
Die Wirkungskette der vorausschauenden Instandhaltung

Vier Übergabestellen zwischen Sensorsignal und realisiertem Ertrag.
Konstruktentwicklung und Abgrenzung für den industriellen Mittelstand

Ralf Platvoet

Platvoet Performance Intelligence (PPI), Remscheid

PPI WORKING PAPER 02/2026 · STAND: 4. SEPTEMBER 2026

Schlagwörter: Predictive Maintenance, vorausschauende Instandhaltung, Condition Monitoring, P-F-Intervall, Alarmermüdung, Wirkungskette, Investitionsentscheidung, Mittelstand, Konstruktentwicklung

Keywords: predictive maintenance, condition monitoring, P-F interval, alarm fatigue, effect chain, investment decision, Mittelstand, construct development

ZUSAMMENFASSUNG

Vorausschauende Instandhaltung wird als Detektionsproblem konzipiert und scheitert als Übergabeproblem. Die technische Literatur, die einschlägigen Normen und der überwiegende Teil der Anbieterkommunikation behandeln die Frage, wie ein beginnender Schaden früher und sicherer erkannt wird. Die Praxis berichtet dagegen von Piloten, die über Monate korrekt messen und keinen nachweisbaren wirtschaftlichen Ertrag erzeugen. Dieses Papier entwickelt ein Konstrukt für diese Beobachtung. Grundlage ist eine induktive Inhaltsanalyse von sieben Praxisdokumenten aus einer Beratungspraxis, in denen wiederkehrend beschrieben wird, an welchen Stellen die Wirkung eines funktionierenden Systems verloren geht. Aus den 42 kodierten Fundstellen lassen sich vier Übergabestellen ableiten, an denen jeweils eine Entscheidung und keine Technik über den weiteren Verlauf bestimmt: die Bewertung der Ausfallfolge je Anlage, die Adressierung der Meldung an ein Subjekt mit Frist und Mandat, die Selektion des Pilotobjekts nach Folge statt nach Zugänglichkeit und die vertragliche Bindung vor der zweiten Entscheidung. Das Konstrukt wird an das P-F-Intervall der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung, an die Signalentdeckungstheorie, an die Alarmbewirtschaftung der Prozessleittechnik und an die Realoptionstheorie zurückgebunden. Eine Abgrenzung gegen acht etablierte Instrumente zeigt, dass keines von ihnen die vierte

Stelle adressiert und keines die erste und die vierte zugleich. Aus den Wirkungsbehauptungen der Praxisliteratur werden sieben prüfbare Propositionen formuliert, deren zentrale lautet, dass die Übergabestellen multiplikativ und nicht additiv wirken. Eine Nebenuntersuchung verfolgt die in der Fachöffentlichkeit kursierenden Wirtschaftlichkeitszahlen bis zu ihren Primärquellen zurück und findet sie in einer Regierungspublikation von 2010, die selbst auf ungenannte Umfragen verweist, sowie in einer Studie über den Ausfall virtualisierter IT-Systeme aus dem Jahr 2016. Das Papier liefert keine Empirie und keinen Wirksamkeitsnachweis. Es schafft die begriffliche Grundlage, auf der ein solcher Nachweis erst geführt werden kann.

ABSTRACT

Predictive maintenance is conceived as a detection problem and fails as a handover problem. The technical literature, the relevant standards and most vendor communication address how incipient damage can be detected earlier and more reliably. Practice, by contrast, reports pilots that measure correctly for months and produce no demonstrable economic return. This paper develops a construct for that observation. It rests on an inductive content analysis of seven practitioner documents from a consulting practice which repeatedly describe where the effect of a functioning system is lost. From the 42 coded passages, four handover points can be derived, at each of which a decision rather than a technology determines what follows: the valuation of failure consequences per asset, the addressing of the alert to a person holding both a deadline and a mandate, the selection of the pilot asset by consequence rather than by accessibility, and contractual commitment ahead of the second decision. The construct is grounded in the P-F interval of reliability-centred maintenance, in signal detection theory, in the alarm management practice of process control, and in real options theory. A delineation against eight established instruments shows that none addresses the fourth point and none addresses the first and the fourth together. Seven testable propositions are derived from the effectiveness claims of the practitioner material; the central one holds that the handover points act multiplicatively rather than additively. A subsidiary investigation traces the economic figures circulating in the field back to their primary sources and locates them in a government publication of 2010 which itself cites unnamed surveys, and in a 2016 study of virtualised IT system downtime. The paper offers neither empirical data nor proof of effectiveness. It establishes the conceptual basis on which such proof can first be attempted.

INTERESSEN OFFENLEGUNG

Der Autor betreibt eine Beratungspraxis, die Leistungen zu dem hier beschriebenen Gegenstand anbietet. Das Primärmaterial dieser Untersuchung stammt aus dem Marketing- und Schulungsbestand dieser Praxis. Daraus ergibt sich ein Interessenkonflikt, der die Auswahl des Gegenstands, nicht aber dessen Bewertung bestimmen soll. Vier Vorkehrungen wurden getroffen. Erstens erscheinen im Fließtext keine Produktnamen; die konkrete Umsetzung wird ausschließlich in Abschnitt 7 als ein dokumentierter Anwendungsfall behandelt. Zweitens werden alle Wirkungsbehauptungen des Quellmaterials in prüfbare Propositionen überführt und nicht als Befunde geführt. Drittens ist jede im Papier verwendete Zahl in einem offengelegten Belegprotokoll nachgewiesen. Viertens, und hier geht das Vorgehen über das übliche Maß hinaus, richtet sich die Quellenprüfung ausdrücklich auch gegen die älteren Veröffentlichungen des Autors. Ihre Ergebnisse werden vollständig berichtet, auch wo sie eigene Aussagen korrigieren. Abschnitt 2.3 enthält diese Korrekturen.

1. Einleitung

Ein mittelständisches Fertigungsunternehmen rüstet eine Anlage mit Schwingungs- und Temperatursensorik aus. Die Messtechnik arbeitet einwandfrei. Sie erfasst über neun Monate zuverlässig die vereinbarten Kennwerte, meldet mehrere Auffälligkeiten und erkennt einen beginnenden Lagerschaden Wochen vor dem Ausfall. Am Ende des Piloten kann niemand im Unternehmen angeben, welchen wirtschaftlichen Ertrag das System erbracht hat. Der Pilot wird nicht verlängert. In der internen Bewertung heißt es, vorausschauende Instandhaltung habe sich für dieses Unternehmen nicht gerechnet.

Dieser Verlauf ist in der Beratungspraxis vertraut, und er ist theoretisch unterbestimmt. Die Erklärung, die aus dem Fach naheliegt, greift nicht: Es lag kein Sensordefekt vor, keine unzureichende Datenqualität und kein fehlerhaftes Modell. Das System hat getan, wofür es gebaut wurde. Es hat trotzdem nichts bewirkt.

Die wissenschaftliche und die normative Beschäftigung mit vorausschauender Instandhaltung konzentriert sich seit Jahrzehnten auf die Detektionsseite. Sie fragt, welche Kennwerte einen beginnenden Schaden am frühesten anzeigen, wie sich Restlaufzeiten schätzen lassen, wie Fehlerbilder unterschieden und wie Modelle gegen Betriebspunktänderungen robust gemacht werden. Die einschlägigen Normen folgen derselben Aufteilung: Sie regeln den Aufbau eines Überwachungsprogramms, die Verarbeitung und Darstellung der Daten sowie die Bewertung der gemessenen Schwingung. Was mit einem Befund geschieht, nachdem er vorliegt, regelt keine von ihnen.

Genau dort liegt die Lücke. Zwischen dem physikalisch messbaren Frühindikator und dem wirtschaftlich realisierten Ertrag liegt eine Folge von Übergaben, von denen jede einzelne misslingen kann und von denen keine technischer Natur ist. Sie sind in der Praxisliteratur beschrieben, dort aber als Sammlung unabhängiger Fehler und nicht als Struktur. Dieses Papier schlägt vor, sie als Kette zu lesen.

Der Beitrag besteht aus vier Teilen. Erstens wird ein Konstrukt mit vier Übergabestellen entwickelt und aus einer induktiven Kodierung von Praxismaterial belegt. Zweitens wird das Konstrukt gegen acht etablierte Instrumente der Instandhaltung und der Unternehmenssteuerung abgegrenzt. Drittens werden sieben Propositionen formuliert, die sich empirisch prüfen lassen und deren zentrale eine multiplikative statt additive Verknüpfung der Stellen behauptet. Viertens werden die in der Fachöffentlichkeit kursierenden Wirtschaftlichkeitszahlen auf ihre Primärquellen zurückverfolgt, weil ohne diese Prüfung jede Aussage über Wirkung auf Sand steht.

Was das Papier nicht leistet, ist ebenso wichtig. Es enthält keine Empirie. Es weist nicht nach, dass die beschriebenen Verluste tatsächlich in der behaupteten Häufigkeit auftreten. Es misst nicht, wie groß sie sind. Es trifft keine Aussage darüber, wie verbreitet die vier Fehler in der Grundgesamtheit mittelständischer Fertigungsunternehmen sind. Alle diese Fragen sind offen, und Abschnitt 11 benennt, wie sie zu beantworten wären.

2. Ausgangslage

2.1 Die Detektionsseite ist nicht mehr der Engpass

Die Annahme, auf der die gesamte folgende Argumentation ruht, lautet: Die Fähigkeit, einen beginnenden Schaden rechtzeitig zu erkennen, ist beschaffbar und nicht mehr der begrenzende Faktor. Diese Annahme ist begründungsbedürftig.

Der stärkste Beleg ist normativer Art. Für die Zustandsüberwachung existiert ein geschlossenes Normenwerk. ISO 17359 regelt das Vorgehen beim Aufbau eines Überwachungsprogramms und verweist auf die zugehörigen Einzelnormen. ISO 13374 regelt in mehreren Teilen die Verarbeitung, Übertragung und Darstellung der Zustandsdaten. ISO 20816-1, Nachfolgerin der lange gebräuchlichen ISO 10816, regelt Messung und Bewertung der Maschinenschwingung. Ein Anwender, der wissen will, wie er misst, womit er misst und wie er das Gemessene einordnet, findet eine vollständige Antwort. Ein Anwender, der wissen will, an wen ein Befund geht, in welcher Frist zu antworten ist und was geschieht, wenn niemand antwortet, findet in diesen Normen nichts. Die Regelungsdichte auf der einen und die Regelungslücke auf der anderen Seite sind der belastbarste verfügbare Hinweis darauf, wo das gelöste und wo das ungelöste Problem liegt.

Die zweite Stütze ist ökonomischer Art. Die Komponenten der Detektionsseite, Sensorik, Konnektivität, Randverarbeitung und Datenhaltung, sind standardisiert und im Preis erheblich gefallen. Industrietaugliche Beschleunigungssensoren liegen heute im dreistelligen Bereich, wo sie vor wenigen Jahren vierstellig lagen. Eine Analyse des Technologiefeldes nach der Methode der Wertschöpfungskartierung, die im untersuchten Material vorliegt, ordnet Sensorik, Konnektivität, Randgeräte und Cloud dem Bereich der Standardgüter zu und verortet die Differenzierung ausschließlich bei Instandhaltungsstrategie und Anlagenkenntnis. Diese

Kartierung stammt vom Autor selbst und ist deshalb kein unabhängiger Beleg. Sie ist als Ausdruck derselben Auffassung zu lesen, nicht als deren Bestätigung.

Gegen die Annahme sprechen zwei Beobachtungen aus dem Material selbst, die hier nicht unterdrückt werden. Erstens wird die Unterspezifikation der Sensorik als häufiger Fehlkauf beschrieben: Schwingungsaufnehmer, die nur gemittelte Werte im niedrigen Frequenzbereich liefern, tragen die Formkennwerte und die Frequenzbandanalyse nicht, für die sie beschafft wurden. Zweitens werden Fehlalarme aus unerkannten Betriebspunktwechseln als häufigstes Einstiegsproblem lernender Verfahren genannt. Beides sind technische Befunde.

Die Auflösung, die das Papier vertritt, schwächt die Annahme ab, statt sie zu verteidigen. In beiden Fällen begrenzt nicht die Detektionsfähigkeit, sondern eine ihr vorgelagerte Entscheidung: die Spezifikation gegen den späteren Auswertungszweck im ersten Fall, die Definition des Betriebspunkts im zweiten. Die Annahme lautet deshalb nicht, dass Technik keine Rolle spielt. Sie lautet, dass die erreichbare Detektionsgüte am Markt verfügbar ist, dass sie nicht mehr die obere Schranke des Ergebnisses bildet und dass sie durch dieselbe Art von Entscheidung begrenzt wird, die auch die vier Übergabestellen bestimmt.

2.2 Die Wirkungsseite ist unbelegt

Wer die Wirtschaftlichkeit vorausschauender Instandhaltung begründen will, findet in der Fachöffentlichkeit einen kleinen, stabilen Satz von Zahlen. Die Wartungskosten sinken um 25 bis 30 Prozent. Die Ausfälle gehen um 70 bis 75 Prozent zurück. Die Kapitalrendite beträgt ein Vielfaches der Investition. Eine Stillstandsstunde kostet 260.000 US-Dollar. Diese Werte erscheinen in Anbieterunterlagen, in Fachbeiträgen und in Beratungsdokumenten, meist ohne Quellenangabe oder mit einer Angabe, die auf eine weitere Sekundärdarstellung verweist.

Für dieses Papier wurden sie bis zu ihren Primärquellen zurückverfolgt. Das Ergebnis ist für die Argumentation folgenreich genug, um es hier auszuführen.

Die Prozentwerte lassen sich auf eine einzige Passage zurückführen. Sie steht im fünften Kapitel des Leitfadens *Operations and Maintenance Best Practices*, herausgegeben in der dritten Ausgabe vom August 2010 durch das Pacific Northwest National Laboratory für das Federal Energy Management Program des US-Energieministeriums. Die Passage lautet im Wortlaut: „In fact, independent surveys indicate the following industrial average savings resultant from initiation of a functional predictive maintenance program“. Es folgen fünf Werte: Kapitalrendite das Zehnfache, Rückgang der Wartungskosten 25 bis 30 Prozent, Beseitigung von Ausfällen 70 bis 75 Prozent, Rückgang der Stillstandszeit 35 bis 45 Prozent, Produktionssteigerung 20 bis 25 Prozent.

Der Leitfaden nennt keine dieser Umfragen. Es fehlen Stichprobengröße, Erhebungsjahr, Branche, Land und Methode. Die Werte werden als industrieller Durchschnitt bezeichnet, stehen aber in einem Dokument, das sich an Liegenschaften des US-Bundes richtet. Da die zitierten Umfragen älter sein müssen als der Leitfaden,

sind sie heute mindestens sechzehn Jahre alt. Die Passage belegt zuverlässig, woher die Zahlen stammen. Sie belegt nicht, dass sie zutreffen.

Die Stillstandskosten von 260.000 US-Dollar je Stunde führen an einen anderen Ort. Sie stammen aus dem Bericht *Maintaining Virtual System Uptime in Today's Transforming IT Infrastructure* der Aberdeen Group vom Februar 2016. Dort heißt es in den Kernaussagen: „The cost of an hour of downtime for all businesses has grown by 60 % to \$260,000.“ Der Bericht wurde von einem Analysten für Informationstechnologie verfasst. Sein Gegenstand sind, nach der eigenen Einleitung, die Entwicklung der Virtualisierung und die Notwendigkeit, virtuelle Server und Anwendungen auf hochverfügbarer, fehlertoleranter Hardware zu betreiben. Der Wert bezieht sich auf die Verfügbarkeit von IT-Systemen, nicht auf den Stillstand von Fertigungsanlagen, er ist ein Durchschnitt über alle Unternehmen und nicht über Fertigungsunternehmen, und er ist zehn Jahre alt.

Eine methodisch transparentere und fachlich näher liegende Erhebung existiert. Der Bericht *The True Cost of Downtime 2022* beruht auf einer Befragung großer Fertigungs- und Industrieunternehmen in den Jahren 2021 und 2022 und rechnet deren Ergebnisse auf die Fortune Global 500 hoch. Er weist eine Stillstandsstunde in der Automobilfertigung mit über zwei Millionen US-Dollar aus, in der Öl- und Gasindustrie mit knapp einer halben Million. Für den industriellen Mittelstand mit 50 bis 500 Beschäftigten ist er dennoch nicht anwendbar, und zwar aus zwei Gründen: Seine Grundgesamtheit sind ausdrücklich Großunternehmen, und die Werte liegen zwischen den Branchen um mehr als den Faktor vier auseinander. Er belegt die Spreizung. Er liefert keinen Referenzwert.

Der Befund über alle drei Quellen hinweg lautet: Die Wirkungsseite der vorausschauenden Instandhaltung ist deutlich schwächer belegt als ihre technische Seite. Es existiert kein belastbarer, auf den europäischen industriellen Mittelstand bezogener Wirksamkeitsnachweis. Was zirkuliert, sind ein sechzehn Jahre alter Verweis auf ungenannte Umfragen und eine branchenfremde Kennzahl aus der Informationstechnologie.

Für die Argumentation dieses Papiers ist das keine Schwächung, sondern eine Präzisierung. Die These, dass die Wirkung an vier Übergabestellen verloren geht, benötigt keine dieser Zahlen. Sie benötigt lediglich, dass die Ausfallfolge je Anlage überhaupt bekannt ist, und genau das ist die erste der vier Stellen.

2.3 Korrekturen an eigenen Veröffentlichungen

Die Prüfung traf auch das ältere Material des Autors. Vier Angaben halten ihr nicht stand, und sie werden hier berichtet, weil ein Papier, das die Beleglage seines Feldes prüft, seine eigene nicht ausnehmen kann.

Erstens schreibt eine eigene Veröffentlichung vom Juni 2026 die Zahl von 260.000 US-Dollar je Stunde einer Reihe von „Branchenanalysen (McKinsey, Aberdeen Group, Deloitte 2023 bis 2026)“ zu und bezieht sie auf Fertigungsunternehmen. Richtig ist, dass es sich um einen einzelnen Bericht der Aberdeen Group vom Februar 2016 über IT-Systemverfügbarkeit handelt. Die Zuschreibung ist in Quelle, Datierung und Gegenstand unzutreffend.

Zweitens führt dieselbe Veröffentlichung an, vorausschauende Instandhaltung verringere Maschinenstillstände um bis zu 70 Prozent. Der Wert von 70 bis 75 Prozent bezeichnet in der zugrunde liegenden Liste die Beseitigung von Ausfallereignissen. Der Rückgang der Stillstandszeit wird in derselben Liste mit 35 bis 45 Prozent angegeben. Es liegt eine Verwechslung zweier Zeilen vor.

Drittens nennt sie eine Kapitalrendite von 300 Prozent über drei Jahre als typischen Wert. Eine Primärquelle dafür war nicht auffindbar. Die zugrunde liegende Liste nennt an dieser Stelle das Zehnfache der Investition, ohne Zeitbezug.

Viertens nennen mehrere eigene Texte eine kritische Alarmlast von 20 bis 30 Meldungen am Tag. Die Normwerte der Prozessleittechnik liegen bei etwa sechs bis zwölf Alarmen je Bediener und Stunde und damit um eine Größenordnung höher. Dies ist allerdings kein einfacher Fehler, sondern eine andere Bezugsgröße, und Abschnitt 4.3 behandelt den Unterschied als eigenständigen Ertrag.

Ein fünfter Punkt betrifft nicht die Richtigkeit, sondern die Vergleichbarkeit. Das untersuchte Material nennt fünf Angaben zur Amortisationsdauer, die zwischen drei Monaten und vierundzwanzig Monaten liegen. Sie widersprechen einander nur scheinbar. Die kürzeste bezieht die Erstinvestition eines einzelnen Objekts auf ein einzelnes vermiedenes Ereignis, die längeren beziehen ein Programm über viele Objekte auf einen Jahresnutzen. Keine der Angaben nennt ihre Bezugsgröße. Dieses Papier verwendet deshalb keine Amortisationsdauer und hält stattdessen fest, dass Amortisationsangaben in diesem Feld ohne Nennung von Bezugsobjekt, Nutzenabgrenzung und Kostenumfang nicht vergleichbar sind.

2.4 Zwischenfazit

Drei Beobachtungen ergeben zusammen die Ausgangslage. Die Detektion ist normativ geregelt, technisch beherrscht und im Preis gefallen. Die Wirkung ist unbelegt und wird mit Zahlen begründet, die einer Prüfung nicht standhalten. Und der Anbietermarkt ist so fragmentiert und in seinen Bindungsmodellen so weit gespreizt, dass die Auswahlentscheidung selbst zu einem eigenen Risiko wird. Der Engpass hat sich verschoben, von der Frage, ob ein Schaden erkannt wird, zu der Frage, was mit der Erkenntnis geschieht. Diese Verschiebung ist bisher nicht als solche beschrieben worden.

3. Methodisches Vorgehen

Das Material dieser Untersuchung besteht aus sieben Dokumenten einer Beratungspraxis, die zwischen Juli und August 2026 entstanden sind. Vier davon sind Fachartikel, die in wöchentlichem Abstand nacheinander verfasst und veröffentlicht wurden. Jeder behandelt ein eigenes Thema, verwendet ein eigenes Instrument und schließt mit einem eigenen Abschnitt zu wiederkehrenden Einwänden. Das fünfte Dokument ist eine spätere Zusammenfassung dieser vier Themen; es ist deshalb ausdrücklich keine unabhängige fünfte Quelle, wohl aber der Ort, an dem eine Ordnung sichtbar wird, die in den Einzeltexten nicht erkennbar ist. Das

sechste ist ein Selbstbewertungsinstrument mit zehn Merkmalen, das aus dem fünften abgeleitet wurde. Das siebte stammt aus einer anderen Produktlinie derselben Praxis, ist unabhängig von den übrigen entstanden und dient als Kreuzprüfung.

Als Kodiereinheit diene jede Aussage darüber, an welcher Stelle die Wirkung eines Instandhaltungssystems verloren geht. Aussagen über Detektionsverfahren, Sensorspezifikation oder Modellklassen wurden nicht kodiert, sondern der in Abschnitt 2.1 dargestellten Prüfung der Grundannahme zugeführt. Die Kodierung erfolgte induktiv: Die Kategorien wurden nicht vorab festgelegt, sondern aus der Wiederholung ähnlicher Aussagen über verschiedene Texte hinweg gebildet. Sie ergaben vier Kategorien, denen sich sämtliche 42 Fundstellen zuordnen ließen, sowie zwei Randbedingungen, die in Abschnitt 5.6 behandelt und begründet ausgeschlossen werden.

Die Grenzen dieser Genese sind erheblich und werden hier benannt, statt sie in die Limitationen zu verschieben. Das Material stammt von einem einzigen Autor, aus einer einzigen Beratungspraxis und aus einem einzigen Marktsegment. Es wurde zu Vertriebs- und Schulungszwecken verfasst und nicht zur Erhebung. Eine zweite kodierende Person stand nicht zur Verfügung, eine Interkoderübereinstimmung konnte deshalb nicht bestimmt werden. Die Kodierung ist nachvollziehbar, weil jede Fundstelle mit Quelle und Wortlaut dokumentiert ist, aber sie ist nicht unabhängig repliziert. Was hier entsteht, ist die Systematisierung einer Praxisauffassung, nicht ihre Bestätigung.

Ergänzend wurde jede im Material genannte Zahl auf ihre Primärquelle zurückverfolgt. Das Ergebnis dieser Prüfung ist in Abschnitt 2.2 und 2.3 dargestellt und vollständig in einem gesonderten Belegprotokoll dokumentiert. Wo eine Primärquelle nicht erreichbar war, wird die betreffende Zahl im Papier nicht verwendet oder ausdrücklich als ungeprüft gekennzeichnet.

4. Theoretischer Bezugsrahmen

4.1 Das P-F-Intervall als Zeitachse

Den Bezugspunkt liefert die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung. In dem Bericht, den F. Stanley Nowlan und Howard F. Heap 1978 für das US-Verteidigungsministerium vorlegten, wird zwischen dem potenziellen und dem funktionalen Ausfall unterschieden. Ein potenzieller Ausfall ist ein erkennbarer physikalischer Zustand, der anzeigt, dass ein funktionaler Ausfall bevorsteht. Der Abstand zwischen beiden Zeitpunkten heißt P-F-Intervall. Zustandsorientierte Instandhaltung besteht darin, auf potenzielle Ausfälle zu prüfen, um funktionale zu verhindern.

Für dieses Papier ist das P-F-Intervall mehr als eine Definition. Es ist die Ressource, um die es geht. Das Intervall ist von der Physik des Schadensverlaufs vorgegeben und lässt sich durch keinerlei organisatorische Maßnahme verlängern. Frühere Detektion verschiebt seinen Anfangspunkt nach vorn und vergrößert es

damit. Jede Übergabe innerhalb der Kette verbraucht davon Zeit. Ein System, das einen Schaden sechs Wochen im Voraus erkennt, dessen Meldung aber vier Wochen bis zu einer Entscheidung braucht, verfügt über ein wirksames Handlungsfenster von zwei Wochen. Ein System mit derselben Detektionsgüte und einer Reaktionszeit von einem Tag verfügt über fast sechs Wochen. Die Detektionsgüte ist in beiden Fällen identisch. Der Unterschied entsteht vollständig in der Übergabe.

Daraus folgt eine Aussage, die das Papier durchzieht: Verbesserungen der Detektion und Verbesserungen der Übergabe wirken auf dieselbe Größe, nämlich auf das nutzbare Handlungsfenster. Sie sind deshalb gegeneinander aufrechenbar, und sobald die Übergabezeit das Intervall aufzehrt, ist zusätzliche Detektionsgüte wirkungslos. Das ist die theoretische Grundlage von Proposition P5.

4.2 Signalentdeckung und die Unauflösbarkeit des Schwellenkonflikts

Die Signalentdeckungstheorie in der Tradition von Green und Swets beschreibt, dass die Entscheidung zwischen Signal und Rauschen eine Schwelle voraussetzt und dass jede Verschiebung dieser Schwelle Trefferquote und Fehlalarmrate gemeinsam bewegt. Eine empfindlichere Einstellung erkennt mehr beginnende Schäden und erzeugt mehr Fehlalarme; eine unempfindlichere tut das Umgekehrte. Beide Größen lassen sich nur gemeinsam verbessern, wenn die Trennschärfe des Verfahrens selbst steigt, also durch bessere Messtechnik oder bessere Modelle.

Für das Konstrukt hat das eine unbequeme Folge. Die zweite Übergabestelle, die Adressierung, wird in der Praxis häufig als Kalibrierungsproblem behandelt: Man stelle die Schwellen richtig ein, dann sinke die Alarmlast und die Bearbeitungsquote steige. Die Signalentdeckungstheorie zeigt, dass diese Rechnung nicht aufgeht. Wer die Schwelle anhebt, um die Alarmlast zu senken, verliert genau die frühen und schwachen Anzeigen, für die das System angeschafft wurde. Die Kalibrierung verschiebt den Konflikt, sie löst ihn nicht. Was ihn auflöst, ist eine gestufte Reaktion, die unterschiedlich sichere Anzeigen unterschiedlich teuer behandelt, und damit eine organisatorische und keine messtechnische Antwort.

4.3 Alarmermüdung und die Frage nach der richtigen Bezugsgröße

Das Phänomen, dass Bediener bei hoher Meldungsfrequenz beginnen zu selektieren, ohne dass eine Regel diese Selektion steuert, ist in zwei Feldern gut untersucht. In der Prozessleittechnik haben sich Kennwerte für die zumutbare Alarmlast etabliert, die in der einschlägigen Normung und der darauf aufbauenden Fachliteratur übereinstimmend mit etwa sechs Alarmen je Bediener und Stunde als sehr wahrscheinlich beherrschbar und etwa zwölf als maximal beherrschbar angegeben werden, bei einer Eingriffsgrenze oberhalb von achtzehn. In der Intensiv- und Anästhesiepflege ist die Ermüdung durch Alarme als Sicherheitsrisiko dokumentiert.

Die Übertragung auf die vorausschauende Instandhaltung verlangt Vorsicht, und an dieser Stelle liegt ein eigenständiger Ertrag dieser Untersuchung. Die genannten Normwerte gelten für einen besetzten Leitstand, in dem eine Person anwesend ist, deren Aufgabe die Alarmbearbeitung ist. Ein Befund aus der

Zustandsüberwachung erreicht dagegen typischerweise eine Instandhaltungskraft, die daneben ihrer eigentlichen Arbeit nachgeht, die nicht im Schichtdienst an einem Bildschirm sitzt und die nachts nicht erreichbar ist. Die zumutbare Last ist unter diesen Bedingungen erheblich niedriger, und die im untersuchten Praxismaterial genannte Schwelle von zwanzig bis dreißig Meldungen am Tag ist deshalb plausibel, auch wenn sie eine Größenordnung unter dem Normwert liegt. Sie bezeichnet schlicht eine andere Größe.

Daraus folgt eine allgemeinere Beobachtung. Die Alarmbewirtschaftung der Prozessindustrie lässt sich nicht ohne Anpassung auf die Instandhaltung übertragen, weil ihre stillschweigende Voraussetzung, die permanente Besetzung einer Empfängerrolle, dort nicht erfüllt ist. Genau diese fehlende Voraussetzung ist der Gegenstand der zweiten Übergabestelle.

4.4 Aufmerksamkeit, Lagebewusstsein und die Ebene der Verdichtung

Endsleys Modell des Lagebewusstseins unterscheidet drei Ebenen: die Wahrnehmung von Elementen, das Verstehen der Lage und die Projektion in die nahe Zukunft. Ein Messwert bedient die erste Ebene. Eine Aussage darüber, was der Messwert für diese Anlage in diesem Betriebszustand bedeutet, gehört zur zweiten. Eine Aussage darüber, wie viel Zeit bis zum Ausfall bleibt, gehört zur dritten. Die Unterscheidung erklärt, warum zusätzliche Messkanäle die Lage nicht verbessern: Sie vermehren Elemente der ersten Ebene, ohne die zweite oder dritte zu bedienen.

Für die Kette bedeutet das eine Zuordnung. Die erste Übergabestelle, die Bewertung, ist der Übergang von der ersten zur zweiten Ebene, denn erst die Kenntnis der Ausfallfolge macht aus einem Ausschlag eine Bedeutung. Die Einordnung auf dem P-F-Intervall ist der Übergang zur dritten Ebene. Das Papier des Autors zum betrieblichen Lagebild hat diese Zuordnung für Führungsinstrumente allgemein entwickelt; hier wird sie auf den Instandhaltungsfall angewandt.

4.5 Der Pilot als Option

Die ökonomisch tragfähigste Begründung für die dritte und vierte Übergabestelle liefert die Realoptionstheorie in der Fassung von Dixit und Pindyck. Ein Pilot ist keine verkleinerte Investition. Er ist der Kauf einer Option auf eine größere Investition, deren Wert davon abhängt, welche Unsicherheit er auflöst und welche Handlungsfreiheit er erhält.

Aus dieser Sicht lassen sich beide Stellen präzise fassen. Ein Pilot an einem Objekt ohne nennenswerte Ausfallfolge kauft eine Option, deren Basiswert nahe null liegt: Der Erfolg des Piloten sagt nichts darüber aus, ob der Rollout sich lohnt, weil an diesem Objekt ohnehin nichts zu gewinnen war. Das ist der Gehalt der dritten Stelle, und es erklärt, warum ein technisch erfolgreicher Pilot als Scheitern verbucht werden kann. Ein Pilotvertrag ohne vereinbarte Ausstiegsbedingungen verkauft umgekehrt einen Teil der Handlungsfreiheit mit, die der Pilot eigentlich schaffen sollte. Das ist der Gehalt der vierten Stelle. In beiden Fällen wird der Optionswert nicht durch die Technik zerstört, sondern durch die Konstruktion der Entscheidung.

Die Realloptionsbetrachtung liefert zugleich die Erklärung für einen zeitlichen Widersinn: Die vierte Stelle wirkt am spätesten und wird am frühesten unwiderruflich entschieden. Wer eine Option verkauft, bevor er weiß, was sie wert ist, kann den Preis nicht kennen. Daraus folgt Proposition P3.

4.6 Absorptionsfähigkeit

Cohen und Levinthal beschreiben mit der Absorptionsfähigkeit die Voraussetzung dafür, dass eine Organisation externes Wissen erkennen, bewerten und anwenden kann, und binden sie an bereits vorhandenes verwandtes Wissen. Für die zweite Übergabestelle liefert das die Erklärung, warum ein funktionierender Meldeweg nicht durch Einführung eines Systems entsteht, sondern nur dort, wo bereits eine Praxis existiert, Zustandsinformationen in Aufträge zu übersetzen. Das ist zugleich der Grund, warum die Frage nach einem vorhandenen Auftragssystem im Material regelmäßig auftaucht und ebenso regelmäßig relativiert wird: Nicht das System ist die Voraussetzung, sondern die Übung.

4.7 Reichweite und Grenze der Kettenanalogie

Die hier verwendete Kette ist eine Prozessanalogie, keine physikalische Beschreibung. Sie unterstellt, dass die Zustände in einer festen Reihenfolge durchlaufen werden und dass jeder Übergang gelingen muss, damit der nächste erreicht wird. Beides trifft in der Praxis nicht lückenlos zu. Es gibt Rückkopplungen, etwa wenn die Erfahrung aus einem Piloten die Bewertung der Ausfallfolgen präzisiert. Es gibt Teilerfolge, etwa wenn ein Befund einen Instandhalter zufällig erreicht, obwohl kein Meldeweg definiert ist.

Die Analogie wird hier gewählt, weil sie eine prüfbare Aussage erzeugt, nämlich die multiplikative Verknüpfung. Diese Aussage ist eine Modellannahme und keine Messung. Es ist ausdrücklich möglich, dass sich der Zusammenhang empirisch als steile Sättigungsfunktion und nicht als Produkt darstellt. Abschnitt 9 behandelt diesen Punkt, und Abschnitt 11 gibt an, wie er zu entscheiden wäre.

5. Konstruktentwicklung

Die Kette besteht aus fünf Zuständen und vier Übergängen. Ein physikalisches Signal wird zu einem bewerteten Signal, dieses zu einer adressierten Meldung, diese zu einer ausgeführten Handlung und diese zu einem realisierten Ertrag. Jeder Übergang ist eine Übergabestelle. An jeder entscheidet eine organisatorische Festlegung und keine technische Eigenschaft darüber, ob der nächste Zustand erreicht wird.

5.1 K1 Bewertung

Definition. Die erste Übergabestelle ist geschlossen, wenn für jede überwachte Anlage die wirtschaftliche Folge eines ungeplanten Stillstands als Zahl vorliegt, die über die Reparaturkosten hinausgeht und Produktionsausfall, Ausschuss, Sonderlogistik, Mehrarbeit und vertragliche Folgen umfasst.

Beleg. Elf Fundstellen in fünf Quellen. Der Verlustmechanismus wird in allen Fassungen gleichlautend beschrieben, und er ist nicht der, den man erwarten würde. Die Daten fehlen nicht. Sie liegen in der Betriebsdatenerfassung, in den Instandhaltungsaufträgen und in der Logistikabrechnung vor. Was fehlt, ist ihre Zusammenführung zu einer Zahl je Anlage. Das Material formuliert das an einer Stelle so, dass die tatsächlichen Kosten eines ungeplanten Stillstands in den Systemen vorhanden, aber nirgends zusammengerechnet seien. K1 ist damit kein Erhebungs-, sondern ein Verdichtungsproblem.

Theoretische Rückbindung. Der Übergang entspricht Endsleys zweiter Ebene. Ohne bekannte Ausfallfolge trägt ein Ausschlag keine Bedeutung, und ohne Bedeutung gibt es keinen Grund, ein Signal einem anderen vorzuziehen. Die praktische Folge ist nicht Untätigkeit, sondern Gleichbehandlung: Alle Meldungen werden gleich dringlich, was gleichbedeutend damit ist, dass keine dringlich ist.

Eine bemerkenswerte Nebenaussage. Das Material besteht ausdrücklich nicht auf Genauigkeit. Eine grobe Näherung, gebildet aus dem Deckungsbeitrag der betroffenen Linie und den größten Folgekosten der letzten beiden Störereignisse, wird als ausreichend bezeichnet, weil die Größenordnung für die Priorisierung genügt. Das ist ökonomisch konsistent: Für eine Rangfolge wird kein Absolutwert benötigt, sondern nur eine verlässliche Ordnung. Diese Beobachtung wird in Proposition P7 aufgegriffen.

5.2 K2 Adressierung

Definition. Die zweite Übergabestelle ist geschlossen, wenn jede Klasse von Befunden eine benannte empfangende Person oder Rolle hat, wenn für diese eine Antwortfrist gilt, wenn eine abgestufte Reaktionsregel festlegt, welcher Befund welche Handlung auslöst, und wenn die Erreichbarkeit auch außerhalb der Regelarbeitszeit geklärt ist.

Beleg. Sechzehn Fundstellen in vier Quellen, die dichteste Beleglage der vier Stellen. Auffällig ist die Form der Einführung: Das Material definiert diese Stelle durch Ausschluss der technischen Erklärungen. Es sei kein defekter Sensor gewesen, keine schlechte Datenqualität und kein falscher Algorithmus, sondern niemand habe auf den Befund reagiert. Zwei der sechzehn Fundstellen stammen aus Texten, die einem ganz anderen Thema gewidmet sind, und eine aus einer anderen Produktlinie. Dort heißt es, die Sensorik habe die beginnende Störung erkannt, sie habe nur nicht rechtzeitig die Ebene erreicht, die über eine geplante Abstellung hätte entscheiden können. Diese Formulierung trennt Detektion und Wirkung so klar, wie es das Material an keiner anderen Stelle tut.

Theoretische Rückbindung. Drei Bezüge greifen ineinander. Die Signalentdeckungstheorie zeigt, dass die naheliegende Antwort auf Alarmermüdung, die Anhebung der Schwelle, den Zweck des Systems untergräbt. Die Alarmbewirtschaftung liefert die Erkenntnis, dass eine zumutbare Last ohne eine permanent besetzte Empfängerrolle nicht definiert werden kann. Die Absorptionsfähigkeit erklärt, warum ein Meldeweg nicht durch Systemeinführung entsteht.

Abgrenzung gegen zwei verbreitete Deutungen. Das Material weist zwei Erklärungen ausdrücklich zurück, und die Zurückweisung ist konstruktbildend. Die erste lautet, es handle sich um ein Schulungsproblem. Dem wird entgegengehalten, dass Schulung die Aufmerksamkeit schärft, aber nicht regelt, was mit einem Befund um drei Uhr nachts geschieht, wenn die geschulte Person nicht im Dienst ist. Die zweite lautet, eine Plattform habe die Mechanik bereits eingebaut. Dem wird entgegengehalten, dass ein Werkzeug die Umsetzung unterstützt, aber die Festlegung nicht ersetzt, wer bei welchem Befund innerhalb welcher Frist was tut. K2 ist damit weder ein Wissens- noch ein Werkzeugproblem, sondern ein Festlegungsproblem.

5.3 K3 Selektion

Definition. Die dritte Übergabestelle ist geschlossen, wenn das Objekt des ersten Piloten nach der Höhe seiner Ausfallfolge und nicht nach der Leichtigkeit seiner Ausrüstung gewählt wurde, genauer: wenn die Wahl entlang beider Achsen erfolgte und das gewählte Objekt eine hohe Ausfallfolge bei vertretbarem Nachrüstaufwand aufweist.

Beleg. Acht Fundstellen in vier Quellen. Der Verlustmechanismus unterscheidet sich von den übrigen dreien. An K1 und K2 geht Wirkung verloren, weil eine Handlung unterbleibt. An K3 geht sie verloren, obwohl alles funktioniert: Der Pilot misst zuverlässig, erkennt Schäden und verhindert womöglich Ausfälle, nur haben diese Ausfälle keine nennenswerten Kosten verursacht. Das Material formuliert das in einer Wendung, die den Kern trifft: Ein Pilot an der unkritischen Anlage messe zuverlässig, erzeuge aber kaum Wirkung, wenn er erfolgreich sei.

Der Zurechnungsfehler. Daraus folgt ein zweiter, schwerer wiegender Effekt. Weil der Pilot keine sichtbare Wirkung erzeugt, wird er als gescheitert bewertet, und die Bewertung trifft nicht die Objektwahl, sondern die Methode. Das Material hält fest, der Pilot gelte als gescheitert, obwohl die Methode funktioniert hätte. Für die Organisation entsteht daraus eine dauerhafte Festlegung: Die Erfahrung, dass vorausschauende Instandhaltung im eigenen Haus nichts gebracht hat, überlebt die Kenntnis darüber, warum. K3 erzeugt damit nicht nur einen einmaligen Verlust, sondern eine Sperre für spätere Versuche.

Abhängigkeit von K1. K3 ist die einzige Stelle, die eine andere voraussetzt. Die erste Achse der Priorisierung ist die Ausfallfolge je Anlage, also genau das Ergebnis von K1. Wer K1 nicht geschlossen hat, kann K3 nicht anders als nach Zugänglichkeit entscheiden, weil ihm der zweite Maßstab fehlt. Die Kette ist an dieser Stelle nicht nur zeitlich, sondern sachlich geordnet.

Theoretische Rückbindung. Der Pilot als gekaufte Option nach Dixit und Pindyck. Ein Pilot an einem folgenlosen Objekt kauft eine Option ohne Basiswert.

5.4 K4 Bindung

Definition. Die vierte Übergabestelle ist geschlossen, wenn vor Abschluss des ersten Vertrags festgelegt ist, in welchem Format die eigenen Rohdaten herausgegeben werden, über welche Schnittstellen das System an

bestehende Auftrags- und Planungssysteme angebunden werden kann, welche Laufzeit und Kündigungsfrist gelten und unter welchen Bedingungen der Ausstieg möglich ist.

Beleg. Sieben Fundstellen in zwei Quellen. Dies ist die schwächste Beleglage der vier Stellen, und sie wird hier ausdrücklich als solche geführt. K4 kommt in drei der vier Fachartikel nicht vor, nicht in der Kreuzprüfungsquelle und, wie Abschnitt 7 zeigt, in keinem einzigen Merkmal des abgeleiteten Bewertungsinstruments. Anders als bei K1 bis K3 stützt sich die Stelle im Wesentlichen auf einen einzigen Text.

Warum sie dennoch aufgenommen wird. Drei Gründe. Erstens ist die Beleglage schwach, nicht widersprüchlich: Keine Quelle spricht gegen K4, die übrigen schweigen. Zweitens ist die eine Fundstelle theoretisch die ergiebigste des gesamten Materials. Sie lautet sinngemäß, Pilotverträge blieben selten befristet, weil die eigenen Daten, das aufgebaute Prozesswissen und die bereits getätigten Aufwendungen dafür sorgten, dass aus dem Pilotanbieter der langfristige Anbieter werde, ob geplant oder nicht. Das benennt eine faktische Unwiderruflichkeit bei formaler Befristung und führt sie auf drei benennbare Mechanismen zurück. Drittens folgt K4 aus der Realoptionsbetrachtung zwingend, sobald man den Piloten als Option auffasst: Wer die Ausübungsfreiheit vorab veräußert, entwertet die Option, die er gerade kauft.

Die Zeitasymmetrie. K4 hat eine Eigenschaft, die keine der anderen Stellen aufweist. Ihre Wirkung tritt zuletzt ein, häufig im zweiten oder dritten Jahr, während die Entscheidung darüber als erste unwiderruflich fällt, nämlich mit der Unterschrift vor dem Piloten. Zwischen Entscheidung und Wirkung liegt die gesamte Laufzeit des Vorhabens, und in dieser Zeit wächst der Bestand an eigenen Daten im System des Anbieters kontinuierlich an. Daraus folgt Proposition P3.

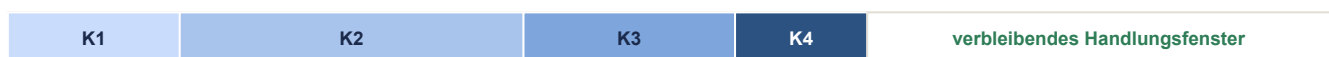
5.5 Die Konstruktdefinition

Die Wirkungskette der vorausschauenden Instandhaltung ist die geordnete Folge von vier Übergabestellen zwischen dem physikalisch messbaren Frühindikator eines Anlagenschadens und dem wirtschaftlich realisierten Ertrag seiner Vermeidung. Sie umfasst die Bewertung der Ausfallfolge je Anlage (K1), die Adressierung des Befundes an eine benannte Rolle mit Frist und Reaktionsregel (K2), die Selektion des Pilotobjekts nach Ausfallfolge statt nach Zugänglichkeit (K3) und die vertragliche Bindung mit erhaltener Ausstiegssfreiheit (K4). An jeder Stelle entscheidet eine organisatorische Festlegung und keine technische Eigenschaft über den Übergang zum nächsten Zustand. Jede Stelle verbraucht einen Teil des P-F-Intervalls, das die Physik des Schadensverlaufs vorgibt und das durch keine organisatorische Maßnahme verlängert werden kann.

Vom Signal zum Ertrag: vier Übergaben



Das P-F-Intervall als verbrauchte Ressource



P: erkennbarer potenzieller Ausfall

F: funktionaler Ausfall

Die Anteile sind schematisch. Was eine Stelle verbraucht, steht der nächsten nicht mehr zur Verfügung.

Abbildung 1. Die Wirkungskette. Fünf Zustände, vier Übergabestellen und das P-F-Intervall als gemeinsame Ressource. Jede Stelle verbraucht Zeit aus einem Fenster, das die Physik des Schadensverlaufs vorgibt.

5.6 Zwei Randbedingungen, die keine Übergabestellen sind

Zwei weitere Kandidaten wurden geprüft und begründet ausgeschlossen. Sie hier zu unterschlagen würde das Konstrukt sauberer erscheinen lassen, als es ist.

R1, die Eignung des Anlagenbestands. Das untersuchte Bewertungsinstrument fragt nach dem Anteil rotierender Aggregate und nach der Kenntnis des P-F-Intervalls der wichtigsten Fehlerbilder. Die Kursunterlagen der Praxis geben Vorwarnzeiten je Fehlerbild an, die von Wochen bis zu Minuten reichen. Wo das Intervall in Stunden statt in Wochen gemessen wird, kann keine organisatorische Kette es nutzen. Dies ist jedoch keine Stelle, an der Wirkung verloren geht, sondern die Bedingung dafür, dass überhaupt eine Kette existiert. R1 wird deshalb als Vorbedingung geführt.

R2, die Freigabeadressierung. Dasselbe Instrument fragt nach dem Zugang zur Geschäftsführung und nach einem Budgetrahmen ohne Gremienverfahren. Das ist Adressierung, betrifft aber die Investitionsentscheidung und nicht den einzelnen Befund. Die Versuchung, dies unter K2 zu fassen, wird zurückgewiesen: K2 ist operativ und wiederholt sich bei jedem Signal, R2 ist einmalig und organisatorisch. Beide unter einer Kategorie zu führen würde die Kategorie unscharf machen.

5.7 Drei Befunde aus der Kodierung

Über die Zuordnung der einzelnen Fundstellen hinaus ergab die Kodierung drei Beobachtungen, die keine der Quellen selbst ausspricht und die zusammen die Kettenstruktur tragen.

Erstens werden zwei Stellen als eine Ursache genannt. In der Antwort auf den Einwand, man habe es versucht und es habe nichts gebracht, heißt es, der Pilot sei am einfachsten statt am teuersten Objekt gelaufen und die Befunde seien in einem Dashboard statt in einem Wartungsauftrag gelandet. Das ist K3 und K2 in einem Satz, als gemeinsame Erklärung eines einzigen Scheiterns. Der Text behandelt sie nicht als zwei unabhängige Fehler, sondern als eine Verlustursache mit zwei Orten.

Zweitens rekonstruiert eine Prüfliste die Reihenfolge. Die zusammenfassende Quelle schließt mit zwölf Prüfpunkten, die als bloße Zusammenfassung angelegt sind. Ihre Ordnung folgt jedoch lückenlos der Kette: Die ersten beiden Punkte betreffen die Bezifferung der Ausfallfolgen und die Strategieentscheidung je Anlage, also K1. Die Punkte drei und vier betreffen Auflösung und Kennzahlenwahl, also die Detektionsvorbedingung. Die Punkte fünf bis acht betreffen Empfänger, Eskalationsregel, Weg in den Auftrag und Alarmarchitektur, also K2. Die Punkte neun und zehn betreffen die Objektwahl und den Aufwandszuschlag, also K3. Die Punkte elf und zwölf betreffen den Anbietervergleich und die Ausstiegsbedingungen im Erstvertrag, also K4. Die Reihenfolge ist nicht kommentiert und nicht begründet. Sie ergibt sich, weil der Text der Sache folgt. Dies ist der stärkste Einzelbeleg dafür, dass die vier Gegenstände eine Sequenz bilden und keine Aufzählung.

Drittens wiederholt sich die Prämisse wörtlich. Der Satz, die Technologie sei die einfache Hälfte, steht wortgleich in drei der vier unabhängig verfassten Fachartikel und als Schlusssatz der Prüfliste in der zusammenfassenden Quelle, dort ergänzt um die Aussage, die vier Entscheidungen davor bestimmten, ob sie wirke. Vier Texte, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten und über unterschiedliche Gegenstände verfasst wurden, formulieren dieselbe Grundannahme in denselben Worten.

6. Abgrenzung gegen etablierte Instrumente

Ein Konstrukt rechtfertigt sich nur, wenn es etwas fasst, was vorhandene Instrumente nicht fassen. Geprüft wurden acht Instrumente aus der Instandhaltung, der Anlagenwirtschaft und der Unternehmenssteuerung. Beurteilt wurde jeweils, ob das Instrument die betreffende Übergabestelle adressiert, sie teilweise adressiert oder sie nicht behandelt. Beurteilungsgrundlage ist der jeweilige Regelungs- oder Methodengegenstand, nicht die Frage, was sich mit dem Instrument im Einzelfall zusätzlich tun ließe.

Kein Instrument adressiert die vierte Stelle

	K1 Bewertung	K2 Adressierung	K3 Selektion	K4 Bindung
Zustandsüberwachung (ISO 17359, 13374)	—	—	—	—
Schwingungsbewertung (ISO 20816-1)	—	—	—	—
Instandhaltungsmanagement (CMMS, EAM)	—	●	—	—
Zuverlässigkeitsorientierte IH (RCM)	●	◐	●	—
Fehlermöglichkeitsanalyse (FMEA)	●	—	●	—
Umfassende produktive IH (TPM, OEE)	◐	—	◐	—
Anlagenwirtschaft (ISO 55000)	◐	◐	◐	—
Reifegradmodelle Digitalisierung	◐	—	—	—

● adressiert

◐ teilweise

— nicht behandelt

Spalte K4: keine Nennung

Abbildung 2. Die Abgrenzungsmatrix. Acht etablierte Instrumente gegen die vier Übergabestellen. Kein Instrument adressiert K4, und keines adressiert K1 und K4 zugleich.

Instrument	K1 Bewertung	K2 Adressierung	K3 Selektion	K4 Bindung
Zustandsüberwachung nach ISO 17359 und ISO 13374	nein	nein	nein	nein
Schwingungsbewertung nach ISO 20816-1	nein	nein	nein	nein
Instandhaltungsmanagementsystem (CMMS, EAM)	nein	ja	nein	nein
Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung (RCM)	ja	teilweise	ja	nein
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA)	ja	nein	ja	nein
Umfassende produktive Instandhaltung (TPM) mit Gesamtanlageneffektivität	teilweise	nein	teilweise	nein
Anlagenwirtschaft nach ISO 55000	teilweise	teilweise	teilweise	nein
Reifegradmodelle der industriellen Digitalisierung	teilweise	nein	nein	nein

Der Befund. Kein Instrument adressiert K4. Kein Instrument adressiert K1 und K4 zugleich. Und nur eines adressiert K2 vollständig, nämlich das Instandhaltungsmanagementsystem, das dafür an den übrigen drei Stellen nichts beiträgt. Die Zustandsüberwachungsnormen, also genau jene Regelwerke, die dem Gegenstand am nächsten stehen, adressieren keine einzige der vier Stellen. Das ist kein Mangel dieser Normen. Sie regeln, was sie zu regeln beanspruchen. Es zeigt aber, dass der Gegenstand dieses Papiers außerhalb ihres Geltungsbereichs liegt.

6.1 Die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung verlangt eine gesonderte Behandlung

Ein Instrument in dieser Tabelle darf nicht mit einer knappen Zeile abgetan werden. Die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung adressiert K1 und K3 methodisch vollständig. Sie verlangt eine Analyse der Funktionen, der Funktionsausfälle und ihrer Folgen, sie ordnet die Folgen nach Kategorien einschließlich der betrieblichen und wirtschaftlichen, und sie leitet die Wahl der Instandhaltungsstrategie aus dieser Ordnung ab. Wer eine solche Analyse durchgeführt hat, hat K1 beantwortet und verfügt über die

Grundlage für K3. Der Ansatz stammt aus derselben Arbeit, die auch das P-F-Intervall eingeführt hat, ist also nicht nur verwandt, sondern gemeinsamen Ursprungs.

Die Abgrenzung darf deshalb nicht behaupten, die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung leiste das nicht. Sie muss auf eine andere Ebene zielen, und zwar auf die Verbreitung. Der Ansatz ist personal- und zeitintensiv, in seiner vollständigen Form auf sicherheitskritische Anwendungen zugeschnitten und im industriellen Mittelstand der hier betrachteten Größe nach der Erfahrung des Autors selten anzutreffen. Das ist eine Aussage über die Anwendungshäufigkeit, nicht über die Methodengüte, und sie ist im Rahmen dieses Papiers nicht belegt. Sie wird deshalb als Vermutung gekennzeichnet und in die Forschungsagenda aufgenommen.

Daraus folgt eine Einschränkung des Beitrags, die hier klar gesagt werden soll: Für ein Unternehmen, das eine vollständige zuverlässigkeitsorientierte Analyse betreibt, leistet dieses Konstrukt an K1 und K3 nichts Neues. Sein Beitrag liegt dort in K2 und K4 und in der Aussage über die Verknüpfung der Stellen.

6.2 Warum Reifegradmodelle die Kette nicht abbilden können

Reifegradmodelle der industriellen Digitalisierung bewerten Stufen der technischen und organisatorischen Entwicklung und verdichten sie zu einer Kennzahl. Sie sind für die Standortbestimmung nützlich und für die vorliegende Frage aus einem strukturellen Grund ungeeignet: Sie sind additiv. Eine Schwäche in einer Dimension wird durch Stärke in einer anderen ausgeglichen, weil am Ende summiert oder gemittelt wird.

Wenn die Übergabestellen einer Kette angehören, ist dieses Vorgehen falsch. Eine Kette, die an einer Stelle reißt, ist gerissen, gleichgültig wie fest die übrigen Glieder sind. Ein Unternehmen mit vorbildlicher Bewertung der Ausfallfolgen, sorgfältiger Objektwahl und ungeklärter Adressierung erhält in einem additiven Modell eine gute Bewertung und erzielt in der Sache nichts. Genau diese Aussage ist als Proposition P1 formuliert und damit prüfbar. Abschnitt 7 zeigt, dass das Problem nicht theoretisch ist.

7. Instanziierung: die Prüfung eines vorhandenen Instruments

Aus dem untersuchten Material ist ein Selbstbewertungsinstrument hervorgegangen, das in zehn Merkmalen die Voraussetzungen für eine Entscheidung über vorausschauende Instandhaltung erhebt und sie in vier Dimensionen gliedert. Es wird hier als ein dokumentierter Anwendungsfall behandelt, nicht als Empfehlung. Seine Prüfung gegen das Konstrukt ist zugleich der schärfste verfügbare Test dafür, ob das Konstrukt etwas leistet.

Merkmal	Gegenstand	Zuordnung
1	Vollständiger Überblick über den Anlagenbestand	Vorbedingung zu K3
2	Bewertung des Bestands nach Kritikalität	K3
3	Anteil rotierender Aggregate	R1
4	Stillstands- und Instandhaltungsaufzeichnungen der letzten 12 bis 24 Monate	Vorbedingung zu K1
5	Stillstandskosten je Anlage quantifiziert	K1
6	Zustandsorientierte Instandhaltung im Einsatz	R1
7	Sensorik oder Zustandsüberwachung im Einsatz	Detektion
8	P-F-Intervall der wichtigsten Fehlerbilder bekannt	R1
9	Geschäftsführung für die Investitionsentscheidung erreichbar	R2
10	Budgetrahmen ohne Gremienverfahren verfügbar	R2

Zwei Befunde ergeben sich daraus.

Erstens fehlen zwei der vier Stellen vollständig. Kein Merkmal erhebt, ob ein Befund einen benannten Empfänger, eine Frist oder eine Eskalationsregel hat. Kein Merkmal erhebt, ob Datenherausgabe, Schnittstellenoffenheit, Laufzeit oder Ausstiegsbedingungen geklärt sind. Das Instrument erhebt K1 und K3 sowie die Randbedingungen, und es lässt K2 und K4 aus. Die Systematik dieser Auslassung ist aufschlussreich: Erhoben wird, was sich vor Projektbeginn feststellen lässt. Nicht erhoben wird, was sich erst im Projekt zeigt. Das ist aus der Erhebungslogik verständlich und für den Zweck des Instruments folgenreich, denn die ausgelassene Stelle K2 ist die im Material am dichtesten belegte.

Zweitens ist die Auswertung additiv. Die zehn Merkmale werden gleich gewichtet und zu einem Prozentwert summiert, aus dem sich eine Reifestufe ergibt. Ein Unternehmen, das K1 und K3 sowie die Randbedingungen vollständig erfüllt, erreicht damit eine hohe Bewertung und wird als entscheidungsreif ausgewiesen, ohne dass zu K2 und K4 überhaupt eine Aussage vorläge. Nach dem hier entwickelten Konstrukt wäre das eine Fehlbewertung, und zwar systematisch in Richtung Überschätzung.

Diese Prüfung richtet sich gegen ein Werkzeug des Autors. Sie steht hier, weil sie zeigt, dass das Konstrukt eine Aussage erzeugt, die dem vorhandenen Instrument nicht zu entnehmen war, und weil ein Papier, das die

Beleglage seines Feldes prüft, bei den eigenen Werkzeugen nicht haltmachen kann. Ob aus dem Befund eine Überarbeitung des Instruments folgt, ist eine Entscheidung außerhalb dieses Papiers.

8. Propositionen

Die folgenden Aussagen sind aus den Wirkungsbehauptungen des Praxismaterials abgeleitet und in prüfbare Form gebracht. Keine von ihnen ist belegt. Jede benennt die abhängige Größe, an der sie scheitern könnte.

P1 Multiplikativität. Der realisierte Ertrag eines Vorhabens zur vorausschauenden Instandhaltung verhält sich zum Produkt der Übergabegütern der vier Stellen und nicht zu ihrer Summe. Eine Übergabegüte nahe null setzt den Ertrag unabhängig von den übrigen drei Stellen nahe null. Abhängige Größe: der über zwölf Monate zurechenbare Nettonutzen. Prüfbar an einer Stichprobe abgeschlossener Vorhaben, deren Übergabegütern je Stelle unabhängig eingestuft werden. Dies ist die zentrale Aussage des Papiers, und sie widerspricht der additiven Logik verbreiteter Reifegradmodelle.

P2 Reihenfolge. Wird K3 vor K1 entschieden, sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass nach Abschluss des Piloten eine zweite Ausbaustufe freigegeben wird, weil dem Ergebnis der Vergleichsmaßstab fehlt. Abhängige Größe: die Freigabequote der Folgestufe.

P3 Irreversibilitätsasymmetrie. Die vierte Stelle wird zeitlich zuerst unwiderruflich entschieden und wirkt zuletzt. Der erwartete Schaden aus einer ungeklärten vierten Stelle wächst deshalb mit der Laufzeit des Vorhabens, getrieben durch den Zuwachs an eigenen Daten im System des Anbieters. Abhängige Größe: der Anteil der Pilotverträge, die ohne erneute Auswahlentscheidung in ein Dauerverhältnis übergehen. Diese Proposition ist mit vergleichsweise geringem Aufwand prüfbar, weil sie keinen Zugang zu Betriebsdaten voraussetzt, sondern nur zu Vertragsverläufen.

P4 Alarmlast. Der Zusammenhang zwischen Meldungsfrequenz und Bearbeitungsquote ist nicht linear, sondern weist eine Schwelle auf, oberhalb derer eine Selektion ohne explizite Regel einsetzt. Die Lage dieser Schwelle hängt davon ab, ob eine Empfängerrolle permanent besetzt ist, und liegt bei nicht permanent besetzter Rolle deutlich unter den Kennwerten der Prozessleittechnik. Abhängige Größe: der Anteil der Meldungen, die zu einer dokumentierten Beurteilung führen.

P5 Detektionsgüte ohne Wirkung. Oberhalb einer Mindestschwelle erhöht eine Verbesserung der Detektionsgüte den realisierten Ertrag nicht, solange die organisatorische Reaktionszeit das P-F-Intervall aufzehrt. Abhängige Größe: der Anteil der Befunde, die zu einer geplanten statt einer ungeplanten Maßnahme führen. Dies ist die schärfste Aussage gegen die vorherrschende Forschungsrichtung des Feldes.

P6 Fensterlänge. Der Ertrag steigt mit dem Verhältnis von P-F-Intervall zu organisatorischer Reaktionszeit, nicht mit der absoluten Vorwarnzeit. Ein Verfahren mit sechs Wochen Vorwarnzeit in einer Organisation mit

fünf Wochen Reaktionszeit leistet weniger als eines mit zwei Wochen Vorwarnzeit in einer Organisation mit zwei Tagen Reaktionszeit. Abhängige Größe: derselbe Anteil wie in P5.

P7 Offenlegung der Unsicherheit. Das explizite Ausweisen der Unsicherheit der eigenen Stillstandskostenschätzung erhöht die Wahrscheinlichkeit einer Investitionsfreigabe, statt sie zu senken. Abhängige Größe: die Freigabequote. Diese Proposition ist gegen die naheliegende Erwartung formuliert und deshalb besonders prüfenswert. Sie greift die Beobachtung aus Abschnitt 5.1 auf, dass für eine Rangfolge keine genaue Zahl nötig ist, und knüpft an das Merkmal des Belastbarkeitsausweises aus dem Vorgängerpapier des Autors an.

9. Diskussion und Grenzen

Die Multiplikativität ist eine starke Annahme. Sie ist der Kern des Konstrukts und zugleich seine angreifbarste Stelle. Sie unterstellt, dass keine Stelle die Schwäche einer anderen ausgleichen kann. Die Praxis kennt Gegenbeispiele: Ein außergewöhnlich erfahrener Instandhalter kann eine fehlende Eskalationsregel eine Zeit lang ersetzen, und ein Anbieter kann eine ungeklärte Datenherausgabe kulant handhaben. Solche Fälle sprechen nicht gegen die Ordnung der Stellen, wohl aber gegen die strenge Produktform. Denkbar ist ebenso eine steile Sättigungsfunktion, in der eine schwache Stelle den Ertrag stark, aber nicht vollständig dämpft. Die Entscheidung darüber ist empirisch und in Abschnitt 11 als Vorhaben benannt. Bis dahin gilt die Produktform als Modell und nicht als Befund.

Der Zielkonflikt an K2 ist nicht auflösbar. Die Signalentdeckungstheorie schließt aus, dass Trefferquote und Fehlalarmrate durch Schwellenverschiebung gemeinsam verbessert werden. Eine abgestufte Reaktion mildert die Folgen, indem sie unsichere Anzeigen billiger behandelt, aber sie beseitigt den Konflikt nicht. Wer eine PdM-Einführung ohne die Bereitschaft betreibt, eine bestimmte Zahl folgenloser Prüfungen als Kosten zu akzeptieren, wird die Schwellen so lange anheben, bis das System nur noch bestätigt, was ohnehin absehbar war.

Die Kette erbt die Qualität ihrer Eingangsdaten. K1 setzt voraus, dass Stillstandszeiten und Folgekosten überhaupt erfasst wurden. Wo die Betriebsdatenerfassung Stillstände nicht nach Ursache trennt oder Sonderlogistik nicht der auslösenden Anlage zurechnet, liefert auch eine sorgfältige Verdichtung eine Zahl von begrenztem Wert. Das Konstrukt beschreibt, wo Wirkung verloren geht, und sagt nichts darüber, wie gut die Ausgangsdaten sind.

Verdichtung erzeugt ein Sicherheitsgefühl, das der Datenlage vorseilen kann. Sobald eine Zahl je Anlage vorliegt und eine Rangfolge daraus entsteht, wirkt die Entscheidungslage geordneter, als sie ist. Die Genauigkeitsanmutung einer Zahl übersteigt regelmäßig die Genauigkeit ihrer Herkunft. Dagegen hilft allein, die Unsicherheit mit auszuweisen, was Proposition P7 zu einer nicht nur akademischen Frage macht.

Was gemessen wird, wird gesteuert. Ein System, das den Zustand einiger Anlagen sichtbar macht, verschiebt Aufmerksamkeit auf diese Anlagen, auch dort, wo das sachlich nicht gerechtfertigt ist. Die nicht überwachten Aggregate werden nicht sicherer, sie werden unsichtbarer. Wo die Auswahl der überwachten Objekte nach K3 erfolgt, ist diese Verschiebung gewollt. Wo sie nach Zugänglichkeit erfolgte, verstärkt sie den Fehler.

Die Kette braucht einen Eigentümer. Die vier Stellen liegen in unterschiedlichen Zuständigkeiten: die Bewertung im Controlling, die Adressierung in der Instandhaltung, die Objektwahl in der Werkleitung, die Bindung im Einkauf. Keine dieser Funktionen ist für die Übergänge zwischen ihnen zuständig. Eine Kette reißt zuerst an der Stelle, die niemandem gehört. Diese Beobachtung folgt aus dem Konstrukt, ist aber im Material nicht belegt und wird deshalb als Vermutung geführt.

Die Beleglage ist über die Stellen ungleich verteilt. K2 stützt sich auf sechzehn Fundstellen in vier Quellen, K4 auf sieben in zwei. Diese Ungleichheit ist kein Zufall, sondern spiegelt vermutlich die Perspektive einer Beratungspraxis, die häufiger in laufende Projekte gerufen wird als in Vertragsverhandlungen. Ein anderes Materialkorpus, etwa aus dem Einkauf, würde die Gewichtung wahrscheinlich verschieben.

10. Limitationen

Das Papier ist konzeptionell. Es enthält keine Empirie, keine Fallstudie und keinen Wirksamkeitsnachweis.

Die Materialbasis ist ein Autor, eine Beratungspraxis, sieben Dokumente aus einem Zeitraum von zwei Monaten. Eine Interkoderübereinstimmung wurde nicht bestimmt, weil eine zweite kodierende Person nicht zur Verfügung stand. Das Material wurde nicht zu Erhebungszwecken verfasst, sondern zu Vertriebs- und Schulungszwecken, und ist entsprechend selektiv.

Der Autor hat ein wirtschaftliches Interesse am Gegenstand. Die getroffenen Vorkehrungen sind in der Interessenoffenlegung benannt. Sie können den Konflikt begrenzen, nicht beseitigen.

Die vier Stellen werden nicht als vollständig behauptet. Es ist möglich, dass weitere existieren, die im untersuchten Material nicht auftauchen, weil die Praxis, aus der es stammt, sie nicht antrifft. Die Prüfung auf Vollständigkeit ist Gegenstand der Forschungsagenda.

Der Geltungsbereich ist beschränkt auf Fertigungsunternehmen mit rotierenden Aggregaten im deutschsprachigen Raum, in einer Größenordnung von etwa fünfzig bis fünfhundert Beschäftigten. Für Prozessanlagen, für sicherheitskritische Anwendungen mit vorgeschriebenen Instandhaltungsverfahren und für Konzernstrukturen mit eigener Instandhaltungsorganisation ist keine Aussage getroffen.

Zwei Belege konnten nicht am Primärdokument geprüft werden. Die Kennwerte für die zumutbare Alarmlast wurden mehreren übereinstimmenden Fachdarstellungen entnommen, nicht dem kostenpflichtigen Normtext.

Die Schwellenwerte für Schwingungskennzahlen wurden aus demselben Grund im Papier nicht verwendet. Beide Punkte sind vor einer Weiterverwertung zu schließen.

11. Forschungsagenda

Fünf Vorhaben ergeben sich, geordnet nach steigendem Aufwand.

Erstens die Vertragsanalyse zu P3. Eine Erhebung unter Unternehmen, die einen PdM-Piloten abgeschlossen haben, mit der Frage, ob dem Pilotanbieter ohne erneute Auswahlentscheidung ein Dauerverhältnis folgte, und mit welchen Regelungen zu Datenherausgabe und Laufzeit der Erstvertrag versehen war. Dieses Vorhaben braucht keinen Zugang zu Betriebsdaten und ist deshalb der günstigste Einstieg.

Zweitens die Messung der Übergabezeit. Erhebung der Zeitspanne zwischen dem Auftreten einer Anomalie im System und dem Anlegen eines Auftrags im Instandhaltungsmanagementsystem, gemessen an den Zeitstempeln beider Systeme. Diese Größe ist in vielen Installationen ohne zusätzliche Erhebung verfügbar und operationalisiert P5 und P6 unmittelbar.

Drittens die Prüfung der Multiplikativität. Eine Stichprobe abgeschlossener Vorhaben, in der die vier Übergabegütern unabhängig eingestuft und gegen den zurechenbaren Nutzen gestellt werden. Additive und multiplikative Modelle lassen sich daran gegeneinander prüfen. Dies ist der eigentliche Test des Konstrukts und der aufwendigste.

Viertens die Verbreitungsfrage. Die in Abschnitt 6.1 als Vermutung gekennzeichnete Aussage, dass die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung in Unternehmen dieser Größe selten vollständig angewandt wird, ist erhebbar und entscheidet über die Reichweite des Beitrags.

Fünftens die Vollständigkeitsprüfung. Eine Befragung nach dem Delphi-Verfahren unter Instandhaltungsverantwortlichen zu der Frage, ob die vier Stellen die beobachteten Verlustursachen abdecken und welche weiteren zu ergänzen wären.

12. Fazit

Die Diskussion über vorausschauende Instandhaltung wird als technische Diskussion geführt. Sie fragt nach Kennwerten, Verfahren und Modellen und misst den Fortschritt daran, wie früh und wie sicher ein Schaden erkannt wird. Diese Frage ist weitgehend beantwortet. Die einschlägigen Normen regeln sie vollständig, die Komponenten sind Standardgüter geworden, und die dafür erforderliche Investition liegt in einer Größenordnung, die für den industriellen Mittelstand erreichbar ist.

Unbeantwortet ist die andere Frage: was mit einem Befund geschieht, nachdem er vorliegt. Zwischen dem messbaren Frühindikator und dem realisierten Ertrag liegen vier Übergaben, an denen jeweils eine Festlegung und keine Technik entscheidet. Ob die Ausfallfolge einer Anlage überhaupt beziffert ist. Ob ein Befund eine benannte Person mit einer Frist erreicht. Ob der erste Pilot dort läuft, wo ein Erfolg sichtbar wird. Ob der erste Vertrag die Freiheit erhält, die der Pilot erst schaffen soll. Alle vier werden entschieden, bevor der erste Sensor bestellt ist, und keine von ihnen wird in der Regel als Entscheidung wahrgenommen.

Dieses Papier ordnet diese vier Stellen zu einer Kette und behauptet, dass sie multiplikativ wirken. Es belegt diese Behauptung nicht. Es formuliert sie so, dass sie widerlegt werden kann, grenzt sie gegen acht etablierte Instrumente ab und weist nach, dass keines von ihnen die vierte Stelle behandelt. Und es hält fest, dass die Wirtschaftlichkeitszahlen, mit denen das Feld argumentiert, einer Prüfung an den Primärquellen nicht standhalten: Sie führen auf eine Regierungspublikation von 2010 zurück, die ungenannte Umfragen zitiert, und auf eine Studie über den Ausfall virtualisierter Rechnersysteme aus dem Jahr 2016.

Daraus folgt keine Absage an die Sache. Es folgt eine Verschiebung der Frage. Solange nicht bekannt ist, wie viel Wirkung an den Übergabestellen verloren geht, ist auch nicht bekannt, wie viel vorausschauende Instandhaltung leisten kann. Die Antwort darauf beginnt nicht mit einem besseren Verfahren, sondern mit einer Messung der eigenen Übergabezeit.

Literatur

Aberdeen Group (2016). *Maintaining Virtual System Uptime in Today's Transforming IT Infrastructure*. Verfasst von J. Rapoza. Boston, MA: Aberdeen Group.

Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity. A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128 bis 152.

Dixit, A. K., & Pindyck, R. S. (1994). *Investment under Uncertainty*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 37(1), 32 bis 64.

Green, D. M., & Swets, J. A. (1966). *Signal Detection Theory and Psychophysics*. New York: Wiley.

International Organization for Standardization (2003 bis 2015). *ISO 13374. Condition monitoring and diagnostics of machine systems. Data processing, communication and presentation*. Genf: ISO.

International Organization for Standardization (2016). *ISO 20816-1. Mechanical vibration. Measurement and evaluation of machine vibration. Part 1: General guidelines*. Genf: ISO.

- International Organization for Standardization (2018). *ISO 17359. Condition monitoring and diagnostics of machines. General guidelines*. Genf: ISO.
- Moubray, J. (1997). *Reliability-Centred Maintenance* (2. Aufl.). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-Centered Maintenance*. Bericht an das Office of Assistant Secretary of Defense. San Francisco, CA: United Airlines.
- Platvoet, R. (2026). *Das Betriebslagebild. Konstruktdefinition, Abgrenzung und Bezugsrahmen eines Führungsinstruments für den industriellen Mittelstand*. PPI Working Paper 01/2026. Remscheid: Platvoet Performance Intelligence.
- Senseye Predictive Maintenance / Siemens (2023). *The True Cost of Downtime 2022*. Erhebung 2021 bis 2022.
- Sullivan, G. P., Pugh, R., Melendez, A. P., & Hunt, W. D. (2010). *Operations and Maintenance Best Practices. A Guide to Achieving Operational Efficiency* (Release 3.0, PNNL-19634). Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory für das Federal Energy Management Program, U.S. Department of Energy.