



Wertschöpfungsorientierte Transformation mit und durch KI
39. Instandhaltungsforum

Innovative Instandhaltung

Innovative Instandhaltung

- Leseprobe -

Praxiswissen für Ingenieure – Instandhaltung

Herausgegeben von Hubert Biedermann, em.o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont.,
Präsident der ÖVIA, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich



Dieser Titel wurde von der
ÖVIA (Österreichische technisch-wissenschaftliche
Vereinigung für Instandhaltung & Anlagenwirtschaft) erstellt.

-Leseprobe -

Wertschöpfungsorientierte Transformation mit und durch KI
39. Instandhaltungsforum

Innovative Instandhaltung

TÜV Media

H. Biedermann (Hrsg.)



General Rights

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 978-3-7406-1011-1 (Print)
ISBN 978-3-7406-1012-8 (E-Book)

© by TÜV Media GmbH, TÜV Rheinland Group, Köln 2025
® 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 2025
Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

Autorenverzeichnis	7
Innovationen im normativen, strategischen und operativen Instandhaltungsmanagement Hubert Biedermann	9
Künstliche Intelligenz verändert alles – Raum, Zeit und die dritte Dimension der Intelligenz in der Arbeitswelt Harald Leitenmüller	31
Künstliche Intelligenz in der Instandhaltung – Strukturierte Einordnung aktueller Ansätze auf Basis einer systematischen Literaturrecherche Miloš Tucović, Hubert Biedermann	43
Integriertes Asset Management für physische und digitale Instandhaltung – Gemeinsamkeiten, Unterschiede und wechselseitige Lerneffekte Robin Kühnast-Benedikt, Boris Kozlowski	61
KI trifft Blaumann – Wie KI Techniker in der Instandhaltung mit domänenspezifischen Wissen unterstützen kann Rolf Piana, Benjamin Schwärzler	79
Zukunft der Luftfahrtwartung: KI- und AR-basierte Remote- Inspektionen – Ein kognitives Assistenzsystem zur Inspektionsunterstützung Andreas Steiner, Lukas Rapp, Fazel Ansari, Kirsty Bettinger	95
Mit KI und Knowledge Graphen Instandhaltungsaufgaben in der Industrie effizient steuern – Von generativer bis agentenbasierter Künstlicher Intelligenz Alexander Wahler, Ioan Toma, Umutcan Serles	107
Weltweiter Rollout mobiler digitaler Anwendungen in der Instandhaltung – Am Fallbeispiel der Schaeffler Technologies AG & Co.KG Anna-Theresa Kundmüller	117
Digitale Transformation der Instandhaltung durch AR-gestützte Asset- Navigation Clemens Kirner, Wolfgang Kriegner	129

Wissensmanagement in der Instandhaltung - Erfolgsfaktoren für die digitale Transformation – Chancen und Herausforderungen	141
Michael Wolny, David Kiklhorn	
Instandhaltungs- und Wissensmanagement im Umbruch – Mit 3 einfachen Methoden erfolgreich agieren	151
Markus Molls, Frank Stopa	
Vom Chaos zum Chor – Shopfloor Management als Schlüssel zur Transformation der Instandhaltung	171
Stefan Mutschlechner, Andreas Buchner	
Instandhaltungsstrategien im dynamischen Umfeld – wertschöpfungsorientiert und produktivitätsverbessernd	187
Georg Steger	

- Leseprobe -

Autorenverzeichnis

Fazel Ansari

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Universitätsprofessor
 Leiter der Forschungsgruppe Produktions- und Instandhaltungsmanagement
 Institut für Managementwissenschaften, Technische Universität Wien
 Fraunhofer Austria Research GmbH
 Wien, Österreich

Kirsty Bettinger

MAv, MSc, CBP, CMgr MCMI, Managing Director
 Celairion GmbH
 Bruck an der Leitha, Österreich

Hubert Biedermann

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

Andreas Buchner

Dipl.-Ing., MSc, Produktionsleitung Werk Lienz
 Liebherr-Hausgeräte Lienz GmbH
 Lienz, Österreich

David Kiklhorn

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

Clemens Kirner

Mag., CEO
 Insider Navigation Inc.
 Wien, Österreich

Boris Kozlowski

Dr., Standortleiter
 Capgemini Deutschland GmbH
 München, Deutschland

Wolfgang Kriegner

DI, Techn. Geschäftsführer Polen und Rumänien
 voestalpine Steel Service Center Polska Sp. z o.o.
 Tychy, Polen

Anna-Theresa Kundmüller

B. Eng., Spezialist Maintenance
 Schaeffler Technologies AG & Co. KG
 Herzogenaurach, Deutschland

Robin Kühnast-Benedikt

Dipl.-Ing., Dr.mont., Service Delivery Manager
 Capgemini Deutschland GmbH
 München, Deutschland

Harald Leitenmüller

Dipl.-Ing., Chief Technology Officer
 Microsoft Österreich GmbH
 Wien, Österreich

Markus Molls

Dr.-Ing., Teamleitung Instandhaltung Stranggießanlagen
 Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH
 Duisburg, Deutschland

Stefan Mutschlechner

Ing., Leitung Maintenance Werk Lienz
 Liebherr-Hausgeräte Lienz GmbH
 Lienz, Österreich

Rolf Piana

Ing., Leiter Instandhaltung Sortierung Schweiz
 Post CH AG
 Härringen, Schweiz

Lukas Rapp

BA, ARS, Airworthiness Review Staff
 Celairion GmbH
 Bruck an der Leitha, Österreich

Benjamin Schwärzler

MSc., CEO
 Workheld GmbH
 Wien, Österreich

Umutcan Serles

Dr., Senior Research Scientist
 Onlim GmbH
 Wien, Österreich

Georg Steger

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

Andreas Steiner

Dipl.-Ing., BSc, Wissenschaftlicher Mitarbeiter
 Institut für Managementwissenschaften, Technische Universität Wien
 Celairion GmbH
 Wien, Österreich

Frank Stopa

Dr.-Ing., Leiter Fertigung Anlagenkomponenten
 Hüttenwerke Krupp Mannesmann GmbH
 Duisburg, Deutschland

Ioan Toma

Dr., Chief AI Officer
 Onlim GmbH
 Wien, Österreich

Miloš Tučović

Dipl.-Ing., BSc, Projektmitarbeiter ÖVIA
 Österreichische Vereinigung für Instandhaltung und Anlagenwirtschaft
 Leoben, Österreich

Alexander Wahler

Dipl.-Ing., CEO
 Onlim GmbH
 Wien, Österreich

Michael Wolny

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

Innovationen im normativen, strategischen und operativen Instandhaltungsmanagement

Hubert Biedermann

Die letzten zehn bis fünfzehn Jahre haben das Instandhaltungsmanagement grundlegend neu definiert. Von einer primär technikfokussierten, reaktiven Funktion entwickelte es sich zu einem strategischen Werttreiber, der maßgeblich zum Unternehmenserfolg beiträgt. Diese Entwicklung resultiert aus zunehmender industrieller Komplexität, globalen Lieferkettenstörungen, verschärften Nachhaltigkeitsanforderungen und rasanten technologischen Fortschritten. Normative Rahmenbedingungen wurden angepasst, um Resilienz und Nachhaltigkeit stärker zu betonen. Strategische Ansätze wurden proaktiver und datengesteuerter. Operationale Praktiken wurden durch Industrie 4.0-Technologien revolutioniert. Trotz signifikanter Fortschritte bestehen weiterhin Herausforderungen wie Fachkräftemangel, Cybersicherheitsrisiken und die Integration von Altsystemen. Der vorliegende Bericht beleuchtet diese Entwicklungen detailliert und bietet Empfehlungen für eine zukunftsorientierte Instandhaltung.

1 Die Veränderungen und Entwicklungen im Instandhaltungsmanagement

Das Instandhaltungsmanagement (IM) wandelte sich in der letzten Dekade von einer technikzentrierten Dienstleistung mit Kostenfokus zu einer entscheidenden strategischen Funktion für den Unternehmenserfolg. Dies wird durch folgende Faktoren vorangetrieben: zunehmende Komplexität industrieller Anlagen bei hohem Flexibilitätspotenzial, Anfälligkeit globaler Lieferketten, wachsende Anforderungen an ökologische Nachhaltigkeit und schnelle Einführung digitaler Technologien.

Das moderne IM – eigentlich Asset-Management (AM) – verfolgt das übergeordnete Ziel, optimale Anlagenverfügbarkeit und -zuverlässigkeit über den gesamten Lebenszyklus zu geringstmöglichen Kosten zu gewährleisten. Dies umfasst die Sicherstellung der Betriebs- und Arbeitssicherheit, Reduzierung von Maschinenausfällen, Verlängerung der Nutzungs- und Lebensdauer von Investitionsgütern (assets¹), Optimierung von Prozessen und Arbeitsabläufen sowie kontinuierliche Verbesserung der Gesamtanlageneffektivität (OEE – Overall Equipment Efficiency). Das weiterentwickelte IM priorisiert die Verlängerung der Lebensdauer von Anlagen bei minimalen Ausfallzeiten und Kosten. Effektives AM ist entscheidend für die Verbesserung der Betriebseffizienz, Sicherheit und Langlebigkeit von Anlagen in vielen Branchen; von der Produktion über Energie- und Medienversorgung bis hin zu Gesundheitswesen und Logistik. Dies erfordert einen ganzheitlichen und integrierten Ansatz über normative, strategische und operative Dimensionen hinweg und verfolgt die teils konkurrierenden Ziele der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension des Wirtschafts.² Zur Implementierung des ressourcenschonend orientierten AM ist die duale

¹ Die ISO 55 000 (2014) S.2: definiert das Asset als „ein Element, ein Gegenstand oder eine Einheit, dass (der) (die) einen möglichen oder tatsächlichen Wert für eine Organisation besitzt. Dieser Wert variiert zwischen verschiedenen Organisationen und ihren Standorten und kann materieller oder immaterieller Art, finanzieller oder nicht finanzieller Art sein.“

² Vgl. Biedermann, H. (2022): S. 15 ff

Ausrichtung der Lean Smart Maintenance Philosophie (LSM³) zweckmäßig, da diese neben der Ausfallvermeidung und Ressourcenerhaltung (Effektivitätsdimension – Smart-Ausrichtung) die Leistungsrationalisierung der Instandhaltung und Ökoeffizienz der Anlage (Effizienzdimension – Lean-Ausrichtung) fokussiert.⁴

2 Normative Entwicklungen: Standards und regulatorische Rahmenbedingungen

Die letzten Jahre waren einerseits geprägt durch den zunehmenden Fokus des Managements auf die normativ-kulturelle Ebene der Instandhaltung und andererseits von einer dynamischen Anpassung normativer Rahmenbedingungen, die das IM auf nationaler und internationaler Ebene beeinflussen. Diese Entwicklungen spiegeln ein wachsendes Bewusstsein für die Bedeutung von AM, Nachhaltigkeit und Resilienz wider.

2.1 Aktualisierungen internationaler Standards (z.B. ISO 55000-Reihe, ISO 9001/14001/45001-Revisionen)

Die International Organization for Standardization (ISO) hat ihre Kernstandards im Bereich Asset Management und Managementsysteme umfassend aktualisiert oder deren Revisionen eingeleitet. Die "Kern"-Dokumente der ISO 55000-Reihe, ISO 55000 und ISO 55001, wurden 2024 aktualisiert, während ISO 55002 bereits 2020 eine Überarbeitung erfuhr⁵. Ergänzend wurden 2024 neue Standards wie ISO 55011, ISO 55012 und ISO 55013 veröffentlicht. Diese Standards bieten einen Überblick über Prinzipien, Konzepte und die Terminologie des AM und legen die Anforderungen für Einrichtung, Implementierung, Aufrechterhaltung und Verbesserung eines "Managementsystems für Asset Management" fest. Sie konzentrieren sich darauf, die Managementelemente zu beschreiben, die zum lebenszyklusorientierten Management von Assets vorhanden sein müssen.⁶

Parallel dazu werden die wichtigen Managementsystem-Standards ISO 9001 (Qualitätsmanagement), ISO 14001 (Umweltmanagement) und ISO 45001 (Arbeits- und Gesundheitsschutzmanagement) überarbeitet⁷. Die Diskussionen für diese Aktualisierungen konzentrieren sich verstärkt auf Risikomanagement, Resilienz und die Integration von Überlegungen zur digitalen Transformation sowie einen stärkeren Fokus auf Nachhaltigkeit und Lieferkettenmanagement.

Die gleichzeitigen Aktualisierungen der ISO 55000-Reihe und die Revisionen der ISO 9001, 14001 und 45001 zeigen eine konzertierte globale Anstrengung zur Harmonisierung von

³ Vgl. Biedermann, H.; Kinz, A. (2021) S. 112 ff.

⁴ Vgl. Biedermann, H. (2022) S. 19 f.

⁵ Vgl. <https://www.assetivity.com.au/articles/asset-management/implementing-iso-55000-what-is-iso-55000/>

⁶ Zu den Kernelementen eines ISO 55000 Managementsystems gehören der organisatorische Kontext, Führung, Planung, Unterstützung, Betrieb, Leistungsbewertung und Verbesserung. ISO 55010 bietet Leitlinien zur Abstimmung finanzieller und nicht-finanzieller Aspekte des Asset Managements, einschließlich IT-Systemen und Finanzplanung. ISO 55011:2024 befasst sich mit dem "ermöglichen Umfeld für Asset Management" und öffentlichen Politikmaßnahmen, während ISO 55012 die Einbindung und Kompetenzen von Personen fördert und ISO 55013 Leitlinien für das Datenmanagement im Kontext des Asset Managements bereitstellt

⁷ Die Veröffentlichung der revidierten ISO 9001 und ISO 14001 wird für 2026 erwartet, mit Entwurfsversionen, die Mitte 2025 bzw. Anfang 2025 zur Verfügung stehen sollen. Die Revision von ISO 45001 ist ebenfalls in Arbeit und wird voraussichtlich 2027 veröffentlicht. Für ISO 45001:2025 wird ein stärkerer Schwerpunkt auf psychische Gesundheit und Wohlbefinden am Arbeitsplatz erwartet

Managementsystemstandards. Dies deutet auf einen strategischen Schritt hin zu integrierten Governance-Rahmenwerken, bei denen AM nicht als isolierte Funktion, sondern tief mit Qualitäts-, Umwelt- und Sicherheitsmanagement verknüpft ist. Globale Herausforderungen wie Klimawandel, Volatilität der Lieferketten und das Wohlbefinden der Belegschaft erfordern robustere und anpassungsfähigere Organisationspraktiken. Das bedeutet, dass Unternehmen einen ganzheitlicheren und stärker vernetzten Ansatz für Compliance und operative Exzellenz verfolgen müssen. Für die Instandhaltung ist dies von herausragender Bedeutung: Sie ist nicht mehr nur eine technisch-organisatorische Abteilung, sondern ein wichtiger Akteur bei der Gewährleistung der gesamten organisationalen Resilienz, Compliance und Nachhaltigkeit, was eine Änderung der Denkweise und integrierte Datenstrategien erfordert.

2.2 Europäische Standards und Richtlinien (z.B. EN 17948, Ökodesign-Verordnung, Richtlinie zur Resilienz kritischer Entitäten)

Auf europäischer Ebene gab es bedeutende normative Entwicklungen, die das IM beeinflussen werden. Das Dokument EN 17948:2024, das "Instandhaltungsmanagement und -funktionen" spezifiziert, legt den wesentlichen Inhalt und die Haupttätigkeiten des IM fest. Es ist anwendbar für Instandhaltungs- und Asset - Management im Industriesektor sowie für Infrastruktur und Gebäude. Die Definition von IM umfasst dabei "alle Managementaktivitäten, die die Instandhaltungsanforderungen, -ziele, -strategien und -verantwortlichkeiten festlegen und deren Umsetzung durch Mittel wie Instandhaltungsplanung, Instandhaltungssteuerung und die Verbesserung von Instandhaltungsaktivitäten und -wirtschaftlichkeit"⁸ ermöglichen.

Die Mitte 2024 veröffentlichte Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (ESPR)⁹ schafft einen Rahmen für die Festlegung von Ökodesignanforderungen, um Produkte langlebig, zuverlässig, wiederverwendbar und reparierbar zu machen. Ziel ist es, den Verbrauch neuer Produkte und damit den Rohstoffeinsatz zu minimieren. Die im Oktober 2024 in Kraft getretene Richtlinie zur Resilienz kritischer Entitäten (CER-Richtlinie) verpflichtet die EU-Mitgliedstaaten, Risikobewertungen für wesentliche Dienstleistungen durchzuführen und kritische Entitäten bis Juli 2026 zu identifizieren. Gegebenenfalls kann auch diese Richtlinie das jeweilige Unternehmen zwingen diese Bewertungen durchzuführen.

Ein weiteres relevantes Dokument ist das CEN Workshop Agreement (CWA 18188:2025¹⁰), das Anforderungen an eine Methodik zur Implementierung von Projekten für Energiemanagement und nachhaltige Fertigung (EMSM)¹¹ in Industrieunternehmen festlegt. Es betont die effiziente Nutzung begrenzter Ressourcen, die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und den Kampf gegen den Klimawandel, wobei die Auswirkungen auf Instandhaltung, Betrieb und das Ende der Nutzungsdauer von Anlagen berücksichtigt werden müssen.

Die europäischen Vorschriften gehen über traditionelle Sicherheits- und Leistungsstandards hinaus und verankern Nachhaltigkeit und Resilienz tief in Produktdesign und Betriebsmanagement. Dies bedeutet, dass das IM nicht mehr nur für die Anlagenverfügbarkeit verantwortlich ist, sondern direkt zur Kreislaufwirtschaft (Instandhaltbarkeit, Abfallreduzierung) beitragen und die kontinuierliche, ungehinderte Bereitstellung wesentlicher Dienstleistungen angesichts vielfältiger Risiken gewährleisten muss. Die rechtlichen und

⁸ EN 17984 (2025) S. 6.

⁹ Ecodesign vor Sustainable Products Regulation (ESPR)

¹⁰ CWA 18188 (2025) S. 10 ff.

¹¹ Energy Management and Sustainable Manufacturing (EMSM)

reputationsbezogenen Risiken, die mit der Nichteinhaltung verbunden sind, nehmen zu, was einen proaktiven und integrierten Instandhaltungsansatz erforderlich macht, der Umwelt- und soziale Auswirkungen berücksichtigt.¹²

Für die Instandhaltung bedeutet dies eine verstärkte Berücksichtigung von Design für Instandhaltbarkeit (Wartung, Inspektion und Instandsetzung), die Notwendigkeit detaillierter Wartungs- und Reparaturhistorien für digitale Produktpässe, die Integration von Resilienzmaßnahmen in Instandhaltungsstrategien und die Messung der Instandhaltungsleistung anhand von Nachhaltigkeits-KPIs (z.B. Energieeffizienz, Abfallreduzierung). Dies hebt die Instandhaltungsfunktion zu einem strategischen Faktor von Corporate Social Responsibility und der Realisierung von Wettbewerbsvorteilen hervor. Siehe hierzu zusammenfassend Tabelle 1.

Tabelle 1: Wichtige normative Aktualisierungen (2020-2025) und ihre Implikationen

Standard/Richtlinie	Veröffentlichungs-/Geltungsdatum	Hauptfokus/Änderungen	Implikationen für das IM
ISO 55000:2024 Serie	2024 (Kern), 2020 (55002), 2024 (Neu)	Management-System für Asset Management; Prinzipien, Konzepte, Terminologie; Ausrichtung Finanz/Nicht-Finanz; Einbindung Personal; Datenmanagement.	Ganzheitliche Betrachtung des Asset-Lebenszyklus; Verbesserte Datenerfassung und -berichterstattung; Stärkere Integration von Finanz- und IT-Aspekten; Fokus auf Personalentwicklung und Datenqualität.
ISO 9001/14001/45001	Erwartet 2026/2027 (Entwürfe 2025)	Verbesserter Fokus auf Risikomanagement, Resilienz, Nachhaltigkeit, digitale Transformation; Betonung psychischer Gesundheit (ISO 45001).	Integration von Instandhaltung in umfassendere Qualitäts-, Umwelt- und Sicherheitsmanagementsysteme; Berücksichtigung von Resilienz und Nachhaltigkeit in Wartungsstrategien; Anpassung an neue digitale Anforderungen.

¹² Die treibende Kraft hinter dieser Entwicklung ist die strategische Agenda der EU für einen "grünen, digitalen und widerstandsfähigen Binnenmarkt". Dies führt zu Vorschriften, die Unternehmen zwingen, Umwelt- und Sozialkosten zu internalisieren und die Verantwortung für das Produktlebenszyklusmanagement und die Risikominderung auf Hersteller und Betreiber zu verlagern.

Standard/Richtlinie	Veröffentlichungs-/Geltungsdatum	Hauptfokus/Änderungen	Implikationen für das IM
EN 17948:2025	2025	Spezifikation von Instandhaltungs-managementinhalten und -aktivitäten; Definition von Zielen, Strategien und Verantwortlichkeiten.	Klare Richtlinien für Instandhaltungs- und Asset Management; Betonung der Rolle der Instandhaltung bei der Erreichung von Unternehmenserfolgsfaktoren.
Ökodesign-Verordnung (ESPR)	Mitte 2024 (Veröffentlichung), ab Juni 2025 (spezifische Regeln)	Rahmen für nachhaltige Produkte (langlebig, reparierbar, wiederverwendbar); Digitaler Produktpass; Verbot der Zerstörung unverkaufter Produkte.	Notwendigkeit, Produkte für Wartbarkeit und Reparierbarkeit zu gestalten; Erfassung und Bereitstellung detaillierter Wartungshistorien; Beitrag zur Kreislaufwirtschaft durch Reparatur und Wiederverwendung.
CER-Richtlinie	Oktober 2024 (Inkrafttreten)	Risikobewertungen für wesentliche Dienste; Identifizierung kritischer Entitäten; resilienzfördernde Maßnahmen gegen alle Gefahren.	Entwicklung von Instandhaltungsstrategien, die die Resilienz kritischer Anlagen gegenüber vielfältigen Risiken erhöhen; Integration von Instandhaltung in Notfall- und Business-Continuity-Pläne.
CWA 18188:2025	2025	Methodik für Energiemanagement und nachhaltige Fertigung (EMSM); Fokus auf Ressourceneffizienz und Klimaschutz.	Direkte Verantwortung der Instandhaltung für Energieeffizienz und CO2-Reduktion; Berücksichtigung von Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus von Anlagen.

Standard/Richtlinie	Veröffentlichungs-/Geltungsdatum	Hauptfokus/Änderungen	Implikationen für das IM
DIN EN 12845:2020, DIN 14675:2020	November 2020, Januar 2020	Aktualisierte Sicherheitsstandards für Brandbekämpfungs- und Brandmeldeanlagen.	Kontinuierliche Anpassung der Instandhaltungspraktiken an aktuelle Sicherheitsvorschriften; Sicherstellung der Compliance und Risikominimierung.

3 Strategische Evolution: Neudeinition der Instandhaltungsstrategie

Die strategische Ausrichtung des Instandhaltungsmanagements hat sich in den letzten Jahren grundlegend gewandelt. Der Fokus liegt nun verstärkt auf proaktiven, datengesteuerten Konzepten, die Nachhaltigkeit integrieren und die Anlagenleistung ganzheitlich optimieren.

3.1 Verlagerung hin zu proaktiven und präskriptiven Instandhaltungsstrategien

Die Industrie hat sich deutlich von der *reaktiven* Instandhaltung (Run-to-Failure), die Probleme erst nach einem Ausfall behebt, hin zu proaktiveren Ansätzen bewegt. Reaktive Instandhaltung ist heute primär für weniger kritische Anlagen allerdings zumeist die adäquate Vorgangsweise.

Die *vorbeugende* Instandhaltung (Preventive Maintenance, PM) beinhaltet geplanten Teiletausch und Wartungen, um Verschleiß zu verhindern und die gewünschte Verfügbarkeit von Anlagen zu erhalten. Sie orientiert sich an festen zeitlichen Abständen oder an der produzierten Menge. Diese Strategie ist in der betrieblichen Praxis noch sehr weit verbreitet; allerdings als eine sehr kostenintensive und zumeist nicht wirtschaftliche Strategie.

Die *zustandsorientierte* Instandhaltung (Condition-Based Maintenance, CBM) nutzt Sensoren, um kontinuierlich Daten über den Zustand von Anlagen (z.B. Vibration, Temperatur, Ölqualität) zu sammeln und potenzielle Defekte frühzeitig zu erkennen.

Die *vorausschauende* Instandhaltung (Predictive Maintenance, PdM) ist eine Form der CBM, die Zustandsüberwachungsdaten mit Analysesoftware (KI/ML) kombiniert, um vorherzusagen, wann eine vorbeugende Instandsetzung durchgeführt wird. Dies ermöglicht eine proaktive und optimierte Planung. Die Vorteile umfassen eine Reduzierung ungeplanter Ausfallzeiten, niedrigere Fehlerraten und einen geringeren Anstieg des Ersatzteilbestands.¹³

Die *präskriptive* Instandhaltung (Prescriptive Maintenance, RxM) stellt die höchste Reifestufe in der geplanten Instandhaltungsstrategie dar. Sie geht über die Vorhersage hinaus, indem sie konkrete Maßnahmen zur Verhinderung oder der Beseitigung von Ausfällen

¹³ Detaillierte Informationen hierzu unter: Biedermann, H. (2018) S. 25 ff.

empfiehlt. Sie nutzt KI, IoT und Big Data, um umsetzbare Erkenntnisse zu generieren, die die Ressourcenzuweisung optimieren und die Lebensdauer von Anlagen verlängern. RxM bietet prinzipiell detaillierte Ursachenanalysen und eine verbesserte Entscheidungsunterstützung.

Die weitreichende Einführung von Technologien der Industrie 4.0 (IoT, KI, ML) ist der primäre Wegbereiter für die Verlagerung von reaktiver zu proaktiver und präskriptiver Instandhaltung. Sensoren liefern die Daten, KI/ML-Algorithmen verarbeiten sie zu Erkenntnissen, und fortschrittliche Software (CMMS, APM) erleichtert die optimierte Planung und Ausführung. Dies schafft eine positive Rückkopplung, bei dem Technologie anspruchsvollere Strategien ermöglicht, die wiederum erhebliche operative und finanzielle Vorteile mit sich bringen, was weitere Technologieinvestitionen verstärkt. Die Verfügbarkeit und der geringere Investitionsaufwand von IoT-Sensoren, leistungsstarken KI/ML-Algorithmen und robusten Datenanalyseplattformen (Technologien der Industrie 4.0) machen die präskriptive und vorausschauende Instandhaltung praktikabel und effektiv. Voraussetzung zur präzisen Vorhersage sind Echtzeitdaten von Sensoren und Steuerungen. Die Auswirkungen können neben reduzierten Ausfallzeiten und damit Kosteneinsparungen, verlängerte Lebensdauer von Anlagen sein. Diese Vorteile treiben weitere Investitionen in diese Technologien voran. Dies impliziert zusätzlich eine Verschiebung der rein mechanischen zu dateninterpretierenden und technologieinteraktiven Fähigkeiten des Instandhaltungspersonals.

3.2 Integration von Nachhaltigkeits- und Kreislaufwirtschaftsprinzipien

Die Ziele des AM werden vermehrt auf Ressourceneffizienz und -schonung ausgerichtet. Dazu gehören Konzepte der Kreislaufwirtschaft, wie Instandsetzung und Wiederverwendung von Komponenten zur Abfallreduzierung, kohlenstoffneutrale Operationen durch den Einsatz emissionsarmer Werkzeuge und die Verfolgung des CO₂-Fußabdrucks sowie intelligentes Energiemanagement, das erneuerbare Energiequellen mit der Anlageninstandhaltung integriert. Wie erwähnt fördern regulatorische Elemente explizit Langlebigkeit, Reparierbarkeit und effiziente Ressourcennutzung, was die Instandhaltungstechniken direkt beeinflusst.

Nachhaltigkeitsorientierte Instandhaltung verlängert die Lebensdauer von Anlagen, positioniert Organisationen als Vorreiter in verantwortungsvoller Produktion und liefert sowohl Kosteneinsparungen als auch Umweltvorteile. Die Integration von Nachhaltigkeit in die strategische Instandhaltung ist nicht nur eine Compliance-Verpflichtung, sondern ein Wettbewerbsvorteil und ein Treiber für langfristige Wertschöpfung. Dies signalisiert eine Abkehr von einer rein kostenorientierten Betrachtung der Instandhaltung hin zu einer, die Umwelt-, Sozial- und Governance-Faktoren (ESG)¹⁴ einbezieht. Instandhaltungsentscheidungen beeinflussen nun direkt den CO₂-Fußabdruck einer Organisation, die Ressourceneffizienz und das öffentliche Image. Dies erfordert eine Neubewertung des Anlagenlebenszyklusmanagements aus einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsperspektive.

Über Kosteneinsparungen hinaus sind die Steigerung der Markenreputation, die Minderung regulatorischer Risiken und die Gewinnung von umweltbewussten Investoren und Kunden das Ziel. Der Wert der Instandhaltung wird neu definiert, um neben wirtschaftlichen, ökologischen und soziale Vorteile einzuschließen. Dies erfordert neue Leistungsindikatoren (z.B.

¹⁴ ESG: Environmental, Social, Governance

CO₂-Fußabdruckreduzierung, Materialrecyclingquoten etc.) und eine tiefere Zusammenarbeit zwischen Instandhaltung, Beschaffung, Engineering und Nachhaltigkeitsabteilungen.

3.3 Entwicklung und Einführung von Asset Performance Management (APM)-Frameworks

APM-Frameworks werden zunehmend eingesetzt, um die Anlagenleistung, -gesundheit und -risiken zu optimieren, indem die Leistung jeder Anlage mit den Kosten und der Risikobelastung abgewogen wird. Es gilt, den Wert zu maximieren, die Instandhaltungskosten zu senken und die Anlagenverfügbarkeit zu erhöhen. APM nutzt IoT-Sensordaten, Instandhaltungsaufzeichnungen, KI und technische Simulationen, um das Anlagenverhalten aus der Ferne zu überwachen und Erkenntnisse zu gewinnen. Es hilft, IT/OT¹⁵-Daten in einer einzigen Ansicht zu kontextualisieren, um fundierte Entscheidungen zu treffen. APM integriert bewährte Zuverlässigkeitssmethoden wie die Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA) in die zuverlässigkeitsoorientierte Instandhaltung (RCM). APM ist eng auf den Säulen des Smart Manufacturing abgestimmt und konzentriert sich auf die Vernetzung von Daten, die Automatisierung von Warnmeldungen, die Verfolgung von Trends und die Analyse der Leistung anhand von KPIs.¹⁶

APM-Frameworks bieten die Struktur und die Tools (wie SAP APM¹⁷, Plex APM¹⁸), um diese Daten zu interpretieren. Dies ermöglicht Organisationen, über die einfache Überwachung hinaus zur echten Optimierung überzugehen. Dies ist ein weiterer Baustein zum strategischen Asset-Management. Es unterstützt proaktive, datengestützte Entscheidungen über Anlageninvestitionen, -veräußerungen und das gesamte Lebenszyklusmanagement verbunden mit einer langfristigen Rentabilitätssteigerung. Dies erfordert eine Änderung des organisationalen Denkens, bei der Instandhaltungserkenntnisse direkt in die strategische Planung auf Führungsebene einfließen.

3.4 Datengetriebene Entscheidungsfindung in der strategischen Instandhaltungsplanung

Die datengestützte Entscheidungsfindung bildet die Grundlage für ein effektives IM und umfasst:

- Sammlung präziser und relevanter Daten (aus Anlagenzuständen, Wartungshistorien, Energieverbrauchsmetriken),
- Implementierung fortschrittlicher Analysetools (prädiktive Modelle),
- Integration von Daten über verschiedene Systeme hinweg (zur Überwindung von Datensilos),
- Erstellung datengesteuerter Vorhersagen sowie
- kontinuierliche Überwachung und Anpassung.

Technologie, Daten und digitale Fähigkeiten werden zunehmend zu Differenzierungsmerkmalen. Die Herausforderungen bestehen darin, dass viele Unternehmen sich in der Planungs-

¹⁵ OT: Operational Technology d.h. Betriebstechnik

¹⁶ Vgl. Campos, J. et.al (2017): S.146 f

¹⁷ SAP Asset Performance Management

¹⁸ Plex Asset Performance Management

und Experimentierphase mit KI - Analysen befinden und in sehr geringem Ausmaß anwenden. Datenqualität, -konsistenz und -governance sind hierbei zusätzliche kritische Punkte.

Die Verlagerung hin zu datengesteuerten Entscheidungen in der Instandhaltung ist eine direkte Folge des zunehmenden Volumens und der Komplexität der Betriebsdaten, die von vernetzten Anlagen (IoT) generiert werden. Die Fähigkeit, diese "Big Data" mit KI/ML-Tools zu sammeln, zu verarbeiten und zu analysieren, verwandelt Daten in umsetzbare Intelligenz. Diese ist entscheidend für die Optimierung von Instandhaltungsstrategien, da sie den Übergang von zeitgesteuerten oder reaktiven Ansätzen zu präziseren, zustandsbasierten und prädiktiven Interventionen ermöglicht und so den Anlagenwert maximiert und Kosten minimiert.

Das strategische Gebot ist der Aufbau einer "datengesteuerten Kultur", in der Erkenntnisse aus Instandhaltungsdaten in umfassendere Geschäftsziele und Wettbewerbsvorteile einfließen.

4 Operationale Fortschritte: Technologien und Methoden

Die operativen Aspekte des Instandhaltungsmanagements werden durch eine Reihe von Technologien und Methoden der Industrie 4.0 transformiert die Effizienz, Präzision und Reaktionsfähigkeit erheblich verbessern können¹⁹.

4.1 Auswirkungen von Industrie 4.0-Technologien (IoT, KI, Maschinelles Lernen, Digitale Zwillinge, AR/VR)

Das Internet der Dinge (IoT), Künstliche Intelligenz (KI) und Maschinelles Lernen (ML) sind zentrale Wegbereiter für die intelligente Instandhaltung. IoT-Sensoren sammeln Echtzeitdaten über den Anlagenzustand (Temperatur, Vibration, Ölqualität, Fehlercodes). KI/ML-Algorithmen analysieren diese Daten, um Ausfälle vorherzusagen, Instandhaltungspläne zu optimieren und die Entscheidungsfindung zu verbessern. Dies führt zu Kosteneinsparungen und Effizienzsteigerungen durch Minimierung ungeplanter Ausfallzeiten und optimierten Ressourceneinsatz.

Digitale Zwillinge ermöglichen Echtzeitüberwachung, Simulation, Szenarioplanung und Risikominderung ohne physische Eingriffe. Unternehmen, die digitale Zwillinge nutzen, berichten von Produktivitätssteigerungen, einer Verbesserung des Materialausbringens und einer Verringerung von Produktionsqualitätsproblemen.²⁰

Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) sind immersive Technologien, die die Instandhaltungsschulung und Maßnahmenausführung verändern können. AR-Tools bieten u.a. Echtzeit-Einblendungen von Anlagenschemata; ermöglichen hilfreiche Szenarien zur Kompetenzentwicklung und Fehlerbehebung ohne den Produktionsbetrieb zu unterbrechen. AR-Brillen erlauben den freihändigen Betrieb, Videotelefonie für die Fernunterstützung, interaktive Diagnosen und digitale Dokumentation; dies kann teilweise zu deutlichen Kapazitätsentlastungen von Instandhaltungsmitarbeitern für den erweiterten Aufgabenbereich, führen.

¹⁹ Weiterführende Informationen hierzu unter Biedermann, H. (2023) S. 18 ff.

²⁰ Vgl. Deuse, J.; Barthelmey, A. (2021) S. 243 ff.

Werden diese Technologien kombiniert und einander ergänzend eingesetzt, entfalten diese ein zusätzliches Synergiepotenzial. IoT generiert die Rohdaten, KI/ML verarbeitet sie zu umsetzbaren Erkenntnissen, digitale Zwillinge können eine virtuelle Umgebung für Simulation und Optimierung auf der Grundlage dieser Erkenntnisse liefern. Letztendlich ermöglichen AR/VR menschliche Techniker mit Echtzeitinformationen und Fernunterstützung durch Experten zu unterstützen. Das Potenzial liegt in ihrer synergetischen Integration, die zu "einheitlichen digitalen Plattformen" und "intelligenten Workflows" führt. Letztendlich erfordert dies eine umfassende digitale Strategie, die zu einem leistungsstarken, integrierten "Smart Maintenance"-System führt. Eine derartige Digitalisierungs-Roadmap erfordert eine funktionsübergreifende Zusammenarbeit zwischen IT, OT und der Instandhaltung bzw. dem Asset-Management.²¹

4.2 Verbesserungen im computergestützten Instandhaltungsmanagementsystemen (CMMS)

CMMS sind die absolute Basis für ein effektives Instandhaltungsmanagement. Sie zentralisieren Anlagendaten, Arbeitsaufträge und präventive Instandhaltungspläne; bieten Echtzeitinformationen, optimieren die Arbeitsauftragsverwaltung und generieren zahlreiche Berichte für verbesserte Abläufe. Weiters ermöglichen sie ein effizientes Ersatzteilmanagement. Vermehrt können auch Planungsaufgaben automatisiert und rechtskonforme-Aufzeichnungen gespeichert werden.

Workflow-Automatisierung umfasst die Digitalisierung durch Identifizierung, Standardisierung und Automatisierung routinemäßiger Aufgaben und ermöglicht neben einer erhöhten Produktivität (durch Konzentration auf höherwertige Arbeiten), klaren Aufgabenzuweisung und verbesserter Qualitätskontrolle, minimierte menschliche Fehler und eine höhere Arbeitszufriedenheit. Die Fortschritte bei CMMS und Workflow-Automatisierung zielen darauf ab, bestehende Prozesse neu zu gestalten und zu optimieren. Ein noch weitgehend ungenutztes Feld ist die Integration von KI in CMMS. Diese könnte zu einer intelligenten Planung und Ressourcenzuweisung führen. Die Automatisierung zielt darauf ab, dynamische und resiliente Operationen zu schaffen, die die operative Agilität steigert.

4.3 Einführung von Lean- und Smart-Methoden in Instandhaltungsoperationen

Lean Maintenance ist in der Lean Manufacturing-Philosophie verwurzelt und zielt darauf ab, die Gesamtanlageneffektivität (OEE) zu maximieren, indem Verschwendungen (Muda) in Instandhaltungsprozessen identifiziert und eliminiert wird. Zu den Schlüsselprinzipien gehören 5S (Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin) für die Arbeitsplatzorganisation, Total Productive Maintenance (TPM) für kollektive Verantwortung und kontinuierliche Verbesserung (Null Fehler, Null Ausfälle, Null Unfälle), Schwachstellenanalyse und kontinuierliche Verbesserung (KVP). Die Vorteile umfassen die Reduzierung ungeplanter Stillstände, die Möglichkeit, Wartungsarbeiten in Nicht-Produktionszeiten zu planen, die Reduzierung von Lagerbeständen und die Verbesserung der Sicherheit.

²¹ weiterführende Literatur hierzu unter Dankl, A. (2022): Seite 227 ff.

Das Konzept von LSM ist als Höhepunkt einer evolutionären Entwicklung in der Instandhaltungsphilosophie zu verstehen. Es vereint strategisch zwei entscheidende Perspektiven: "Lean" und "Smart".²² Siehe hierzu Abb. 1.



Abbildung 1: Elementare Lean Smart Maintenance – Bausteine²³

Der "Lean"-Aspekt von LSM konzentriert sich wie vorstehend dargelegt, auf Effizienz und die Reduzierung von Verlusten auf der Eingangsseite des Instandhaltungsmanagementsystems, wobei Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit im Vordergrund stehen. Die "Smart"-Komponente repräsentiert die Effektivitätsperspektive und steht für ein intelligentes und lernendes Instandhaltungsmanagement, das sich auf kontinuierliche Verbesserung und dynamische Strategieanpassung konzentriert. Es vollzieht einen Wandel von einer klassischen kostenorientierten Input-Steuerung hin zu einer Output-Steuerung, die sich an Wertschöpfungsbeiträgen und Schlüsselkennzahlen wie Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) orientiert. Diese "smarte" Dimension wird maßgeblich durch Technologien der Industrie 4.0 ermöglicht.

4.4 Rolle von Robotik und Automatisierung bei der Instandhaltungsausführung

Der Markt für kollaborative Roboter (Cobots) wird voraussichtlich 2025 ein Volumen von 12,1 Milliarden US-Dollar erreichen, was einem jährlichen Wachstum von 50,1% seit 2020 entspricht und eine tiefgreifende Umgestaltung der Instandhaltungs- und Reparaturbranche ankündigt.²⁴ Robotik und Automatisierung entwickeln sich über einfache, sich wiederholende Aufgaben hinaus zu komplexeren, intelligenten Instandhaltungsfunktionen,

²² Vgl. Biedermann, H.; Kinz, A. (2021) S. 111 ff.

²³ Vgl. Biedermann, H. (2021) S. 17

²⁴ Vgl.: Collaborative Robots and the Future of Electronic and Precision Equipment Repair & Maintenance, Zugriff am 28.07.2025

insbesondere in gefährlichen oder schwer zugänglichen Umgebungen. Dieser Trend wird durch den Bedarf an erhöhter Sicherheit und gesteigerter Effizienz in risikoreichen Industrien vorangetrieben. Das schnelle Wachstum des Cobot-Marktes deutet auf eine Zukunft hin, in der die Mensch-Roboter-Kollaboration Standard ist und eine signifikante Verschiebung der Arbeitsplatzfähigkeiten hin zu Programmierung, Überwachung und Management automatisierter Systeme nach sich zieht. Die Nachfrage nach höheren Sicherheitsstandards und Effizienz, gepaart mit der technologischen Reifung, beschleunigt die Einführung von Robotik in der Instandhaltung. Dies schafft einen erheblichen Bedarf an qualifizierten Technikern, insbesondere mit Mechatronik-Kenntnissen. Siehe hierzu zusammenfassend Tabelle 2.

Tabelle 2: Wichtige operationale Technologien und Methoden und ihre Vorteile

Technologie/Methode	Kernfunktionalität Beschreibung	Hauptvorteile	Beispiele/Anwendungen
Predictive Maintenance (PdM)	Nutzung von Sensordaten und KI/ML zur Vorhersage von Anlagenausfällen und Optimierung von Instandhaltungszeitpunkten.	Reduzierte ungeplante Ausfallzeiten, geringere Fehlerraten, reduzierte Instandhaltungskosten.	ArcelorMittal (Stahlwerk-Uptime durch ML), ZF Friedrichshafen (Ausfallprognose), Trenitalia (Zugwartung durch IoT/KI).
Prescriptive Maintenance (RxM)	Geht über die Vorhersage hinaus, indem es spezifische, datengestützte Maßnahmen zur Problemlösung vorschlägt.	Minimierte Ausfallzeiten, verbesserte Entscheidungsfindung, Kosten senkung, verlängerte Anlagenlebensdauer, gesteigerte Betriebs-effizienz.	Empfehlungen zur Reduzierung der Maschinenlast oder zum Austausch von Komponenten basierend auf Risikobewertung.
Digitale Zwillinge	Virtuelle Repliken physischer Anlagen/Umbgebungen zur Echtzeitüberwachung, Simulation und Optimierung.	Produktivitätssteigerung, Material-ausbringens-verbesserung, Qualitätsverbesserung, Energieein-spargungen.	LG Electronics (Produktivität & Qualität in der Montage), P&G (Lageroptimierung), Western Digital (was tun, Energie-reduzierung durch "Lights-out-Automation"), GE Power Plants (Kosten-und Ausfallreduktion; Steigerung

Technologie/Methode	Kernfunktionalität Beschreibung	Hauptvorteile	Beispiele/Anwendungen
			Betriebseffizienz durch Anlagenüberwachung).
Augmented Reality (AR) / Virtual Reality (VR)	Immersive Technologien für Schulung, Fehlerbehebung und Fernunterstützung.	Zeitersparnis, verbesserte Präzision, effizientere Schulung, Reduzierung von Reisezeiten für Spezialisten.	AR-Brillen für freihändige Arbeitsanweisungen, Videotelefonie für Remote-Support, VR-Simulationen für Notfalltraining.
Computerized Maintenance Management Systems (CMMS)	Zentralisierung von Anlagendaten, Arbeitsaufträgen und -plänen; Automatisierung von Aufgaben.	Echtzeit-informationen, optimierte Arbeitsauftrags-verwaltung, verbesserte Bericht-erstattung, Unterstützung der Compliance.	Erhöhung des PM-Anteils (erhöhter Planungsgrad), Identifizierung kritischer Ersatzteile, Reduktion der Stillstandszeiten.
Workflow-Automatisierung	Standardisierung und Automatisierung routinemäßiger Instandhaltungsaufgaben mittels Software.	Erhöhte Produktivität, verbesserte Verantwortlichkeit, höhere Qualitäts-kontrolle, minimierte menschliche Fehler, gestiegerte Arbeits-zufriedenheit.	Automatisierte Arbeitsauftragsgenerierung, intelligente Zeitplanung, Integration mit ERP-Systemen.
Lean Maintenance (TPM, 5S)	Eliminierung von Verschwendungen in	Reduzierung ungeplanter Stillstände, optimierte	US Automobilzulieferer (Reduzierung von

Technologie/Methode	Kernfunktionalität Beschreibung	Hauptvorteile	Beispiele/Anwendungen
	Instandhaltungsprozessen zur Maximierung der OEE.	Lagerbestände, verbesserte Sicherheit, kontinuierliche Verbesserung.	Förderbandschäden und Ausfallzeiten).
Lean Smart Maintenance (LSM)	Anpassungsfähige, kollaborative und iterative Ansätze zur kontinuierlichen Verbesserung von Instandhaltungsprozessen. Life-cycle-Orientierung.	Schnellere Reaktion auf Änderungen, verbesserte Zusammenarbeit, iterative Wertschöpfung, kontinuierliche Anpassung.	Optimierte Ersatzteilmanagement, Optimierung der Instandhaltungsprozesse, kritikalitätsbezogene Budgetierung, Transaktionskosten-senkung, Bewertung der Wertschöpfung
Robotik & Automatisierung	Einsatz von Robotern und Drohnen für Inspektionen, Wartung und Reparaturaufgaben.	Verbesserte Qualität, Effizienz und Flexibilität; erhöhte Sicherheit durch Reduzierung menschlicher Exposition in gefährlichen Umgebungen.	Drohnen für Flugzeuginspektionen, Cobots in der Elektronikreparatur.

5 Schlüsselherausforderungen und strategische Antworten

Die Transformation im IM ist mit erheblichen Herausforderungen verbunden, die strategische Antworten erfordern, um das volle Potenzial moderner Ansätze auszuschöpfen.

5.1 Bewältigung des Fachkräftemangels und der Personalentwicklung

Der Fachkräftemangel stellt eine der größten Herausforderungen für die Instandhaltungsbranche dar. Der demografische Wandel und die zunehmende Komplexität der Instandhaltungstechnologien (Industrie 4.0, Smart Maintenance) haben diesen Mangel verschärft. Strategische Antworten konzentrieren sich auf die kontinuierliche Schulung und Weiterbildung

des Personals, um technische Kompetenz zu erhalten, neue Fähigkeiten zu erlernen und sich an neue Geschäftstrends und aufkommende Technologien anzupassen. Dies beinhaltet auch Schulungen zu neuen Gerätesicherheitsstandards, Automatisierung und Robotik. Die Befähigung der Mitarbeiter für die beschriebenen Technologien muss ein zentrales Ziel der Instandhaltung sein. AR/VR-Technologien können effiziente, interaktive digitale Handbücher und Schulungen am Arbeitsplatz bereitstellen. Zusätzlich ist der Fokus auf Talentgewinnung und -bindung zu legen, um qualifiziertes Personal zu rekrutieren, zu binden und kontinuierlich weiterzubilden.

Der Fachkräftemangel ist nicht nur ein externes Markt- sondern auch ein Imageproblem und eine direkte Folge der rasanten technologischen Entwicklung in der Instandhaltung. Mit der zunehmenden Datenunterstützung und Automatisierung der Instandhaltung verlagern sich die erforderlichen Fähigkeiten von der technischen zu digitaler Kompetenz, Datenanalyse und Mensch-Maschine-Kollaboration. Die strategische Reaktion muss daher über die traditionelle Rekrutierung hinausgehen und kontinuierliches, technologiegestütztes Lernen sowie eine Neudeinition der Instandhaltungsrollen umfassen, um Talente anzuziehen und zu halten. Wenn das Stammpersonal nicht gleichzeitig weitergebildet wird, können die Vorteile dieser Technologien nicht vollständig realisiert werden und den Arbeitskräftemangel verschärft. Das strategische Gebot ist, in die kontinuierliche Entwicklung des Instandhaltungspersonals zu investieren und Technologien wie AR/VR für effiziente Schulungen zu nutzen, um diese Lücke zu schließen. Dies erfordert einen proaktiven Plan zur Personalentwicklung, der Schulungen zu neuen Managementkonzepten und Technologien sowie Datenanalyse und Cybersicherheit beinhaltet. Es impliziert auch eine Änderung der Denkweise über menschliche Fehler. Technologie kann einige Fehler mindern, menschliches Fachwissen ist jedoch weiterhin entscheidend für komplexe Problemlösungen und Entscheidungsfindungen. Dies erfordert kontinuierliche Investitionen in Humankapital.

5.2 Cybersicherheitsrisiken in industriellen Steuerungssystemen (ICS)

Industrielle Steuerungssysteme (ICS)²⁵ und operative Technologien (OT)-Netzwerke werden zunehmend zum Ziel von Cyberbedrohungen und stellen eine kritische Geschäftspriorität dar. Die strategischen Antworten erfordern spezialisierte Abwehrmaßnahmen für OT-Netzwerke und SCADA²⁶-Systeme, die über die traditionelle IT-Sicherheit hinausgehen. Netzwerksegmentierung und Zugriffskontrolle sind grundlegend für eine sichere ICS-Umgebung. Die Einhaltung von Standards wie NIST²⁷-konforme Praktiken und die Integration regulatorischer Anforderungen direkt in das Prozessdesign sind unerlässlich. Der Schutz sensibler Anlagendaten vor unbefugtem Zugriff, Verstößen und Cyberbedrohungen ist von höchster Bedeutung. Zudem müssen Notfallpläne entwickelt werden, die auf mögliche Bedrohungen wie Cyberangriffe reagieren können.

Die Technologien, die die Effizienz in der Instandhaltung erhöhen, führen gleichzeitig zu erheblichen Cybersicherheitslücken in kritischen Betriebsinfrastrukturen. Dies schafft einen direkten Zielkonflikt zwischen Konnektivitätsvorteilen und erhöhtem Risiko. Cybersicherheit ist damit nicht länger eine reine IT-Angelegenheit, sondern eine Kernverantwortung des Instandhaltungsmanagements, da die operative Kontinuität und Sicherheit davon

²⁵ ICS: Industrial Control Systems

²⁶ SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

²⁷ NIST: National Institute of Standards and Technology (US-Behörde)

abhangen.²⁸ Cybersicherheit muss in jede Ebene des Instandhaltungsmanagements integriert werden, vom anfänglichen Systemdesign über den täglichen Betrieb bis hin zur Reaktion auf Vorfälle. Dies erfordert eine funktionsübergreifende Zusammenarbeit zwischen IT-, OT- und den Instandhaltungsteams sowie kontinuierliche Investitionen in Sicherheitsmaßnahmen und Mitarbeiter Schulungen.

5.3 Integrationsherausforderungen mit Altsystemen und Datensilos

Fragmentierte Systeme, unflexible Prozesse und veraltete Infrastrukturen blockieren Innovation und Agilität. Daten werden oft dupliziert in weitläufigen, isolierten Umgebungen gespeichert, was den Zugriff und die Integration erschwert. Datensilos und Altsysteme stellen einen grundlegenden Engpass dar, der das volle Potenzial fortschrittlicher Instandhaltungsstrategien behindert. Die Unfähigkeit, Daten über IT- und OT-Systeme hinweg zu integrieren, verhindert eine ganzheitliche Sicht auf die Anlagenleistung und erschwert die datengesteuerte Entscheidungsfindung.

Strategische Antworten umfassen die zunehmende Nutzung einheitlicher digitaler Plattformen, die Instandhaltungsdaten, Kommunikation und Workflows zentralisieren. Die Implementierung geeigneter Daten-Governance-Frameworks ist entscheidend, um Datenqualität und -konsistenz sicherzustellen. Das Potenzial der prädiktiven und präskriptiven Instandhaltung, digitaler Zwillinge und APM hängt von der Fähigkeit ab, große Mengen an Echtzeitdaten aus verschiedenen Quellen zu sammeln und zu integrieren. Dies erfordert eine strategische Investition in "einheitliche digitale Plattformen", robuste "Daten-Governance-Frameworks" und eine singuläre Datenquelle.

5.4 Messung des Wertschöpfungsbeitrages (ROI)

Das IM hat zumeist Schwierigkeiten, Kosten genau vorherzusagen, unerwartete Ausgaben zu erkennen und einen Return on Investment (ROI) für digitale Transformationsprojekte nachzuweisen. Traditionelle Budgetierungsmethoden und Investitionsrechnungen erfassen nicht den gesamten Umfang der zu quantifizierenden Einflüsse. Diese beinhalten die Definition klarer Ziele und messbarer Ergebnisse. Die Entwicklung und Implementierung relevanter Key Performance Indicators (KPI's) ist unerlässlich, um die Effektivität zu messen. Dazu gehören die mittlere Reparaturzeit (MTTR), der Prozentsatz der geplanten Instandhaltungsmaßnahmen (Planungsgrad), die Gesamtanlageneffektivität (OEE) und die Anlagenauslastung. Die Bewertung der Projekte und Maßnahmen ist entscheidend; auch um neue Technologien und Prozesse vor der vollständigen Implementierung testen und begründen zu können.

Die in der betrieblichen Praxis weit verbreitete Schwierigkeit, den Einfluss auf den ROI zu messen, stellt eine erhebliche Hürde für Investitionen in fortschrittliche Instandhaltungstechnologien dar. Diese Lücke zwischen technologischem Potenzial und strategischer Rechtfertigung impliziert, dass das IM anspruchsvollere, wertbasierte Bewertungsansätze implementieren muss. Diese sollten sowohl direkte Kosteneinsparungen (z.B. reduzierte Ausfallzeiten, Ersatzteile u.v.m.) als auch indirekte Vorteile (z.B. verbesserte Sicherheit, Umweltkonformität, erhöhte Produktqualität, Wettbewerbsvorteile) erfassen. Der Wertschöpfungsbeitrag der Instandhaltung erweitert sich beträchtlich (wie in Abschnitt 3.2 zur Nachhaltigkeit und

²⁸ Weiterführende Literatur hierzu siehe: Roßmann, T. (2022) S. 217 ff.

3.3 zu APM erörtert).²⁹ Wenn der ROI lediglich durch direkte Kostenreduzierung gemessen wird, werden die umfassenderen Vorteile (z.B. verbesserte Sicherheit, verbessertes Markenimage durch Nachhaltigkeit, erhöhte Resilienz) übersehen. Erforderlich ist die Abstimmung der Instandhaltungsziele mit umfassenderen Unternehmenszielen und die effektive Kommunikation des Wertversprechens an die Stakeholder wie sie in der LSM-Philosophie verankert sind. Ohne klare, ganzheitliche ROI-Bewertungen bleibt die strategische Akzeptanz für transformative Instandhaltungsinitiativen begrenzt. Siehe hierzu zusammenfassend Tabelle 3.

Tabelle 3: Häufige Herausforderungen und strategische Lösungen im modernen IM

Herausforderung	Beschreibung der Herausforderung	Strategische Lösungen
Fachkräftemangel	Zunehmende Komplexität der Technologien und demografischer Wandel führen zu einem Mangel an qualifizierten Instandhaltungstechnikern.	Kontinuierliche Schulung und Weiterbildung (digitale Fähigkeiten, Datenanalyse, AR/VR); technologiegestützte Personalentwicklung; Fokus auf Rekrutierung und Bindung von Talenten.
Cybersicherheitsrisiken	Industrielle Steuerungssysteme (ICS) und OT-Netzwerke sind zunehmend Cyberbedrohungen ausgesetzt, mit potenziell katastrophalen Folgen für Betrieb und Sicherheit.	Spezialisierte Cybersicherheitsmaßnahmen für OT/ICS (Netzwerksegmentierung, Zugriffskontrolle); Einhaltung von Sicherheitsstandards (NIST); robuste Daten- und Asset-Sicherheit; Notfallpläne für Cyberangriffe.
Integrationsbedarf	Fragmentierte Altsysteme und Datensilos verhindern einen nahtlosen Datenfluss und eine ganzheitliche Sicht auf die Anlagenleistung, was Innovationen blockiert.	Einführung einheitlicher digitaler Plattformen; Implementierung umfassender Daten-Governance-Frameworks; parallele Neugestaltung von Prozessen und Technologieeinführung; Nutzung von API-Management und Cloud-Integration.
Messung der Wert schöpfung (ROI)	Schwierigkeiten bei der Quantifizierung des Return on Investment für fortschrittliche Instandhaltungsinitiativen, da	Definition klarer, messbarer Ziele und Ergebnisse; Entwicklung umfassender KPIs (OEE, MTTR, PMP, Nachhaltigkeitsmetriken); datengesteuerte Leistungsbewertung;

²⁹ Weiterführende Literatur hierzu unter Biedermann, H. (2021) S. 19 f.

Herausforderung	Beschreibung der Herausforderung	Strategische Lösungen
	traditionelle Metriken den vollen Wert nicht erfassen.	Nutzung von Pilotprogrammen zur Validierung; Quantifizierung der ROI-Wirksamkeit

6 Ausblick

Die Trends, die das Instandhaltungsmanagement insbesondere in der Theorie und in einigen realisierten Pilotanwendungen und Best-Practice-Firmen in den letzten Jahren geprägt haben, werden sich weiter beschleunigen und zu einer intelligenteren, vernetzten und autonomen Instandhaltungslandschaft führen. Im normativen Management werden die steigende Zahl an Management-Standards eine lückenlose Dokumentation und Auditierbarkeit der IH-Prozesse nach sich ziehen.

Die kontinuierliche technologische Evolution wird sich fortsetzen. Die prädiktive Instandhaltung wird zusätzliche Anwendungen finden, wobei KI-Systeme sich dynamisch an Umgebungsbedingungen und Nutzungsmuster anpassen und virtuelle Simulationen nutzen. Digitale Zwillinge werden dynamischer, adaptiver und prädiktiver werden.

Eine tiefere Integration und einheitliche Systemlandschaft werden immer wichtiger. Organisationen werden zunehmend auf digitale Plattformen setzen, die Instandhaltungsdaten, Kommunikation und Workflows über Abteilungen, Kunden und Lieferanten (alle Stakeholder) hinweg zentralisieren. Dies wird den sofortigen Datenaustausch, ein integriertes Compliance-Management und eine optimierte Entscheidungsfindung ermöglichen.

Die Verlagerung hin zu dezentralen Modellen und Edge Computing wird sich fortsetzen. Flexible, dezentrale Instandhaltungsstrukturen werden durch IoT-Überwachung und fortschrittliche Kommunikationstools ermöglicht. Edge Computing wird die Datenverarbeitung neu definieren, indem es schnellere Erkenntnisse am Ort der Datenerfassung liefert, selbst bei begrenzter Konnektivität, was die Resilienz erhöht.

Agilität und Resilienz werden zu normativen Kernprinzipien. Instandhaltungsmaßnahmen werden auf Agilität ausgelegt sein, wobei Lean-Methoden und adaptive Prozesse starre Strategien ersetzen. Dynamische Planung und präzise Ressourcenzuweisung werden entscheidend werden. Resilienz wird durch kritische Systemredundanz und branchenspezifische Anpassungen aufgebaut.

Die kennzahlenbasierte Leistungs- und Erfolgsmessung wird vollständig in die strategische Entscheidungsfindung integriert, wobei fortschrittliche Analysen die Leistung über mehrere Perspektiven konform zur Balanced Score Card (BSC), also Ökonomie, Effektivität (Stakeholdersicht bzw. Asset), Effizienz (Instandhaltungsperformance) und Mitarbeiter/Ressourcen (u.a. KI etc.) messen. So können kontinuierliche Verbesserungen und Verantwortlichkeiten nachgewiesen werden die ihrerseits weitere Investitionen rechtfertigen.

Nachhaltigkeit wird als grundlegendes Prinzip fundamental im normativen Verständnis und Management Eingang finden und den Fokus auf Kreislaufwirtschaft, das „Recht auf Reparatur“, die Reduktion des CO₂-Fußabdrucks und intelligentes Energiemanagement lenken. Proaktives Risikomanagement und Redundanz für kritische Infrastruktur werden die IH-Strategien nachhaltig prägen.

Trotz dieser Fortschritte werden bereits bestehende Herausforderungen bestehen bleiben. Der demografische Wandel und der technologische Fortschritt werden weiterhin zu einer Verknappung qualifizierter Arbeitskräfte in der Instandhaltung führen. Die Cybersicherheit wird ein kritischer Bereich bleiben. Beides erfordert kontinuierliche Investitionen und strategische Aufmerksamkeit. Der Ausblick deutet auf eine Konvergenz der identifizierten Trends hin zu einem zunehmend autonomen und selbstoptimierenden AM. Die wissensbasierte prädiktive Instandhaltung, dezentrale Modelle und verteiltes Wissen, einschließlich Fertigkeiten und Fähigkeiten des Personals deuten auf eine Zukunft hin, in der Instandhaltungssysteme nicht nur reaktiv oder prädiktiv, sondern in größerem Maße proaktiv und selbstkorrigierend sind. Dies impliziert eine kontinuierliche Verwischung der Grenzen zwischen IT und Betriebstechnik (OT) und eine noch größere Abhängigkeit von KI für Echtzeit-Entscheidungen. Notwendig ist ein hochentwickeltes soziotechnisches System, in dem fortschrittliche Technologie nahtlos in ein hochqualifiziertes und anpassungsfähiges Instandhaltungsteam integriert ist. Die Herausforderungen der Personalentwicklung und Cybersicherheit werden sich verschärfen, da die Komplexität und Autonomie der Instandhaltungssysteme zunehmen. Dies macht kontinuierliches Lernen, eine ausgeprägte Fehlerkultur als Teil des Wissensmanagements und robuste Sicherheit für eine erfolgreiche langfristige Implementierung notwendig.

Zusammenfassend wird Instandhaltung in naher Zukunft zu einem digitalen, nachhaltigen und strategisch entscheidenden Bereich avancieren. Die Bewältigung der technologischen Komplexität, die Entwicklung neuer Kompetenzen und die Anpassung an sich ändernde regulatorische Rahmenbedingungen sind die zentralen Aufgaben, die es zu meistern gilt.

7 Fazit und Empfehlungen

Der Zeitraum der letzten etwa zehn Jahre war von entscheidender Bedeutung für das IM. Es hat sich von einer traditionellen Unterstützungsfunction zu einer strategischen Säule industrieller Produktion und Wertschöpfung entwickelt. Durch zunehmende normative Anforderungen (Nachhaltigkeit, Resilienz), strategische Imperative (proaktives, datengesteuertes APM) und revolutionäre operative Technologien (IoT, KI, Digitale Zwillinge, AR/VR, Robotik) ist die Instandhaltung nunmehr von zentraler Bedeutung für die Erreichung von Effizienz, Kostensenkung, Effektivität (Produktqualität), Sicherheit und Umweltkonformität in produzierenden Unternehmen. Trotz erheblicher Fortschritte bestehen weiterhin Herausforderungen im Zusammenhang mit den Fähigkeiten der Arbeitskräfte, der Cybersicherheit und der Integration von Altsystemen.

Für Organisationen ergeben sich daraus folgende Empfehlungen:

- LSM – Philosophie samt Methoden implementieren: Übernehmen Sie adaptive Prozessrahmenwerke, um die strategische & operative Flexibilität zu verbessern, Verschwendungen zu reduzieren und die kontinuierliche Verbesserung in den Instandhaltungsworflows zu fördern.

- Eine integrierte digitale Instandhaltungsstrategie entwickeln: Vermeiden Sie eine stückweise Technologieeinführung. Erstellen Sie einen umfassenden Fahrplan, der IoT, KI/ML, Digitale Zwillinge und CMMS/APM-Systeme in ein einheitliches Gesamtsystem integriert.
- Daten-Governance und Analysefähigkeiten priorisieren: Investieren Sie in robuste Datenerfassungs-, Qualitäts- und Integrationsrahmenwerke. Kultivieren Sie eine datengesteuerte Kultur, indem Sie die Mitarbeiter in Datenkompetenz schulen und Zugang zu fortschrittlichen Analysetools ermöglichen.
- Cybersicherheit für OT/ICS stärken: Implementieren Sie spezialisierte Cybersicherheitsmaßnahmen für industrielle Steuerungssysteme, einschließlich Netzwerksegmentierung, Zugriffskontrolle und robuster Incident-Response-Pläne³⁰, da diese Assets von kritischer Bedeutung sind.
- In die Transformation der Arbeitskräfte investieren: Implementieren Sie kontinuierliche Schulungsprogramme, die sich auf digitale Fähigkeiten, Datenanalyse und Mensch-Maschine-Kollaboration konzentrieren. Nutzen Sie AR/VR für effiziente Schulungen und Fernunterstützung, um Qualifikationslücken zu schließen und die Produktivität zu steigern.
- Funktionsübergreifende Zusammenarbeit fördern: Brechen Sie funktionale Arbeitsteiligkeit zwischen Instandhaltung, IT, Produktion, Engineering und Finanzabteilungen auf, um einen ganzheitlichen Ansatz für das AM und IM sicherzustellen.
- Wertschöpfung definieren und verfolgen: Gehen Sie über traditionelle kostenorientierte KPI's hinaus und integrieren Sie Metriken, die den umfassenderen Wert der Instandhaltung dargestellt nach den 4 Dimensionen des BSC-Schemas erfassen. Ergänzen Sie dies durch eine kritikalitätsbasierte Budgetierung der Instandhaltung.

Literaturverzeichnis

Biedermann, H. (2018): Predictive Maintenance – Möglichkeiten und Grenzen. In: Biedermann, H. (Hrsg.) Predictive Maintenance – Realität und Vision. TÜV Media GmbH S. 23-40

Biedermann, H.; Kinz, A. (2021): Lean Smart Maintenance – agiles, Lern- und wertschöpfungsorientiertes Instandhaltungsmanagement. Springer Gabler

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

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

³⁰ Ein Incident-Response-Plan definiert den Ablauf im Falle eines Incidents einschließlich Kommunikations- und Eskalationswege. Die International Organization for Standardization (ISO) gibt in der Norm ISO/IEC 27035:2016

„Information technology – Security techniques – Information security incident management“
Vorgaben für die Behandlung von Sicherheitsvorfällen.

Biedermann, H. (2023): KI in der Instandhaltung – Stand und Ausblick. In: Biedermann, H. (Hrsg.) Instandhaltung im dynamischen Umfeld. TÜV Media GmbH S. 11-22

Campos, J. et.al (2017): Business Performance Measurements in Asset Management with the Support of Big Data Technologies. In: Management Systems in Production Engineering. Volume 25, Issue 3, pp 143-149

CWA 18188 (2025): Zugriff am 01.08.2025. https://www.cencenelec.eu/media/CEN-CENELEC/CWAs/RI/2025/cwa18188_2025.pdf

Collaborative Robots and the Future of Electronic and Precision Equipment Repair & Maintenance. <https://3laws.io/pages/Collaborative%20Robots%20and%20the%20Future%20of%20Electronic%20and%20Precision%20Equipment%20Repair%20and%20Maintenance.html>

Dankl, A. (2022): Digitalisierung von Instandhaltung und Assetmanagement mit Fokus auf Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit – wie eine praxiserprobte Digitalisierungs- Roadmap helfen kann, teure Sackgassen und Umwege zu vermeiden. In: Biedermann, H. (Hrsg.) Vom Instandhaltungs- zum Assetmanagement – Konzepte, Lösungen, Erfahrungen. TÜV Media GmbH S. 227-238

Deuse, J.; Barthelmey, A. (2021): Was nutzt ein Digitaler Zwilling? Über die Relevanz cyber-physischer Systeme für die industrielle Instandhaltung. In: Biedermann, H. (Hrsg.). Instandhaltung als Erfolgsfaktor. Strategien, Lebenszyklusbetrachtung und Digitalisierung. TÜV Media GmbH S. 243 – 268

EN 17948 (2025): Maintenance management and functions. CEN/TC 319/WG 8 - Maintenance Management

ESPR (2024): Zugriff am 01.08.2025, <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj?locale=de>

Roßmann, T. (2022): alles unter eigener Kontrolle? Welches Wissen rund um Assets wichtig für die Cybersicherheit ist. In: Biedermann, H. (Hrsg.) von Instandhaltungs-zum Assetmanagement – Konzepte, Lösungen, Erfahrungen. TÜV Media GmbH S. 217-226

What is ISO 55000? Zugriff am 29.07.2025, <https://www.assetivity.com.au/articles/asset-management/implementing-iso-55000-what-is-iso-55000/>