



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Entwicklung eines Lean Smart Maintenance Konzepts am Beispiel der kontinuierlichen Prozessindustrie

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Dipl.-Ing. Klaudia Kovacs

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik, Systemplanung und Facility Management, Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Niklas Riezinger

01616012



Wien, im Oktober 2021

Niklas Riezinger



Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Oktober 2021

Niklas Riezinger

Gender Erklärung

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei beide Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während meines Studiums und insbesondere bei der Anfertigung dieser Diplomarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein herzlicher Dank Dipl.-Ing. Klaudia Kovacs, die meine Diplomarbeit mit fachlicher Kompetenz und großem Engagement betreut hat. Durch ihre hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik hat sie maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Besonderes bedanken möchte ich mich auch bei meinem Vorgesetzten im Referenzunternehmen, Herrn Roland Ornetzeder. Seine freundliche und fachliche Unterstützung ermöglichte vom ersten Tag an eine hervorragende Zusammenarbeit, welche entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beitrug.

Ein großes Dankeschön auch an meine Eltern Johannes und Angelika, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben. Ich möchte mich auch bei meinen Großeltern Traudi und Josef und Anna und Hans sowie bei meinen Geschwistern Benedikt und Julian bedanken, die mir mein ganzes Leben lang zur Seite gestanden sind.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Studienkollegen und Freunden bedanken, mit denen ich in den vergangenen Jahren viele gemeinsame Stunden an der Universität und in meiner Freizeit verbracht habe. Hier möchte ich besonders meine beiden Freunde Johannes und Marcus hervorheben, mit denen ich seit dem ersten Tag an der Universität befreundet bin und die ich sehr schätze. Ein herzliches Dankeschön geht auch an meine gute Freundin Anna für das professionelle Korrekturlesen meiner Arbeit.

Kurzfassung

Aufgrund des hohen internationalen Wettbewerbsdrucks und der hohen Anforderungen an die Produktqualität ist die Chemie- und Prozessindustrie besonders auf ein zuverlässiges Instandhaltungsmanagement angewiesen. Eine funktionierende Instandhaltung gewährleistet einen stabilen Betrieb der hochgradig vernetzten Systeme, indem sie kostspielige, ungeplante Ausfallzeiten aufgrund unerwarteter Fehlfunktionen vermeidet. Der im Rahmen von Industrie 4.0 stattfindende technologische Transformationsprozess von konventionellen Fabriken zu intelligenten, vernetzten Fabriken eröffnet Unternehmen neue Möglichkeiten im Bereich der Anlagenüberwachung und -instandhaltung. Studien zeigen jedoch, dass das Potenzial der innovativen Technologien noch nicht ausreichend vom Instandhaltungsmanagement genutzt wird.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept für die kontinuierliche Prozessindustrie zu entwickeln, das etablierte Methoden und Konzepte der Instandhaltung mit innovativen Technologien der Industrie 4.0 kombiniert, um die Effizienz und Effektivität bei gleichbleibender Qualität und reduzierten Kosten zu steigern. Das entwickelte Konzept soll nicht nur der Wissenschaft dienen, sondern auch möglichst praxisnahe Handlungsempfehlungen und Instrumente für das Instandhaltungsmanagement der industriellen Praxis bereitstellen.

Das Ergebnis der Arbeit ist ein entwickeltes Lean Smart Maintenance (LSM) Konzept, das aus einem Fundament und drei darauf aufbauenden Bausteinen mit jeweils dafür entwickelten Tools besteht. Der erste Baustein umfasst die dynamische Anpassung der Instandhaltungsstrategie mit Hilfe eines Anlagenkritikalitätsindex sowie ein Tool für die transparente Kostenübersicht bezogen auf die Anlagenkritikalität. Der zweite Baustein befasst sich mit der Implementierung von Lean-Management Methoden im Instandhaltungsprozess. Speziell die autonome Instandhaltung birgt ein enormes Potenzial, da aufgrund der hoch automatisierten Anlagen in der kontinuierlichen Prozessindustrie häufig freie Kapazitäten des Produktionspersonals verfügbar sind. Zusätzlich wird eine Balanced Score Card speziell für die Instandhaltung entwickelt. Der letzte Baustein befasst sich mit der Integration digitaler Enabler, um eine effizientere Durchführung von Instandhaltungsaktivitäten und -planung zu gewährleisten und den Informationskreislauf für eine kontinuierliche Verbesserung zu schließen. Letztlich ist die nachhaltige Integration und Standardisierung im Unternehmen mit Hilfe einer Qualifikationsmatrix, einem systematischem Wissensmanagement und einem auf Kata-Coaching basierendem Schulungskonzept das Fundament für den Erfolg des Konzeptes.

Die Validierung des entwickelten LSM-Konzepts erfolgt anhand eines Chemieunternehmens, das Zellulosefasern in einem kontinuierlichen Prozess herstellt.

Abstract

Due to high international competitive pressure and high demands on product quality, the chemical and process industry is particularly dependent on reliable maintenance management. Effective maintenance ensures stable operation of the highly networked systems by avoiding costly, unplanned downtime due to unexpected malfunctions. The technological transformation process from conventional factories to smart, networked factories that is taking place as part of Industry 4.0 is opening up new opportunities for companies in the area of plant monitoring and maintenance. However, studies show that the potential of innovative technologies is not yet sufficiently exploited by maintenance management.

The aim of this work is to develop a concept for the continuous process industry that combines established methods and concepts of maintenance with innovative technologies of Industry 4.0 to increase efficiency and effectiveness while maintaining quality and reducing costs. The developed concept is not only intended to serve science, but also to provide recommendations for action and tools for maintenance management in industrial practice that are as practical as possible.

The result of the work is a developed Lean Smart Maintenance (LSM) concept, which consists of a foundation and three modules based on it, each with tools developed for this purpose. The first module includes the dynamic adjustment of the maintenance strategy with the help of a plant criticality index as well as a tool for the transparent cost overview related to the plant criticality. The second module deals with the implementation of lean management methods in the maintenance process. Especially autonomous maintenance has an enormous potential, because due to the highly automated plants in the continuous process industry often free capacities of production personnel are available. In addition, a balanced score card is developed specifically for maintenance. The last module deals with the integration of digital enablers to ensure a more efficient execution of maintenance activities and planning and to close the information loop for continuous improvement. Finally, the sustainable integration and standardization in the company with the help of a qualification matrix, a systematic knowledge management and a training concept based on kata coaching is the foundation for the success of the concept.

The validation of the developed LSM concept is based on a chemical company that produces cellulose fibers in a continuous process.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Motivation	1
1.2	Problemstellung	1
1.3	Forschungsfragen und Ziel der Arbeit	3
2	Theoretische Grundlagen.....	4
2.1	Instandhaltung	4
2.1.1	Definition und Ziel der Instandhaltung.....	4
2.1.2	Maßnahmen der Instandhaltung	5
2.1.3	Grundlegende Instandhaltungsstrategien und Strategieauswahl.....	10
2.2	Instandhaltungskonzepte.....	16
2.2.1	Lean Maintenance (LM)	16
2.2.2	Total Productive Maintenance (TPM).....	17
2.2.3	Risk Based Maintenance (RBM)	22
2.2.4	Knowledge Based Maintenance (KBM)	24
2.2.5	Lean Smart Maintenance (LSM)	25
2.3	Charakteristika der kontinuierlichen Prozessindustrie	27
3	State-of-the-Art	29
3.1	Systematische Literaturrecherche	29
3.2	Auswahl der Dimensionen.....	30
3.3	Analyse bestehender Modelle zur Umsetzung einer LSM-Strategie	31
3.4	Resümee	42
3.5	Anforderungen an ein LSM-Konzept	42
4	LSM-Konzept für die Prozessindustrie	43
4.1	Überblick des LSM-Konzepts	43
4.2	Baustein I: Anlagenspezifische Instandhaltungsstrategie.....	44
4.3	Baustein II: Implementierung von Methoden des Lean Managements	52
4.3.1	Kennzahlengestützte Instandhaltung	52
4.3.2	Autonome Instandhaltung	54
4.4	Baustein III: Enabler der Digitalisierung.....	57
4.4.1	Potenzial durch die Verwendung Handheld-Geräten	57

4.4.2	Potenzial durch die Verwendung von Wearables.....	59
4.4.3	Potenzial durch die Verwendung eines Shopfloor-Boards	59
4.4.4	Bewertung der Enabler der Digitalisierung.....	60
4.5	Fundament: Standardisierung und nachhaltige Integration	61
4.5.1	Vorgehensmodell für ein systematisches Wissensmanagement	62
4.5.2	Schulungskonzept für die Einführung und nachhaltige Integration autonomer Instandhaltung	65
4.5.3	Entwickeltes Tool zur transparenten Darstellung der Mitarbeiterqualifikation	69
5	Validierung anhand eines Fallbeispiels	71
5.1	Rahmenbedingungen und Ausgangssituation	71
5.2	Anlagenspezifische Instandhaltungsstrategie.....	73
5.2.1	Instandhaltungskosten-Analyse	73
5.2.2	Anlagenkritikalitätsindex	75
5.2.3	Transparente Kostenübersicht vs. Anlagenkritikalitätsindex	77
5.2.4	Auswahl/Anpassung der Instandhaltungsstrategie	79
5.3	Implementierung von Methoden des Lean Managements.....	80
5.3.1	Derzeitige Durchführung autonomer Tätigkeiten.....	80
5.3.2	Autonome Instandhaltung mit Hilfe von Checklisten	80
5.4	Enabler der Digitalisierung	83
5.4.1	Auswahl geeigneter digitaler Enabler.....	83
5.4.2	Integration von Handheld-Geräten.....	83
5.5	Standardisierung und nachhaltige Integration	87
5.5.1	Systematisches Wissensmanagement	87
5.5.2	Schulungskonzept für die Einführung und nachhaltige Integration autonomer Instandhaltung	89
5.6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse.....	91
6	Zusammenfassung und Ausblick	92
6.1	Ergebnisse der Arbeit.....	92
6.2	Abschließende Diskussion der Forschungsfragen	92
6.3	Ausblick.....	95
7	Literaturverzeichnis.....	96
8	Abkürzungsverzeichnis	102

9	Abbildungsverzeichnis	104
10	Formelverzeichnis	106
11	Tabellenverzeichnis	107

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Angesichts des hohen Wettbewerbsdrucks am Markt versuchen Unternehmen laufend neue Technologien zu adaptieren, um die geforderten Kundenbedürfnisse erfüllen und ihren Marktanteil halten zu können. Angetrieben von diesen Umständen hat die Industrie in den letzten 200 Jahren drei Revolutionen durchlebt.¹ Eine unvermeidliche Tatsache, welche das Ziel der hohen Wettbewerbsfähigkeit (Verfügbarkeits-, Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen) ernsthaft bedroht, ist jedoch das Auftreten kostspieliger, außerplanmäßiger Ausfallzeiten durch unerwartete Ausfälle.^{2,3} Insbesondere die Chemie- und Prozessindustrie ist aufgrund der hohen Flexibilitäts- und Qualitätsanforderungen sowie des enormen Kostendrucks besonders auf ein zuverlässiges Instandhaltungsmanagement angewiesen, um den stabilen Betrieb der hochkomplexen Anlagen sicherzustellen.⁴ Aus diesen Gründen hat sich die Instandhaltung in den letzten Jahrzehnten als ein effektiver Teil der Wettbewerbsfähigkeit und als Schlüsselrolle in der Leistungsverbesserung etabliert.^{5,6}

1.2 Problemstellung

Im Zuge der vergangenen Revolutionen hat sich die Instandhaltungsstrategie von reaktiv (fail-and-fix) zu präventiv oder blind proaktiv entwickelt. Bei diesen statischen Ansätzen versuchen Unternehmen, Instandhaltungsaktivitäten im Voraus anhand von historischen Daten und Erfahrungswerten zu planen. Diese Strategie hat oft zur Folge, dass einerseits funktionsfähige Teile und Komponenten ausgetauscht werden und andererseits Maschinenausfälle durch unerwartet hohen Verschleiß von Maschinenteilen auftreten.⁷ In der kontinuierlichen Prozessindustrie wird die Strategieauswahl zusätzlich durch die reduzierte Zugänglichkeit der Anlage für Inspektionen und Wartungsarbeiten aufgrund der hohen Anlagenintensität erschwert. Aus diesem Grund müssen alle Zeitfenster, die durch produktions- oder störungsbedingte Stillstände entstehen, für Instandhaltungsarbeiten genutzt werden, damit die Ausfallhäufigkeit und die damit verbundenen Produktionsausfälle reduziert und die Anlagenverfügbarkeit erhöht werden kann.⁸

¹ vgl. Al-Najjar et al., 2018, S. 20

² vgl. Ruiz-Sarmiento et al., 2020, S. 1

³ vgl. Biedermann, 2016a, S. 12

⁴ vgl. Kinz et al., 2016b, S. 16

⁵ vgl. Al-Najjar et al., 2018, S. 21

⁶ vgl. Macchi et al., 2017, S. 383

⁷ vgl. Ruiz-Sarmiento et al., 2020, S. 2

⁸ vgl. Kinz et al., 2016b, S. 17 Kinz et al., 2016b

Abhilfe für die angeführten Probleme könnten die durch Industrie 4.0 initiierten technologischen Fortschritte in den Bereichen Cyber-Physical Systems (CPS), Internet of Things (IoT), Internet of Services (IoS) und Big Data schaffen.⁹ Diese Technologien verwandeln konventionelle Fabriken in vernetzte Fabriken (Smart Factories), die es den Anlagenbetreibern ermöglichen, Maschinenzustände in Echtzeit zu überwachen und eine riesige Menge an Anlagen- und Systemdaten in unterschiedlichen Formaten und Qualitäten aufzuzeichnen.¹⁰ Durch diese Digitalisierung der Fabriken haben Unternehmen die Möglichkeit, Analysen der erfassten Daten von Prozessen und Anlagen durchzuführen und daraus dynamische, anlagenspezifische Instandhaltungsstrategien zu generieren.¹¹ Dadurch könnten Unternehmen die Ausfallhäufigkeit und die damit verbundenen Produktionsausfälle reduzieren und die Anlagenverfügbarkeit erhöhen.¹²

In der Praxis stellen jedoch Probleme im Zusammenhang mit der Menge, Qualität, Integration und Nutzung von Instandhaltungsdaten die Entscheidungsträger vor Herausforderungen.¹³ Vor welchen Schwierigkeiten Unternehmen im Bereich der Datenanalyse stehen, zeigt eine ausführlichen Branchenumfrage unter 151 Analytikern und Entscheidungsträgern in Industrieunternehmen. Die Studie demonstriert, dass Kompatibilität zwischen den Systemkomponenten (78%), Datenqualität (62%) und Gewinnung von Erkenntnissen aus den gewonnenen Daten (62%) für Unternehmen problematisch sind, während der Datenzugriff für die meisten Unternehmen kein Problem darstellt. Anhand dieser Ergebnisse lässt sich erkennen, dass derzeit viele Unternehmen noch nicht ausreichend auf die Anforderungen und Möglichkeiten des enormen Datenumfangs vorbereitet sind.¹⁴ Die Vermutung, dass Schwierigkeiten bei der Datenanalyse die Wahl der Instandhaltungsstrategie beeinflussen, bestätigt eine Benchmark-Studie der Österreichischen Gesellschaft für Instandhaltung aus dem Jahr 2018. Die Studienteilnehmer gaben an, dass sie sich bei der Wahl der Instandhaltungsstrategie auf Erfahrungswerte (89%), historische Daten (66%) oder persönliche Erfahrungen (61%) stützen. Durch diese Auswahlmethoden ist es nicht verwunderlich, dass die befragten Unternehmen hauptsächlich die reaktive (46%) und präventive (71%) Instandhaltungsstrategie anwenden.^{15,16}

Die angeführten Studien zeigen, dass Unternehmen Schwierigkeiten haben, Daten aus fortschrittlichen Technologien und Systemen (IoT, Big Data usw.) zu nutzen, um z. B. Anlagen- (34 %) oder Risikobewertungen (53 %) durchzuführen und damit eine

⁹ vgl. Al-Najjar et al., 2018, S. 20

¹⁰ vgl. Ruiz-Sarmiento et al., 2020, S. 1

¹¹ vgl. Passath/Mertens, 2019, S. 364

¹² vgl. Chin et al., 2020, S. 163

¹³ vgl. Marttonen-Arola et al., 2020, S. 249

¹⁴ vgl. Lueth et al., 2016, S. 49

¹⁵ vgl. Passath/Huber, 2019, S. 9

¹⁶ vgl. Passath/Mertens, 2019, S. 365f

dynamische Instandhaltungsstrategie festzulegen.¹⁷ Dieser Umstand lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Instandhaltung, einer der wichtigsten Enabler der Smart Factory, noch nicht ausreichend auf die neuen Anforderungen und Möglichkeiten von Industrie 4.0 vorbereitet ist. Daher benötigt das Instandhaltungsmanagement ein Lean Smart Maintenance Konzept, welches Lean-Management Tools, Risikoanalyse und Datenanalytik sowie die Anwendung digitaler Enabler kombiniert. Mit dem Ziel den Wandel hin zu einem effizienten und effektiven Asset-Management zu ermöglichen und dadurch die Kosten bei gleichbleibender Qualität zu reduzieren.¹⁸

1.3 Forschungsfragen und Ziel der Arbeit

Ausgehend von der erarbeiteten Ausgangssituation und Problemdefinition lässt sich die spezifische übergeordnete Forschungsfrage und die daraus resultierenden Forschungsfragen ableiten.

Forschungsfrage: Wie können etablierte Methoden und Konzepte der Instandhaltung mit innovativen Technologien der Digitalisierung kombiniert werden, um Effizienz und Effektivität bei gleichbleibender Qualität zu steigern und gleichzeitig die Kosten zu senken?

- Subfrage 1: Welche Methoden und Maßnahmen eignen sich in der Praxis zur Reduktion der Instandhaltungskosten bei gleichbleibender Produkt- und Produktivitätsqualität?
- Subfrage 2: Welche Enabler der Digitalisierung lassen sich mit den etablierten Methoden verknüpfen, um Effizienzsteigerung zu erzielen?
- Subfrage 3: Wie können die entwickelten Konzepte und Methoden im Unternehmen nachhaltig integriert werden?

Ziel aus Sicht der Wissenschaft ist es, ein Lean Smart Maintenance Konzept für die vollkontinuierliche Prozessindustrie zu entwickeln, welches ein effizientes, lernorientiertes und zugleich risiko- und ressourcenoptimiertes Instandhaltungsmanagement gewährleistet.

Das Ziel aus Unternehmenssicht ist es, durch die Integration von Aspekten des Lean Managements und der Digitalisierung die Effizienz und Effektivität zu steigern und damit die Kosten zu senken. Das entwickelte Konzept soll anhand eines Fallbeispiels mit einem Anwendungspartner, welcher in vollkontinuierlichen Prozessanlagen regenerative Zellulosefaser für die Textilindustrie herstellt, validiert werden

¹⁷ vgl. Passath/Mertens, 2019, S. 365

¹⁸ vgl. Biedermann et al., 2016, S. 1

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Instandhaltung

2.1.1 Definition und Ziel der Instandhaltung

Bis in die 1950er Jahre beschränkten sich die Instandhaltungsarbeiten auf Reparaturen, die nach Maschinenausfällen notwendig waren. Diese störungsbedingte (reaktive) Instandsetzung wurde nicht mit Kosten oder Rentabilitätseinbußen in Verbindung gebracht, sondern als unvermeidliche Wiederherstellung des funktionsfähigen Zustandes akzeptiert.¹⁹ Heute ist die Instandhaltung gemäß DIN EN 13306 definiert als:

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus eines Objekts, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung seines funktionsfähigen Zustands dient, sodass es die geforderte Funktion erfüllen kann.“²⁰

Demzufolge wurde der Aufgabenbereich der Instandhaltung um die vorbeugende (präventive) Instandhaltung erweitert. Die Notwendigkeit geplanter und vorbeugender Maßnahmen (Wartung, geplante Instandsetzung, Verbesserung, Inspektion) ergibt sich vor allem aus der zunehmenden Kompliziertheit, Automatisierung und Verkettung von Anlagen.²¹ Um einen funktionsfähigen Zustand, d.h. eine hohe Anlagenverfügbarkeit und -sicherheit, zu gewährleisten und damit kostspielige Maschinenausfälle zu vermeiden, reicht es nicht mehr aus, dass die Instandhaltung nur im Störfall reagiert. Daher müssen Unternehmen abwägen, wie viel Instandhaltungsaufwand für die eingesetzten Aggregate optimal ist, um das Hauptziel der maximalen Zuverlässigkeit bei minimalen Kosten zu erreichen.²²

Abbildung 1 veranschaulicht die Beziehung zwischen den direkten Instandhaltungskosten (Instandhaltungsaufwand) und den Anlagenausfallkosten und den daraus resultierenden Gesamtkosten der Instandhaltung. Darüber muss auf das Optimierungspotenzial durch dynamische Instandhaltungsstrategieanpassung und Effizienzsteigerung von Instandhaltungsprozessen hingewiesen werden.²³ Dabei ist zu beachten, dass Änderungen in der Instandhaltungsstrategie zum einen meist erst mittel- oder langfristig erkennbar sind und zum anderen oft von anderen Aktivitäten in der Produktion (Auslastung etc.) überlagert werden. Messbar ist hingegen der Zusammenhang zwischen der verwendeten Instandhaltungsstrategie und den damit

¹⁹ vgl. Pawellek, 2016, S. 3

²⁰ DIN13306, 2018-02, S. 8

²¹ vgl. Matyas, 2018, S. 33

²² vgl. Matyas, 2018, S. 32

²³ vgl. Matyas, 2018, S. 28

verbundenen Instandhaltungsmaßnahmen sowie der Ausnutzung des Abnutzungsvorrates.²⁴

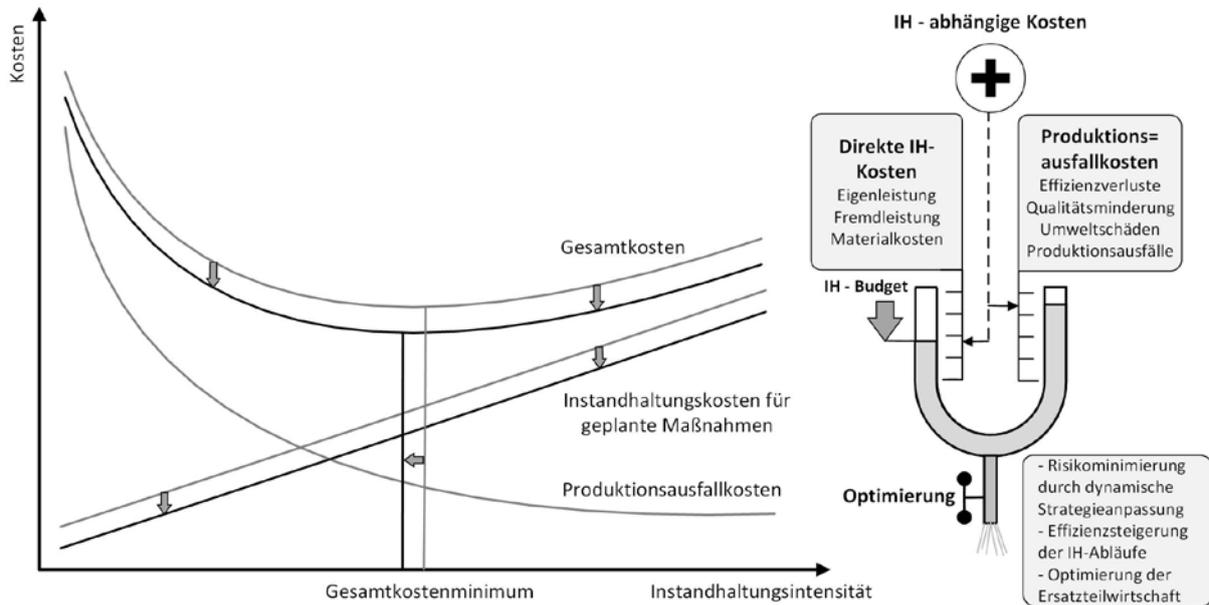


Abbildung 1: IH-abhängige Kosten²⁵

2.1.2 Maßnahmen der Instandhaltung

In Abbildung 2 werden die vier Grundmaßnahmen der Instandhaltung zur Ermittlung des Ist-Zustandes, zur Erhaltung und zur Wiederherstellung des Funktionszustandes dargestellt.²⁶

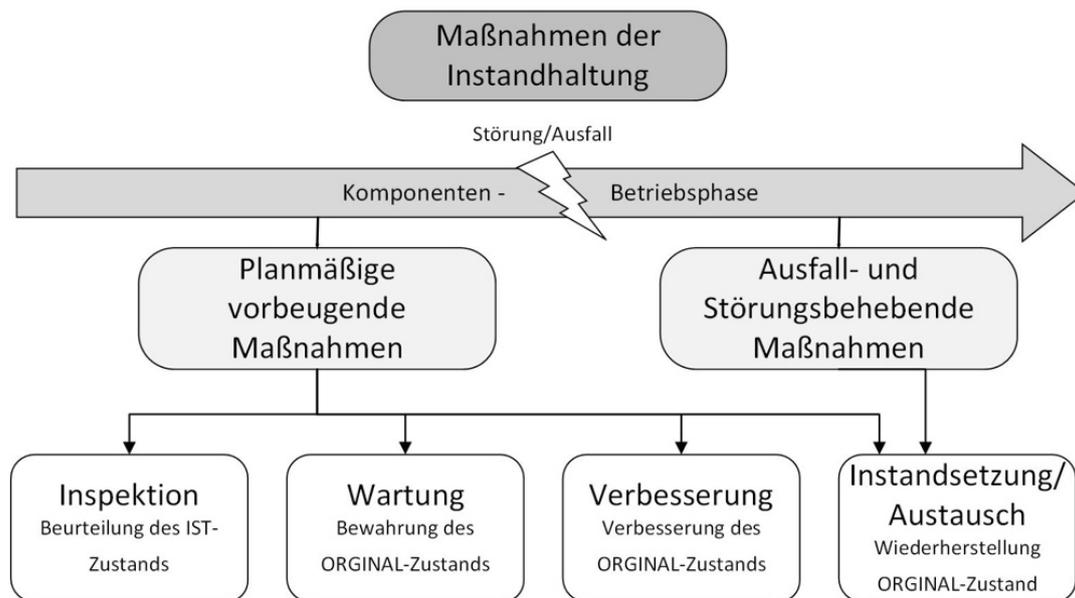


Abbildung 2: Grundmaßnahmen der Instandhaltung²⁷

²⁴ vgl. Ryll/Freund, 2010, S. 26f

²⁵ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Matyas, 2018, S. 28&48

²⁶ vgl. Apel, 2018, S. 49f

²⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Sihm et al., 2016, S. 350

In dieser Arbeit sind Inspektion und Wartung von besonderem Interesse und werden daher im Folgenden ausführlicher betrachtet. Um die Aufrechterhaltung der Produktion und die Sicherstellung der Produktqualität zu gewährleisten, muss die technische Anlage, wie in Abbildung 3 dargestellt, über der Abnutzungsgrenze betrieben werden.^{28,29} Die Intention der Instandhaltung ist daher, den unvermeidlichen Verschleiß durch chemische und/oder physikalische Prozesse (Korrosion, Reibung, etc.) mit Hilfe geeigneter Instandhaltungsmaßnahmen zu beeinflussen und damit die Abnutzungsreserve auf dem größtmöglichen Niveau zu halten. Dadurch ist es möglich eine Störung und den daraus resultierenden Ausfall der Anlage zu verzögern bzw. zu verhindern.³⁰

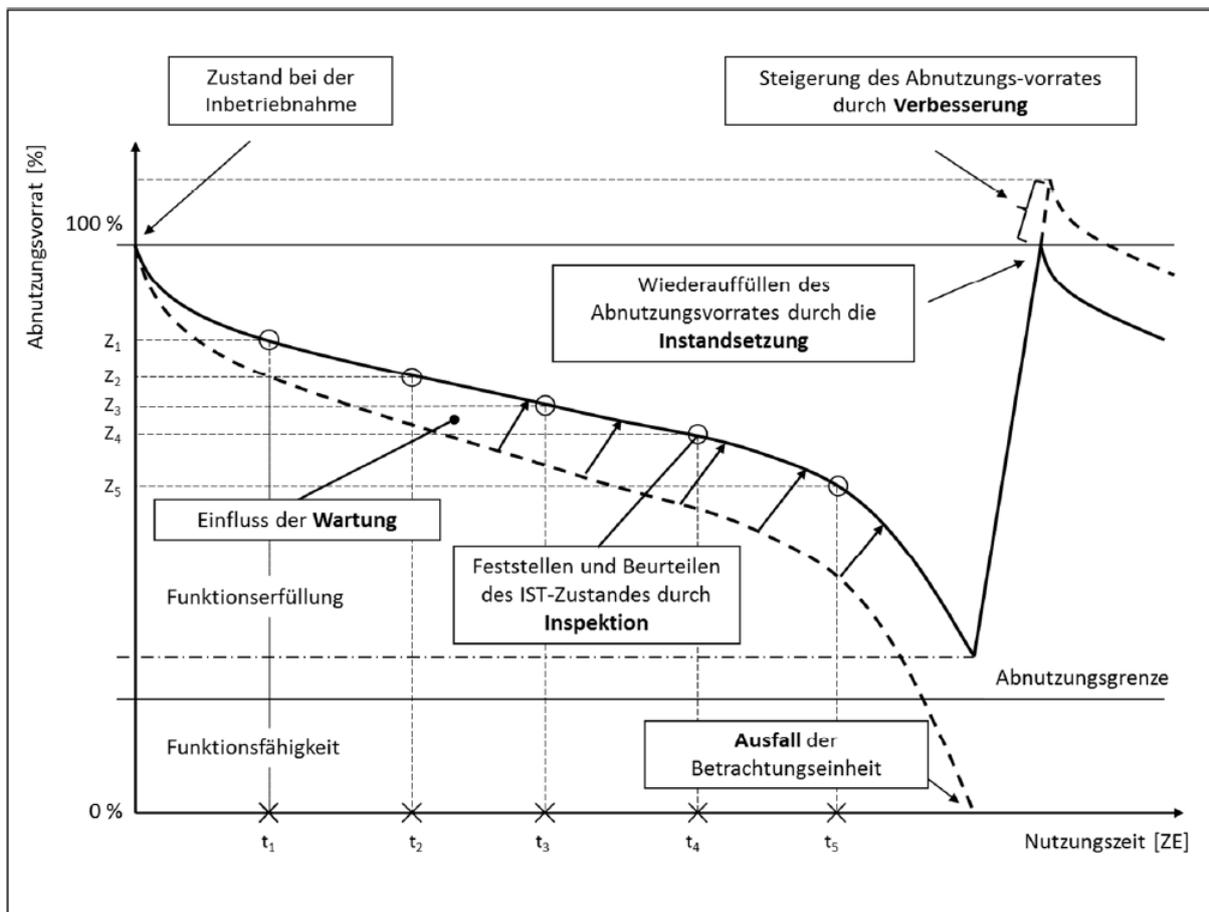


Abbildung 3: Instandhaltungsmaßnahmen und deren Einfluss auf den Abnutzungs-vorrat³¹

Damit die Instandhaltung die richtigen Maßnahmen, im richtigen Umfang und zum richtigen Zeitpunkt einleiten kann, ist es zuerst notwendig genaue Informationen über den Abnutzungs-vorrat der Anlagen zu erheben. Dies erfolgt mittels Inspektion.³²

²⁸ vgl. Pawellek, 2016, S. 18

²⁹ vgl. Nemeth et al., 2015, S. 569

³⁰ vgl. Matyas, 2018, S. 34

³¹ Hölbfner, 2014, S. 17

³² vgl. Apel, 2018, S. 51

Bei der subjektiven Prüfung werden die menschlichen Sinne des Mitarbeiters (Inspekteur) in Kombination mit seiner Kompetenz, Erfahrung und Zuverlässigkeit genutzt, um qualitative Informationen über den Zustand der Anlage zu erhalten. Objektive Prüfverfahren sind zum einen der qualitative Vergleich geometrischer Längen oder Formen mit Hilfe von Lehren und zum anderen die quantitative Messung physikalischer und chemischer Größen mit Hilfe verschiedenster Messgeräte/-instrumente. Letzteres kann sowohl durch die einfache Messung der Differenz der Messgröße vor und nach der Störung oder dem Ausfall (direkte Messung) als auch durch die Korrelation einer Messgröße und dem daraus resultierenden Objektzustand (indirekte Messung) erfolgen.³⁹

Wartung

Die Wartung wird zum einen durch festgelegte Wartungspläne für die einzelnen Anlagen und zum anderen durch die Entdeckung von Anomalien im Rahmen von Inspektionen eingeleitet. Sie wird nach DIN 31051 definiert als:

„Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats.“⁴⁰

Demzufolge werden Wartungsmaßnahmen ergriffen, um den Ausgangszustand so gut wie möglich zu erhalten, indem man die Abnutzungsgeschwindigkeit reduziert (Abbildung 3). Neben der Erhöhung der Lebensdauer, leisten die Maßnahmen auch einen wesentlichen Beitrag zur Arbeitssicherheit.^{41,42}

Die typischen Wartungsmaßnahmen werden nachfolgend aufgelistet und kurz erörtert:

- **Pflegen und Reinigen:** Die Entfernung von Fremd- und Hilfsstoffen verlangsamt den Verschleiß der Geräte und gewährleistet gleichzeitig die Arbeitssicherheit (Grundsätze der Sauberkeit und Ordnung) und die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen im Falle von Gefahrstoffen. Um eine sichere und regelmäßige Durchführung zu gewährleisten, werden häufig Reinigungspläne erstellt.
- **Austausch und Ergänzen von Betriebsstoffen:** Betriebsstoffe (Schmierstoffe, Kühlwasser, Dichtmaterialien, etc.) unterliegen oft thermischen, mechanischen oder chemischen Einwirkungen und müssen deshalb in vordefinierten Intervallen (Herstellerangaben) in der richtigen Art und Menge erneuert bzw. ergänzt werden. Ein Beispiel ist die Verschleißminderung durch regelmäßiges Schmieren von Reibstellen.

³⁹ vgl. Apel, 2018, S. 52f

⁴⁰ DIN31051, 2019-06, S. 5

⁴¹ vgl. Matyas, 2018, S. 35

⁴² vgl. Pawellek, 2016, S. 19

- Ergänzen und Nachladen: Typische Maßnahmen hierfür sind notwendige, obligatorische Wartungsarbeiten wie das Auf- und Nachfüllen von Hilfsstoffen oder das Laden von elektrischen Speicherelementen (Akkus).
- Konservieren: Um die Funktionalität zu erhalten und den Verschleiß zu verlangsamen, ist es oft notwendig Komponenten vor Fremdeinflüssen zu schützen. Hierzu gibt es eine Reihe unterschiedlicher Möglichkeiten (Lackieren, Kunststoffbeschichtung, etc). Häufig muss die Konservierung nach Instandsetzung oder Wartungs- und Reinigungsarbeiten wiederhergestellt werden.
- Einstellen und Justieren: Nachstellen von Maschinenelementen (Federn, Schalter, Justierschrauben etc.) ist speziell im Maschinen-, Anlagen- und Fahrzeugbau üblich.
- Auswechseln: Der Austausch von Kleinkomponenten, Verschleiß- oder Sicherungsteile ist bei Wartungsarbeiten oft nicht zu vermeiden. Beispiele sind Sicherungstifte, Nieten, aber auch Luft- und Ölfilter.^{43,44}

Ein sehr hilfreiches Werkzeug, welches der Instandhaltung eine systematische Durchführung der Wartung ermöglicht, ist ein Wartungsplan. Dieser wird in produkt- und leistungsspezifischen Wartungsintervallen ausgestellt und enthält alle notwendigen Informationen für die Wartungstätigkeit am betroffenen Objekt, sowie die verantwortliche Person. Bei richtiger Anwendung werden neben dem Status (offen, erledigt, etc.) und dem Datum der Durchführung, auch wertvolle Informationen bezüglich der Zweckmäßigkeit und Qualität der Wartungsmaßnahmen festgehalten.⁴⁵

Instandsetzung/Austausch

Trotz geeigneter Wartungsmaßnahmen lässt sich der Verschleiß der Bauteile nicht verhindern, so dass ein Ausfall zu einem nicht genau vorhersehbaren Zeitpunkt eintreten kann. Um ein Versagen der Anlage und die damit einhergehenden Risiken zu vermeiden, müssen intervallabhängige, zustandsabhängige oder auch durch die Abnutzungsgrenze bedingte Instandsetzungsmaßnahmen gesetzt werden (Abbildung 3).⁴⁶ Gemäß DIN 31051 ist die Instandsetzung definiert als:

„Physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion eines fehlerhaften Objekts wiederherzustellen.“⁴⁷

Die Wiederherstellung des Sollzustandes der Anlage ist einerseits durch Nachbesserung (Reparatur) und andererseits durch den Austausch von Komponenten möglich. Ersteres ist aufgrund der Nachhaltigkeit und möglicherweise schnelleren

⁴³ vgl. Matyas, 2018, S. 38

⁴⁴ vgl. Apel, 2018, S. 56ff

⁴⁵ vgl. Apel, 2018, S. 55

⁴⁶ vgl. Matyas, 2018, S. 39f

⁴⁷ DIN31051, 2019-06, S. 5

Umsetzung vorzuziehen, erfordert aber qualifiziertes Personal und die entsprechenden Betriebsmittel. Wenn trotz der vorbeugenden Maßnahmen ein Ausfall eintritt, muss der Funktionszustand so schnell wie möglich wiederhergestellt werden oder, falls dies nicht anders möglich ist, das System im Notbetrieb gefahren werden.⁴⁸

Verbesserung

Durch die Integration von Verbesserungen kann, wie in Abbildung 3 ersichtlich, der Abnutzungsvorrat auf mehr als 100% aufgestockt werden.⁴⁹ Sie wird nach DIN 31051 definiert als:

„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der immanenten Zuverlässigkeit und/oder Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit eines Objekts, ohne seine ursprüngliche Funktion zu ändern“⁵⁰

Ziel der Verbesserung ist es demnach, durch technische Entwicklungen die Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Sicherheit von Geräten zu erhöhen, ohne die Funktion der Geräte zu verändern. Verbesserungsmöglichkeiten ergeben sich aus technischen Entwicklungen in Form von neuen Materialien, innovativen Produkten und Verfahren und können je nach wirtschaftlichem Nutzen entlang des gesamten Lebenszyklus der Anlage integriert werden.^{51,52}

2.1.3 Grundlegende Instandhaltungsstrategien und Strategieauswahl

Die Instandhaltungsstrategie bestimmt, welche Instandhaltungsmaßnahmen (Wartung, Inspektion und Instandsetzung) zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Intensität durchgeführt werden.⁵³ Sie wird nach DIN EN 13306 definiert als:

„Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele.“⁵⁴

Ziel ist es durch eine umfassende Analyse für jede Anlage eine optimale, objektspezifische IH-Strategie zu wählen und so eine maximale Zuverlässigkeit und Lebensdauer bei minimalen Kosten zu erreichen.⁵⁵ Basierend auf dem Bezug zum Zeitpunkt des Ausfalls werden Instandhaltungsstrategien grundsätzlich in reaktive

⁴⁸ vgl. Apel, 2018, S. 59f

⁴⁹ vgl. Pawellek, 2016, S. 19

⁵⁰ DIN31051, 2019-06, S. 6

⁵¹ vgl. Matyas, 2018, S. 40f

⁵² vgl. Apel, 2018, S. 61f

⁵³ vgl. Werner et al., 2020, S. 365

⁵⁴ DIN13306, 2018-02, S. S 9

⁵⁵ vgl. Matyas, 2018, S. 120

(korrigierende nach Ausfall) und präventive (vorausschauende) Instandhaltung unterteilt (Abbildung 5).⁵⁶

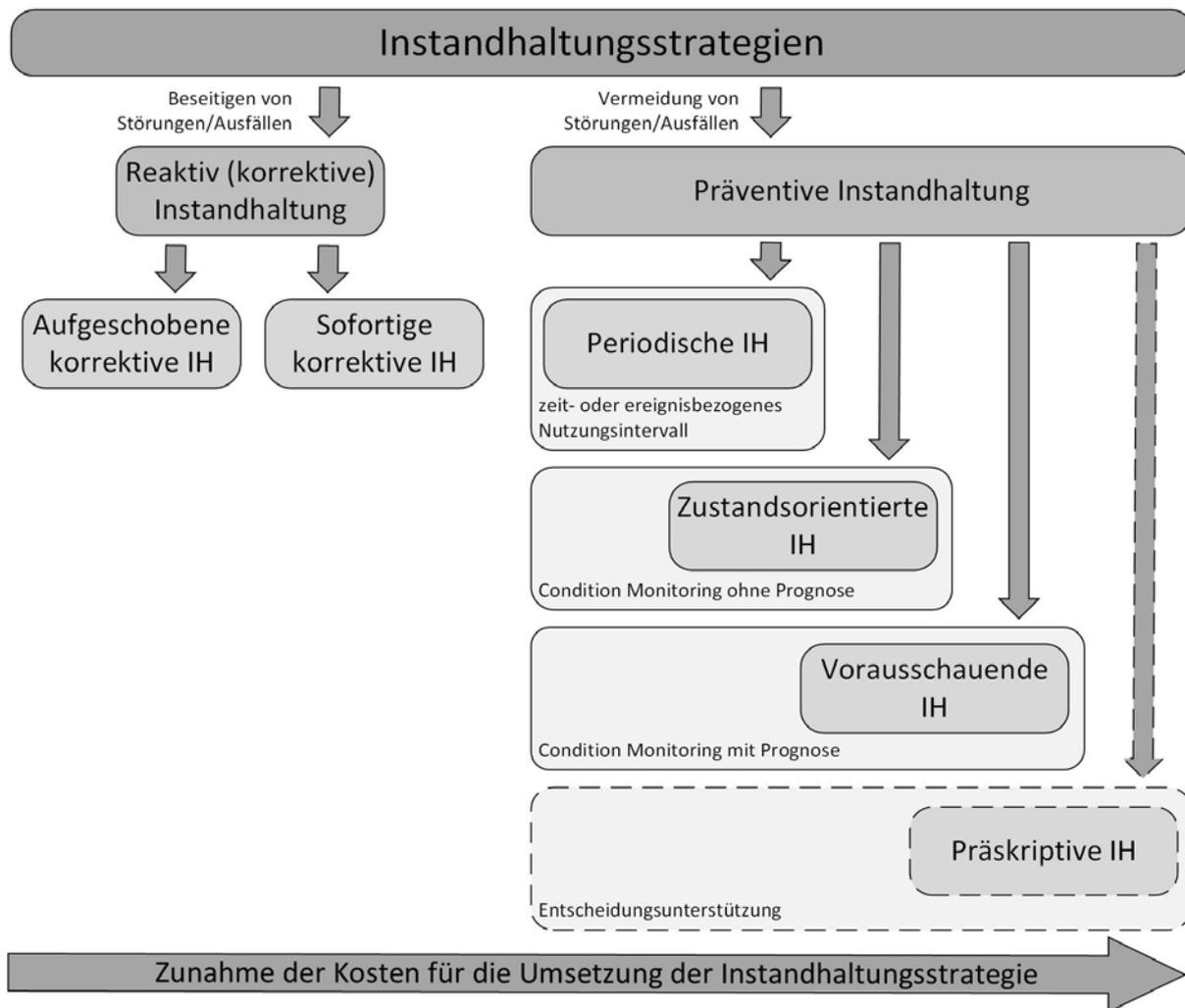


Abbildung 5: Instandhaltungsstrategien⁵⁷

Reaktive Instandhaltung (Corrective Maintenance)

Bei der reaktiven Instandhaltung, auch ausfall- oder störungsbedingte Instandhaltung genannt, wird auf jegliche vorbeugenden Maßnahmen (Wartung, Inspektion) verzichtet und die Anlage bis zum Eintritt eines Ausfalls/einer Störung oder bis zum Erreichen der Schadensgrenze (Abnutzungsgrenze) betrieben. Durch den Betrieb der Anlage bis zum Auftreten eines Schadens wird die Abnutzungsvorrat jeder Komponente voll ausgenutzt und damit ein maximales Wartungsintervall gewährleistet, andererseits können aber durch den Ausfall unvorhergesehene Folgeschäden (z.B.: Sprunghafter Anstieg der Abnutzung) an anderen Komponenten auftreten.^{58,59}

⁵⁶ vgl. Apel, 2018, S. 410

⁵⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Glawar, 2020, S. 31 und Apel, 2018, S. 410

⁵⁸ vgl. Ryll/Freund, 2010, S. 27f

⁵⁹ vgl. Pawellek, 2016, S. 174

Wie in Abbildung 5 dargestellt, unterteilt die DIN 13306 die reaktive (korrektive) Instandhaltung in sofortige und aufgeschobene korrektive Instandhaltung. Während erstere sofort nach dem Erkennen des Fehlers aktiv wird, verschiebt letztere die Instandsetzung nach definierten Instandhaltungsrichtlinien, wodurch eine gewisse Planung möglich ist.⁶⁰

Im Allgemeinen wird die reaktive Wartung nur dann eingesetzt, wenn entweder ein redundantes System vorhanden ist oder wenn eine Produktionsunterbrechung nicht zu Lieferproblemen oder Sicherheitseinschränkungen führt.⁶¹

Periodische Instandhaltung (Preventive Maintenance)

Bei der periodischen Instandhaltung wird auf Basis von Erfahrungswerten des Herstellers und des Anlagenbetreibers ein zeit- oder ereignisbezogenes Nutzungsintervall (z.B.: Kalenderzeit, Betriebsstunden, etc.) festgelegt, in dem die Komponente ausgetauscht oder instandgesetzt wird, ohne den tatsächlichen Zustand der Komponente zu berücksichtigen.^{62,63}

Die Durchführungsdauer dieser geplanten vorbeugenden Instandhaltungsmaßnahmen wird durch die ständige Wiederholung und die Planbarkeit der Instandhaltungsressourcen im Gegensatz zur reaktiven Instandhaltung deutlich verkürzt, wodurch sich die Anlagenstillstände reduzieren. Der Vorteil besteht darin, dass das Ausfallrisiko und damit die Ausfallkosten deutlich reduziert werden. Der Nachteil besteht darin, dass das Bauteil in der Regel zu früh ausgetauscht wird und damit ein gewisser Abnutzungsvorrat der Komponente verschenkt wird. Die Kosten durch die Erhöhung der präventiven Kosten (z. B.: Verbrauch von Ersatzteilen) sind vertretbar im Vergleich zur Unplanbarkeit der Maßnahmen und den zu erwartenden Folgeschäden an anderen Komponenten durch einen Ausfall. Der Vorteil dieser Strategie kann durch unvorhergesehene Ausfälle während des Intervalls gefährdet werden, welche durch eine ungenaue Berechnung oder durch die Beschleunigung der Abnutzungsgeschwindigkeit aufgrund einer intensiven oder schwankenden Nutzung der Anlage verursacht werden können.^{64,65}

Im Allgemeinen wird eine periodische Instandhaltung durchgeführt, wenn ein Ausfall eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt, wenn gesetzliche Vorschriften dies erfordern oder wenn die zu erwartende Lebensdauer von Komponenten aufgrund von Erfahrungswerten sehr gut abgeschätzt werden kann.⁶⁶

⁶⁰ vgl. DIN13306, 2018-02, S. 38

⁶¹ vgl. Pawellek, 2016, S. 174

⁶² vgl. Pawellek, 2016, S. 174f

⁶³ vgl. Ryll/Freund, 2010, S. 28

⁶⁴ vgl. Matyas, 2018, S. 122

⁶⁵ vgl. Ryll/Freund, 2010, S. 28f

⁶⁶ vgl. Ryll/Freund, 2010, S. 30

Zustandsorientierte IH (Condition Based Maintenance)

Das Ziel einer optimalen Ausnutzung der Abnutzungsvorräte wird erreicht, wenn aktuelle Zustandsinformationen der Komponenten einen Austausch kurz vor dem Auftreten des Ausfalls oder der Störung ermöglichen.⁶⁷ Bei der zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie wird dies erreicht, indem der aktuelle Zustand (Abnutzungsvorrat) der Komponente oder gegebenenfalls Abweichungen vom normalen Betriebsverhalten durch Anlagenüberwachung und -diagnose (technische Diagnostik) erfasst wird. Basierend auf diesen Erkenntnissen wird das Instandhaltungsintervall angepasst oder es werden Gegenmaßnahmen eingeleitet. Diese Strategie setzt voraus, dass Funktionsausfälle oder -störungen nicht schlagartig auftreten, wodurch es möglich ist, potenzielle Fehler (Warnsignale) einerseits durch regelmäßige Inspektionen durch Mitarbeiter oder andererseits mit Hilfe einer zyklischen oder kontinuierlichen Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) zu erkennen (Abbildung 6).^{68,69}

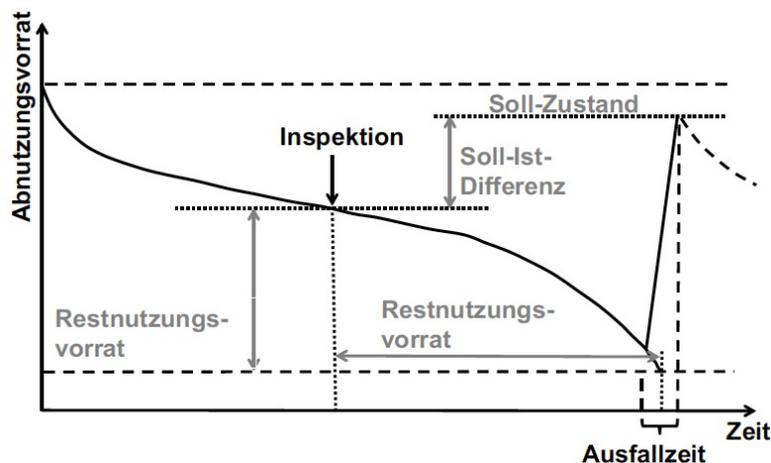


Abbildung 6: Zustandsbasierte Instandhaltungsstrategie und dessen Wirkung auf den Abnutzungsvorrat⁷⁰

Aufgrund der optimierten (reduzierten) Anzahl von Instandsetzungen ist die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie im Allgemeinen wirtschaftlicher als die periodische Instandhaltung, mit wenigen Ausnahmen, wie z. B. dem periodischen Flüssigkeitswechsel oder dem Austausch von Komponenten, deren Reparaturkosten im Verhältnis zu den Ausfallkosten sehr gering sind.⁷¹

Vorrausschauende IH (Predictive Maintenance)

Aufgrund der zunehmenden Komplexität der Produktionsprozesse kann die geforderte Anlagenverfügbarkeit mit den drei klassischen Instandhaltungsstrategien (reaktiv,

⁶⁷ vgl. Pawellek, 2016, S. 175

⁶⁸ vgl. Matyas, 2018, S. 125f; Matyas, 2018

⁶⁹ vgl. Ryll/Freund, 2010, S. 30f

⁷⁰ Pawellek, 2016, S. 176

⁷¹ vgl. Matyas, 2018, S. 124

periodisch, zustandsorientiert) oft nicht mehr gewährleistet werden. Die klassische Methode, Anlagenverfügbarkeit durch verstärkte Instandhaltungsmaßnahmen zu erkaufen, kann bei kontinuierlicher Maschinenauslastung (Massenproduktion) noch einigermaßen effektiv eingesetzt werden, funktioniert aber bei kundengetriebener Auftragsfertigung, die durch eine hohe Variation des Produktionsprogramms und inhomogene Belastungsspektren gekennzeichnet ist, nur noch bedingt. In diesen flexiblen Fertigungssystemen ist ein zeit- und verschleißoptimaler Komponententausch aufgrund fehlender Informationen über den Maschinenzustand nicht möglich, was zu einer Verschwendung von Ressourcen durch falsch geplante Instandhaltungsmaßnahmen führt.^{72,73}

Die Lösung für diese Herausforderung ist eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie, welche die Maschinen-, Produkt- und Prozessperspektive verbindet und dadurch die richtigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt zur Verfügung zu stellt. Dazu ist es notwendig, Sensordaten aus Condition-Monitoring-Systemen, Qualitäts- und Maschinendaten sowie historisches Wissen (Ausfallmuster und Maschinenbelastungen) zu kombinieren und mit Hilfe von Prognosemodellen (Data Mining, Regressionsanalyse, etc.) Ausfallzeiten und Qualitätsabweichungen zu prognostizieren. Auf dieser Basis können Instandhaltungsmaßnahmen gezielt positioniert werden.^{74,75}

Diese Instandhaltungsstrategie, welche die Frage "Was passiert wann?" beantworten soll, wird auch als "Smart Maintenance" oder "Instandhaltung 4.0" bezeichnet.⁷⁶

Präskriptive IH (Prescriptive Maintenance)

Mithilfe neuester Entwicklungen im Bereich Cyber physischen Produktionssysteme (CPPS) ist eine Entscheidungsunterstützung und Optimierung anstehender Instandhaltungsprozesse möglich. Ziel ist es, die Selbstdiagnose und selbstgesteuerte Wartung von Maschinen durch die jüngsten Verbesserungen der Selbstorganisations- und Selbststeuerungsfähigkeiten von CPPS zu erreichen.⁷⁷ Dies ermöglicht es, den zukünftigen Zustand eines Systems bestmöglich zu beeinflussen, um Risiken und Kosten zu minimieren und die Verfügbarkeit zu maximieren.⁷⁸ Derzeit befindet sich die präskriptive Instandhaltung noch im Forschungsstadium und wird in der industriellen Praxis nicht vollständig ausgeschöpft.⁷⁹

⁷² vgl. Nemeth et al., 2015, S. 569f

⁷³ vgl. Matyas, 2018, S. 137

⁷⁴ vgl. Apel, 2018, S. 421f

⁷⁵ vgl. Nemeth et al., 2015, S. 570

⁷⁶ vgl. Ansari et al., 2019, S. 485

⁷⁷ vgl. Ansari et al., 2019, S. 485

⁷⁸ vgl. Franzen/Kuhlenkötter, 2018, S. 65

⁷⁹ vgl. Ansari et al., 2019, S. 487

Einflüsse auf die Strategiewahl

Ziel bei der Wahl der Instandhaltungsstrategie ist es, die optimale Verfügbarkeit der Anlage bei angemessenen Kosten zu erreichen. Zusätzlich muss bei der Auswahl eine Abwägung zwischen Risiko, Sicherheit und Reaktionsfähigkeit getroffen werden.⁸⁰

Die Entscheidung für die zielgerichtete Festlegung der Instandhaltungsmaßnahmen wird durch

- das Ziel, welches durch die vorhergesehenen Maßnahmen verfolgt wird (z.B.: Erhaltung oder Verbesserung der Anlage),
- den Zustand in der sich die Anlage befindet und das daraus resultierende Ausfallrisiko,
- die Ausfallfolgen der betrachteten Anlage bzw. Baugruppe,
- den Zeitpunkt, die Art und die Qualität der Informationen über den Zustand der Anlage, welche gewonnen werden können (auch auf Basis von Trends),

beeinflusst.^{81,82}

Bei der Gestaltung einer Instandhaltungsstrategie für verkettete hochkomplexe Anlagen ist es aufgrund der unterschiedlichen Abnutzungsverhalten und der unterschiedlichen Bedeutung der einzelnen Anlagenteile sinnvoll, verschiedene strategische Ansätze umzusetzen. Es ist zu betonen, dass bei einer Aufschlüsselung in alle Einzelteile der Stückliste, die Kosten den Nutzen bei weitem übersteigen. Die nachfolgende dreistufige Systematik soll dabei helfen den Aufwand der Strategieauswahl zu begrenzen:

- Identifizieren von Schwachstellen und kritischen Komponenten mit Hilfe einer Anlagenanalyse der gesamten Anlage. Dabei können persönliche Erfahrungen und eine gut dokumentierte Anlagenhistorie oft sehr hilfreich sein, um einen großen Teil der gesuchten Komponenten sehr schnell und zeitsparend zu finden.
- Festlegung von komponentenbezogener Instandhaltungsstrategien.
- Bildung einer Gesamtstrategie für einzelne Baugruppen oder die gesamte Anlage unter Berücksichtigung der theoretischen und wirtschaftlichen Abhängigkeiten der Baugruppen.⁸³

Derzeit wird die Wahl der richtigen Instandhaltungsstrategie für Unternehmen durch die zunehmende Komplexität und Automatisierung von Anlagen erschwert. Zu diesem Zweck wird eine dynamische Strategieauswahl in Abhängigkeit von der

⁸⁰ vgl. Apel, 2018, S. 425

⁸¹ vgl. Apel, 2018, S. 409

⁸² vgl. Pawellek, 2016, S. 188

⁸³ vgl. Pawellek, 2016, S. 192f

Lebenszyklusphase und der Produktionsumgebung vorgeschlagen, die auf einer Kritikalitäts- und Risikobewertung basiert.⁸⁴

2.2 Instandhaltungskonzepte

In der vorliegenden Arbeit wird der Begriff Instandhaltungskonzept als ein übergeordnetes Rahmenwerk und allgemeine Prinzipien zur Erreichung der Instandhaltungsziele definiert. Die Konzepte des Instandhaltungsmanagements werden also aus der Perspektive der operativen, taktischen und strategischen Unternehmensaktivitäten betrachtet und bilden den allgemeinen Rahmen für die Entwicklung der Instandhaltungsstrategien.⁸⁵

2.2.1 Lean Maintenance (LM)

Aufgrund des zunehmenden globalen Wettbewerbsdrucks führen immer mehr Unternehmen das Konzept des Lean Managements ein, um Verschwendung zu reduzieren und die Wertschöpfung zu erhöhen und sich so den Bedürfnissen des Marktes anzupassen.^{86,87} Lean Maintenance ist Teil dieser Philosophie und zielt einerseits auf die Erhöhung der Effektivität durch Anpassung der Instandhaltungsstrategie und andererseits auf die Steigerung der Effizienz durch Optimierung der Instandhaltungsprozesse ab.⁸⁸ Zwei der verwendeten Lean Management Methoden und Tools, die in dieser Arbeit relevant sind, werden im Folgenden kurz erläutert.

5S-Methode

Sehr oft ist der erste Schritt bei der Implementierung von Lean Management die Einführung der 5S-Methode, die darauf abzielt, Arbeitsplätze in allen Bereichen des Unternehmens so zu organisieren und zu standardisieren, dass Verschwendung deutlich reduziert und Arbeitsunfälle vermieden werden.⁸⁹ In Abbildung 7 wird ein kurzer Überblick gegeben.

⁸⁴ vgl. Passath/Mertens, 2019, S. 364

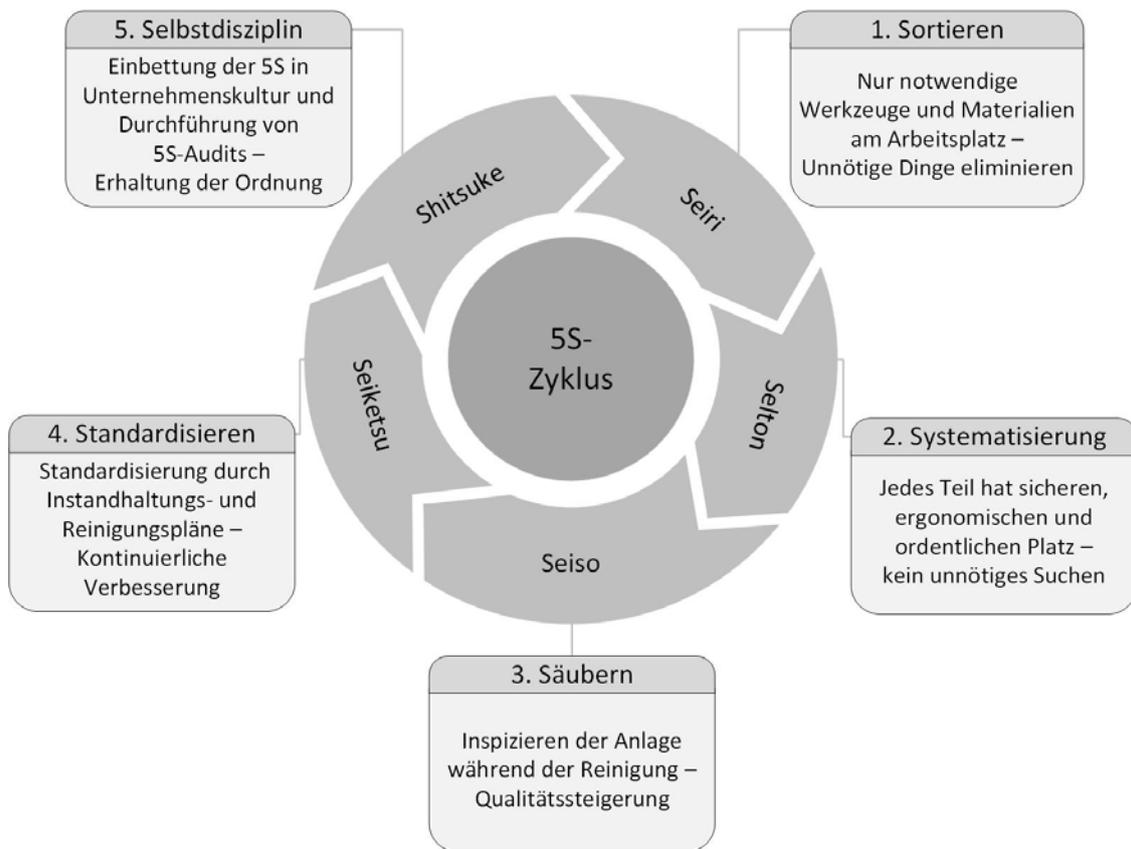
⁸⁵ vgl. Velmurugan/Dhingra, 2015, S. 1627

⁸⁶ vgl. Pawellek, 2016, S. 7

⁸⁷ vgl. Lenzian/Martin-Martin, 2016, S. 83

⁸⁸ vgl. Matyas, 2018, S. 201

⁸⁹ vgl. Dorner, 2016, S. 328

Abbildung 7: 5S-Zyklus⁹⁰

Shopfloor Management

Die Problemlösungskompetenz der Mitarbeiter hat sich als unverzichtbar für eine schnelle Problemerkennung und -lösung erwiesen. Die Einführung von Shopfloor Management auf allen Ebenen erhöht diese Schlüsselkompetenz und reduziert damit die Folgen in Form von Zeit-, Kosten- und Qualitätsverlusten. Shopfloor Management basiert auf dem Prinzip einer standardisierten, effektiven und effizienten Kommunikation und Problemlösung direkt am Ort des Geschehens. Mit Hilfe des Shopfloor-Boards wird der aktuelle Status der Abteilung zum Beispiel mit KPIs visualisiert und bietet damit einen schnellen Überblick über Informationen wie Produktion, Störungen und auch Abweichungen. Auf Basis dieser Informationen können gemeinsam Maßnahmen eingeleitet werden, welche zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse führen.⁹¹

2.2.2 Total Productive Maintenance (TPM)

Ziel des Konzepts ist es, die Anlageneffizienz durch umfassende und vorbeugende Instandhaltungsmaßnahmen über den gesamten Lebenszyklus der Anlage zu erhöhen.

⁹⁰ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Dorner, 2016, S. 329f

⁹¹ vgl. Lenzian/Martin-Martin, 2016, S. 84

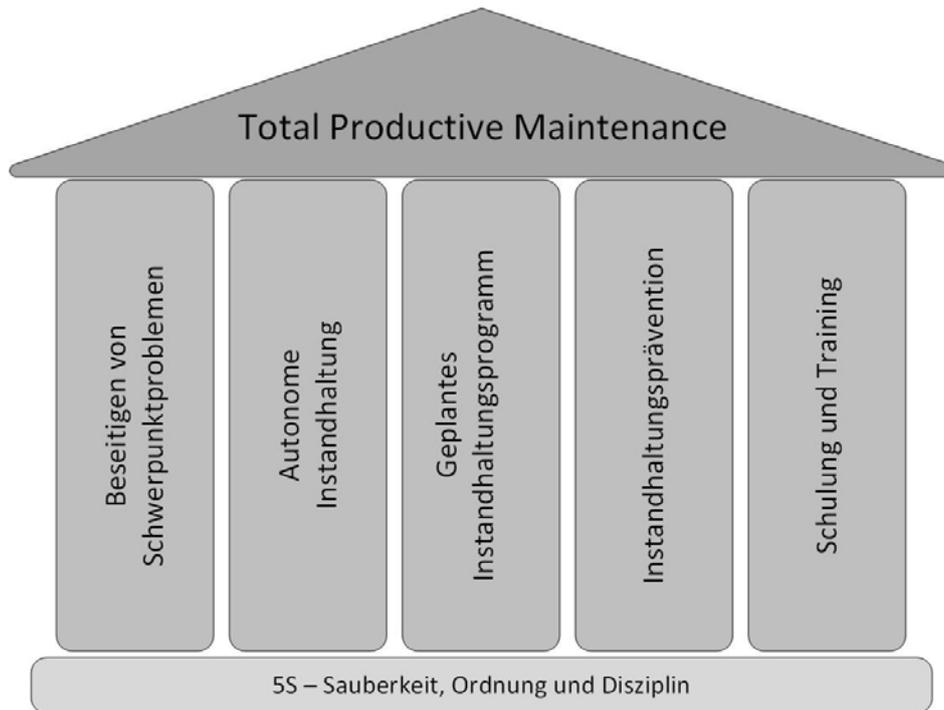


Abbildung 8: Total Productive Maintenance (TPM)⁹²

Kern von TPM ist die gemeinsame Bewältigung des steigenden Instandhaltungsaufwands infolge der Automatisierung und die damit verbundene Vervielfachung der technischen Anlagen und Komponenten unter Einbeziehung aller Abteilungen und Ebenen mit Schnittstellen zur Instandhaltung. In Abbildung 8 sind die 5 Säulen des TPM Konzepts ersichtlich mit der 5S-Methode als Fundament.^{93,94} Im Folgenden wird der Fokus auf die beiden für diese Arbeit besonders relevanten Säulen gelegt, gefolgt von einem Überblick über Kennzahlen und Kennzahlensysteme.

Autonome Instandhaltung

Die autonome Instandhaltung ermöglicht es Unternehmen, die relativ wenigen Instandhaltungsexperten zu entlasten, indem sie Routinearbeiten an das operative Produktionspersonal abgeben und dadurch Instandhaltungstätigkeiten von Mitarbeitern durchführen lassen, die täglich an und mit der Anlage arbeiten und daher spontane oder schleichende Veränderungen am ehesten wahrnehmen.^{95,96}

Abbildung 9 veranschaulicht das Verfahren zur Festlegung des gemeinsamen Aufgabenbereichs von Instandhaltungsmitarbeitern und Produktionsmitarbeiter.

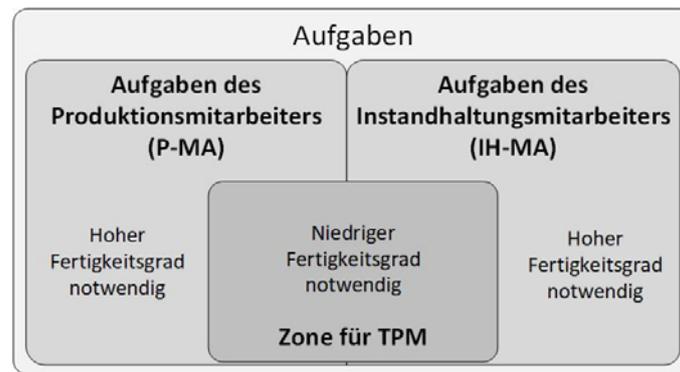
⁹² Eigene Darstellung, in Anlehnung an Pawellek, 2016, S. 6

⁹³ vgl. Pawellek, 2016, S. 5

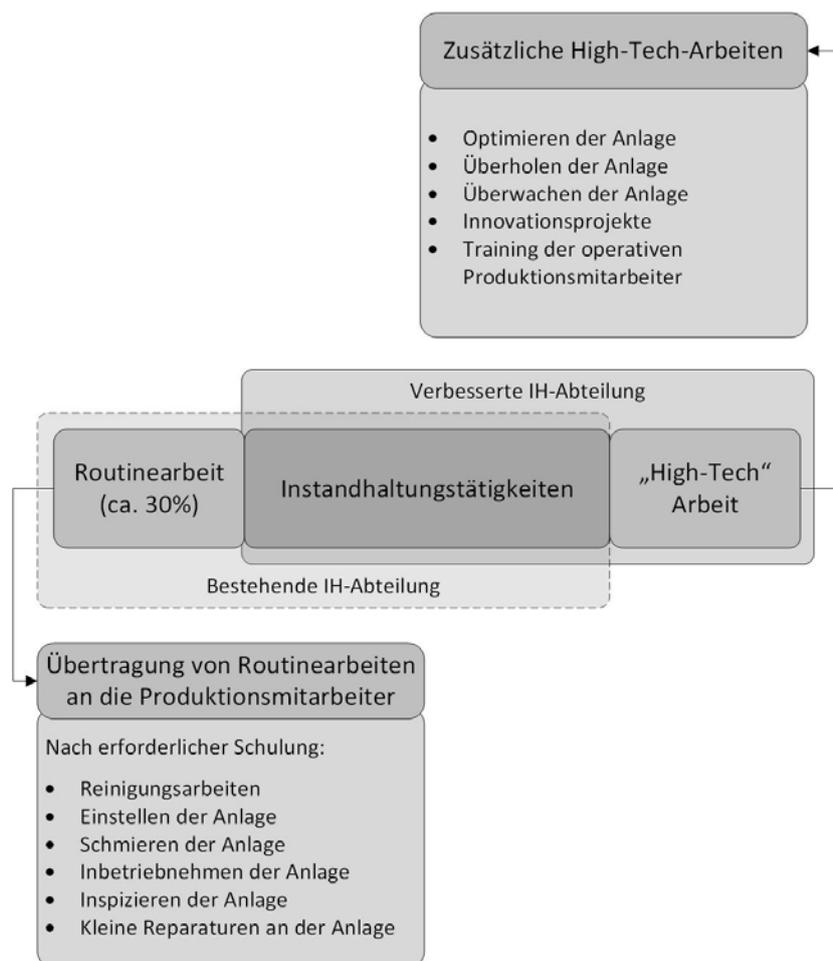
⁹⁴ vgl. Heller/Prasse, 2017, S. 5

⁹⁵ vgl. Conrad, 2016, S. 36

⁹⁶ vgl. Heller/Prasse, 2017, S. 5

Abbildung 9: Transferdiagramm für TPM-Aufgaben⁹⁷

Routinetätigkeiten eines Instandhaltungsarbeiters, die einen geringen Fertigungsgrad (z.B.: Inspektions- und Reinigungsarbeiten oder kleine Reparaturen) haben, können nach entsprechender Schulung in die Verantwortung des Produktionsmitarbeiters übertragen werden. Aufgaben mit hohem Fertigungsgrad verbleiben in der jeweils qualifizierteren Abteilung.⁹⁸

Abbildung 10: Aufgabenverlagerung durch autonome IH⁹⁹

⁹⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Matyas, 2018, S. 335

⁹⁸ vgl. Matyas, 2018, S. 235f

⁹⁹ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Matyas, 2018, S. 236

Dieser Ansatz führt zu einer strategischen Aufwertung des Instandhaltungspersonals, da es sich stärker auf seine Kernkompetenzen (z.B.: Generalüberholungen, Optimierungsarbeiten und Innovationsprojekte) konzentrieren und diese ausbauen kann (Abbildung 10).¹⁰⁰ Darüber hinaus ist das Instandhaltungspersonal in Zukunft für die notwendige Schulung der Produktionsmitarbeiter verantwortlich und wird auch in die Vorbereitung neuer autonomer Instandhaltungsaktivitäten eingebunden. Diese abteilungsübergreifende Zusammenarbeit bewirkt einen großen Schritt in Richtung hundertprozentiger Anlagenverfügbarkeit.¹⁰¹

Schulung und Training

Der notwendige Anstieg der Kompetenz und Verantwortung der Produktionsmitarbeiter muss sich auch in der Qualifizierung widerspiegeln und ist damit ein weiterer Schlüsselfaktor für die Umsetzung der TPM-Philosophie.¹⁰² Insbesondere in der Prozessindustrie sind der Ausbildungsstand und das Qualifikationsprofil für die Einführung der autonomen Instandhaltung oft nicht ausreichend.¹⁰³ Daher erfordern die veränderten Rollen des Produktions- und Instandhaltungspersonals einerseits eine Weiterbildung in technischen Kompetenzen und andererseits Schulungen in Teamarbeit und Problemlösungskompetenz. Darüber hinaus ist eine koordinierte bzw. intelligente Abstimmung von autonomer und professioneller Instandhaltung für eine effiziente Durchführung der Instandhaltungsmaßnahmen notwendig.¹⁰⁴

Kennzahlen und Kennzahlensysteme

Mit Hilfe von Kennzahlen ist es möglich, komplexe Geschäftsprozesse prägnant und objektiv darzustellen. Daher sind Kennzahlen einerseits ein ideales Instrument zur Identifikation von Kostentreibern und Ursachen-Wirkungs-Zusammenhänge sowie andererseits eine Entscheidungshilfe (festlegen von Planwerten und korrigierende Maßnahmen) im Hinblick auf die Erreichung der definierten Unternehmensziele. Grundvoraussetzung für Kennzahlen ist die zeitgerechte Verfügbarkeit und Benutzerfreundlichkeit sowie die Spezifizierung des Informationsbedarfs auf die unterschiedlichen Ebenen des Unternehmens.^{105,106}

¹⁰⁰ vgl. Heller/Prasse, 2017, S. 102

¹⁰¹ vgl. Matyas, 2018, S. 236

¹⁰² vgl. Conrad, 2016, S. 37

¹⁰³ vgl. Pawellek, 2016, S. 5f

¹⁰⁴ vgl. Reichert et al., 2018, S. 55

¹⁰⁵ vgl. Pawellek, 2016, S. 78

¹⁰⁶ vgl. Matyas, 2018, S. 97

Die Balanced Scorecard (BSC) ist ein Kennzahlensystem, welches die monetäre und nicht-monetäre Leistung des Unternehmens misst und eine an der Unternehmensstrategie orientierte Steuerung ermöglicht.¹⁰⁷

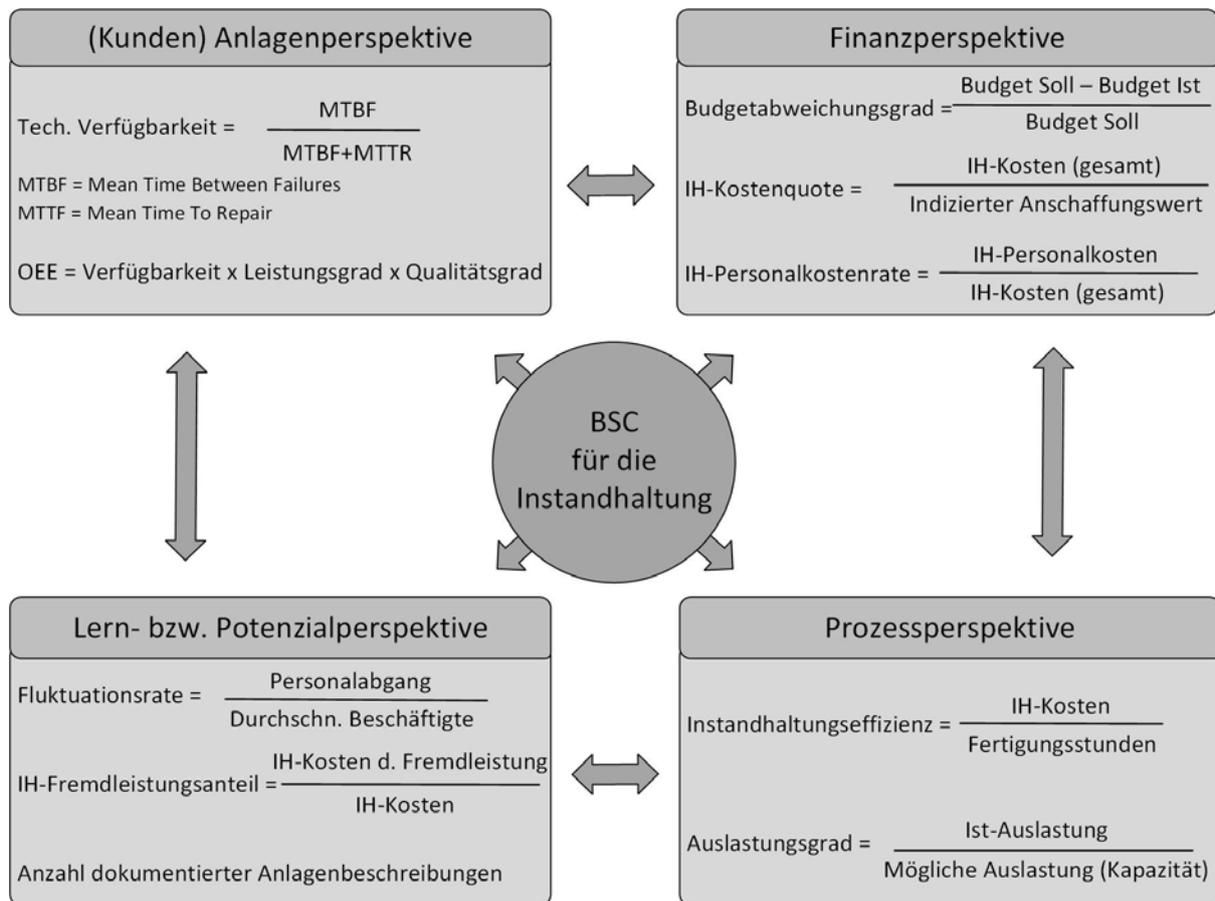


Abbildung 11: Balanced Scorecard für die Instandhaltung¹⁰⁸

Die BSC unterscheidet generell zwischen der Finanzperspektive, der Prozessperspektive, der Lern- und Potenzialperspektive und der (Kunden) Anlagenperspektive.¹⁰⁹ In Abbildung 11 wird eine BSC mit Kennzahlen speziell für die Instandhaltung dargestellt.

In Abbildung 12 wird die Gesamtanlageneffektivität (Overall Equipment Effectiveness, OEE) ausführlicher behandelt, da sie eine kompliziertere Struktur aufweist. Der OEE zielt auf die Beseitigung der sechs Hauptverlustquellen ab und wird oft als Schlüsselkennzahl im TPM bezeichnet.¹¹⁰ Damit diese als Entscheidungshilfe funktionieren kann, muss die Kennzahl ermittelt und grafisch aufbereitet werden. So können Verlustquellen und Schwachstellen erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Generell ist zu betonen, dass die OEE zur Überwachung einzelner

¹⁰⁷ vgl. Pawellek, 2016, S. 89

¹⁰⁸ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Pawellek, 2016, S. 94ff und Apel, 2018, S. 519f

¹⁰⁹ vgl. Matyas, 2018, S. 105

¹¹⁰ vgl. Ryll/Freund, 2010, S. 81

Anlagen oder des gesamten Produktionsbereichs eingesetzt werden kann und keinen Einblick in die Ursache der auftretenden Verluste gibt.¹¹¹

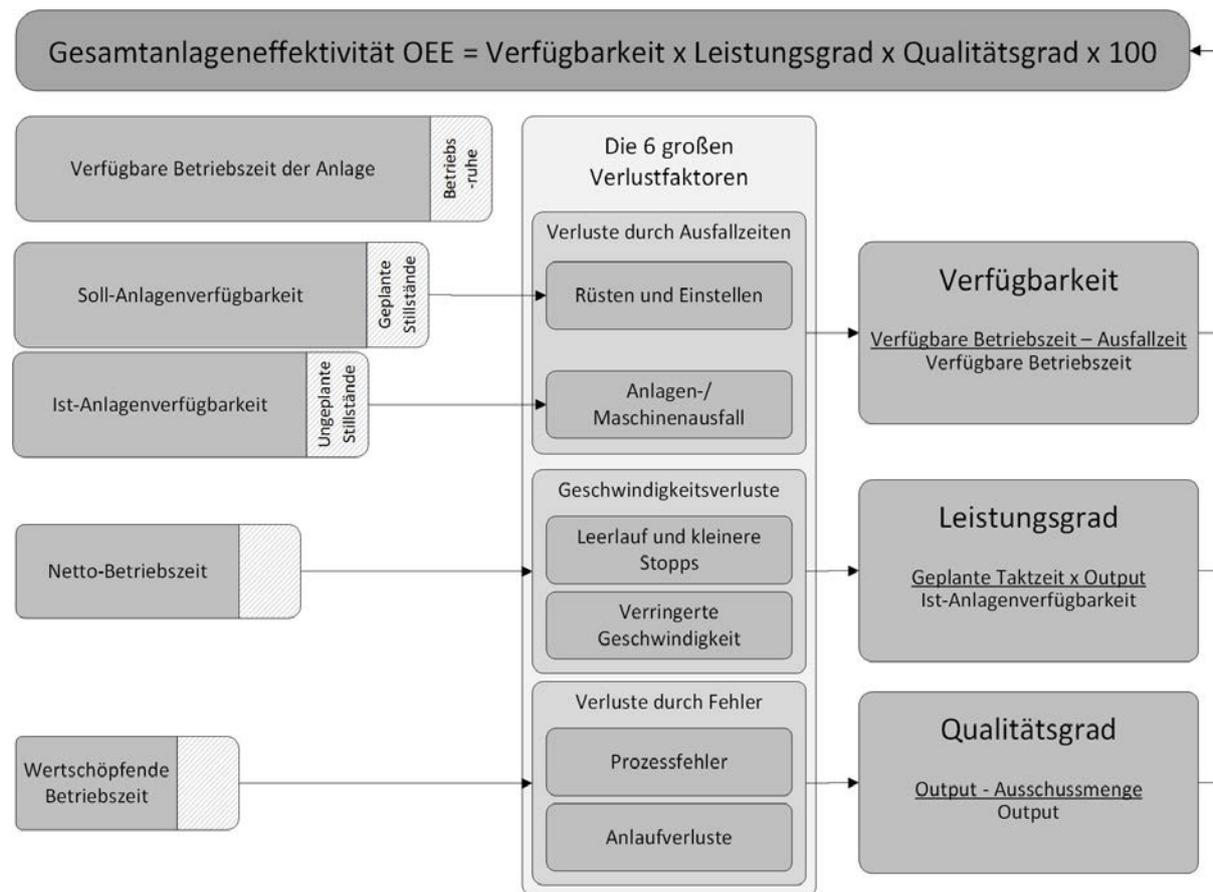


Abbildung 12: Gesamtanlageneffektivität OEE¹¹²

2.2.3 Risk Based Maintenance (RBM)

Durch eine individuelle, risikoorientierte Strategiewahl ist es möglich, das Ziel einer wirtschaftlich sinnvollen Instandhaltung mit maximaler Zuverlässigkeit bei minimalen Instandhaltungs- und Ausfallkosten zu erreichen.^{113,114}

Im ersten Schritt ist zu definieren, welche Funktion und damit verbundene Leistung der Prozess bzw. die Anlage unter gegebenen Betriebsbedingungen erfüllen soll. Basierend auf diesen Informationen werden mit Hilfe einer Wertstromanalyse kritische Systeme identifiziert, die aufgrund der weitreichenden Auswirkungen im Falle eines Stillstands für eine Risikobewertung in Frage kommen. Mögliche Fehlerfolgen, welche Einfluss auf die Klassifizierung der Anlage haben, sind z. B. die Verkettung der Anlage, die Redundanz von Anlagen, Sicherheits- und Umweltaspekte sowie die Verfügbarkeit von Ersatzteilen. Im nächsten Schritt ist es notwendig, die ausgewählten kritischen

¹¹¹ vgl. Matyas, 2018, S. 226

¹¹² Eigene Darstellung, in Anlehnung an Matyas, 2018, S. 225ff und Pawellek, 2016, S. 89

¹¹³ vgl. Matyas, 2018, S. 145

¹¹⁴ vgl. Apel, 2018, S. 425

Anlagen zu analysieren und herauszufinden, welche Fehler auftreten können (Fehlerart) und wodurch sie verursacht werden (Fehlerursache). Bevor die Strategie ausgewählt werden kann, muss eine Risikobewertung der Anlage durchgeführt werden. Diese Bewertung kann entweder monetär oder nichtmonetär mithilfe von Risikoprioritätszahlen erfolgen.¹¹⁵ Wenn entsprechende Daten zur Ausfallhäufigkeit vorliegen, ist ersteres zu bevorzugen, da die finanzielle Betrachtung eine bessere Vergleichbarkeit der verschiedenen Dimensionsausprägungen ermöglicht.¹¹⁶

Wie in Formel 1 dargestellt, wird das Risiko R [€] durch Multiplikation des Schadensausmaßes S [€/Ereignis] mit der Ausfallhäufigkeit H [Ereignis/Jahr] berechnet.

$$R = S * H$$

Formel 1: Berechnung des Risikos¹¹⁷

Das Schadensausmaß S umfasst sowohl die direkten Instandhaltungskosten K [€] als auch die Kosten der Leistungsminderung, welche sich aus dem Wert der Leistungseinschränkung W [€/Leistung], der Instandsetzungsdauer t [Zeit] und dem Ausmaß der Leistungseinschränkung L von 0 bis 1 zusammensetzt (Formel 2).

$$S = W * t * L + K$$

Formel 2: Berechnung des Schadensausmaßes¹¹⁸

Mit Hilfe einer Risikomatrix (Abbildung 13) ist es möglich, die nicht-monetäre Bewertung der Komponenten, aber auch die monetäre Bewertung der Komponenten durch Einteilung in Häufigkeits- und Schadensklassen zuzuordnen und so einen Überblick zu erhalten.¹¹⁹

Basierend auf der durchgeführten Risikoanalyse kann schließlich für jede Komponente je nach Bedarf eine korrektive oder vorbeugende Instandhaltungsstrategie festgelegt werden. Erstere wird vor allem bei nichtkritischen Komponenten mit niedrigem Schadensausmaß und niedriger Ausfallhäufigkeit eingesetzt. Bei hohem Schadensausmaß oder hoher Ausfallhäufigkeit wird je nach Möglichkeit der Zustandserfassung und Dokumentation des Ausfallverhaltens der Komponente zwischen der zustandsorientierten und der periodischen Instandhaltungsstrategie entschieden. Die vorausschauende Instandhaltungsstrategie wird, wenn technisch möglich, bei Komponenten mit hohem Schadensausmaß und hoher Ausfallhäufigkeit

¹¹⁵ vgl. Matyas, 2018, S. 147ff

¹¹⁶ vgl. Pawellek, 2016, S. 180

¹¹⁷ vgl. Pawellek, 2016, S. 181

¹¹⁸ vgl. Pawellek, 2016, S. 181

¹¹⁹ vgl. Pawellek, 2016, S. 181f

angewendet.^{120,121} Erfahrungsgemäß beträgt dieser Anteil nur ca. 10% der Gesamtkomponenten im Kraftwerksbereich bzw. in der Verfahrenstechnik.^{122,123}

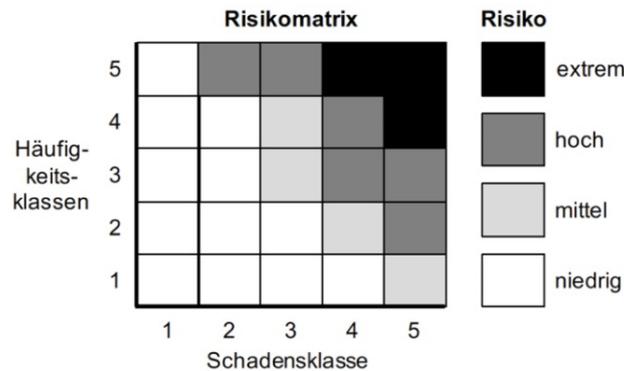


Abbildung 13: Risikomatrix¹²⁴

2.2.4 Knowledge Based Maintenance (KBM)

Das Konzept der Knowledge Based Maintenance beziehungsweise der wissensbasierte Instandhaltung geht davon aus, dass mit den klassischen Konzepten (Kapitel 2.2.1-2.2.3) kein ausreichender Wettbewerbsvorteil erzielt werden kann, da die Kosten zumeist auf Personal- und Steuerbelastungen zurückzuführen sind. Die geforderte Kostensenkung in der Instandhaltung muss daher durch Leistungsoptimierung (Effizienzsteigerung und Qualität) mit Hilfe der richtigen Wahl der Instandhaltungsstrategie realisiert werden.¹²⁵

Das KBM-Konzept berücksichtigt die langfristigen, wirtschaftlichen Auswirkungen von Strategieentscheidungen. Durch die ganzheitliche Betrachtung aller Komponenten wird versucht eine Groboptimierung zu erreichen und damit das Konfliktpotenzial zu minimieren, welches sich aus der Optimierung durch einzelne Ansätze in einzelnen Bereichen ergibt. Um diese übergreifende Instandhaltungsstrategie zu ermöglichen, ist eine Vereinigung der drei klassischen Vorgehensweisen notwendig (Abbildung 14).^{126,127} Voraussetzung dafür ist das Sammeln von Informationen über Schäden an Anlagen und Komponenten (Maschinen-, Prozess- und Produktdaten) und das Kombinieren von im Unternehmen verteilte Wissen (strategische, taktische und operative Ebene). Anhand der gesammelten Daten lassen sich die Auswirkungen und Folgen der Instandhaltungsintensität untersuchen und die Risiken abschätzen. Außerdem kann durch eine detaillierte Betrachtung bis auf die Objektebene der

¹²⁰ vgl. Apel, 2018, S. 425

¹²¹ vgl. Matyas, 2018, S. 157f

¹²² vgl. Matyas, 2018, S. 151

¹²³ vgl. Pawellek, 2016, S. 181

¹²⁴ Pawellek, 2016, S. 181

¹²⁵ vgl. Pawellek, 2016, S. 9

¹²⁶ vgl. Matyas, 2018, S. 327f

¹²⁷ vgl. Nemeth et al., 2018, S. 1040

Anlagenzustand bestimmt werden und zudem durch die gewählte Instandhaltungsstrategie die Organisation bzw. die Abläufe des Unternehmens ermittelt werden.^{128, 129}

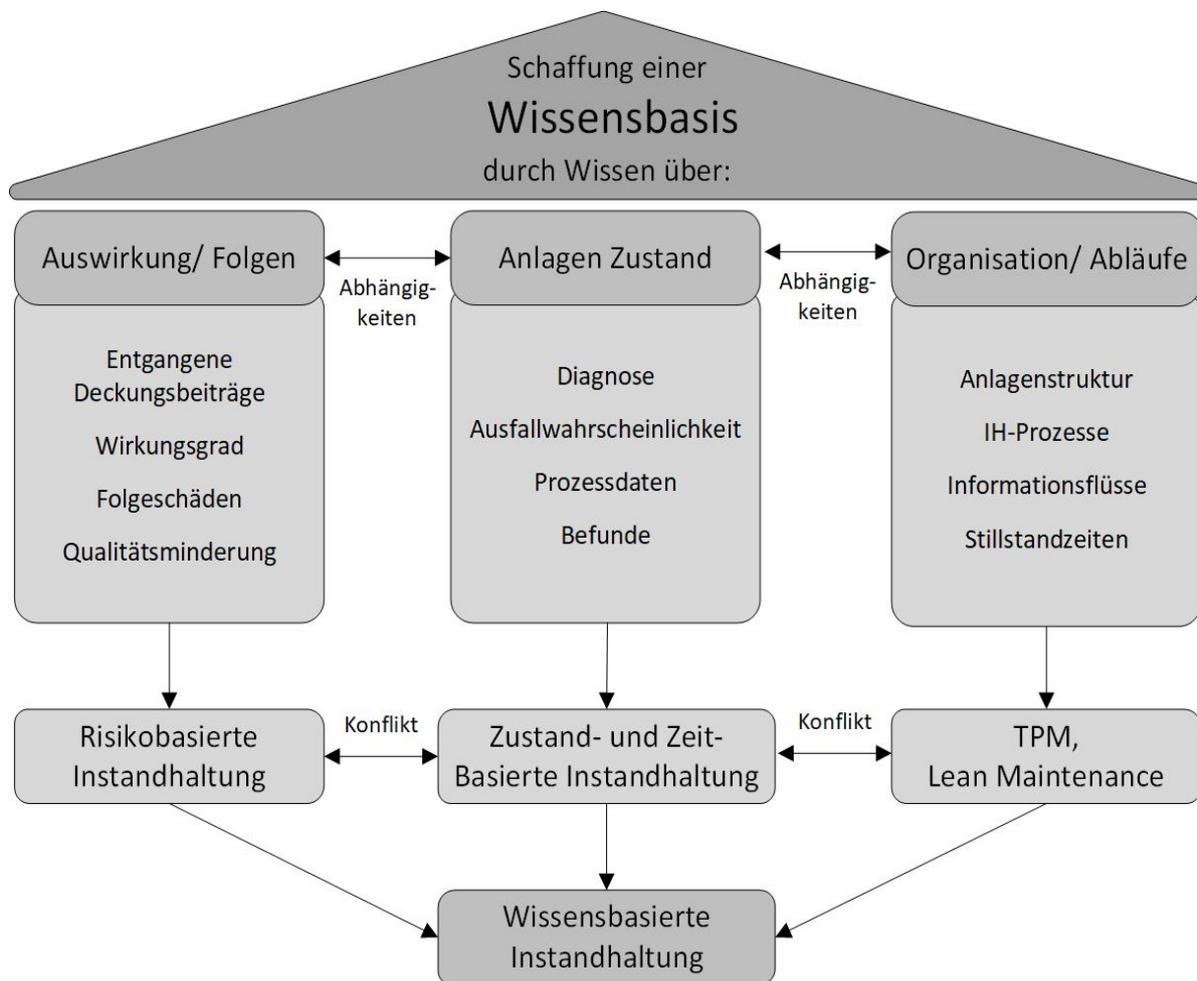


Abbildung 14: Knowledge Based Maintenance (KBM)¹³⁰

2.2.5 Lean Smart Maintenance (LSM)

Die stark zunehmende Digitalisierung und Automatisierung durch die vierte industrielle Revolution (Industrie 4.0) und die damit verbundene Komplexität von Produktionsanlagen hat die Anforderungen an das Instandhaltungsmanagement enorm verändert.¹³¹ Insbesondere das leistungsfähige Toolset aus Internet der Dinge (Internet of Things - IoT) und Cyber-physische Systeme (Cyber-Physical Systems - CPS) der Industrie 4.0 hat die Entwicklung hin zu einer smarten Fabrik vorangetrieben.¹³² Daher werden diese Begriffe nachfolgend kurz erläutert.

¹²⁸ vgl. Pawellek, 2016, S. 10

¹²⁹ vgl. Ansari et al., 2019, S. 485

¹³⁰ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Pawellek, 2016, S. 10 und Ansari et al., 2019

¹³¹ vgl. Jasiulewicz-Kaczmarek et al., 2020, S. 77

¹³² vgl. Jantunen et al., 2019, S. 67

- **Internet of Things (IoT)**

Eine der wichtigsten Grundlagen für die 4. industrielle Revolution (Industrie 4.0) ist das Internet of Things (IoT). Dabei handelt es sich um ein Netzwerk, welches physische Objekte (Anlagen, Werkzeuge, etc.) aus der realen Welt, welche mit Elektronik, Software, Sensoren und Netzwerkkonnektivität ausgestattet sind, mit der virtuellen Welt verbindet. Objekte sind eindeutig identifizierbar und können selbstständig miteinander interagieren, wodurch Prozesse intelligenter und effizienter werden und in der Folge einen höheren Grad an Automatisierung ermöglichen.^{133,134}

- **Cyber-Physical-Systems (CPS)**

Cyber-physische Systems werden oft als transformative Technologien definiert, die das Management vernetzter Systeme zwischen ihren physischen Assets und ihrer Rechenleistung ermöglichen.^{135,136}

Der Aufbau eines Cyber-physischen Systems wird in Abbildung 15 dargestellt. Informatische, mechanische und elektronische Komponenten sind die Grundelemente des Cyber-physischen Systems. Darüber hinaus stehen Schnittstellen für die Energieversorgung, für die Kommunikation mit lokalen Netzwerken, dem Internet und der Cloud sowie für die Interaktion mit der Systemumgebung zur Datengenerierung (Sensoren) und zur Beeinflussung durch die Umsetzung realer Prozesse (Aktoren) zur Verfügung. Der Prozessor wird für die Steuerungs-, Kontroll- und Auswertungsaufgaben benötigt.¹³⁷ Basierend auf einer Studie der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften aus dem Jahr 2012 werden CPS als eingebettete Systeme definiert, die

- mithilfe von Sensoren physische Daten generieren und mittels Aktoren reale Vorgänge beeinflussen,
- Daten sichern und verarbeiten und daraus Handlungen ableiten,
- eine Verbindung durch Kommunikationsschnittstellen (lokal/global und drahtlos/drahtgebunden) gewährleisten,
- eine ortsunabhängige Nutzung von bereitstehenden Daten und Diensten nutzen und anbieten,
- Möglichkeiten zur Kommunikation und Steuerung in Form von Mensch-Maschine-Schnittstellen bereitstellen.¹³⁸

Die komplexen und datengetriebenen Eigenschaften von CPPS stellen Instandhaltungsstrategien im Zeitalter von Industrie 4.0 vor die Herausforderung die

¹³³ vgl. Pistorius, 2020, S. 9

¹³⁴ vgl. Kumar/Galar, 2018, S. 233

¹³⁵ vgl. Jantunen et al., 2019, S. 69

¹³⁶ vgl. Kumar/Galar, 2018, S. 234

¹³⁷ vgl. Pistorius, 2020, S. 10f

¹³⁸ vgl. Geisberger/Broy, 2012, S. 22

Vorhersage-, Anpassungs- und Optimierungsfähigkeiten in horizontal und vertikal integrierten CPPS-Umgebungen weiterzuentwickeln.¹³⁹

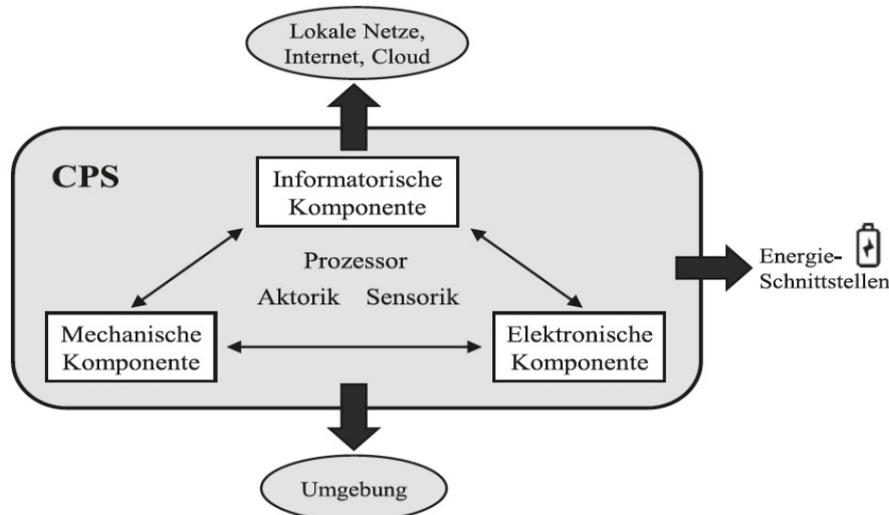


Abbildung 15: Aufbau von Cyber-physischen Systemen¹⁴⁰

Durch diese Technologien sind Unternehmen in der Lage, tiefe Einblicke in Prozesse zu gewinnen, indem sie die aufgezeichneten Datenmengen analysieren und damit ein neues Maß an Effizienz und Effektivität erreichen.¹⁴¹ Derzeit gibt es in der Forschung jedoch noch keinen Konsens darüber, was ein Instandhaltungskonzept im Zeitalter von Industrie 4.0 genau ausmacht. Dieser Mangel an Begriffsklarheit hat zur Verbreitung mehrerer verwandter und sich überschneidender Konzepte mit unterschiedlichen Namen geführt. Die dadurch entstandenen Schlüsselwörter sind „e-Maintenance“, „digital Maintenance“, „Maintenance 4.0“, „Predictive Maintenance“, „Smart Maintenance“ und „Lean Smart Maintenance“.^{142,143,144} Die Gemeinsamkeit dieser Konzepte besteht in der Kombination von Lean-Management-Tools, Risikoanalyse und Datenanalyse sowie der Anwendung digitaler Enablers zur Maximierung der Anlagenverfügbarkeit.

2.3 Charakteristika der kontinuierlichen Prozessindustrie

Die Prozessindustrie (grundstoffverarbeitende Industrie) ist in etlichen Aspekten nicht mit der Fertigungsindustrie vergleichbar. In Tabelle 1 sind einige Charakteristika der Prozessindustrie aufgelistet, die sich von denen der Fertigungsindustrie unterscheiden.

¹³⁹ vgl. Ansari et al., 2020, S. 1

¹⁴⁰ Pistorius, 2020, S. 11

¹⁴¹ vgl. Bernerstätter/Kühnast, 2019, S. 21

¹⁴² vgl. Ansari et al., 2019, S. 483

¹⁴³ vgl. Bokrantz et al., 2020, S. 2

¹⁴⁴ vgl. Ansari et al., 2020, S. 1

Tabelle 1: Prozessindustrie vs. Fertigungsindustrie¹⁴⁵

Charakteristika der Prozessindustrie	Charakteristika der Fertigungsindustrie
Vernetzte, teilweise zyklische Materialflüsse	unabhängige Materialflüsse
Lagerung der begrenzt haltbaren Zwischenprodukten in produktspezifischen Tanks oder Silos	Einfache Lagerung der Halbzeuge zwischen den Fertigungsstufen (Puffer)
Nicht-unterbrechbare Produktionsvorgänge	Unterbrechbare Produktionsvorgänge
Reihenfolge- bzw. einsatzdauerabhängige Reinigungsprozesse	Unabhängige Reinigungsprozesse
Kontinuierliche als auch chargenweise Produktion (Batchproduktion)	Diskrete Produktionseinheiten, d.h. teilebezogene Fertigung- und Montageprozesse

Die Wertschöpfung in der Prozessindustrie wird durch physikalische Vorgänge (Mischen, Separieren, Umformen) und/oder chemische Reaktionen erzielt und erfolgt entweder als Batch-Produktion (Produktion in Losen) oder als kontinuierliche Produktion. Die in der Prozessindustrie verarbeiteten und produzierten Materialien sind sehr vielfältig (gasförmig, flüssig, fest und mehrphasig) und unter bestimmten Bedingungen oft giftig, entflammbar oder explosiv, weshalb Sicherheits- und Umweltschutzaspekte von zentraler Bedeutung sind. Aufgrund der hohen Investitionskosten (Planung, Material, Arbeit etc.) und der hohen Betriebskosten (Roh- und Betriebsstoffe, Instandhaltung, eingesetztes Personal etc.) sind Prozessanlagen sowohl in der Errichtung als auch im Betrieb sehr teuer und zudem stark abhängig von den Ressourcen Wasser und Energie. Häufig entstehen neben dem Hauptprodukt (Zwischen- oder Endprodukt) auch Kuppelprodukte (Dampf, Energie etc.), Nebenprodukte und Abfallprodukte. Während Kuppel- und Nebenprodukte entweder in Folgeprozessen genutzt oder durch Wiederaufbereitung erneut im Produktionsprozess verwendet werden können, sind die Abfallprodukte oft umweltgerecht (kostenintensiv) zu entsorgen. Beispiele für die Prozessindustrie sind Hersteller von chemischen Produkten, Papier, Lebensmittel, Stahl, Gummi etc. ^{146,147}

In der vorliegenden Arbeit wird in Anlehnung an Felix et al. (2015) die kontinuierliche Prozessindustrie (kontinuierliche Fertigungsart der Prozessindustrie) durch

- teure Produktionsinfrastruktur,
- hohe Produktionsgeschwindigkeit und kurze Durchlauf- und Durchsatzzeiten,
- Kapazitätsrestriktionen (Ausbringungsmenge im direkten Zusammenhang mit dem Faktoreinsatz),
- einen Ablauf für alle Produkte und somit geringer Produktvarianz und
- nicht unterbrechbare Produktionsvorgänge

definiert.

¹⁴⁵ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Felix et al., 2015, S. 30

¹⁴⁶ vgl. Schönsleben, 2020, S. 353f

¹⁴⁷ vgl. Brennan, 2020, S. 2f

3 State-of-the-Art

Zuerst wird eine umfassende und systematische Literaturrecherche mit definierten Schlagwörtern durchgeführt. Anschließend wird die ausgewählte Literatur analysiert und der komplexe Betrachtungsgegenstand mit Hilfe eines morphologischen Kastens mit zuvor definierten Dimensionen bestmöglich erfasst und bewertet. Abschließend wird der Forschungsbedarf abgeleitet und die Anforderungen für ein Lean Smart Maintenance Konzept definiert.

3.1 Systematische Literaturrecherche

In Abbildung 16 wird das Vorgehen der systematische Literaturrecherche dargestellt.

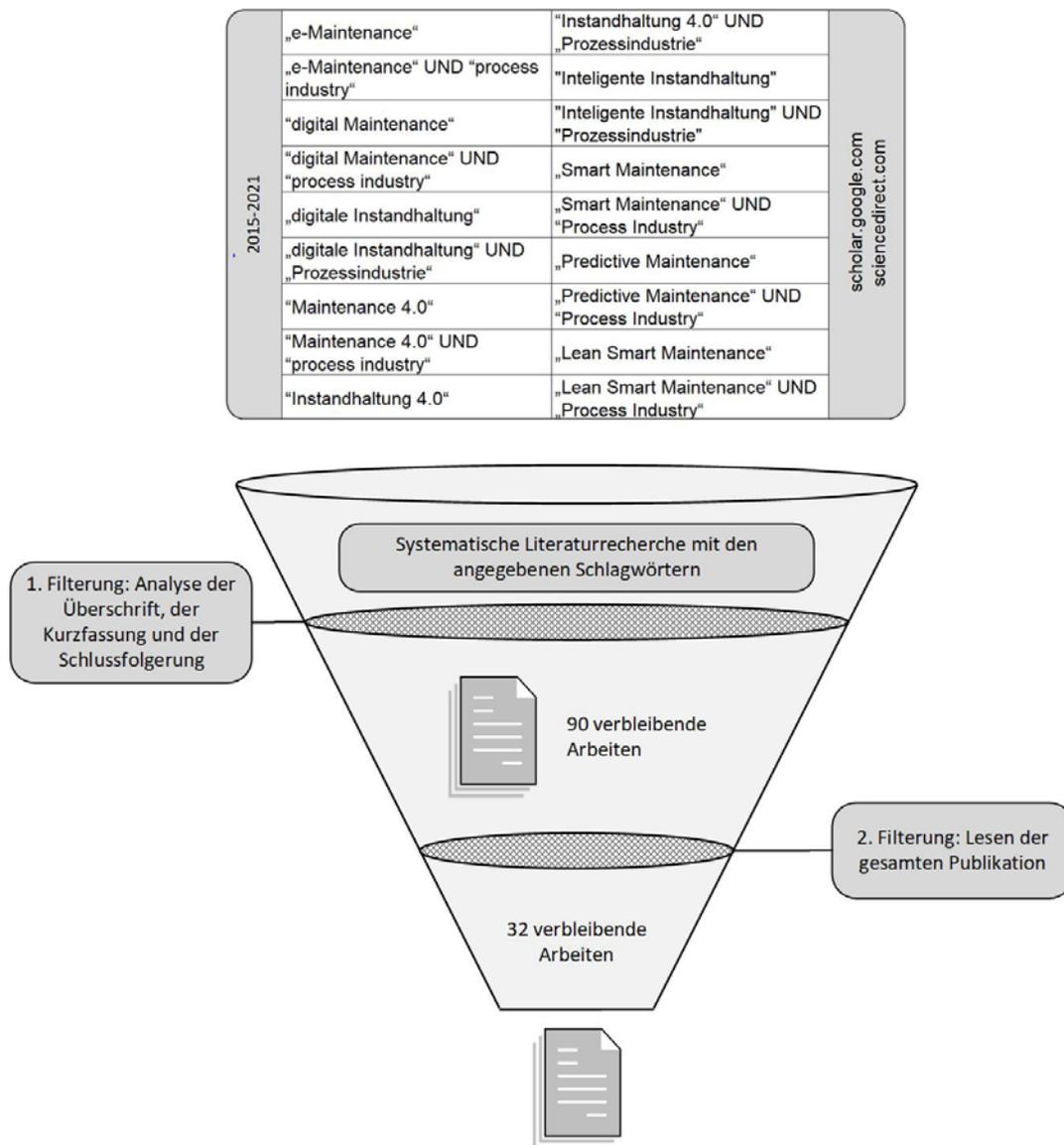


Abbildung 16: Systematische Literaturrecherche¹⁴⁸

¹⁴⁸ Eigene Darstellung

Die Schlüsselwörter für die Literaturrecherche wurden auf der Grundlage der verschiedenen Bezeichnungen (Kapitel 2.2.5) für Instandhaltung im Zeitalter von Industrie 4.0 ausgewählt. Die zahlreichen Arbeiten und Studien der umfassenden Recherche wurden anschließend anhand von Titel, Kurzfassung und Schlussfolgerung gefiltert und auf 90 relevante Publikationen reduziert. Schließlich wurden die verbleibenden Artikel und Studien durch eine sorgfältige Analyse auf die für diese Arbeit relevanten 32 Veröffentlichungen reduziert.

3.2 Auswahl der Dimensionen

Im Folgenden werden Dimensionen definiert, um die komplexe Thematik der ausgewählten Publikationen und Studien bestmöglich zu erfassen und zu bewerten.

In mehrere Publikationen wird darauf hingewiesen, dass einerseits durch die zunehmende Komplexität und Automatisierung und andererseits durch die ständige Änderung der Rahmenbedingungen die Wahl der optimale Instandhaltungsstrategiewahl erschwert wird. Diese Problematik soll durch eine Kritikalitäts- und Risikobewertung sowie eine Schwachstellenanalyse der Anlagen während der Lebenszyklusphasen bewältigt werden. Ziel ist es, mit Hilfe einer dynamischen Anlagenkritikalitätsbewertung (Anlagenkritikalitätsindex) eine Anpassung der anlagenbezogenen Instandhaltungsstrategie entlang des Lebenszyklus der Anlage zu erreichen.^{149,150,151}

Die nächsten Dimensionen beziehen sich auf Methoden des Lean Managements. Um die Effizienz und Effektivität von Strategie und Ausführung der Instandhaltung zu messen, wird als erstes Kriterium ein Soll/Ist- und Zeitvergleich mit einem an einer Balanced Score Card orientierten KPI-System vorgeschlagen. Die Key Performance Indicators (KPIs) beziehen sich sowohl auf die quantitative finanzielle Perspektive als auch auf die Prozesseffizienz, die Kundenorientierung sowie die Mitarbeiter- und Wachstumsperspektive.^{152,153} Die nächste Dimension zielt darauf ab, eines der Hauptziele jedes Unternehmens zu erreichen, nämlich die Lebensdauer der Ausrüstung (Anlagen und Werkzeuge) zu verlängern und gleichzeitig kostspielige Reparaturen zu vermeiden. Dies kann in erster Linie durch gut geschultes Bedienerpersonal erreicht werden, welches durch Routineinspektionen kleinere Schäden erkennen kann, bevor diese zu einem größeren Problem werden. Die Dokumentation der Inspektionen und kleinen Reparaturen hilft zum einen, die

¹⁴⁹ vgl. Passath/Mertens, 2019, S. 364

¹⁵⁰ vgl. Biedermann, 2016a, S. 12

¹⁵¹ vgl. Passath/Huber, 2019, S. 8

¹⁵² vgl. Biedermann, 2016a, S. 13

¹⁵³ vgl. Biedermann/Kinz, 2019, S. 15

Instandhaltungsarbeiten der einzelnen Maschinen zu verfolgen und zum anderen, individuelle Wartungspläne zu erstellen.¹⁵⁴

Im Zeitalter von Industrie 4.0 bieten sich digitale Enabler zur effizienten Dokumentation und Visualisierung von Instandhaltungsarbeiten an. Für die schnelle und einfache Erfassung von Störungen und Instandhaltungsbedarfe sind digitale Enabler für Anlagenbediener und Instandhalter sehr gut geeignet. Eine ordnungsgemäße Umsetzung verspricht erhebliche Effizienzgewinne durch effektiven Personaleinsatz, kürzere Reaktionszeiten, die Beseitigung unnötiger Prozessschritte und eine verbesserte Ausführung. Bei der korrekten Umsetzung sollte vor allem auf die Rückmeldungen (Dokumentation) an das System und damit auf das Schließen des Informationskreislaufes geachtet werden.^{155, 156}

Der letzte Schritt bei der Einführung eines Konzepts ist die nachhaltige Integration in das gesamte Unternehmen. Mit Hilfe von Qualifikationsprofilen (Qualifikationsmatrizen) kann die Wissensdokumentation und -entwicklung eines jeden Mitarbeiters nachvollziehbar erfasst werden.¹⁵⁷ In diesem Zusammenhang erscheint es besonders wichtig, Wissens- und Kompetenzverlusten durch ein umfassendes Wissensmanagement entgegenzuwirken. Die durch die Extraktion, Aufbereitung und Weitergabe von Daten gewonnenen Informationen bilden die Grundlage, um einerseits den Wissenserwerb zu erleichtern und langfristig zu sichern und andererseits die Unternehmensziele dauerhaft zu erfüllen.¹⁵⁸ Für die Einführung und weitere Optimierung der Methoden und Werkzeuge wird im Zeitalter von Industrie 4.0 die Methode des Kata Coachings vorgeschlagen.¹⁵⁹

3.3 Analyse bestehender Modelle zur Umsetzung einer LSM-Strategie

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der durchgeführten Literaturrecherche dargestellt. Zu diesem Zweck wurden alle relevanten theoretisch-konzeptionellen Ansätze aufgelistet und die jeweiligen Schwerpunkte identifiziert und klassifiziert. Die Bewertung der Studien und Publikationen hinsichtlich des Erfüllungsgrades der Dimensionen erfolgt anhand des Füllungsgrades der Kreise.

¹⁵⁴ vgl. Poór et al., 2019, S. 251

¹⁵⁵ vgl. März, 2017, S. 692f

¹⁵⁶ vgl. Silvestri et al., 2020, S. 11

¹⁵⁷ vgl. Biedermann, 2016a, S. 14

¹⁵⁸ vgl. Huber et al., 2021, S. 198f

¹⁵⁹ vgl. Wang et al., 2016, S. 5

Tabelle 2: Relevante Ansätze zu Lean Smart Maintenance

Jahr	Autor	Titel	Anlagenspez. IH-Strategie	Lean Methoden		Digitale Enabler	Integration/ Standardisierung			Prozessindustrie
				Autonome Instandhaltung	Kennzahlen KPIs		Qualifikationsprofile	Wissensmanagement	Kata-Coaching	
Klassifizierung:										
<ul style="list-style-type: none"> ◐ erwähnt/vorgeschlagen ◑ etwas näher erläutert ◒ sehr gut erklärt + Implementierungsansätze ◓ völlig auf Problemstellung anwendbar 										
2021	Huber et al.	Wissens- und lernorientierte Instandhaltung unter dem Aspekt zunehmender Digitalisierung	◑		◑		◑	◒		
2021	Tortorella et al.	Integration of Industry 4.0 technologies into Total Productive Maintenance practices		◑	◑	◑	◑			
2021	Garms	Von der analogen zur mobilen Instandhaltung: Fünf Gründe, die für den Low-Code-Ansatz sprechen				◒		◑		
2020	Chin et al.	Asset maintenance optimisation approaches in the chemical and process industries – A review	◑							◑
2020	Rødseth et al.	Smart Maintenance in Asset Management – Application with Deep Learning	◒		◑					
2020	Marttonen-Arola et al.	Introducing Lean into Maintenance Data Management: A Decision Making Approach		◑		◑		◑		
2019	Poór et al.	Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development	◑	◒	◑			◑		
2019	Passath/ Mertens	Decision Making in Lean Smart Maintenance: Criticality Analysis as a Support Tool	◒	◑				◑	◑	
2019	Jasiulewicz - Kaczmarek/ Gola	Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing - an Overview			◑	◑		◑		
2019	Razmi-Farooji et al.	Advantages and potential challenges of data management in e-maintenance				◒		◑		
2019	Passath/ Huber	Dynamische Instandhaltungsstrategie= anpassung durch Anlagenkritikalitätsbewertung	◒					◑		
2019	Preuss	Modernes Informationsmanagement als Basis für die Industrie 4.0 (Teil I)				◒		◑		

Klassifizierung:			Anlagenspez. IH-Strategie	Lean Methoden		Digitale Enabler	Integration/ Standardisierung		
Jahr	Autor	Titel		Autonome Instandhaltung	Kennzahlen KPIs		Qualifikationsprofile	Wissensmanagement	Kata-Coaching
<p>☐ erwähnt/vorgeschlagen</p> <p>◐ etwas näher erläutert</p> <p>◑ sehr gut erklärt + Implementierungsansätze</p> <p>● völlig auf Problemstellung anwendbar</p>									
2019	Henke et al.	Smart Maintenance-Der Weg vom Status quo zur Zielvision	◐			◐		◐	
2019	Biedermann/ Kinz	Lean Smart Maintenance—Value Adding, Flexible, and Intelligent Asset Management	◐	◐	◐	◐		◐	
2018	Mühlnickel et al.	Smart Maintenance				◐		◐	
2018	Baethge-Kinsky et al.	Perspektiven industrieller Instandhaltungsarbeit		◐	◐	◐	◐	◐	
2018	Al-Najjar et al.	Maintenance 4.0 to fulfil the demands of Industry 4.0 and Factory of the Future			◐			◐	
2017	März	Instandhaltungsmanagement für die Fabrik der Zukunft	◐	◐	◐	●		●	
2016a	Kinz et al.	Lean Smart Maintenance—Efficient and Effective Asset Management for Smart Factories	●		◐			◐	◐
2016b	Kinz et al.	Lean Smart Maintenance in der Prozessindustrie	◐					◐	◐
2016	Haase et al.	Anforderungen an die lernförderliche Gestaltung von Assistenzsystemen für die Instandhaltung: Beispiele aus der Stahl- und Prozessindustrie				●	◐	◐	◐
2016a	Biedermann	Lean Smart Maintenance	◐	◐	◐		◐	◐	
2016	Rakyta et al.	Proactive approach to smart maintenance and logistics as a auxiliary and service processes in a company	◐			◐		◐	
2016	Akkermans et al.	Smart moves for smart maintenance		◐	◐	◐		◐	
2016b	Biedermann	Lean Smart Maintenance	◐	◐	◐		◐	◐	
2016c	Biedermann	Optimierung der Instandhaltungsstrategie durch datenanalytische Risikoklassifikation und Störungsprognose	◐					◐	

			Anlagenspez. IH-Strategie	Lean Methoden		Digitale Enabler	Integration/ Standardisierung			Prozessindustrie
Jahr	Autor	Titel		Autonome Instandhaltung	Kennzahlen KPIs		Qualifikationsprofile	Wissensmanagement	Kata-Coaching	
Klassifizierung:  erwähnt/vorgeschlagen  etwas näher erläutert  sehr gut erklärt + Implementierungsansätze  völlig auf Problemstellung anwendbar										
2016	Wang et al.	Generic procedure model to introduce Industrie 4.0 in small and medium-sized enterprises								
2015	Höhnel et al.	Effizienzsteigerung in der Instandhaltung durch Sozio-Cyber-Physische Systeme								
2015	Mostafa et al.	Lean thinking for a maintenance process								
2015	Biedermann	Die Arbeitsorganisation der Instandhaltung im Kontext zu Industrie 4.0								
2015	Henke et al.	Smart Maintenance für Smart Factories								
2015	Ehni/Kersten	Toyota Kata: Empowering Employees for Target-Oriented Improvement-A Best Practice Approach								

Im Folgenden werden ausgewählte Publikationen im Hinblick auf die gewählten Dimensionen näher erläutert und die für die Problemstellung dieser Arbeit relevanten Konzepte, Werkzeuge und Technologien kurz erklärt.

Zunächst geben Henke et al. (2019) mit Hilfe der acatech-Studie "Smart Maintenance - Der Weg vom Status quo zur Zielversion" einen kurzer Einblick in die aktuelle Situation von Industrieunternehmen, indem 96 Unternehmen aus 14 verschiedenen Branchen zu ihren Instandhaltungsmanagement befragt wurden. Der Umfrage zufolge verfolgen 57 % der Unternehmen eine reaktive Instandhaltungsstrategie (keine Datenverarbeitung), 39 % eine vorbeugende Instandhaltungsstrategie (auf der Grundlage historischer Daten) und nur 4 % eine vorausschauende Instandhaltungsstrategie (auf der Grundlage von Echtzeitdaten). Lediglich 35% der befragten Unternehmen erfüllen die Basis für eine Datenauswertung, da sie über ein zentrales Datensystem (z.B.: ERP) verfügen, das automatisch Zustands-, Störungs- oder Ausfallinformationen erfasst und übermittelt. Die Erwartungen der Unternehmen an die Einführung der vorausschauenden Instandhaltung sind eine bessere Planbarkeit durch die Vermeidung ungeplanter Ausfallzeiten (46 %) und eine höhere Anlagenverfügbarkeit (30 %). Etwa ein Drittel der Unternehmen verfügt über ein

standardisiertes Wissensmanagementsystem, das einerseits den Zugriff auf unternehmensinternes Wissen entweder auf einem Computer (26 %) oder auf einem mobilen Gerät direkt an der Anlage (12 %) ermöglicht und andererseits ständig durch individuelles Wissen der Belegschaft erweitert wird. Hinsichtlich der Dokumentation von standardisierten Instandhaltungsabläufen sind nur 31% der Unternehmen in der Lage diese Informationen zentral und digital zur Verfügung zu stellen (z.B.: ERP, Sharepoint). Die Umfrage zeigt auch, dass die Unternehmen erwarten, dass der Einsatz mobiler Geräte (z. B. Smartphone, Tablet) das Wissensmanagement durch eine bessere Dokumentation der Arbeit (35 %) und die Unterstützung der Benutzer bei der Ausführung (45 %) verbessern wird.

Biedermann (2015) untersucht in seinem Artikel die Eignung bestehender Instandhaltungsstrategien im Hinblick auf den verstärkten Einsatz von Cyber-Physical Systems (CPS) und die damit verbundenen steigenden Komplexitäts-, Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen im Zuge von Industrie 4.0. Die Wirksamkeit wird mit Hilfe eines Zielbündels, welches Effizienz- und Effektivitätsziele in Kombination betrachtet überprüft. Das Ergebnis zeigt, dass TPM und KBM durch den ausgeprägten Einsatz von autonomer und geplanter Instandhaltung, Aus- und Weiterbildung sowie begleitenden Maßnahmen (BSC, CMMS) die beste Grundlage bieten, um mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien (z.B.: CPS) weiter ergänzt und aufgebaut zu werden. Es handelt sich hierbei um eine akademische Arbeit, welche keinerlei Implementierungsvorschläge beinhaltet.

Al-Najjar et al. (2018) definieren in ihrer Publikation zunächst Instandhaltungsaufgaben, um den Anforderungen von Industrie 4.0 gerecht zu werden und formulieren dann, welche Eigenschaften ein Maintenance 4.0 Konzept ihrer Meinung nach haben sollte. Durch die Verarbeitung (Analyse, Prognose etc.) kontinuierlich gewonnener Daten können Anomalien frühzeitig erkannt werden und dadurch ungeplante Stillstände durch Schäden verhindert werden. Weitere wichtige Punkte sind die Fähigkeit einfach und in Echtzeit mit der Datenerfassungsplattform zu kommunizieren (Import/Export von Daten) sowie die Visualisierung von Echtzeitdaten, erledigten/ausstehenden Arbeiten, Analyseergebnissen und Wartungsarbeiten und deren Fortschritt (z.B.: Shopfloor-Board). Al-Najjar et al. (2018) legen besonderen Wert auf die Erfassung von Produktionsleistungsindikatoren (KPIs) durch das Instandhaltungssystem, um die Auswirkungen der Instandhaltung zu ermitteln, zu bewerten und zu verbessern. Der Artikel gibt einen sehr generischen Überblick über ein Konzept für die Instandhaltung im Zeitalter von Industrie 4.0, ohne konkrete Vorschläge für die Umsetzung zu nennen.

Ehni/Kersten (2015) betonen, dass für ein langfristiges Überleben im globalen Wettbewerb der Lean Management (LM) Ansatz für unternehmerische Agilität und kontinuierliche Verbesserung erforderlich ist. Das Problem in westlichen Unternehmen

ist, dass sie versuchen, LM mit Hilfe von Projekten zu implementieren, wobei die anfänglich signifikante Leistungssteigerung nach Abschluss des Projekts nicht weiter verbessert wird und dadurch bestenfalls auf dem erreichten Niveau bleibt. Dieser Implementierungsansatz führt daher sehr oft nicht zu der langfristig gewünschten Effizienzsteigerung. Nach Ehni/Kersten (2015) soll das von Toyota entwickelte KATA-Coaching, welches aus der Verbesserungs-Kata und der Coaching-Kata besteht, Abhilfe schaffen. Die Verbesserungs-Kata zielt darauf ab, sich schrittweise auf eine klar definierte Vision zuzubewegen, während die Coaching-Kata dazu dient, dem Personal die erforderlichen Fähigkeiten zu vermitteln. Kata-Coaching scheint ein vielversprechender Weg zu sein, um den kontinuierlichen Verbesserungsprozess im Unternehmen zu etablieren und damit eine Standardisierung und nachhaltige Integration von LM-Methoden zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird Kata Coaching speziell für den Einsatz in der kontinuierlichen Prozessindustrie adaptiert und in diese Arbeit miteinbezogen.

Die beiden Veröffentlichungen von Biedermann (2016a) und Biedermann (2016b) sind sehr ähnlich, wie in Tabelle 2 ersichtlich ist. Die Ansätze beruhen auf einem dualen Vorgehensmodell, welche aus einem Smart- und einem Lean-Teil besteht und somit ein Lean Smart Maintenance Konzept abbilden. Ersterer steht für ein intelligentes und lernorientiertes Instandhaltungsmanagement (Effektivitätsperspektive) unter Verwendung eines CIP und letzterer für eine Verlustminimierung auf der Inputseite (Effizienzperspektive). Zu diesem Zweck schlagen beide Arbeiten eine anlagenspezifische Instandhaltungsstrategie, die Einführung einer autonomen Instandhaltung zur schnellen Identifizierung von Problemen und ein KPI-Zielsystem zur kontinuierlichen Verbesserung vor. Sie unterscheiden sich jedoch in der detaillierteren Ausführung der Qualifikationsprofile beziehungsweise des Wissensmanagements. Biedermann (2016a) zeigt in seiner Arbeit einen Ausschnitt einer Qualifikationsmatrix, welche als Basisinstrument zur Wissensdokumentation und -entwicklung von Mitarbeitern eingesetzt wird. Biedermann (2016b) gibt an, dass sein LSM-Konzept mithilfe der entwickelten Wissensorganisation einen Beitrag zur Standortsicherung und damit zur Betriebssicherung leisten kann. Es ist notwendig auf Personen- und Organisationsebene den Austausch und die Generierung von Wissen zu fördern und das gewonnene Wissen in den Leistungs- und Innovationsprozess zu integrieren. Einige Methoden zum vorgeschlagenen Austausch von Erfahrungswissen sind in Tabelle 3 aufgelistet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass beide Veröffentlichungen einen sehr generischen Überblick über ein Instandhaltungskonzept für das Zeitalter von Industrie 4.0 geben. In den vereinzelt Ansätzen zur Umsetzung in den Unternehmen werden die spezifischen Charakteristika der Prozessindustrie nicht berücksichtigt.

Tabelle 3: Methoden zum Erfahrungswissen-Austausch¹⁶⁰

Wissenschaftliche Basis	Praxisrelevante Fragen zur Erfahrungswissens-Weitergabe	Mögliche Methodik
Wissen ist personen- und systemgebundene Konstruktion	Warum hat ein Wissensträger (Experte) bestimmte Vorgehensweisen und Einschätzungen zu Erfolg/Misserfolg entwickelt?	Wissenslandkarte,-baum; Visualisierung der Problemlösungsmethodik
Wissen als Prozess anstelle statischer Wissensobjekte	Wie geht der Wissensträger (Experte) vor?	Erfahrungsberichte; Entscheidungsbaum
Wissensaustausch als Dialog	Wie kann Erfahrungswissen nachhaltig vermittelt werden?	Feedbackorientierter Wissensdialog, Schlussfolgerung für zukünftige Problemlösung.

Huber et al. (2021) reagieren in ihrem Artikel auf eine Benchmark-Studie der DACH-Region, wonach weniger als 50% der 188 befragten Unternehmen einen standardisierten Prozess zur Wissenserhaltung und -weitergabe implementiert hatten. Der Ansatz zielt darauf ab, das Wissensmanagement vertikal über alle drei Managementebenen und horizontal über die gesamte Wertschöpfungskette zu integrieren, indem der DMAIC-Zyklus und das MOT-Modell in Bezug auf das Strukturmodell umgesetzt werden (Abbildung 17).

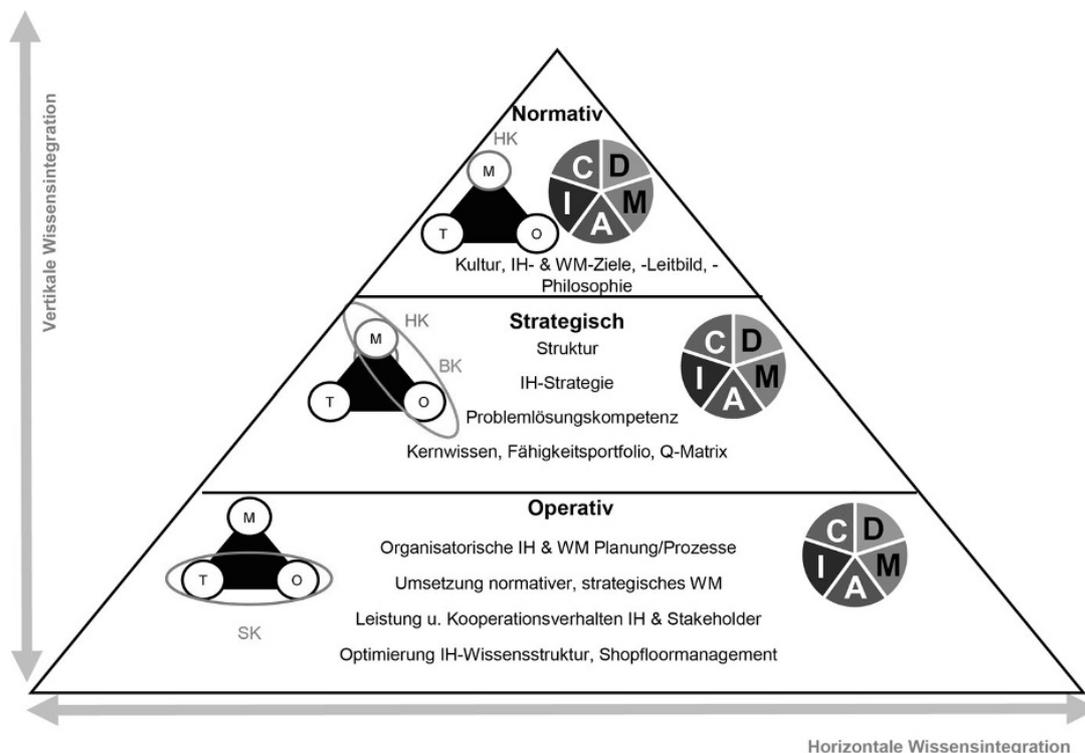


Abbildung 17: Wissensintegration auf den Managementebenen¹⁶¹

¹⁶⁰ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Biedermann, 2016b, S. 138

¹⁶¹ Huber et al., 2021, S. 202

Huber et al. (2021) geben in ihrer Arbeit für jede Ebene unterschiedliche Methoden und Instrumente des Wissensmanagements an, welche eine optimale Ausrichtung von Menschen, Organisation und Technik (MOT) unterstützen und mit Hilfe des DMAIC-Zyklus angewendet werden. In diesem Zusammenhang sind die Generierung von Wissen mit Hilfe von Planspielen, Szenario-Techniken etc. und die anschließende Verbreitung dieses Wissens mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologien (Intranet, Big Data etc.) von besonderer Bedeutung für diese Arbeit. Darüber hinaus hat das Erfassen und Speichern von implizitem Wissen (Erfahrungen des Wartungspersonals) durch die Anwendung von Lessons Learned oder Storytelling, aber auch das Erfassen und Speichern von explizitem Wissen (Daten von Anlagen) hohe Relevanz. Schlussendlich gibt diese Publikation nur einen allgemeinen und akademischen Überblick für die Implementierung eines funktionierenden Wissensmanagements in einem Unternehmen und beinhaltet nur wenige weitere Dimensionen.

Poór et al. (2019) weisen darauf hin, dass bestmöglich funktionierende Anlagen eine Grundvoraussetzung für Industrie 4.0 sind und daher ein hocheffizientes Instandhaltungskonzept für eine geringer Ausfall- und Störungswahrscheinlichkeit erforderlich ist. Zu diesem Zweck konzentrieren sie sich vor allem auf die Schulung von Instandhaltungspersonal und Betreibern, sowie auf das Wissensmanagement in den verschiedensten Formen. Bei ersterem wird auf die Unverzichtbarkeit von Routineinspektionen durch geschulte Anlagenbetreiber verwiesen, die kleinere Schäden erkennen und an das Instandhaltungspersonal melden, bevor sie zu einem tatsächlichen Problem werden. Im Hinblick auf das Wissensmanagement liegt der Schwerpunkt auf individuellen Wartungsplänen und der genauen Protokollierung aller Instandhaltungstätigkeiten (Inspektionen, Wartung etc.) für jede Anlage. Die sich daraus ergebende Instandhaltungshistorie der Anlagen bietet einerseits einen Überblick über den "Gesundheitszustand" der Anlagen und andererseits einen großen Vorteil bei Verhandlungen über Garantieansprüche. Dieser Artikel gibt einen kurzen allgemeinen Überblick über einige erforderlichen Eigenschaften einer Instandhaltung 4.0 und enthält keine Vorschläge zur Umsetzung.

Haase et al. (2016) gehen davon aus, dass die gezielte Aufbereitung von Daten und Informationen aufgrund der zunehmenden Komplexität durch die Digitalisierung eine der größten Schwierigkeiten der Zukunft darstellen wird. Die Instandhaltung bietet durch die Anpassung an diese neuen Gegebenheiten ein großes Potenzial für den Einsatz von Assistenzsystemen. Haase et al. (2016) empfehlen die Integration eines Assistenzsystems, das je nach Arbeitsaufgabe und Person einen direkten Zugriff auf die Anlagendokumente vor Ort über mobile Geräte oder fest installierte Monitorsysteme ermöglicht. Zudem ist die Bereitstellung von strukturierten Abläufen für die Wartung und die Störungsbehebung für die Mitarbeiter mit Hilfe von Checklisten sowie Handlungsanweisungen und -empfehlungen von Experten entscheidend, um

eine schnelle und sichere Problemlösung zu gewährleisten. Außerdem müssen die Mitarbeiter in der Lage sein, neue Erfahrungen und Anmerkungen direkt auf dem mobilen Gerät zu dokumentieren, um sie anschließend mit Kollegen zu reflektieren. Durch die Anbindung an das Prozessleitsystem wird die Fehlerinformation zudem direkt auf dem mobilen Gerät angezeigt und gibt gleichzeitig durch die Störungsmeldung einen Hinweis auf die Ursache der Störung. Zur eindeutigen Identifizierung der Ursache ist der Zugriff auf die Historie der relevanten Sensordaten eine große Hilfe. Abschließend wird betont, dass bei der Entwicklung des Assistenzsystems die späteren Nutzer und Beteiligten umfassend einbezogen werden müssen. Diese Publikation gibt einen sehr guten akademischen Überblick über ein effizientes Assistenzsystem, aber keine konkreten Vorschläge zur Umsetzung in der industriellen Praxis.

Die beiden Arbeiten Passath/Huber (2019) sowie Passath/Mertens (2019) fokussieren sich auf die Wahl der optimalen Instandhaltungsstrategie. Basierend auf den Ergebnissen der standardisierten Kritikalitätsbewertung kann eine dynamische Anpassung der Strategie vorgenommen werden. Die vorgeschlagene Kritikalitätsanalyse besteht aus der Kriterienbewertung der Anlagen, der Identifikation von risiko- oder kostenkritischen Anlagen mithilfe eines Anlagenprioritätsportfolios und einer detaillierten Risiko- und Kostenanalyse der zuvor identifizierten kritischen Anlagen (Abbildung 18).

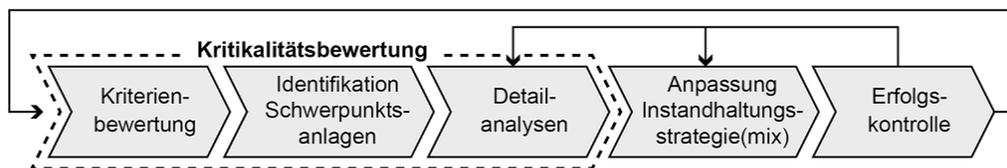


Abbildung 18: Prozessmodell der dynamischen Strategieoptimierung¹⁶²

Auf der Grundlage der detaillierten Analyse wird der Instandhaltungsstrategiemix (Kombination aus reaktiver und präventiver Instandhaltung) von Anlagen, die in Bezug auf Kosten und/oder Kritikalität auffällig sind, angepasst. Die Strategieoptimierung kann auch zu Anpassungen im Bereich der Instandhaltungsressourcen (Human-, Struktur- oder Beziehungskapital) führen, wie z.B. die Einführung der autonomen Instandhaltung oder die Anpassung der Qualifikationsanforderungen. Diese Artikel enthalten ein Vorgehensmodell zur dynamischen Optimierung der Instandhaltungsstrategie mit punktuellen Vorschlägen zur Implementierung. Sie enthalten jedoch nur wenige andere definierte Dimensionen.

Biedermann (2016c), Kinz et al. (2016b) und Kinz et al. (2016a) verwenden in ihrem LSM-Modell ein duales Vorgehensmodell zur Implementierung und Weiterentwicklung eines effektiven und effizienten Managementkonzeptes (Abbildung 19).

¹⁶² Passath/Huber, 2019, S. 9

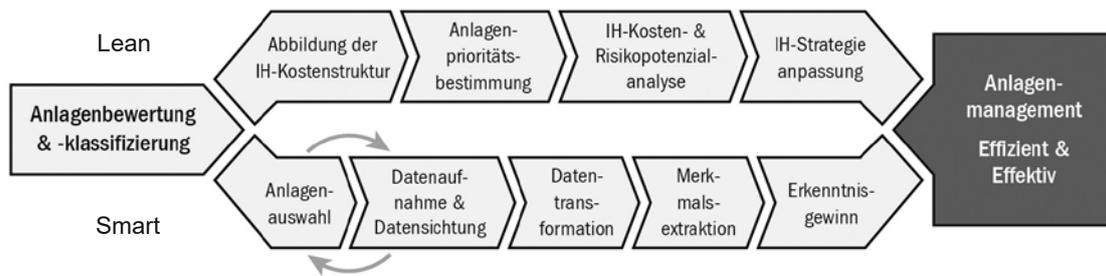


Abbildung 19: Lean Smart Maintenance duales Vorgehensmodell¹⁶³

Mit Hilfe der Anlagenbewertung und -klassifizierung durch Ermittlung des Risikokostenpotenzials (Multiplikation von Schadensausmaß, Eintrittswahrscheinlichkeit und Entdeckungswahrscheinlichkeit) wird eine Vorauswahl relevanter und kritischer Anlagen getroffen. Die nächsten Schritte sind wie in Abbildung 19 ersichtlich in einen Lean (oben) und einen Smarten (unten) Pfad unterteilt. Der Lean-Pfad befasst sich mit der Anpassung der Instandhaltungsstrategie auf der Grundlage einer Kosten- und Risikoanalyse unter Verwendung eines Anlagenprioritätsportfolios. Der Smart-Pfad hingegen befasst sich mit der Vorhersage von Komponentenausfällen von einzelnen Anlagen. Kinz et al. (2016a) betonen, dass die Risikobewertung ein sehr zeitaufwändiger Prozess ist, weshalb sie zusätzlich ein Instrument für eine schnelle und einfache Anlagenbewertung (Anlagenindex) anhand verschiedener Indikatoren entwickelt haben (Abbildung 20). Das vorgestellte Managementkonzept ist sehr allgemein gehalten und für den Einsatz in der Prozessindustrie mit stark vernetzten Anlagen nur bedingt geeignet.

Object 1				Value	Asset index		
availability	low	medium	high	3	15		
susceptibility to failure	low	medium	high	1			
number of redundant assets	> 3	3	2	1		0	3
maintenance costs	low	medium	high	very high		2	
age	young	medium	old	3			
influence on quality	none	low	medium	high		2	
downtime costs	low	medium	high	1			

Abbildung 20: Anlagenbewertung mittels Anlagenindex¹⁶⁴

Die Kritikalitätsbewertung von Rødseth et al. (2020) zur Unterstützung einer intelligenten Instandhaltungsplanung umfasst die Berechnung des Anomaliegrades (Anomaly degree, AD) sowie die Berechnung des Gewinnverlustindikators (Profit loss indicator, PLI). Mit Hilfe des PLI wird die wirtschaftliche Folge eines Ausfalls berechnet, indem alle verschiedenen Arten von Produktionsverlusten (Qualitätsverluste,

¹⁶³ Kinz et al., 2016b, S. 17

¹⁶⁴ Kinz et al., 2016a, S. 5

Verfügbarkeitsverluste usw.) berücksichtigt werden. Ein effizientes computergestütztes Anomalie-Erkennungssystem kann Anomalien von Geräten in einem frühen Stadium erkennen und davon die Wahrscheinlichkeit eines Maschinenausfalls ableiten. Nach der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit (AD) und der Folgen (PLI) zukünftiger Störungen kann eine Risikomatrix verwendet werden, um die Kritikalität der Anlagen zu bestimmen und darauf basierend Instandhaltungsmaßnahmen zu planen und zu priorisieren. Zusätzlich zur Standard-Risikomatrix haben Rødseth et al. (2020) jedem Feld eine Prioritätsnummer zugewiesen, die es dem Instandhaltungsplaner ermöglicht, bei mehreren Anlagen im kritischen Bereich anhand der Prioritätsnummer erneut zu differenzieren. Der sehr allgemeine Ansatz könnte aufgrund der Besonderheit der Prioritätsnummer möglicherweise in angepasster Form auf die Prozessindustrie übertragen werden.

Tabelle 2 zeigt, dass die Arbeit von Biedermann/Kinz (2019) sehr viele der definierten Kategorien zumindest kurz beschreibt. Kernstück der Arbeit ist ein vierstufiges Prozessmodell zur Implementierung des Lean Smart Maintenance-Konzepts zur Ablösung des reaktiven Instandhaltungsmanagements. In der ersten Phase werden die gesammelten Daten aus allen Hierarchieebenen (Interviews etc.) in einem fünfstufigen Reifegradmodell verarbeitet und so der IST-Zustand jeder Managementkategorie (Instandhaltungscontrolling und -strategie, Ersatzteilmanagement etc.) abgeleitet. Daraufhin wird der Ziel-Reifegrad der jeweiligen Kategorie festgelegt. Im zweiten Schritt werden durch GAP-Analysen (Vergleich des Ist-Zustandes mit dem Ziel-Zustand) die Potenziale der einzelnen Kategorien erfasst und anschließend durch interdisziplinäre Workshops Maßnahmenpläne abgeleitet. Die dritte Phase umfasst zum einen die Umsetzung der Maßnahmen (zunächst in einem Pilotbereich) sowie das Projektmanagement, die Fortschrittsüberwachung durch KPIs und regelmäßige Controlling-Meetings. Die letzte Phase ist für die nachhaltige Standardisierung der neuen Prozesse und Ergebnisse im Unternehmen zuständig. Der vorgeschlagene Implementierungsansatz ist sehr allgemein gehalten und daher für diese Arbeit nur bedingt anwendbar.

März (2017) unterstreicht, dass die Instandhaltung insbesondere in anlagenintensiven Fertigungsprozessen (Rohstoffverarbeitung, Chemie- oder Automobilindustrie) ein strategisch wichtiger Erfolgsfaktor ist. Der Artikel behandelt die vorrausschauende Instandhaltung, die mobile Instandhaltung und die Lebenszykluskosten im Detail. Es wird darauf hingewiesen, dass die vorausschauende Instandhaltung aus wirtschaftlicher Sicht derzeit nur für sehr kritische Komponenten die beste Option darstellt, weshalb eine Risikobewertung auf der Grundlage von Vergangenheitsdaten erforderlich ist, um diese zu ermitteln. März (2017) beschreibt die mobile Instandhaltung als enormen Effizienztreiber, indem sie einerseits die schnelle Erfassung von Störungen und Instandhaltungsbedarfen und andererseits den Austausch von Daten und Informationen in Echtzeit ermöglicht. Im Hinblick auf die

Lebenszykluskosten wird vorgeschlagen, die Erkenntnisse aus dem Betrieb und der Optimierung bestehender Anlagen in die Planung neuer Anlagen einfließen zu lassen, wodurch insbesondere bei kapitalintensiven, langlebigen Produktionsanlagen enorme Einsparungen der Gesamtkosten (Anschaffungskosten, Instandhaltungskosten, Betriebskosten und Entsorgungskosten) erzielt werden können. Das vorgeschlagene Konzept berücksichtigt sehr viele der definierten Dimensionen und bietet einen äußerst guten Überblick, insbesondere im Hinblick auf die mobile Instandhaltung. Die Schwierigkeiten der Prozessindustrie werden jedoch nicht behandelt.

3.4 Resümee

Im Zuge der Literaturrecherche stellte sich heraus, dass nur sehr wenige der vorgestellten Ansätze durch konkrete Umsetzungsvorschläge für die industrielle Praxis untermauert wurden. Speziell die Eigenart der Prozessindustrie, die sich durch komplexe Produktionsprozesse mit einer großen Anzahl von Parametern und Variablen sowie langen Wertschöpfungsketten mit vielen Schnittstellen auszeichnet und damit eine große Herausforderung für die Instandhaltung darstellt, wird in keinem der Konzepte näher thematisiert. Basierend auf diesen Erkenntnissen lässt sich ein eindeutiger Forschungsbedarf für die Entwicklung eines Lean Smart Maintenance Konzepts für die kontinuierliche Prozessindustrie im Zeitalter von Industrie 4.0 ableiten.

3.5 Anforderungen an ein LSM-Konzept

Wie eingangs erwähnt, gibt es derzeit keinen Konsens darüber, welche Anforderungen (Methoden, Werkzeuge, Instrumente etc.) ein Instandhaltungskonzept im Zeitalter von Industrie 4.0 erfüllen sollte. In dieser Arbeit wird ein entsprechendes Instandhaltungskonzept als Lean Smart Maintenance Konzept bezeichnet, dessen Anforderungen und Charakteristika im Folgenden definiert werden:

Ein Lean Smart Maintenance Konzept für die kontinuierliche Prozessindustrie sollte Werkzeuge wie die Anlagenkritikalitäts- und Kostenanalyse nutzen, um eine dynamische, anlagenbezogene Instandhaltungsstrategie zu realisieren und damit eine risiko- und ressourcenoptimierte Instandhaltung zu gewährleisten. Gleichzeitig sollen Lean-Management Methoden wie die Integration der autonomen Instandhaltung oder einer Balanced Score Card sowie der Einsatz digitaler Enabler eine effiziente Instandhaltungsausführung und -planung ermöglichen und somit die Instandhaltungskosten senken. Für die Standardisierung und nachhaltige Integration der Werkzeuge und Methoden im Unternehmen ist ein systematisches Wissensmanagement sowie ein auf kontinuierliche Verbesserung ausgerichtetes Schulungskonzept mit integrierter Qualifikationsmatrix erforderlich.

4 LSM-Konzept für die Prozessindustrie

4.1 Überblick des LSM-Konzepts

Ziel des entwickelten LSM-Konzepts ist eine schlanke, lernorientierte und zugleich risiko- und ressourcenoptimierte Instandhaltung in der kontinuierlichen Prozessindustrie zu gewährleisten. Abbildung 21 gibt einen Überblick über die drei Bausteine und das Fundament des entwickelten Konzepts mit den jeweils ausgewählten oder entwickelten Werkzeugen und Instrumenten.

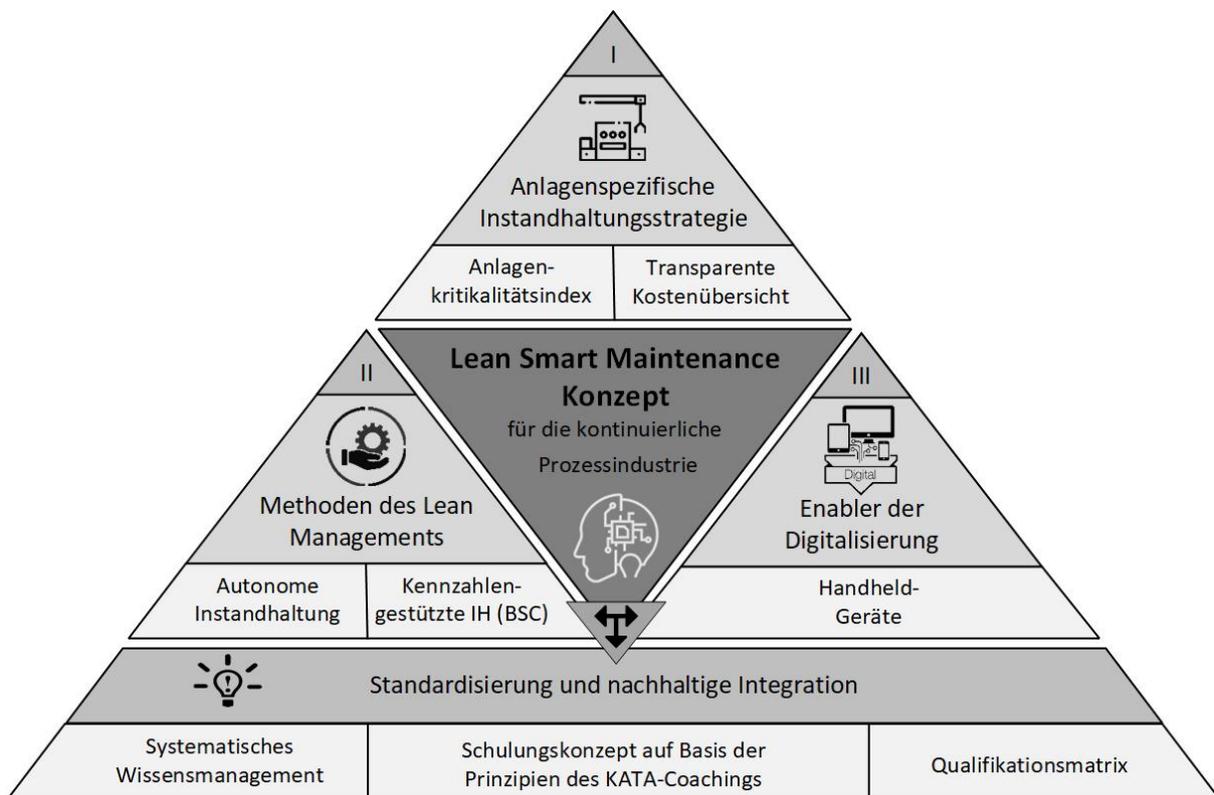


Abbildung 21: Lean Smart Maintenance Konzept¹⁶⁵

Baustein I beinhaltet die Ermittlung eines individuellen Anlagenkritikalitätsindex als Entscheidungshilfe für die Auswahl der anlagenbezogenen Instandhaltungsstrategie. Darüber hinaus wird ein entwickeltes Tool für eine transparente Übersicht über die Instandhaltungskosten in Bezug auf den Anlagenkritikalitätsindex eingesetzt. Baustein II umfasst die Integration von autonomer Instandhaltung und einer Balanced Scorecard, um die Instandhaltung zu entlasten und die Instandhaltungsleistung für das Management sichtbar und messbar zu machen. Baustein III konzentriert sich auf den Einsatz digitaler Enabler für den Informations- und Datenaustausch in Echtzeit, um eine effizientere Nutzung von Anlagen und Maschinen zu ermöglichen. Das Fundament des LSM-Konzepts ist die Standardisierung und nachhaltige Integration im

¹⁶⁵ Eigene Darstellung

Unternehmen durch ein systematisches Wissensmanagement und ein auf den Prinzipien des KATA-Coachings basierendes Schulungskonzept mit integrierter Qualifikationsmatrix.

4.2 Baustein I: Anlagenspezifische Instandhaltungsstrategie

Aufgrund des unterschiedlichen Abnutzungsverhaltens und der unterschiedlichen Bedeutung der einzelnen Anlagenteile ist eine einheitliche Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage weder sinnvoll noch wirtschaftlich.

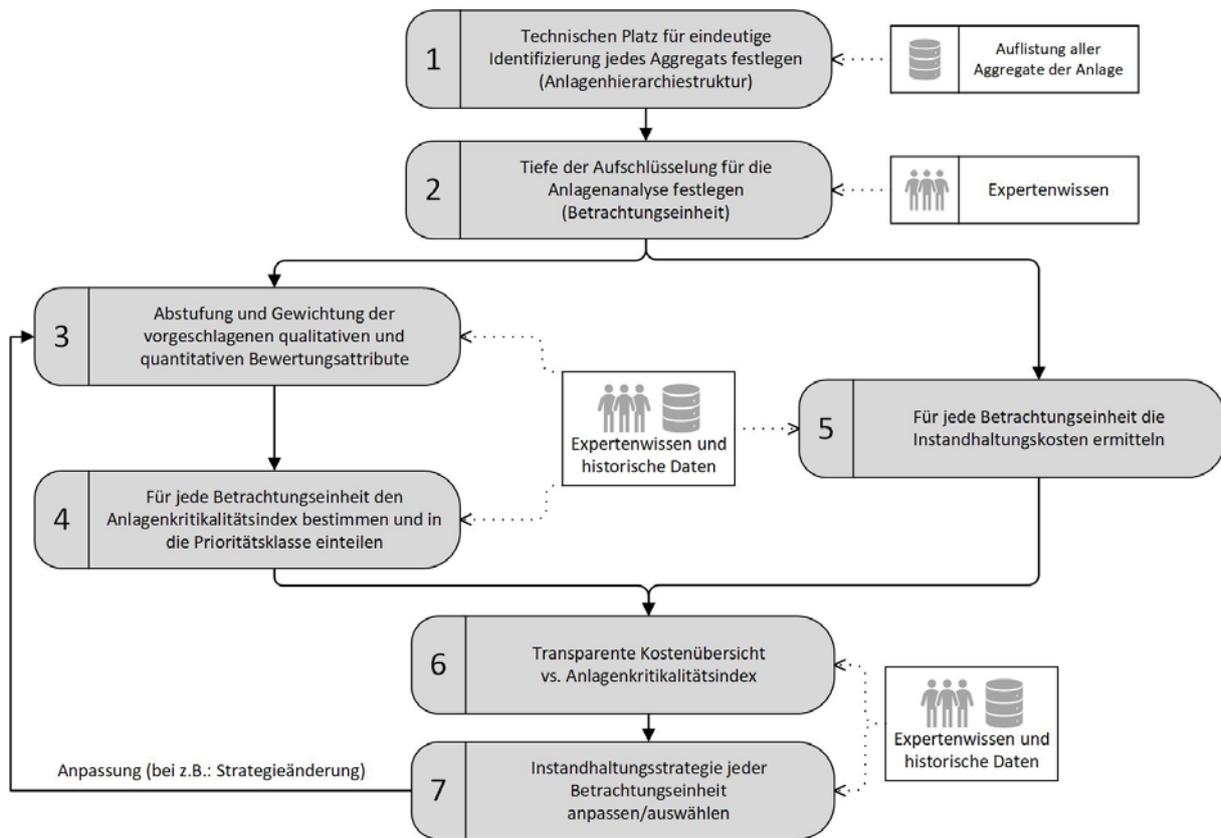


Abbildung 22: Vorgehensweise zur Bestimmung der Instandhaltungsstrategie¹⁶⁶

Die Wahl der richtigen Instandhaltungsstrategie ist speziell in der kontinuierlichen Prozessindustrie aufgrund der stark verketteten und automatisierten Anlagen in Kombination mit der Forderung nach sehr hoher Anlagenverfügbarkeit eine große Herausforderung. Aus diesen Gründen wird in Baustein I eine in der industriellen Praxis anwendbare generische Vorgehensweise (Abbildung 22) zur Ermittlung einer anlagenspezifischen Instandhaltungsstrategie vorgestellt, damit die jeweiligen Instandhaltungsmaßnahmen zum optimalen Zeitpunkt und mit entsprechender

¹⁶⁶ Eigene Darstellung

Intensität durchgeführt werden. Die Vorgehensweise und die enthaltenen Tools und Werkzeuge werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Schritt 1: Technischen Plätze festlegen

Alle Aggregate innerhalb des Instandhaltungssystems eines Unternehmens müssen eindeutig identifiziert werden, so dass die Kosten aufgeschlüsselt und die Meldungen und Aufträge zugewiesen werden können. Dazu empfiehlt diese Arbeit eine intelligente Anlagenhierarchiestruktur, die eine funktionale, prozessorientierte oder auch räumliche Zuordnung eines "Technischen Platzes" für jedes Aggregat ermöglicht. Dies ermöglicht die Zuordnung aller notwendigen Informationen zu den Instandhaltungsmaßnahmen (Kosten, verantwortlicher Instandhalter etc.) sowie deren Speicherung in der Anlagenhistorie des betreffenden Aggregats. Abbildung 23 zeigt ein entsprechendes Beispiel für die Struktur des Technischen Platzes in einem ERP-System.

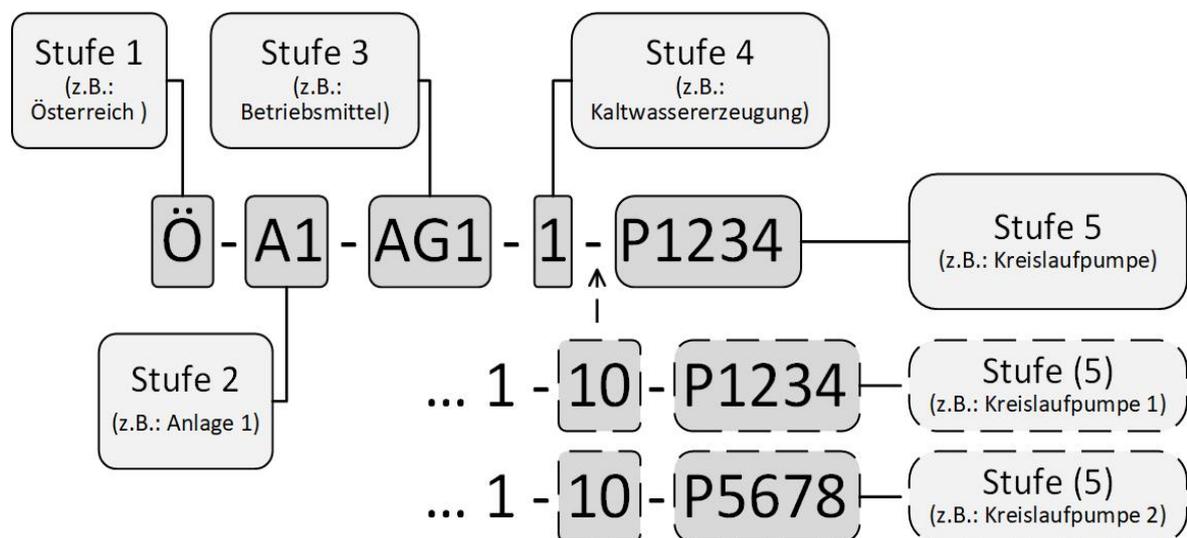


Abbildung 23: Exemplarischer Aufbau des technischen Platzes¹⁶⁷

Der technische Platz besteht aus:

- Stufe 1: Standort (Land) der Anlage (für internationales Unternehmen)
- Stufe 2: Anlagennummer (falls mehrere Anlagen in einem Land)
- Stufe 3: Teilanlage um die es sich handelt
- Stufe 4: Baugruppe um die es sich handelt,
- Stufe 5: Typennummer des Aggregats

Bei redundanten oder identischen Aggregaten wird wie in Abbildung 23 dargestellt zur Verbesserung der Transparenz eine weitere Ebene zwischen Stufe 4 und 5 eingefügt.

¹⁶⁷ Eigene Darstellung

Schritt 2: Tiefe der Aufschlüsselung der Anlage

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnt, ist insbesondere für die Risikobewertung von verketteten hochkomplexen Anlagen eine Aufschlüsselung in alle Einzelteile der Stückliste wenig sinnvoll und auch wirtschaftlich nicht vertretbar.¹⁶⁸ Wie stark dabei ins Detail gegangen wird, muss von den jeweiligen Experten der Unternehmen entschieden werden (Abbildung 24). Die daraus resultierende letzte Stufe (Teilanlage, Baugruppe etc.) wird als eine Betrachtungseinheit definiert.

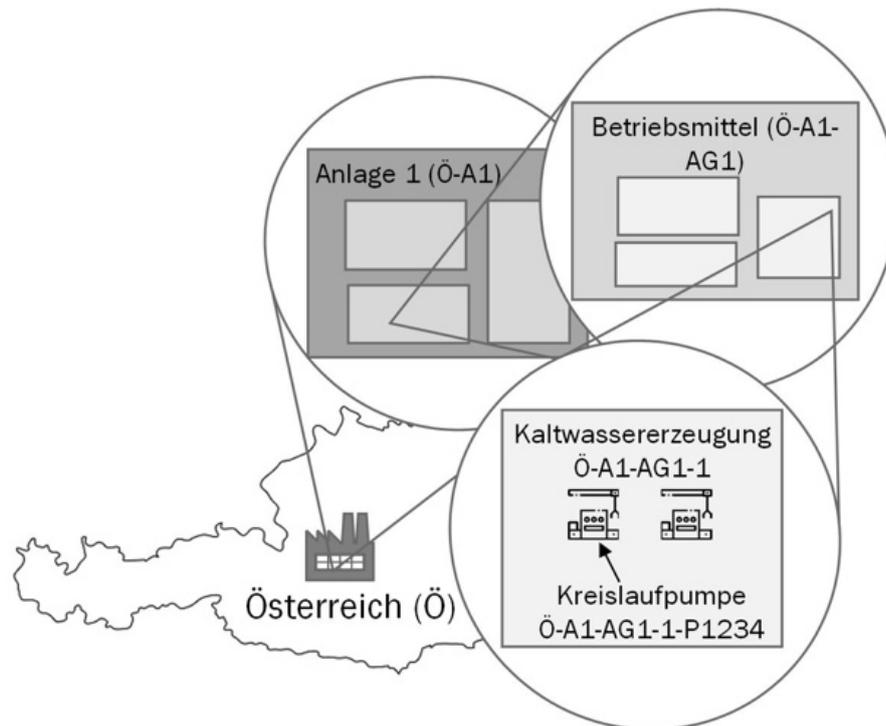


Abbildung 24: Aufschlüsselung der Anlage¹⁶⁹

Schritt 3: Festlegen der Abstufung und der Gewichtung der Bewertungsattribute

Die vorgeschlagenen quantitativen und qualitativen Bewertungskriterien für die Anwendung in der Prozessindustrie sind in Tabelle 4 aufgelistet. Die Schadensklassen der qualitativen Kriterien sind mit Hilfe von Experten (Asset-Manager, Instandhaltung, Qualitätsmanager, etc.) zu ermitteln. Bei den quantitativen Kriterien müssen sowohl Experten als auch historische Anlagendaten in die Festlegung der Abstufung einbezogen werden. Zu diesem Zweck ist es sinnvoll ein Referenzjahr zu wählen und auf Basis dieser Anlagendaten (Ausfalldaten, Qualitätsdaten, Instandhaltungskosten) die Schadensklassen festzulegen.

¹⁶⁸ vgl. Pawellek, 2016, S. 192f

¹⁶⁹ Eigene Darstellung

Tabelle 4: Bewertungsattribute¹⁷⁰

Bewertungsattribute	Schadensklasse					Bewertung
	Marginal [1]	Gering [2]	Moderat [3]	Bedeutend [4]	Gravierend [5]	
Arbeitssicherheit Hat die Anlage Auswirkungen auf die Mitarbeiter bei einem Störfall?	A Person in der Belegschaft verletzt, kann aber nach Erste-Hilfe-Versorgung weiterarbeiten. Anzeichen einer leichten, behebbaren, kurzfristigen Beeinträchtigung.	Person in der Belegschaft fällt für 1 oder 2 Tage aus. Anzeichen einer mäßigen, behebbaren, mittelfristigen Beeinträchtigung.	Person in der Belegschaft fällt für mindestens 3 Tage aus. Anzeichen einer mäßigen, irreversiblen Beeinträchtigung.	Todesfall in der Belegschaft. Personen werden vom Werkgelände in ein Spital gebracht. Anzeichen einer schweren irreversiblen Beeinträchtigung.	Mehrere Todesfälle in der Belegschaft. Mehrere Personen werden in ein Spital gebracht.	Expertenwissen
Umwelt Hat die Anlage Auswirkungen auf die Umwelt bei einem Störfall?	B Leichter behebbare Umweltschaden innerhalb der Werksgrenzen. Sanierungsmaßnahmen können notwendig sein.	Leichter behebbarer Umweltschaden außerhalb der Werksgrenzen. Sanierungsmaßnahmen können notwendig sein.	Kurzfristiger Umweltschaden in einem begrenzten Bereich außerhalb der Werksgrenzen. Sanierungsmaßnahmen können notwendig sein.	Mittelfristig bedeutender Umweltschaden. Sanierungsmaßnahmen sind notwendig.	Massiver, langfristiger Umweltschaden in einem großen Gebiet. Umfangreiche Sanierungsmaßnahmen sind erforderlich.	Expertenwissen
Ersatzteil-Verfügbarkeit Sind ET verfügbar bzw. wie schnell sind sie verfügbar?	C Im internen Lager verfügbar. Rasche und einfache Bereitstellung für die Reparatur.	Im internen Lager oder Hauptlager verfügbar. Mäßig schnelle Bereitstellung für die Reparatur.	Im Hauptlager verfügbar. Langsame Bereitstellung für die Reparatur.	Ersatzteil muss bestellt werden. Wartezeit < 1 Tag	Ersatzteil muss bestellt werden. Wartezeit > 1 Tag	Expertenwissen
Qualitätseinfluss [Index] Beschreibt den Einfluss der Anlage auf die Produktqualität.	D Kein Einfluss auf die Qualität.	Geringer Einfluss auf die Qualität.	Moderater Einfluss auf die Qualität.	Bedeutender Einfluss auf die Qualität.	Gravierender Einfluss auf die Qualität.	Expertenwissen und historische Daten
Auswirkung auf die Produktion [Tonnen] Wie wirkt sich ein Ausfall der Anlage auf die Produktion aus bzw. kann der Produktionsprozess trotzdem aufrechterhalten werden?	E Anlage kann weiterhin mit voller Geschwindigkeit betrieben werden bis die Reparatur erledigt ist. (Bsp.: redundante Pumpe/Motor)	Anlage kann bis zu einem gewissen Punkt mit voller Geschwindigkeit betrieben werden bis die Reparatur erledigt ist.	Anlage kann nicht mit voller Geschwindigkeit betrieben werden bis die Reparatur erledigt ist.	Kontrolliertes Abstellen der Anlage notwendig.	Sofortiger Ausfall der gesamten Anlage (Shutdown).	Expertenwissen und historische Daten
	x	x	x	x	x	

Die Gewichtung der einzelnen Bewertungsattribute ist Aufgabe des Anlagenbetreibers und orientiert sich an der Strategie des Unternehmens (Tabelle 6).

Schritt 4: Bestimmung der Anlagenprioritätsindizes und Prioritätsklassen

Die Anlagenbewertung der Betrachtungseinheiten kann beginnen, nachdem sowohl die Tiefe der Aufschlüsselung der Anlage als auch die Einstufung und die Gewichtung der Bewertungsattribute erfolgt ist. Im Hinblick auf eine schnelle und einfache Anlagenbewertung wird das von Kinz et al. (2016a) entwickelte Tool für den Einsatz in der kontinuierlichen Prozessindustrie modifiziert. Für ein aussagekräftiges Ergebnis ist es notwendig, die Zusammenhänge der Anlagenteile zu erkennen und zu analysieren, weshalb ein Team von Fachleuten aus allen relevanten Abteilungen (Asset Manager,

¹⁷⁰ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Hölbfer, 2014, S. 120 und Kinz et al., 2016a, S. 5

Instandhaltung, Qualitätsmanager usw.) unabdingbar ist. Zur Veranschaulichung zeigt Tabelle 6 beispielhaft den Aufbau der Anlagenprioritätsanalyse, wobei die Anlage bis zur Stufe 4 aufgeschlüsselt wird.

Nach der Beurteilung der einzelnen Betrachtungseinheiten durch das Expertenteam und der anschließenden Berechnung des Anlagenindex (Formel 3) erfolgt die Einteilung in die definierten Prioritätsklassen (Tabelle 5).

$$AI = \sum \text{Bewertung} * \text{Gewichtung}$$

Formel 3: Berechnung des Anlagenkritikalitätsindex

Der Anlagenkritikalitätsindex kann Werte zwischen 1 und 5 annehmen und wird wie in Tabelle 5 dargestellt in Prioritätsklassen von A bis C unterteilt. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die Abstufung 5 bei der Attributbewertung eine besondere Bedeutung hat.

Tabelle 5: Prioritätsklassen¹⁷¹

Anlagenkritikalitätsindex	Prioritätsklassen
≤ 2	C
>2 - 3,5	B
> 3,5	A

Betrachtungseinheiten, welche in einer Bewertungskategorie mit der Abstufung 5 bewertet wurden, werden unabhängig von ihrem Anlagenindex aufgrund ihrer gravierenden Auswirkungen in die Prioritätsklasse A eingestuft. Eine zusätzliche Hilfe für das Instandhaltungsmanagement bietet die Bewertung der übergeordneten Ebene (Teilanlage) welche sich an der höchsten Prioritätsklasse der untergeordneten Ebene (Baugruppen) orientiert.

Tabelle 6: Anlagenprioritätsanalyse¹⁷²

Anlagenprioritätsanalyse		Bewertungsattribute [1-5] und Gewichtung [0-1]					Anlagenkritikalitätsindex (AI)	Anlagen-Prioritätsklasse
Bezeichnung	Technischer Platz	Qualitätseinfluss	Arbeitsicherheit	Umwelt	Auswirkung auf die Produktion	ET-Verfügbarkeit		
Teilanlage 1	Ö-A1-AG1							
Betrachtungseinheit 1	Ö-A1-AG1-0							
Betrachtungseinheit 2	Ö-A1-AG1-1							
Betrachtungseinheit 3	Ö-A1-AG1-2							
Teilanlage 2	Ö-A1-AG2							
Betrachtungseinheit 1	Ö-A1-AG2-0							
Betrachtungseinheit 2	Ö-A1-AG2-1							
.....							
.....							

¹⁷¹ Eigene Darstellung

¹⁷² In Anlehnung an Kinz et al., 2016a, S. 5

Durch die Ermittlung des Anlagenkritikalitätsindex und der Unterteilung in Anlagenprioritätsklassen ist eine hierarchische Reihung der Betrachtungseinheiten auf Basis der Kritikalität möglich. Eine notwendige Anpassung der Gewichtungen und der Schadensklassen der Bewertungsattribute durch etwa einen Strategiewechsel ist jederzeit möglich. Dadurch ist die Anlagenprioritätsanalyse ein Hilfsmittel des Instandhaltungsmanagements bei der dynamischen Anpassung der Instandhaltungsstrategie.

Schritt 5: Ermittlung der Instandhaltungskosten jeder Betrachtungseinheit

Für die Strategiewahl bzw. -anpassung und für die Identifikation von Ressourcenverschwendung ist eine Dokumentation und Darstellung der Instandhaltungskosten jeder Betrachtungseinheit notwendig (Tabelle 7 und Abbildung 25).

Tabelle 7: Instandhaltungskosten jeder Betrachtungseinheit ¹⁷³

IH-Kosten der Betrachtungseinheit		Instandhaltungsaktivitäten				Gesamtkosten
Bezeichnung	Techn. Platz	Wartung	Inspektion	Instandsetzung	Verbesserung	
Teilanlage 1	Ö-A1-AG1					
Betrachtungseinheit 1	Ö-A1-AG1-0					
Betrachtungseinheit 2	Ö-A1-AG1-1					
Betrachtungseinheit 3	Ö-A1-AG1-2					

IH-Kosten der Betrachtungseinheit		Kostenanteil				Gesamtkosten
Bezeichnung	Techn. Platz	Personalkosten	Materialkosten	Fremdleistungen	sonstige Kosten	
Teilanlage 1	Ö-A1-AG1					
Betrachtungseinheit 1	Ö-A1-AG1-0					
Betrachtungseinheit 2	Ö-A1-AG1-1					
Betrachtungseinheit 3	Ö-A1-AG1-2					

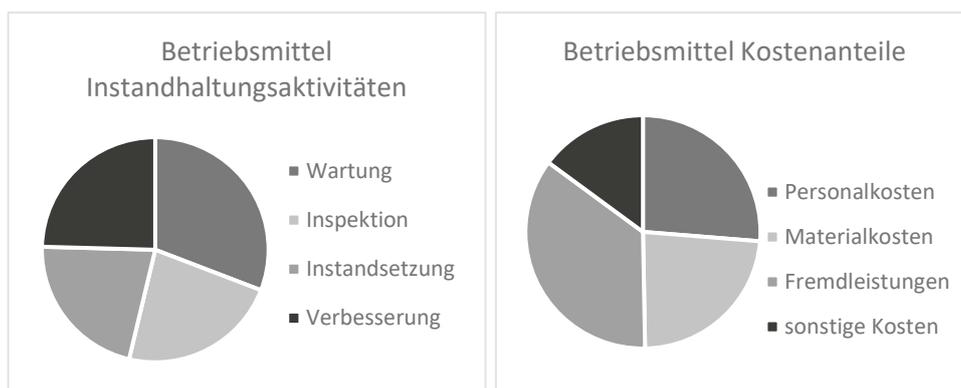


Abbildung 25: Exemplarische Darstellung der IH-Kosten jeder Betrachtungseinheit ¹⁷⁴

Die Gliederung orientiert sich dabei zum einen an den Kosten der Instandhaltungsaktivitäten (Wartung, Inspektion, Instandsetzung, Verbesserung) und zum anderen an den Kostenanteilen (Materialkosten, interne Personalkosten, Fremdleistungen, sonstige Kosten). Die Aufteilung in Instandhaltungsaktivitäten

¹⁷³ Eigene Darstellung

¹⁷⁴ Eigene Darstellung

ermöglicht eine Einteilung in ausfallbedingte oder präventive Maßnahmen, während die Aufteilung in die einzelnen Kostenanteile insbesondere den Fremdleistungsanteil hervorhebt.¹⁷⁵ Diese tabellarische und grafische Aufschlüsselung macht es sehr einfach, die treibenden Kosten für die Instandhaltung zu identifizieren.

Schritt 6: Transparente Kostenübersicht vs. Anlagenkritikalitätsindex

Der nächste Schritt ist die Analyse der Wirtschaftlichkeit der bestehenden Instandhaltungsstrategie der einzelnen Betrachtungseinheiten.¹⁷⁶ Zu diesem Zweck wird das in Abbildung 26 vorgeschlagen Tool, welches eine transparente Kostenübersicht in Relation auf den Anlagenkritikalitätsindex ermöglicht. Insbesondere sind in diesem Schritt die Betrachtungseinheiten zu berücksichtigen, die in der zuvor durchgeführten Anlagenprioritätsanalyse als Ergebnis einer Bewertung mit der Abstufung 5 unabhängig von ihren Anlagenkritikalitätsindex in die Anlagenprioritätsklasse A eingestuft wurden.

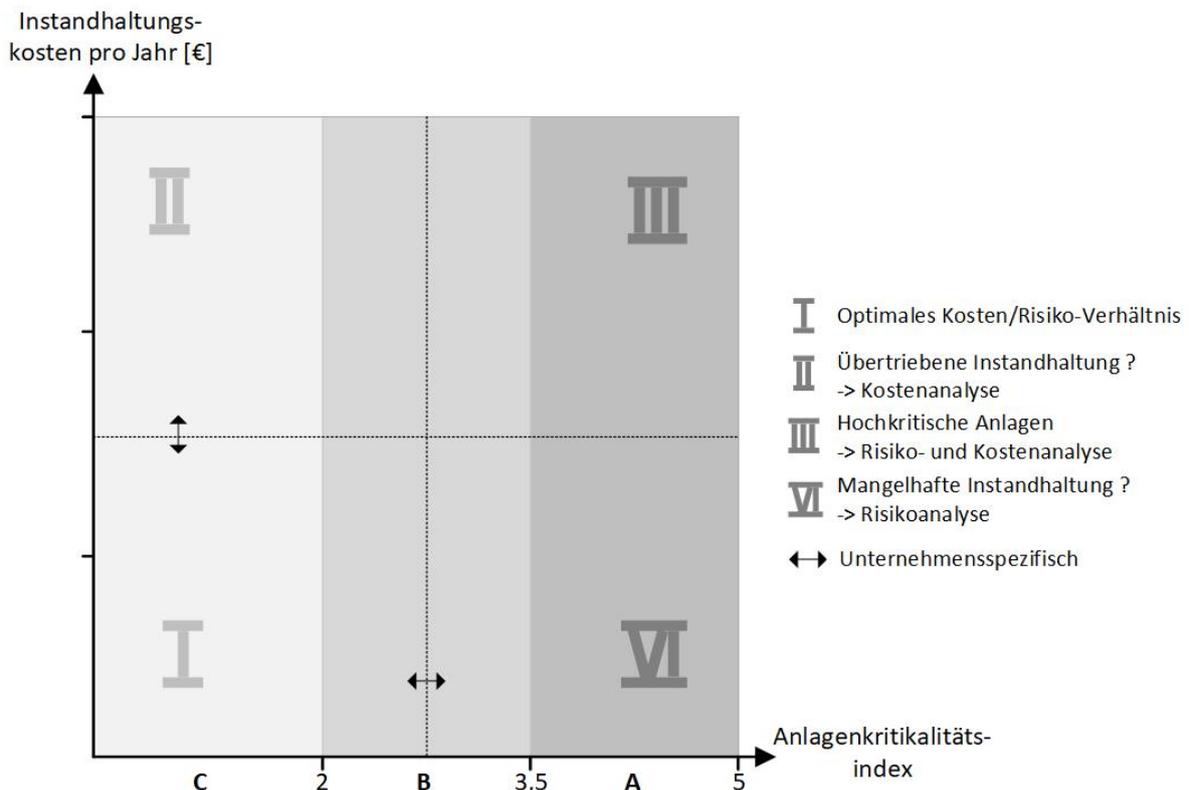


Abbildung 26: Transparente Kostenübersicht vs. Anlagenkritikalitätsindex¹⁷⁷

Bei der Analyse müssen kritische Betrachtungseinheiten besonders sorgfältig betrachtet werden, da zum einen mit enormen Ausfallfolgen zu rechnen ist und zum anderen die notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen (Inspektion, Sensorik etc.) teuer und zeitaufwendig sind. Zu diesem Zweck können die Experten die

¹⁷⁵ vgl. Biedermann, 2016c, S. 83

¹⁷⁶ vgl. Pawellek, 2016, S. 192f

¹⁷⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Passath/Mertens, 2019, S. 367

Betrachtungseinheiten aufteilen, indem sie die Kosten-Trennlinie anheben/absenken und die Index-Trennlinie verschieben, um besonders kostenintensive und/oder kritische Einheiten zuerst auf Kosten bzw. Risiko zu untersuchen (Abbildung 26). Darüber hinaus ermöglicht das Austauschen der gesamten Instandhaltungskosten auf der Ordinate durch einzelne Kosten für Instandhaltungsaktivitäten (Wartung, Inspektion etc.) oder Kostenanteile (Personalkosten, Fremdleistungskosten etc.) eine dynamische Kostenbetrachtung. Befindet sich die betrachtete Einheit im dritten Quadranten, sind sowohl die Instandhaltungskosten auf die kostentreibenden Faktoren zu untersuchen als auch die Risikoeinstufung erneut zu überprüfen. Im zweiten und vierten Quadranten erfordert der Verdacht auf übermäßige oder mangelhafte Instandhaltung entweder eine Kostenanalyse oder eine Risikoanalyse.¹⁷⁸ Die Ergebnisse der Analysen werden genutzt, um kostensparende oder risikomindernde Maßnahmen auf die betroffenen Betrachtungseinheiten anzuwenden und sie so in Richtung des ersten Quadranten zu verlagern.

Schritt 7: Auswahl/Anpassung der Instandhaltungsstrategie

Nach der detaillierten Analyse der Kosten sind die Experten in der Lage den treibenden Kostenfaktor den reaktiven oder präventiven Maßnahmen zuzuordnen.

Tabelle 8: Auswahl der richtigen Instandhaltungsstrategie¹⁷⁹

	Instandhaltungsstrategie	Anlagenprioritäts- klasse	Wann wird sie angewendet?
Beseitigung von Störung/Ausfall	Reaktive (korrektive) Instandhaltung	C	Für nicht kritische Aggregate, bei denen die Fehlererkennung oder -vermeidung teurer ist als die Ausfallkosten
Präventive Vermeidung von Störung/Ausfall	Periodische Instandhaltung	B und C	Bei Aggregaten mit gut dokumentierten Ausfallverhalten und/oder wenn der Zustand der Anlage nicht oder erst mit langwierigem Zerlegen erkennbar ist
	Zustandsorientierte Instandhaltung	A und B	Für kritischen Aggregate, die zu unvorhersehbaren Zeiten ausfallen und die Möglichkeit der Zustandsüberwachung gegeben ist
	Vorausschauende Instandhaltung	A	Für besonders kritische Aggregate, die durch hohe Variation des Produktionsprogramms und/oder ohne feste Lastkollektive gekennzeichnet sind und daher eine Prognose von Verschleiß notwendig ist
	Redundanz oder Neukonstruktion	A	Kritische Aggregate für die kein anderes Verfahren anwendbar ist

¹⁷⁸ vgl. Passath/Mertens, 2019, S. 367

¹⁷⁹ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Matyas, 2018, S. 158&137

Die Risikoanalyse wiederum gibt Aufschluss darüber, ob und in welchem Umfang präventive Maßnahmen erforderlich sind. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich die notwendigen Schlussfolgerungen für die Anpassung oder Auswahl der passenden Instandhaltungsstrategie zur Kostenreduktion ziehen. Dazu stehen die in Kapitel 2.1.3 erläuterten Instandhaltungsstrategien zur Verfügung, welche in Tabelle 8 nochmals kurz zusammengefasst sind. Kann keine der angeführten Strategie zugewiesen werden, weil z. B. für eine besonders kritische Einheit keine Überwachung oder Prognose möglich ist oder die Fehlerursache nicht beseitigt werden kann, muss eine redundante Einheit oder eine Neukonstruktion in Betracht gezogen werden.

Mit Hilfe der in der Vorgehensweise integrierten Werkzeuge und Tools werden zum einen technische und kostentreibende Betrachtungseinheiten in Kombination mit deren Anlagenkritikalitätsindex transparent dargestellt und zum anderen organisatorische Optimierungspotenziale identifiziert. Anpassungen zur Leistungssteigerung können zum Beispiel das Outsourcing von Spezialleistungen, die Erhöhung des Qualifizierungsbedarfs oder die Optimierung von Ersatzteilmanagement umfassen. Diese Arbeit schlägt die Steigerung der Effizienz und die damit verbundene Senkung der Kosten durch die Einführung bzw. Ausweitung von Lean Management Methoden (z.B.: autonome Instandhaltung) und den Einsatz digitaler Enabler (z.B.: Handheld-Geräte) vor.

4.3 Baustein II: Implementierung von Methoden des Lean Managements

Das Ziel des zweiten Bausteins ist es durch die Integration von Lean-Management Methoden die Instandhaltungskosten bei gleichbleibender Produktions- und Produktqualität zu senken. Dafür wird in dieser Arbeit eine Balanced Score Card mit Kennzahlen speziell für die Instandhaltung sowie die Integration einer autonomen Instandhaltung vorgeschlagen.

4.3.1 Kennzahlengestützte Instandhaltung

Unternehmen benötigen Kennzahlen auf allen Ebenen, um komplexe Geschäfts- und Produktionsprozesse schnell und übersichtlich darzustellen und auf deren Grundlage Entscheidungen im Hinblick auf die definierten Unternehmensziele zu treffen.¹⁸⁰ Ein weiterer wichtiger Aspekt sind Kennzahlen auf der operativen Ebene, die so gestaltet sein müssen, dass sich die Produktionsmitarbeiter mit ihnen identifizieren können und sich auch in der Lage sehen, diese positiv beeinflussen zu können.¹⁸¹

¹⁸⁰ vgl. Matyas, 2018, S. 97

¹⁸¹ vgl. Heller/Prasse, 2017, S. 20

Balanced Scorecard für die Instandhaltung

In Kapitel 2.2.2 wurde die in Abbildung 27 dargestellte BSC speziell für die Instandhaltung präsentiert. Die ausgewählten Kennzahlen sind besonders aussagekräftig für die Entscheidungsfindung auf strategischer Ebene.

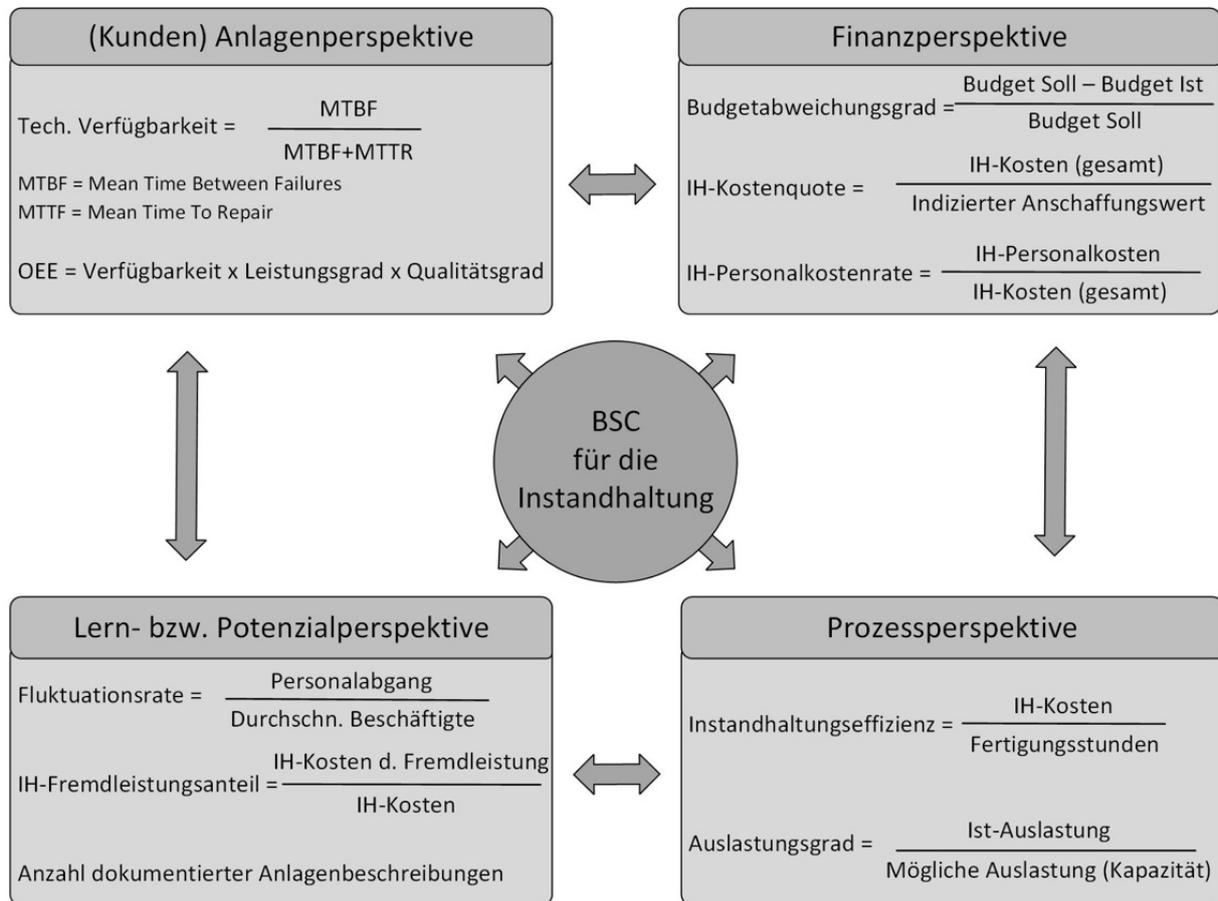


Abbildung 27: Balanced Scorecard für die Instandhaltung¹⁸²

Die Gesamtanlageneffektivität (Overall Equipment Effectiveness, OEE) wurde speziell für die Fertigungsindustrie entwickelt und muss daher für die Anwendung in der kontinuierliche Prozessindustrie angepasst werden. Im Folgenden wird ein Modifikationsvorschlag für den OEE zur optimalen Nutzung in der vollkontinuierlichen Prozessindustrie vorgestellt (Abbildung 28). Es wird vorgeschlagen den OEE nicht wie üblich mit Stückzahlen und Betriebszeit, sondern mit der produzierten Menge in Tonnen zu bestimmen. In einem ersten Schritt muss die theoretisch mögliche Produktionskapazität der Anlage als Grundlage für die Berechnung ermittelt werden. Diese kann aufgrund der ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse etwas schwanken und muss daher in Absprache mit Fachleuten (Anlagenbetreiber, Asset Manager usw.) realistisch eingeschätzt werden. Für eine einwandfreie Produktion sind Stillstände in bestimmten Zeitabständen für Instandhaltungszwecke, sowie die Reinigung der Anlage, in der Prozessindustrie Standard. Insbesondere sind die

¹⁸² Eigene Darstellung, in Anlehnung an Pawellek, 2016, S. 94ff und Apel, 2018, S. 519f

Geschwindigkeitsverluste in der Prozessindustrie nicht mit denen in der verarbeitenden Industrie vergleichbar, da es sich um einen kontinuierlichen Prozess handelt, der nicht einfach unterbrochen werden kann. In einigen Branchen ist es trotzdem möglich, den Prozess zu verlangsamen, ohne die gesamte Anlage abzuschalten, wenn es Probleme mit der Anlage oder Engpässe bei den Materialien oder Betriebsstoffen gibt. Qualitätsverluste in der Prozessindustrie sind häufig auf eine schlechte Qualität der Ausgangsmaterialien und -stoffe sowie der Anfahr- und Umstellprozesse der Anlage zurückzuführen.

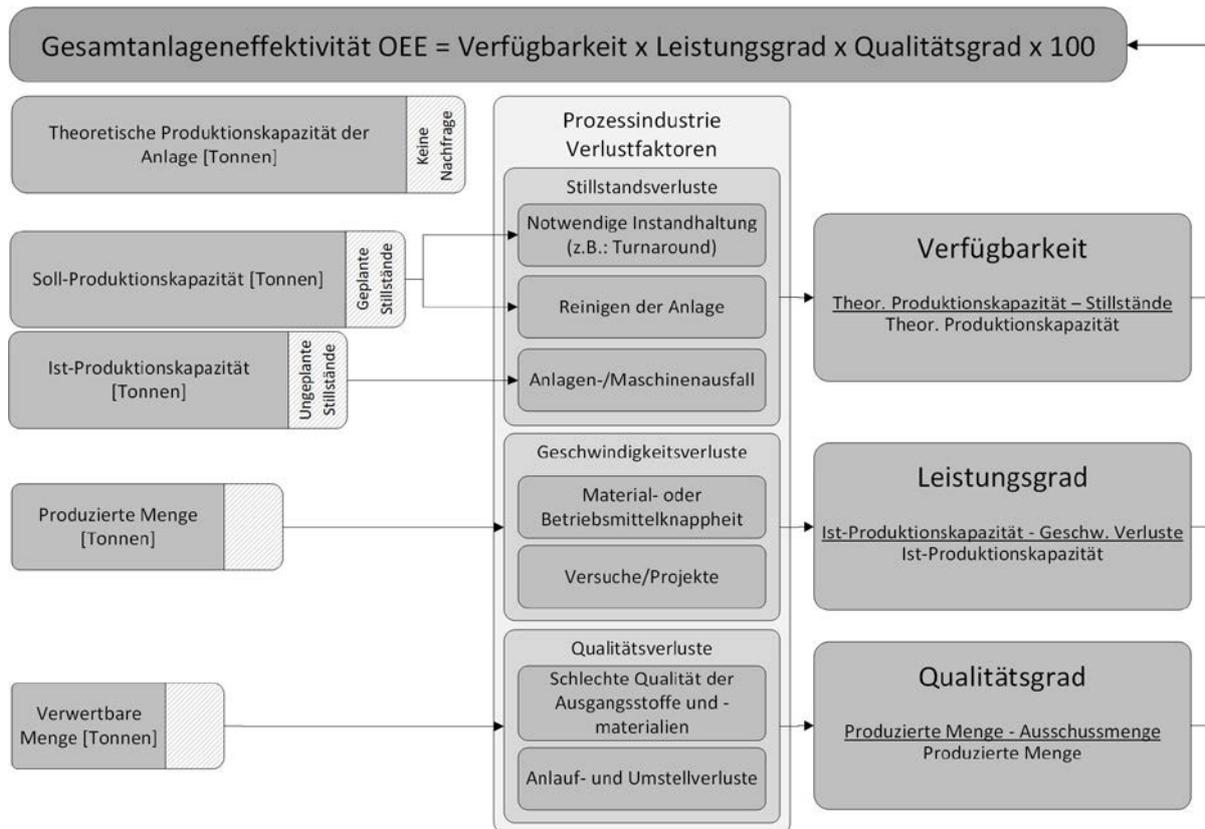


Abbildung 28: OEE modifiziert für die vollkontinuierliche Prozessindustrie¹⁸³

4.3.2 Autonome Instandhaltung

Ziel der Einführung der autonomen Instandhaltung ist es, die scharfe Trennung zwischen Instandhaltung und Produktion in einigen Bereichen aufzuheben und sie gemeinsam für die Instandhaltung der Produktionsanlagen und die Sicherstellung einer reibungslosen Produktion verantwortlich zu machen. Mit der Einführung der autonomen Instandhaltung versprechen sich die Unternehmen eine Verringerung der Stillstandzeiten, eine Entlastung des Instandhaltungspersonals und kürzere Reaktionszeiten.¹⁸⁴

¹⁸³ Eigene Darstellung

¹⁸⁴ vgl. Reichert et al., 2018, S. 53

Potenzial der autonomen Instandhaltung

Aufgrund der hochautomatisierten Anlagen in der kontinuierlichen Prozessindustrie und der daraus resultierenden freien Kapazitäten des Produktionspersonals im Normalbetrieb ist die Integration der autonomen Instandhaltung besonders geeignet. Das Potenzial durch die Einführung der autonomen Instandhaltung ist in Abbildung 29 dargestellt. Die Entlastung durch die Übertragung von Aufgaben mit geringem und mittlerem Fertigungsgrad an das Produktionspersonal ermöglicht dem qualifizierten Instandhaltungspersonal die Durchführung von „High-Tech“ Aufgaben. Die gewonnene Kapazität wird somit für die Identifizierung von Optimierungspotenzialen, die Integration von innovativen Technologien und das Managen von Verbesserungsprojekten genutzt.¹⁸⁵ Auch das Insourcing bzw. Re-Insourcing von Kernkompetenzen ist in der Prozessindustrie ein großes Thema, um im Falle eines Ausfalls schnell mit internem, qualifiziertem Personal reagieren zu können. Damit entfällt auch die Abhängigkeit von externem Personal, das die komplexen Anlagen kaum kennt und dessen Kompetenz oft nicht beurteilt werden kann. Ein weiterer Vorteil des gemeinsamen Ansatzes besteht darin, dass die Produktionsmitarbeiter bei Anlagenstillständen unterstützende Tätigkeiten ausführen können.

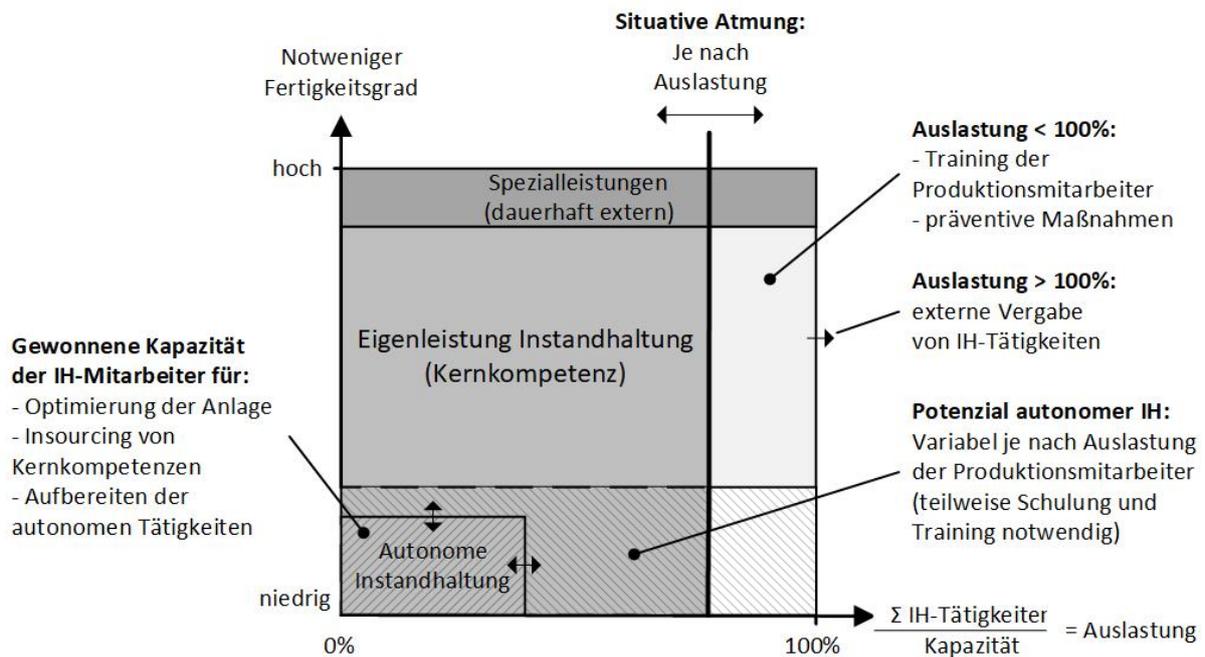


Abbildung 29: IH-Auslastung mit autonomer Instandhaltung¹⁸⁶

Ein Teil der gewonnenen Kapazitäten muss allerdings für die Vorbereitung autonomer Instandhaltungstätigkeiten und für die praktische Ausbildung des Produktionspersonals in diesen Tätigkeiten aufgewendet werden.

¹⁸⁵ vgl. Heller/Prasse, 2017, S. 102

¹⁸⁶ Eigene Darstellung

Vorgehensmodell zur systematischen Ein- und Durchführung der autonomen Instandhaltung

Für die nachhaltige Integration einer autonomen Instandhaltung wurde das Vorgehensmodell in Abbildung 30 entwickelt.

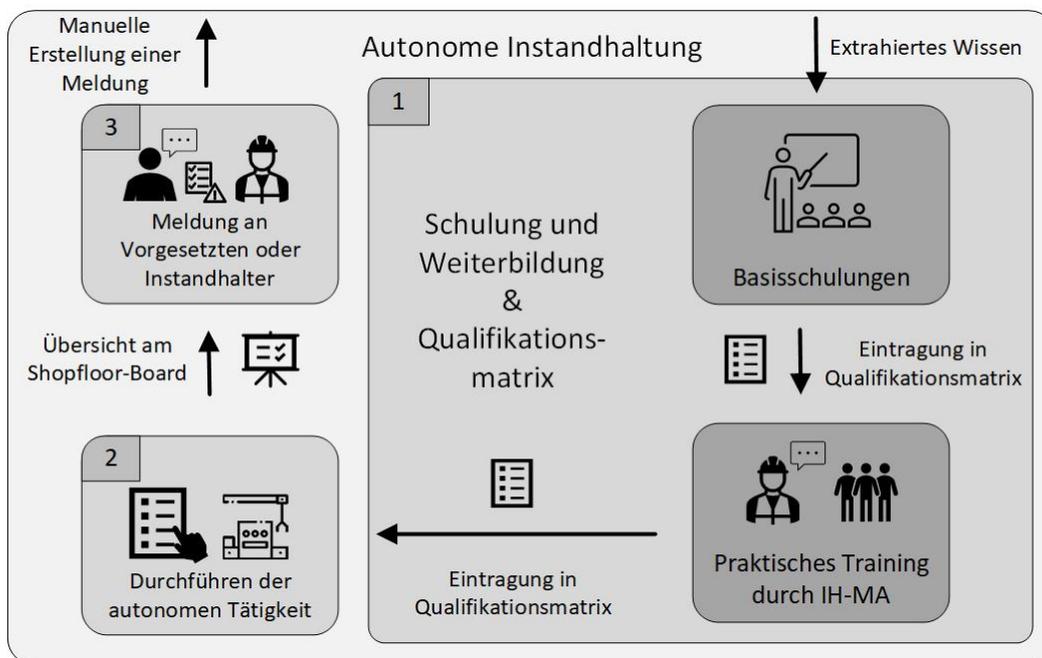


Abbildung 30: Vorgehensmodell zur Ein- und Durchführung einer analogen autonomen IH¹⁸⁷

Die Grundvoraussetzung für die Einführung der autonomen Instandhaltung ist das extrahierte Wissen (Kapitel 4.5.1) des Instandhaltungspersonals, welches für die Schulung und das Training der Produktionsmitarbeiter sowie für die Durchführung der IH-Tätigkeiten benötigt wird.

Schritt 1: Schulung und Qualifikationsmatrix

Wie in Abbildung 30 dargestellt, erfordert eine geregelte und nachhaltige Einführung der autonomen Instandhaltung sowohl eine theoretische Basisausbildung als auch eine praktische Ausbildung der Produktionsmitarbeiter durch das Instandhaltungspersonal. Dafür ist in Kapitel 4.5.2 der Aufbau eines Schulungskonzeptes zur Einführung der autonomen Instandhaltung näher erläutert. Sowohl die Basisschulungen als auch die erlernten autonomen Tätigkeiten werden in der Qualifikationsmatrix jedes Produktionsmitarbeiters erfasst.

Schritt 2: Durchführung der autonomen IH

Nach der Basisschulung und der praktischen Ausbildung ist das Produktionspersonal in der Lage die klassischen Instandhaltungsaufgaben wie Reinigung, Inspektion, Schmierung etc. durchzuführen und somit das Instandhaltungspersonal zu entlasten.

¹⁸⁷ Eigene Darstellung

Für die korrekte und effiziente Abwicklung der Tätigkeiten wird den Produktionsmitarbeitern das aufbereitete Wissen zum Beispiel in Form von Checklisten zur Verfügung gestellt.

Schritt 3: Erstellen der Fehlermeldung

Die Entdeckung einer Fehlfunktion muss dem zuständigen Vorgesetzten oder dem Instandhaltungspersonal gemeldet werden. Daraufhin wird manuell eine Meldung im entsprechenden ERP-System erstellt, die dann bearbeitet wird.

Mit operativen Kennzahlen und To-Do-Listen auf einem Shopfloor-Board können die autonom ausgeführten Tätigkeiten visualisiert und bewertet werden. Die Unterstützung durch digitale Enabler bei der Durchführung der autonomen Tätigkeit verspricht eine deutliche Effizienzsteigerung.

4.4 Baustein III: Enabler der Digitalisierung

Baustein III befasst sich mit der Nutzung digitaler Enabler (Tablets, Smartphones, Smartwatches etc.) durch Mitarbeiter in Produktion und Instandhaltung, welche erhebliche Effizienzgewinne durch die Optimierung der Instandhaltungsausführung und -planung sowie durch den Austausch von Daten und Informationen in Echtzeit verspricht.¹⁸⁸ Aus diesem Grund wurden die in der systematischen Literaturrecherche identifizierten Potenziale der Enabler der Digitalisierung aufgelistet und auf ihre Eignung für die Instandhaltung bewertet.

4.4.1 Potenzial durch die Verwendung Handheld-Geräten

Abbildung 32 verdeutlicht wie die Verwendung von Handheld-Geräten (Smartphones und Tablets) das Auftragsmanagement, die Auftragsdurchführung und die Informationsbasis und -daten in der Instandhaltung verbessern kann.



Abbildung 31: Handheld-Geräte¹⁸⁹

¹⁸⁸ vgl. März, 2017, S. 10

¹⁸⁹ vgl. <https://www.festo.com/de/de/app/smartenance.html> (gelesen am:27.11.2021)

Darüber hinaus wird auf die Effizienzsteigerung durch autonome Instandhaltung aufgrund der frühzeitigen Erkennung von Störungen und Fehlern hingewiesen. Durch den Einsatz von Barcodes oder RFID-Technologien können Technische Plätze automatisch identifiziert werden, wodurch eine schnelle Erfassung von Störungen oder Instandhaltungsbedarf nach Inspektionen gewährleistet wird.¹⁹⁰ Für die optimierte Abwicklung von Instandhaltungsmaßnahmen ist der Zugriff auf historische Wartungs- und Maschinendaten, sowie das Abrufen von Fachinformationen und Expertenwissen, z.B. in Form von Checklisten, auf dem Handheld-Geräten unerlässlich. Der Instandhaltungstechniker kann sowohl den Beginn der Arbeit als auch die Rückmeldung direkt vor Ort über das Handheld-Gerät mit allen notwendigen Informationen (verwendete Materialien und Werkzeuge, aktueller Zustand der Anlage usw.) erledigen. Überdies sollte es dem Instandhaltungspersonal möglich sein, Anmerkungen oder Erkenntnisse in Form von Annotationen hinzuzufügen, um diese mit Kollegen reflektieren und in den Planungsprozess integrieren zu können.^{191,192}

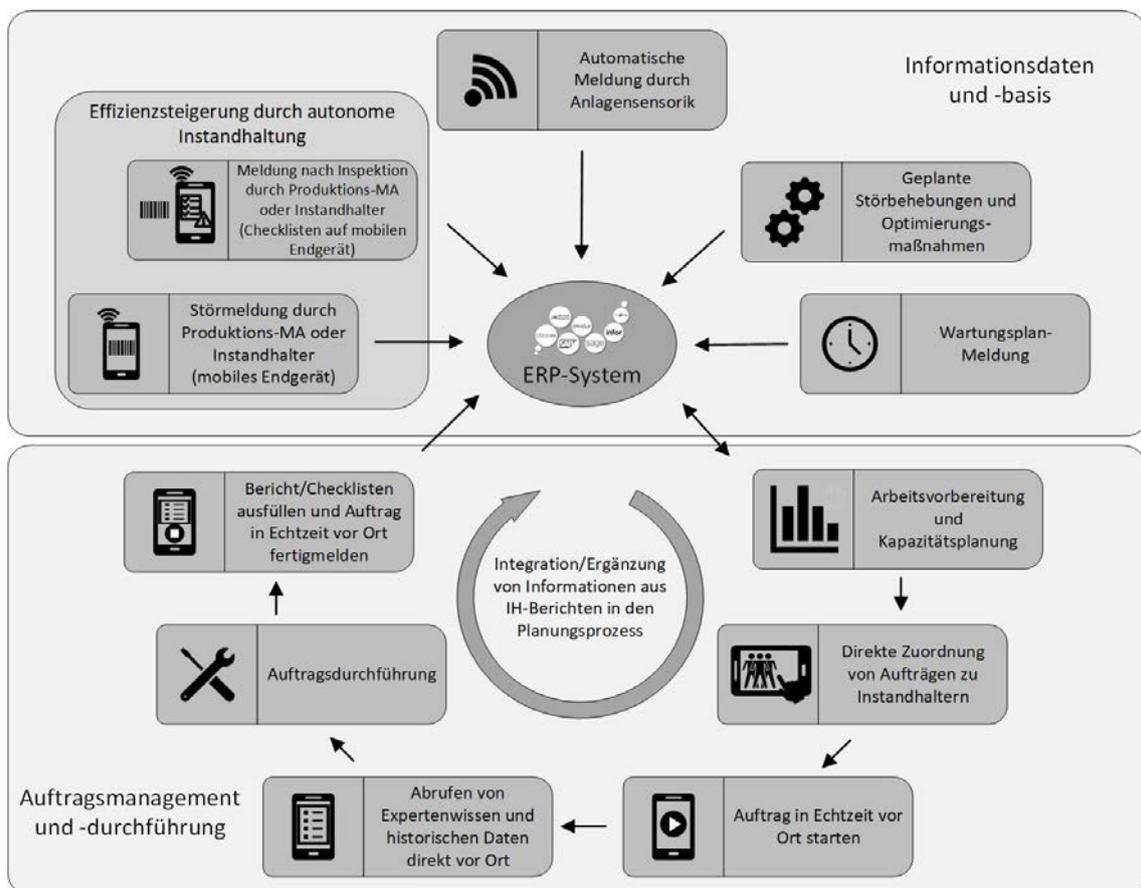


Abbildung 32: Potenzial durch die Verwendung von Handheld-Geräten¹⁹³

Diese schnelle und vollständige Übermittlung der notwendigen Informationen sichert den Informationskreislauf und gewährleistet die hohe Effizienz des Systems.

¹⁹⁰ vgl. März, 2017, S. 693

¹⁹¹ vgl. Haase et al., 2016, S. 329ff

¹⁹² vgl. Zapp et al., 2018, S. 216

¹⁹³ Eigene Darstellung, in Anlehnung an März, 2017, S. 693

Zusammengefasst führt die Integration von Handheld-Geräten unter anderem zu einer Verkürzung der Reaktionszeit, einer Erhöhung der Datenqualität, einer Steigerung der wertschöpfenden Tätigkeiten jedes Mitarbeiters sowie zu direkten und indirekten Kosteneinsparungen beim Betrieb der Anlage.¹⁹⁴

4.4.2 Potenzial durch die Verwendung von Wearables

Die Smartwatch hat den großen Vorteil, dass Anweisungen vom Instandhaltungspersonal durch Vibration am Handgelenk sofort wahrgenommen werden und somit eine sofortige Rückmeldung zu erwarten ist. Das Problem besteht jedoch darin, dass der Informationskreislauf aufgrund des Informationsinputdefizits nicht geschlossen werden kann und daher die Verwendung auf Instandhaltungskoordination beschränkt ist.¹⁹⁵



Abbildung 33: Wearables¹⁹⁶

Trotz der Möglichkeit des freihändigen Zugriffs auf Informationen wird der Einsatz von Datenbrillen in der Instandhaltung aufgrund des mangelnden Tragekomforts, der schlechten drahtlosen Netzwerkverbindung und der verbalen Informationseingabe, welche aufgrund des hohen Lärmaufkommens in der Prozessindustrie oft nicht möglich ist, in Frage gestellt.¹⁹⁷

4.4.3 Potenzial durch die Verwendung eines Shopfloor-Boards

Ein sehr wichtiger Aspekt des Shopfloor-Managements ist nicht nur die Erfassung von KPIs, sondern auch die Visualisierung dieser direkt am Shopfloor. Hierfür eignet sich ein digitales Shopfloor-Board (Abbildung 34), mit dessen Hilfe KPIs, der aktuelle Stand von Verbesserungsprojekten oder auch die zu erledigenden Aufgaben visualisiert werden können. Auf Basis dieser Informationen können in täglichen Meetings am Shopfloor-Board gemeinsam Maßnahmen eingeleitet werden, welche zu einer kontinuierlichen Verbesserung der Prozesse führen.

¹⁹⁴ vgl. März, 2017, S. 692

¹⁹⁵ vgl. Merhar et al., 2019, S. 299

¹⁹⁶ vgl. <https://www.technik-profis.de/magazin/wearables-was-ist-das> (Gelesen am: 27.11.2021)

¹⁹⁷ vgl. Kovacs et al., 2019, S. 90



Abbildung 34: Digitales Shopfloor-Board¹⁹⁸

4.4.4 Bewertung der Enabler der Digitalisierung

Um die Entscheidungsfindung für Unternehmen zu unterstützen, werden die digitalen Enabler und das digitale Shopfloor-Board in Tabelle 9 zusammengefasst und auf ihre Eignung für den Einsatz in der Instandhaltung bewertet.

Tabelle 9: Digitale Enabler und Shopfloor-Assistenzsysteme¹⁹⁹

Produktgruppe	Wearables		Handheld Geräte		Shopfloor-Assistenzsysteme	
	Produkt	Datenbrille	Smart Watch	Smartphone	Tablet	Digitales Shopfloor-Board
	Charakteristika	mobil				stationär
Ergonomie	Bedienerfreundlich	●	●	●	●	●
	Tragekomfort	○	●	●	●	-
Unterstützungsleistung	Informationsbereitstellung	●	○	●	●	●
	Auftragsdokumentation (Start-Ende)	Ja	Ja	Ja	Ja	-
	IH-Koordination	●	●	●	●	○
	Informationsinput	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja
Anwendungsfelder	Einführungskosten	hoch	mittel	mittel	mittel-hoch	mittel-hoch
	Sonstige Anmerkungen	Schulungen, Werkerassistenzsystem, Remote Support	Transparenter Informationsfluss (Anstehende Tätigkeiten)	IH-Dokumentation, Unterstützung bei der Durchführung, Werkerassistenzsystem	IH-Dokumentation, Unterstützung bei der Durchführung, Werkerassistenzsystem	Visualisierung der Kennzahlen für Lean Management/TPM, Transparenz durch Visualisierung entsprechender Maßnahmen
	Sonstige Anmerkungen	Durch hohe Anlagenlautstärke kein verbaler Informationsinput möglich	Durch Vibration am Handgelenk sofortige Wahrnehmung	Gerät kann immer mitgeführt werden (immer "am Mann")	Für autonome Instandhaltung zu teuer	-

Das Fazit der Evaluierung ist, dass die Handheld-Geräte aufgrund der Möglichkeit der Informationsbereitstellung am besten für die Unterstützung bei der Durchführung von Instandhaltungstätigkeiten geeignet sind und darüber hinaus aufgrund der Möglichkeit der Informationseingabe den Informationskreislauf schließen und somit die kontinuierliche Verbesserung des Instandhaltungsprozesses gewährleisten.

¹⁹⁸ vgl. <https://www.shopfloor-board.de> (Gelesen am: 27.11.2021)

¹⁹⁹ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Niehaus, 2017, S. 9 und Kovacs et al., 2019, S. 91

4.5 Fundament: Standardisierung und nachhaltige Integration

Das Fundament bilden Werkzeuge und Instrumente zur Standardisierung und nachhaltigen Integration des LSM-Konzepts im Unternehmen, wodurch es eine Grundvoraussetzung für die Umsetzung der drei Bausteine darstellt.

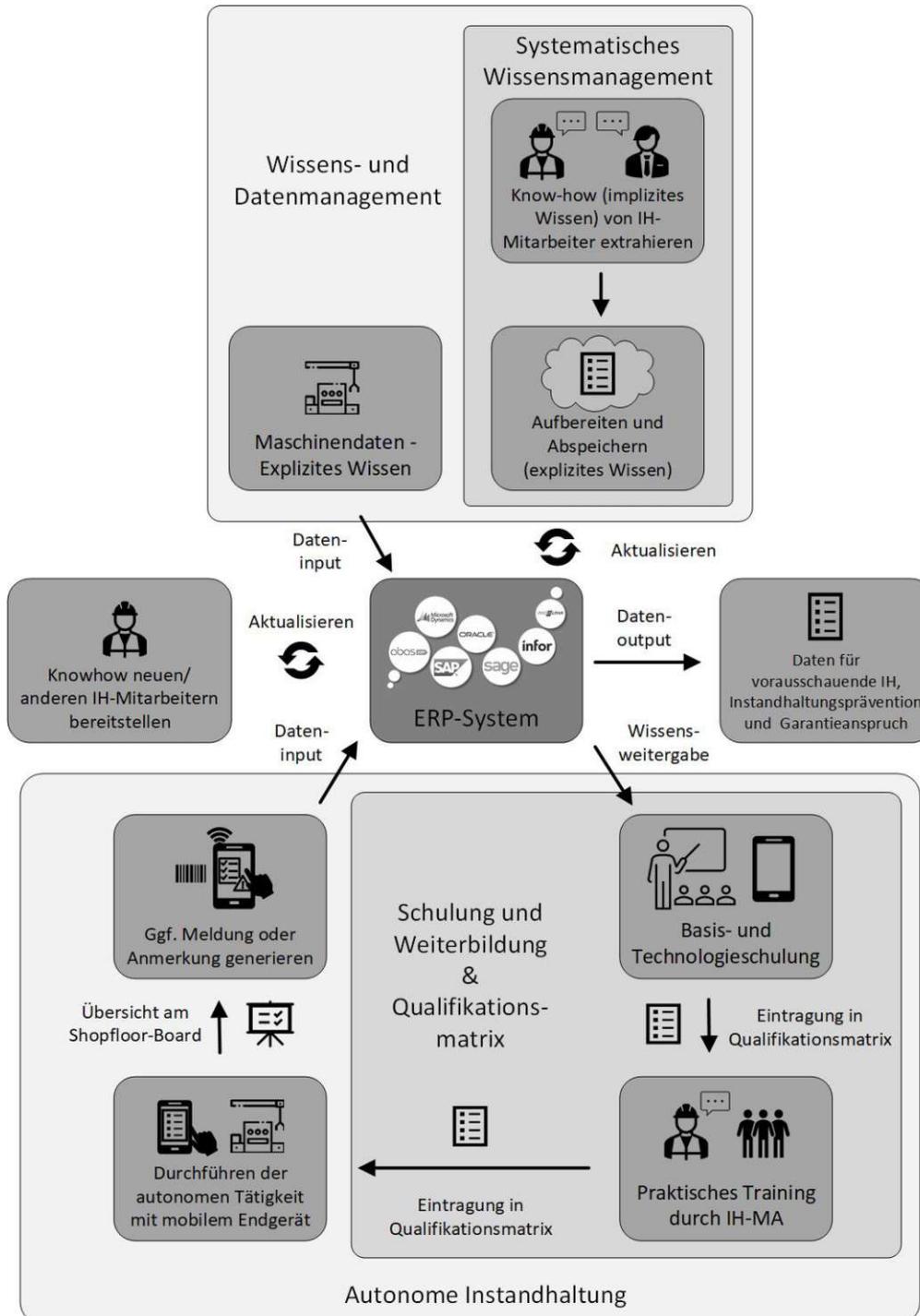


Abbildung 35: Standardisierung und nachhaltige Integration²⁰⁰

²⁰⁰ Eigene Darstellung

Durch das systematische Wissensmanagement wird das implizite Wissen der Instandhaltungsmitarbeiter extrahiert, aufbereitet und in das ERP-System geladen. Neben den erfassten Maschinendaten können, die aufbereiteten expliziten Daten dem Instandhaltungspersonal mittels digitaler Enabler zur Weiterbildung und zur Unterstützung bei der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt sowie für die autonome Instandhaltung genutzt werden. Zusätzlich kann das aufbereitete Wissen und die Aufzeichnungen über die Instandhaltungsaktivitäten der einzelnen Anlagen auch zur Instandhaltungsprävention, für die vorausschauende Instandhaltung und zur Vermeidung von Problemen bei Garantieansprüchen herangezogen werden.^{201,202} Ein weiterer Punkt des systematischen Wissensmanagements ist die ständige Aktualisierung der Dokumente auf der Grundlage von Verbesserungsvorschlägen des Instandhaltungs- und Produktionspersonals.

Die Aus- und Weiterbildung der Produktionsmitarbeiter und die Transparenz des erreichten Qualifikationsniveaus sind für die Umsetzung der autonomen Instandhaltung erforderlich. Daher wird in Kapitel 4.5.2 das entwickelte Schulungskonzept auf Basis der Prinzipien des Kata-Coachings und in Kapitel 4.5.3 eine exemplarische Qualifikationsmatrix für die autonome Instandhaltung vorgestellt.

4.5.1 Vorgehensmodell für ein systematisches Wissensmanagement

Die Digitalisierung und Automatisierung und die damit verbundene Komplexität der Produktionsanlagen erhöhen die Qualifikationsanforderungen jedes Mitarbeiters im Unternehmen. Daher ist der Fokus auf ein funktionierendes Wissensmanagement notwendig, um der Gefahr des Wissensverlustes und des damit verbundenen Kompetenzverlustes entgegenzuwirken.²⁰³ Dafür wird das Wissen erfahrener Mitarbeiter extrahiert, verarbeitet und gespeichert, um es dann als Empfehlungen und Informationen für neue/andere Mitarbeiter und für die Umsetzung der autonomen Instandhaltung zur Verfügung zu stellen.²⁰⁴

Schritt 1: Know-how der IH-Mitarbeiter extrahieren

Durch die Bereitstellung von Fachinformationen und Expertenwissen direkt vor Ort, z.B. über Handheld-Geräte oder Wearables, werden die Mitarbeiter bei der sicheren

²⁰¹ vgl. Biedermann/Kinz, 2019, S. 17

²⁰² vgl. Poór et al., 2019, S. 251

²⁰³ vgl. Huber et al., 2021, S. 198

²⁰⁴ vgl. Biedermann/Kinz, 2019, S. 16

und schnellen Lösung von Problemen unterstützt und das Risiko von menschlichem Versagen minimiert.^{205,206}

Tabelle 10: Methoden für die Wissensextraktion²⁰⁷

	Methoden	Praxisrelevante Fragen
mündlich	Interview	-Welche Sicherheitsmaßnahmen sind erforderlich? -Wie geht der erfahrene Mitarbeiter vor?
	Storytelling	-Warum wurden gewisse Vorgehensweisen und Einschätzungen getroffen?
schriftlich	Erfahrungsberichte	-Gibt es Besonderheiten, die beachtet werden müssen? -Maßnahmen für eine schnellere/ genauere Ausführung der Tätigkeit ("Tricks")?
	Entscheidungsbaum	-Welche bekannten Störungen/Fehler gibt es?
	Lessons learned	-Gibt es Aufzeichnungen (Bilder) der aufgetretenen Störungen/Fehler?

Dazu muss zunächst das Know-how erfahrener Mitarbeiter mit geeigneten Methoden des Wissensmanagements erfasst werden. Die Methoden, die eingesetzt werden können, sind sehr vielfältig und können von den Unternehmen individuell gewählt werden. In Tabelle 10 werden einige schriftlich und mündlich durchgeführte Methoden aufgelistet. Die aufgeführten praxisorientierten Fragen dienen dem Instandhaltungsmanagement als Vorlage bzw. Hilfe, um alle relevanten Informationen schnell und vollständig zu sammeln.

Schritt 2: Aufbereiten und Abspeichern der extrahierten Informationen

Nach der Extraktion müssen die gewonnenen Informationen aufbereitet werden, um das Wissen langfristig zu sichern und neuen/anderen Mitarbeitern den Wissenserwerb zu erleichtern.²⁰⁸ Je nach Anwendungsfall kann hier die Erstellung von Checklisten, Entscheidungsbäumen, Prozessdiagrammen oder auch der Aushang von Informationen am Shopfloor-Board zum Einsatz kommen.

Für die Durchführung von autonomen Tätigkeiten wie Reinigen, Inspektionen und Schmierungen sind insbesondere Checklisten zu empfehlen. In der Prozessindustrie ist der größte Mehrwert durch die autonome Inspektion zu erwarten. Zu diesem Zweck wird in dieser Arbeit ein Verfahren zur effizienten Erstellung eines Inspektionsplans für die autonome Instandhaltung vorgestellt.

²⁰⁵ vgl. Haase et al., 2016, S. 333

²⁰⁶ vgl. Kovacs et al., 2019, S. 87

²⁰⁷ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Biedermann, 2016b, S. 138 und Huber et al., 2021, S. 203

²⁰⁸ vgl. Huber et al., 2021, S. 199

Vorgehensweise für die Erstellung eines Inspektionsplans

In Abbildung 36 wird ein exemplarischer Aufbau einer Inspektions-Checkliste dargestellt, welche auf Basis der Informationen aus der Wissensextraktion (Tabelle 10) zusammengestellt werden kann.

Bezeichnung der Betrachtungseinheit mit technischem Platz
z.B.: Kreislaufpumpe Ö-A1-AG1-1-P1234


 Logo des Unternehmens

Notwendigen Sicherheitsmaßnahmen
z.B.: Freigabeschein erforderlich

Notwendiges Equipment
z.B.: Taschenlampe

1. Kontrollstelle

Beschreibung des Vorgangs (Auf was ist zu achten etc.)

2. Kontrollstelle

Beschreibung des Vorgangs (Auf was ist zu achten etc.)

3. Kontrollstelle

Beschreibung des Vorgangs (Auf was ist zu achten etc.)

⋮







Bei gleichen/ähnlichen Betrachtungseinheiten

	1. Kontrollstelle	2. Kontrollstelle	3. Kontrollstelle	...
Ö-A1-AG1-1-10-P1234	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Ö-A1-AG1-1-10-P5678	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
...				

Ansprechperson für Fragen und Verbesserungsvorschläge (gelenktes Dokument)

Abbildung 36: Exemplarischer Aufbau einer Inspektionsplan²⁰⁹

²⁰⁹ Eigene Darstellung

Die folgenden Punkte sollten in einem Inspektionsplan für die Anwendung in der autonomen Instandhaltung integriert werden:

- Namen und Technischer Platz der Betrachtungseinheit
- Benötigtes Equipment für die Durchführung
- Notwendige Sicherheitsmaßnahmen in Abstimmung mit den Produktionsleitern
- Kontrollstellen:
 - Genaue Beschreibung, worauf zu achten ist
 - Bild der Kontrollstelle oder historisches Bild der Störung/des Fehlers (falls vorhanden) mit Markierung
 - Kästchen zum Ankreuzen
- Ansprechperson für Fragen und etwaige Verbesserungsvorschläge

Bei mehreren identischen/ähnlichen Beobachtungseinheiten in unmittelbarer Nähe wird zur effizienten Bearbeitung anstelle der einzelnen Kästchen, die neben dem jeweiligen Kontrollpunkt anzukreuzen sind, eine Tabelle wie in Abbildung 36 vorgeschlagen.

Die erstellten csv-Dateien werden anschließend dem entsprechenden Technischen Platz im ERP-System hinzugefügt und zusätzlich intern gespeichert. Verbesserungsvorschläge sowie die Erweiterung relevanter Kontrollpunkte aufgrund des Auftretens neuartiger Mängel oder aufgrund einer Konstruktionsänderung müssen in den Checklisten stets aktualisiert werden.

Schritt 3: Erforderlicher Informationsgehalt der generierten Meldungen

Die Meldungen, welche das Produktions- oder Instandhaltungspersonal mit Hilfe von digitalen Enablern generiert, werden als Daten (explizites Wissen) an das ERP-System weitergegeben und können so in spätere Analysen einbezogen werden. Die generierten Meldungen sollen eindeutig zuordenbar sein und möglichst wenig Individualität aufweisen, weshalb eine automatische Meldungsgenerierung mit nur wenigen, selbständig einzugebenden Attributen von Vorteil ist. Empfohlene Attribute, die die generierten Meldungen enthalten sollten, sind: Meldungsart, Meldungsnummer, Technischer Platz, Kurzbeschreibung, Meldender, Verantwortliche Person/Abteilung und Meldungsdatum und Uhrzeit.

4.5.2 Schulungskonzept für die Einführung und nachhaltige Integration autonomer Instandhaltung

Auf die Extraktion, Verarbeitung und Speicherung der Informationen folgt die Schulung des Produktionspersonals. Das Schulungskonzept enthält, wie in Abbildung 37 dargestellt, vier Module:

- Modul 1: Theoretische Basisschulung 1

- Modul 2: Theoretische Basisschulung 2
- Modul 3: Praktische Trainings durch IH-Mitarbeiter
- Modul 4: Systematisches KATA-Coaching für nachhaltige Integration

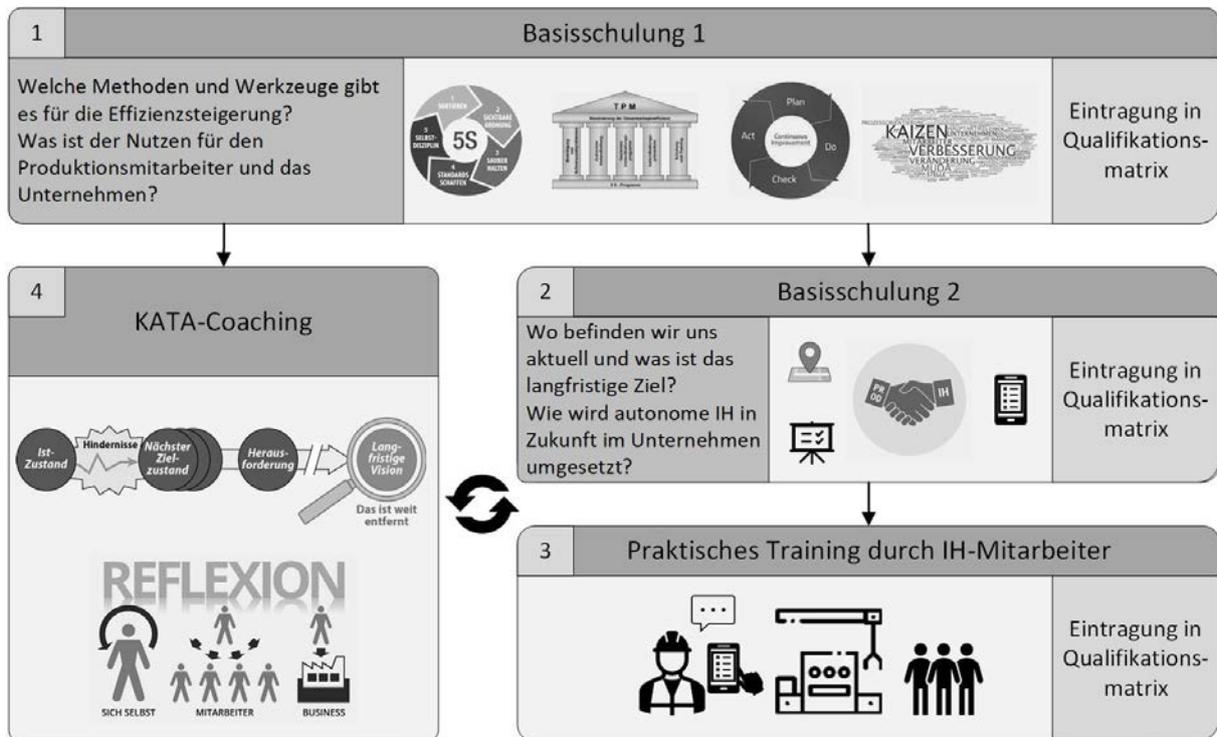


Abbildung 37: Schulungskonzept für die Einführung autonomer IH²¹⁰

Modul 1: Basisschulung 1

Diese Teilschulung soll die grundsätzlichen Fragen

- „Welche Methoden und Werkzeuge gibt es für die Effizienzsteigerung ein einem Unternehmen?“ und
- "Was ist der Nutzen für den Produktionsmitarbeiter und in weiterer Folge für das Unternehmen?"

klären. Dazu ist es notwendig die grundlegenden Methoden und Instrumente des Lean Managements zu erläutern und ihre Vorteile für das Unternehmen und die Mitarbeiter aufzuzeigen. Methoden und Instrumente, welche empfohlen werden, sind: 5S-Methode, Total Productive Maintenance (TPM), Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP), KATA-Coaching und Kaizen.

Insbesondere die autonome Instandhaltung sollte ausführlich behandelt werden, um die Vorteile für das Unternehmen und die Produktionsmitarbeiter aufzuzeigen und zu konkretisieren.

²¹⁰ Eigene Darstellung

Modul 2: Basisschulung 2

Der Inhalt der zweiten Basisschulung konzentriert sich hauptsächlich auf die Vision der Einführung einer digitalen autonomen Instandhaltung. Hier sind die Fragen

- „Wo befinden wir uns aktuell und was ist das langfristige Ziel (Vision)?“ und
- „Wie wird die autonome Instandhaltung in Zukunft im Unternehmen umgesetzt?“

zu beantworten. In einem ersten Schritt ist daher zu analysieren, welche autonomen Tätigkeiten derzeit von den Produktionsmitarbeitern auf welche Weise ausgeführt werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Dokumentation von den autonom durchgeführten Aktivitäten, sowie ob und wie digitale Enabler genutzt werden. Anhand dieser Erkenntnisse lässt sich beurteilen, wie vertraut das Produktionspersonal mit dem Konzept der autonomen Instandhaltung und der Nutzung von digitalen Enablern ist.

Darauf aufbauend ist zu klären, wie und mit welchen digitalen Enablern die autonome Instandhaltung künftig im Unternehmen umgesetzt werden soll. Zu diesem Zweck wird die Verwendung eines Ablaufdiagramms mit schrittweiser Erklärung auf dem zu verwendenden digitalen Enabler empfohlen, um eine Grundlage für die praktische Ausbildung zu schaffen. Die Übersicht und Bewertung der Enabler der Digitalisierung in Tabelle 9 soll die Auswahl des am besten geeigneten Tools für die autonome Instandhaltung unterstützen.

Modul 3: Praktisches Training

Die Instandhaltungsabteilung muss mit der Produktionsabteilung abstimmen, welche Tätigkeiten für die autonome Instandhaltung in Frage kommen. Für die ausgewählten Tätigkeiten muss die Instandhaltungsabteilung anschließend die für die Ausführung notwendigen Informationen von der Extraktion bis zur Speicherung wie zuvor beschrieben aufbereiten.

Die praktische Ausbildung wird von einem qualifizierten Instandhalter in kleinen Gruppen mit mehreren Produktionsmitarbeitern direkt am Shopfloor durchgeführt. Wie bereits in der Checkliste angegeben, besteht der erste und wichtigste Punkt darin, die Sicherheitsmaßnahmen während der Durchführung gemeinsam zu besprechen. Es folgt die Abarbeitung der Checkliste für die Betrachtungseinheit mit Hilfe des ausgewählten digitalen Enabler und die mehrmalige Erstellung einer Störungsmeldung zur Festigung der Routine. Der Fokus sollte einerseits auf der exakten Ausführung der Tätigkeit mit Hilfe des digitalen Enablers und andererseits auf der korrekten Erstellung einer Meldung im Falle eines vorliegenden Fehlers liegen. Produktionsmitarbeiter, die sich nach dem Training in der Lage fühlen, die Tätigkeit korrekt auszuführen, erhalten für diese Tätigkeit die Qualifikationsstufe 1 in der Qualifikationsmatrix (Kapitel 4.5.3).

Modul 4: Systematisches KATA-Coaching für nachhaltige Integration

Bei der Einführung von Lean Management Methoden kommt es vor allem auf die Art und Weise an, wie sie im Unternehmen implementiert werden. Die Umsetzung der Lean-Methode als Projekt mit einem Projektabschluss lässt keinen Raum für weitere Verbesserungen und führt daher im besten Fall zu einer Stagnation auf dem geschaffenen Niveau (Abbildung 38).

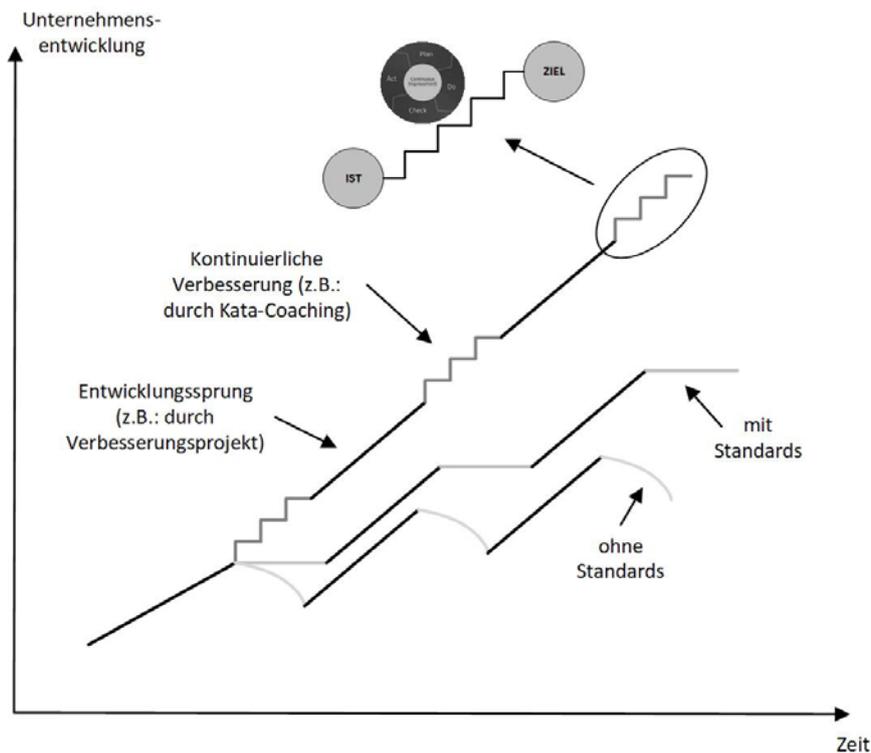


Abbildung 38: Auswirkung der kontinuierlichen Verbesserung²¹¹

Der von Toyota entwickelte KATA-Coaching-Ansatz motiviert Produktionsmitarbeiter dazu, konsequent und zielgerichtet neue Standards durch kontinuierliche Prozessverbesserung zu entwickeln. Zu diesem Zweck wird eine langfristige Vision als Grundstein gelegt, welche durch die Realisierung kleiner Zwischenziele erreicht werden soll.²¹²

Abbildung 39 veranschaulicht den KATA-Coaching Ansatz speziell für die Einführung der autonomen Instandhaltung. Als ersten Schritt wird die Orientierung durch die Vision einer digitalen autonomen Instandhaltung im Unternehmen verankert. Im Anschluss daran muss der aktuelle Zustand erfasst und darauf aufbauend das nächste kurzfristige Ziel definiert werden. Die nächsten kurzfristigen Ziele im Zusammenhang mit der autonomen Instandhaltung könnten z.B. die Durchführung von Schulungen, die Erstellung von Checklisten und das Training für die nächste autonome Tätigkeit sein. Auch Verbesserungsvorschläge von Produktionsmitarbeitern hinsichtlich zusätzlicher

²¹¹ Eigene Darstellung

²¹² vgl. Ehni/Kersten, 2015, S. 177

Ausrüstung für eine ergonomischere Durchführung der Inspektion oder Kommentare zur Software des digitalen Enablers können kurzfristige Ziele darstellen. Der Weg vom Ist- zum Ziel-Zustand wird unter Verwendung des PDCA-Zyklus abgearbeitet und anschließend gemeinsam mit allen beteiligten Personen reflektiert. Daraufhin startet der Vorgang erneut. Sowohl in der Planungs- als auch in der Problemlösungsphase wird das Produktionspersonal durch das Know-how des Instandhaltungspersonals unterstützt.²¹³

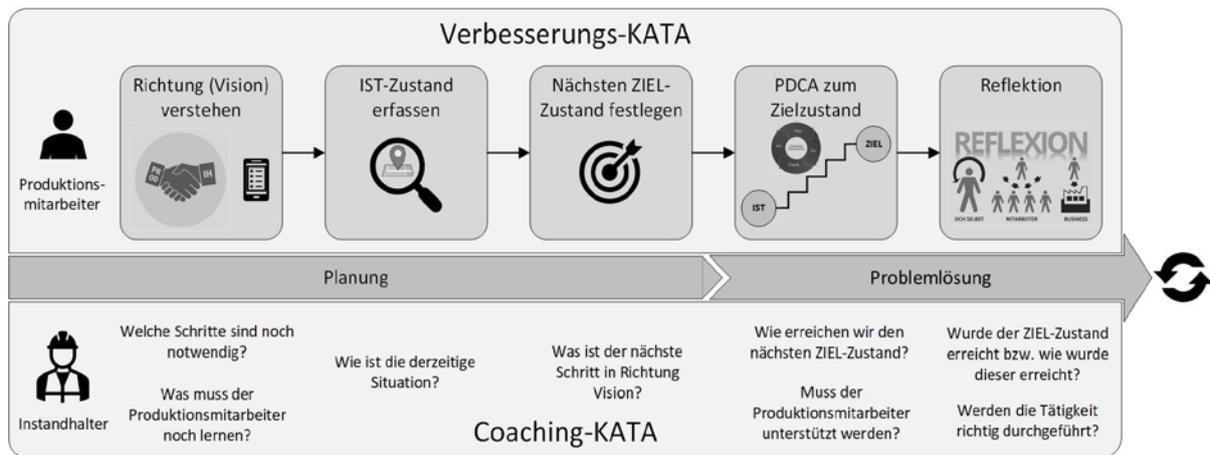


Abbildung 39: KATA-Coaching speziell für die Einführung digitaler autonomer IH²¹⁴

Diese schrittweise Annäherung an den langfristigen Zielzustand (Vision) unterstützt den kontinuierlichen Lernprozess der Mitarbeiter sowie die nachhaltige Integration im Unternehmen durch Standardisierung der einzelnen Teilziele.

4.5.3 Entwickeltes Tool zur transparenten Darstellung der Mitarbeiterqualifikation

Da die Qualifizierung Zeit und Aufwand in Anspruch nimmt, sollte sie geplant und erfolgsorientiert durchgeführt werden.²¹⁵ Dies erfordert eine strukturierte und standardisierte Dokumentation der Mitarbeiterqualifikationen mit Hilfe einer Qualifikationsmatrix.²¹⁶

Das verwendete Punktesystem mit Beschreibung und Voraussetzung für die Erreichung der jeweiligen Qualifikationsstufe wird in Tabelle 11 dargestellt. Die Absolvierung der beiden theoretischen Schulungen wird mit 3 Punkten beziffert und ist Voraussetzung für das praktische Training der autonomen Instandhaltungstätigkeiten. Nach Abschluss der praktischen Ausbildung durch das Instandhaltungspersonal erhalten die Produktionsmitarbeiter die Qualifikationsstufe 1 für die jeweilige Tätigkeit. Die Qualifikationsstufe 2 für die Erlaubnis zur selbständigen Ausführung wird erreicht,

²¹³ vgl. Ehni/Kersten, 2015, S. 180

²¹⁴ Eigene Darstellung, in Anlehnung an Rother, 2009, S. 192 und Ehni/Kersten, 2015, S. 181

²¹⁵ vgl. Buck/Witzgall, 2012, S. 403

²¹⁶ vgl. Lange/Henschel, 2017, S. 164

indem die Tätigkeit zweimal zusammen mit einem Produktionsmitarbeiter der Stufe 2 ausgeführt wurde. Durch das vorgeschlagene Scoring der Mitarbeiter wird den Vorgesetzten (Schichtmeister etc.) ein schneller und transparenter Überblick über das Qualifikationsniveau der Mitarbeiter gegeben.

Tabelle 11: Punktesystem für Qualifikationsmatrix²¹⁷

Punkte	Qualifikationsstufe	Beschreibung	Voraussetzung
0	Stufe 0	Praktisches Training noch nicht absolviert	Basisschulungen absolviert
1	Stufe 1	Keine selbstständige Durchführung ohne Aufsicht erlaubt	Praktisches Training durch IH-Mitarbeiter durchgeführt
2	Stufe 2	Selbstständige Durchführung erlaubt	Tätigkeit zweimal mit Unterstützung durchgeführt

Tabelle 12 zeigt beispielhaft den Aufbau einer Qualifikationsmatrix speziell für die autonome Instandhaltung, die den chronischen Verlauf der Ausbildung und das Qualifikationsniveau der Produktionsmitarbeiter durch systematisches Scoring darstellt.

Tabelle 12: Exemplarischer Aufbau einer Qualifikationsmatrix²¹⁸

Autonome IH	Mitarbeiter/innen Qualifikation	Mitarbeiter 1		Mitarbeiter 2		Mitarbeiter 3		Mitarbeiter 4		Mitarbeiter 5	
		Stufe	Datum	Stufe	Datum	Stufe	Datum	Stufe	Datum	Stufe	Datum
		Schulungen	Basisschulung 1								
Basisschulung 2											
autonome Tätigkeiten	Tätigkeit 1										
	Tätigkeit 2										
	Tätigkeit 3										
	Tätigkeit 4										
	Tätigkeit 5										
	Qualifikationsniveau										

²¹⁷ Eigene Darstellung

²¹⁸ Eigene Darstellung

5 Validierung anhand eines Fallbeispiels

Die Validierung des LSM-Konzepts wird anhand eines Chemiekonzerns durchgeführt, welcher regenerative Zellulosefasern für die Textilindustrie herstellt. Nach der Beschreibung der Rahmenbedingungen und der Ausgangssituation folgt die Validierung der anlagenspezifischen Instandhaltungsstrategieauswahl sowie die Identifikation von Ressourcenverschwendung, angewandt auf eine Teilanlage. Anschließend wird die Integration von autonomer Instandhaltung und die Verwendung von digitalen Enablern demonstriert. Abschließend wird das vorgeschlagene Schulungskonzept für die Einführung von autonomer Instandhaltung vorgestellt.

5.1 Rahmenbedingungen und Ausgangssituation

Die Herstellung von Zellulosefasern erfordert einen kontinuierlichen Prozess mit kritischen Anlagen. Das Abschalten einzelner Aggregate aufgrund von Störungen oder Fehlern ist nur sehr eingeschränkt möglich. Aus diesem Grund sind Störungen im kontinuierlichen Prozess meist mit hohen Stillstandzeiten und -kosten verbunden. Die Referenzanlage wird einmal im Quartal abgestellt, um anstehende Reparatur- und Wartungsarbeiten durchzuführen und die Anlage gründlich zu reinigen. Abbildung 41 zeigt ein vereinfachtes Prozessschema der Referenzanlage zur Veranschaulichung des kontinuierlichen Prozesses. Die Nummerierung im Prozessschema gibt die aktuelle Stufe der Faserproduktion (Abbildung 40) an.

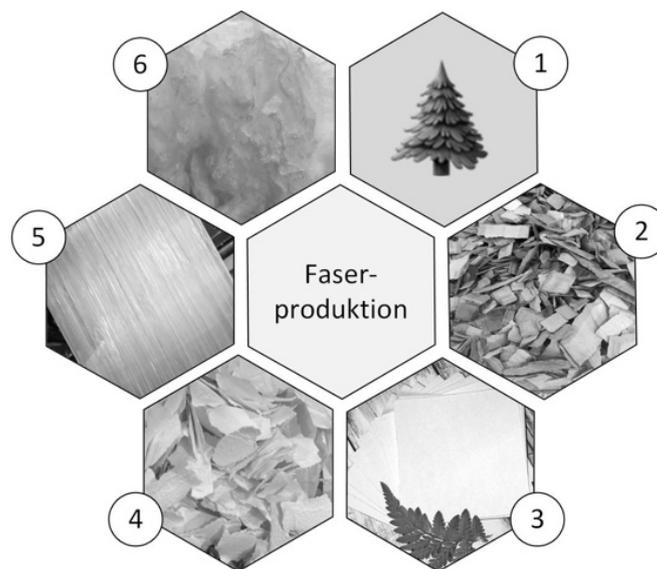


Abbildung 40: Stufen der Faserproduktion²¹⁹

Der für die Produktion benötigte Zellstoff wird aus dem Rohstoff Holz (①-②) gewonnen und als gepresste Platten angeliefert (③). Die Zellstoffplatten werden in den ersten Schritten zerkleinert und gemahlen und im Zellstoffpuffer gelagert (④). Die Zellstoff-

²¹⁹ Eigene Darstellung

Schnipsel werden dann im Dünnschichtverdampfer (Filmtruder) mit der nichttoxischen Chemikalie N-Methylmorpholin-N-oxid (NMMO) und Wasser vermischt und unter Vakuum einer erhöhten Temperatur ausgesetzt. Der Dünnschichtverdampfer (Filmtruder) verwendet Abstreifelemente, um einen Flüssigkeitsfilm entlang des beheizten Mantels zu erzeugen, der dann kontinuierlich nach unten befördert wird und durch die Verdampfung des Wassers zunehmend viskoser wird. Ab einem bestimmten Wassergehalt löst sich die Zellulose auf und bildet eine verwendbare Spinnmasse, die gefiltert und durch die Boosterpumpen zu den Spinnstellen gepresst wird.

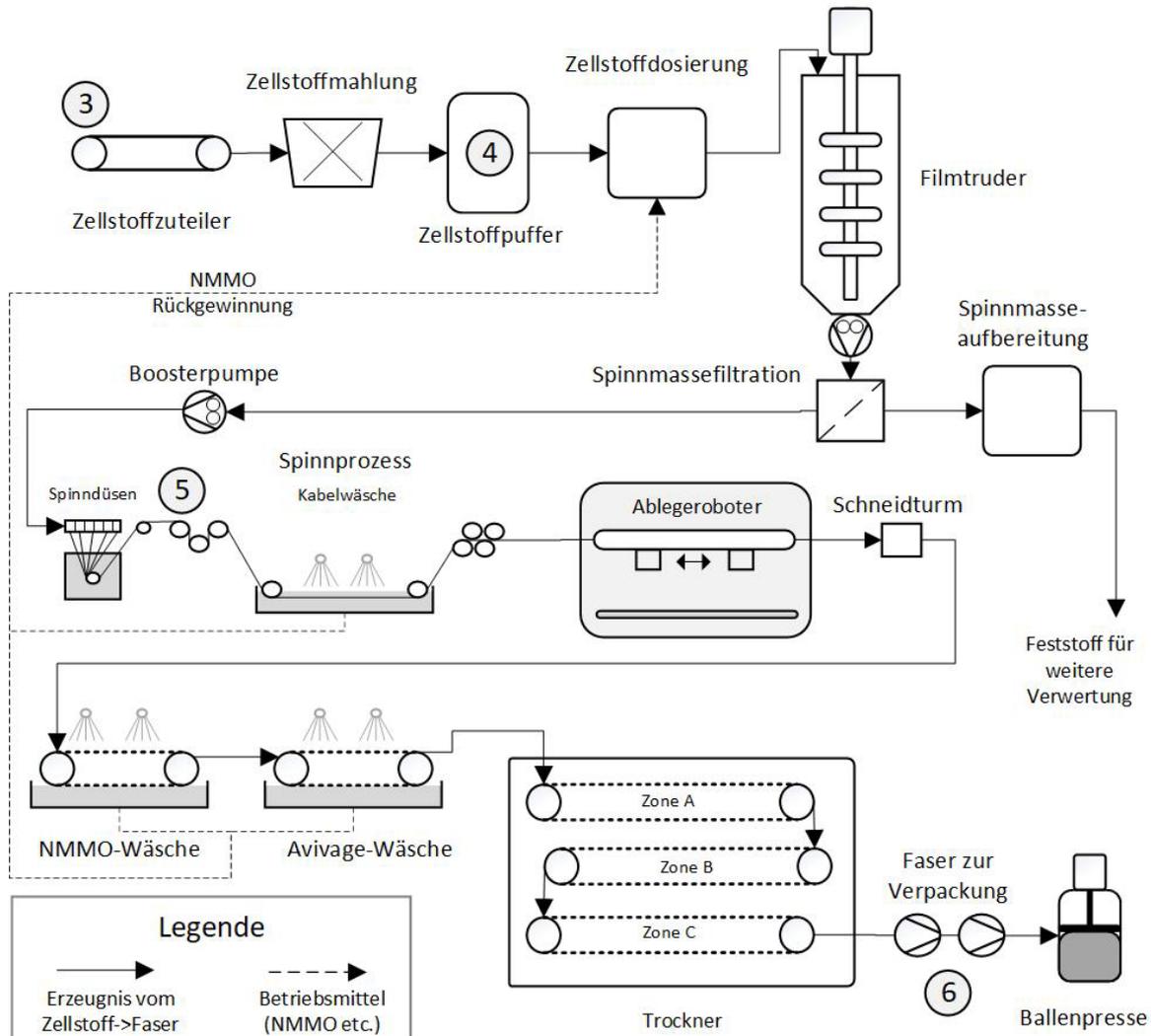


Abbildung 41: Prozessschema der kontinuierlichen Faserproduktion²²⁰

Die Spinnmasse (NMMO, Wasser, Zellstoff) wird dann durch Spinnndüsen gepresst und durch Kühlluft koaguliert, wodurch die Endlosfasern entstehen. Ein Teil des NMMO wird dann im Spinnbad aus dem Endlosfasern ausgewaschen, bevor diese mittels angetriebener Walzen in die Kabelwäsche gezogen wird. (5). Anschließend wird die Endlosfaser je nach Kundenwunsch auf eine bestimmte Länge geschnitten und in der darauffolgenden Nachbehandlung (NMMO und Avivage-Wäsche) von NMMO und

²²⁰ Eigene Darstellung

Verunreinigungen gesäubert. Durch die Rückführung des ausgewaschenen Lösungsmittels (NMMO) in den Prozess ist eine nahezu vollständige Kreislaufführung möglich, weshalb die Herstellung der Faser als sehr umweltfreundlich gilt. Schließlich wird die Kurzfaser in den drei Zonen des Trockners getrocknet und mit Hilfe der Ballenpresse zu Ballen von je 500 kg gepresst und verpackt (©).

Eine Besonderheit der Referenzanlage sind die Ablegeroboter, welche die Anlage in zwei Abschnitte unterteilen. Tritt im zweiten Abschnitt der Linie eine Störung auf, kann der Prozess an dieser Stelle kurzzeitig unterbrochen werden, indem die produzierte Endlosfaser mit Hilfe der Roboter abgelegt wird. Durch diese Unterbrechung wird der Stillstand der gesamten Anlage vermieden und damit in vielen Fällen auch das sehr zeitaufwändige Anspinnen der Spinddüsen. Nach der Störbehebung werden die abgelegten Endloskabel langsam wieder in den Prozess eingespeist. Aufgrund der begrenzten Kapazität der Ablagefläche und -höhe beschränkt sich die Unterbrechung bei minimierter Produktion auf ungefähr vier Stunden.

5.2 Anlagenspezifische Instandhaltungsstrategie

Der erste Schritt besteht darin, die Betrachtungseinheiten mit Hilfe des Anlagenbetreibers zu definieren, d. h. die erforderliche Tiefe der Aufschlüsselung der Anlage festzulegen. Es folgt die Analyse der Instandhaltungskosten der gesamten Referenzanlage, sowie für die einzelnen Betrachtungseinheiten. Anschließend wird mit Hilfe eines Expertenteams der Kritikalitätsindex der Anlage für jede Betrachtungseinheit ermittelt und in die entsprechenden Prioritätsgruppen eingeordnet. Im nächsten Schritt wird der Anlagenkritikalitätsindex über die Instandhaltungskosten aufgetragen und analysiert. Abschließend wird für jede Betrachtungseinheit eine geeignete Instandhaltungsstrategie vorgeschlagen. Zum Schutz von Know-how und Betriebsgeheimnissen wird in der folgenden Analyse nur auf einen der neun Teilbereiche eingegangen.

5.2.1 Instandhaltungskosten-Analyse

Für die anschließende Kostenanalyse werden sämtliche Aufträge des Referenzjahres mit allen relevanten Daten (Technischer Platz, Beschreibung, Kostenstelle, Auftragsart etc.) aus dem SAP-System geladen. Zunächst erfolgt eine Analyse der Kosten der gesamten Anlage, indem diese zum einen auf die Kostenanteile (Lohnkosten, Material, externe Dienstleistungen und sonstige Kosten) und zum anderen auf die Kosten für Instandhaltungstätigkeiten (Reinigung, Wartung, Reparatur, sonstige Kosten) unterteilt werden (Abbildung 42). Die Analyse der gesamten Instandhaltungskosten hat ergeben, dass 57% der Kosten durch Reparaturen entstehen und, dass ein großer Teil der notwendigen Maßnahmen an externe Unternehmen vergeben wird.

Instandhaltungstätigkeit	Jahressumme	Kostenanteil	Summe von Jahressumme
Reparatur	€ 2.756.290,57	Summe von Material	€ 763.749,93
Wartung	€ 1.629.474,14	Summe von Löhne	€ 2.146.224,59
Reinigung	€ 362.586,72	Summe von Fremd	€ 1.853.457,25
sonstige Kosten	€ 56.758,01	Summe von sonstigen Kosten	€ 41.677,67
Gesamtkosten	€ 4.805.109,44	Gesamtkosten	€ 4.805.109,44

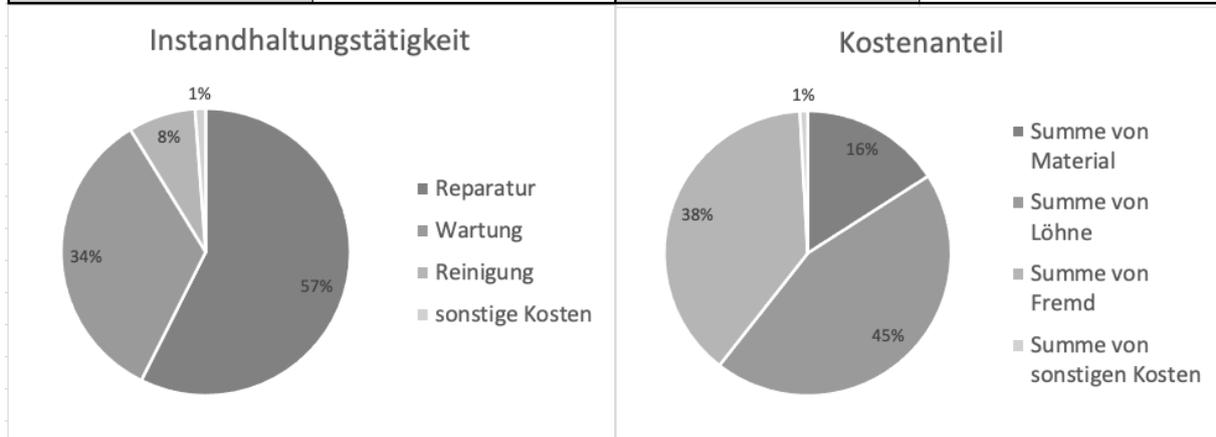


Abbildung 42: Instandhaltungskosten der Referenzanlage²²¹

Gemeinsam mit dem Expertenteam wurden einige vorgeschlagene Verbesserungsmaßnahmen diskutiert. Die hohen Reparaturkosten könnten durch eine Optimierung der Instandhaltungsmaßnahmen, zum Beispiel durch den Einsatz digitaler Enabler, reduziert werden. Die Einführung der autonomen Instandhaltung würde die frühzeitige Erkennung von Störungen ermöglichen, was in einigen Fällen größere Schäden verhindern und damit auch die Reparaturkosten senken könnte. Darüber hinaus könnten durch die freiwerdenden Kapazitäten des Instandhaltungspersonals einige deren Kernkompetenzen ingesourced werden und damit der hohe Anteil an Fremdleistungen reduziert werden.

Die Kosten werden daraufhin den definierten Betrachtungseinheiten zugeordnet und nochmals nach Kostenanteile einerseits und den Kosten der Instandhaltungsaktivitäten andererseits aufgeschlüsselt. Es ist zu beachten, dass die Kosten für die durchgeführten Inspektionen im Referenzjahr in zwei Jahresaufträgen im SAP-System für die gesamte Anlage erfasst werden und daher nicht spezifisch den einzelnen Betrachtungseinheiten zugeordnet werden können.

In Tabelle 13 und Tabelle 14 enthalten die Kosten der Betrachtungseinheiten, welche der Teilanlage „Nachbehandlung/Trockner (NABE/TRO)“ mit dem Technischen Platz T-T1-AG5 angehören. Die Kosten, die als "Nachbehandlung/Trockner allgemein" klassifiziert werden, betreffen alle Betrachtungseinheiten der Teilanlage und waren daher nicht direkt zuordnungsfähig. Die anschließende Bestimmung der Anlagenkritikalität sowie die Anwendung des Tools zur transparenten Kostenübersicht bezogen auf die Kritikalität der Anlage erfolgt ausschließlich an dieser Teilanlage.

²²¹ Eigene Darstellung

Tabelle 13: Kosten für Instandhaltungstätigkeiten von NABE/TRO²²²

Asset UG	Asset UG Bezeichnung	Auftragsart	Auftragsart Bez.	Anzahl von Auftragsart	Jahressumme
T-T1-AG5-0	NABE/TRO Allgemein	IRA	Reparatur	2	14.842,37
		IRW	Wartung mit Wartungsplan	1	2.248,36
		TWP	Wartung	38	5.163,23
				41	22.253,96
T-T1-AG5-1	NMMO-Wäsche	IGH	Reinigung	1	2.142,16
		IRA	Reparatur	19	84.514,45
		TWP	Wartung	7	25.301,42
				27	111.958,03
T-T1-AG5-2	Avivage - Wäsche	IRA	Reparatur	21	81.562,67
		IRS	Reparatur (sofort)	4	6.353,60
		IRW	Wartung mit Wartungsplan	1	12.893,56
				26	100.809,83
T-T1-AG5-3	Trockner	IRA	Reparatur	39	53.956,75
		IRS	Reparatur (sofort)	2	1.845,32
		IRW	Wartung mit Wartungsplan	1	1.419,72
		TWP	Wartung	11	929,50
				53	58.151,29
T-T1-AG5-4	Trockner Zonen (Vent.+WT)	IRA	Reparatur	16	20.065,12
		IRS	Reparatur (sofort)	1	193,80
T-T1-AG5-5	Packerei	IRA	Reparatur	2	1.469,15
		IRW	Wartung mit Wartungsplan	1	276,41
				3	1.745,56
T-T1-AG5	NABE/TRO			167	315.177,59

Tabelle 14: Instandhaltungskosten nach Kostenart von NABE/TRO²²³

Asset UG	Asset UG Bezeichnung	Kostenart	Jahressumme
T-T1-AG5-0	NABE/TRO Allgemein	Material	15.463,45
		Löhne	4.435,95
		Fremd	2.354,56
			22.253,96
T-T1-AG5-1	NMMO-Wäsche	Material	75.364,83
		Löhne	15.874,34
		Fremd	20.718,86
			111.958,03
T-T1-AG5-2	Avivage - Wäsche	Material	82.372,57
		Löhne	13.192,92
		Fremd	5.244,34
			100.809,83
T-T1-AG5-3	Trockner	Material	45.762,85
		Löhne	7.394,99
		Fremd	4.993,45
			58.151,29
T-T1-AG5-4	Trockner Zonen (Vent.+WT)	Material	16.249,57
		Löhne	2.713,72
		Fremd	1.235,63
			20.198,92
T-T1-AG5-5	Packerei	Material	1.003,23
		Löhne	742,33
			1.745,56
T-T1-AG5	NABE/TRO		315.117,59

5.2.2 Anlagenkritikalitätsindex

Für die Ermittlung der Ressourcenverschwendung werden neben den Kosten auch die Anlagenkritikalitätsindizes der betrachteten Einheiten benötigt. Darüber hinaus ermöglicht die Ermittlung des Anlagenkritikalitätsindex eine Einteilung der

²²² Eigene Darstellung

²²³ Eigene Darstellung

Betrachtungseinheiten in Prioritätsklassen, welche wiederum für die Beschaffung von Ersatzteilen von großem Nutzen ist.

▪ **Festlegen der Abstufung und der Gewichtung der Bewertungsattribute**

In einem ersten Schritt müssen die Bewertungsattribute anhand von historischen Daten und Expertenwissen, wenn möglich quantitativ, ansonsten qualitativ in Bereiche eingeteilt werden.

Tabelle 15: Bewertungsattribute speziell für die Referenzanlage²²⁴

Bewertungsattribute	Schadensklasse					Bewertung
	Marginal [1]	Gering [2]	Moderat [3]	Bedeutend [4]	Gravierend [5]	
Arbeitsicherheit Hat die Anlage Auswirkungen auf die Mitarbeiter bei einem Störfall?	A Person in der Belegschaft verletzt, kann aber nach Erste-Hilfe-Versorgung weiterarbeiten. Anzeichen einer leichten, behebbaren, kurzfristigen Beeinträchtigung.	Person in der Belegschaft fällt für 1 oder 2 Tage aus. Anzeichen einer mäßigen, behebbaren, mittelfristigen Beeinträchtigung.	Person in der Belegschaft fällt für mindestens 3 Tage aus. Anzeichen einer mäßigen, irreversiblen Beeinträchtigung.	Todesfall in der Belegschaft. Personen werden vom Werkgelände in ein Spital gebracht. Anzeichen einer schweren irreversiblen Beeinträchtigung.	Mehrere Todesfälle in der Belegschaft. Mehrere Personen werden in ein Spital gebracht.	Expertenwissen
Umwelt Hat die Anlage Auswirkungen auf die Umwelt bei einem Störfall?	B Leichter behebbare Umweltschaden innerhalb der Werksgrenzen. Sanierungsmaßnahmen können notwendig sein.	Leichter behebbarer Umweltschaden außerhalb der Werksgrenzen. Sanierungsmaßnahmen können notwendig sein.	Kurzfristiger Umweltschaden in einem begrenzten Bereich außerhalb der Werksgrenzen. Sanierungsmaßnahmen können notwendig sein.	Mittelfristig bedeutender Umweltschaden. Sanierungsmaßnahmen sind notwendig.	Massiver, langfristiger Umweltschaden in einem großen Gebiet. Umfangreiche Sanierungsmaßnahmen sind erforderlich.	Expertenwissen
Ersatzteil-Verfügbarkeit Sind ET verfügbar bzw. wie schnell sind sie verfügbar?	C Im internen Lager verfügbar. Rasche und einfache Bereitstellung für die Reparatur.	Im internen Lager oder Hauptlager verfügbar. Mäßig schnelle Bereitstellung für die Reparatur.	Im Hauptlager verfügbar. Langsame Bereitstellung für die Reparatur.	Ersatzteil muss bestellt werden. Wartezeit < 1 Tag	Ersatzteil muss bestellt werden. Wartezeit > 1 Tag	Expertenwissen
Qualitätseinfluss [Index] Beschreibt den Einfluss der Anlage auf die Produktqualität.	D Kein Einfluss auf die Qualität.	Geringer Einfluss auf die Qualität.	Moderater Einfluss auf die Qualität.	Bedeutender Einfluss auf die Qualität.	Gravierender Einfluss auf die Qualität.	Expertenwissen und historische Daten
	1A	1A	2A	2A	LG	
Auswirkung auf die Produktion [Tonnen] Wie wirkt sich ein Ausfall der Anlage auf die Produktion aus bzw. kann der Produktionsprozess trotzdem aufrechterhalten werden?	E Anlage kann weiterhin mit voller Geschwindigkeit betrieben werden bis die Reparatur erledigt ist. (Bsp.: redundante Pumpe/Motor)	Anlage kann weiterhin mit voller Geschwindigkeit betrieben werden bis die Reparatur erledigt ist. Es muss abgelegt werden.	Anlage kann nicht mit voller Geschwindigkeit betrieben werden bis die Reparatur erledigt ist. Es muss abgelegt werden.	Kontrolliertes Abstellen der Anlage notwendig. Filmtruder wird "Leergefahren".	Sofortiger Ausfall der gesamten Anlage (Shutdown).	Expertenwissen und historische Daten
	0	bis 50	50-100	100-150	ab 150	

²²⁴ Eigene Darstellung

Es folgt die Gewichtung der Attribute durch den Anlagenbetreiber auf Basis der Unternehmensstrategie. In Tabelle 15 sind die gewählten Bewertungsattribute mit der Gewichtung und den festgelegten Bereichsgrenzen dargestellt. Die Qualität der fertigen Textilfaser werden demnach im Referenzwerk in drei Stufen eingeteilt, wobei die Faserballen mit der Qualitätsstufe 1A und 2A an die Kunden verkauft werden, während Faserballen mit der Qualitätsstufe LG als Ausschuss klassifiziert werden. Die Bestimmung der Auswirkungen von Ausfällen einzelner Betrachtungseinheiten auf die Produktion erfordert sowohl Expertenwissen als auch historische Ausfalldaten. In dieser Kategorie müssen sowohl die Redundanz einzelner Assets als auch die Möglichkeit des Ablegens der Endlosfaser berücksichtigt werden.

▪ Bestimmung der Anlagenkritikalitätsindizes und Prioritätsklassen

Nach der Definierung und Gewichtung der Bewertungsattribute folgt die Bestimmung der Kritikalität der Betrachtungseinheiten mit Hilfe eines Expertenteams, bestehend aus dem Asset-Manager, einem Produktionsspezialisten und einem Instandhalter. Die Ergebnisse der Anlagenprioritätsanalyse sind in Tabelle 16 dargestellt. Die gesamte Teilanlage NABE/TRO wird in die Prioritätsklasse B eingestuft, da keine der enthaltenen Betrachtungseinheiten die höchste Prioritätsklasse A aufweist.

Tabelle 16: Anlagenprioritätsanalyse der Teilanlage NABE/TRO²²⁵

Anlagenprioritätsanalyse		Bewertungsattribute [1-5] und Gewichtung [0-1]					Anlagenindex (AI)	Anlagen-Prioritätsklasse
Bezeichnung	Technischer Platz	Arbeitssicherheit	Umwelt	ET-Verfügbarkeit	Qualitätseinfluss	Auswirkung auf die Produktion		
		0,15	0,20	0,15	0,20	0,30		
NABE/ TRO	T-T1-AG5							B
NABE/TRO Allgemein	T-T1-AG5-0	-	-	-	-	-	-	
NMMO-Wäsche	T-T1-AG5-1	2	1	3	2	4	2,55	B
Avivage - Wäsche	T-T1-AG5-2	2	3	3	4	3	3,05	B
Trockner	T-T1-AG5-3	4	3	2	4	3	3,2	B
Trockner Zonen (Vent.+WT)	T-T1-AG5-4	3	2	1	2	2	2	C
Packerei	T-T1-AG5-5	3	2	1	3	1	1,9	C

5.2.3 Transparente Kostenübersicht vs. Anlagenkritikalitätsindex

Der nächste Schritt besteht darin, die Anlagenkritikalitätsindizes über die Instandhaltungskosten jeder Betrachtungseinheit aufzutragen (Abbildung 43). Bei den Betrachtungseinheiten Trockner (T-T1-AG5-3), Trockner Zone (T-T1-AG5-4) und Packerei (T-T1-AG5-5) sind die Instandhaltungskosten im Verhältnis zur Kritikalität der Anlage akzeptabel. Die Betrachtungseinheiten NMMO-Wäsche (T-T1-AG5-1) und Avivage-Wäsche (T-T1-AG5-2) sind auf Grund ihrer hohen Instandhaltungskosten auffällig und müssen daher näher betrachtet werden (Tabelle 17). In beiden Beobachtungseinheiten, in denen Verschwendung festgestellt wurde, machten Reparaturkosten und Materialkosten den größten Teil der Kosten aus.

²²⁵ Eigene Darstellung

Um die Kosten für Reparaturen und Fremdleistungen zu senken, wurde die Einführung der autonomen Instandhaltung thematisiert, während das Expertenteam zur Senkung der Wartungskosten den Einsatz digitaler Enabler zur Effizienzsteigerung diskutierte.

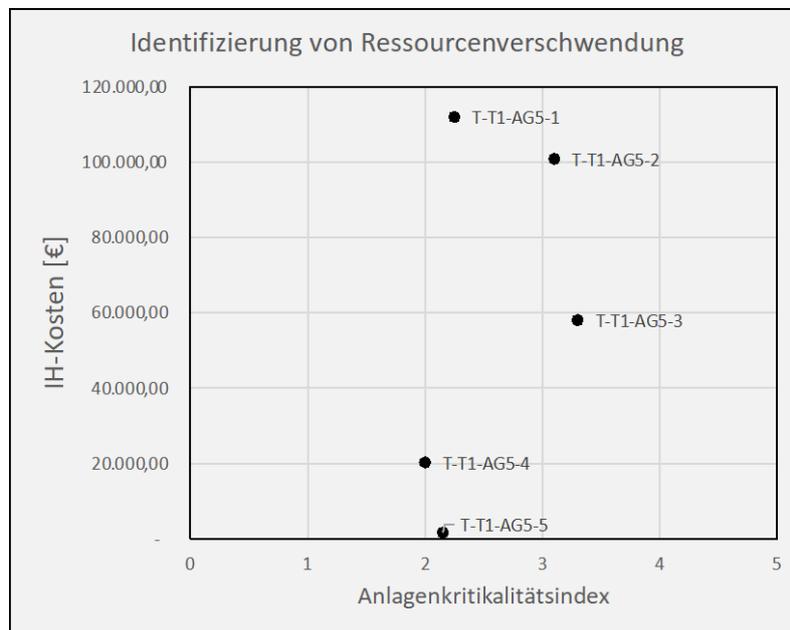


Abbildung 43: Transparente Kostenübersicht vs. Anlagenkritikalitätsindex²²⁶

Die Senkung der Materialkosten könnte durch ein verbessertes Ersatzteilmanagement auf der Grundlage der Priorisierung von Anlagen erreicht werden, wodurch kurzfristige und teure Ersatzteilbeschaffungen vermieden werden könnten. Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit wurde auf letzteres in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Tabelle 17: Kostenanalyse NMMO- und Avivage-Wäsche²²⁷

Asset UG	Asset UG Bezeichnung	Auftragsart	Auftragsart Bez.	Jahressumme
T-T1-AG5-1	NMMO-Wäsche	TGH	Reinigung	2.142,16
		TRA	Reparatur	84.514,45
		TWP	Wartung	25.301,42
				111.958,03
T-T1-AG5-2	Avivage - Wäsche	TRA	Reparatur	81.562,67
		TRS	Reparatur (sofort)	6.353,60
		TRW	Wartung mit Wartungsplan	12.893,56
				100.809,83

Asset UG	Asset UG Bezeichnung	Kostenart	Jahressumme
T-T1-AG5-1	NMMO-Wäsche	Material	65.364,83
		Löhne	25.874,34
		Fremd	20.718,86
			111.958,03
T-T1-AG5-2	Avivage - Wäsche	Material	82.372,57
		Löhne	13.192,92
		Fremd	5.244,34
			100.809,83

²²⁶ Eigene Darstellung

²²⁷ Eigene Darstellung

5.2.4 Auswahl/Anpassung der Instandhaltungsstrategie

Zu Beginn werden einige Bemerkungen zur Referenzanlage beziehungsweise zur Teilanlage, die für die Auswahl der Instandhaltungsstrategie von Bedeutung waren, erläutert. Die Referenzanlage wird mit Ausnahme von vier Stillständen pro Jahr kontinuierlich mit beinahe der gleichen Geschwindigkeit betrieben. Wie in Abbildung 41 dargestellt, besteht diese Teilanlage hauptsächlich aus Förderbändern, welche über Antriebswellen angetrieben werden, sowie aus Pumpen und Heizelementen zum Auswaschen und Trocknen der Fasern. Sehr viele dieser Aggregate sind frei zugänglich, weshalb es möglich ist, Inspektionen zur Zustandsüberwachung durchzuführen. Dazu sind die subjektive Prüfung durch menschliche Sinnesorgane und die objektive Prüfung z. B. durch Einsatz von Schwingungsmessgeräten möglich. Auf der Grundlage dieser Fakten, sowie der Kostenanalyse und des Kritikalitätsindex jeder Betrachtungseinheit, sind die in Tabelle 18 angegebenen Instandhaltungsstrategien vorgeschlagen.

Tabelle 18: Vorgeschlagene Instandhaltungsstrategie²²⁸

Betrachtungseinheit	Technischer Platz	Anlagenkritikalitätsindex	Vorgeschlagene Strategie	Anmerkung
NMMO-Wäsche	T-T1-AG5-1	B	Periodische und Zustandsorientierte IH	Aufgrund der hohen Auswirkung auf die Produktion sowie hohen Reparaturkosten, wird in einigen Bereichen eine zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie bevorzugt
Avivage - Wäsche	T-T1-AG5-2	B	zustandsorientierte IH	Aufgrund von hohen Reparaturkosten sollte die Inspektionen erweitert werden
Trockner	T-T1-AG5-3	B	zustandsorientierte IH	Aufgrund des hohen Einflusses auf die Qualität der Faser
Trockner Zonen (Vent.+WT)	T-T1-AG5-4	C	periodische IH	Aufgrund gut dokumentierten Ausfallverhalten und der niedrigen Anlagenkritikalität ist eine periodische Wartung ausreichend
Packerei	T-T1-AG5-5	B	periodische IH	Aufgrund gut dokumentierten Ausfallverhalten und der niedrigen Anlagenkritikalität ist eine periodische Wartung ausreichend

Ob die zustandsorientierte Instandhaltungsstrategie in Zukunft mit Hilfe von Sensoren an den Aggregaten oder durch subjektive und objektive Inspektionsmaßnahmen durchgeführt wird, muss auf der Grundlage einer Wirtschaftlichkeitsberechnung entschieden werden. In jedem Fall ist die Einführung der digitalen autonomen

²²⁸ Eigene Darstellung

Instandhaltung sowie digitaler Enabler für das Instandhaltungspersonal ein Schritt hin zu einer effizienteren und kostengünstigeren Instandhaltung der Anlage.

5.3 Implementierung von Methoden des Lean Managements

In der kontinuierlichen Prozessindustrie sind aufgrund des hohen Automatisierungsgrades der Anlagen während des Normalbetriebs Kapazitäten von Produktionsmitarbeitern vorhanden, die häufig nicht genutzt werden. Aus diesem Grund ist sich das Expertenteam einig, dass die Einführung der autonomen Instandhaltung im Referenzunternehmen zu signifikanten Einsparungen führen wird.

5.3.1 Derzeitige Durchführung autonomer Tätigkeiten

In der Referenzanlage werden derzeit einzelne Tätigkeiten vom Produktionspersonal selbständig ausgeführt. Dazu wird, wie in Abbildung 44 dargestellt, eine analoge Excel-Liste mit einer kurzen Beschreibung der Tätigkeit, einem kleinen Bild des zu prüfenden Aggregats und der Häufigkeit der Ausführung im Produktionsbereich abgelegt. Der Vorarbeiter kontrolliert die von den Produktionsmitarbeitern ausgeführten Tätigkeiten und bestätigt die korrekte Ausführung mit seiner Unterschrift.

Tätigkeiten	Bild	Häufigkeit	Schicht	Anwesende Schicht	MO
Dampfanlage, Dampfschlauch und Absperrungen auf Undichtheit prüfen. Bei nicht Benutzung muss das Dampfventil geschlossen werden. Dienstanweisung Spinnerei Punkt 5.8		Schicht-anfang	F		
			S		
			N		

Abbildung 44: Derzeitige Ausführung von autonomen Tätigkeiten²²⁹

Die ausgefüllten Excel-Listen werden derzeit in Ordnern aufbewahrt und nicht in das SAP-System eingetragen oder für weitere Analysen verwendet.

5.3.2 Autonome Instandhaltung mit Hilfe von Checklisten

Die Basis für die Integration der autonomen Instandhaltung in das Unternehmen ist die Wissensextraktion und -aufbereitung (Kapitel 4.5.1). Im Zuge dieser Arbeit wird ein Inspektionsplan für alle Hubspindelgetriebe im Bereich Spinnerei erstellt, welcher somit auf mehrere Technische Plätze anwendbar ist.

Schritt 1: Know-how des IH-Mitarbeiters extrahieren

Für die Wissensextraktion sind in Tabelle 10 verschiedene Methoden und relevante Fragen aufgeführt. In diesem Fall wird die Inspektion des Hubspindelgetriebes

²²⁹ Eigene Darstellung

zunächst vor Ort mit dem verantwortlichen Instandhalter durchgeführt. Anschließend wird ein Interview mit dem Instandhalter sowie dem Produktionsleiter geführt, um alle relevanten Fragen für die Erstellung der Checkliste zu klären und die vorhandenen Daten (Bilder etc.) zu sammeln.

Schritt 2: Erstellung der Checkliste

Kontrollplan für Hubspindelgetriebe T-T1-AG3

Sicherheitsmaßnahmen bei der Inspektion

- Beim verantwortlichen Produktionsmitarbeiter ankündigen. - Keinesfalls unter dem Behälter (Spinnwanne) arbeiten!

Fettrückstände am Boden bzw. Schutzkappe richtig montiert?

Falls Fettrückstände vorhanden sind, dürfte sich die Schutzkappe gelöst haben.

Pneumatikleitungen überprüfen!

Abluftschläuche (Kunststoff) und Druckluftleitungen (Metall) angeschlossen?

Hubelement prüfen

- Faltenbalken mit Schlauchschellen montiert?
- Faltenbalken rissig?

Umlenkseil auf Risse prüfen!

Hörprüfung!

Das Getriebe wird mit Druckluft betrieben, daher kann durch einen akustischen Test (Zischgeräusch) auf Dichtheit geprüft werden.

Benötigtes Equipment:
Taschenlampe

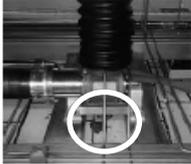





Abbildung 45: Inspektionsplan für Hubspindelgetriebe 1/2²³⁰

Auf der Grundlage der gesammelten Informationen und Daten sowie des in Kapitel 4.5.1 erläuterten Vorgehens wird die Checkliste für die Inspektion des Hubspindelgetriebes erstellt (Abbildung 45 und Abbildung 46). Der Inspektionsplan

²³⁰ Eigene Darstellung

enthält alle relevanten Informationen, welche für die Verwendung im Rahmen der autonomen Instandhaltung erforderlich sind. Wie bereits erwähnt, ist das Hubspindelgetriebe ein Aggregat, das in unmittelbarer Umgebung mehrmals zum Einsatz kommt, so dass für eine effiziente Inspektion eine Tabelle zum Ankreuzen der festgestellten Fehler verwendet werden kann (Abbildung 46).

	Fettrückstände/ Schutzkappe	Leitung gelöst	Faltenbalk falsch montiert	Faltenbalk rissig	Umlenkseil rissig	Leitung undicht (Hörtest)
A01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A03	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A04	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A05	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A06	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A07	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A08	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A09	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A11	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Hiermit bestätige ich die Vollständigkeit meiner Angaben!

Ansprechperson: Instandhalter der Abteilung

Abbildung 46: Inspektionsplan für Hubspindelgetriebe 2/2²³¹

Schritt 3: Durchführung der Inspektion

Die gemeinsame Durchführung der Inspektion mit einem Produktionsmitarbeiter hat gezeigt, dass mit Hilfe dieser Checkliste eine gezielte und fehlerfreie Kontrolle der Hubspindelgetriebes gewährleistet wird.

Um die Effizienz weiter zu erhöhen, wird die Checkliste im Anschluss in die Technischen Plätze des SAP-System integriert, so dass die Nutzung dieser auf digitalen Enablern ermöglicht wird.

²³¹ Eigene Darstellung

5.4 Enabler der Digitalisierung

5.4.1 Auswahl geeigneter digitaler Enabler

Beide Handheld-Geräte erfüllen in hohem Maße die in Tabelle 9 aufgeführten funktionalen Anforderungen für den Einsatz in der Instandhaltung. Aufgrund der Tatsache, dass das Handheld-Gerät zur persönlichen Mitarbeiterausstattung werden soll und daher immer "am Mann" getragen werden sollte, hat das Smartphone gegenüber dem Tablet einen kleinen Vorteil in Bezug auf den Tragekomfort.²³² Auf der Grundlage der durchgeführten Analyse wurde entschieden, dass für die Umsetzung der digitalen autonomen Instandhaltung der Einsatz von Smartphones für das Produktionspersonal am besten geeignet wäre. Darüber hinaus ist die Implementierung eines digitalen Shopfloor-Boards vorgesehen, um den Status der autonomen Instandhaltungstätigkeiten sowie operative Kennzahlen zur Bewertung der Tätigkeiten abzubilden.

5.4.2 Integration von Handheld-Geräten

Die Verwendung von Smartphones in der autonomen Instandhaltung erfordert eine einfache und selbsterklärende Softwareplattform. Daher muss der Abruf der Checkliste auf dem Smartphone und eine schnelle und standardisierte Erstellung von Fehlermeldungen ermöglicht werden.

Derzeitige Verwendung von Smartphones

In der Referenzanlage verwendet das Instandhaltungspersonal derzeit Smartphones, welche über die Movilizer-Plattform mit dem SAP-System verbunden sind, um Inspektionspläne abzarbeiten und Stör- bzw. Wartungsnachmeldungen zu erstellen.

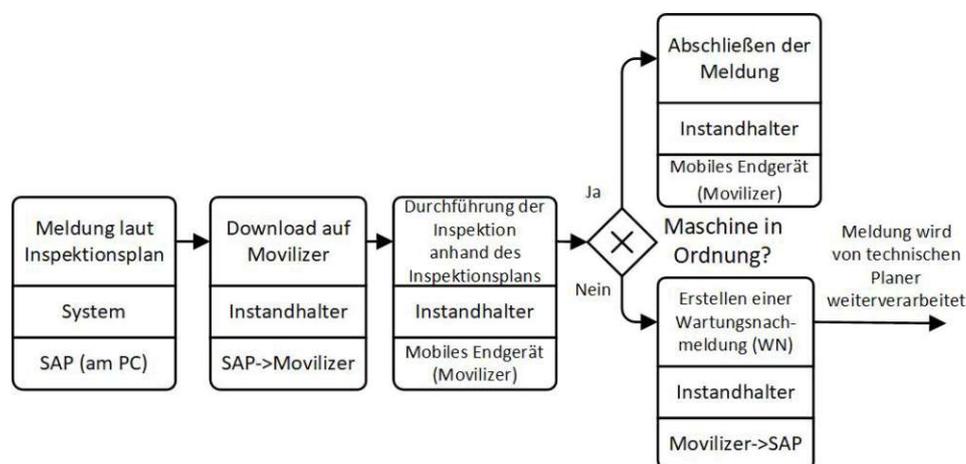


Abbildung 47: Prozessablauf mit einem Handheld-Gerät²³³

²³² vgl. Schacht/Niemeyer, 2017, S. 157

²³³ Eigene Darstellung

In einem ersten Schritt werden die generierten Meldungen der Inspektionspläne aus dem SAP-System auf das Handheld-Gerät geladen. Anschließend wird die Inspektion anhand des Inspektionsplans durchgeführt und bei einer Fehlererkennung eine Wartungsnachmeldung generiert.

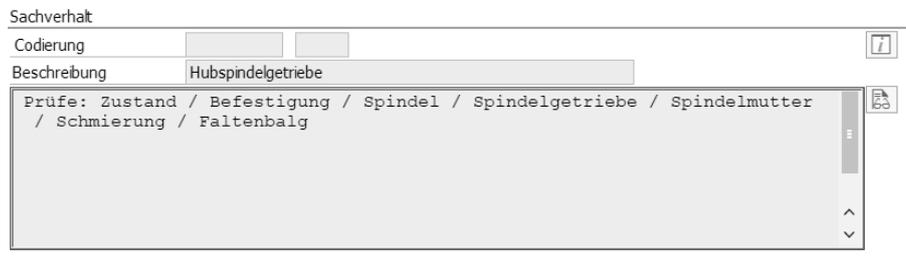


Abbildung 48: Derzeitiger Inspektionsplan in der Referenzanlage²³⁴

Abbildung 48 zeigt den derzeitigen Inspektionsplan des Hubspindelgetriebes, der im SAP-System zur Durchführung der Inspektion hinterlegt ist und auf dem Smartphone unter „Langtext anzeigen“ (Abbildung 49) angezeigt wird.

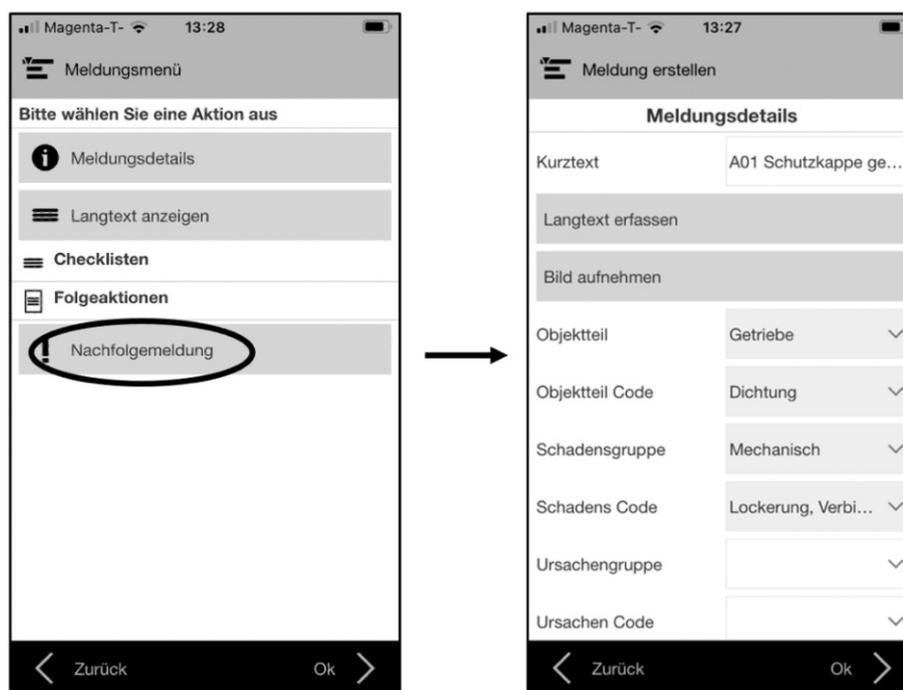


Abbildung 49: Wartungsnachmeldung generieren²³⁵

Die Erstellung der Wartungsnachmeldung wird in Abbildung 49 dargestellt. Dazu muss der Instandhaltungsmitarbeiter zunächst den Kurztext und dann die vier Klassifizierungsattribute Objektteil, Objektteil-Code, Schadensgruppe und Schadens-Code eingeben oder auswählen. In jeder dieser Kategorien sind bis zu 20 verschiedene Selektionen möglich. Dadurch ist eine effiziente Bearbeitung nicht möglich und derselbe Fehler wird vom Instandhaltungspersonal manchmal

²³⁴ Eigene Darstellung

²³⁵ Eigene Darstellung

unterschiedlich klassifiziert. Darüber hinaus kann der Instandhalter einen Langtext sowie Bilder hinzufügen, um die Meldung näher zu erläutern.

Im Zusammenhang mit der Einführung einer digitalen autonomen Instandhaltung ergeben sich zwei Probleme aus der derzeitigen Nutzung von Smartphones. Erstens bestehen die derzeitigen Inspektionspläne (Abbildung 48) nur aus wenigen Stichworten, welche von erfahrenem Instandhaltungspersonal, nicht aber von technisch ungeschultem Produktionspersonal interpretiert werden können. Zweitens ist die standardisierte und effiziente Erstellung von Wartungsnachmeldungen im Störfall aufgrund der hohen Komplexität und des notwendigen Know-hows für Produktionsmitarbeiter nicht realisierbar. Aus den oben genannten Gründen muss der Einsatz des Smartphones für die autonome Instandhaltung durch die Implementierung von Checklisten effizienter und außerdem benutzerfreundlicher gestaltet werden.

Durchführung von Inspektionen mit digitalen Checklisten

Die Integration der in Kapitel 5.3.2 erstellte Checkliste auf dem Smartphone ist ein notwendiger Schritt zur Realisierung der autonomen Inspektion des Hubspindelgetriebes.

- **Aufbereiten der Checkliste für Handheld-Geräte**

Für die effiziente und standardisierte Erstellung von Wartungsnachmeldungen wird der Checkliste im Programm Adobe Reader DC Formularfelder hinzugefügt.

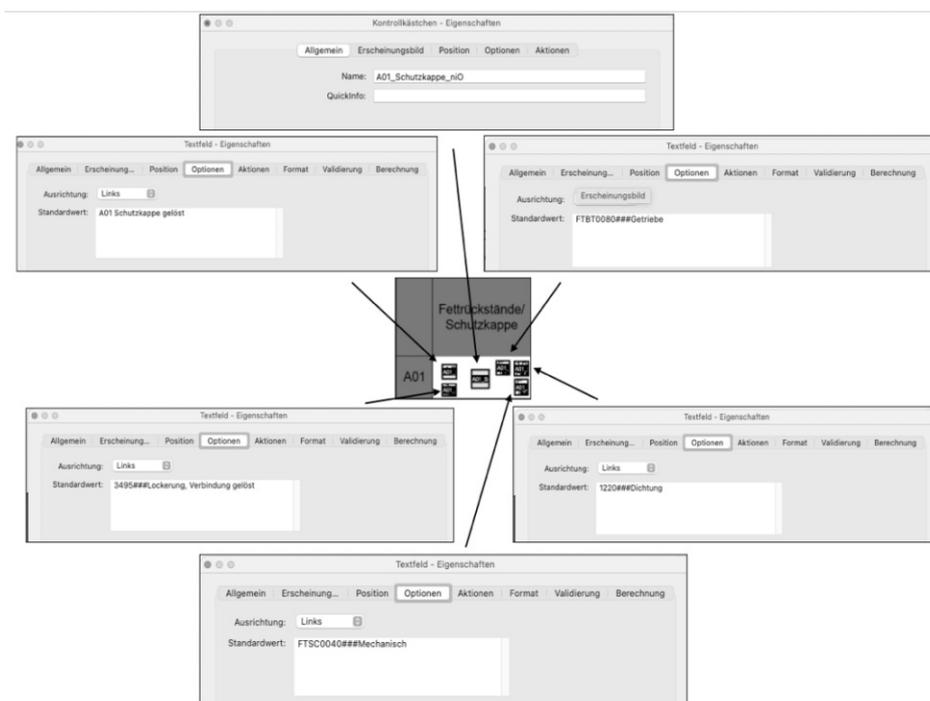


Abbildung 50: Aufbereiten der Checkliste²³⁶

²³⁶ Eigene Darstellung

Abbildung 50 wird die Erstellung des Fehlerfeldes "Fettrückstände/Schutzkappe" für das Hubspindelgetriebe A01 demonstriert. In der Checkliste können somit sämtliche erkannte Fehler angekreuzt werden, wodurch eine Wartungsnachmeldung (WN-Meldung) mit bereits hinterlegtem Kurztext, Objektteil, Objektteil-Code, Schadensgruppe und Schadens-Code erzeugt wird.

▪ Anwendung der digitalen Checklisten

Ziel der Nutzung der aufbereiteten Checklisten auf dem Smartphone ist es, die Effizienz des bewährten Prozessablaufs (Abbildung 47) deutlich zu steigern.

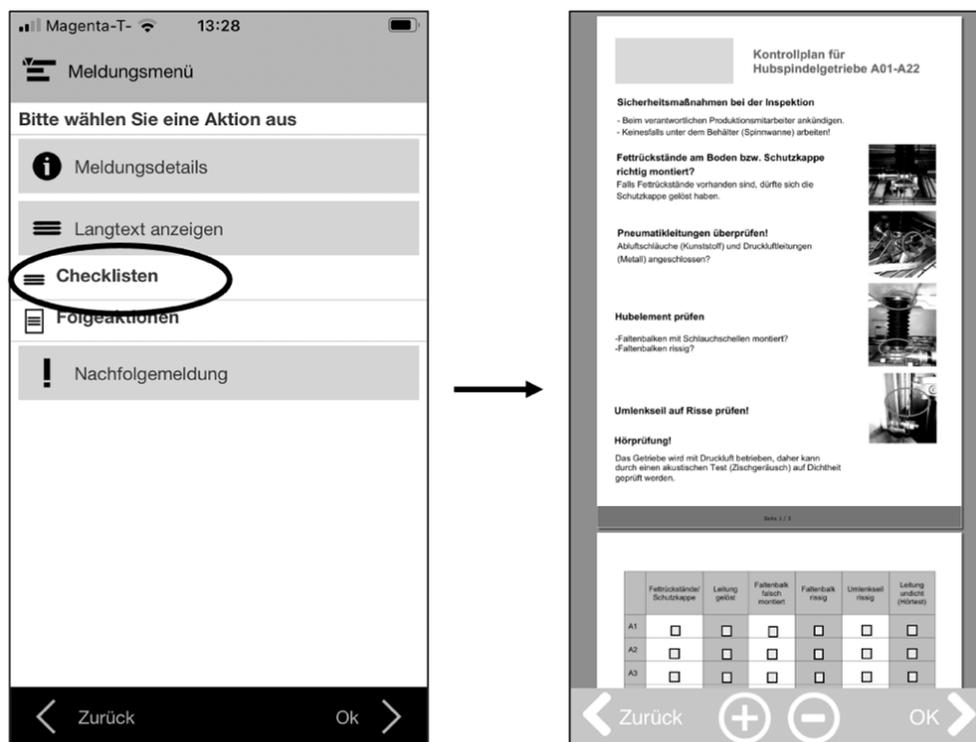


Abbildung 51: Abrufen der Checkliste am Handheld-Gerät²³⁷

Dank der detaillierten Checkliste weiß der Mitarbeiter, welche Kontrollpunkte am Aggregat zu prüfen sind und worauf er konkret zu achten hat (Abbildung 51). Wird einer der in der Checkliste aufgeführten Fehler festgestellt, so ist nur ein Kreuz bei dem betreffenden Aggregat (11 Hubspindelgetriebe) zu setzen und die Wartungsnachmeldung wird automatisch mit dem hinterlegten Kurztext und den vier Klassifizierungsattributen erstellt (Abbildung 52). Vor dem Abschließen der Meldung hat der Mitarbeiter nach wie vor die Möglichkeit, Bilder oder einen Langtext für eine ausführlichere Beschreibung des Fehlers an die Meldung anzufügen. Treten neue Fehler auf, die nicht in der Checkliste vermerkt sind, muss eigenständig eine Meldung generiert und die Checkliste um diesen Fehler erweitert werden.

²³⁷ Eigene Darstellung



Abbildung 52: Automatische Generierung der Wartungsnachmeldung²³⁸

Durch den Einsatz der modifizierten Checklisten auf dem Smartphone konnte eine deutliche Effizienzsteigerung bei der Bearbeitung der Inspektionen festgestellt werden. Die Effizienzsteigerung wurde in Form einer starken Reduzierung des Zeitaufwands für die Erstellung von Wartungsnachmeldungen sowie der gezielten Inspektion anhand der klar definierten Kontrollpunkte erreicht. Aufgrund der kurzen Projektlaufzeit konnte die Leistungsverbesserung nur qualitativ durch Beobachtung der Umsetzung und Rücksprache mit Experten, nicht aber quantitativ anhand von Kennzahlen bewertet werden.

5.5 Standardisierung und nachhaltige Integration

Standardisierung und nachhaltige Integration ist das Fundament des LSM-Konzepts und daher unerlässlich.

5.5.1 Systematisches Wissensmanagement

Ein großer Teil des systematischen Wissensmanagements besteht in der Extraktion und Aufbereitung des impliziten Wissens der Mitarbeiter und der anschließenden Speicherung und Aktualisierung des expliziten Wissens (z.B. csv-Dateien). Diese Punkte werden in den Kapiteln 5.3.2 und 0 ausführlich ausgearbeitet und validiert.

²³⁸ Eigene Darstellung

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die aus den Checklisten am Smartphone generierten Meldungen alle erforderlichen Informationen enthalten und dass diese Informationen auch ordnungsgemäß an das SAP-System übertragen werden.

Meldung	Meldungsart	Meldungsdatum	Techn. Platz	Tech. Pl. Bezeichnung	Bezeichnung	Beschreibung	Verantw.ArbPl.	Meldender	Langtext
4581235	WN	05.07.21	T-T1-AG3-1	Spinnreihe A	Hubspindelgetriebe	A01 Faltenbalken eingerissen	Schilcher	Schön	Unten eingerissen
4581234	WN	05.07.21	T-T1-AG3-1	Spinnreihe A	Hubspindelgetriebe	A01 Schutzkappe gelöst	Sitter	Schön	Neue Schelle notwendig
4581236	WN	05.07.21	T-T1-AG3-1	Spinnreihe A	Hubspindelgetriebe	A03 Umlenkseil eingerissen	Sitter	Seiringer	

Meldung	Codegruppe	Obj.T.Grp.Text	Objektteilcode	Obj.T.Code.Txt	Codegruppe	Probl.Grp.Text	Schadenscode	Probl.Code.Txt
4581235	FTBT0280	Sonstige	2965	Sonstiges	FTSC0040	Mechanisch	3530	Riss
4581234	FTBT0080	Getriebe	1220	Dichtung	FTSC0040	Mechanisch	3495	Lockerung, Verbindung gelöst
4581236	FTBT0280	Sonstige	2965	Sonstiges	FTSC0040	Mechanisch	3530	Riss

Abbildung 53: Daten von generierte Wartungsnachmeldung²³⁹

Abbildung 53 zeigt die aus dem SAP-System extrahierten Daten für drei mit dem Smartphone erstellte Wartungsnachmeldungen. Alle diese Informationen, mit Ausnahme des Langtextes, der individuell hinzugefügt werden kann, werden automatisch generiert, indem das entsprechende Kreuz auf der Checkliste gesetzt wird. Der für diese Teilanlage zuständige technische Planer wird automatisch als verantwortlicher Arbeitsplatz (Verantw.ArbPl.) hinzugefügt, welcher dann die Meldung weiterbearbeitet und gegebenenfalls einen Auftrag erstellt. Der technische Planer muss als ersten Schritt den Technischen Platz manuell auf das tatsächliche Hubspindelgetriebe ändern, welches im Attribut "Beschreibung" automatisch angegeben wird. Dies ist notwendig, da eine direkte Zuordnung von Checklisten, die mehrere Aggregate gleichzeitig mit Hilfe einer Tabelle (Abbildung 46) behandeln, mit der aktuellen Software (Movilizer) nicht möglich ist. Für eine direkte Zuordnung müsste die Checkliste bei jedem der 11 Hubspindelgetriebe auf den Technischen Platz im SAP-System abgelegt werden. Der Effizienzgewinn wird dadurch stark eingeschränkt, weil der Instandhalter jede Inspektionsmeldung und die dazugehörige Checkliste einzeln öffnen und abschließen müsste. Aus diesem Grund ist bei der Durchführung von Inspektionen mehrerer angrenzender Geräte mit der aktuellen Software die Verwendung einer Tabelle am sinnvollsten (Abbildung 52). Im Falle der Wartungsnachmeldung 4581235 (Abbildung 53) wird der technische Platz von Spinnreihe A (T-T1-AG3-1) auf das Hubspindelgetriebe A01 mit dem technischen Platz T-T1-AG3-1-01-H1310140 geändert und ist damit eindeutig zugeordnet. Durch die automatische und standardisierte Erstellung von Meldungen mit allen relevanten Informationen, sowie die direkte Zuordnung zum entsprechenden Technischen Platz, erfüllen die generierten Meldungen alle Voraussetzungen für die Verwendung in späteren Auswertungen.

²³⁹ Eigene Darstellung

5.5.2 Schulungskonzept für die Einführung und nachhaltige Integration autonomer Instandhaltung

Die Einführung von Lean Management Methoden und Instrumenten (5S-Methode, autonome IH) ist in der Vergangenheit in dem Referenzunternehmen mehrfach gescheitert. Im Kick-Off Meeting sowie in mehreren Gesprächen mit den Verantwortlichen werden diverse Gründe für das Scheitern ermittelt. Der erste Kritikpunkt ist die mangelnde Unterstützung durch die Führungsebene. Der zweite kritisierte Punkt ist die Einführung mit Hilfe von Verbesserungsprojekten, die nach wenigen Wochen keine Unterstützung mehr hatten und nie richtig abgeschlossen wurden. Während der erste Punkt unternehmensintern geregelt werden muss, kann der zweite Punkt durch ein gut durchdachtes Ausbildungskonzept gelöst werden, um eine nachhaltige Integration im Unternehmen zu erzielen.

Zu diesem Zweck wird das in Kapitel 4.5.2 entwickelte Schulungskonzept zur Einführung der autonomen Instandhaltung gemeinsam mit dem Instandhaltungsmanagement an das Referenzunternehmen angepasst. Im Gegensatz zu einem Verbesserungsprojekt setzt dieses Konzept auf eine kontinuierliche Umsetzung durch die schrittweise Schaffung neuer Standards nach den Prinzipien des Kata-Coachings (Abbildung 54).

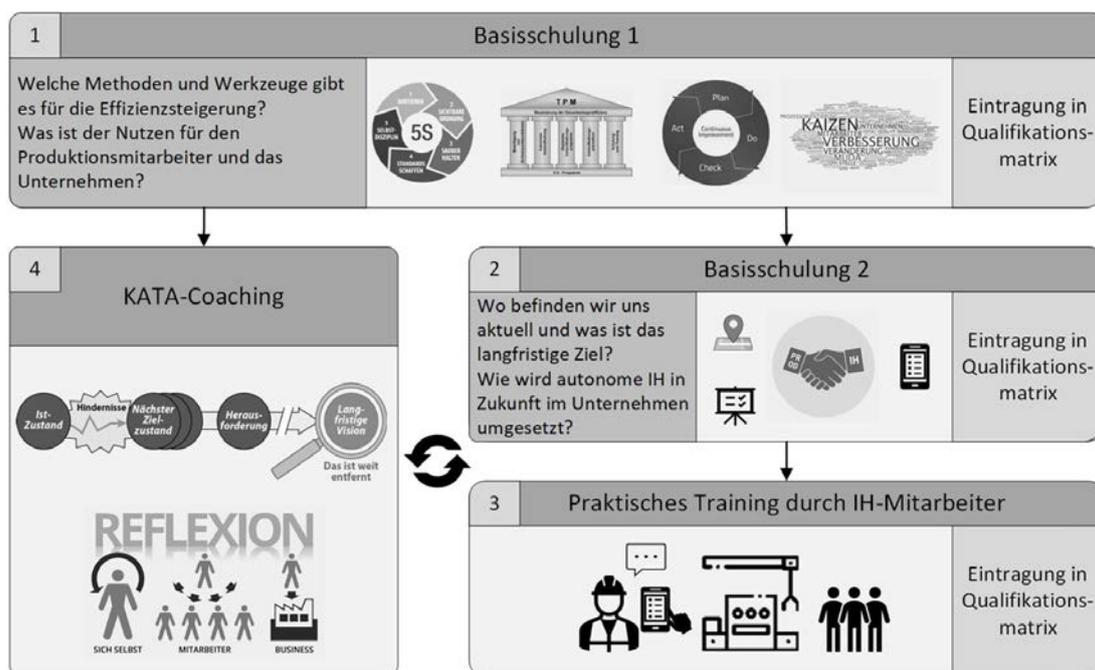


Abbildung 54: Schulungskonzept für die Einführung autonomer IH²⁴⁰

Zur Sensibilisierung der Produktionsmitarbeiter für die Anwendung von Methoden und Instrumenten des Lean Managements ist das Basistraining 1 vorgesehen. Abbildung 55 zeigt einige PowerPoint-Folien der ersten Basisschulung.

²⁴⁰ Eigene Darstellung

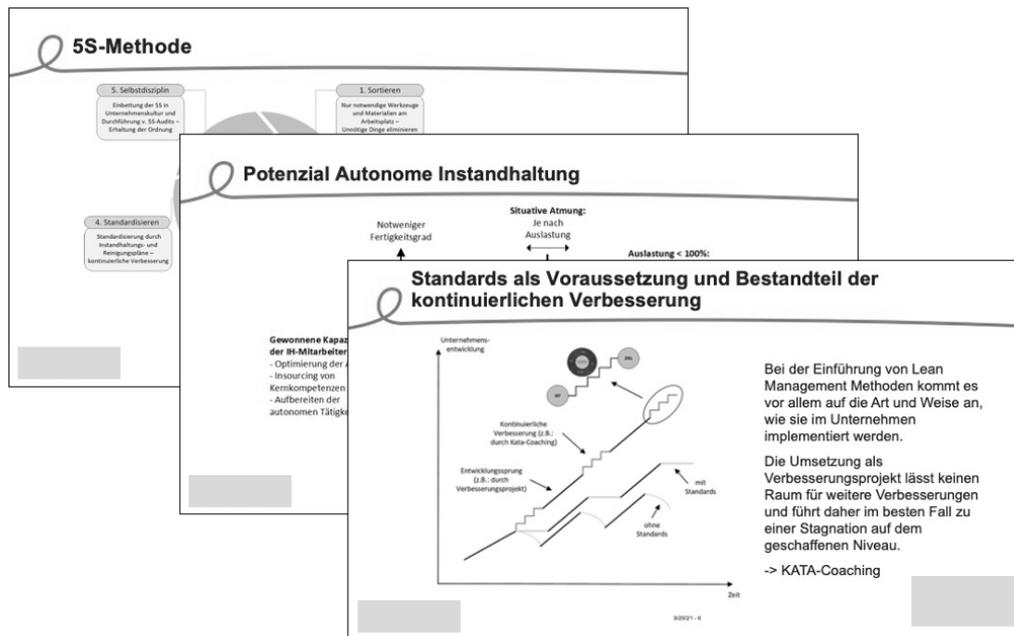


Abbildung 55: Auszug aus den Folien zur Basisschulung 1²⁴¹

Am Ende dieser Schulung müssen sich die Mitarbeiter über den Nutzen der autonomen Instandhaltung für das Unternehmen und vor allem für sich selbst im Klaren sein. In der Basisschulung 2 soll vermittelt werden, wie die digitale autonome Instandhaltung in Zukunft im Unternehmen umgesetzt wird, d.h. das langfristige Ziel (Vision) festgelegt werden. In Abbildung 56 sind einige PowerPoint-Folien aus der zweiten Basisschulung dargestellt.

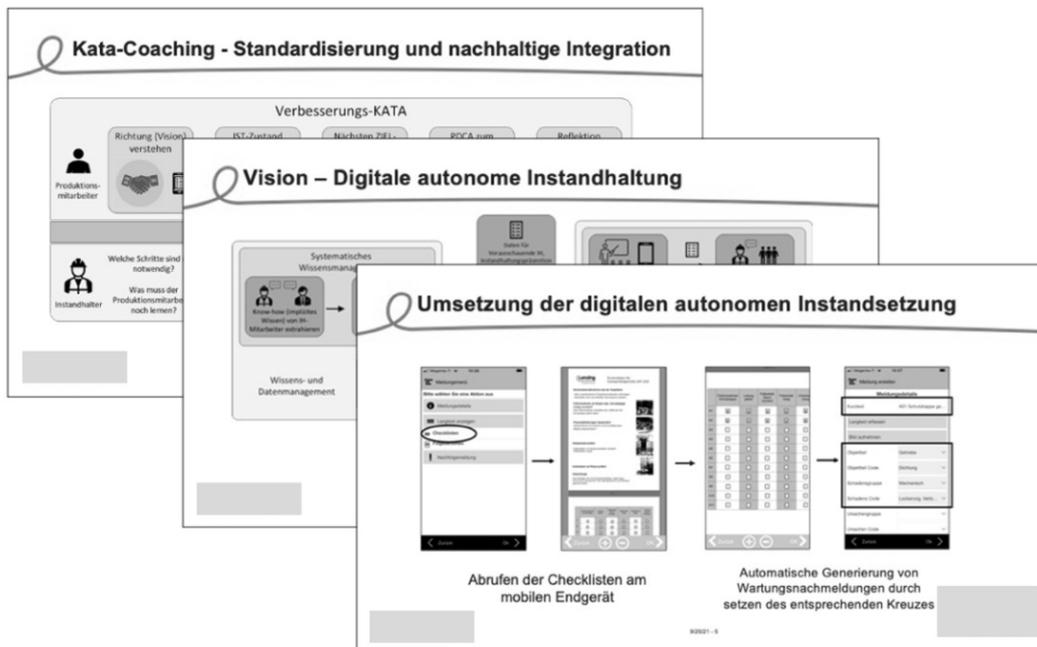


Abbildung 56: Auszug aus den Folien zur Basisschulung 2²⁴²

²⁴¹ Eigene Darstellung
²⁴² Eigene Darstellung

Einer der Schwerpunkte der zweiten Schulung ist die Erläuterung des Umgangs mit dem Smartphone, um eine Grundlage für die anschließende praktische Ausbildung zu schaffen.

Das Referenzunternehmen erstellt derzeit erste Checklisten auf der Basis des in Kapitel 4.5.1 entwickelten Verfahrens für ausgewählte Aggregate, die zukünftig durch die autonome Instandhaltung eigenständig inspiziert werden sollen. Gleichzeitig wird das Instandhaltungspersonal im Umgang mit den Checklisten auf dem Smartphone geschult, damit sie ihr Wissen bei den praktischen Trainingseinheiten bestmöglich an das Produktionspersonal weitergeben können. Speziell bei der praktischen Ausbildung wird es notwendig sein das Produktionspersonal aufzufordern, sämtliche Verbesserungsvorschläge an den Vorgesetzten oder das Instandhaltungspersonal weiterzuleiten. Durch die Anwendung des entwickelten Schulungskonzepts verspricht sich das Unternehmen einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess, der es Schritt für Schritt der Vision einer digitalen autonomen Instandhaltung näherbringt.

5.6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die Werkzeuge und Tools der Bausteine des Lean Smart Maintenance Konzepts wurden im Referenzunternehmen umgesetzt und damit auf ihre Praxistauglichkeit hin validiert.

Die Ermittlung des Anlagenkritikalitätsindex und die Aufschlüsselung der Instandhaltungskosten (Kostenanteile und Instandhaltungsaktivitäten) sowie die anschließende Zuordnung zu den definierten Betrachtungseinheiten ermöglichten eine Anpassung der Instandhaltungsstrategie sowie eine transparente Kostenübersicht. Aus der transparenten Kostenübersicht wurden die teilweise sehr hohen Wartungs- und Reparaturkosten sowie der hohe Anteil an externen Dienstleistungen identifiziert. Die größten Herausforderungen bei diesem Baustein waren die mitunter schlechte Datenqualität und die Notwendigkeit eines hochqualifizierten Expertenteams für die Aufbereitung und Bestimmung des Anlagenkritikalitätsindexes.

Der derzeitige Einsatz von Smartphones im Unternehmen erwies sich als ineffizient und für die autonome Instandhaltung nicht geeignet. Mit Hilfe des entwickelten Ansatzes zur Wissensextraktion und -aufbereitung konnte eine digitale Checkliste für das Smartphone erstellt werden, die nachweislich eine wesentlich effizientere und fehlerfreie Inspektion sowohl durch das Instandhaltungs- als auch das Produktionspersonal ermöglicht.

Das nach den Prinzipien des KATA-Coachings entwickelte Schulungskonzept wird in den kommenden Monaten genutzt, um die digitale autonome Instandhaltung kontinuierlich und nachhaltig im Unternehmen zu implementieren.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In den folgenden Kapiteln werden die Forschungsfragen beantwortet und schließlich ein Ausblick auf eine mögliche Weiterentwicklung des Konzepts gegeben.

6.1 Ergebnisse der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Lean Smart Maintenance Konzept für die kontinuierliche Prozessindustrie entwickelt, das etablierte Methoden und Konzepte der Instandhaltung mit innovativen Technologien der Industrie 4.0 kombiniert, um die Effizienz und Effektivität bei gleichbleibender Qualität und reduzierten Kosten zu steigern. Das LSM-Konzept soll nicht nur der Wissenschaft, sondern auch den Anwendern der betrieblichen Praxis dienen und sie dabei adäquat bei der Umsetzung eines effizienteren und effektiveren Instandhaltungsmanagements unterstützen. Die durchgeführte Validierung in einem Chemieunternehmen, das in einem kontinuierlichen Prozess regenerative Zellulosefasern für die Textilindustrie herstellt, bestätigt die Wirksamkeit des LSM-Konzepts. Durch geringfügige Adaptionen kann das vorgestellte Konzept auf andere Unternehmen in der kontinuierlichen Prozessindustrie übertragen werden.

6.2 Abschließende Diskussion der Forschungsfragen

Im Folgenden werden die in Kapitel 1.3 formulierte übergreifende Forschungsfrage und die daraus resultierenden Forschungsfragen beantwortet.

Forschungsfrage: *Wie können etablierte Methoden und Konzepte der Instandhaltung mit innovativen Technologien der Digitalisierung kombiniert werden, um Effizienz und Effektivität bei gleichbleibender Qualität zu steigern und gleichzeitig die Kosten zu senken?*

Die Antwort auf die übergreifende Forschungsfrage ergibt sich aus den drei konkreten Fragestellungen:

Subfrage 1: *Welche Methoden und Maßnahmen eignen sich in der Praxis zur Reduktion der Instandhaltungskosten bei gleichbleibender Produkt- und Produktivitätsqualität?*

Um die Kosten zu senken, besteht die erste Maßnahme des Instandhaltungsmanagements darin, die Instandhaltungsstrategie auf der Grundlage des Kritikalitätsindex der jeweiligen Betrachtungseinheit (Teilanlage, Baugruppe etc.) anzupassen und die bestehenden Instandhaltungsmaßnahmen mit Hilfe eines entwickelten Werkzeugs auf verschwendete Ressourcen zu überprüfen. Ziel dieses Vorgehens ist es, die Instandhaltungsressourcen zur richtigen Zeit am richtigen Ort

einzusetzen und somit das Instandhaltungsbudget gezielt und effizient zu nutzen. Das Verfahren zur Ermittlung der anlagenspezifischen Instandhaltungsstrategie sowie zur Identifizierung verschwendeter Ressourcen wird in Kapitel 4.2 erläutert und in Kapitel 5.2 anhand einer Teilanlage des Referenzunternehmens validiert.

Eine weitere Maßnahme zur Senkung der Instandhaltungskosten ist die Einführung und nachhaltige Integration von Lean Management Methoden. Aufgrund der hochautomatisierten Anlagen in der kontinuierlichen Prozessindustrie und der daraus resultierenden freien Kapazitäten des Produktionspersonals im Normalbetrieb ist die Integration der autonomen Instandhaltung besonders geeignet. Direkte Kosteneinsparungen entstehen dabei durch die Übernahme von Routinetätigkeiten (Inspektion, Reinigung etc.) des Instandhaltungspersonals durch das Produktionspersonal. Das weitaus größere Einsparungspotenzial liegt in den indirekten Kosteneinsparungen. So können zum Beispiel durch die frühzeitige Erkennung von Störungen, die in einigen Fällen größere Schäden verhindert, die Reparaturkosten gesenkt werden. Zudem können die freien Kapazitäten des qualifizierten Instandhaltungspersonals genutzt werden, um Verbesserungsprojekte an der Anlage zu identifizieren und umzusetzen. Eine weitere Möglichkeit freie Kapazitäten zu nutzen ist das Insourcing von Kernkompetenzen, um die Kosten für externe Dienstleistungen zu senken und gleichzeitig das interne Know-how zu stärken. Das Potenzial und die Umsetzung der autonomen Instandhaltung werden in Kapitel 4.3.2 erläutert. In Kapitel 5.3.2 wird die Zweckmäßigkeit der autonomen Instandhaltung anhand der Durchführung einer Inspektion durch einen Produktionsmitarbeiter überprüft. Mit Hilfe einer vorbereiteten Checkliste konnte eine gezielte und fehlerfreie Kontrolle des Aggregats sichergestellt werden. Dies bestätigt, dass die Übertragung solch einfacher, autonomer Tätigkeiten auf das Produktionspersonal möglich ist und eine Effizienzsteigerung im Unternehmen verspricht.

Subfrage 2: Welche Enabler der Digitalisierung lassen sich mit den etablierten Methoden verknüpfen, um Effizienzsteigerung zu erzielen?

Das Potenzial zur Effizienzsteigerung durch den Einsatz digitaler Enabler besteht in sehr vielen Bereichen und Anwendungen der Instandhaltung. Im Rahmen der systematischen Literaturrecherche wurden in Kapitel 4.4.4 einige Enabler der Digitalisierung zur Unterstützung der Durchführung von Instandhaltungsaktivitäten identifiziert und bewertet. Dabei erhalten die beiden Handheld-Geräte, Smartphone und Tablet, durchweg hohe Bewertungen in allen Kategorien, wobei das Smartphone aufgrund seiner Größe leichter in die persönliche Ausrüstung der Instandhaltungsmitarbeiter integriert werden kann. Neben dem Einsatz von Smartphones empfiehlt sich für die Durchführung von autonomen Instandhaltungsmaßnahmen ein digitales Shopfloor-Board zur Abbildung von operativen Kennzahlen.

Die Anwendung Handheld-Geräten (Smartphones und Tablet) ermöglicht es dem Instandhaltungspersonal beispielsweise, Störungen in Echtzeit zu erfassen oder historische Wartungs- und Maschinendaten sowie Fachinformationen und Expertenwissen bei der Durchführung von Instandhaltungstätigkeiten abzurufen. Durch das Starten und Beenden der Aufträge am Ort des Geschehens und das Hinzufügen von Kommentaren oder Erkenntnissen in Form von Anmerkungen wird der Informationskreislauf geschlossen und eine kontinuierliche Verbesserung des Instandhaltungsprozesses gewährleistet. Ziele der Verwendung von Handheld-Geräten sind unter anderem die Verkürzung der Reaktionszeit, die Erhöhung der Datenqualität und die Steigerung der wertschöpfenden Tätigkeiten jedes Mitarbeiters. Das enorme Potenzial des Einsatzes digitaler Endgeräte für das Instandhaltungspersonal sowie für das Produktionspersonal bei der Durchführung autonomer Tätigkeiten wird in Kapitel 4.4 näher erläutert. In Kapitel 0 wurde die signifikante, qualitativ erfasste Steigerung der Effizienz durch die Verwendung von Checklisten auf Smartphones für die Inspektion validiert.

Subfrage 3: Wie können die entwickelten Konzepte und Methoden im Unternehmen nachhaltig integriert werden?

Grundlage für die Integration der autonomen Instandhaltung ist ein systematisches Wissensmanagement, das die Extraktion, Aufbereitung und Speicherung des impliziten Wissens des Instandhaltungspersonals und die kontinuierliche Aktualisierung des daraus resultierenden expliziten Wissens vornimmt. In Kapitel 4.5.1 wird die Vorgehensweise zur Erstellung einer Checkliste, von der Extraktion bis zur Speicherung, für die Durchführung einer Inspektion erläutert. In Kapitel 5.3.2 wird die entwickelte Vorgehensweise anhand eines Praxisbeispiels im Referenzunternehmen validiert.

Für die nachhaltige Integration einer effizienten autonomen Instandhaltung wurde in Kapitel 4.5.2 ein Schulungskonzept auf den Prinzipien des Kata-Coachings entwickelt, welches auf einer kontinuierlichen Implementierung durch die schrittweise Schaffung neuer Standards beruht. Dieser kontinuierliche Verbesserungsprozess, der durch Verbesserungsvorschläge der Mitarbeiter vorangetrieben wird, sorgt für eine nachhaltige Steigerung der Effizienz und verhindert so eine Stagnation oder Verschlechterung des erreichten Niveaus. In Kapitel 5.5.2 wurden gemeinsam mit dem Referenzunternehmen die Basisschulungen für das Konzept und die weitere Vorgehensweise zur Integration der digitalen autonomen Instandhaltung erarbeitet.

Aufgrund der Tatsache, dass die Weiterbildung von Mitarbeitern oft sehr zeit- und aufwandsintensiv ist, empfiehlt sich die Implementierung einer aussagekräftigen Qualifikationsmatrix. Daher wurde in Kapitel 4.5.3 eine Qualifikationsmatrix speziell für die autonome Instandhaltung entwickelt, die den chronischen Verlauf der Ausbildung und das Qualifikationsniveau der Produktionsmitarbeiter durch systematisches

Scoring darstellt. So erhält das Management einen transparenten Überblick über den Qualifikationsstand der einzelnen Produktionsmitarbeiter, wodurch eine aufgabenspezifische Auswahl der Mitarbeiter und die Planung gezielter Schulungen möglich wird.

6.3 Ausblick

Im Folgenden werden zunächst einige Vorschläge für die Weiterentwicklung und anschließend die im Hinblick auf die Nachhaltigkeit notwendige Ökologisierung des LSM-Konzepts diskutiert.

Zunächst wird auf die Entwicklung und Validierung der bereits im LSM-Konzept erwähnte Instrumente verwiesen. Als ersten Schritt wird die Validierung der entwickelten Qualifikationsmatrix und ein darauf basierendes Belohnungssystem empfohlen. Zudem wird die Gestaltung eines digitalen Shopfloor-Boards und dessen Validierung in Bezug auf die Effektivität, insbesondere im Hinblick auf die Durchführung von autonomen Instandhaltungsaktivitäten, vorgeschlagen.

Derzeit wird fast ausschließlich der ökonomische und nur selten der ökologische Stellhebel zur Leistungssteigerung in Unternehmen eingesetzt.²⁴³ Studien bestätigen jedoch, dass die Kombination von "Lean and Green"-Strategien in einem Unternehmen dazu führt, dass die ökologischen Unternehmensziele erreicht werden, während gleichzeitig Kosten und Risiken gesenkt, die Einnahmen gesteigert und das Markenimage verbessert werden.²⁴⁴ Mit dem Europäischen Green Deal setzt die Europäische Union genau auf dieses große, weitgehend ungenutzte Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz durch den Übergang zu einem sauberen und zirkulären Wirtschaftsmodell anstelle des derzeit vorherrschenden linearen Modells.²⁴⁵ Somit steht die Integration der ökologischen (grünen) Dimension in die Konzeption des Wertschöpfungssystems im Einklang mit den EU-Klimazielen und birgt gleichzeitig vielfältige Chancen und Möglichkeiten für eine nachhaltige und zugleich produktivitätssteigernde Produktion.²⁴⁶ In einem gut organisierten und leistungsorientierten Unternehmen ist neben den primären (z.B.: Produktion) und sekundären (z.B.: Beschaffung) Tätigkeiten vor allem die Instandhaltung ein wichtiger Wertschöpfungsfaktor. In diesem Sinne besteht weiterer Forschungsbedarf in der Integration von Methoden und Maßnahmen für Umweltschutz und Nachhaltigkeit in das Instandhaltungsmanagement und zur Entwicklung eines Lean-Smart-„Green“ Maintenance Konzepts für die kontinuierliche Prozessindustrie zu entwickeln.

²⁴³ vgl. Sihn et al., 2021, S. 21

²⁴⁴ vgl. Sihn et al., 2021, S. 20

²⁴⁵ vgl. Sihn et al., 2021, S. 7

²⁴⁶ vgl. Sihn et al., 2021, S. 5

7 Literaturverzeichnis

- Al-Najjar, B.; Algabroun, H. und Jonsson, M. (2018): Maintenance 4.0 to fulfil the demands of Industry 4.0 and Factory of the Future. In: International Journal of Engineering Research and Applications, 8. Jg. (11), S. 20-31.
- Ansari, F.; Glawar, R. und Nemeth, T. (2019): PriMa: a prescriptive maintenance model for cyber-physical production systems. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32. Jg. (4-5), S. 482-503.
- Ansari, F.; Glawar, R. und Sihm, W. (2020): Prescriptive maintenance of CPPS by integrating multimodal data with dynamic bayesian networks. In: Machine Learning for Cyber Physical Systems, Technologies for Intelligent Automation, 11. Jg., S. 1-8.
- Apel, H. (2018): Instandhaltungs- und Servicemanagement: Systeme mit Industrie 4.0. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Bernerstätter, R. und Kühnast, R. (2019): Data Maturity Assessment–Bewertung der Reife des Datenmanagements für Smart Maintenance. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 164. Jg. (1), S. 21-25.
- Biedermann, H. (2015): Die Arbeitsorganisation der Instandhaltung im Kontext zu Industrie 4.0. In: Industrie Management (3), S. 45-48.
- Biedermann, H. (2016a): Lean Smart Maintenance. In: WINGbusiness, 01. Jg., S. 12-15.
- Biedermann, H. (2016b): Lean Smart Maintenance. In: Biedermann, Hubert (Hrsg.): Industrial Engineering und Management: Beiträge des Techno-Ökonomie-Forums der TU Austria. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 119-141.
- Biedermann, H. (2016c): Optimierung der Instandhaltungsstrategie durch datenanalytische Risikoklassifikation und Störungsprognose. In: Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben.
- Biedermann, H. und Kinz, A. (2019): Lean Smart Maintenance—Value Adding, Flexible, and Intelligent Asset Management. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 164. Jg. (1), S. 13-18.
- Biedermann, H.; Kinz, A.; Bernerstätter, R. und Zellner, T. (2016): Lean smart maintenance – Implementation in the process industry. In: Lehrstuhl

- Wirtschafts- und Betriebswissenschaften, Montanuniversität Leoben, 21. Jg., S. 41-43.
- Bokrantz, J.; Skoogh, A.; Berlin, C.; Wuest, T. und Stahre, J. (2020): Smart Maintenance: an empirically grounded conceptualization. In: International Journal of Production Economics, 223. Jg., S. 107534.
- Brennan, D. (2020): Process Industry Economics: Principles, Concepts and Applications. 2. Auflage: Elsevier.
- Buck, H. und Witzgall, E. (2012): Mitarbeiterqualifizierung in der Montage. In: Lotter, Bruno/Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 397-417.
- Chin, H. H.; Varbanov, P. S.; Klemeš, J. J.; Benjamin, M. F. D. und Tan, R. R. (2020): Asset maintenance optimisation approaches in the chemical and process industries – A review. In: Chemical Engineering Research and Design, 164. Jg., S. 162-194.
- Conrad, R. W. (2016): Total Productive Maintenance (TPM). 5S als Basis des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 35-40.
- DIN 13306: (2018-02), Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung.
- DIN 31051: (2019-06), Grundlagen der Instandhaltung.
- Dorner, H. (2016): 5S-Methode: Optimierung von Prozessen und des Arbeitsumfelds. Erfolgsfaktor Lean Management 2.0. Springer, S. 323-341.
- Ehni, M. und Kersten, W. (2015). Toyota Kata: Empowering Employees for Target-Oriented Improvement-A Best Practice Approach. Innovations and Strategies for Logistics and Supply Chains: Technologies, Business Models and Risk Management. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Vol. 20: Berlin: epubli GmbH.
- Felix, F.; Gram, M.; Schönsleben, P. und Biedermann, H. (2015): Einflussfaktoren und Ausrichtung von Produktionsstrukturen in der Prozessindustrie. In: WInG Business, S. 30-35.
- Franzen, J. und Kuhlenkötter, B. (2018): Präskriptive Analyse im Kontext der Instandhaltung von Schienenfahrzeugen. S. 64-66.

- Geisberger, E. und Broy, M. (2012): agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Springer-Verlag.
- Glawar, R. (2020): Vorgehensmodell zur Integration unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien in dre autonomen Produktionssteuerung, Technische Universität Wien, Wien,
- Haase, T.; Berndt, D. und Termath, W. (2016): Anforderungen an die lernförderliche Gestaltung von Assistenzsystemen für die Instandhaltung : Beispiele aus der Stahl- und Prozessindustrie. In: Megatrend Digitalisierung - Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation, S. 323-337.
- Heller, T. und Prasse, C. (2017): Total Productive Management-ganzheitlich: Einführung in der Praxis. Springer-Verlag.
- Henke, M.; Heller, T. und Stich, V. (2019). Smart Maintenance-Der Weg vom Status quo zur Zielvision. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Hölbfer, S. (2014): Modell zur Auswahl von Instandhaltungsstrategien in anlageintensiven Industriebetrieben, Montanuniversität Leoben, Leoben,
- Huber, C.; Passath, T. und Biedermann, H. (2021): Wissens- und lernorientierte Instandhaltung unter dem Aspekt zunehmender Digitalisierung. In: HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, 58. Jg. (1), S. 197-211.
- Jantunen, E.; Di Orio, G.; Hegedűs, C.; Varga, P.; Moldován, I.; Larrinaga, F.; Becker, M.; Albano, M. und Maló, P. (2019). Maintenance 4.0 World of Integrated Information. In: Popplewell, Keith/Thoben, Klaus-Dieter/Knothe, Thomas/Poler, Raúl (Hrsg.): Enterprise Interoperability VIII. Cham: Springer International Publishing.
- Jasiulewicz-Kaczmarek, M.; Legutko, S. und Kluk, P. (2020): Maintenance 4.0 technologies—new opportunities for sustainability driven maintenance. In: Management and Production Engineering Review, 11. Jg.
- Kinz, A.; Bernerstaetter, R. und Biedermann, H. (2016a). Lean Smart Maintenance—Efficient and Effective Asset Management for Smart Factories. Proceedings of the 8th International Scientific Conference Management of Technology—Step to Sustainable Production.
- Kinz, A.; Bernerstätter, R. und Zellner, T. (2016b): Lean Smart Maintenance in der Prozessindustrie. In: WINGbusiness, 01. Jg., S. 16-19.

- Kovacs, K.; Ansari, F.; Geisert, C.; Uhlmann, E.; Glawar, R. und Sihm, W. (2019). A Process Model for Enhancing Digital Assistance in Knowledge-Based Maintenance. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kumar, U. und Galar, D. (2018): Maintenance in the era of industry 4.0: issues and challenges. In: Quality, IT and Business operations, S. 231-250.
- Lange, J. und Henschel, N. (2017): Der Einsatz von Lean Management zur Komplexitätsreduktion. In: Scheinpflug, Rita/Stolzenberg, Kerstin (Hrsg.): Neue Komplexität in Personalarbeit und Führung: Herausforderungen und Lösungsansätze. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 155-177.
- Lenzian, H. und Martin-Martin, R. (2016): Shopfloor-Management: Nachhaltige Problemlösungen schaffen. Erfolgsfaktor Lean Management 2.0. Springer, S. 83-98.
- Lueth, K. L.; Patsioura, C.; Williams, Z. D. und Kermani, Z. Z. (2016). The current state of data analytics usage in industrial companies. In: Germany, IOT Analytics and Digital Analytics Association (Hrsg.). INDUSTRIAL ANALYTICS: INDUSTRIAL ANALYTICS.
- Macchi, M.; Roda, I. und Fumagalli, L. (2017). On the Advancement of Maintenance Management Towards Smart Maintenance in Manufacturing. In: Lödding, Hermann/Riedel, Ralph/Thoben, Klaus-Dieter/von Cieminski, Gregor/Kiritsis, Dimitris (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing. Cham: Springer International Publishing.
- Marttonen-Arola, S.; Baglee, D.; Kinnunen, S.-K. und Holgado, M. (2020). Introducing Lean into Maintenance Data Management: A Decision Making Approach. In: Liyanage, Jayantha P./Amadi-Echendu, Joe/Mathew, Joseph (Hrsg.): Engineering Assets and Public Infrastructures in the Age of Digitalization. Cham: Springer International Publishing.
- März, M. (2017): Instandhaltungsmanagement für die Fabrik der Zukunft. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 112. Jg. (10), S. 690-694.
- Matyas, K. (2018): Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Merhar, L.; Höllthaler, G. und Berger, C. (2019): Digitale Assistenzsysteme für die Produktion: Von der Zielfindung bis zur Einbindung gemeinsam mit den Mitarbeitern. In: Bosse, Christian K./Zink, Klaus J. (Hrsg.): Arbeit 4.0 im

Mittelstand: Chancen und Herausforderungen des digitalen Wandels für KMU. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 279-302.

Nemeth, T.; Ansari, F.; Sihn, W.; Haslhofer, B. und Schindler, A. (2018): PriMa-X: A reference model for realizing prescriptive maintenance and assessing its maturity enhanced by machine learning. In: Procedia CIRP, 72. Jg., S. 1039-1044.

Nemeth, T.; Bernerstätter, R.; Glawar, R.; Matyas, K. und Sihn, W. (2015): Instandhaltung 4.0. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 110. Jg. (9), S. 569-573.

Niehaus, J. (2017): Mobile Assistenzsysteme für industrie 4.0: Gestaltungsoptionen zwischen autonomie und kontrolle.

Passath, T. und Huber, C. (2019): Dynamische Instandhaltungsstrategieanpassung durch Anlagenkritikalitätsbewertung. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 164. Jg. (1), S. 7-12.

Passath, T. und Mertens, K. (2019): Decision Making in Lean Smart Maintenance: Criticality Analysis as a Support Tool. In: IFAC-PapersOnLine, 52. Jg. (10), S. 364-369.

Pawellek, G. (2016): Integrierte Instandhaltung und Ersatzteillogistik: Vorgehensweisen, Methoden, Tools. Springer-Verlag.

Pistorius, J. (2020): Industrie 4.0–Schlüsseltechnologien für die Produktion. Springer.

Poór, P.; Basl, J. und Zenisek, D. (2019). Predictive Maintenance 4.0 as next evolution step in industrial maintenance development. 2019 International Research Conference on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE).

Reichert, D.; Cito, C. und Barjasic, I. (2018): Vier Ebenen für ein ressourceneffizientes Unternehmen. Lean & Green: Best Practice. Springer, S. 39-70.

Rødseth, H.; Eleftheriadis, R. J.; Li, Z. und Li, J. (2020). Smart Maintenance in Asset Management – Application with Deep Learning. Singapore: Springer Singapore.

Rother, M. (2009): Toyota Kata: Managing people for improvement, adaptiveness and superior results. MGH, New York.

Ruiz-Sarmiento, J.-R.; Monroy, J.; Moreno, F.-A.; Galindo, C.; Bonelo, J.-M. und Gonzalez-Jimenez, J. (2020): A predictive model for the maintenance of

- industrial machinery in the context of industry 4.0. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence, 87. Jg., S. 103289.
- Ryll, F. und Freund, C. (2010): Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schacht, M. und Niemeyer, M. (2017): Entwicklung eines mobilen Shopfloor-Assistenzsystems zur Unterstützung der Instandhaltung im Karosseriebau. In: S-CPS: Ressourcen-Cockpit für Sozio-Cyber-Physische Systeme, S. 153.
- Schönsleben, P. (2020): Integrales Logistikmanagement: Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 8. Auflage. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Sihn, W.; Nemeth, T.; Schieder, P.; Rußbach, L.; Martineau, S.; Schindler, P. A. und Hübsch, M. (2021): Nachhaltige Wertschöpfungssysteme. Fraunhofer Austria Research GmbH.
- Sihn, W.; Sunk, A.; Nemeth, T.; Kuhlant, P. und Matyas, K. (2016): Produktion und Qualität: Organisation, Management, Prozesse. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Silvestri, L.; Forcina, A.; Intronà, V.; Santolamazza, A. und Cesarotti, V. (2020): Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. In: Computers in Industry, 123. Jg., S. 103335.
- Velmurugan, R. S. und Dhingra, T. (2015): Maintenance strategy selection and its impact in maintenance function. In: International Journal of Operations & Production Management, 35. Jg. (12), S. 1622-1661.
- Wang, Y.; Wang, G. und Anderl, R. (2016). Generic procedure model to introduce Industrie 4.0 in small and medium-sized enterprises. Proceedings of the world congress on engineering and computer science.
- Werner, A.; Angadi, V. C.; Lentès, J. und Mousavi, A. (2020): Vorausschauende Instandhaltung – Wenn der Digitale Schatten an seine Grenzen stößt. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115. Jg. (5), S. 335-339.
- Zapp, T.; Jussen, P. und Kurz, M. (2018): Informations- und Kommunikationstechnologien für die Instandhaltungsplanung und -steuerung. Betriebliche Instandhaltung. Springer, S. 205-222.

8 Abkürzungsverzeichnis

€	Euro
BSC	Balanced Scorecard
bzw.	beziehungsweise
CIP	Continous Improvement Prozess
CPPS	Cyber physischen Produktionssysteme
CPS	Cyber-Physical Systems
d.h.	das heißt
DACH	Deutschland, Österreich und die Schweiz
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMAIC	Define - Measure - Analyse - Improve - Control
ERP	Enterprise Resource Planning
etc.	et cetera
ggf.	Gegebenfalls
H	Ausfallhäufigkeit
h	Stunde
IH	Instandhaltung
IH-MA	Instandhaltungsmitarbeiter
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
K	Instandhaltungskosten
KBM	Knowledge Based Maintenance
KPI	Key Performance Indicators
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
L	Leistungseinschränkung
LM	Lean Maintenance
LSM	Lean Smart Maintenance
MA	Mitarbeiter
MOT	Mensch, Organisation, Technik
OEE	Overall Equipment Effectiveness
P-MA	Produktionsmitarbeiter
R	Risiko
RBM	Risk Based Maintenance
RFID	Radio Frequency Identification
S	Schadensausmaß
SAP	Systeme, Anwendungen und Produkte

SAP PM	SAP Plant Maintenance
t	Zeit
TPM	Total Productive Maintenance
WN-Meldung	Wartungsnachmeldung
z.B.	zum Beispiel

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: IH-abhängige Kosten	5
Abbildung 2: Grundmaßnahmen der Instandhaltung	5
Abbildung 3: Instandhaltungsmaßnahmen und deren Einfluss auf den Abnutzungsvorrat	6
Abbildung 4: Einteilung der Prüfverfahren	7
Abbildung 5: Instandhaltungsstrategien	11
Abbildung 6: Zustandsbasierte Instandhaltungsstrategie und dessen Wirkung auf den Abnutzungsvorrat	13
Abbildung 7: 5S-Zyklus	17
Abbildung 8: Total Productive Maintenance (TPM)	18
Abbildung 9: Transferdiagramm für TPM-Aufgaben	19
Abbildung 10: Aufgabenverlagerung durch autonome IH	19
Abbildung 11: Balanced Scorecard für die Instandhaltung	21
Abbildung 12: Gesamtanlageneffektivität OEE	22
Abbildung 13: Risikomatrix	24
Abbildung 14: Knowledge Based Maintenance (KBM)	25
Abbildung 15: Aufbau von Cyber-physischen Systemen	27
Abbildung 16: Systematische Literaturrecherche	29
Abbildung 17: Wissensintegration auf den Managementebenen	37
Abbildung 18: Prozessmodell der dynamischen Strategieoptimierung	39
Abbildung 19: Lean Smart Maintenance duales Vorgehensmodell	40
Abbildung 20: Anlagenbewertung mittels Anlagenindex	40
Abbildung 21: Lean Smart Maintenance Konzept	43
Abbildung 22: Vorgehensweise zur Bestimmung der Instandhaltungsstrategie	44
Abbildung 23: Exemplarischer Aufbau des technischen Platzes	45
Abbildung 24: Aufschlüsselung der Anlage	46
Abbildung 25: Exemplarische Darstellung der IH-Kosten jeder Betrachtungseinheit	49
Abbildung 26: Transparente Kostenübersicht vs. Anlagenkritikalitätsindex	50
Abbildung 27: Balanced Scorecard für die Instandhaltung	53
Abbildung 28: OEE modifiziert für die vollkontinuierliche Prozessindustrie	54
Abbildung 29: IH-Auslastung mit autonomer Instandhaltung	55
Abbildung 30: Vorgehensmodell zur Ein- und Durchführung einer analogen autonomen IH	56
Abbildung 31: Handheld-Geräte	57
Abbildung 32: Potenzial durch die Verwendung von Handheld-Geräten	58
Abbildung 33: Wearables	59
Abbildung 34: Digitales Shopfloor-Board	60
Abbildung 35: Standardisierung und nachhaltige Integration	61
Abbildung 36: Exemplarischer Aufbau einer Inspektionsplan	64

Abbildung 37: Schulungskonzept für die Einführung autonomer IH.....	66
Abbildung 38: Auswirkung der kontinuierlichen Verbesserung.....	68
Abbildung 39: KATA-Coaching speziell für die Einführung digitaler autonomer IH....	69
Abbildung 40: Stufen der Faserproduktion	71
Abbildung 41: Prozessschema der kontinuierlichen Faserproduktion	72
Abbildung 42: Instandhaltungskosten der Referenzanlage	74
Abbildung 43: Transparente Kostenübersicht vs. Anlagenkritikalitätsindex.....	78
Abbildung 44: Derzeitige Ausführung von autonomen Tätigkeiten	80
Abbildung 45: Inspektionsplan für Hubspindelgetriebe 1/2.....	81
Abbildung 46: Inspektionsplan für Hubspindelgetriebe 2/2.....	82
Abbildung 47: Prozessablauf mit einem Handheld-Gerät.....	83
Abbildung 48: Derzeitiger Inspektionsplan in der Referenzanlage	84
Abbildung 49: Wartungsnachmeldung generieren.....	84
Abbildung 50: Aufbereiten der Checkliste.....	85
Abbildung 51: Abrufen der Checkliste am Handheld-Gerät	86
Abbildung 52: Automatische Generierung der Wartungsnachmeldung	87
Abbildung 53: Daten von generierte Wartungsnachmeldung.....	88
Abbildung 54: Schulungskonzept für die Einführung autonomer IH.....	89
Abbildung 55: Auszug aus den Folien zur Basisschulung 1	90
Abbildung 56: Auszug aus den Folien zur Basisschulung 2	90

10 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Risikos	23
Formel 2: Berechnung des Schadensausmaßes	23
Formel 3: Berechnung des Anlagenkritikalitätsindex	48

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prozessindustrie vs. Fertigungsindustrie	28
Tabelle 2: Relevante Ansätze zu Lean Smart Maintenance	32
Tabelle 3: Methoden zum Erfahrungswissen-Austausch	37
Tabelle 4: Bewertungsattribute	47
Tabelle 5: Prioritätsklassen.....	48
Tabelle 6: Anlagenprioritätsanalyse.....	48
Tabelle 7: Instandhaltungskosten jeder Betrachtungseinheit	49
Tabelle 8: Auswahl der richtigen Instandhaltungsstrategie.....	51
Tabelle 9: Digitale Enabler und Shopfloor-Assistenzsysteme.....	60
Tabelle 10: Methoden für die Wissensextraktion	63
Tabelle 11: Punktesystem für Qualifikationsmatrix	70
Tabelle 12: Exemplarischer Aufbau einer Qualifikationsmatrix.....	70
Tabelle 13: Kosten für Instandhaltungstätigkeiten von NABE/TRO	75
Tabelle 14: Instandhaltungskosten nach Kostenart von NABE/TRO	75
Tabelle 15: Bewertungsattribute speziell für die Referenzanlage	76
Tabelle 16: Anlagenprioritätsanalyse der Teilanlage NABE/TRO.....	77
Tabelle 17: Kostenanalyse NMMO- und Avivage-Wäsche	78
Tabelle 18: Vorgeschlagene Instandhaltungsstrategie	79