Praxiswissen Instandhaltung

Von kognitiver Intelligenz zu regenerativen Systemen & Human Digitality

40. Instandhaltungsforum

TÜV Media

Maintenance Next-Level: Asset-Evolution

- Leseprobe -

H. Biedermann (Hrsg.)

TÜV Rheinland

- Leseprobe -

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie. Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier.

ISBN 978-3-7406-1064-7 (Print)
ISBN 978-3-7406-1065-4 (E-Book)

© by TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln 2026
® TÜV, TUEV und TUV sind eingetragene Marken der TÜV Rheinland Group. Eine Nutzung und Verwendung bedarf der vorherigen Zustimmung durch das Unternehmen.
Gesamtherstellung: TÜV Media GmbH, Köln 2026
Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

Autorenverzeichnis **7**

Perspektiven für ein wertorientiertes Asset Management der nächsten Generation – Symbiotic Asset Evolution durch MTO-Integration **11**
Hubert Biedermann

Transformation in volatilen Zeiten – Wie man ein bestehendes Motorenwerk innovativ auf E-Mobilität umbaut **37**
Werner Schröder, Helmut Hochsteiner

Die regenerative Fabrik: Instandhaltung als strategischer Hebel für Nachhaltigkeit und Unternehmenserfolg **49**
Rupert J. Baumgartner

KI-Prognose schlägt Bauchgefühl? – Warum Instandhaltung mehr braucht als Wahrscheinlichkeiten **67**
Sabine Pfeiffer

Künstliche Intelligenz in der Instandhaltung – Sinnvolle Einsatzfelder und klare Grenzen **83**
Günter Horn

Hybride Intelligenz in der industriellen Instandhaltung – Eine Fallstudienanalyse aus soziotechnischer Perspektive **93**
Uta Wilkens, Fazel Ansari

Analyse und Verbesserung von Wissenstransfersituationen im Engineering – Automatisierte Erkennung wiederkehrender Muster und Ableitung methodischer Interventionen **109**
Norbert Gronau, Ravil Goetzke, Tim Müller, Marcus Grum

Entwicklung der IH-Verbandslandschaft in der DACH-Region – Wie erreichen wir die notwendige Schlagkraft für die Interessen der Instandhaltung? **127**
Jens Reichel

Cognitive Digital Twin für die industrielle Instandhaltung – Von Condition Monitoring zum lernfähigen Digital Twin: Entwicklungspfad zu einer autonomen Instandhaltung **135**
Markus Kugelmann, Wolfgang Hahn, Alexander Lichtenberg, Tanja Gruber-Nemeth, Fazel Ansari

- Leseprobe -

Circularity-Oriented Maintenance – KI-gestützte Entscheidungsunterstützung für zirkularitäts-orientierte Instandhaltung 155
Gábor Princz, Sareh Aghaei, Iasmina Solovastru, Fazel Ansari, Rudolf Plettenberg, Isfried Janetschek

Intelligente Werkstoffe: Die Revolution unserer Technik? – Funktionale Oberflächen als Schlüssel zu höherer Leistungsfähigkeit, innovativen Produkten und neuen Anwendungen 175
Nina Schalk, Christoph Czettl, Christian Mitterer

Vom Datenpunkt zur Strategie – Welche Daten, Informationen und Voraussetzungen Unternehmen benötigen, um ihre Instandhaltungsstrategien gezielt weiterzuentwickeln 185
Georg Steger

Datengetriebene Dienstleistungen für eine nachhaltige öffentliche Wertschöpfung in der Daseinsvorsorge – Chancen und Herausforderungen 207
David Kiklhorn

Die Zukunft der Instandhaltung vorbereiten – Einblicke, Ausblicke und Handlungspfade 217
Daniel Hefft

Asset Management als integrierte Managementaufgabe – Wie Instandhaltung, Produktion und Site Management zu einem gemeinsamen Asset Management Plan zusammenfinden 239
Michael Wolny, Daniel Hefft

Generalüberholte Ersatzteile alternativ zu Neuteilen – Kosten-Nutzen-Analyse im industriellen Umfeld zur nachhhaltigkeitsorientierten Ersatzteilbewirtschaftung von generalüberholten Ersatzteilen alternativ zu Neuteilen 249
Bernd Zenk

Beitrag der industriellen Instandhaltung zur Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz – Aktueller Stand, Wirkmechanismen und zukünftige Entwicklungspotenziale 263
Martin Ziegelbecker

- Leseprobe -

Autorenverzeichnis

Sareh Aghaei
M.Sc. PhD, Universitätsassistentin Postdoc
Forschungsbereich Produktions- und Instandhaltungsmanagement, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Technische Universität Wien
Wien, Österreich

Fazel Ansari
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil.,
Leiter des Forschungsbereichs Produktions- und Instandhaltungsmanagement
Technische Universität Wien
Wien, Österreich

Rupert J. Baumgartner
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont.
Universität Graz
Graz, Österreich

Hubert Biedermann
em.o.Univ.-Prof. Dr. mont., Präsident der ÖVIA
Österreichische Vereinigung für Instandhaltung und Anlagenwirtschaft
Montanuniversität Leoben
Leoben, Österreich

Christoph Czettl
Dipl.-Ing. Dr.mont., R&D Manager Cutting Tools
CERATIZIT Austria GmbH
Reutte, Austria

Ravil Goetzke
MSc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Universität Potsdam
Potsdam, Deutschland

Norbert Gronau
Univ.-Prof. Dr.-Ing., Lehrstuhlinhaber für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme, einschließlich Electronic Government
Universität Potsdam
Potsdam, Deutschland

Tanja Gruber-Nemeth
Wissenschaftliche Mitarbeiterin Intelligente Instandhaltung und Produktentwicklung
Fraunhofer Austria Research GmbH
Wien, Österreich

Marcus Grum
Jun.-Prof. Dr.-Ing., Juniorprofessor
Universität Potsdam
Potsdam, Deutschland

Wolfgang Hahn
Leiter Betriebsmittelinstandhaltung
Schaeffler Technologies AG & Co. KG
Herzogenaurach, Deutschland

- Leseprobe -

Daniel Hefft
MSc, Wissenschaftlicher Projektleiter
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
Dortmund, Deutschland

Helmut Hochsteiner
Leitung Operations Management & Stv. Werksleitung
BMW Group Werk Steyr
Steyr, Österreich

Günter Horn
Dr., Geschäftsführer Ingenieurbüro Dr. Horn
Ingenieurbüro Dr. Horn
Frankfurt am Main, Deutschland

Isfried Janetschek
Dipl.-Ing., Managing Director
MESify Solutions GmbH
Hadersfeld, Österreich

David Kiklhorn
MSc, Wissenschaftlicher Projektleiter
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
Dortmund, Deutschland

Markus Kugelmann
MSc, Wissenschaftlicher Mitarbeiter Intelligente Instandhaltung und Produktentwicklung
Fraunhofer Austria Research GmbH
Wien, Österreich

Alexander Lichtenberg
Hilfswissenschaftlicher Mitarbeiter Intelligente Instandhaltung
und Produktentwicklung
Fraunhofer Austria Research GmbH
Wien, Österreich

Christian Mitterer
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont., Lehrstuhlleiter Lehrstuhl für Funktionale Werkstoffe und Werkstoffsysteme
Montanuniversität Leoben
Leoben, Österreich

Tim Müller
MSc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Universität Potsdam
Potsdam, Deutschland

Sabine Pfeiffer
Prof. Dr. habil., W3-Professorin für Soziologie
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Erlangen, Deutschland

Rudolf Plettenberg
Dipl.-Ing., Head of Digital Office
Fried. v. Neuman Gesellschaft m.b.H.
Marktl, Österreich

Gábor Princz
MSc, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
FH-Wiener Neustadt
Wiener Neustadt, Österreich

- Leseprobe -

Jens Reichel
Dr.-Ing., Berater bei Brainfleet sowie Vorstand bei 4OPMC und VAIS
BFM BrainFleet Management GmbH
Frankfurt am Main, Deutschland

Nina Schalk
Assoz.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont., Lehrstuhlleiterstellvertreterin am Lehrstuhl für Funktionale Werkstoffe und Werkstoffsysteme
Montanuniversität Leoben
Leoben, Österreich

Werner Schröder
Dr.mont., Leiter Montage Elektrische Antriebsmaschinen
BMW Group Werk Steyr
Steyr, Österreich

Iasmina-Roxana Solovastru
B.A., M.Sc., Research Assistant
Forschungsbereich Produktions- und Instandhaltungsmanagement, Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften, Technische Universität Wien
Wien, Österreich

Georg Steger
Dipl.-Ing., BSc., Geschäftsführer ÖVIA & ÖVIA Forschungs-GmbH
Österreichische Vereinigung für Instandhaltung und Anlagenwirtschaft
Leoben, Österreich

Uta Wilkens
Univ.-Prof. Dr., Lehrstuhl Arbeit, Personal & Führung
Ruhr Universität Bochum
Bochum, Deutschland

Michael Wolny
Dr.rer.pol., Stellvertretender Abteilungsleiter
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
Dortmund, Deutschland

Bernd Zenk
Spezialist für Prozesse und Systeme im Zentralbereich Global Maintenance
Schaeffler Technologies AG & Co. KG
Herzogenaurach, Deutschland

Martin Ziegelbecker
MSc, BSc (WU), Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter
ÖVIA Forschungs-GmbH
Leoben, Österreich

- Leseprobe -

- Leseprobe -

Perspektiven für ein wertorientiertes Asset Management der nächsten Generation

Symbiotic Asset Evolution durch MTO-Integration

Hubert Biedermann

Anlagenintensive Unternehmen müssen Effizienz und Verfügbarkeit mit Dekarbonisierung, Resilienz und steigenden Governance-Anforderungen verbinden. Der Beitrag entwickelt hierfür einen integrierten Bezugsrahmen für Asset Performance Management (APM) und darauf aufbauend die Symbiotic Asset Evolution (SAE) als Mensch-Technik-Organisation (MTO)-integriertes Ziel. Kern ist ein vierstufiges Reifegradmodell von vernetzten über selbstdiagnostizierende und ko-evolvierende Assets bis zu adaptiven Asset-Ökosystemen. Acht Befähigungsdimensionen, Reifeschwellen und ein Engpass-Prinzip operationalisieren die Entwicklung. Eine wertorientierte Steuerungslogik sowie Leitplanken für Daten, KI, Sicherheit und menschliche Entscheidungseinbindung ergänzen das Modell. SAE versteht Reife nicht als maximale Automatisierung, sondern als wachsende Fähigkeit, Daten in belastbare Entscheidungen, Wirkung und organisationales Lernen zu überführen.

- Leseprobe -

1 Einleitung

Die letzten zehn bis fünfzehn Jahre haben das Instandhaltungsmanagement grundlegend verändert. Von einer primär technikfokussierten, reaktiven Funktion entwickelte es sich zu einem strategischen Werttreiber, der maßgeblich zum Unternehmenserfolg beiträgt[1]. Treiber sind die Komplexität cyber-physischer Produktionssysteme, volatile Lieferketten, Fachkräftemangel, schärfere Nachhaltigkeitsanforderungen sowie Transparenzpflichten (z. B. CSRD/ESRS)[2]. Klassische, intervallbasierte Instandsetzungsstrategien geraten an ihre Grenzen und führen zu einer sowohl unwirtschaftlichen als auch nicht nachhaltigkeitsorientierten Vorgangsweise. Zukunftsorientiert ist ein Asset Management, das Wert, Risiko, Kosten und Nachhaltigkeit über den Lebenszyklus integriert (ISO 55000; ISO 31000; EN 16646).

Symbiotic Asset Evolution (SAE) bezeichnet die Ko-Evolution von physischen Assets und dem Asset-Management-System als gegenseitige, evolutionäre Anpassung in enger Wechselbeziehung. Das Asset transformiert sich vom passiven Bilanzposten im Anlagevermögen zum aktiven, adressierten Objekt, eingebettet in erklärbare KI-gestützte sowie menschliche Entscheidungs- und Handlungsprozesse. Dabei lernt das Managementsystem kontinuierlich aus Daten und aus menschlichen Eingriffen[3]. Lean Smart Maintenance bildet dafür die prozessuale und lernorientierte Grundlage und unterstützt die agil-dynamische Weiterentwicklung der Instandhaltung zu einem umfassenden Asset Management[4].

---

[1] Vgl. Biedermann, H. (2025), S. 9 f.
[2] CSRD: Corporate Sustainability Reporting Directive, Richtlinie (EU) 2022/2464; ESRS: European Sustainability Reporting Standards, Delegierte Verordnung (EU) 2023/2772.
[3] Vgl. IAM (Institute of Asset Management) (2024), S. 30 f.
[4] Vgl. Biedermann, H.; Kinz, A. (2019), S. 13–18.

Ziel dieses Beitrags ist es, ein MTO-integriertes Konzept des Asset Managements der nächsten Generation zu entwickeln, dieses in einem ganzheitlichen APM-Bezugsrahmen zu verankern und mit einem operationalisierbaren SAE-Reifegradmodell zu konkretisieren. Darüber hinaus werden die erforderliche wertorientierte Steuerungslogik und die Governance-Leitplanken verdichtet sowie Herausforderungen, Grenzen und Forschungsbedarfe des Ansatzes diskutiert.

2 Theoretischer Rahmen und Literatur

In den letzten Jahren hat sich die Instandhaltung konzeptionell zu einem lebenszyklus- und wertorientierten Asset Management entwickelt, das die Aufwendungen über den gesamten Anlagenlebenszyklus gemeinsam betrachtet (Gesamtaufwand; Total Expenditure, TOTEX; d. h. CAPEX und OPEX)[5,6].

Dieses umfassende Verständnis wird von Biedermann wie folgt präzisiert: „…eine Kombination von Managementaktivitäten, die die Ressource Anlage in einer lebenslauforientierten Betrachtung ressourcenschonend und -erhaltend unter Gewährleistung der Konformität des Produktionsprozesses und der darauf hergestellten Produkte konzipiert, bereitstellt und betreibt. Diese sind unter Beachtung der Mitarbeiter, der Gesellschaft, der umgebenden Umwelt und als nachhaltige Unternehmensfunktion mit den materiellen und immateriellen, finanziellen, sozialen und ökologischen Ressourcen ausgeglichen zu gestalten.“[7]

Die Definition verbindet Lebenszyklus- und Ressourcenerhaltung mit der Konformität von Produktionsprozess und Produkten sowie mit sozialen, ökologischen und finanziellen Anforderungen. Sie bildet damit eine geeignete begriffliche Grundlage für die im Beitrag entwickelte MTO-integrierte und wertorientierte Perspektive des Asset Managements.

Die Lean Smart Maintenance-Philosophie (LSM) verbindet Effizienz (Lean: Verlusteliminination, Ökoeffizienz) und Effektivität (Smart: daten- und lernbasierte Steuerung) und schafft damit eine Governance- und Datenbasis für weiterführende Reifestufen. Digitale Exzellenz entsteht aus dem abgestimmten Zusammenspiel von Vision und Strategie, Unternehmenskultur, Mitarbeiterkompetenzen, Technologie sowie der Fähigkeit, Daten gezielt zu gewinnen und zu nutzen[8].

Die ISO-55000-Reihe definiert Asset, Wert (Value) und Anforderungen an Asset-Management-Systeme (ISO 55000, ISO 55001 und ISO 55002) und die EN 16646 verankert die Instandhaltung im physischen Asset Management. Ergänzend dazu beschreibt die ISO 31000 Risikoprinzipien und die IEC 60300-3-3 operationalisiert die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC). Über zahlreiche Veröffentlichungen zu Kennzahlen und Kennzahlensystemen stellt die EN 15341 Standards für Instandhaltungskennzahlen bereit. Das IAM („Anatomy of Asset Management“) systematisiert Befähigungen und Entscheidungsflüsse. Neuere Aktualisierungen und Leitfäden schärfen Wertbezug, Datenmanagement und Personalkompetenzen (vgl. Biedermann 2025). Es stehen also umfangreiche Regelwerke,

[5]Vgl. Biedermann, H. (2022), S. 11–20.
[6]Vgl. Biedermann, H. (2021), S. 18–22.
[7]Biedermann, H. (2022), S. 13.
[8]Vgl. Biedermann, H. (2024), S. 16–19.

- Leseprobe -

Empfehlungen und veröffentlichte Literatur als theoretischer Rahmen mit Praxistauglichkeit zur Verfügung.

Die Entwicklungen rund um und mit Industrie 4.0 rücken insbesondere den Menschen (Industrie 5.0) sowie Resilienz und Nachhaltigkeit verstärkt in den Fokus[9]. Cyber-physische Systeme und anlagennahe Datenanalysen (Edge-Analytik) koppeln physische Assets in Echtzeit mit Rechen- und Entscheidungslogik[10]. Digitale Zwillinge erweitern den „digitalen Schatten" um Semantik, Kausalmodelle und Simulationsfähigkeit[11] – Voraussetzungen, um Veränderungen ex ante zu analysieren und präskriptive Entscheidungen abzuleiten.

Der betriebswirtschaftliche und sicherheitsrelevante Wert der Instandhaltung ist vielfach empirisch belegt[12]. Wertschöpfungsorientierte Konzepte verknüpfen Maßnahmen mit monetären Zielen und bewerten deren Wirksamkeit. Die Smart-Maintenance-Forschung zeigt, wie Effekte über KPI-Systeme mess- und steuerbar werden[13]. Gleichzeitig erweitert sich der normative Bezugsrahmen über das klassische Effizienzprinzip hinaus um Ziele der Kreislaufwirtschaft; Lebensdauerverlängerung, Instandhaltbarkeit und Ressourceneffizienz werden damit zu Kernprinzipien des Asset Managements[14].

2.1 Integriertes Asset Performance Management als Bezugsrahmen

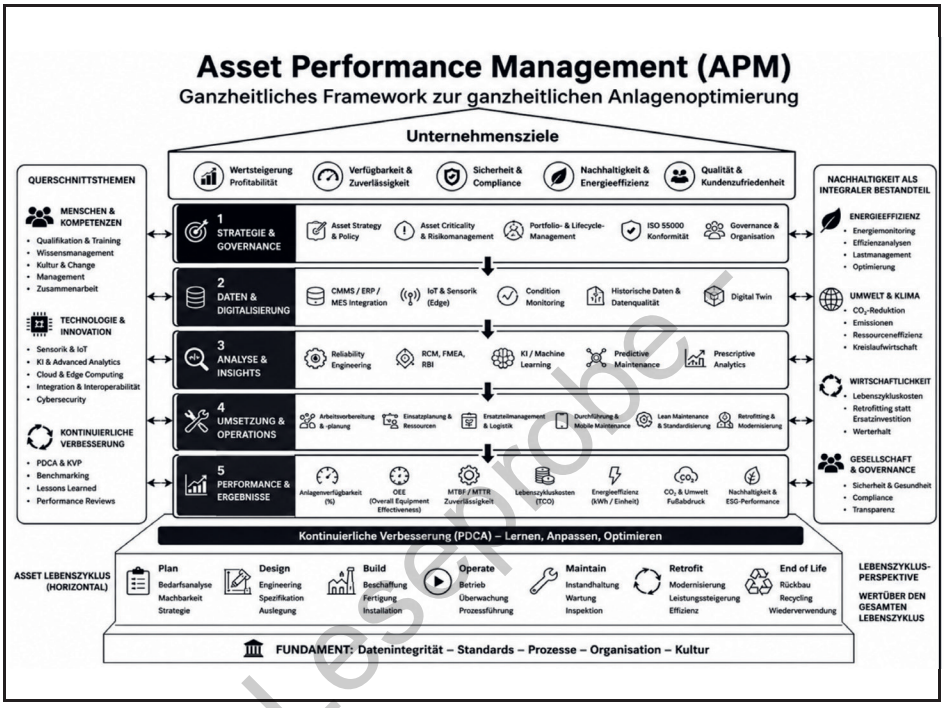
Die dargestellten Entwicklungen verdeutlichen, dass ein zukunftsorientiertes Asset Management nicht durch einzelne Methoden oder digitale Technologien charakterisiert werden kann. Erforderlich ist vielmehr ein integrierter Bezugsrahmen, der Unternehmensziele, Asset-Strategie, Daten und Digitalisierung, Analyse- und Entscheidungsfähigkeit sowie operative Umsetzung miteinander verbindet. Asset Performance Management (APM) wird im vorliegenden Beitrag deshalb nicht als einzelne Softwareplattform, sondern als ganzheitliche Management- und Entscheidungsarchitektur verstanden, die technische, wirtschaftliche und nachhaltigkeitsbezogene Leistungsfähigkeit über den gesamten Asset-Lebenszyklus integriert.

Abb. 1 strukturiert diesen Zusammenhang in fünf vertikal verbundenen Ebenen. Ausgehend von den Unternehmenszielen werden zunächst Strategie und Governance festgelegt. Daten, Digitalisierung und Systemintegration schaffen die Informationsbasis; Zuverlässigkeitsmanagement (Reliability Engineering), RCM/FMEA (IEC 60812:2018), KI, prädiktive Instandhaltung und präskriptive Analytik überführen diese Daten in entscheidungsrelevante Erkenntnisse. Die Umsetzung erfolgt über Arbeitsvorbereitung, Ressourcensteuerung, Ersatzteilmanagement, operative Durchführung, Lean Smart Maintenance und Modernisierung (Retrofitting). Die Wirkung wird schließlich über Leistungs- und Ergebnisgrößen wie Anlagenverfügbarkeit, OEE, MTBF/MTTR, Lebenszykluskosten, Energieeffizienz und Nachhaltigkeitsindikatoren rückgekoppelt.

- Leseprobe -

[9]Vgl. European Commission (2021), S. 13–15.
[10]Vgl. Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H. (2015), S. 18–23.
[11]Vgl. Tao, F. et al. (2018), S. 3563–3576.
[12]Siehe u. a. Al-Najjar, B.; Alsyouf, I. (2004), S. 643; Alsyouf, I. (2007), S. 70; Marais, K.; Saleh, J. (2009), S. 644–645.
[13]Siehe u. a. Lundgren, C.; Bokrantz, J.; Skoogh, A. (2021), S. 1291–1292.
[14]Vgl. Biedermann, H. (2022), S. 12 f.

Die vertikale Steuerungslogik wird durch Menschen und Kompetenzen, Technologie und Innovation sowie kontinuierliche Verbesserung als Querschnittsfähigkeiten ergänzt. Nachhaltigkeit bildet keinen nachgelagerten Zusatz, sondern einen integralen Bestandteil des Gesamtsystems. Gleichzeitig spannt die Lebenszyklusperspektive den Horizont von Planung und Design über Errichtung, Betrieb und Instandhaltung bis zu Retrofit und Lebensende (End-of-Life).



Leseprobe

Abb. 1: Integriertes Asset-Performance-Management-Framework zur ganzheitlichen Anlagenoptimierung. Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an ISO 55000/55001:2024, EN 16646, IAM (2024), Biedermann (2008, 2021, 2022, 2024) und Biedermann & Kinz (2019).

Das Framework bildet den systemischen Bezugsrahmen für die nachfolgend entwickelte Symbiotic Asset Evolution. APM beantwortet primär die Frage, welche Managementelemente und Fähigkeiten zusammenwirken müssen; die MTO-Symbiose beschreibt, wie Mensch, Technik und Organisation diese Fähigkeiten verbinden; das SAE-Reifegradmodell konkretisiert schließlich, wie sich dieses Gesamtsystem von Transparenz über Prognose und Präskription bis zu adaptiver Optimierung entwickelt.

2.2 Methodisches Vorgehen zur Modellentwicklung

Der Beitrag folgt einer konzeptionell-synthetisierenden Modellentwicklung. Ausgangspunkt sind bestehende Reifegrad- und Befähigungsmodelle des Lean Smart Maintenance und des Asset Managements sowie aktuelle Arbeiten zur datengetriebenen Instandhaltung. Ergänzend werden die Anforderungen der ISO-55000-Reihe, des IAM-Befähigungsmodells und des Industry-5.0-Leitbilds als normative und sozio-technische Referenzen herangezogen.

Ziel ist keine bloße Zusammenführung bestehender Modelle, sondern die strukturierte Ableitung eines Entwicklungswegs für ein wertorientiertes, lernendes und MTO-integriertes Asset Management.

Die Herleitung erfolgt in drei Schritten: Erstens werden wiederkehrende Strukturmerkmale bestehender Reifegradmodelle und Asset-Management-Befähigungen identifiziert. Zweitens werden diese mit der Entwicklungslogik von Transparenz über Diagnose und Prognose zur Präskription und adaptiven Optimierung verknüpft. Drittens wird diese Synthese in vier SAE-Reifestufen, acht Befähigungsdimensionen, Reifeschwellen und ein Engpass-Prinzip operationalisiert.[15]

Das resultierende SAE-Modell ist damit ein theorie- und literaturbasierter Bezugsrahmen. Es formuliert eine prüfbare Entwicklungslogik, erhebt jedoch noch keinen Anspruch auf empirische Allgemeingültigkeit. Die empirische Validierung der Dimensionen, Reifeschwellen und ihrer Zusammenhänge ist deshalb Bestandteil der in Kapitel 7 abgeleiteten Forschungsagenda.

3 Die drei Ebenen der Symbiose: normativ – strategisch – operativ

Die Symbiotic Asset Evolution baut auf der historischen Entwicklung der Instandhaltung auf, in der sich nicht nur Methoden und Technologien, sondern auch die relative Bedeutung von Mensch, Technik und Organisation grundlegend verändert haben. Während in der traditionellen Instandhaltung der Mensch als erfahrungsgetragener Problemlöser dominiert und Technik sowie Organisation vor allem unterstützende Funktionen einnehmen, gewinnt mit Lean-orientierter Instandhaltung zunächst die Organisation erheblich an Bedeutung. Lean Smart Maintenance erweitert diese Entwicklung um datenbasierte und technologische Fähigkeiten, ohne die Rolle des Menschen zu relativieren. In der nächsten Entwicklungsstufe - der Symbiotic Asset Evolution - entsteht ein System, in dem Mensch, Technik und Organisation in weitgehend balancierter Form zusammenwirken. Die Entwicklung der Instandhaltung kann somit zugleich als Entwicklung der MTO-Symbiose interpretiert werden.

- Leseprobe -

[15] Vgl. Schmiedbauer, O.; Maier, H.; Biedermann, H. (2020), S. 81–85; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2020), S. 296–302; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2021), S. 235–241; IAM (2024), S. 30–35; Rijsdijk, C.; van de Wijnckel, M.; Tinga, T. (2024), S. 60–61.

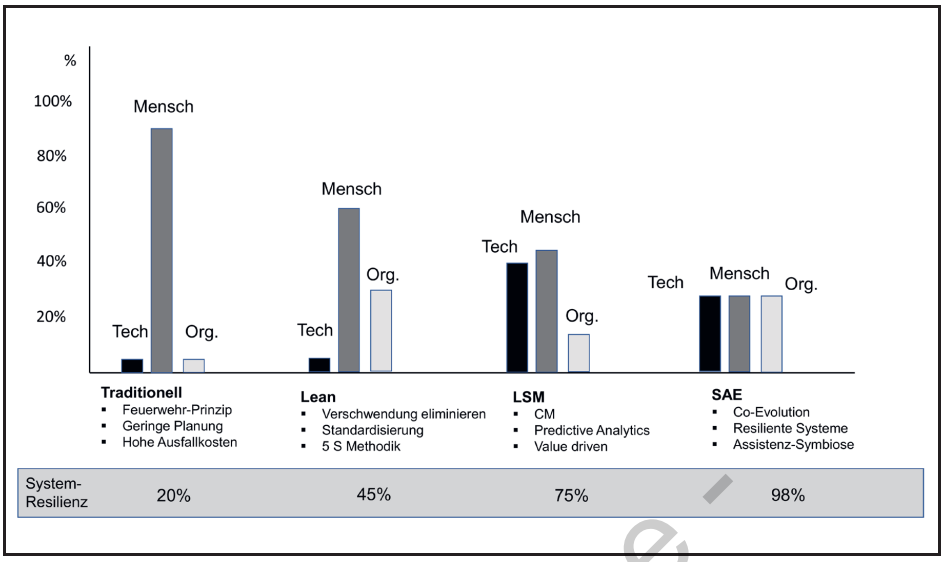


Abb. 2: Entwicklung der relativen Bedeutung von Mensch, Technik (Tech) und Organisation im Zeitverlauf der Instandhaltung und des Asset Managements.

Quelle: Eigene schematische Darstellung. Die Prozentangaben repräsentieren eine konzeptionelle Gewichtung und eine idealtypische Entwicklung der Systemresilienz; sie stellen keine empirisch validierten Messwerte dar.

Leseprobe

Abb. 2 veranschaulicht diese Entwicklung schematisch. Sie zeigt, dass sich der Schwerpunkt von einer überwiegend menschengetriebenen, reaktiven Instandhaltung über organisatorisch stabilisierte und technologisch erweiterte Formen hin zu einer symbiotischen Konfiguration verschiebt. In dieser gewinnt Technik zwar deutlich an Bedeutung, sie ersetzt den Menschen jedoch nicht. Vielmehr verändert sich dessen Rolle: vom reaktiven Störungsbeseitiger über den standardisiert arbeitenden Lean-Anwender und den datenkompetenten LSM-Experten hin zum Mitgestalter eines lernenden, resilienten Asset-Management-Systems. Parallel dazu wächst die Bedeutung organisatorischer Strukturen, Standards und Regelkreise. Die Abbildung unterstützt damit die zentrale These dieses Beitrags, dass Fortschritt im Asset Management nicht monokausal technologisch erklärt werden kann, sondern aus dem abgestimmten Zusammenwirken von Mensch, Technik und Organisation entsteht.

Auf der normativen Ebene definiert das Unternehmen sein Werteverständnis: Instandhaltung wird als Wertschöpfungspartner und nicht als reine Kostenfunktion verstanden; Substanzerhaltung und der Beitrag zum wirtschaftlichen Ergebnis bilden wesentliche Orientierungsgrößen. Kompetitives Asset Management richtet Beschaffung, Bereitstellung, Erhaltung, technologische Weiterentwicklung und Ausmusterung von Sachanlagen so aus, dass der wirtschaftliche Erfolg unter Berücksichtigung von Human- und Nachhaltigkeitszielen langfristig gesichert wird[16]. Mensch-Maschine-Ethik, verständliche und nachvollziehbare KI-Empfehlungen sowie eindeutig geregelte menschliche Entscheidungshoheit sind insbeson-

[16]Vgl. Biedermann, H. (2021), S. 15 f.

dere in sicherheits- und ESG-kritischen Situationen erforderlich. Nachhaltigkeits- und kreislauforientierte Instandhaltung zielt auf den Substanzerhalt der Assets durch Lebensdauerverlängerung, Obsoleszenzmanagement und energie- bzw. stoffstromoptimierten Betrieb[17].

Auf der strategischen Ebene werden Maßnahmen und Vorgehensweisen datenbasiert begleitet und rückgekoppelt; die Steuerung wird dadurch dynamischer und präskriptiver. Prädiktive Instandhaltung (Predictive Maintenance, PdM) nutzt Zustandsdaten und maschinelles Lernen. Präskriptive Instandhaltung (Prescriptive Maintenance, RxM) erweitert die Prognose um die Auswahl und zeitliche Optimierung geeigneter Handlungsoptionen, beispielsweise durch die Kombination maschinellen Lernens mit ereignisdiskreter Simulation[18]. Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung (Reliability-Centered Maintenance, RCM) entwickelt sich so zu einem kontinuierlich aktualisierten, modellgestützten Prozess. Lebenszyklus- und TOTEX-Orientierung werden bereits in Beschaffung und Design von Assets operationalisiert: durch Instandhaltbarkeit (Maintainability) und RAMS, offene Schnittstellen und einen vom Hersteller bereits bei der Auslieferung bereitgestellten Digitalen Zwilling. Ein erheblicher Teil späterer Ausfallursachen wird bereits in vorgelagerten Lebenszyklusphasen angelegt; Erkenntnisse aus dem Betrieb müssen daher in Design und Beschaffung zurückgeführt werden[19]. Eine Datenmanagementstrategie und ihre Governance werden zu Kernfähigkeiten: einheitliche, verlässliche Datenquelle (Single Source of Truth), Verwaltungsschale (Asset Administration Shell, AAS), klare Datenhoheit zwischen OEM und Betreiber sowie eine systematische Steigerung der Datenqualitätsreife entlang der sechs Dimensionen Datenmenge (Volume), Vielfalt (Variety), Geschwindigkeit (Velocity), Wert (Value), Vertrauenswürdigkeit (Veracity) und Visualisierung (Visualization)[20]. Resilienz wird durch opportunistische Instandhaltungsstrategien und gezielte Redundanzen unterstützt. Standards des Instandhaltungsmanagements wie EN 17948 und die CER-Richtlinie[21] tragen dazu bei, kritische Assets besser gegen physische und organisatorische Risiken zu schützen. Der Wandel von Kompetenzen, Arbeitsweisen und der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Technologie führt dazu, dass der Instandhalter

- Instandhaltungsempfehlungen aus prädiktiven Instandhaltungssystemen erhält,
- Tablets nutzt und
- mit digitalen Zwillingen arbeitet,
- KI-Empfehlungen beurteilt und bewertet,
- KI mit Erklärungs- und Hintergrundinformationen nutzt, um Entscheidungen nachvollziehen zu können und
- dokumentiert seine Handlungen direkt im CMMS.

Ambidextrie und Coaching beschleunigen Lernzyklen und verankern den Wandel[22],[23].

Auf der operativen Ebene verschmelzen menschliche Expertise und Maschinenintelligenz im operativen Anlagenbereich (Shopfloor). Intelligente industrielle Daten- und KI-Techno-

Leseprobe

[17]Vgl. Biedermann, H. (2022), S. 14 f.
[18]Vgl. Biedermann, H. (2023), S. 19 f.
[19]Vgl. Biedermann, H. (2022), S. 16.
[20]Vgl. Bernerstätter, R. (2019), S. 95–96, 117–123.
[21]CER: Critical Entities Resilience Directive, Richtlinie (EU) 2022/2557.
[22]Vgl. Biedermann, H. (2024), S. 17 f.
[23]Vgl. Bauer, M.; Grosse, E. (2024), S. 37 ff.

logien wie IIoT, Edge-Computing und erklärbare KI (XAI) ermöglichen Echtzeit-Zustandserfassung, Anomalieerkennung, lokale Schutzmaßnahmen (z. B. gezielte Lastabwurfsteuerung bei hohen Belastungen) und sichere Eskalation durch aktive Einbindung des Menschen (Lee et al. 2015; Biedermann 2023)[24]. Digitale Zwillinge erlauben Simulationen und „Was-wäre-wenn"-Analysen vor physischen Eingriffen; Wartungsfenster, Lastprofile und Ersatzteillogistik werden ex ante optimiert[25]. Assistenzsysteme (AR/VR), Fernunterstützung (Remote Support), Cobots[26] sowie mobile Lösungen/RFID steigern die Durchführungseffizienz, Sicherheit und Datenqualität. Intuitive Benutzerschnittstellen und kontextsensitive Information erhöhen ebenfalls die Durchführungseffizienz[27]. Eine Wissensrückführung über APM-Plattformen verknüpft Instandhaltungs-, Prozess-, Qualitäts- und Energiedaten; Abweichungen und „menschliche Erfahrung und Kreativität" trainieren Modelle; die Strategie passt sich in geschlossenen Regelkreisen an[28].

4 Symbiotic Asset Evolution – ein integriertes Reifegradmodell

Die Entwicklung vom klassischen Instandhaltungsmanagement zu einem wertorientierten Asset Management ist kein singulärer Digitalisierungsschritt, sondern ein mehrdimensionaler Transformationsprozess. Sensorik, Zustandsüberwachung, künstliche Intelligenz oder Digitale Zwillinge sind wichtige technologische Voraussetzungen, erzeugen für sich genommen jedoch noch keine hohe Managementreife. Entscheidend ist, inwieweit technische Assets, Daten, Prozesse, Organisation und Menschen zu einem konsistenten Entscheidungs- und Lernsystem verbunden werden und ob daraus ein nachvollziehbarer Beitrag zu Wert, Risiko, Kosten und Nachhaltigkeit entsteht[29].

Das im Folgenden entwickelte Reifegradmodell der Symbiotic Asset Evolution (SAE) beschreibt daher nicht primär den Technologiestand einer Organisation, sondern ihre Fähigkeit, physische Assets und das Asset-Management-System schrittweise zu einem lernenden, adaptiven und wertorientierten Gesamtsystem weiterzuentwickeln. Das Modell knüpft an entwickelte und in die betriebliche Praxis überführte Reifegradmodelle des Lean Smart Maintenance und des Asset Managements an und verbindet diese explizit mit datengetriebener Instandhaltung, präskriptiver Instandhaltung, MTO-Ko-Evolution und geregelter Autonomie[30].

Die vier Entwicklungsstufen reichen von vernetzten Assets über selbstdiagnostizierende und ko-evolvierende Assets bis zu autonomen Asset-Ökosystemen. Die Bezeichnungen beschreiben den dominierenden Charakter des Systems und erheben keinen Anspruch auf vollständige technische Autonomie. Höhere Reife bedeutet vielmehr eine steigende Fähigkeit,

- Leseprobe -

[24]Logik: IIoT-Sensoren erfassen Daten, Edge-Systeme analysieren Daten vor Ort, KI erstellt Diagnosen, XAI erläutert die Gründe für Empfehlungen und der Instandhaltungsexperte entscheidet über die Maßnahme.
[25]Vgl. Tao, F. et al. (2018), S. 3563–3576.
[26]Cobots: kollaborative Roboter.
[27]Vgl. Biedermann, H. (2019), S. 33 f.
[28]Vgl. Campos, J. et al. (2017), S. 143–147.
[29]Vgl. Schmiedbauer, O.; Maier, H.; Biedermann, H. (2020), S. 81–85; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2020), S. 296–302; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2021), S. 235–241.
[30]Vgl. Schmiedbauer, O.; Maier, H.; Biedermann, H. (2020), S. 81–85; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2020), S. 296–302; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2021), S. 235–241; IAM (2024), S. 30–35.

Daten in Erkenntnisse, Erkenntnisse in Entscheidungen und die Wirkungen dieser Entscheidungen wiederum in Lernen und Anpassung zu überführen. Diese Entwicklung wird in Abb. 3 als Evolutionspfad mit vier Reifeschwellen dargestellt.

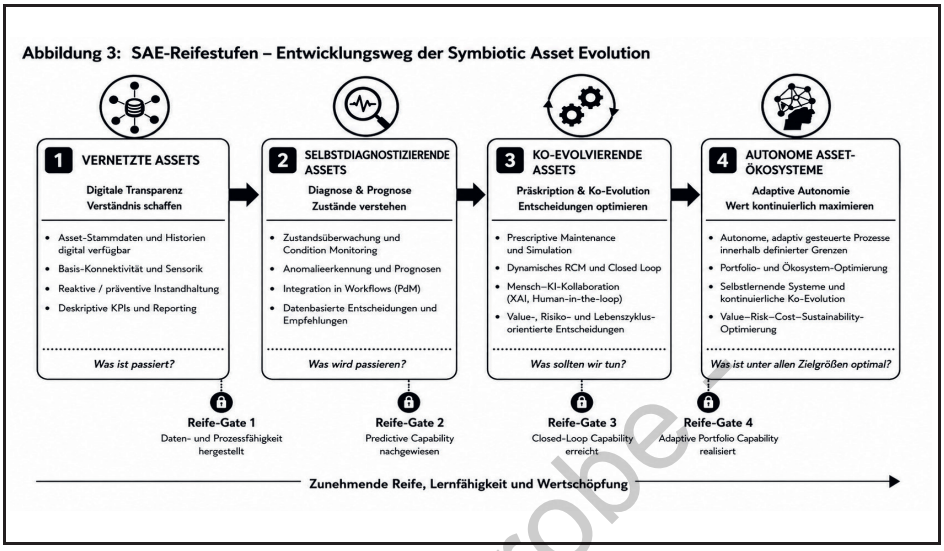


Abb. 3: SAE-Reifestufen – Entwicklungsweg der Symbiotic Asset Evolution.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an IAM (2024), ISO 55001:2024, Biedermann & Kinz (2019), Schmiedbauer, Maier & Biedermann (2020), Maier, Schmiedbauer & Biedermann (2020/2021) und Rijsdijk, van de Wijnckel & Tinga (2024).

- Leseprobe -

4.1 Grundstruktur und Befähigungsdimensionen des Reifegradmodells

Ein zentrales Merkmal des SAE-Modells ist die Unterscheidung zwischen technologischer Reife und Asset-Management-Reife. Eine Organisation kann über hochentwickelte Anwendungen der prädiktiven Instandhaltung verfügen und zugleich Defizite bei Datenqualität, Rollen, Prozessen oder Governance aufweisen. Umgekehrt kann eine hohe Asset-Management-Reife bewusst menschliche Entscheidungen vorsehen, wenn Sicherheit, Verantwortlichkeit oder regulatorische Anforderungen dies verlangen. Diese Sicht entspricht dem Befähigungsgedanken des IAM, der Asset Management als Zusammenspiel mehrerer Fähigkeiten versteht und mit der Anatomy Version 4 ein 10-Box-Befähigungsmodell über alle Reifestufen hinweg verwendet[31].

Für die Symbiotic Asset Evolution werden acht Befähigungsdimensionen als eigene, problembezogene Synthese verwendet: (1) Strategie und Wertausrichtung, (2) Mensch, Organisation und Kompetenzen, (3) Prozesse und Asset-Management-System, (4) Daten und Information, (5) Technologie und Systemintegration, (6) Analyse- und Entscheidungsfähigkeit, (7) Governance, Risiko und Sicherheit sowie (8) Nachhaltigkeit und Resilienz. Die

[31] Vgl. IAM (2024), S. 30–31.

Auswahl verbindet die normativ-strategisch-operative Logik des LSM mit aktuellen Anforderungen an Daten, Analytik, menschbezogene Faktoren und Governance.[32]

Die vier SAE-Stufen bilden die horizontale Entwicklungsrichtung, die acht Befähigungsdimensionen die vertikale Bewertungsstruktur. Die resultierende 8×4-Matrix (Tab. 1) dient als Diagnose- und Entwicklungsinstrument; asynchrone Dimensionsreife macht dabei Engpässe sichtbar.

Die Matrix verdeutlicht, dass sich die Entwicklungsstufen nicht lediglich durch zusätzliche Technologien unterscheiden. Der Reifefortschritt liegt in der Qualität der Fähigkeiten, Informationen zu erzeugen und zu verarbeiten, Entscheidungen zu begründen, Maßnahmen umzusetzen und aus den Ergebnissen systematisch zu lernen. Damit wird die technologische Perspektive in ein sozio-technisches Managementmodell eingebettet.

- Leseprobe -

[32]Vgl. Biedermann, H.; Kinz, A. (2019), S. 13–18; ISO 55001:2024; European Commission (2021), S. 13–15.

Tab.1: SAE-Reifegradmatrix – acht Befähigungsdimensionen × vier Reifestufen

Befähigungsdimension	Stufe 1 – Vernetzt (Transparenz)	Stufe 2 – Selbstdiagnostizierend (Prognose)	Stufe 3 – Ko-evolvierend (Präskription)	Stufe 4 – Adaptives Ökosystem (Optimierung)
1. Strategie & Wertausrichtung	Kosten/Verfügbarkeit; lokale Optimierung	Asset-Ziele verknüpft; Anwendungsfälle mit Nutzenbeleg	Wert/Risiko/Kosten/Lebenszyklus integriert; dynamische Priorisierung	Portfoliooptimierung; Lebenszyklusentscheidungen
2. Mensch, Organisation & Kompetenzen	Funktionale Rollen; klassische IH-Kompetenzen	Daten- und Digitalkompetenz; Experten bewerten Analysen	Interdisziplinäre Asset-Teams; Mensch-KI-Regelkreis	Ziele, Grenzen, Eskalationen; Mensch-KI-Kollaboration
3. Prozesse & Asset-Management-System	Standardisierte präventive/korrektive Prozesse; CMMS/EAM	Zustandsbasierte Prozesse; prädiktive Instandhaltung integriert	Dynamisches RCM; geschlossener Regelkreis	Adaptive Prozesse; teilautonome Planung/Portfolio
4. Daten & Information	Stammdaten/Historien; grundlegende Datenqualität	Zustands-/Prozessdaten integriert; Qualität bewertet	Interoperable Modelle/AAS; Datenrückkopplung	Lernende Datenarchitektur; automatisierte Qualitätskontrolle
5. Technologie & Systemintegration	CMMS/EAM; Sensorik; OT/IT-Konnektivität	IIoT; Zustandsüberwachung; Edge-Analytik	APM; Digitaler Zwilling; KI/Simulation; Systemintegration	Vernetztes Ökosystem; adaptive/teilautonome Systeme
6. Analyse & Entscheidungsfähigkeit	Deskriptive Kennzahlen; Störungs-/Leistungsrückblick	Diagnose/Anomalien; Ausfall-/Zustandsprognose	Präskription; Simulation/Szenarien; XAI + Mensch	Selbstoptimierende Logik; autonome definierte Entscheidungen
7. Governance, Risiko & Sicherheit	Verantwortlichkeiten; Risikobewertung	Daten-/Modellverantwortung; XAI-/Zugriffsregeln	Modell-Governance; Änderungsprotokolle; IEC 62443; menschliche Aufsicht	Geregelte Autonomie; dynamisches Risiko; laufende Regelkonformität/Sicherheit
8. Nachhaltigkeit & Resilienz	Nachhaltigkeit als ergänzendes Ziel; erste Energie-/Umweltkennzahlen	Energie/Umwelt in Anwendungsfälle integriert	Nachhaltigkeit/Resilienz in Entscheidungen; Lebenszykluskosten + Ökologie	Simultane Optimierung von Wirtschaft, Resilienz, Energie, Ressourcen und CO_2

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von ISO 55000/55001:2024, IAM (2024), Biedermann & Kinz (2019), Schmiedbauer, Maier & Biedermann (2020), Maier, Schmiedbauer & Biedermann (2020/2021), Bernerstätter (2019), Rijsdijk, van de Wijnckel & Tinga (2024) und European Commission (2021).

Leseprobe

4.2 Stufe 1 – Vernetzte Assets: Transparenz und Stabilisierung

Die erste SAE-Stufe schafft das Fundament für jede weitere Entwicklung. Im Mittelpunkt steht die verlässliche digitale Abbildung der Assets und ihrer Instandhaltungs- und Betriebsprozesse. Asset-Strukturen, technische Plätze, Stammdaten, Arbeitspläne, Störungen, Aufträge, Ersatzteile und Historien werden in einem CMMS/EAM konsistent geführt. Erste Sensorik und Schnittstellen ergänzen diese Basis, ohne dass bereits eine umfassende analytische Entscheidungslogik vorausgesetzt wird. Lean-Smart-Maintenance-Ansätze betonen in dieser Phase vor allem Standardisierung, Planbarkeit, Verlustelimination und Rückmeldedisziplin.[33]

Die zentrale Managementleistung besteht in der Herstellung von Transparenz. Daten müssen nicht nur vorhanden sein, sondern eindeutig einem Asset und einem Entscheidungszweck zugeordnet werden können. Datenqualität wird damit zu einer organisationalen Fähigkeit. Bernerstätter zeigt für datenanalytische Anwendungen, dass die Qualität der Inputfaktoren – insbesondere Datenerfassung und Datenbereitstellung – die spätere Nutzbarkeit analytischer Verfahren wesentlich begrenzt.[34]

Auf der Entscheidungsseite dominieren deskriptive Kennzahlen und strukturierte Ursachenanalysen. Typische Größen sind Anlagenverfügbarkeit, OEE/TEEP, MTBF, MTTR, Planungsgrad, PM-Anteil, Rückmeldequalität und ungeplante Stillstandszeiten. Die zentrale Frage dieser Stufe lautet: Was ist passiert und wo liegen wiederkehrende Verluste? Der Mensch bleibt primärer Diagnostiker und Entscheider; digitale Systeme schaffen vor allem Sichtbarkeit und Prozessstabilität.

Reifeschwelle 1 – Daten- und Prozessfähigkeit: Der Übergang zu Stufe 2 setzt voraus, dass die Informations- und Prozessbasis belastbar genug ist, um diagnostische und prognostische Verfahren verlässlich zu speisen:

- kritische Assets sind eindeutig identifiziert und strukturiert;
- wesentliche Betriebs- und Instandhaltungsdaten sind verfügbar und rückverfolgbar;
- Datenqualität wird systematisch bewertet und verbessert;
- Instandhaltungsprozesse sind standardisiert und werden im CMMS/EAM rückgemeldet;
- KPIs sind einheitlich definiert und werden für Verbesserungsentscheidungen genutzt.

4.3 Stufe 2 – Selbstdiagnostizierende Assets: Zustandsorientierung und prädiktive Instandhaltung

Auf Stufe 2 verändert sich die Rolle der Daten. Sie dienen nicht mehr primär der Dokumentation vergangener Ereignisse, sondern zunehmend der Diagnose des aktuellen Zustands und der Prognose zukünftiger Entwicklungen. Zustandsüberwachung, IIoT, Edge-Analytik und

[33]Vgl. Biedermann, H. (2016), S. 25 f.; Biedermann, H.; Kinz, A. (2019), S. 13–18; EN 16646:2014.
[34]Vgl. Bernerstätter, R. (2019), S. 95–96, 117–123; ISO 8000-1:2022.

- Leseprobe -

datenanalytische Verfahren werden für kritische Assets fortlaufend eingesetzt. Die klassische Entwicklung reicht von Messung und Zustandsbeobachtung über Diagnose und Prognose bis zur Abschätzung von Ausfallwahrscheinlichkeiten oder Restlebensdauern.[35]

Die technische Konnektivität cyber-physischer Systeme schafft hierfür eine wichtige Voraussetzung, ist aber nicht hinreichend. Entscheidend ist, ob Zustands- und Prozessdaten mit der Asset-Historie, den Instandhaltungsprozessen und der Entscheidungssituation verbunden werden können. Datengetriebene Instandhaltungsreife ist deshalb nicht allein durch das Automatisierungsniveau der Diagnose bestimmt. Rijsdijk, van de Wijnckel und Tinga unterscheiden zusätzlich die Übersetzung der realen Anlage in Daten, die Modellierbarkeit der Entscheidung und die Kausalität der gefundenen Zusammenhänge.[36]

Für SAE werden auf dieser Stufe vier Fähigkeiten gekoppelt: Zustandserkennung, Diagnosefähigkeit, Prognosefähigkeit und Entscheidungsunterstützung. Ein Modell, das eine Anomalie statistisch zuverlässig erkennt, erzeugt erst dann einen Asset-Management-Wert, wenn die Information rechtzeitig, verständlich und in einem operationalisierbaren Arbeitsablauf verfügbar ist. Die Smart-Maintenance-Forschung zeigt entsprechend, dass die Wirkung datenbasierter Instandhaltung über geeignete Leistungskennzahlen und die Integration in Managementprozesse beurteilt werden muss.[37]

Die Rolle des Instandhaltungspersonals erweitert sich um Datenkompetenz, Modellverständnis und die Fähigkeit, analytische Ergebnisse zu beurteilen. Der Instandhalter wird vom rein ausführenden Experten zum bewertenden Entscheider. XAI ist dabei besonders relevant, wenn Empfehlungen sicherheits-, qualitäts- oder produktionskritische Maßnahmen auslösen. Auf dieser Stufe bleibt der bewertende und entscheidende Mitarbeiter der Regelfall: KI unterstützt Diagnose und Prognose; die Verantwortung für Maßnahmen verbleibt im definierten organisatorischen Prozess.

Reifeschwelle 2 – Prognosefähigkeit: Stufe 3 wird erst erreicht, wenn Anwendungen der prädiktiven Instandhaltung nicht nur als Piloten existieren, sondern belastbar in Entscheidungen und Arbeitsabläufe eingebunden sind:

- relevante Zustands- und Prozessdaten werden automatisiert und ausreichend granular erfasst;
- Datenherkunft, Datenqualität und dokumentierte Modellstände sind nachvollziehbar;
- Modelle sind unter realen Betriebsbedingungen validiert und ihre Unsicherheit ist bekannt;
- Fehlalarme, Modellabweichungen und Eskalationen werden systematisch behandelt;
- der Nutzen wesentlicher PdM-Fallbeispiele z. B. in Pilotanwendungsbereichen ist über Leistung, Risiko, Kosten oder Nachhaltigkeit belegt.

- Leseprobe -

[35]Vgl. Jardine, A.K.S.; Lin, D.; Banjevic, D. (2006), S. 1483–1485.
[36]Vgl. Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H. (2015), S. 18–23; Rijsdijk, C.; van de Wijnckel, M.; Tinga, T. (2024), S. 60–61.
[37]Vgl. Lundgren, C.; Bokrantz, J.; Skoogh, A. (2021), S. 1291–1292.

4.4 Stufe 3 – Ko-evolvierende Assets: Präskriptive Instandhaltung mit Regelkreis

Stufe 3 bildet den qualitativen Kern der Symbiotic Asset Evolution. Während Stufe 2 primär fragt, was mit einem Asset voraussichtlich geschehen wird, rückt nun die Frage in den Mittelpunkt, welche Maßnahme unter den gegebenen Randbedingungen die beste ist. Prädiktive Instandhaltung wird durch präskriptive Instandhaltung, Simulation und Digitale Zwillinge ergänzt. Digitale Zwillinge erweitern die reine Zustandsabbildung um semantische, kausale und simulationsfähige Modelle und ermöglichen damit Was-wäre-wenn-Analysen vor einem physischen Eingriff.[38]

Die Entscheidung wird nicht mehr ausschließlich anhand des technischen Zustands getroffen. Handlungsalternativen werden hinsichtlich Verfügbarkeit, Qualität, Kosten, Energieverbrauch, CO_2-Wirkung, Sicherheit, Produktionsprogramm, Ersatzteilverfügbarkeit, Personalressourcen, Lebenszykluskosten und Resilienz bewertet. Ein System kann beispielsweise prüfen, ob ein Bauteiltausch sofort erforderlich ist oder ob Lastreduktion, Produktionsprogrammänderung oder die Kombination mit einem ohnehin geplanten Stillstand einen höheren Gesamtwert erzeugt. Präskriptive Instandhaltung übersetzt damit Prognose in handlungsorientierte Optimierung.

Ko-Evolution entsteht jedoch erst durch die Rückkopplung. Daten führen zur Analyse, die Analyse zu einer begründeten Entscheidung, diese zur Umsetzung; das Ergebnis der Maßnahme wird anschließend gemessen und fließt in Modelle, Strategien und Pläne zurück. APM- und Big-Data-basierte Leistungsansätze unterstützen diesen Regelkreis, indem technische, wirtschaftliche und operative Informationen miteinander verbunden werden.[39]

Damit verändert sich zugleich die Organisation. Anlagenverantwortliche, Produktion, Instandhaltung, IT/OT und Datenanalyse arbeiten in gemeinsamen Entscheidungs- und Lernzyklen. Die neue ISO 55001:2024 verstärkt diese Perspektive durch den expliziten Abschnitt zu Asset-Management-Entscheidungen und Wert (Value) sowie durch stärkere Anforderungen an Daten, Wissen und Lebenszyklusaktivitäten.[40]

Die Entscheidungslogik lässt sich verdichten als: Maschine erkennt – Modell analysiert – KI erklärt – Mensch bewertet – Organisation entscheidet – Asset wird verändert – Ergebnis wird gemessen – Modell und Strategie lernen. Gerade diese Verbindung von technischer Adaptivität und organisationalem Lernen begründet den Begriff der Ko-Evolution.

Reifeschwelle 3 – Regelkreisfähigkeit: Der Übergang zu Stufe 4 erfordert eine belastbare Rückkopplung zwischen Strategie, Planung, Ausführung und Lernen:

- Ergebnisse der prädiktiven Instandhaltung werden systematisch in präskriptive Entscheidungsoptionen überführt;
- Simulationen beziehungsweise Digitale Zwillinge unterstützen relevante Maßnahmenentscheidungen;
- Daten-, Modell- und Entscheidungsregelungen sind definiert und prüfbar;

Leseprobe

[38] Vgl. Tao, F. et al. (2018), S. 3563–3576; Biedermann, H. (2023), S. 11–22.
[39] Vgl. Campos, J. et al. (2017), S. 143–147; Biedermann, H. (2023), S. 11–22.
[40] Vgl. ISO 55001:2024, insbesondere Abschnitt 4.5 „Asset management decision-making and value“ sowie die erweiterten Anforderungen an Daten und Wissen und an Aktivitäten über den Lebenszyklus.

- XAI, menschliche Entscheidungshoheit und Eskalationsgrenzen sind verbindlich geregelt;
- Ergebnisse ausgeführter Maßnahmen werden systematisch in Modelle, RCM-Logiken und Asset-Strategien zurückgeführt.

4.5 Stufe 4 – Autonome Asset-Ökosysteme: Portfoliooptimierung und adaptive Selbststeuerung

Die vierte SAE-Stufe stellt ein langfristiges Ziel – wenn nicht sogar eine Vision – dar. Assets werden nicht mehr isoliert betrachtet, sondern als Bestandteile eines technischen, organisatorischen und wirtschaftlichen Ökosystems. Das Asset-Management-System bewertet Szenarien auf Portfolioebene, priorisiert Maßnahmen dynamisch und optimiert mehrere Zielgrößen gleichzeitig. Die zentrale Frage lautet nicht mehr nur, welche Maßnahme für ein einzelnes Asset optimal ist, sondern welche Entscheidung unter Berücksichtigung des gesamten Portfolios und seiner Restriktionen den höchsten nachhaltigen Wertbeitrag erzeugt.

Die Optimierung folgt einer Wert-Risiko-Kosten-Nachhaltigkeits-Logik. Szenarioanalysen, dynamische Risikoanalysen, Simulation, Portfoliooptimierung, adaptives RCM und KI-gestützte Entscheidungslogiken können dabei zusammenwirken. Die ISO 55001:2024 betont die Notwendigkeit konsistenter Entscheidungskriterien zur Wertrealisierung; damit erhält die Verbindung von Leistung, Risiko und Kosten eine klare Managementsystemperspektive.[41]

Autonomie ist im SAE-Verständnis jedoch nicht mit uneingeschränkter Entscheidungsfreiheit gleichzusetzen. Angestrebt wird vielmehr geregelte Autonomie: Systeme dürfen innerhalb definierter technischer, wirtschaftlicher, sicherheitsbezogener und regulatorischer Grenzen eigenständig optimieren; Entscheidungen außerhalb dieser Grenzen werden an verantwortliche Personen eskaliert. Dieser Ansatz entspricht dem Industry-5.0-Leitbild einer menschenzentrierten, resilienten und nachhaltigen Industrie und ist mit dem Grundgedanken menschlicher Aufsicht über risikoreiche KI-Systeme vereinbar[42],[43].

Die Rolle des Menschen verschiebt sich damit von der Freigabe jeder Einzelmaßnahme hin zur Gestaltung des Zielsystems, der Festlegung von Grenzwerten und der Entscheidungsregeln, der Bewertung außergewöhnlicher Situationen und der Verantwortung für Eskalationen. Der Mensch bleibt Bestandteil des Systems, jedoch auf einer anderen Entscheidungsebene.

Reifeschwelle 4 – Adaptive Portfoliofähigkeit: Stufe 4 ist kein endgültiger Zustand, sondern eine Form adaptiver Exzellenz. Sie ist nur dort sinnvoll, wo Nutzen, Risiko und Governance den Autonomiegrad rechtfertigen:

- Asset-Portfolios werden dynamisch und lebenszyklusorientiert optimiert;
- wirtschaftliche, technische, nachhaltigkeits- und resilienzbezogene Zielgrößen sind in den Entscheidungskriterien integriert;

[41] Vgl. ISO 55000:2024; ISO 55001:2024; ISO 31000:2018; IEC 60300-3-3:2017.
[42] Vgl. Regulation (EU) 2024/1689 (AI Act), insbesondere Art. 14 zur menschlichen Aufsicht; die konkrete Anwendbarkeit hängt von der Klassifikation des jeweiligen KI-Systems ab.
[43] Vgl. European Commission (2021), S. 13–15, 23–28.

- Leseprobe -

- teilautonome Entscheidungen sind auf klar definierte, überwachte Entscheidungsräume begrenzt;
- Modelle, Strategien und Pläne lernen kontinuierlich aus Betriebserfahrungen;
- Sicherheit, Regelkonformität und Prüfbarkeit sowie menschliche Eskalationsmöglichkeiten sind auch bei hoher Automatisierung gewährleistet.

4.6 MTO als Querschnittsdimension der SAE

Das SAE-Modell ist ausdrücklich als sozio-technisches Reifegradmodell angelegt. Technologische Entwicklung ohne entsprechende organisatorische und menschliche Fähigkeiten kann lokale Automatisierung erzeugen, aber kein lernendes Asset-Management-System. MTO bildet deshalb eine Querschnittslogik über alle acht Befähigungsdimensionen und alle vier Reifestufen.

Die in Abb. 2 schematisch dargestellte Annäherung der relativen Bedeutung von Mensch, Technik und Organisation bildet diese Querschnittslogik entlang der Entwicklung von traditioneller Instandhaltung über Lean und Lean Smart Maintenance bis zur Symbiotic Asset Evolution ab.

In der Dimension Mensch entwickelt sich die Rolle vom ausführenden und planenden Instandhalter zum datenkompetenten Experten, der analytische Ergebnisse bewertet, mit KI-Systemen kooperiert und schließlich Zielräume und Eskalationslogiken mitgestaltet. Die ISO 55012:2024 unterstreicht die Bedeutung von Mitarbeitereinbindung, Kompetenz und Kultur für die Wirksamkeit eines Asset-Management-Systems[44].

Die technische Dimension entwickelt sich von Konnektivität und CMMS/EAM über Zustandsüberwachung und prädiktive Instandhaltung zu Simulation, Digitalen Zwillingen, präskriptiver Instandhaltung und teilautonomen Systemen. Die Organisationsdimension wandelt sich von funktional getrennten Verantwortlichkeiten zu bereichsübergreifenden Asset-Teams, gemeinsamen Daten- und Entscheidungsmodellen sowie lernenden Regelkreissystemen. Die drei Entwicklungen sind nicht unabhängig voneinander: Technische Fähigkeiten entfalten erst dann Wirkung, wenn Prozesse, Rollen, Kompetenz und Governance entsprechend mitwachsen.

Auch das Datenmanagement ist als MTO-Thema zu verstehen. Datenqualität entsteht nicht nur durch Technik, sondern durch Verantwortlichkeiten, Prozessdisziplin, Standards und Nutzungskompetenz. ISO 55013:2024 stellt die Managementperspektive auf Daten als eigenständige Assets ausdrücklich in den Zusammenhang mit Asset-Management- und Organisationszielen.[45]

4.7 Reifegradbestimmung und Bewertungslogik

Für die praktische Anwendung wird vorgeschlagen, jede der acht Befähigungsdimensionen separat auf einer vierstufigen Skala zu bewerten. Dadurch entsteht zunächst ein Reifegradprofil und nicht nur ein aggregierter Gesamtwert. Dieses Vorgehen ist mit bestehenden

[44]Vgl. ISO 55012:2024: Asset management – Guidance on people involvement and competence.
[45]Vgl. ISO 55013:2024: Asset management – Guidance on the management of data assets.

- Leseprobe -

LSM- und Asset-Management-Bewertungen kompatibel, die eine strukturierte Bewertung von Fähigkeiten und kontinuierliche Verbesserungszyklen vorsehen[46].

Ein einfacher Mittelwert kann jedoch zu Fehlinterpretationen führen. Eine Organisation mit hochentwickelter KI und geringer Daten- oder Governance-Reife darf nicht allein aufgrund einzelner Spitzenwerte als SAE-Stufe 3 oder 4 gelten. Für das SAE-Modell wird deshalb ein Engpass-Prinzip vorgeschlagen: Eine höhere Stufe gilt erst dann als erreicht, wenn die für diese Stufe definierten kritischen Reifeschwellen erfüllt sind. Schmiedbauer unterscheidet in seinem aktuellen Bewertungsmodell ebenfalls zwischen Befähiger- und Ergebniskriterien und stärkt damit die Logik, dass Reife durch Voraussetzungen und nachweisbare Wirkungen gemeinsam bestimmt werden sollte.[47]

Formal kann die Stufenzuordnung als „SAE-Stufe = höchste Stufe L, für die alle kritischen Kriterien der Reifeschwelle von L erfüllt sind“ beschrieben werden. Ergänzend kann für Management- und Vergleichszwecke ein gewichteter SAE-Index gebildet werden: „SAE-Index = $\Sigma\, w_i \cdot C_i$“ mit $\Sigma\, w_i = 1$. Die Gewichte w_i können organisationsspezifisch festgelegt werden; der Index ersetzt jedoch nicht die Logik der Reifeschwellen.

Für eine belastbare Bewertung sollten die Bewertungen durch Evidenzen gestützt werden: Strategien und Politiken, Prozessbeschreibungen, Datenqualitätskennzahlen, Systemarchitekturen, Modellvalidierungen, KPI-Zeitreihen, Qualifikationsnachweise, revisionssichere Änderungs- und Entscheidungsprotokolle, die nachvollziehbar dokumentieren, wer wann Daten, Modelle oder Entscheidungen verändert oder freigegeben hat, sowie dokumentierte Wirtschaftlichkeitsnachweise. Das Instrument entwickelt sich damit von einer Selbsteinschätzung (Kurzbewertung) zu einer evidenzorientierten Entwicklungsdiagnostik.

- Leseprobe -

4.8 Wissenschaftliche Einordnung und Abgrenzung des SAE-Modells

Die Literatur kennt bereits zahlreiche Reifegradmodelle für Instandhaltung, Smart Maintenance und Asset Management. Das Lean-Smart-Maintenance-Reifegradmodell verbindet Lean- und Smart-Prinzipien und wurde für Anforderungen von Industrie 4.0 erweitert; Validierungsarbeiten und ein generischer Bewertungsrahmen konkretisieren die praktische Anwendung. Das IAM strukturiert Asset Management über Befähigungen, während datengetriebene Instandhaltungsmodelle die Qualität von Daten, Modellen, Entscheidungen und Kausalität differenzieren.[48]

Der wissenschaftliche Beitrag von SAE liegt daher nicht in der erstmaligen Einführung eines Reifegradmodells. Die spezifische Erweiterung besteht in der systematischen Verbindung von vier bislang häufig getrennt betrachteten Entwicklungslinien: erstens Asset-Management-Leistungsfähigkeit und Wertschöpfungsorientierung, zweitens Lean Smart Maintenance und organisationales Lernen, drittens datengetriebene Instandhaltung mit prädiktiven

[46] Vgl. Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2020), S. 296–302; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2021), S. 235–241.
[47] Vgl. Schmiedbauer, O. (2025), S. 125–148.
[48] Vgl. Schmiedbauer, O.; Maier, H.; Biedermann, H. (2020), S. 81–85; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2020), S. 296–302; Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2021), S. 235–241; IAM (2024), S. 30–35; Rijsdijk, C.; van de Wijnckel, M.; Tinga, T. (2024), S. 60–61.

und präskriptiven Strategien sowie viertens Mensch–Technik–Organisation als ko-evolvierendes sozio-technisches System.

Das Modell unterscheidet sich zugleich von lediglich technologieorientierten Digital-Reifegrad-Modellen. Die höchste Stufe ist nicht durch maximale Automatisierung definiert, sondern durch adaptive Entscheidungsfähigkeit innerhalb expliziter Governance-Grenzen. Reife bedeutet damit eine wachsende Fähigkeit des Gesamtsystems, Veränderungen zu erkennen, Optionen zu bewerten, Entscheidungen nachvollziehbar umzusetzen und aus den Ergebnissen zu lernen.

Der konzeptionelle Charakter des Modells setzt zugleich Grenzen. Die acht Dimensionen, die Kriterien der Reifeschwellen und ihre Gewichtung bedürfen einer empirischen Validierung in unterschiedlichen Branchen und Asset-Kategorien. Das SAE-Modell ist deshalb als theorie- und literaturbasierter Bezugsrahmen zu verstehen, der eine überprüfbare Hypothese über den Evolutionspfad des Asset Managements formuliert, nicht als bereits universell validiertes Zertifizierungsmodell.

4.9 Zusammenfassung des SAE-Reifegradmodells

Die vier SAE-Stufen lassen sich als evolutionäre Entwicklung der Entscheidungsfähigkeit zusammenfassen: Stufe 1 schafft Transparenz, Stufe 2 Diagnose und Prognose, Stufe 3 Präskription und Regelkreise, Stufe 4 adaptive Portfoliooptimierung. *Die Entwicklungslinie lautet damit: Vernetzen → Verstehen → Vorhersagen → Empfehlen → Entscheiden → Lernen → Optimieren.*

Der eigentliche Reifefortschritt liegt nicht primär in zunehmender technischer Autonomie. Er liegt in der Fähigkeit, Informationen in bessere Entscheidungen und Entscheidungen wiederum in organisationales Lernen zu überführen. Die Symbiotic Asset Evolution operationalisiert damit das Ziel des „lebenden Assets“ (Living Asset): ein Asset-Management-System, das physische Assets, Daten, Menschen und Organisation in kontinuierlichen Lern- und Wertschöpfungsschleifen verbindet.

Diese Lernlogik kann im Sinne des Deutero-Lernens um eine Metaebene erweitert werden. Nicht nur die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen wird überprüft; Gegenstand der Reflexion ist auch, wie gut die Organisation selbst lernt: wie zuverlässig Ursachen erkannt werden, wie Erfahrungen in Wissen überführt werden, wie Modelle und Entscheidungsregeln angepasst werden und ob die Lernprozesse zu besseren Entscheidungen führen. SAE verbindet damit operatives Lernen mit dem Lernen über die Qualität und Struktur des eigenen Lernens. Dies knüpft an die lernende Instandhaltungsorganisation und an das Konzept des organisationalen Deutero-Lernens an.[49]

5 Wert messen und steuern – wertorientierte Steuerungslogik

Wertorientiertes Asset Management benötigt eine Steuerungslogik, die technische Leistungsfähigkeit nicht isoliert betrachtet, sondern in wirtschaftliche und nichtmonetäre Wirkungen übersetzt. Die empirische Literatur zeigt, dass Instandhaltung über Verfügbarkeit,

[49] Vgl. Biedermann, H. (2002), S. 9–12; Sagadin, J. (2002), S. 197–223; Visser, M. (2007), S. 659–667.

- Leseprobe -

Produktivität, Qualität und Risikoreduktion einen wesentlichen Beitrag zur Profitabilität leisten kann; zugleich greift eine reine Kostenbetrachtung zu kurz.[50]

Für SAE genügt daher keine einzelne Rentabilitätszahl. Auf Ergebnisebene sind monetäre Verfahren wie Gewinn-/Kostenvergleich, ROI beziehungsweise EVA, Kapitalwert und Lebenszykluskosten geeignet, um Cashflow-Wirkungen verschiedener Strategien über den Lebenszyklus vergleichbar zu machen. LCC/TOTEX erweitert die Betrachtung um Investition, Betrieb, Instandhaltung, Ausfall- und Folgekosten und ist insbesondere für Entscheidungen in frühen Lebenszyklusphasen relevant.[51],[52]

Ergänzend wird ein ausgewogenes Kennzahlensystem (KPI-System) benötigt, das die vier Steuerungsfelder Wert, Risiko, Kosten und Nachhaltigkeit sichtbar macht. Typische Ergebnisgrößen sind OEE/TEEP, MTBF/MTTR, Ausfallkosten, Instandhaltungskosten je Output, Energie- und CO_2-Intensität sowie sicherheits- und resilienzbezogene Kennzahlen. EN 15341 und die Smart-Maintenance-Literatur bieten hierfür etablierte Referenzen.[53]

Für SAE ist entscheidend, dass die Bewertungs- und KPI-Logik nicht als nachgelagertes Berichtswesen verstanden werden. KPI- und Cashflow-Werte müssen in die Priorisierung, Asset-Strategie und Planung zurückwirken. Erst diese Rückkopplung macht aus den Messungen eine Steuerung: Ergebnisdaten verändern Modelle und Entscheidungen, Maßnahmen erzeugen neue Ergebnisse. Dieses Kapitel 5 bildet damit bewusst keine eigenständige Controlling-Systematik, sondern die Wertschleife, welche die Reifeschwellen und den Regelkreis des SAE-Modells wirtschaftlich und nachhaltig absichert.

- Leseprobe -

6 Normen, Regulatorik und Governance

Die normative Einbettung der SAE folgt dem Grundprinzip, dass zunehmende daten- und KI-gestützte Entscheidungsfähigkeit mit zunehmender Governance-Reife einhergehen muss. Den Kern bildet die ISO-55000-Reihe. ISO 55000:2024 schärft die Prinzipien Wertorientierung, strategische Ausrichtung und Führung; die ISO 55001:2024 konkretisiert Anforderungen an Entscheidungsfindung und Wertrealisierung, Risiken und Chancen, Daten und Wissen sowie Aktivitäten über den Lebenszyklus. Die EN 16646 verankert die Instandhaltung im physischen Asset Management; die ISO 31000 ergänzt die risikoorientierte Perspektive[54].

Für die höheren SAE-Stufen sind insbesondere daten- und modellorientierte Führungs- und Governance-Strukturen relevant. Datenhoheit, Datenqualität, Modellverantwortung, dokumentierte Modell- und Änderungsstände, Gültigkeitsbereiche sowie revisionssichere Änderungs- und Entscheidungsprotokolle müssen explizit festgelegt sein. Mit der ISO 55013:2024 liegt hierfür eine aktuelle Norm zum Management von Daten als Assets vor; die ISO 55012:2024 ergänzt die Perspektive auf Mitarbeitereinbindung und Kompetenz. Die

[50] Siehe u. a. Al-Najjar, B.; Alsyouf, I. (2004), S. 643; Alsyouf, I. (2007), S. 70; Marais, K.; Saleh, J. (2009), S. 644–645.
[51] Vgl. IEC 60300-3-3:2017; EN 16646:2014.
[52] Vgl. Biedermann, H. (2021), S. 21 f.
[53] Vgl. EN 15341:2019+A1:2022; Lundgren, C.; Bokrantz, J.; Skoogh, A. (2021), S. 1291–1292.
[54] Vgl. ISO 55000:2024; ISO 55001:2024; EN 16646:2014; ISO 31000:2018.

OT-/ICS-Sicherheit ist mit wachsender Vernetzung als Querschnittsanforderung zu behandeln; IEC 62443 und NIST SP 800-82 bilden dafür zentrale Referenzrahmen[55].

Auf europäischer Ebene verstärken Nachhaltigkeits- und Resilienzregeln den Lebenszyklusbezug. Die ESPR[56] verankert unter anderem Langlebigkeit, Reparierbarkeit und den digitalen Produktpass als Elemente einer kreislauforientierten Produktpolitik; die CER-Richtlinie stärkt die Resilienz kritischer Entitäten. Für KI-Anwendungen ist der EU AI Act relevant, sofern eine konkrete Anwendung in dessen Hochrisiko- oder sonstige regulierte Kategorien fällt. Das Prinzip der menschlichen Aufsicht (Human Oversight) unterstützt die SAE-Logik, dass Entscheidungsautonomie risikoadäquate menschliche Aufsicht, Kompetenz und Eingriffsmöglichkeiten voraussetzt.[57],[58]

Auf der Ebene der Unternehmensführung gilt: Je höher Autonomie und Wirkungsgrad einer Entscheidung, desto klarer müssen Kriterien, Verantwortlichkeiten und Eskalationsgrenzen definiert sein. Für präskriptive oder teilautonome Funktionen sind Asset-Verantwortliche, Instandhaltungsleitung sowie Daten-, Modell- und Sicherheitsverantwortliche zu benennen; Änderungen an Datenmodellen und Entscheidungsalgorithmen benötigen Freigaben und Wirksamkeitsnachweise. Definierte und genau geregelte Autonomie ist damit Voraussetzung für verantwortbare adaptive Systeme.

- Leseprobe -

7 Diskussion: Herausforderungen, Grenzen und Forschungsbedarf

7.1 Systemintegration und Datenbasis

Die erste Herausforderung liegt weniger in einzelnen Analyseverfahren als in der Integration heterogener IT-/OT-Landschaften. Bestehende Systeme in gewachsenen Strukturen, proprietäre Schnittstellen und uneinheitliche Asset-Strukturen erschweren die durchgängige Verbindung von Zustands-, Prozess-, Qualitäts-, Energie- und Instandhaltungsdaten. SAE macht diese Integrationsfähigkeit bewusst zu einer eigenen Reifedimension. Damit folgt das Modell der Annahme, dass analytische Reife nicht höher sein kann als die Daten- und Prozessreife, auf der sie basiert.

7.2 Kausalität, Modellunsicherheit und Erklärbarkeit

Eine zweite Grenze betrifft die Qualität datenbasierter Entscheidungen. Hohe Prognosegüte ist nicht automatisch mit kausaler Erklärung oder belastbarer Handlungsempfehlung gleichzusetzen. Besonders bei seltenen Fehlerereignissen, veränderlichen Betriebsbedingungen und begrenzten Trainingsdaten können Modelle scheinbar präzise, aber außerhalb ihres Gültigkeitsbereichs unsicher bis falsch, sein. Die von Rijsdijk et al. (2024) hervorgehobene *Trennung von Daten-/Entscheidungsreife, Realitätsabbildung, Modellierbarkeit und Kausalität* ist deshalb für die empirische Weiterentwicklung von SAE wesentlich.

---

[55] Vgl. ISO 55012:2024; ISO 55013:2024; IEC 62443; NIST SP 800-82 Rev. 3 (2023).
[56] ESPR…Ecodesign for Sustainable Products Regulation (EU-Verordnung 2024/1781)
[57] Vgl. Regulation (EU) 2024/1689 (AI Act), insbesondere Art. 14 zur menschlichen Aufsicht bei Hochrisiko-KI-Systemen.
[58] Vgl. Regulation (EU) 2024/1781 (ESPR); Directive (EU) 2022/2557 (CER).

7.3 Mensch, Kompetenz und Akzeptanz

Die MTO-Perspektive macht deutlich, dass höhere technische Reife neue Kompetenzprofile erzeugt. Daten- und Modellverständnis, Risiko- und Systemdenken sowie die Fähigkeit zur kritischen Bewertung von KI-Empfehlungen werden zu Kernkompetenzen. Gleichzeitig verändern sich Rollen und Verantwortung: Der Mensch entscheidet nicht zwangsläufig weniger, sondern auf anderen Ebenen. *Forschung und Praxis müssen daher klären, wie unmittelbare menschliche Entscheidungseinbindung, überwachende menschliche Aufsicht und teilautonome Entscheidungen je nach Kritikalität sinnvoll kombiniert werden können.*

7.4 Reifegradlogik und empirische Validierung

Das SAE-Modell ist bislang ein konzeptioneller Bezugsrahmen. Die Reifeschwellen und das Engpass-Prinzip sind theoretisch plausibel, müssen aber empirisch auf Reliabilität, Trennschärfe und Prognosekraft geprüft werden. *Zu untersuchen ist insbesondere, ob die acht Dimensionen in unterschiedlichen Branchen gleich relevant sind oder branchenspezifische Gewichtungen benötigen. Ebenso ist offen, welche Mindestanforderungen für den Übergang zwischen den Stufen quantitativ sinnvoll sind und ob höhere Reife tatsächlich mit höherem Wert, geringeren Risiken oder besserer Nachhaltigkeitsleistung korreliert.*

7.5 Forschungsagenda

Aus dem Modell ergeben sich fünf prioritäre Forschungsfelder: *erstens die empirische Validierung der 8×4-Matrix und der Reifeschwellen; zweitens skalierbare, erklärbare Verfahren der präskriptiven Instandhaltung einschließlich Unsicherheitsbewertung; drittens die Verbindung von Portfoliooptimierung mit CO_2-, Ressourcen- und Resilienzkriterien; viertens Kompetenz- und Governance-Modelle für Mensch-KI-Kollaboration; fünftens interoperable Datenräume und robuste OT-Sicherheitsarchitekturen.* Damit verschiebt sich der Forschungsfokus von der isolierten Technologieentwicklung hin zur Wirksamkeit des gesamten sozio-technischen Asset-Management-Systems.

8 Fazit und Ausblick

Wertorientiertes Asset Management der nächsten Generation ist die Gestaltung eines lernenden, MTO-integrierten Systems. Der entwickelte APM-Bezugsrahmen beschreibt die erforderliche Gesamtarchitektur aus Strategie, Daten, Analyse, Betrieb und Leistung über den Lebenszyklus. Lean Smart Maintenance liefert hierfür die prozessuale und lernorientierte Basis; Symbiotic Asset Evolution beschreibt die nächste Entwicklungslogik.

Das SAE-Reifegradmodell konkretisiert diese Entwicklung in vier Stufen und acht Befähigungsdimensionen. Sein zentraler Gedanke ist, Reife nicht mit Automatisierung gleichzusetzen. Vernetzung schafft Transparenz, Selbstdiagnose ermöglicht Prognose, Ko-Evolution verbindet Präskription mit Lernen durch Regelkreise, und adaptive Asset-Ökosysteme optimieren innerhalb definierter Governance-Grenzen auf Portfolioebene. Reifeschwellen und Engpass-Prinzip verhindern dabei, dass technologische Einzelspitzen Defizite bei Daten, Menschen, Prozessen oder Governance verdecken.

- Leseprobe -

Die wertorientierte Steuerungslogik und der normative Governance-Rahmen sichern die Entwicklung wirtschaftlich und institutionell ab. *Die Vision ist das „lebende Asset" (Living Asset): ein System, das mit seinen Menschen lernt und den Wertbeitrag im Spannungsfeld von Leistung, Risiko, Kosten, Nachhaltigkeit und Resilienz fortlaufend optimiert.* Der nächste wissenschaftliche Schritt besteht in der empirischen Prüfung der Reifegradmatrix und den Kriterien ihrer Reifeschwellen sowie in der Untersuchung, unter welchen Bedingungen höhere SAE-Reife tatsächlich zu überlegener Anlagenleistung führt.

Literatur

Al-Najjar, B.; Alsyouf, I. (2004): Enhancing a company's profitability and competitiveness using integrated vibration-based maintenance: A case study. European Journal of Operational Research 157(3), 643–657. DOI: 10.1016/S0377-2217(03)00258-3.

Alsyouf, I. (2007): The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability. International Journal of Production Economics 105(1), 70–78. DOI: 10.1016/j.ijpe.2004.06.057.

Bauer, M.; Grosse, E. (2024): Digital Transforming Coaching. GITO.

Bernerstätter, R. (2019): Reifegradmodell zur Bewertung der Inputfaktoren für datenanalytische Anwendungen – Konzeptionierung am Beispiel der Schwachstellenanalyse. Dissertation, Montanuniversität Leoben.

Biedermann, H. (2002): Instandhaltung und Wissensmanagement – Die Entwicklung zur lernenden Instandhaltungsorganisation. Industrie-Management, S. 9–12.

Biedermann, H. (2008): Anlagenmanagement – Managementinstrumente zur Wertsteigerung. 2., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, TÜV Media, Köln.

Biedermann, H. (2016): Lean Smart Maintenance – Wertschöpfende, lernorientierte und ressourceneffiziente Instandhaltung. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Lean Smart Maintenance: Konzepte, Instrumente und Anwendungen für eine effiziente und intelligente Instandhaltung. Köln: TÜV Media, S. 19–29.

Biedermann, H. (2019): Digitalisierte Instandhaltung – Komplex, agil, datengetrieben. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Digitalisierte Instandhaltung: Stand und Perspektiven. Köln: TÜV Media, S. 25–38, ISBN 978-3-7406-0467-7.

Biedermann, H. (2021): Wertschöpfungsorientiertes Instandhaltungs- und Assetmanagement – Zielsystem & Bewertung. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Instandhaltung als Erfolgsfaktor. Strategie, Lebenszyklusbetrachtung und Digitalisierung. TÜV Media, Köln, S. 13–28.

Biedermann, H. (2022): Transformation von Instandhaltungs- zum Asset-Management: Ziele, Aufgaben und Instrumente. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Vom Instandhaltungs- zum Assetmanagement: Konzepte, Lösungen, Erfahrungen. TÜV Media, Köln, S. 11–20.

Biedermann, H. (2023): KI in der Instandhaltung: Stand und Ausblick. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Instandhaltung im dynamischen Umfeld: Lean – Digital – Integrativ – Nachhaltig – Wertschöpfend. Band 37, TÜV Media, Köln, S. 11–22.

Biedermann, H. (2024): Digitale Exzellenz im Unternehmen: Grundlagen, Strategie und Change. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Digital Excellence in der Instandhaltung: Strategien für Ihren Unternehmenserfolg. Band 38, TÜV Media, Köln, S. 11–22.

- Leseprobe -

Biedermann, H. (2025): Innovationen im normativen, strategischen und operativen Instandhaltungsmanagement. In: Biedermann, H. (Hrsg.): Innovative Instandhaltung: Wertschöpfungsorientierte Transformation mit und durch KI. Band 39, TÜV Media, Köln, S. 9–29.

Biedermann, H.; Kinz, A. (2019): Lean Smart Maintenance—Value Adding, Flexible, and Intelligent Asset Management. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 164, 13–18. DOI: 10.1007/s00501-018-0805-x.

Campos, J.; Sharma, P.; Jantunen, E.; Baglee, D.; Fumagalli, L. (2017): Business Performance Measurements in Asset Management with the Support of Big Data Technologies. Management Systems in Production Engineering 25(3), 143–149. DOI: 10.1515/mspe-2017-0021.

EN 15341:2019+A1:2022: Maintenance – Maintenance Key Performance Indicators.

EN 16646:2014: Maintenance – Maintenance within physical asset management.

EN 17948:2024: Maintenance management and functions.

European Commission (2021): Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry.

European Union (2022a): Directive (EU) 2022/2557 on the resilience of critical entities (CER).

European Union (2022b): Directive (EU) 2022/2464 as regards corporate sustainability reporting (CSRD).

European Union (2023): Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards (ESRS).

European Union (2024a): Regulation (EU) 2024/1781 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products (ESPR).

European Union (2024b): Regulation (EU) 2024/1689 laying down harmonised rules on artificial intelligence (AI Act).

IAM (Institute of Asset Management) (2024): An Anatomy of Asset Management. Version 4.

IEC 60300-3-3:2017: Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing.

IEC 60812:2018: Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).

IEC 62443: Industrial communication networks – Network and system security. Part series.

ISO 31000:2018: Risk management – Guidelines.

ISO 55000:2024: Asset management – Vocabulary, overview and principles.

ISO 55001:2024: Asset management – Asset management system – Requirements.

ISO 55002:2018: Asset management – Management systems – Guidelines for the application of ISO 55001.

ISO 55012:2024: Asset management – Guidance on people involvement and competence.

ISO 55013:2024: Asset management – Guidance on the management of data assets.

ISO 8000-1:2022: Data quality – Part 1: Overview.

- Leseprobe -

Jardine, A.K.S.; Lin, D.; Banjevic, D. (2006): A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing 20(7), 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.

Lee, J.; Bagheri, B.; Kao, H. (2015): A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manufacturing Letters 3, 18–23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.

Lundgren, C.; Bokrantz, J.; Skoogh, A. (2021): Performance indicators for measuring the effects of Smart Maintenance. International Journal of Productivity and Performance Management 70(6), 1291–1316. DOI: 10.1108/IJPPM-03-2019-0129.

Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2020): Validation of a Lean Smart Maintenance Maturity Model. Technical Journal 14(3), 296–302. DOI: 10.31803/tg-20200706131623.

Maier, H.; Schmiedbauer, O.; Biedermann, H. (2021): Development of a Generic Framework to Assess Asset Management Maturity within Organisations. Technical Journal 15(2), 235–241. DOI: 10.31803/tg-20210510161621.

Marais, K.; Saleh, J. (2009): Beyond its cost, the value of maintenance: An analytical framework for capturing its net present value. Reliability Engineering & System Safety 94(2), 644–657. DOI: 10.1016/j.ress.2008.07.004.

NIST SP 800-82 Rev. 3 (2023): Guide to Operational Technology (OT) Security.

Rijsdijk, C.; van de Wijnckel, M.; Tinga, T. (2024): A maturity framework for data driven maintenance. In: Proceedings of the 8th European Conference of the Prognostics and Health Management Society 2024, S. 60–70. arXiv:2407.18996.

Sagadin, J. (2002): Die lernende Organisation: Eine Umsetzungsstudie aus der produzierenden Industrie. In: Bornemann, M.; Sammer, M. (Hrsg.): Anwendungsorientiertes Wissensmanagement. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, S. 197–223. DOI: 10.1007/978-3-322-89655-1_12.

Schmiedbauer, O.; Maier, H.; Biedermann, H. (2020): Evolution of a Lean Smart Maintenance Maturity Model towards the new Age of Industry 4.0. In: Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2020), Hannover: publish-Ing., S. 78–91. DOI: 10.15488/9649.

Schmiedbauer, O. (2025): Modell zur Bewertung eines Instandhaltungsmanagements. Dissertation, Montanuniversität Leoben. DOI: 10.34901/mul.pub.2025.076.

Tao, F.; Cheng, J.; Qi, Q.; Zhang, M.; Zhang, H.; Sui, F. (2018): Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 94, 3563–3576. DOI: 10.1007/s00170-017-0233-1.

Visser, M. (2007): Deutero-Learning in Organizations: A Review and a Reformulation. Academy of Management Review 32(2), 659–667. DOI: 10.5465/AMR.2007.24351883.

Hinweis zum Einsatz generativer KI

Bei der Erstellung und redaktionellen Überarbeitung dieses Beitrags wurde ChatGPT (OpenAI, Modell GPT-5.6 Sol) unterstützend eingesetzt. Der Einsatz umfasste insbesondere die sprachliche Überarbeitung und Verdichtung von Textpassagen, die Verbesserung von Grammatik, Stil, Struktur und Verständlichkeit, die bevorzugte Verwendung deutschsprachiger Fachbegriffe - soweit dies fachlich sinnvoll war - sowie die Unterstützung bei der Strukturierung und grafischen Aufbereitung des Beitrags. Darüber hinaus wurde ChatGPT

- Leseprobe -

zur formalen Überprüfung der Literaturzitate und des Literaturverzeichnisses, zur Identifikation bibliografischer Inkonsistenzen sowie zur Unterstützung bei der Überprüfung von Querverweisen und der formalen Gestaltung eingesetzt.

Die wissenschaftlichen Inhalte, Argumentationslinien, Modelle, Daten, Bewertungen und Schlussfolgerungen stammen vom Autor. Die verwendeten Quellen und Literaturstellen wurden vom Autor ausgewählt und eigenständig geprüft. Die Verantwortung für Inhalt, wissenschaftliche Aussagen und Zitierweise liegt vollständig beim Autor.

- Leseprobe -