationssicherheit: Möglichkeiten und Grenzen, 1. Auflage. Berlin 2022.
- [6] Zweites Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme (IT-Sicherheitsgesetz 2.0). URL: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/gesetzestexte/it-sicherheitsgesetz-2.pdf?__blob=publicationFile&v=1, Abrufdatum 13.02.2025.
- [7] The EU Resilience Act. URL: https://digital-strategy.ec.europa. eu/en/library/cyber-resilience-act, Abrufdatum 11.10.2024.
- [8] NIS-2 Directive. URL: digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/ nis2-directive, Abrufdatum 11.10.2024.
- International Electrotechnical Commission: IEC TR 63069:2019.
 Industrial-process measurement, control and automation. URL: vde-verlag.de/iec-normen/247681/iec-tr-63069-2019, Abrufdatum: 11.10.2024.
- [10] NAMUR: NA 163:2017. IT-Risikobeurteilung von PLT-Sicherheitseinrichtungen. URL: dinmedia.de/de/technische-regel/namur-na-163/284932490, Abrufdatum: 11.10.2024.
- [11] Yarza, I.; Agirre, I.; Mugarza, I.; Nitsche, G.; Uven, P.; Orbegozo, J. M. Towards a Contract-Based Definition of Update-Compatibility Modelling Safety Integration Criteria. 2023 IEEE 26th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). DOI: https://doi.org/10.1109/ITSC57777.2023.10422590.
- [12] International Electrotechnical Commission: IEC 61508-3:2010. Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. URL: https://www.vde-verlag.de/iec-normen/217179/iec-61508-3-2010.html, Abrufdatum: 10.02.2025.
- [13] Mugarza, I.; Parra, J.; Jacob, E. Cetratus: A framework for zero downtime secure software updates in safety□critical systems. Software: Practice and Experience, 50(8), 1399–1424. DOI: https://doi.org/10.1002/spe.2820.
- [14] Agirre, I.; Yarza, I.; Mugarza, I.; Binchi, J.; Onaindia, P.; Poggi, T.; Cazorla, F. J.; Kosmidis, L.; Grüttner, K.; Uven, P.; Abuteir, M.; Loewe, J.; Orbegozo, J. M.; Botta, S. Safe and secure software updates on high-performance mixed-criticality systems: The UP2DATE approach. Microprocessors and Microsystems, 87, 104351. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micpro.2021.104351.
- [15] Ehrlich, M.; Bröring, A.; Harder, D.; Auhagen-Meyer, T.; Kleen, P.; Wisniewski, L.; Jasperneite, J. (2021). Alignment of safety and security risk assessments for modular production systems. Elektrotech. Informationstechnik, 138(7), 454-461.
- [16] Lindemann, F.: Digitale Vernetzung und (Cyber-)Sicherheit unlösbarer Widerspruch oder zwei Seiten einer Medaille? Für ein neues Zusammenspiel von Staat, Wirtschaft und Gesellschaft. Sicherheit interdisziplinäre Perspektiven. 2019.
- [17] Hollerer, S.; Kastner, W.; Sauter, T.: Safety und Security ein Spannungsfeld in der industriellen Praxis. In: Elektrotechnik und Informationstechnik: e & i, 138 (2021) 7, S. 449-453.
- [18] Lawall, A.; Garcia, J.: Die Utopie der europäischen Cybersicherheitszertifizierungen. Industry 4.0 Science 40 (2024) 2, S.48-55.





Kollaborative Drohneninspektion

Die Infrastruktur in Deutschland ist Gegenstand zahlreicher Debatten. Dabei geht es oft nicht um Erweiterung, sondern um Instandhaltung. Die Voraussetzung dafür sind Inspektionen – etwa an Streckenabschnitten der Bahn –, mit denen der Ausbesserungsbedarf festgestellt wird, die jedoch den laufenden Betrieb nicht beeinträchtigen sollen. Künstliche Intelligenz kann diese Inspektionsprozesse optimieren und damit die Zeit ungeplanter Absperrungen reduzieren.



Prof. Dr. Till Becker ist Professor für Wirtschaftsinformatik am Fachbereich Wirtschaft der Hochschule Emden/Leer.



Agron Neziraj, M. A. arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachbereich Wirtschaft der Hochschule Emden/Leer.

Schlüsselwörter

Künstliche Intelligenz, Inspektionsprozess, kollaborative Inspektion, teilautomatisierte Inspektion, Drohneninspektion

Kontakt

till.becker@hs-emden-leer.de www.hs-emden-leer.de



Kollaborative Drohneninspektion

Ein neuer Ansatz für die Inspektionsarbeit mit KI-Unterstützung

Till Becker und Agron Neziraj, Hochschule Emden/Leer

Die Drohnentechnologie und der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) bieten für verschiedene Bereiche vielversprechende Vorteile. Hierzu zählt auch der Bereich der Inspektionsarbeit. Der Einsatz innovativer Inspektionstechnologien kann Inspektionen insgesamt effizienter machen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurden unterschiedliche rechtliche und wirtschaftliche Aspekte einer KI-basierten autonomen Drohneninspektion betrachtet. Ein weiterer Schwerpunkt ist dabei die Erarbeitung eines Soll-Prozesses, der den Einsatz einer KI-basierten Drohneninspektion darstellt und den Einsatz einer derartigen Inspektionstechnologie steuert. In diesem Beitrag geht es speziell um den kollaborativen Ansatz dieser neuartigen Inspektionsmethodik.

Infrastruktur und Industrieinfrastruktur werden oft über Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte hinweg verwendet. Angesichts der hohen Anzahl an alten Bauwerken kann die Einführung und Etablierung einer effizienteren Inspektionsmethodik einen wirtschaftlichen und infrastrukturellen Vorteil bewirken. Beispielhaft hierfür steht der Verkehrssektor mit ca. 40.000 Bauwerke im Bereich der Bundesfernstraßen [1], die regelmäßig geprüft und unterhalten werden müssen. Mit zunehmendem Alter kann sich der Bauwerkszustand verschlechtern. Die Zustandsnote (ZN) eines Bauwerkes gibt hierzu valide Anhaltspunkte. Im Bereich der Bundesfernstraße befinden sich beispielsweise 23,9 % der Bauwerke bzw. Teilbauwerke in einem guten oder sehr guten Zustand. Ein Großteil der Bauwerke (71,8 %) sind mit befriedigend oder ausreichend bewertet. 4,3 % sind mit nicht ausreichend oder ungenügend bewertet [1].

Der Zustand eines Bauwerkes wirkt sich maßgeblich auf die Inspektionskosten aus. Auf Grundlage einer standardisierten Formel der VFIB e.V. [2] kann der Einfluss einer Zustandsnote auf die Inspektionskosten anschaulich dargestellt werden (**Bild 1**). Zwar kann die finale Kostenausgestaltung einer Bauwerksprüfung nur individuell erfolgen, jedoch gibt dieser standardisierte Ansatz einen guten Einblick in die Kostenstruktur einer Inspektion. Bestandteil der Formel ist zum einen der Zeitaufwand und zum anderen der Stundensatz der Prüfer. Dabei werden alle relevanten Kostenfaktoren berücksichtigt wie Bauwerksart und Umfang der Prüfung [2].

Bild 1 stellt ein fiktives Rechenbeispiel in vereinfachter Form dar, um den Einfluss der Zustandsnoten auf die Inspektionskosten darzustellen. Ergebnis: Je schlechter der Zustand eines Bauwerkes, desto aufwendiger und teurer gestaltet sich eine Inspektion. Die Inspektion einer 100 m² großen Brücke mit einer Zustandsnote von 1,0 kostet 1634 Euro. Befindet sich diese Brücke jedoch in

einem schlechten Zustand (ZN 3,5) steigen die Kosten auf ca. 350 % und damit auf 5848 Euro. Die Inspektion einer 1000 m² und 2000 m² kostet vergleichsweise mehr. Doch **Bild 1** zeigt auf, dass der Kostenverlauf unabhängig von der Brückengröße ähnlich stark verläuft und der relative

Kostenunterschied in der zuvor genannten Konstellation ebenfalls bei ca. 350 % liegt.

Hier besteht das Potenzial, mit neuartiger Drohnentechnologie und KI-Unterstützung den Aufwand und damit die Kosten einer Bauwerksinspektion zu reduzieren. Es gibt bereits erste Ansätze, wie Schäden mit Drohnen erfasst und mit einer KI-basierten Bilderkennungstechnologie automatisiert erkannt werden können [3].

Aktuelle Studien

Die Idee einer Drohneninspektion ist nicht neu. So haben sich bereits verschiedene Institutionen mit den Möglichkeiten einer Inspektion mithilfe von Drohnen beschäftigt. Die Studie von Krebs und Hagenweiler aus dem Jahr 2019 beschäftigt sich mit der Drohneninspektion von Brücken. In dieser Studie konnte festgestellt werden, dass die Drohneninspektion für visuelle Inspektionen effizient eingesetzt werden kann. Neben der Zeit- und Kostenersparnis konnten auch bessere Ergebnisse verzeichnet werden. Die Studie deutete jedoch lediglich auf einen unterstützenden Einsatz durch die Drohne hin, da bestimmte Tätigkeiten im Rahmen der handnahen Prüfung wie die Entnahme von Materialproben mit einer Drohne nicht bewältigt werden können [4]. In einer weiteren Studie von 2017 von Sperber et al., die von der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht wurde, wurden praktische Befliegungen mit einer Drohne an mehreren Brücken durchgeführt, um die Schadenserkennung einer Inspektionsdrohne zu untersuchen [5]. Demnach sind u. a. kleine Risse und chemische Einwirkungen kaum prüfbar.

Insgesamt beschränkt sich die Eignung auch hier eher auf die visuelle Inspektion von Bauwerken [5]. In einer Studie der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) wurde 2023 die



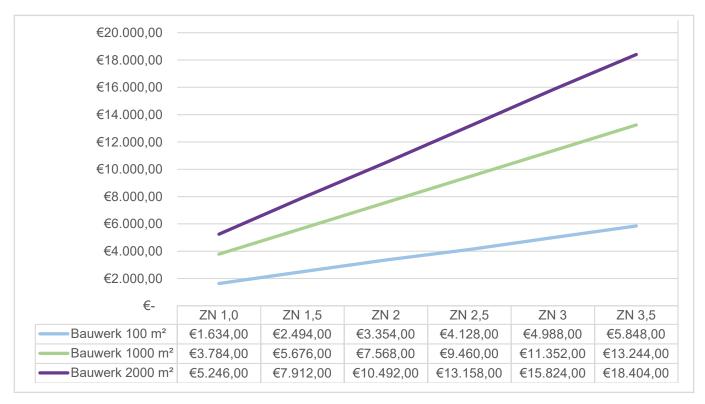


Bild 1: Vergleich Inspektionskosten und Zustandsnote (eigene Darstellung).

Thematik der Schadenserkennung anhand eines Wasserbauwerkes untersucht. Es stellte sich heraus, dass mit dem Einsatz einer Drohne lediglich ca. 70 % der Risse erkannt wurden. Auch wurde eine KI-basierte Schadenserkennungssoftware getestet. Hierbei erzielte die KI lediglich eine Trefferquote von 10 % [6]. Eine weitere Studie aus 2023, die sich mit der visuellen Schadenserkennung befasst hat, macht wiederum deutlich, welche Vorteile eine autonome Drohneninspektion hat. Hierbei wird die Effizienz einer derartigen Inspektionsvariante hervorgehoben. In diesem Kontext wird vor allem auf die gute Bildqualität und die Zeitersparnis eingegangen. Zudem können durch die Erstellung eines digitalen Abbilds bereits identifizierte Schäden besser nachverfolgt werden, wodurch eine Qualitätssteigerung durch die präzise Überwachung bewirkt werden kann. Hinzu kommt die objektive und zuverlässige Schadenserfassung bei gleichzeitiger Minimierung des Arbeitsrisikos [3].

Anhand der Studien kann zusammenfassend festgehalten werden, dass eine umfangreiche handnahe Prüfung durch eine Drohne nicht ersetzt werden kann. Vielmehr können Drohnen unterstützend eingesetzt werden, da die Drohnentechnologie nicht immer alle Schäden erfassen kann. Hinzu kommt, dass Inspektionen mit KI-Unterstützung nicht zwangsläufig zu besseren Ergebnissen führen. Insofern erscheint die Idee einer kollaborativen Inspektion als realistischer Lösungsansatz. Eine kollaborative Inspektion lehnt sich an der Grundidee der Kollaborativen Robotik

an und beschreibt in diesem Kontext die Zusammenarbeit zwischen Mensch und einer KI-basierten Drohne im Zuge einer Bauwerksinspektion. Dadurch sollen die Vorteile der Drohnentechnologie und der klassischen Inspektion genutzt und gleichzeitig die Nachteile beider Varianten ausgehebelt werden. Der Einsatz von KI soll bewirken, dass Inspektionen zuverlässiger, schneller und in einer höheren Frequenz durchgeführt werden, damit nachgelagerte Instandhaltungsmaßnahmen im Sinne einer Predictive Maintenance durchgeführt werden können. Dadurch lassen sich ungeplante Ausfälle verhindern und Kosten einsparen.

Forschungsmethode

Damit zukunftsweisende Prozesse entstehen können, müssen aktuell gültige Prozesse und rechtliche Vorgaben betrachtet und überprüft werden. Bestehende Prozesse beinhalten alle wichtigen Komponenten einer Inspektion und können dementsprechend wichtige Indikatoren für eine zukunftsweisende Inspektionsmethodik enthalten. Aufgrund des spezialisierten Themengebiets und der geringen Verfügbarkeit von Dokumentationen wurden Experteninterviews mit unterschiedlichen Akteuren geführt.

Nach Aussagen der Experten geht es bei der Modellierung eines Soll-Prozesses nicht um die Erstellung neuer Prozesse, sondern vielmehr um die Weiterentwicklung be-



Prozessphase		Autonomielevel		
		0 manuell	1 kollaborativ	2 vollständig autonom
Vorbereitung	Prüf- und Flugplanung	Wird in Absprache mit Auftraggeber erstellt	KI-basierter Entwurf	KI-basierte Anpassung während der Inspektion
gun	Flugsteuerung der Drohne	Ein Drohnenpilot steuert die Drohne	Automatische Flugsteuerung	Vollständig autonome Flugsteuerung
Durchführung	Auswertung der Daten	Vollständige Datenauswertung durch Prüfer	Datenauswertung durch Kl und manuelle Verifizierung	Vollständige Datenauswertung durch Kl
Abschluss	Bericht und Instandhaltungsplan	Vollständige Erstellung durch Prüfer	Kl-basierter Entwurf	Vollständige Erstellung durch Kl

Bild 2: Autonomielevel einer Drohneninspektion (eigene Darstellung).

stehender Prozesse entsprechend einer kollaborativen Inspektion. Die Inspektionsarbeit ist vielschichtig und kann je nach Objektart und Zuständigkeitsbereich differenziert werden. Dabei sind ähnliche Strukturen in Bezug auf Prüfarten und Prüfintervalle zu erkennen. Eine häufig angewandte Vorschrift ist die DIN 1076 ("Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen"). Diese Vorschrift besagt, dass Schäden rechtzeitig zu erkennen und zu beseitigen sind, damit ein Bauwerk regulär genutzt werden kann [7]. Die Option einer Drohneninspektion bzw. Anwendung einer Drohne als Hilfsmittel zur Durchführung einer Inspektion ist in dieser Vorschrift nicht explizit aufgeführt. Eine mit der DIN 1076 vergleichbare Vorschrift gibt es für den Bereich der Drohneninspektion nicht. Zwar existieren Vorschriften, die u. a. den Umgang einer Drohne im Flugbetrieb regulieren, daraus lassen sich jedoch keine Ablaufprozesse ableiten. Daher wurden auch Personen mit Expertise im Bereich Drohnenflüge in die Gruppe der interviewten Experten aufgenommen.

Sollszenarien

Die Auswertung der Interviews und Studien zeigt, dass die Anwendung von KI-unterstützten Drohnenflügen im Zuge einer Inspektion differenziert betrachtet werden muss. Demnach stellt sich grundsätzlich die Frage, welche Funktion KI im jeweiligen Kontext hat und wie zuverlässig die jeweilige Funktion mit KI ausgeführt werden kann.

Beispiele für die KI-Nutzung im Prozess der Drohneninspektion sind in allen Phasen zu finden. Z. B. können in der Vorbereitungsphase durch Machine Learning trainierte Systeme besonders anfällige Stellen eines Bauwerks in das Prüfprogramm aufnehmen. Während des Fluges kann KI die Flugsteuerung der Drohne unterstützen, um bestimmte Bereiche anzufliegen oder für Sensor- und Bildaufnahmen an einer Position schweben. In der Auswertungsphase können Bild- und Musterkennungsalgorithmen helfen, Schäden zu identifizieren. Demnach können bestimmte Prozessschritte je nach Entwicklungsstand der KI variieren. Das Projektteam geht davon aus, dass die Autonomie einer Drohneninspektion vom Entwicklungsstand der KI abhängig ist. Auf Grundlage dieser Annahme zeigt Bild 2 die wesentlichen Unterschiede einzelner Projektphasen in Abhängigkeit des KI-Entwicklungsstands

Autonomielevel 0 beschreibt eine manuelle Drohneninspektion ohne KI-Komponente. Die befragten Experten haben in diesem Kontext aufgezeigt, welche manuellen Tätigkeiten im Rahmen einer klassischen Inspektion zählen: die vorherige Dokumentationen sichten, Genehmigungen einholen, Besichtigung des Bauwerkes, Reinigungsarbeiten am Bauwerk sowie der Aufbau von Gerüsten. Der Einsatz einer Drohne erfolgt nach Ansicht der Experten nur punktuell. Die hauptsächliche Prüfung führt der Prüfer mit einem Notizblock und anderen Hilfsmitteln wie Hammer und Kamera durch. Zur Begutachtung und



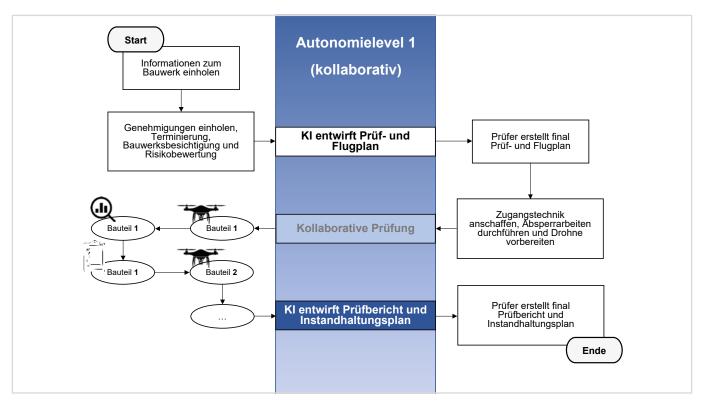


Bild 3: Kollaborativer Inspektionsprozess (eigene Darstellung).

Einleitung von bestimmten Maßnahmen werden nur relevante Bilder hinzugezogen. In diesem Szenario wertet nur der Prüfer die Daten aus und schreibt eigenständig den Prüfbericht.

Autonomielevel 1 kann als eine Form der teilautomatisierte Inspektion verstanden werden und stellt den kollaborativen Prozess einer Drohneninspektion dar. Dieser Prozess wird zumindest in Teilen bereits heute angewendet. Eine vollständig kollaborative Inspektion als Standardvorgehen ist in den nächsten Jahren zu erwarten. Der kollaborative Aspekt ist in diesem Szenario stark ausgeprägt. Die KI unterstützt den Prüfer in allen wichtigen Phasen. **Bild 3** zeigt die Abfolge einer kollaborativen Inspektion und die Wechselwirkung zwischen Mensch und Drohne auf.

Zunächst werden alle relevanten Informationen (Berichte und Konstruktionsdaten) eingeholt. Danach findet eine Bauwerksbesichtigung vor Ort statt sowie eine Risikobewertung, um die Durchführbarkeit einer kollaborativen Inspektion zu prüfen. Anschließend wird gemeinsam mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Wetterverhältnisse ein Termin vereinbart. Auf Grundlage der vorhandenen Informationen entwirft eine KI-basiere Software einen Prüf- und Flugplan. Die finale Planung übernimmt der Prüfer in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber. Auf Grundlage der Vorplanungen erfolgt im nächsten Schritt die Anschaffung und Einrichtung von Zugangstechnik

sowie die rechtzeitige Umsetzung von Absperrarbeiten.

Die Vorprogrammierung der Flugroute zwecks einer teilautomatisierten Befliegung empfiehlt sich im Rahmen einer kollaborativen Inspektion etappenweise und gehört noch zur technischen Vorbereitung. Eine Etappe beschreibt einen bestimmten Bauwerksbereich bzw. ein bestimmtes Bauteil. So ist es möglich, dass ein vordefinierter Bereich von der Drohne zunächst teilautomatisiert inspiziert wird. Die Daten werden in Echtzeit über eine KI-basierte Analysesoftware ausgewertet. Auf Grundlage der Datenanalyse erfolgt die Validierung der KI-Ergebnisse durch den Prüfer. Danach erfolgt eine punktuelle handnahe Nachprüfung.

Während der Nachprüfung wird der nächste Bauwerksbereich von der Drohne inspiziert. An dieser Stelle wiederholt sich der Prozess, bis das komplette Bauwerk inspiziert wurde.

Abschließend werden die Inspektionsergebnisse herangezogen und mithilfe einer KI-basierten Analysesoftware in Form eines Prüfberichts vorformuliert. Die finale Erstellung erfolgt danach durch den Prüfer. Ein Instandhaltungsplan wird ebenfalls durch die KI vorbereitet und anschließend durch den Prüfer final fertiggestellt.

Autonomielevel 2 beschreibt eine vollständig autonome Drohneninspektion. In diesem Szenario besteht die Mög-



lichkeit, dass eine KI-basierte autonome Drohne den Flug- und Prüfplan während der Inspektion anpasst. Die Berechnung der Flugroute erfolgt vollständig autonom und in Echtzeit während der Befliegung. Die Auswertung der Daten inkl. der Schadensidentifizierung übernimmt die KI vollständig autonom. Ebenfalls werden Prüfberichte und Instandhaltungspläne KI-basiert und ohne Eingriff eines Prüfers erstellt. Eine manuelle Verifizierung des Outputs ist nicht erforderlich. Dieses Szenario ist nach Ansicht des Projektteams der Hochschule Emden/Leer und unter Berücksichtigung der erhobenen Daten technologisch und rechtlich aktuell nicht möglich.

Empfehlungen und Ausblick

Die Anpassung aktueller Regularien spielt angesichts der Etablierung dieser neuartigen Technologie eine wichtige Rolle. Hierbei sollte gemäß der befragten Experten keine zusätzlichen bürokratischen und regulatorischen Hürden aufgestellt werden. Die rechtliche Legitimierung einer Drohneninspektion sollte mitunter Haftungsfragen klären sowie klar definierte Qualitätsstandards vorgeben. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit empfiehlt sich mit Einführung einer KI-basierten (teilautomatisierten) Inspektionsdrohne die Durchführung einer individuellen Kosten-Nutzen-Analysen und u. U. die Beauftragung externer Drohnendienstleister, um Fehlinvestitionen zu vermeiden.

Aus wissenschaftlicher Sicht ergeben sich weitere Aspekte, die es zukünftig zu untersuchen gilt. Dazu gehören die Bewertung der Zuverlässigkeit der kollaborativen Inspektion im Vergleich zum klassischen Vorgehen [8], auch mit Blick auf Worst-Case-Risiken [9], sowie die Nachvollziehbarkeit von KI-Entscheidungen [10] und die Integration des Inspektionsprozesses in das Konzept des "Digitalen Zwillings" von Infrastruktur- und Industrieanlagen als Komponente des Lebenszyklus-Managements [11].

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts "KI-basierte autonome Drohneninspektion unzugänglicher Infrastrukturen". Gefördert wird das Projekt durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur.

Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen: Fokus: Brücken. Brückenstatistik. URL: https://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Fachthemen/brueckenstatistik/bruecken_hidden_node.html, Abrufdatum 07.02.2025.
- [2] VFIB e.V.: Empfehlung zur Leistungsbeschreibung, Aufwandsermittlung und Vergabe von Leistungen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Hinweise zur Vergabe von Bauwerksprüfungen. URL: https://www.vfib-ev.de/service/leistungsbeschreibung. php, Abrufdatum 07.02.2025.
- [3] Von Thiessen, R.; Scheidegger, F. u. a.: Automatisierte Infrastrukturwartung. Drohneninspektionen mit Bilderkennung. Zürich 2023. URL: https://www.zh.ch/de/wirtschaft-arbeit/wirtschaftsstandort/innovation-sandbox/ki-in-der-infrastrukturwartung.html, Abrufdatum 07.02.2025.
- [4] Krebs, H.-A.; Hagenweiler, P.: Inspektion von Brücken und Ingenieurbauwerken mit unbemannten Luftfahrzeugsystemen. Kassel 2019. DOI: http://dx.doi.org/doi:10.17170/kobra-202206286413, Abrufdatum 07.02.2025.
- [5] Sperber, M.; Gößmann, R. u. a.: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie. Bergisch Gladbach 2017. URL: https://bast.opus.hbz-nrw.de/ frontdoor/index/index/docld/1840, Abrufdatum 07.02.2025.
- [6] Seiffert, A.; Heimig, B.: Innovative Methoden zur Zustandserfassung. FuE-Abschlussbericht B3951.04.04.70009. Karlsruhe 2023. URL: https://hdl.handle.net/20.500.11970/110943, Abrufdatum 07.02.2025.
- [7] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung. Berlin 1999.
- [8] Rakha, T.; Gorodetsky, A.: Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. In: Automation in Construction 93 (2018). DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002.
- [9] Alderson, D.; Brown, G.; Carlyle, W. M.; Wood, R. K.: Assessing and Improving the Operational Resilience of a Large Highway Infrastructure System to Worst-Case Losses. In: Transportation Science 52 (2017) 4, 1012-1034. DOI: https://doi.org/10.1287/ trsc.2017.0749.
- [10] Ahmed, I.; Jeon, G.; Piccialli, F.: From artificial intelligence to explainable artificial intelligence in industry 4.0: a survey on what, how, and where. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics 18 (2022) 8. DOI: https://doi.org/10.1109/ TII.2022.3146552.
- [11] Kaewunruen, S.; Sresakoolchai, J.; Ma, W.; Phil-Ebosie, O.: Digital Twin Aided Vulnerability Assessment and Risk-Based Maintenance Planning of Bridge Infrastructures Exposed to Extreme Conditions. In: Sustainability (2021) 13, 2051. DOI: https://doi.org/10.3390/su13042051



Preisverleihung
Hannover Messe,
2. April um 16:30 Uhr, Halle 17





MAINDAYS 2025 Jahrestreffen der Instandhalter

EINE NEUE ÄRA BEGINNT – DIGITAL, NACHHALTIG UND SMART 21. – 22. Mai 2025, Berlin



DIE WICHTIGSTEN THEMEN IM ÜBERBLICK

Mobile, nachhaltige und digitale Instandhaltungsstrategien für das **Asset Portfolio**

Umgang mit **Fachkräftemangel, Kompetenzent- wicklung und Qualifizierung** von Mitarbeitenden

Outsourcing vs. Insourcing: Herausforderungen durch Personalabbau und steigende Kosten für Fremdfirmen **KI-Lösungen** zur Umsetzung von Predictive Maintenance

Ressourceneinsparung durch Digitalisierung von **Abwicklungsprozessen**

Das richtige Teil am richtigen Ort zur richtigen Zeit – **digital gestütztes Ersatzteilmanagement**





Schulungen im Industrial Metaverse

Vor allem in der Industrie können virtuelle Systeme eine realitätsnahe und risikofreie Lernumgebung schaffen, die Schulungen nicht nur einfacher, sondern auch kostengünstiger macht – was in Zeiten des Fachkräftemangels und wachsender Produktionskomplexität so entscheidend ist wie nie. Welche Chancen Trainingsprogramme genau bieten, und was die Herausforderungen bei ihrem Einsatz sind, wird in einer Reihe von Experteninterviews deutlich.

Schlüsselwörter

Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality, Schulungen, Immersives Lernen, Industrieexperten, Metaversum

Leon Schellhammer studiert im Master Umweltorientierte Logistik an der Stuttgart Business School der Hochschule für Technik Stuttgart.

Lucas Waag studiert im Master Umweltorientierte Logistik an der Stuttgart Business School der Hochschule für Technik Stuttgart.

Mert Cumert studiert im Master Umweltorientierte Logistik an der Stuttgart Business School der Hochschule für Technik Stuttgart.

Prof. Dr.-Ing. Dieter Uckelmann lehrt als Professor an der Hochschule für Technik Stuttgart. Seine Forschungsthemen umfassen u. a. Anwendungen des Internets der Dinge in der Industrie 4.0 sowie zugehörige Fragen der Didaktik.

Kontakt

32scle1mul@hft-stuttgart.de www.hft-stuttgart.de



Schulungen im Industrial Metaverse

Buzzword oder Chance?

Leon Schellhammer, Lucas Waag, Mert Cumert und Dieter Uckelmann, Hochschule für Technik Stuttgart

Metaversum-basierte Trainingsprogramme bieten eine realitätsnahe und risikofreie Lernumgebung, die besonders im industriellen Kontext wertvolle Anwendungen findet – etwa in immersiven Schulungen und der Simulation von Arbeitsabläufen. Trotz erheblicher Potenziale bestehen Herausforderungen wie Datenschutz, technologische Akzeptanz und Integration in bestehende Systeme. Zur Untersuchung der Relevanz von Schulungen im Metaverse wurden vier Experteninterviews durchgeführt. Um die wissenschaftliche Strenge zu gewährleisten, wurde bei allen Interviews derselbe Fragebogen eingesetzt. Dies ermöglichte es, die Antworten zu analysieren und vergleichbare, verlässliche Daten zu erhalten.

Es lässt sich beobachten, dass Unternehmen wie Meta, Microsoft und Google beträchtliche Ressourcen in die Entwicklung von Technologien investieren, die das Metaversum unterstützen. Dies deutet darauf hin, dass es sich nicht nur um einen kurzlebigen Trend handelt, sondern um ein langfristiges Engagement. [4]

Metaversum und seine Bedeutung

Das Metaversum (engl. Metaverse) hat seine Wurzeln im Gaming-Bereich, etwa in den Computerspielen "Habitat" und "Second Life". Im Laufe der Zeit wurden diese Spielewelten zunehmend von stationären Computern auf mobile Geräte übertragen. Aufgrund der langen Existenz des Begriffs und der verschiedenen Plattformen haben sich diverse Definitionen und Ansätze entwickelt. [1] Es ist daher von Bedeutung, diesen Begriff näher zu definieren und einzugrenzen. [2] In diesem Artikel wird der Begriff als eine virtuelle Welt verstanden, in der Objekte digital abgebildet werden. [3] Es wird als eine Erweiterung der realen Welt betrachtet, in diesem Fall ist es eine virtuelle Erweiterung der Schulungsumgebung. Das Metaversum wird als eine Ansammlung verschiedener virtueller Welten betrachtet, die früher oder später miteinander vernetzt werden und eine einzige grenzenlose Welt entstehen lassen. [1] Das Metaversum ist eng verknüpft mit der Entwicklung von VR (Virtual Reality) und AR (Augmented Reality), die auch gerne unter dem Begriff XR (eXtender Reality) zusammengefasst werden.

Metaversum: Buzzword oder zukünftiger Standard?

Das Metaversum hat sich inzwischen auch in der Industrie zu einem Gesprächsthema entwickelt. Es stellt sich jedoch die Frage, ob es ein Buzzword ist oder die Basis für zukünftige digitale Standards bildet. [4] Die Fähigkeit des Metaversums, ein immersives virtuelles Erleben mit realwirtschaftlichen Aktivitäten zu verknüpfen, ist mehr als nur ein kurzfristiges Phänomen. Das ist die Meinung von Experten, die sich mit der Zukunft des Metaversums beschäftigen [5].

Aktuell steigt die Anzahl wissenschaftliche Literatur zu diesem Thema, wie eine Suche nach den Begriffen "Metaverse" und "Industrial Metaverse" in Google Scholar belegt (Tabelle 1).

Ein großes Thema bei den Veröffentlichungen ist das Marktpotenzial des Metaversums, wobei häufig die notwendige Hardware für das Metaversum im Vordergrund steht. Die Technologien Augmented Reality (kurz: AR) oder Virtual Reality (kurz: VR) werden als Umsatztreiber in diesem Bereich gesehen. [1]

Die Experten der Boston Consulting Group prognostizierte 2022 das Marktpotenzial des Metaversum im Jahr 2025 auf 250 bis 400 Milliarden USD. [7] Bei Unternehmen soll es in Zukunft, vor allem in den Bereichen Werbung, Konferenzen und Veranstaltungen, viele Anwendungsfälle geben. [1] Mit dem "Industrial Metaverse", das Konzepte wie das Internet der Dinge, Digitale Zwillinge und XR vereint und fortführt, entwickelt sich seit kurzem ein neues Anwendungsfeld. Persistence Market Research geht davon aus, dass der industrielle Metaverse-Markt bis 2033 auf 765,8 Milliarden USD anwachsen wird. [8] Damit übersteigt das wirtschaftliche Potenzial des "Industrial Metaverse" die Prognose von 2022 für das gesamte Metaversum.

Ein wichtiger Einsatzbereich in der Industrie sind VR und AR-gestützte Trainings. Bei Siemens Energy wird jedoch nicht von Metaversum-Schulungen gesprochen, sondern von Schulungen, die in einer digitalen Umgebung stattfinden. Missverständnisse, die durch den inflationär benutzten Begriff "Metaversum" auftreten, werden so umgangen. [9] Ebenfalls werden lieber spezifische Namen der Softwarelösungen der Anwendung verwendet, anstatt des Begriffs des "Industrial Metaverse". [10] Vor dem



Jahr	Zahl der Ergebnisse zum Suchbegriff "Metaverse"	Zahl der Ergebnisse zum Suchbegriff "Industrial Metaverse"
2022	22 800	117
2023	31 200	421
2024	35 900	839

Bild 1: Ergebnisse einer Suchanfrage in Google Scholar [6] zu den Begriffen "Metaverse" und "Industrial Metaverse".

Hintergrund der aktuellen Entwicklungen sowie des Engagements führender Technologieunternehmen kann jedoch angenommen werden, dass das Metaversum nicht nur eine vorübergehende Faszination, sondern eine zukünftig relevante Technologie darstellt. [4]

Einsatzmöglichkeiten und Vorteile

Angewandte Use Cases

Die Integration von VR und AR in industrielle Ausbildungsprozesse bietet innovative Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz und Qualität der Schulungen. In der VR-Umgebung wird der Arbeiter direkt in die Produktionsumgebung eingebunden und kann Montagevorgänge in einem simulierten realen Kontext üben. Diese immersive Methode ermöglicht eine realitätsnahe und risikofreie Vorbereitung auf die tatsächlichen Arbeitsbedingungen. [10]

Zusätzlich kann die AR-Technologie unterstützend eingesetzt werden, um etwa einem geringqualifizierten Arbeiter visuell und interaktiv zu zeigen, wie spezifische Aufgaben wie der Wechsel des Rades oder der Batterie eines fahrerlosen Transportsystems auszuführen sind. Hierzu kann ein Tablet verwendet werden, das Schritt für Schritt die notwendigen Handlungen in der erweiterten Realität darstellt. Durch diese visuelle Anleitung können das Verständnis und die Kompetenz des Arbeiters erheblich verbessert werden, ohne dass umfangreiche Vorkenntnisse erforderlich sind. [10]

Ein praktisches Beispiel für den Einsatz von AR-Technologie fand in einer Mini-Fabrik an einer Hochschule in Deutschland statt. Dieser Showcase zeigte das Potenzial der AR-Anwendungen, allerdings wurde das Projekt nicht weiterverfolgt. Eine bemerkenswerte Ergänzung zu dieser Technologie ist die Möglichkeit, Spezialisten per Videokonferenz hinzuzuschalten, um spezifische Fragestellungen effektiv zu bewältigen. Diese Methode trägt zur Verringerung von ortsgebundenen Reisetätigkeiten bei und hat positive Auswirkungen auf den Fachkräftemangel, indem Expertenwissen flexibel und ortsunabhängig zur Verfügung gestellt werden kann. [11]

Effizienzsteigerung im Training

Einen großen Vorteil sieht der Experte von Trumpf darin, dass man in der Virtual Reality Bewegungsabläufe optimal trainieren kann, um das "Muscle Memory" bei den Trainierenden zu aktivieren. Es existieren zwar unterschiedliche Gewichte und eine andere Haptik im Gegensatz zum realen System, aber es können die Aufgaben in der richtigen Reihenfolge trainiert werden, um sich besser auf die reale Welt vorzubereiten. Zudem bleiben Fehler in der digitalen Welt ohne Konsequenzen und tragen so zur Arbeitssicherheit bei.

Dieses Prinzip ist ein wichtiger Bestandteil der Schulungen von Trumpf, um aus Fehlern lernen zu können. Bei großen und komplexen Maschinen spielt deshalb auch die Sicher-

Bild 2: Mitarbeiterschulung im Live-Betrieb (generiertes Bild: DALL·E).







Bild 3: XR-inspirierte Trainingsszenarien (generiertes Bild: DALL·E).

heit immer eine große Rolle, welche in der digitalen Welt gegeben ist. Einen weiteren Vorteil der digitalen Schulung sieht der Experte darin, dass man bestimmte Aufgaben, die man früher in der Ausbildung gelernt hat, aber seitdem nicht mehr angewendet hat, wiederholen und trainieren kann, bevor man in der echten Welt an der Maschine arbeitet. [12] Siemens Energy bestätigt den Vorteil, dass Trainierende nicht nur den Trainern zuschauen, sondern die die Arbeitsschritte in der virtuellen Welt durchführen und verinnerlichen. [9]

Nachhaltigkeit neu gedacht

Beim Thema Nachhaltigkeit sieht die Expertin von Siemens Energy einen großen Vorteil in den digitalen Schulungen. International operierende Unternehmen haben Standorte und Kunden auf der ganzen Welt. Anstatt dass die Experten für Schulungen oder Probleme jeweils zu dem entsprechenden Standort fliegen müssen, können sie Mitarbeitende vor Ort durch die Virtual Reality unterstützen. Zudem können die Schulungen überall auf der Welt, unabhängig von Zeit und Ort, durchgeführt werden. [9]

Zusätzlich bilden digitale Schulungen einen großen Vorteil für Firmen wie Trumpf, welche mit sehr großen, komple-

xen und teuren Maschinen arbeiten. Das Unternehmen muss nun nicht mehr für jeden Trainingsstandort eine Maschine herstellen, wodurch Platz und Geld gespart werden kann. Stattdessen werden diese Maschinen als 3D-Modell in der virtuellen Welt dargestellt. Dort können den Trainierenden die nötigen Arbeitsschritte gezeigt werden. Diese können anschließend in VR geübt und auch evaluiert werden. [12]

Die Produktion wird in der Art und Weise, wie aktuell gearbeitet wird, durch die Unterstützung verschiedener Technologien (z.B. XR-Brillen, Projektion, Tablet, Kamera, Roboter) radikal verändert. Gegenüber der Arbeit mit einem Tablet bleiben die Hände bei der Nutzung von XR-Brillen für die Eingabe frei. [10]

Welche Herausforderungen sehen die Industrieexperten?

Überwindung der Akzeptanzbarrieren

Die Industrieexperten waren sich bewusst, dass das Thema Akzeptanz, vor allem bei den Mitarbeitenden der älteren Generation, eine Herausforderung sein wird. Der Experte von abat sieht die Herausforderung bei älteren Personen, bei denen das Gefühl für den Controller nicht in gleichem Maße vorliegt, wie bei der jüngeren Generation. [11] Trumpf hat zur Akzeptanzsteigerung eine externe Firma eingeladen, die den Mitarbeitenden das Prinzip der digitalen Schulung näherbringen soll. Dabei durften die Mitarbeitenden das Equipment austesten, um sich ein eigenes Bild zu machen. Die junge Generation wächst praktisch mit diesen Technologien auf und ist deshalb offen für solche Innovationen, aber auch die älteren Kollegen haben ein gutes Feedback nach dem Austesten gegeben. Die Prämisse ist jedoch, dass die digitale Schulung einwandfrei läuft und man alles wie in der realen Welt abbilden kann. [12]

Die Expertin bei Siemens Energy beschreibt folgende Vorgehensweise. Den Mitarbeitenden wird nicht einfach eine neue Technologie vorgesetzt, nur weil diese gerade aktuell ist. Stattdessen wird nach Lösungen für Probleme gesucht, die durch XR-Technologie gelöst werden können. [9]

Dassault Systèmes sieht die Technologie seit Jahren einsatzbereit. Die aktuelle Herausforderung besteht darin, diesen Wandel zu steuern. Der Wille, in diesem Bereich voranzukommen, muss daher vom Management vorangetrieben und so geführt werden, dass die Mitarbeiter und der Mehrwert im Mittelpunkt der Diskussionen stehen. Das Management zögert jedoch noch, große Summen in diese Art von Projekten zu investieren. [10] Derzeit geht eine signifikante Anzahl von Menschen in den Ruhestand und die jüngere Generation rückt nach.



Dies könnte zu einer deutlichen Verbesserung der Akzeptanz führen. [11]

Datenschutz und Cyber-Security im Fokus

Die Unternehmen Trumpf und Siemens Energy sind sich einig, dass der Datenschutz die größte Herausforderung bei digitalen Schulungen ist. Trumpf sieht vor allem die Gefahr, dass schützenswerte CAD-Daten durch die Software enthüllt werden können. Diese wären besonders wertvoll für Konkurrenten, weil dadurch Reverse Engineering betrieben werden könnte.

Hier muss dafür gesorgt werden, dass die Cloud und alle Server vor möglichen Angriffen geschützt sind. Außerdem müssen auch die Daten der Nutzer, also der Trainierenden oder Service-Techniker, geschützt werden. Falls ein Service-Techniker bei Kunden unterwegs ist, darf die Software oder Hardware nur eingeschränkt Daten erfassen. Hier muss auch die EU den Datenschutz für die entsprechende Hardware und Software regulieren. [12]

Aus dem Interview mit Siemens Energy geht Cyber-Security als große Herausforderung hervor, weshalb ein dauerhafter Austausch mit den IT-Kollegen notwendig ist. Siemens Energy führt aus diesem Grund regelmäßig Penetrationstests für die Hardware und Software durch, um Angriffspotenziale auszumachen und diese dann zu beheben. Vor allem Unternehmen in der Energiebranche sind ein beliebtes Ziel bei Hackern. [9]

Ersetzt das Metaversum bald die traditionelle Schulung?

Siemens Energy gibt an, dass Schulungen in bestimmten Bereichen zu 100 % durch digitale Schulungen ersetzt werden können. Gerade bei der Inbetriebnahme und Instandhaltung von Maschinen oder Geräten sieht Siemens Energy großes Potenzial. Trotz geopolitischer Spannungen können Reparaturen mithilfe von Experten in einem digitalen Raum durchgeführt werden. So konnte etwa eine Gasturbine in Israel repariert werden. Ebenfalls kann der Techniker vor Ort nachhaltiger geschult werden und bei ähnlichen Problemen diese selbstständig lösen, anstatt wieder auf den Experten zurückzugreifen. [9] Laut Trumpf werden die Schulungen im Metaversum jedoch eher als Zusatz angesehen und sollen die traditionellen Schulungen in bestimmten Bereichen unterstützen. [12]

Laut Dassault Systèmes sollte jedes produzierende Unternehmen anstreben, online Schulungen anzubieten und zu fördern. Durch diese Online-Plattform kann die Ausbildungszeit von 2-3 Jahren halbiert werden. [10] Arbeitskräfte in der Produktion werden immer knapper, so dass auch weniger qualifiziertes Personal eingestellt wird, die Fertigungsabläufe werden komplexer, die Produktionsvarianz nimmt drastisch zu und schließlich gibt es ein hohes Optimierungspotenzial der Qualitätskontrolle. Der Experte von Dassault Systèmes sieht Online-Schulungen als Standard in der Zukunft. [10]

Bild 4: Überblick der Ergebnisse aus der Expertenbefragung.

Thema	Erkenntnisse aus den Experteninterviews
Metaversum: Buzzword oder Standard?	Das Metaversum wird langfristig als relevante Technologie betrachtet.
Akzeptanz	Ältere Mitarbeitende haben Schwierigkeiten mit der Steuerung. Unternehmen wie Trumpf setzen auf Testphasen zur Gewöhnung.
Datenschutz und Cyber- Security	Der Schutz sensibler Daten ist entscheidend. Unternehmen wie Trumpf und Siemens Energy führen Penetrationstests durch.
Einsatzmöglichkeiten	VR- und AR-Integration bieten Vorteile in Schulungen für realitätsnahe Trainings. Nutzung von Tablets bieten einen Mehrwert zur interaktiven Anleitung.
Effizienzsteigerung im Training	Bewegungsabläufe werden in VR trainiert, um Muskelgedächtnis zu aktivieren. Fehler können gefahrlos gemacht werden.
Nachhaltigkeit	Reduzierung von Reiseaufwänden und CO2-Emissionen durch Remote- Schulungen. Virtuelle 3D-Modelle ersetzen physische Maschinen für Trainingszwecke.
Zukunft der Schulungen	Siemens Energy sieht in bestimmten Bereichen eine komplette Digitalisierung der Schulungen. Trumpf betrachtet das Metaversum als zusätzliche Lösung.
Kritische Stimmen	Einige Unternehmen sehen Probleme in der Rückmeldung und Fehlererkennung in VR-Trainings. Dienstleister wie abat bemerken ein abnehmendes Interesse an VR-Technologie.



Es gibt auch Gegenstimmen aus der Industrie. Ein Experte von abat empfindet das Thema eher kritisch. In Schulungen werden oftmals falsche Objekte gegriffen oder falsche Abläufe durchsimuliert. Hier fehlt es an adäquaten Rückmeldungen, die den Schulenden darauf hinweisen, dass gerade ein Fehler gemacht wurde. Jedoch sieht auch er Potenzial, gerade wenn es zu Gefahrensituationen kommt. Hier können digitale Schulungen immense Vorteile zum Schutz der Mitarbeitenden darstellen. [11] Dennoch erlebt abat seit Anfang 2024 einen Rückgang des Interesses an der VR-Technologie. Der Mehrwert sei nicht so groß, dass kleinere Firmen diese kaufen wollen. Dagegen verfügen Großunternehmen über eigene Abteilungen für die neue Technologie und entwickeln individuelle Softwarelösungen. [11]

Schulungen zukünftig mit VR-Brille?

Die Untersuchung zeigt, dass das Metaversum, ursprünglich aus der Spielewelt stammend, zunehmend als wichtige technologische Entwicklung in der Industrie anerkannt wird (Tabelle 2).

Durch die Integration von VR- und AR-Technologien können Schulungen effizienter und realistischer gestaltet werden, was insbesondere bei der Inbetriebnahme und Wartung komplexer Maschinen erhebliche Vorteile bietet. [12] Digitale Schulungen ermöglichen nicht nur die Simulation von Arbeitsprozessen in einer sicheren Umgebung, sondern tragen auch zur Nachhaltigkeit bei, indem CO₂-Emissionen durch ausbleibende Reisen reduziert werden. [9] Trotz dieser Vorteile bestehen Herausforderungen. Die Akzeptanz neuer Technologien variiert, insbesondere bei älteren Mitarbeitern, und der Datenschutz bleibt ein zentrales Anliegen. Technologische Einschränkungen und hohe Kosten sind weitere Hürden, die überwunden werden müssen. Dennoch sehen Experten langfristig großes Potenzial im Metaversum, insbesondere durch die kontinuierliche Verbesserung der Hardware und die zunehmende Akzeptanz digitaler Lösungen. [12]

Insgesamt kann das Metaversum als eine transformative Technologie betrachtet werden, die die Art und Weise, wie industrielle Schulungen durchgeführt werden, grundlegend verändern kann. Unternehmen sollten die Entwicklung dieser Technologien verfolgen und evaluieren, wie sie in ihre spezifischen Trainings- und Produktionsumgebungen integriert werden können, um Wettbewerbsvorteile zu sichern und dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken.

Aus den Resultaten der Befragung ergeben sich eine Reihe von offenen Forschungsfragen zu didaktischen Konzepten, den wirtschaftlichen Auswirkungen und den Chancen von KI-Assistenten für die Individualisierung und Akzeptanzsteigerung der Trainingsszenarien, die es zukünftig zu beantworten gilt.

Literatur

- [1] Bauer, S. R.: Das Metaversum heute Chancen, Risiken und Erfolgsfaktoren für deutsche Unternehmen. Essen 2023.
- [2] Tingelhoff, F.; Marga, J. J.: Perspektiven auf das Metaverse: Zeitgeist des Internets der Zukunft. In: Wirtschaftsinformatik & Management (2023) 15, S. 290–294.
- [3] Jan, B.; Dr. Hans-Peter, K.: Metaverse: Hype oder "next big thing"? Institut der deutschen Wirtschaft Köln e.V. Köln 2022.
- [4] Martha, B.; Hartmut, F.; Markus, S.: Metaversum: Hype oder Hoffnung?. In: Wirtschaftsinformatik & Management (2023), S. 44-53.
- [5] Anderie, L.; Hönig M.: Untersuchungen zum Potenzial von Metaverse, Working Papers, No. 27. Frankfurt am Main 2023.
- [6] "Google Scholar," Alphabet Inc. URL: https://scholar.google.de/ scholar?hl=de&as_sdt=0%2C5&q=Metaversum&btnG=, Abrufdatum: 02.06.2024.
- [7] Bobier, J.-F.; Mérey, T.; Robnett, S.; Grebe, M.; Feng, J.; Rehberg, B.; Woolsey K.; Hazan, J.: The Corporate Hitchhiker's Guide to the Metaverse. Boston Consulting Group. Boston 2022.
- [8] "Persistence Market Research, Industrial Metaverse Market Outlook," [Online]. Available: https://www.persistencemarketresearch.com/market-research/industrial-metaverse-market. asp. [Abrufdatum: 13.02.2025]
- [9] E. Siemens Energy: Experteninterview mit Siemens Energy über Schulungen im Metaverse. [Interview]. 14.05.2024.
- [10] E. Dassault Systèmes: Experteninterview mit Dassault Systèmes über Schulungen im Metaverse. [Interview]. 03.05.2024.
- [11] E. abat: Experteninterview mit abat über Schulungen im Metaverse. [Interview]. 23.05.2024.
- [12] E. Trumpf: Experteninterview mit Trumpf über Schulungen im Metaverse. [Interview]. 26.04.2024.



Enhance your visibility

Increase your reach and influence with Open Access by GITO

For immediate and lasting impact

It is our priority to make your publication available to the wider research community. As members of Crossref, the leading organization for the promotion of scientific exchange, we can offer our authors all the advantages of open access at attractive conditions.

Digital Object Identifiers (DOI) are pivotal to the digital infrastructure of scholarly publishing. They are of great value to authors, readers and publishers, making publications easily accessible in the long term. Since DOIs uniquely identify their objects, they enable texts to be located anytime and anywhere with a single link. Unlike URLs, DOIs remain unchanged. In the ever-growing sea of digital information, DOIs make the exchange of information more reliable. This way, you can significantly boost the reach and impact of your work.

Your benefits at a glance

- **✓** Higher Visibility
- √ Improved Dissemination of Your Research
- ✓ More Citations
- **✓** Excellent Value for Money
- **✓** All-inclusive Service
- **✓** Greater Recognition





VORSCHAU



3/2025

Digitaler Zwilling

Veröffentlichung: Juni 2025

Ausgabe 4/2025 von Industry 4.0 Science mit dem Schwerpunkt "Intelligente Logistik" erscheint im August 2025.

Modell der Strategischen Produktplanung: Digitale Zwillinge für kreislauffähige Produkte und Produktionsprozesse

Die Strategische Produktplanung (SPP) muss sich aktuellen Herausforderungen wie Kreislaufwirtschaft, Digitale Geschäftsmodelle und Interdisziplinarität stellen. Etablierte Vorgehensmodelle sind beispielsweise nur bedingt auf Produkt-Service-Systeme anwendbar. In diesem Beitrag wird ein neues Modell der SPP vorgestellt, das auf einer Analyse von 230 existierenden SPP-Ansätzen basiert und Digitale Zwillinge zur kontinuierlichen Informationsrückführung aus dem gesamten Produktlebenszyklus integriert. Dies ermöglicht eine vorläufige Produktüberwachung und eine dynamische Anpassung der SPP. Das Modell folgt einem agilen, iterativen Ansatz bestehend aus fünf zyklischen Kernaktivitäten, die entlang der zunehmenden Reife durch fünf Kontrollpunkte strukturiert werden. Die frühzeitige Berücksichtigung der Kreislauffähigkeit sorgt für ressourcenschonende Produkte und Produktionsprozesse. Durch Flexibilität, Informationszirkularität und Nachhaltigkeit ist das Modell zukunftsfähig und branchenübergreifend anwendbar.

Iris Gräßler, Sven Rarbach und Benedikt Grewe (Universität Paderborn)

Implementierung Digitaler Zwillinge für Produktion und Logistik: Herausforderungen und Handlungsempfehlungen

Digitale Zwillinge realer Ressourcen, Produkte oder Prozesse ermöglichen unter Verwendung der Simulation und geeigneter Datenschnittstellen eine echtzeitnahe Abbildung des aktuellen Systemverhaltens. Durch die kontinuierliche Erfassung und Verarbeitung von Realdaten erlauben sie simulationsgestützte Analysen, Prognosen und ggf. steuernde Eingriffe in die Realität. Auf diese Weise können Produktions- und Logistikprozesse effizienter und effektiver geplant und betrieben werden. Die vielfältigen Anwendungsfelder von Digitalen Zwillingen sind beispielsweise die virtuelle Inbetriebnahme von Anlagen, die simulationsgestützte Verbesserung von Produktionsabläufen, die vorausschauende Wartung sowie die Überwachung von Logistik- und Produktionsprozessen. Für eine effiziente industrielle Umsetzung Digitaler Zwillinge ist es essenziell, mögliche Anwendungsfelder in Produktion und Logistik für das eigene Unternehmen zu erkennen und daraus resultierende Herausforderungen der Implementierung zu bewerten.

Sigrid Wenzel, Deike Gliem und Nicolas Wittine (Universität Kassel)

IMPRESSUM

Herausgeber

Wissenschaftlicher Beirat

Anschrift des Verlages

Redaktionsleitung

Wissenschaftliche Redaktion

Nachrichten

Bezugsbedingungen

Industry 4.0 Science erscheint jeden 2. Monat. **Einzelpreis** € 59,– zzgl. Versand

Verlag und Vertrieb

Layout und Satz

Nicole Kappe E-Mail: nicole.kappe@gito-verlag.de

GITO achtet und respektiert Diversität.

In unseren Medien wird für Personen- und Berufsbezeichnungen in der Regel das generische Maskulinum verwendet. Diese Sprachform schließt wertungsfrei alle Geschlechter ein.

Industry 4.0 Science ist Organ der Fachgruppe "Informationssysteme in Industrie und Handel" der Gesellschaft für Informatik e.V. sowie Organ der Wissenschaftlichen Gesellschaft (Hochschulgruppe) für Arbeits- und Betriebsorganisation WGAB e.V.

Der Verlag behält sich eine Nutzung seiner Inhalte für kommerzielles Text und Data Mining im Sinne von § 44b UrhG ausdrücklich vor. Für den Erwerb eines









Expertenwissen für Entscheider.

Anspruchsvolle Inhalte perfekt aufbereitet. Damit Sie und Ihr Unternehmen bei Technologieentscheidungen vorankommen. Führende Unternehmen lesen die führenden Fachmedien.



Nr. 1 bei ERP-Systemen

ERP Management ist das führende Fachmedium rund um ERP, HR, BI und CRM Software im deutschsprachigen Raum.

erp-management.de



Smart Factory

Factory Innovation ist das smarte, innovative Fachmedium für Lösungen rund um Smart Factory und das Industrial Internet of Things. factory-innovation.de



Nr. 1 bei der Anbieterauswahl

Innovative Suchportale auf den Websites von ERP und FI bieten eine zielgenaue Auswahl von Anbietern, Beratern und Weiterbildung. siehe ERP und FI Websites

Vorsprung für Wissenschaftler.

Sorgfältig selektierte Forschungsergebnisse werden einem hochrangigen internationalen Publikum präsentiert.

Namhafte Wissenschaftler weltweit lesen unsere Science-Journals.



Industrie 4.0

Industry 4.0 Science ist die führende wissenschaftliche Zeitschrift für die Industrie 4.0. Auf Deutsch und Englisch. industry-science.com



Enterprise Systems

AIS Transactions on Enterprise Systems ist die führende wissenschaftliche Zeitschrift rund um Unternehmenssoftware.

aes-journal.com



Wirtschaftsinformatik Unser Online-Lexikon der Wirt-

Unser Online-Lexikon der Wirtschaftsinformatik hat die meisten Zugriffe bei WI-Studierenden und Hochschulen.

enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de





Mittwoch, 02. April 2025, 12:00 - 14:00 Uhr Lounge Digital Transformation Stage, Halle 17

Treffen Sie in entspannter Lounge-Atmosphäre ausgewiesene Experten, die im kleinen Kreis Ihre Fragen rund um ERP-Systeme beantworten.

- Wo kann ich sofort mit KI meine Abläufe verbessern?
- Ist mein ERP-System zu alt, brauche ich ein Upgrade?
- Muss ich meinem Anbieter in die Cloud folgen?
- Wie sollte meine IT-Landschaft in Zukunft aussehen?
- Kann mein ERP-Anbieter noch mit den neuen Technologien mithalten?
- Welches sind die besten ERP-Systeme für meine Branche?
- Soll ich auch die nötigen Umsysteme von meinem Anbieter kaufen oder lieber frei am Markt?
- Wie kann ich mein teures kompliziertes ERP-System durch eine bessere Alternative ablösen?
- Brauche ich für die Digitale Transformation ein neues ERP-System?

Zielgruppe: ERP-Anwender auf C-Level

Im Anschluss: informeller Austausch, Snacks und Drinks



gito GITO EVENTS

