



# Ökonomische Analyse dreier technischer Anlagen hinsichtlich deren Eignung für Predictive Maintenance

## Eine multiple Fallstudie am Flughafen München

Julian Rott<sup>1</sup> · Sebastian Floerecke<sup>2</sup> · Christoph Ertl<sup>1</sup> · Alexander Herzfeldt<sup>1</sup> · Markus Böhm<sup>1</sup> · Helmut Krcmar<sup>1</sup>

Angenommen: 10. April 2021 / Online publiziert: 1. Juni 2021  
© Der/die Autor(en) 2021

### Zusammenfassung

Treten bei technischen Anlagen während ihres Lebenszyklus Fehler auf, ist dies in den meisten Fällen das Ergebnis eines schleichenden Prozesses und nicht eines plötzlich auftretenden Ereignisses. Mithilfe geeigneter Verfahren können Fehler bereits vor ihrem Eintritt erkannt werden. Die von Herstellern vorgegebene Instandhaltungsstrategie berücksichtigt diese Möglichkeit für gewöhnlich jedoch nicht. Im Unterschied dazu zielt Predictive Maintenance (PdM) auf die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen vor dem eigentlichen Fehlereintritt ab, indem sowohl der aktuelle als auch der zukünftige Anlagenzustand inklusive der Umgebungsbedingungen diagnostiziert bzw. prognostiziert werden. Dessen Einführung bedarf allerdings einen deutlich höheren Digitalisierungsgrad und ist daher mit kostenintensiven Investitionen verbunden. Insofern ist PdM nicht für jede Anlagenklasse wirtschaftlich und prozessual sinnvoll. Der zentrale Aspekt, ob der Entwicklungs- und Datenerhebungsaufwand durch Einsparungen bei einer PdM-Strategie überhaupt refinanziert werden kann, wurde von der Forschung bislang weitgehend außer Acht gelassen. Wissenschaftler haben sich stattdessen auf die Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung des Verschleißgrads von Komponenten und damit auf die technischen Belange konzentriert. Vor diesem Hintergrund untersucht dieser Beitrag innerhalb einer multiplen explorativen Fallstudie am Flughafen München drei repräsentative Anlagenklassen von Flughäfen – Aufzüge, Pre-Conditioned-Air(PCA)-Anlagen und Multienteiser – in Bezug auf Aufwands-, Nutzen- und Risikoaspekte des PdM. Im Ergebnis zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Anlagenklassen: Während Aufzüge und PCA-Anlagen hohes Potenzial aufweisen, ist die Einführung für Multienteiser aufgrund der lediglich saisonalen Nutzung wirtschaftlich nicht sinnvoll. Mit diesem Beitrag erhalten Entscheidungsträger in Unternehmen eine Orientierungshilfe, für welche Anlagenklassen PdM profitabel ist und welche Aspekte in die ökonomische Bewertung technischer Anlagen grundsätzlich einbezogen werden sollten. Das angewandte Bewertungsverfahren dient als Muster für die Analyse weiterer technischer Anlagen.

---

✉ Julian Rott  
julianrott@web.de

Sebastian Floerecke  
sebastian.floerecke@uni-passau.de

Christoph Ertl  
mail@christoph-ertl.de

Alexander Herzfeldt  
aherzfeldt@gmx.de

Markus Böhm  
markus.boehm@tum.de

Helmut Krcmar  
helmut.krcmar@tum.de

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Geschäftsprozessmanagement, Technische Universität München, München, Deutschland

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik mit Schwerpunkt Informations- und IT-Service-Management, Universität Passau, Passau, Deutschland

## Einleitung

Treten bei technischen Anlagen entlang ihres Lebenszyklus Fehler auf, ist dieser Umstand mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht einem plötzlichen Ereignis geschuldet, sondern das Ergebnis eines schleichenden Prozesses. Neben dem altersbedingten Verschleiß beeinflussen eine Vielzahl weiterer Faktoren, wie die Materialbeschaffenheit oder bereits durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen das Auftreten eines technischen Fehlers. Die konkreten Auswirkungen dieser Einflussfaktoren können jedoch von Personen nicht unmittelbar erkannt werden [1, 2]. Da außerdem jede Anlage in einer anderen Umgebung unter dem Einfluss spezifischer Faktorenausprägungen betrieben wird, kann die vom Hersteller vorgegebene, vorausbestimmte Instandhaltungsstrategie nicht das wirtschaftliche Optimum bedeuten [3]. Die vorbeugende Wartung findet entweder zu früh und damit unnötig oder zu spät statt.

Predictive Maintenance (PdM) beschreibt im Gegensatz dazu eine Instandhaltungsstrategie, bei der die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen vor dem eigentlichen Fehlereintritt erfolgt. Dazu werden der Anlagenzustand inklusive der Umgebungsbedingungen erfasst, evaluiert und daraus Wahrscheinlichkeiten für zukünftige Fehler berechnet [4]. Die Grundvoraussetzung dafür ist, die technischen Anlagen mit adäquater Sensorik auszustatten und Algorithmen für die Diagnose und Prognose des Anlagenzustands zu entwickeln und einzusetzen. Die Einführung einer PdM-Strategie ist für Unternehmen folglich mit einer nicht zu unterschätzenden initialen Investition verbunden [5, 6]. Insofern ist PdM nicht für jede Anlagenklasse bzw. Anlage aus wirtschaftlichen und prozessualen Gesichtspunkten vorteilhaft. Eine Einzelfallprüfung ist daher unabdingbar.

Wissenschaftler haben sich bislang auf die Entwicklung von Verfahren, sogenannte PdM-Algorithmen, zur Bestimmung des Verschleißgrads einzelner Komponenten bzw. Anlagen und somit insgesamt auf die technischen Aspekte fokussiert. Weitgehend außer Acht gelassen wurde die grundsätzliche Frage, inwieweit der Entwicklungs-, Datenerhebungs- und Datenauswertungsaufwand durch Einsparungen infolge einer PdM-Strategie überhaupt refinanziert werden kann. Um diese Forschungslücke zu verkleinern, untersucht dieser Beitrag innerhalb einer multiplen explorativen Fallstudie am Flughafen München drei sich grundlegend voneinander unterscheidende Anlagenklassen – Aufzüge, Pre-Conditioned-Air (PCA)-Anlagen und Multienteiser – in Bezug auf Aufwands-, Nutzen- und Risikoaspekte des PdM. Diese drei Anlagenklassen stehen dabei stellvertretend für die an Flughäfen eingesetzten technischen Anlagen im Bereich der Gebäude (Aufzüge), der luftverkehrspezifischen Anlagen (PCA-Anlagen) und des Fuhrparks (Multienteiser).

Der Beitrag ist folgendermaßen aufgebaut: In Kapitel 2 werden die Grundlagen zur Instandhaltung im Allgemeinen und der Instandhaltungsart PdM im Speziellen beschrieben. Zudem werden der aktuelle Stand der Forschung und damit die Forschungslücke aufgezeigt. In Kapitel 3 wird auf grundsätzlich einsetzbare Bewertungsverfahren zur Ermittlung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit von PdM eingegangen und daraus das geeignetste ausgewählt. Kapitel 4 beschreibt das Forschungsdesign und Kapitel 5 die drei betrachteten Anlagenklassen sowie deren derzeitigen Instandhaltungsprozess. Kapitel 6 präsentiert die fallspezifischen und fallübergreifenden Ergebnisse der Untersuchung. Seinen Abschluss findet dieser Beitrag mit dem Nutzen für die Wissenschaft und die betriebliche Praxis, Limitationen und weiterem Forschungsbedarf in Kapitel 7.

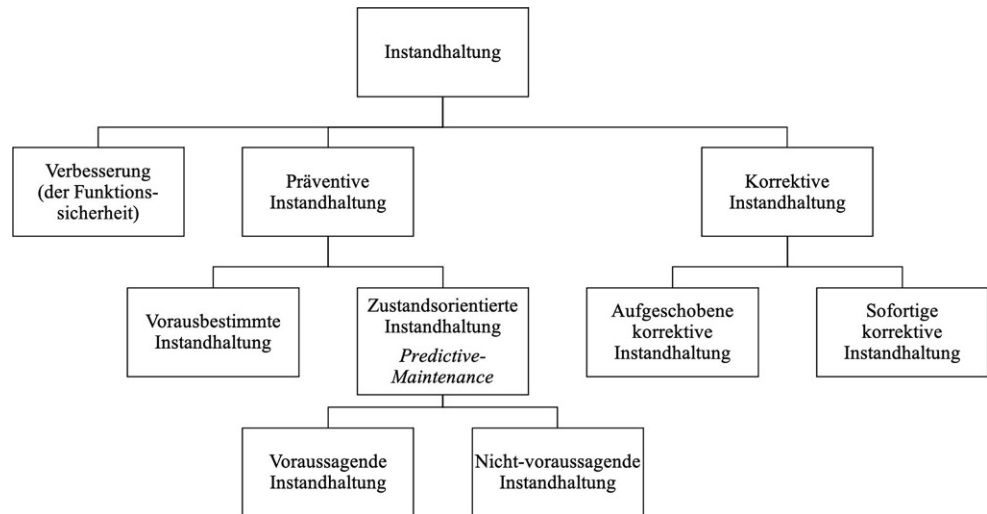
## Hintergrund und Stand der Forschung

Der Begriff Instandhaltung beschreibt nach DIN 13306 die „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 erforderliche Funktion erfüllen kann“ [7]. Es werden mehrere Instandhaltungsstrategien (Abb. 1) unterschieden, von denen in Unternehmen die korrektive und die vorausbestimmte Instandhaltung am weitesten verbreitet sind [8].

Bei der korrektiven Instandhaltung erfolgt die Instandhaltungsmaßnahme nach dem Auftreten eines Fehlers. Die Entscheidung zur Durchführung einer aktiven Instandhaltung wird somit durch den Fehler der Anlage selbst hervorgerufen [5, 7]. Die vorausbestimmte Instandhaltung wird dagegen in regelmäßigen Zeitabständen ausgeführt. Bei beiden Formen bietet ein höherer Digitalisierungsgrad zur Entscheidungsunterstützung keinerlei Vorteile. Dies steht im Gegensatz zur zustandsorientierten Instandhaltung, dem Predictive Maintenance (PdM), dessen Verbreitung durch die gestiegenen Möglichkeiten moderner Informations- und Kommunikationstechnik ausgelöst wurde [6, 8]. Ergänzend ist zu betonen, dass keine allgemein akzeptierte Definition für PdM in der Literatur existiert [8] und im englischen Sprachraum die Begriffe Condition-based Maintenance (CbM) und PdM entweder gleichgesetzt oder anhand der voraussagenden (PdM) und nichtvoraussagenden (CbM) Form unterschieden werden. Für den weiteren Verlauf dieses Beitrags wird die breitere Begriffsdefinition gewählt und die voraussagende und nichtvoraussagende zustandsorientierte Instandhaltung als Reifegrade des PdM interpretiert [6].

Basierend auf einer seitens der Autoren dieses Beitrags durchgeführten strukturierten Literaturrecherche wur-

Abb. 1 Instandhaltungsstrategien [7]



den die einzelnen Dimensionen von PdM (Konfiguration, Zustandsmonitoring, Datenakquise und -konvertierung, Diagnose und Prognose), die im praktischen Kontext implementiert werden müssen, ermittelt:

Innerhalb der **(1) Konfiguration** (Abb. 2) wird festgelegt, wie viele Anlagen und Komponenten die PdM-Strategie umfassen soll, in welchen zeitlichen Abständen Daten erhoben werden und welche Fehlerarten analysiert bzw. prognostiziert werden. Zudem werden die Art und die Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen konkretisiert und entschieden, nach welchen Kriterien die PdM-Strategie optimiert wird.

Das **(2) Zustandsmonitoring** dient der Erfassung des aktuellen Anlagenzustands und setzt sich aus zwei Phasen zusammen: (2a) Datenakquise und (2b) Datenkonvertierung. Erstere umfasst sämtliche Verfahren zur Erhebung von Event- und Zustandsdaten. Unter Eventdaten werden Informationen über vergangene Ereignisse verstanden. Sie geben Aufschluss darüber, was vorgefallen ist (Beispiel: Ausfall), was die Ursache war (Beispiel: Kurzschluss) und

welche Maßnahmen daraufhin ausgelöst wurden (Beispiel: Komponententausch) [9]. Zustandsdaten beschreiben den aktuellen Zustand einer Anlage. Diese werden für gewöhnlich durch verschiedenste Sensoren generiert, welche die Daten automatisch erfassen und dadurch eine kontinuierliche Beobachtung des Anlagenzustands ermöglichen [9]. Um anhand der erfassten Daten das Verschleißverhalten des untersuchten Objekts zu beschreiben, existieren verschiedene Datenkonvertierungsmodelle, welche die spätere Entscheidungsfindung zur Durchführung einer Instandhaltungsmaßnahme im PdM-Prozess maßgeblich beeinflussen [10] und daher den zentralen Teil einer PdM-Strategie bilden [11]. Im Wesentlichen kann zwischen stochastischen Modellen, wie dem Gamma- oder dem Markov-Prozess, und nichtstochastischen Modellen, wie einem Experten- oder einem regelbasierten System, unterschieden werden. Für detaillierte Informationen zu den einzelnen Modellen wird insbesondere auf [9, 12] und [13] verwiesen.

Nach der Datenkonvertierung können die **(3) Diagnose** und die **(4) Prognose** des Anlagenzustands erfolgen. Bei

Element	Mögliche Ausprägungen			
Anlagenanzahl	Einzelne Anlage		Multiple Anlagen	
Komponentenanzahl	Einzelkomponenten		Multiple Komponenten	
Art der Observierung	Keine	Imperfekt		Perfekt
Zeitperioden der Observierung	Diskret-periodisch	Diskret-unregelmäßig		Kontinuierlich
Betriebsstatus bei Observierung	In Betrieb		Außer Betrieb	
Fehlerart	Weiche Fehler		Harte Fehler	
Maschinenzustände	Zwei		Multiple	
Art der Instandhaltungsmaßnahme	Keine	Imperfekt		Perfekt
Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen	Endlich		Unendlich	
Optimierungskriterium	Kosten	Verfügbarkeit	Sicherheit	Durchsatz
				Kombination

Abb. 2 Aus der Literatur abgeleitete Konfigurationsmöglichkeiten des PdM (Predictive Maintenance)

ersterer werden historische Informationen [14] mit dem Ziel analysiert, den Fehlerursprung zu identifizieren [5, 9, 15] und ein Frühwarnsystem zu etablieren, das den Verantwortlichen Hinweise auf ein abnormales Verhalten der Anlage liefert. Der Fokus der Prognose liegt auf der Evaluation des zukünftigen Anlagenzustands und somit auf einer vorzeitigen Eventanalyse. Hierdurch verbleibt ein größerer Zeitraum für das Definieren und Planen von Instandhaltungsmaßnahmen [16].

Bisherige Veröffentlichungen zu PdM haben überwiegend eigene PdM-Algorithmen für eine bestimmte Anlagenklasse entwickelt und im Nachgang die monetäre Vorteilhaftigkeit anhand eines konstruierten bzw. realen Anwendungsfalls bewertet. Beispiele hierfür sind die Analyse von Eisenbahnschienen [17], Galliumarsenid-Laser [18], Helikoptergetrieben [19] und Generatoren [20]. Die jeweils ermittelten Einsparpotenziale weichen deutlich voneinander ab: Während etwa Sharma et al. [17] eine 10%ige Reduktion simulieren, können die Instandhaltungskosten in der Studie von Yildirim et al. [20] um 55 % gesenkt werden. Wie viel Aufwand in die Entwicklung und Datenerfassung für PdM gesteckt wurde und welcher Gesamtnutzen somit aus PdM resultiert, hat keine Studie adressiert.

Im Unterschied zu den existierenden Forschungsarbeiten verzichtet dieser Beitrag auf die Entwicklung eines PdM-Algorithmus. Denn im praktischen Kontext erfolgt eine Entscheidung für oder wider die Implementierung einer PdM-Strategie vor der eigentlichen Investition in Soft- und Hardware und somit ebenfalls vor der Entwicklung eines entsprechenden Algorithmus. Daher werden in diesem Beitrag quantitative und qualitative Aspekte, die aus der Einführung einer PdM-Strategie resultieren, untersucht. Daraus lässt sich ein umfassendes Bild über deren Vorteilhaftigkeit verschaffen. Durch die Anwendung derselben Bewertungssystematik über mehrere Anlagenklassen hinweg wird obendrein aufgezeigt, für welche der betrachteten Anlagenklassen die Einführung am ehesten geeignet ist, welche Faktoren dafür ausschlaggebend sind und somit für die Analyse weiterer Anlagen verwendet werden können.

## Verfahren zur Evaluation von PdM-Strategien

Für die Durchführung dieser Studie war es notwendig, vorab ein Bewertungsverfahren auszuwählen, das die Evaluation sowohl der qualitativen als auch der quantitativen Auswirkungen einer PdM-Strategie beinhaltet. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend generische sowie explizit Digitalisierungsbezug aufweisende Bewertungsverfahren auf ihre diesbezügliche Eignung hin analysiert.

## Generische Bewertungsverfahren

Mithilfe der Investitionsrechnung lassen sich die finanziellen Auswirkungen von Investitionsvorhaben ermitteln. Grundsätzlich wird unterschieden, ob ein repräsentatives Durchschnittsjahr (statisch) oder mehrere Perioden (dynamisch) einbezogen werden. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, ob ausschließlich quantitative Aspekte (eindimensional) oder zusätzlich qualitative Faktoren (mehrdimensional) betrachtet werden [21]. Da die Einführung einer PdM-Strategie mit einer Investition, insbesondere in Software und Sensorik, verbunden ist, lassen sich die traditionellen Verfahren der Investitionsrechnung grundsätzlich anwenden. Allerdings ist die Anwendung einer einzigen generischen Methode für die umfassende Evaluation im PdM-Kontext nicht ausreichend [6]. Dies liegt zum einen daran, dass die eindimensionalen Methoden eine ausschließlich quantitative Bewertung vornehmen und wichtige qualitative Aspekte, wie beispielsweise die Anlagenverfügbarkeit außen, vorlassen. Zum anderen haben die meisten mehrdimensionalen Verfahren gemeinsam, dass unterschiedliche Investitionsalternativen miteinander verglichen werden, die bei der Evaluation von PdM nicht zwangsläufig vorliegen. Vielmehr geht es um den Vergleich des Ist-Zustands mit einem möglichen PdM-Prozess, um eine Aussage über die Vorteilhaftigkeit von PdM treffen zu können.

## Bewertungsverfahren mit Digitalisierungsbezug

In Anbetracht der lediglich rudimentären Eignung der generischen Bewertungsverfahren für PdM wurde eine systematische Literaturrecherche [22] nach Bewertungsmodellen mit expliziten Digitalisierungsbezug durchgeführt. Hierbei wurden mittels nachfolgender Suchwörter die führenden Literaturdatenbanken EBSCO Host, Google Scholar, Science Direct und Scopus durchsucht: (*digitization OR digital innovation OR digital transformation*) AND (*evaluation OR assessment*) AND (*method OR model*) AND (*process OR economic*). Anhand des Titels, der Zusammenfassung und der Schlüsselwörter wurden (nach erfolgter Vorwärts- und Rückwärtssuche) insgesamt 16 Publikationen mit 15 verschiedenen Bewertungsmodellen (zwei Publikationen betrachten das gleiche Bewertungsmodell) herausgefiltert, die zusammen mit dem einzigen, speziell für PdM entwickelten Verfahrensmodell von Tauterat [6] analysiert wurden. Als relevant wurden Publikationen eingestuft, die eine eigene Bewertungssystematik für die digitale Branche vorschlagen.

Da dieser Beitrag verschiedene technische Anlagen auf Basis der Instandhaltungsprozesse miteinander vergleicht, stellen Geschäftsprozesse das Bewertungsobjekt des Verfahrens dar. Daher wurden diejenigen Methoden ausge-

**Tab. 1** Gegenüberstellung der Bewertungsverfahren der Geschäftsprozessebene für Predictive Maintenance (PdM)

Name	DREAMY [24, 25]	Technology Map [26]	PriMa-X [23]	PdM-Verfahrensmodell [6]
Vorgehen	Beantwortung eines Fragenkatalogs	Angabe von Anwendungsszenario, Produktlebenszyklusphase und Mitarbeiterziele	Iterative Analyse der Bestandteile einer Prescriptive-Maintenance-Strategie	Bewertung von Aufwands-, Nutzen- und Risikoaspekten des PdM
Ziel	Entwicklung einer Roadmap zur digitalen Transformation	Ermittlung relevanter Technologien für ein unternehmensspezifisches Problem	Konfiguration des Prescriptive-Maintenance-Prozesses	Qualitative und quantitative Bewertung einer PdM-Strategie
<i>Anforderungen/Bewertung</i>				
Bewertungsobjekt	Geschäftsprozess	Anwendungsszenario	Instandhaltungsprozess	Instandhaltungsprozess
Bewertungsvariation möglich?	Ja	Ja (bezogen auf die vorgeschlagenen Lösungen) Nein (bezogen auf Variationen innerhalb der Lösungen)	Ja	Ja
Art der Bewertung	Qualitativ	Qualitativ	Qualitativ	Qualitativ und quantitativ

geschlossen, die anstelle der Geschäftsprozesse die Geschäftsstrategie (4), die Geschäftsmodelle (3), die Geschäftsfähigkeiten (1), die Organisation (1), das Management (1) bzw. zugrunde liegende Daten (1) und Informationen (1) eines Unternehmens bewerten.

Somit verbleiben vier der insgesamt 16 ursprünglich identifizierten Verfahren für die Durchführung der Bewertung von Instandhaltungsprozessen. Tab. 1 stellt die vier Verfahren der Geschäftsprozessebene überblicksmäßig gegenüber:

Damit das Bewertungsmodell für die Zielstellung dieses Beitrags verwendet werden kann, müssen aus Sicht der Autoren die folgenden drei Anforderungen (A) erfüllt sein:

1. A1 Die Effekte aus der Einführung von PdM, insbesondere auf den Instandhaltungsprozess, müssen das Bewertungsobjekt des Verfahrens bilden.
2. A2 Mit dem Bewertungsverfahren muss es möglich sein, die einzelnen Anlagenklassen unterschiedlich zu bewerten, um aus dem Vergleich der Einzelbewertungen die Anlage mit dem höchsten wirtschaftlichen Potenzial ermitteln zu können.
3. A3 Neben dem wirtschaftlichen Potenzial (quantitative Bewertung) müssen für ein umfassendes Bild auch qualitative Aspekte berücksichtigt werden können.

Die Technology Map [26] schlägt zu einem gegebenen Problem mögliche Lösungen – beispielsweise PdM – vor und bietet somit eine Vorselektion geeigneter Instandhaltungsprozesse. Da jedoch keine Detaillierung, sondern lediglich eine allgemeine qualitative Bewertung stattfindet, eignet sich dieses Verfahren nicht für die (quantitative) Bewertung des Potenzials unterschiedlicher Prozesse (A2 und A3).

Auch beim Bewertungsverfahren DREAMY [24, 25] kann nur ein Hinweis über die mögliche Eignung abgegeben werden, indem der aktuelle Instandhaltungsprozess anhand eines Fragenkatalogs in ein qualitatives Reifegradmodell eingeordnet wird. Eine quantitative Untersuchung findet nicht statt (A3).

Ziel des Modells von Nemeth et al. [23] ist nicht die Auswahl einer Anlage, sondern die Konfiguration des Prescriptive Maintenance – eine Instandhaltungsstrategie, bei der Events (Beispiele: Ausfall oder Instandhaltung einer Anlage) gezielt ausgelöst werden – für ein definiertes technisches Objekt. Es lässt sich daher ebenfalls nicht für die Bewertung von unterschiedlichen Instandhaltungsprozessen einsetzen (A1, A2 und A3).

Das Verfahren von Tauterat [6] kombiniert zwei generische Bewertungsmodelle: (1) die Kostenvergleichsrechnung für die Betrachtung von Aufwandsaspekten und (2) die Prioritätenanalyse für die Evaluierung von Nutzen- und Risikofaktoren. Für den Vergleich des Ist-Prozesses mit einem möglichen PdM-Prozess wird ersterer zunächst in ein Reifegradmodell eingeordnet (Abb. 3).

Für die Aufwands-, Nutzen- und Risikobewertung stellt Tauterat [6] eine Sammlung von Nutzen- sowie Risikogruppen und -aspekten zur Verfügung. Sie kann gefiltert und um weitere ergänzt werden. Die eigentliche Bewertung beinhaltet eine Zuordnung der Aspekte zur jeweiligen Reifegradstufe (ab welcher der Aspekt eintritt) und erfolgt innerhalb von Workshops oder Interviews mit Experten. Für die Aufwandsbewertung werden außerdem drei Szenarien (bester, mittlerer und schlechtester Fall) erstellt. Nachdem das Verfahren von Tauterat [6] als einziges alle drei Anforderungen erfüllt, wird es für die vorliegende Studie verwendet.



Predictive Maintenance Prozessschritte	Softwareintensivierungsgrad der Instandhaltung in Bezug auf Predictive Maintenance					
	Grad 0	Grad 1	Grad 2	Grad 3	Grad 4	Grad 5
<b>Lokale Zustandserfassung und -speicherung</b>		✓	✓	✓	✓	✓
Maschine besitzt notwendige Hardware (z.B. Sensoren, etc.)						
Zustandsdaten erfassen						
Zustandsdaten anzeigen						
Zustandsdaten speichern						
<b>Zentrale Zustandsspeicherung</b>			✓	✓	✓	✓
Mit Netzwerk (Intranet/Internet) verbunden						
Zustandsdaten übermitteln						
Zustandsdaten im Zeitverlauf zentral in interner oder externer Cloud vorhalten						
<b>Analyse der Zustandsdaten</b>				✓	✓	✓
Zentrale Datenanalysesoftware in interner oder externer Cloud vorhalten						
Strukturierung und Auswertung der Daten zur Zustandsvorhersage						
Analyse der Daten zur Zustandsvorhersage						
<b>Vorhersage der Ausfallwahrscheinlichkeit</b>					✓	✓
Verknüpfung der Daten zur Zustandsvorhersage						
Prognose der Ausfallwahrscheinlichkeit basierend auf den Zustandsdaten						
<b>Unterstützung der aktiven Instandhaltungsmaßnahme</b>						✓
Ableitung von Handlungsempfehlungen						
Planung der Instandhaltung						
Koordination der Instandhaltung						

Abb. 3 PdM(Predictive Maintenance)-Reifegradmodell [6]

## Forschungsdesign

Für diesen Beitrag wurde eine explorative multiple Fallstudie [27] am Flughafen München durchgeführt. Fallstudien eignen sich, um innerhalb von Gebieten mit bisher wenig durchgeführten Studien zu forschen und damit die Art und Komplexität der stattfindenden Prozesse zu verstehen sowie vom aktuellen State of the Art zu lernen und ausgehend von der Praxis Hypothesen und Theorien zu generieren [28]. Diese Kriterien treffen allesamt auf das Ziel dieses Beitrags zu: Die fallspezifische und fallübergreifende Untersuchung von Anlagenklassen in Bezug auf Aufwands-, Nutzen- und Risikoaspekte des PdM.

Der Betrieb des gemessen an den Passagierzahlen zweitgrößten Verkehrsflughafen Deutschlands wird von der Flughafen München GmbH (FMG) mit ihren 15 Tochtergesellschaften übernommen, die in Summe als sogenannter Full Service Operator agieren und einen Großteil der Leistungen in nahezu allen Bereichen des Flughafenmanagements selbst erbringen. Der Technikbereich der FMG ist für den Betrieb aller technischen Anlagen verantwortlich. Diese lassen sich in vier Gruppen unterteilen: (1) Fahrzeuge, (2) Gebäude, (3) Luftverkehrsflächen und -anlagen sowie (4) Anlagen der Energie-, Wasser- und Abfallwirtschaft. Aufgrund der Vielzahl und Varietät sicherheitsrelevanter, technischer Anlagen ist der Flughafen München als Forschungsobjekt für diese Studie bestens geeignet.

Um die verschiedenen Anlagentypen eines Flughafens zu repräsentieren, wurde aus den drei technischen Bereichen am Flughafen München, die PdM bislang nicht einsetzen (Fahrzeugmanagement, Luftverkehrsflächen und -anlagen und Gebäudemanagement), jeweils eine Anlage ausgewählt. Die Auswahl der Anlagen erfolgte anhand einer Kombination aus intensitäts- und kriterienbasiertem Sampling [29]. Ersteres zielt darauf ab, Fälle auszuwählen, die voraussichtlich einen hohen Informationsgehalt liefern. Das kriterienbasierte Sampling bezieht sich darauf, dass An-

lagen in Eigen- und Fremdinstandhaltung mit direkt und nicht/indirekt observierbaren Stillstandskosten, von denen mehrere gleiche installiert sind, untersucht werden sollen. Die Wahl fiel schließlich auf die folgenden drei Anlagen: Multiteiseiser, PCA-Anlagen und Aufzüge.

Zur Sammlung von Daten, die den Ist-Prozess und die Auswirkungen einer PdM-Strategie beschreiben und somit für die Potenzialbewertung verwendet werden können, dienten in Anlehnung an [6] leitfadengestützte Workshops, in denen neben den Wortbeiträgen der Teilnehmer auch Dokumente, wie Prozessmodelle und Kostenaufstellungen, betrachtet wurden. Um eine größtmögliche Variation an Perspektiven zu erreichen, wurden der Anlagenverantwortliche, ein Mitarbeiter mit hohem Instandhaltungsbezug und der zuständige Controller zum jeweiligen Workshop eingeladen. Die drei Workshops fanden im Juni und Juli 2019 statt und dauerten je Anlage zwischen 5,5 und 6,5h. Hierbei wurden die vier Themenfelder Prozessbewertung und -einordnung sowie die Bewertung der Aufwands-, Nutzen- und Risikoaspekte [6] behandelt. Die Bestimmung der Bewertungsausprägungen erfolgte innerhalb einer Gruppendiskussion.

Während der Workshops wurden handschriftliche Notizen angefertigt, aus denen im Anschluss ein inhaltlich strukturiertes Protokoll [6] erstellt und den Teilnehmern mit der Bewertung der einzelnen Aspekte zur Validierung [29] zugesandt wurde. Änderungswünsche seitens der Teilnehmer wurden im Nachgang nicht eingebracht. Bei der Analyse der Bewertungsergebnisse dienten die Protokolle insbesondere zur Interpretation der Bewertungsausprägungen. Alle Informationen und Einschätzungen in Bezug auf die jeweilige Anlage basieren somit, wenn nicht anders gekennzeichnet, auf den jeweiligen Workshops. Die Datenauswertung erfolgte auf zwei Arten: Einerseits wurde jede technische Anlage isoliert, mit dem Ziel der Beschreibung und Untersuchung des konkreten Falls, betrachtet. Andererseits fand

im Sinne einer fallübergreifenden Analyse eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der drei Anlagen statt [29].

## Beschreibung der Anlagenklassen und der gegenwärtigen Instandhaltungsprozesse

### Multienteiser

Der Flughafen München verfügt über fünf Multienteiser, die je nach Härte des Winters zwischen 50 und 400 Betriebsstunden in einer Winterdienstsaison vom 15.10.–30.04. leisten und für die Enteisung der Vorfeldflächen eingesetzt werden. Aufgrund ihrer saisonalen Nutzung werden sämtliche vorausbestimmten Instandhaltungstätigkeiten (Wartung und Unfallverhütungsvorschriften) durch eine flughafeneigene Fahrzeugwerkstatt in den Monaten Mai–September umgesetzt.

Bei der Durchführung der vorausbestimmten Instandhaltung wird neben den vom Hersteller empfohlenen Tätigkeiten eine optische Sichtkontrolle vorgenommen. Diese dient dem frühzeitigen Erkennen und dem Austausch von Komponenten, die innerhalb der bevorstehenden Winterdienstsaison ausfallen könnten bzw. mit hoher Wahrscheinlichkeit ersetzt werden müssten. Während des Winters erforderliche Instandsetzungstätigkeiten resultieren überwiegend aus Schadensvorfällen.

### Pre-Conditioned-Air(PCA)-Anlagen

Um Flugzeuge auf der Parkposition mit vorklimatisierter Frischluft zu versorgen, setzt der Münchner Flughafen Pre-Conditioned-Air(PCA)-Anlagen ein. Die PCA-Anlagen sind im Vergleich zu den eigentlich für die Klimatisierung am Flugzeug vorgesehenen Hilfsturbinen (Auxiliary Power Unit) im Betrieb deutlich leiser, senken den Kerosinverbrauch und den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Derzeit sind zwölf dieser Anlagen am Terminal 1 installiert.

Die vorausbestimmte Instandhaltung besteht aus einer monatlichen Inspektion, einer halbjährlichen Hygiene- sowie einer jährlichen umfänglichen Wartung. Eine Herausforderung besteht darin, dass sich die Nutzungsintensität der einzelnen PCA-Anlagen deutlich unterscheidet, da der jeweilige Pilot selbst über die Verwendung entscheidet. Demzufolge ist der Zeitpunkt der vorausbestimmten Wartung bzw. Inspektion bei viel genutzten Anlagen tendenziell verspätet und bei selten genutzten Anlagen verfrüht. Die Störbeseitigung und Instandsetzung erfolgen nach dem Auftreten von Fehlern oder dem Ausfall von Komponenten (korrektive Instandhaltung).

## Aufzugsanlagen

Am Flughafen München sind rund 300 Aufzüge in Betrieb. Im Gegensatz zu den beiden anderen Anlagenklassen befinden sich häufig mehrere Aufzüge in unmittelbarer Nachbarschaft. Dies liegt zum einen daran, dass die Aufzüge gegenseitig als Rückfallstufe dienen. Zum anderen sind mancherorts mehrere Anlagen zur Bewältigung der Spitzenlast nötig.

Die Aufzüge werden durch beauftragte Dienstleister bzw. die Hersteller instand gehalten. Die Vergütung erfolgt im Rahmen eines Dienstvertrags anhand einer jährlichen Pauschale je Aufzug. Der Vertragspartner ist dabei für die Durchführung aller Instandhaltungstätigkeiten – mit Ausnahme von Vandalismusvorfällen – verantwortlich. Die Instandhaltung geschieht demnach nach den Prinzipien der vorausbestimmten und korrektiven Ausprägung.

## Wirtschaftliche Evaluation der drei Anlagen

Anhand des Verfahrensmodells von Tauterat [6] wird in diesem Kapitel nacheinander auf die Aufwands-, Nutzen- und Risikoaspekte eingegangen, die aus der PdM-Einführung für die drei Anlagenklassen resultieren. Die darauffolgende Gesamteinschätzung fasst die wesentlichen Punkte der einzelnen Aspekte anlagenvergleichend zusammen.

### Aufwandsanalyse

#### Kosteneinsparung durch PdM

Da die korrektive Instandhaltung der Multienteiser nahezu ausschließlich aus Fremdeinwirkungen resultiert und die vorausbestimmte Instandhaltung bereits erfahrungsbasiert optimiert durchgeführt wird, ist keine Auswirkung von PdM auf die Instandhaltungskosten zu erwarten.

Anders verhält es sich bei den Aufzugs- und PCA-Anlagen. In Tab. 2 sind die erwarteten Auswirkungen (+: Zusatzkosten; -: Kosteneinsparung) einer PdM-Einführung – unterschieden nach drei Szenarien (schlechtester, mittlerer und bester Fall) – aufgeführt:

Für die meisten Instandhaltungstätigkeiten zeigt sich eine deutlich höhere erwartete Einsparung bei den Aufzugsanlagen als bei den PCA-Anlagen. Lediglich bei der Instandsetzung wird von einer größeren relativen Einsparung bei den PCA-Anlagen ausgegangen. Die Ergebnisse hinsichtlich der Kosteneinsparungen lassen sich wie folgt begründen: Zum einen erfolgt die Instandhaltung der Aufzüge durch eine Fremdfirma über Pauschalen und nicht, wie bei den PCA-Anlagen, durch eigene Mitarbeiter. Um das Verlustrisiko aufseiten der Instandhaltungsfirma zu verringern, ist in der Kalkulation ein Zuschlag enthalten. Zum anderen

**Tab. 2** Kosteneinsparung durch Predictive Maintenance bei PCA(Pre Conditioned Air)-Anlagen und Aufzügen

Instandhaltungstätigkeiten	Status quo		Schlechtester Fall		Mittlerer Fall		Bester Fall	
	Aufzüge in %	PCA in %	Aufzüge in %	PCA in %	Aufzüge in %	PCA in %	Aufzüge in %	PCA in %
Inspektion	10,0	15,0	0,0	6,7	-25,0	0,0	-50,0	-10,0
Wartung	40,0	40,0	-10,0	5,0	-33,3	-5,0	-50,0	-15,0
Störbeseitigung	20,0	20,0	-10,0	0,0	-42,5	0,0	-75,0	0,0
Instandsetzung	30,0	25,0	0,0	0,0	0,0	-10,0	-16,7	-20,0
<i>Summe</i>	<i>100,0</i>	<i>100,0</i>	<i>94,0</i>	<i>103,0</i>	<i>75,7</i>	<i>95,5</i>	<i>55,0</i>	<i>87,5</i>

ist an einem Aufzug bereits ein PdM-Prototyp installiert. Da somit bereits Erfahrungen mit PdM bei Aufzügen gesammelt werden konnten, ist davon auszugehen, dass das tiefere Verständnis der Thematik zu höheren Prognosen in Bezug auf das wirtschaftliche Potenzial führt.

**Kosten des PdM-Systems**

Die in Abb. 4 dargestellte Kostenschätzung (absolut und relativ im Vergleich zu den jährlichen Instandhaltungskosten) basiert für die Aufzugsanlagen auf einer Hochrechnung eines vorliegenden Angebots zur Prototypeninstallation. Da für Multiteisier und PCA-Anlagen nach Kenntnis der Autoren kein PdM-System auf dem Markt verfügbar ist, wurde hierfür eine eigene Kostenschätzung angestellt, die auf den Einsichten der Workshops und Erfahrungen aus einem PdM-Projekt am Flughafen München basiert. Folglich weist die Kostenprognose für Multiteisier und PCA-Anlagen eine höhere Unsicherheit auf.

Aus der Gegenüberstellung der Kostenprognosen geht hervor, dass die Installation von PdM bei einer Vielzahl von Anlagen mit einer hohen initialen Investition in Hardware einhergeht. Während für die Aufzugsanlagen die einmaligen Aufwendungen vordergründig den Erwerb und die Installation der Hardwarekomponenten umfassen, machen bei den PCA-Anlagen und den Multiteisern die Softwareentwicklungskosten den Hauptanteil aus. Nachdem am Markt derzeit keine Standardlösung für PdM bei Multiteisern und PCA-Anlagen verfügbar ist, muss hierfür eigens ein spezifischer PdM-Algorithmus entwickelt werden.

**Nutzenanalyse**

**Relevanzhäufigkeit**

Wie aus Tab. 3 hervorgeht, steht bei der Einführung von PdM bei allen drei Anlagen die Erhöhung der Verfügbarkeit und die Optimierung des Personaleinsatzes im Vordergrund.

Als zentrales Ergebnis lässt sich festhalten: Alle Nutzengruppen wurden mindestens bei einer Anlage als relevant eingestuft. Dass elf der insgesamt 17 Nutzengruppen lediglich bei einer der drei Anlagen von Bedeutung sind, kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die Ziele von PdM stark von den Besonderheiten einer Anlagenklasse und dem jeweiligen Kontext abhängen. Beispielsweise ist die verbesserte Steuerung des Fremddienstleisters nur für die Aufzugsanlagen relevant, da diese Gegenstand eines Vollinstandhaltungsvertrags sind und somit nicht von der FMG selbst instand gehalten werden. Ähnliches gilt für „Redundantes und/oder Reservegerät optimieren“. Denn nur bei den Aufzugsanlagen sind für gewöhnlich mindestens zwei redundante Anlagen installiert.

**Reifegradeinordnung**

Aus der Gegenüberstellung der Reifegradeinordnungen der Nutzenaspekte aller drei Anlagen (Tab. 4), ab welchem Reifegrad der Nutzen eintritt, wird sichtbar, dass die Mehrzahl an Nutzenaspekten (21 von 36) mit der Implementierung eines PdM-Systems der dritten Stufe (Zustandsdatenanalyse) realisiert wird. Dass dies nicht der Einordnung einer spezifischen Anlage geschuldet ist, zeigt sich darin, dass für jede der drei untersuchten Anlagen bei der dritten Stufe die meisten Nutzenaspekte ausgelöst werden.

Außerdem wird deutlich, dass ausschließlich bei den Multiteisern die lokale und bei den PCA-Anlagen die

Kosten PdM	Anzahl der Anlagen	Multiteisier		PCA Anlagen		Aufzüge	
		5	366 %	12	52 %	300	43 %
Installation, Schulung & Entwicklung (einmalig)		271.000 €		160.500 €		247.905 €	
Hardware (einmalig)		12.500 €	17 %	30.000 €	10 %	504.000 €	88 %
Software (laufend)		2.000 €	3 %	2.000 €	1 %	50.400 €	9 %

**Abb. 4** Vergleich der Kosten aus der Predictive-Maintenance-Einführung. PCA Pre Conditioned Air



**Tab. 3** Relevanzhäufigkeit der Nutzengruppen bei der Predictive-Maintenance-Einführung

Bei keiner Anlage relevant	Bei einer von drei Anlagen relevant	Bei zwei von drei Anlagen relevant	Bei allen Anlagen relevant
–	Produktqualität (P)	Kosteneinsparung (A, P)	Anlagen-, Maschinen- und Bauteilverfügbarkeit (A, M, P)
	Umsatzerhöhung (P)	Prozess- und Produktionsqualität (M, P)	Personaleinsatz (A, M, P)
	Allgemein (P)	Planungssicherheit (A, P)	
	Nachhaltigkeit (APU-Nutzung nicht notwendig) (P)	Stillstandszeiten optimieren (A, P)	
	Sicherheit (M)		
	Steuerung des Fremddienstleisters (A)		
	Transparenz (A)		
	Kunden (A)		
	Ersatzteilplanung verbessern (A)		
	Zusätzliche Services (A)		
	Redundantes und/oder Reservegerät optimieren (A)		

A Aufzüge, APU Auxiliary Power Unit, M Multienteiser, P Pre-Conditioned-Air-Anlagen

**Tab. 4** Vergleich der Reifegradeinordnung der Nutzenaspekte

Reifegrad	Nutzenaspekte	Multienteiser		Pre-Conditioned-Air-Anlagen		Aufzüge		Summe	
		Einzelbetrachtung	Kumuliert	Einzelbetrachtung	Kumuliert	Einzelbetrachtung	Kumuliert	Einzelbetrachtung	Kumuliert
1	Lokale Zustandserfassung und -speicherung	1	1	0	0	0	0	1	1
2	Zentrale Zustandsspeicherung	0	1	7	7	0	0	7	8
3	Analyse der Zustandsdaten	3	4	7	14	11	11	21	29
4	Vorhersage der Ausfallwahrscheinlichkeit	0	4	2	16	1	12	3	32
5	Unterstützung der aktiven Instandhaltungsmaßnahme	1	5	0	16	3	15	4	36

zentrale Zustandsspeicherung zusätzlichen Nutzen generiert. Zurückzuführen lässt sich dieser Umstand bei den PCA-Anlagen darauf, dass durch die zentrale Transparenz über aktuelle Zustandsdaten manuelle Prüfungen vor Ort reduziert werden können. Da bei den Multienteisern aktuell keine Zustandsdaten vorliegen, führt schon die lokale Erfassung zur Generierung von Erfahrungswissen, das für zukünftige Instandhaltungen verwendet werden kann.

### Risikoanalyse

#### Relevanzhäufigkeit

Bei der Betrachtung der als relevant identifizierten Risikogruppen (Tab. 5) wird der Vorteil der Eigentümerschaft an den Anlagen deutlich: Bei keiner der drei untersuchten

Anlagen wird die Datenbereitstellung für PdM als Risiko eingestuft.

Hingegen stellen die Kosten für alle drei Anlagenklassen ein relevantes Risiko dar. Dies bezieht sich sowohl auf die Kostenprognose des PdM, also die Kosten, die aus der Einführung von PdM resultieren, als auch auf die erwartete Kosteneinsparung durch die geänderte Instandhaltungsstrategie. Als weiteres für alle drei Anlagen zutreffendes Risiko gilt die Daten- und Voraussagequalität. Insbesondere wenn die Vorhersagen des PdM automatisiert Entscheidungen auslösen, wie etwa die Terminierung einer Instandhaltungsmaßnahme oder die Bestellung eines Ersatzteils, müssen die zugrunde liegenden Daten sowie das Vorhersagemodell eine hohe Qualität aufweisen.

Die Risiken des PdM-Systems (erhöhte Störanfälligkeit, nicht beherrschbare Komplexität und zu große Datenmen-

**Tab. 5** Relevanzhäufigkeit der Risikogruppen bei der PdM(Predictive Maintenance)-Einführung

Bei keiner Anlage relevant	Bei einer von drei Anlagen relevant	Bei zwei von drei Anlagen relevant	Bei allen drei Anlagen relevant
Datenbereitstellung	Risiko für das Unternehmen (M)	Datensicherheit (A, P) Risiken des PdM-Systems (M, P) Faktor Mensch (A, M)	Daten- und Voraussagequalität (A, M, P) Kosten (A, M, P)

A Aufzüge, M Multienteiser, P Pre-Conditioned-Air-Anlagen

**Tab. 6** Vergleich der Reifegradeinordnung der Risikoaspekte

Reifegrad	Risikoaspekte	Multienteiser		Pre-Conditioned-Air-Anlagen		Aufzüge		Summe	
		Einzelbe-trachtung	Kumuliert	Einzelbe-trachtung	Kumuliert	Einzelbe-trachtung	Kumuliert	Einzelbe-trachtung	Kumu-liert
1	Lokale Zustandserfassung und -speicherung	3	3	2	2	0	0	5	5
2	Zentrale Zustands-speicherung	1	4	1	3	1	1	3	8
3	Analyse der Zustands-daten	4	8	2	5	2	3	8	16
4	Vorhersage der Aus-fallwahrscheinlichkeit	1	9	1	6	1	4	3	19
5	Unterstützung der aktiven Instandhal-tungsmaßnahme	1	10	1	7	2	6	4	23

gen) werden nur bei den Multienteisern und den PCA-Anlagen als Risiko eingestuft. Die Vermutung liegt nahe, dass der installierte Prototyp bei den Aufzugsanlagen zeigt, dass große Datenmengen zielgerichtet verarbeitet und komplexe Sachverhalte dargestellt werden können sowie keine erhöhte Fehleranfälligkeit aus einer Installation entsteht.

### Reifegradeinordnung

Ähnlich der Einordnung der Nutzenaspekte werden relativ gesehen auch die meisten Risiken (8 von 23) durch die Analyse der Zustandsdaten ausgelöst (Tab. 6). Der Anteil ist mit 35 % jedoch deutlich geringer (Nutzenaspekte: 58 %).

Weitere fünf Risiken treten bei den Multienteisern (fehlende Akzeptanz der Mitarbeiter; Vertrauen in die Daten und Software; erhöhte Fehler- und Störanfälligkeit durch zusätzliche Sensoren) und PCA-Anlagen (Datenqualität; erhöhte Fehler- und Störanfälligkeit durch zusätzliche Sensoren) bereits mit der lokalen Zustandserfassung auf. Hier ergibt sich ein großer Unterschied zu den Nutzenaspekten, bei denen lediglich ein Aspekt ab der ersten Reifegradstufe relevant ist.

### Fallübergreifende Analyse

Für die abschließende Ermittlung der Anlage mit dem höchsten Potenzial aus wirtschaftlicher und prozessualer

Sicht werden in Abb. 5 alle betrachteten Themenfelder gegenübergestellt:

Die ermittelte, abgeschätzte Amortisationsdauer

$$\left( \frac{\text{Einmalige Kosten}}{\text{Erwartete Kosteneinsparung} - \text{Laufende Kosten}} \right)$$

stellt für die Aufzugsanlagen mit 8,16 Jahren den kürzesten Zeitraum dar. Für die Multienteiser ist aufgrund der erwarteten Kosteneinsparung von 0 % keine Amortisation zu erwarten. Als einzige der drei untersuchten Anlagen entstehen bei der Nichtverfügbarkeit von PCA-Anlagen direkte „Stillstandskosten“, da die Anlage nicht zur Verrechnung an die Nutzer zur Verfügung steht. Da die erwartete relative Einsparung der Instandhaltungskosten niedriger als die der Aufzugsanlagen ist, ergibt sich für die PCA-Anlagen mit 11,57 Jahren eine höhere Amortisationsdauer. Das Verhältnis von relevanten Nutzen- zu Risikoaspekten weist mit 16/7 (PCA-Anlagen) und 15/6 (Aufzüge) einen vergleichbaren Wert auf. Für die Multienteiser entsteht mit 5/10 ein Übergewicht der Risikoaspekte.

Die Aufzugsanlagen haben somit das im Vergleich größte wirtschaftliche Potenzial (höchste relative und absolute Einsparung). Außerdem ist das Verhältnis von Nutzen- zu Risikoaspekten am größten. Aufgrund der Vielzahl an Aufzügen ist die Einführung jedoch ebenfalls mit den höchsten initialen und laufenden Kosten verbunden.

		Multienteiser		PCA Anlagen		Aufzüge	
<b>Aktuelle Instandhaltungskosten</b>	In Summe	74.000 €		310.000 €		570.000 €	
	Anzahl der Anlagen	5		12		300	
	Je Anlage	14.800 €		25.833 €		1.900 €	
<b>Einsparung durch PdM (absolut/relativ)</b>	Schlechtester Fall (Instandhaltung)	0 €	0,0 %	9.300 €	3,0 %	-34.200 €	-6,0 %
	Mittlerer Fall (Instandhaltung)	0 €	0,0 %	-13.950 €	-4,5 %	-136.800 €	-24,0 %
	Bester Fall (Instandhaltung)	0 €	0,0 %	-38.750 €	-12,5 %	-256.500 €	-45,0 %
	Stillstandskosten	0 €	0,0 %	-2.000 €	-0,6 %	0 €	0,0 %
<b>Kosten PdM</b>	Installation, Schulung & Entwicklung (einmalig)	271.000 €	366,2 %	160.500 €	51,8 %	247.905 €	43,5 %
	Hardware (einmalig)	12.500 €	16,9 %	30.000 €	9,7 %	504.000 €	88,4 %
	Software (laufend)	2.000 €	2,7 %	2.000 €	0,6 %	50.400 €	8,8 %
<b>Amortisation</b>	Jährliche erwartete Einsparung	0,0 %		-5,3 %		-25,0 %	
	Amortisationsdauer (in Jahren)	-		11,57		8,16	
<b>Nutzen</b>	Anzahl relevanter Nutzengruppen	4		10		11	
	Am höchsten priorisierte Nutzengruppe	Sicherheit		Nachhaltigkeit (APU Nutzung nicht notwendig)		Planungssicherheit	
	Anzahl relevanter Nutzenaspekte	5		16		15	
	Am höchsten priorisierter Nutzenaspekt	Gefühlte Sicherheit (Instandhalter und System hat alles im Blick)		Leistungsverrechnung		Erhöhung der Maschinen- und Anlagenverfügbarkeit	
<b>Risiko</b>	Anzahl relevanter Risikogruppen	4		4		4	
	Am höchsten priorisierte Risikogruppe(n)	Risiko für das Unternehmen		Daten- und Voraussagequalität		Kosten & Faktor Mensch	
	Anzahl relevanter Risikoaspekte	10		7		6	
	Am höchsten priorisierter Risikoaspekt	Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Vorhersagen		Erhöhte Fehler- bzw. Störanfälligkeit von Maschinen durch bspw. zusätzliche Sensoren		Einsparung bei FMG durch PdM tritt nicht in erwarteter Höhe ein	

**Abb. 5** Fallübergreifende Analyse von PdM (Predictive Maintenance). *APU* Auxiliary Power Unit, *FMG* Flughafen München GmbH, *PCA* Pre Conditioned Air

### Schlussbetrachtung

Von den drei untersuchten Anlagen am Flughafen München – Multienteiser, PCA-Anlagen und Aufzüge – weisen Aufzüge das höchste wirtschaftliche und qualitative Potenzial für die Einführung von PdM auf. Während PdM auch bei den PCA-Anlagen insbesondere aus qualitativer Sicht sinnvoll wäre, ist es für die Multienteiser gegenüber der traditionellen, erfahrungsbasiert optimierten Instandhaltung nicht von Vorteil.

Übergreifend zeigen die Ergebnisse der Studie, dass die Sinnhaftigkeit der Einführung einer PdM-Strategie durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird, deren Ausprägung zwischen Anlagenklassen enorm variieren. Die Vorteilhaftigkeit sollte daher im Vorfeld der Einführung, vorzugsweise mithilfe des Verfahrens von Tauterat [6], geprüft werden. Während die Instandhaltungskosten in der Regel reduziert und die Anlagenverfügbarkeit erhöht werden kann, entstehen neuartige Risiken im Zusammenhang mit der Datensicherheit und eine erhöhte Störanfälligkeit aus zusätzlicher Sensorik. Im Falle einer Fremdinstandhaltung ist es zudem notwendig, die PdM-Strategie im Dienstvertrag zu verankern. Dies kann im Rahmen einer Ausschreibung zu einer eingeschränkten Anbieterauswahl führen und birgt außerdem ein Akzeptanzrisiko, da sich die Mitarbeiter durch das PdM-System kontrolliert fühlen könnten. Um für eigene Anlagen eine erste Indikation für die Eignung von PdM durchzuführen, können die in Tab. 7

abgebildeten Nutzen- und Risikofaktoren herangezogen werden. Hier handelt es sich um diejenigen Faktoren, die in der Fallstudie bei mindestens zwei Anlagen als relevant eingestuft wurden. Somit ist es eine priorisierte Sammlung der Aspekte aus [6]:

Vorliegender Beitrag ist eine der ersten Forschungsarbeiten, welche die Sinnhaftigkeit der Einführung einer PdM-Strategie für unterschiedliche Anlagen anhand qualitativer und quantitativer Aspekte betrachtet. Entscheidungsträger in Unternehmen erhalten eine Orientierungshilfe, für welche Anlagenklassen PdM profitabel ist und welche Aspek-

**Tab. 7** Nutzen- und Risikofaktoren zur Abschätzung der Eignung einer Anlagenklasse für PdM (Predictive Maintenance)

Nutzenfaktoren	Risikofaktoren
Anlagen-, Maschinen- und Bauteilverfügbarkeit	Daten- und Voraussagequalität
Kosteneinsparung (Instandhaltungs- und Energiekosten)	Datensicherheit (Datenmanipulation, erhöhte Anzahl an Schnittstellen)
Personaleinsatz (Eigene und fremde Instandhaltungsmitarbeiter)	Faktor Mensch (Mitarbeiterakzeptanz und Fehlinterpretation der Daten)
Planungssicherheit (Stillstandzeiten, optimierte Tourenplanung)	Kosten (PdM-System, Verlust von Garantieansprüchen)
Prozess- und Produktionsqualität	Risiken des PdM-Systems (Erhöhte Fehler- bzw. Störanfälligkeit durch zusätzliche Sensoren)

te in die ökonomische Bewertung grundsätzlich einbezogen werden müssen. Das angewandte Bewertungsverfahren dient als Muster für die Analyse weiterer technischer Anlagen und lässt sich auch für andere Technologien, wie beispielsweise Augmented Reality oder Cloud Computing, adaptieren. Zunächst müssten hierzu allerdings spezifische Aufwands-, Nutzen- und Risikoaspekte ermittelt werden.

Die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ist dadurch eingeschränkt, dass drei Anlagen im selben Umfeld untersucht wurden. Außerdem beruhen die einzelnen Bewertungen vorwiegend auf Schätzungen der Workshopteilnehmer, was deren Validität begrenzt. Um generalisierbare Schlüsse für die Eignung einer bestimmten Anlagenklasse für PdM ziehen zu können, ist es daher notwendig, die vorliegenden Ergebnisse in weiteren Forschungsarbeiten um die Analyse zusätzlicher Anlagen aus anderen Unternehmen und Branchen zu erweitern sowie zusätzliche Personengruppen (Softwareentwickler, IT-Sicherheitsverantwortliche und das zuständige Betriebspersonal) in die Bewertung einzubeziehen.

Als Gesamtfazit lässt sich festhalten: PdM bietet Unternehmen ein erhebliches Potenzial. Allerdings ist es in Anbetracht der durchaus hohen initialen Investitionskosten nicht für jede Anlagenklasse gegenüber der vorausbestimmten und korrektiven Instandhaltung im Vorteil. Deshalb ist es unabdingbar, die Vorteilhaftigkeit im Einzelfall vor der Einführung genauestens zu prüfen.

**Funding** Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

## Literatur

- Amari SV, McLaughlin L, Pham H (2006) Cost-effective condition-based maintenance using Markov decision processes. In: Annual reliability and maintainability symposium Newport Beach
- Lee J, Qiu H, Ni J, Djurdjanovic D (2004) Infotronics technologies and predictive tools for next-generation maintenance systems. In: 11th IFAC symposium on information control problems in manufacturing Salvador
- Labib AW (2004) A decision analysis model for maintenance policy selection using a CMMS. *J Qual Maintenance Eng* 10(3):191–202
- Shin J-H, Jun H-B (2015) On condition based maintenance policy. *J Comput Des Eng* 2(2):119–127
- Prajapati A, Bechtel J, Ganesan S (2012) Condition based maintenance: a survey. *J Qual Maintenance Eng* 18(4):384–400
- Tauterat T (2018) Verfahren zur Bewertung von Predictive Maintenance für Anbieter von Instandhaltungsdienstleistungen. EUL Verlag, Siegburg
- DIN Deutsches Institut für Normung: Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017 (2017)
- Chebel-Morello B, Nicod J-M, Varnier C (2017) From prognostics and health systems management to predictive maintenance 2: knowledge, reliability and decision. John Wiley & Sons, Hoboken
- Jardine AK, Lin D, Banjevic D (2006) A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mech Syst Signal Process* 20(7):1483–1510
- Alaswad S, Xiang Y (2017) A review on condition-based maintenance optimization models for Stochastically deteriorating system. *Reliab Eng Syst Saf* 157:54–63
- Tang D, Makis V, Jafari L, Yu J (2015) Optimal maintenance policy and residual life estimation for a slowly degrading system subject to condition monitoring. *Reliab Eng Syst Saf* 134:198–207
- Ye ZS, Xie M (2015) Stochastic Modelling and Analysis of Degradation for Highly Reliable Products. *Appl Stoch Model Bus Ind* 31(1):16–32
- Si X-S, Wang W, Hu C-H, Zhou D-H (2011) Remaining useful life estimation—a review on the statistical data driven approaches. *Eur J Oper Res* 213(1):1–14
- Neves ML, Santiago LP, Maia CA (2011) A condition-based maintenance policy and input parameters estimation for deteriorating systems under periodic inspection. *Comput Ind Eng* 61(3):503–511
- Jeong I, Leon V, Villalobos J (2007) Integrated decision-support system for diagnosis, maintenance planning, and scheduling of manufacturing systems. *Int J Prod Res* 45(2):267–285
- Ahmad R, Kamaruddin S (2012) A review of condition-based maintenance decision-making. *Eur J Ind Eng* 6(5):519–541
- Sharma S, Cui Y, He Q, Mohammadi R, Li Z (2018) Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry. *Transp Res Part C Emerg Technol* 90:34–58
- Tang D, Yu J, Chen X, Makis V (2015) An optimal condition-based maintenance policy for a degrading system subject to the competing risks of soft and hard failure. *Comput Ind Eng* 83:100–110
- Li X, Cai J, Zuo H, Li H (2017) Optimal cost-effective maintenance policy for a helicopter gearbox early fault detection under varying load. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2017/4682409>
- Yildirim M, Sun XA, Gebraeel NZ (2016) Sensor-driven condition-based generator maintenance scheduling—part I: maintenance problem. *IEEE Trans Power Syst* 31(6):4253–4262
- Pape U (2018) Investitionsrechnung. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/investitionsrechnung-41465/version-264829>. Zugegriffen: 24. Juni 2019
- Webster J, Watson RT (2002) Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. *Manag Inf Syst Q* 26(2):13–26
- Nemeth T, Ansari F, Sihn W, Haslhofer B, Schindler A (2018) Prima-X: a reference model for realizing prescriptive maintenance and assessing its maturity enhanced by machine learning. *Proc CIRP* 72:1039–1044
- De Carolis A, Macchi M, Negri E, Terzi S (2017) A maturity model for assessing the digital readiness of manufacturing companies. In: IFIP international conference on advances in production management systems Hamburg
- De Carolis A, Macchi M, Negri E, Terzi S (2017) Guiding manufacturing companies towards digitalization. A methodology for supporting manufacturing companies in defining their digitalizati-

- on roadmap. In: International conference on engineering, technology and innovation Madeira
26. Tafvizi Zavareh M, Sadaune S, Siedler C, Aurich JC, Zink KJ, Eigner M (2018) A Study on the Socio-Technical Aspects of Digitization Technologies for Future Integrated Engineering Work Systems. In: Nord Design 2018
  27. Yin RK (2017) Case study research and applications: design and methods. SAGE, Thousand Oaks
  28. Benbasat I, Goldstein DK, Mead M (1987) The case research strategy in studies of information systems. *Manag Inf Syst Q* 11(3):369–386
  29. Paré G (2004) Investigating information systems with positivist case research. *CAIS* 13(1):233–264