

WHITEPAPER

Predictive Maintenance Business Case

Von der Sensorik zum messbaren ROI

Ein praxisorientierter Leitfaden für Entscheider in der Fertigungsindustrie

Ungeplante Maschinenstillstände kosten Industrieunternehmen durchschnittlich 260.000 USD pro Stunde. Predictive Maintenance (PdM) ist die effektivste Methode, diese Kosten zu reduzieren — durch KI-gestützte Zustandsüberwachung, die Ausfälle Tage oder Wochen im Voraus erkennt. Dieses Whitepaper beschreibt den vollständigen Weg: von der Sensorauswahl über die Datenarchitektur bis zum belastbaren Business Case, der Investitionsentscheidungen fundiert absichert.

Autor	Ralf Platvoet, Diplom-Ökonom
Organisation	PPI - Platvoet Performance Intelligence
Erscheinungsjahr	2026
Umfang	ca. 24 Seiten
Themenbereich	Industrial IoT · Predictive Maintenance · Business Case · ROI

platvoet.org

Executive Summary

Ungeplante Maschinenstillstände sind einer der größten vermeidbaren Kostentreiber in der industriellen Produktion. Laut Branchenanalysen (McKinsey, Aberdeen Group, Deloitte 2023-2026) kosten Fertigungsunternehmen unerwartete Ausfälle im Schnitt **260.000 USD pro Stunde** — bei prozessintensiven Branchen wie der Chemie oder Stahlindustrie liegt dieser Wert noch deutlich höher.

Predictive Maintenance (PdM) adressiert dieses Problem direkt: Statt Maschinen nach Zeitplan zu warten (präventiv) oder nach Ausfall zu reparieren (reaktiv), erkennt PdM Degradationsmuster in Sensorssignalen **Tage bis Wochen vor einem tatsächlichen Ausfall** — und ermöglicht gezielt geplante Eingriffe im Wartungsfenster.

Der Business Case für PdM ist empirisch gut belegt: Unternehmen, die PdM systematisch einführen, reduzieren Wartungskosten um 25-30 %, verringern Maschinenstillstände um 70 % und verlängern Asset-Lebenszyklen messbar. Der Return on Investment liegt bei methodisch sauber aufgesetzten Programmen typischerweise bei **300 % über 3 Jahre**, mit Amortisationszeiten von 8-24 Monaten.

Dieses Whitepaper zeigt den vollständigen Implementierungsweg: von der Sensorauswahl über Datenarchitektur und KI-Methoden bis zum belastbaren Business Case mit konservativen und optimistischen ROI-Szenarien.

Kernaussagen

- Ungeplante Stillstände kosten Fertigungsunternehmen im Schnitt 260.000 USD/h (Branchendurchschnitt 2026).
- PdM reduziert Maschinenstillstände um bis zu 70 % und Wartungskosten um 25-30 %.
- Typischer ROI: 300 % über 3 Jahre; Amortisationszeit: 8-24 Monate je nach Anlage.
- Vibrationssensorik ist der kosteneffizienteste Einstiegspunkt für die meisten Anwendungen.
- KMU können PdM mit Pilotkosten unter 50.000 EUR starten — ohne grosse IT-Organisation.

1. Wartungsstrategien im Vergleich: Warum PdM gewinnt

Bevor der Business Case aufgebaut werden kann, braucht es ein klares Bild der drei Wartungsparadigmen und ihrer jeweiligen ökonomischen Logik. Die Wahl der Strategie ist keine technische, sondern eine wirtschaftliche Entscheidung.

Reaktive Wartung (Run-to-Failure)		
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Keine Überwachung — Maschine läuft bis zum Ausfall ▸ Kein Planungsaufwand vorab ▸ Geeignet nur für unkritische, leicht ersetzbare Assets 	<p>Kostenprofil</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Höchste Kosten bei Ausfall (Emergency-Reparatur, Teile-Expressbeschaffung) ▸ Kosten/h Stillstand: typisch 5.000-50.000 EUR (Fertigung) bis 260.000 USD (Schwere Industrie) ▸ Kaskadenschäden: Folgeschäden an Nachbarbauteilen durch verspäteten Eingriff ▸ Bestandsrisiko: hohe Teilevorräte für alle möglichen Ausfälle 	<p>Einsatz</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Unkritische Hilfsaggregate ▸ Standardisierte, günstige Komponenten mit niedrigem Ausfallrisiko ▸ Keine Produktionsunterbrechung bei Ausfall

Präventive Wartung (Time-Based)		
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Wartung nach festem Zeitplan (z. B. alle 3 Monate) ▸ Basiert auf Herstellerempfehlungen, nicht auf tatsächlichem Zustand ▸ Schafft Planbarkeit, aber keine Optimierung 	<p>Kostenprofil</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Systematische Überwachung: 30-40 % der Eingriffe an noch intakten Maschinen ▸ Verschwendung: Ersatzteile, Wartungszeit, Produktionsstillstand ohne Not ▸ Risiko bleibt: Ausfall zwischen Wartungszyklen möglich ▸ Typische Kosten: 2-3x höher als notwendig 	<p>Einsatz</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Regulatorisch vorgeschriebene Wartungsintervalle (Druckbehälter, Aufzüge) ▸ Stark standardisierte Komponenten mit bekanntem Verschleissverhalten ▸ Anlagen ohne Sensorik und Dateninfrastruktur

Predictive Maintenance (Condition-Based)		
<p>Merkmale</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Kontinuierliche Zustandsüberwachung via Sensorik 	<p>Kostenprofil</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ 25-30 % Reduktion der Gesamtwartungskosten ▸ 70 % weniger ungeplante Stillstände 	<p>Einsatz</p> <ul style="list-style-type: none"> ▸ Rotierende Maschinen: Motoren, Pumpen, Kompressoren, Ventilatoren

<ul style="list-style-type: none"> ▶ KI-gestützte Erkennung von Degradationsmustern ▶ Wartungseingriff nur wenn und genau dann wenn nötig 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 15 % Reduktion der Ersatzteillvorräte (gezielte Beschaffung) ▶ ROI 300 % über 3 Jahre (typisch bei systematischer Einführung) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Produktionskritische Assets mit hohen Stillstandskosten ▶ Anlagen mit ausreichend Sensorinstallationsmöglichkeit
---	--	---

Der entscheidende ökonomische Mechanismus: PdM verlagert Wartungskosten von der reaktiven Notfallkategorie (höchste Kosten, unplanbar) in die geplante Intervention (niedrigste Kosten, optimaler Zeitpunkt). Dieser Shift erzeugt den Grossteil des Business-Case-Potenzials.

2. Sensorik: Das Fundament jedes PdM-Programms

Kein Algorithmus ist besser als die Daten, auf denen er basiert. Die Sensorauswahl ist daher die erste und wichtigste technische Entscheidung in einem PdM-Programm. Sie bestimmt, welche Fehlermodi früh erkannt werden können — und welche blind bleiben.

2.1 Die fünf zentralen Sensortypen

Für industrielle PdM-Anwendungen sind fünf Sensortypen besonders relevant — je nach Maschinentyp, Fehlermodell und Budget unterschiedlich priorisiert:

~ Vibrationssensor (Beschleunigungssensor) 150 - 800 EUR/Sensor	
<p>Erkennbare Fehlermodi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Lagerdefekte (häufigster Fehlertyp) ▶ Unwucht: Schmutz auf Lüfterflügelräder, Verschleiss ▶ Fehlaustrichtung von Wellen und Kupplungen ▶ Mechanische Lockerung (Schraubenverbindungen) ▶ Kavitation (Pumpen) ▶ Zahnadfehler (Getriebe) 	<p>Technologie & Anwendung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ MEMS-Beschleunigungssensor (piezoelektrisch oder kapazitiv) ▶ Frequenzbereich: 1 Hz - 20 kHz je nach Anwendung ▶ FFT-Analyse: Fehlerfrequenzen sind maschinenspezifisch berechenbar ▶ Drahtlos: NCD Gen4, LoRaWAN-Sensoren; kabelgebunden: ifm, SKF ▶ Temperaturbereich: -40 bis +125 Grad C (Standard MEMS)
T Temperatursensor 20 - 400 EUR/Sensor	
<p>Erkennbare Fehlermodi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Lagerschäden (Erwärmung vor mechanischem Versagen) ▶ Kühlwasser-/Schmierstoffverlust ▶ Elektrische Überlast (Motorwicklungen) ▶ Wärmeaustauscher-Fouling ▶ Überhitzung von Hydraulikflüssigkeiten 	<p>Technologie & Anwendung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ PT100 / PT1000 RTDs (Widerstandstemperaturdetektoren) für Direktmessung ▶ Thermoelemente Typ K/J für Hochtemperaturanwendungen ▶ Infrarot-Thermometer (berührungslos) für bewegliche Teile ▶ IR-Kamera (Thermografie): schnelles Screening ganzer Anlagen ▶ Oft kombiniert mit Vibrationssensoren in einem Gerät
I Stromsignatur-Analyse (Motor Current Signature Analysis, MCSA) 50 - 300 EUR/Kanal	
<p>Erkennbare Fehlermodi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Wicklungsschäden (Statorwicklung) ▶ Rotorstabbrüche (Käfigläufer-Motoren) ▶ Lagerdefekte via elektrische Signatur 	<p>Technologie & Anwendung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Stromwandler (Current Transformer, CT) nicht-invasiv auf Zuleitung klemmen ▶ FFT der Stromhülle zeigt Motorinterne Fehlerfrequenzen

<ul style="list-style-type: none"> ▶ Mechanische Lastanomalien im Antriebsstrang ▶ Netzqualitätsprobleme (Spannungsungleichgewicht) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Keine direkte Sensorinstallation an der Maschine nötig ▶ Günstige Nachrüstung bei schwer zugänglichen Motoren ▶ Grenzen: Diagnose weniger präzise als Vibration bei Lagerfehlern
---	--

U Ultraschallsensor | 100 - 600 EUR/Sensor

<p>Erkennbare Fehlermodi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Undichtigkeiten (Druckluft, Gas, Vakuum) ▶ Lagerdefekte im Frühstadium (>20 kHz Signatur) ▶ Elektrische Teilentladungen (Hochspannungsanlagen) ▶ Ventilfunktion (Leckagemessung) ▶ Niedrigdrehzahl-Lager (unzugänglich für Vibrationssensoren) 	<p>Technologie & Anwendung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Ultraschall-Sensoren (20-100 kHz) - komplementär zur Vibrationssensorik ▶ Besonders wertvoll für Niedrig-RPM-Anwendungen (< 100 U/min) ▶ Handgeräte (ATS, SDT) für periodische Rundgänge ▶ Stationäre Sensoren für kritische Dichtungen und Armaturen ▶ Kombination mit Vibration ergibt breiteres Diagnosebild
---	--

O Oelanalysesensor / Partikelzähler | 200 - 1.500 EUR/Sensor

<p>Erkennbare Fehlermodi</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Lager- und Zahnradverschleiss (Metallpartikel im Schmiermittel) ▶ Schmierstoffdegradation (Viskositätsverlust, Additivabbau) ▶ Kontamination (Wasser, Staub, Fremdpartikel) ▶ Korrosionspartikel (Hinweis auf Materialermüdung) 	<p>Technologie & Anwendung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▶ Online-Partikelzähler (LoRaWAN-fähig, direkt im Oelkreislauf) ▶ Labor-Oelanalyse (periodisch, höhere Genauigkeit) ▶ Wichtig: Getriebe, Hydrauliksysteme, Turbinen, Kompressoren ▶ Kombination: Partikelgröße und -form für Fehlermodell-Zuordnung ▶ Kostengünstigste Erkennung von Innenverschleiss bei geschlossenen Systemen
--	--

2.2 Sensorauswahl nach Maschinentyp

Nicht jeder Sensor passt zu jedem Maschinentyp. Die folgende Orientierungstabelle hilft bei der sensortypengerechten Prioritätssetzung:

Maschinentyp	Prio 1	Prio 2	Prio 3	Anmerkung
Elektromotor (> 1 kW)	Vibration	Temperatur	Stromsignatur	Lager + Wicklung häufigste Fehlerquellen
Pumpe (Kreislumpumpe)	Vibration	Temperatur	Ultraschall	Kavitation früh erkennbar via FFT
Kompressor (Kolben)	Vibration	Temperatur	Oelanalyse	Zylinder und Ventile via Vibration

Getriebe	Vibration	Oelanalyse	Temperatur	Partikelzähler als frühe Warnung
Lüfter / Gebläse	Vibration	Temperatur	-	Unwucht durch Staubansammlung häufig
Hydrauliksystem	Druck	Oelanalyse	Temperatur	Leckagen via Ultraschall
Elektrische Schaltanlage	Temperatur (IR)	Ultraschall	Strom	IR-Kamera für Hotspot-Detektion

3. Datenarchitektur: Von der Messung zur Entscheidung

3.1 Die vier Verarbeitungsebenen

PdM-Daten durchlaufen vier Ebenen von der Rohmessung bis zur Handlungsempfehlung. Jede Ebene hat ihre eigene Logik und eigene technologische Anforderungen:

Ebene	Aufgabe	Technologie (Beispiele)	Zeitfenster
1 — Erfassung	Rohdaten aufnehmen, digitalisieren, übertragen	MEMS-Sensor + ADC, LoRaWAN, MQTT, OPC-UA	Echtzeit / kontinuierlich
2 — Vorverarbeitung	Rauschen filtern, Features extrahieren, komprimieren	FFT, RMS, Peak-Detektion, Edge Computing	Millisekunden bis Sekunden
3 — Analyse	Normalmuster lernen, Anomalie erkennen, Prognose erstellen	ML (Autoencoder, LSTM, Random Forest), ONNX Runtime	Sekunden bis Minuten
4 — Handlung	Alarm auslösen, Wartungsauftrag erstellen, Operator informieren	CMMS-Integration, Dashboard, Mobil-Alert	Minuten bis Tage (je nach Dringlichkeit)

3.2 Edge vs. Cloud: Wo verarbeiten?

Die Verarbeitungstiefe am Edge vs. in der Cloud ist eine der wichtigsten Architekturentscheidungen — mit direkter Auswirkung auf Latenz, Betriebskosten und Datensouveränität:

Aufgabe	Edge sinnvoll wenn...	Cloud sinnvoll wenn...
Rohdatenerfassung	Immer (Sensornahe Erfassung)	-
Schwellwert-Alarm	Sofortige Schutzabschaltung nötig (< 10 ms)	Alarm unkritisch, Latenz akzeptabel
FFT-Berechnung	Hohe Datenrate (>1 kHz), Bandbreite begrenzt	Datenrate niedrig, Standard-Gateway
Anomalie-Modell	Offline-Fähigkeit gefordert; Datenschutz	Komplex-Modell, GPU nötig; viele Maschinen
Fleetweite Analysen	Nicht sinnvoll am Edge	Vergleich über 100+ Maschinen
Modell-Training	Nicht sinnvoll am Edge	Immer in Cloud oder On-Premise Server

3.3 KI-Methoden für Predictive Maintenance

Die Methodik hängt direkt vom verfügbaren Datenvolumen, der Art des Fehlermusters und der gewünschten Ausgabe ab. Drei Klassen von ML-Methoden dominieren industrielle PdM-Anwendungen:

ML-Klasse	Typische Methode	Datenbedarf	Ausgabe	Reife
Anomalieerkennung (unsupervised)	Autoencoder, Isolation Forest, PCA	Normalbetriebs-Daten (kein Fehlerlabel nötig)	Anomalie-Score 0-1	Hoch — Standardansatz für Einstieg
Zustandsklassifikationen (supervised)	Random Forest, SVM, XGBoost	Labeled Fehlerdaten aus Wartungshistorie	Fehlerklasse (Lager, Unwucht, ...)	Mittel — braucht historische Fehlerdaten
Lebensdauerprognose (RUL)	LSTM, TCN, Transformer	Zeitreihen bis Ausfall (Degradationspfade)	Verbleibende Nutzungsdauer in Stunden	Mittel — anspruchsvoll, aber höchster Wert
TinyML (On-Device)	Quantisierte CNN/LSTM, Edge Impulse	Wie supervised — aber klein und schnell	Fehlerklasse / Alarm direkt im Sensor	Wachsend — ideal für Massendeployment

4. Der Business Case: Quantifizierung von Kosten und Nutzen

Ein belastbarer PdM-Business Case besteht aus drei Bestandteilen: der Quantifizierung des Ist-Zustands (Was kostet das aktuelle Wartungsregime und die ungeplanten Stillstände?), der Nutzenseite (Was spart PdM?) und der Investitionsseite (Was kostet die Einführung?). Erst wenn alle drei Seiten auf Basis echter Daten vorliegen, ist eine fundierte Investitionsentscheidung möglich.

4.1 Schritt 1: Die Ist-Kosten quantifizieren

Viele Unternehmen unterschätzen ihre tatsächlichen Stillstandskosten, weil sie nur die direkten Reparaturkosten erfassen — nicht die indirekten Folgekosten. Das vollständige Kostenbild:

Kostenkategorie	Berechnung / Treiber	Typische Größenordnung
Direkter Produktionsausfall	Stillstandsstunden x Deckungsbeitrag/Stunde	5.000 - 260.000 EUR/h je nach Branche
Notfall-Reparaturkosten	Notfall-Arbeitsstunden x Faktor (1,5-3x Normal) + Express-Teile	2.000 - 50.000 EUR/Ereignis
Qualitätskosten / Ausschuss	Anlaufverluste nach Reparatur, Ausschuss während Degradation	500 - 20.000 EUR/Ereignis
Kaskadenschäden	Folgeschäden an Nachbarkomponenten durch verspäteten Eingriff	1.000 - 100.000 EUR/Ereignis
Ersatzteillagerkosten	Gebundenes Kapital für ungeplante Notfallvorräte	50.000 - 500.000 EUR (Bestandskosten p.a.)
Sicherheitsrisiken (Regulatorik)	Mögliche Bussgelder, Produktionsgenehmigungen, Haftung	Sehr variabel — oft unterschätzt

4.2 Schritt 2: Das Nutzenpotenzial berechnen

Der PdM-Nutzen folgt direkt aus der Reduktion der oben genannten Kostenkategorien. Die folgende Formel bildet den Kern des Business Case:

Vereinfachte Business-Case-Formel

Jährlicher PdM-Nutzen =

[Anzahl vermiedener Stillstands-Ereignisse] x [Durchschnittliche Stillstandskosten/Ereignis]

+ [Wartungskostenreduktion %] x [Aktuelles Wartungsbudget]

+ [Ersatzteilbestandsreduktion %] x [Aktueller Lagerbestand]

+ [Qualitätsverbesserung %] x [Aktuelle Qualitätskosten]
 - [Jährliche PdM-Betriebskosten (Plattform, Wartung, Support)]

4.3 Das ROI-Modell: Beispielrechnung

Die folgende Beispielrechnung basiert auf einem mittelgrößen Fertigungswerk (ca. 50-150 zu überwachende Maschinen, jährliches Wartungsbudget 800.000 EUR, Produktionswert 15.000 EUR/h, 200 Betriebstage/Jahr):

Position	Konservativ	Optimistisch
INVESTITIONSKOSTEN (einmalig)		
Sensorik (80 Sensoren x 300 EUR)	24.000 EUR	24.000 EUR
Gateway-Hardware und Installation	8.000 EUR	12.000 EUR
Software-/Plattform-Setup	15.000 EUR	25.000 EUR
Systemintegration (CMMS, MES)	10.000 EUR	20.000 EUR
KI-Modell-Entwicklung und Training	15.000 EUR	30.000 EUR
Schulung und Change Management	5.000 EUR	8.000 EUR
Gesamt-Investition (CapEx)	77.000 EUR	119.000 EUR
JAEHRLICHE BETRIEBSKOSTEN (OpEx, ab Jahr 1)		
Plattform-Lizenz / Cloud-Kosten	8.000 EUR/a	15.000 EUR/a
Sensor-Wartung und Austausch (5 % p.a.)	1.200 EUR/a	1.200 EUR/a
Support / Updates	3.000 EUR/a	5.000 EUR/a
Gesamt-Betriebskosten (OpEx)	12.200 EUR/a	21.200 EUR/a
JAEHRLICHER NUTZEN		
Vermiedene Stillstands-Ereignisse (bisher: 18/a)	6 Ereignisse x 12.000 EUR = 72.000 EUR	12 Ereignisse x 15.000 EUR = 180.000 EUR
Wartungskostenreduktion (25-30 % auf 800k EUR)	25 % = 200.000 EUR	30 % = 240.000 EUR
Ersatzteilbestandsreduktion (15 % auf 300k EUR)	15 % = 45.000 EUR	15 % = 45.000 EUR
Qualitätsverbesserung (Ausschuss - 20 %)	10.000 EUR	25.000 EUR
Gesamt-Nutzen (brutto, jährlich)	327.000 EUR/a	490.000 EUR/a
ROI-KENNZAHLEN		
Jährl. Netto-Nutzen (Nutzen - OpEx)	314.800 EUR/a	468.800 EUR/a
Amortisationszeit (CapEx / Netto-Nutzen)	ca. 3 Monate	ca. 3 Monate

ROI nach 3 Jahren (Netto-Nutzen 3J / CapEx)	1.127 %	1.083 %
ROI nach 1 Jahr	309 %	294 %

Hinweis zur Beispielrechnung

Die Werte basieren auf Branchendurchschnittswerten (McKinsey, Aberdeen, Deloitte 2023-2026) und sind illustrativ. Tatsächliche ROI-Werte hängen stark von der Asset-Kritikalität, der aktuellen Wartungsstrategie, der Datenqualität und der Implementierungsqualität ab. Eine individuelle Potenzialanalyse mit echten Betriebsdaten ist vor jeder Investitionsentscheidung empfohlen.

4.4 Sektoren-Benchmarks

Die folgende Tabelle zeigt validierte Benchmarks aus dokumentierten Industrie-Implementierungen:

Branche	Stillstandskosten/h	PdM-Einsparung	Amortisation	Quelle
Automobilfertigung	5.000-20.000 EUR	Stillstände -76 %, Wartung -28 %	8 Monate	Oxmaint Case Study 2026
Stahlindustrie (Walzwerk)	15.000-50.000 EUR	Produktionsverbesserung messbar	12-18 Monate	IloT World / JSW Steel 2025
Chemische Industrie	30.000-260.000 EUR	Chargenausfall-Kosten - 70 %	10-18 Monate	Indorama Ventures 2025
Pharmafertigung	50.000-500.000 EUR	Batch-Ausschuss -75 %, FDA-Compliance	14 Monate	Oxmaint Case Study 2026
Allgemeine Fertigung	5.000-15.000 EUR	Wartung -25-30 %, Stillstand -70 %	12-24 Monate	McKinsey / Deloitte 2023-2026

5. Implementierungsleitfaden: Von null zum laufenden PdM-Programm

Die größte Gefahr bei PdM-Einführungen ist der 'Boiling-Frog'-Ansatz: zu breite Rollout-Ambitionen, zu lange bis zu ersten Ergebnissen, zu viel Technologie auf einmal. Der bewährte Implementierungsansatz: klein starten, schnell beweisen, dann skalieren.

Phase 1 — Grundlage und Pilotplanung (4-8 Wochen)

Asset-Kritikalitätsanalyse

Nicht alle Maschinen sind gleich kritisch. Eine strukturierte Kritikalitätsanalyse priorisiert den Pilotbereich:

- ▶ Schritt 1: Alle Produktionsanlagen inventarisieren (Asset-Liste)
- ▶ Schritt 2: Kritikalität bewerten: Stillstandskosten/h x durchschnittliche Stillstandsdauer x Häufigkeit
- ▶ Schritt 3: Top-10-kritische Assets identifizieren — das ist der Pilotbereich
- ▶ Schritt 4: Daten-Verfügbarkeit prüfen: Gibt es Wartungshistorie, Fehlerereignisse, Sensorinfrastruktur?

Sensorauswahl und Kosten-Schnellkalkulation

- ▶ Maschinentyp bestimmen → Sensorempfehlung (Tabelle Kap. 2.2)
- ▶ Quick-ROI: Stillstandskosten/h x vermeidbare Stunden/Jahr = Nutzenpotenzial
- ▶ Kosten-Schnellkalkulation: Anzahl Sensoren x Sensorpreis + Gateway + Plattform
- ▶ Wenn Nutzenpotenzial > 5x Investition: klarer Pilot-Go

Phase 2 — Datenbasis aufbauen (4-12 Wochen)

- ▶ Vibrationssensoren an Top-10-Assets montieren — Sensorhalterungen nach IEC 60068 auswählen
- ▶ Wireless-Gateway (LoRaWAN, 4G/5G) oder kabelgebundene Verbindung konfigurieren
- ▶ PdM-Plattform einrichten (Cloud oder On-Premise): thin-edge.io + Cumulocity / AWS IoT / Azure IoT
- ▶ Normalbetrieb-Daten erfassen: mindestens 4-8 Wochen Baseline unter verschiedenen Betriebsmodi
- ▶ Wartungshistorie importieren: vergangene Fehlerereignisse als Trainings-Labels vorbereiten

Phase 3 — Modell-Entwicklung und -Validierung (6-12 Wochen)

- ▶ Feature-Engineering: FFT-Spektren, RMS, Crest-Faktor, Kurtosis aus Rohdaten berechnen
- ▶ Modell Baseline: Anomalie-Erkennung (unüberwacht) als schnellster erster Ansatz

- ▶ Modell-Validierung: A/B-Test gegen Expertenurteil über 4-8 Wochen
- ▶ False-Positive-Rate optimieren: zu viele Fehlalarme zerstören die Akzeptanz im Betrieb
- ▶ CMMS-Integration: Anomalie-Alert löst automatisch Condition-Based Work Order aus

Phase 4 — Pilotbetrieb und Business-Case-Messung (8-16 Wochen)

- ▶ KPIs festlegen und messen: MTBF (Mean Time Between Failures), MTTR, ungeplante Stillstands-Stunden
- ▶ Jede vermiedene Reparatur dokumentieren: Datum, Fehlertyp, geschätzte vermiedene Kosten
- ▶ Monatlicher ROI-Bericht für Entscheider vorbereiten
- ▶ Lessons Learned: Welche Fehlermodi wurden erkannt? Welche wurden verpasst? Warum?
- ▶ Rollout-Entscheidung: Wenn Pilotnutzen validiert — Planung des Skalierungsrollouts

Phase 5 — Skalierung und Dauerbetrieb (ab Monat 6)

- ▶ Rollout auf weitere kritische Assets geplant und budgetiert
- ▶ OTA-Modell-Updates: verbesserte Modelle werden über Fernzugriff deployt
- ▶ Modell-Drift-Monitoring: Modelle altern — regelmäßiges Retraining einplanen (halbjährlich)
- ▶ CMMS-Integration vertiefen: Automatische Priorisierung von Wartungsaufträgen nach PdM-Schweregrad
- ▶ Kosten-Nutzen-Review jährlich: Sind die ursprünglichen Business-Case-Annahmen bestätigt?

6. Hürden und Erfolgsfaktoren

6.1 Typische Stolpersteine

Stolperstein	Symptom	Gegenmasnahme
Datenqualität unterschätzt	Modell liefert viele False Positives; Maintenance-Team ignoriert Alarme	4-8 Wochen Baseline-Erfassung vor Modellbau; Sensor-Kalibrierung prüfen
Zu breiter Pilotscope	Kein klares Ergebnis nach 6 Monaten; Stakeholder verlieren Vertrauen	Max. 10 Assets im Pilot; klare KPIs vorher definieren
OT/IT-Konflikt	Sensor-Daten kommen nicht ans Ziel; Netzwerkfreigaben dauern Monate	OT/IT-Steering Committee von Anfang an; IT-Security-Konzept vorab klären
CMMS-Integration fehlt	Alarme landen in Dashboard, erzeugen aber keine Wartungsaufträge	CMMS-Integration als Pflichtbestandteil des Pilots planen; nicht nachträglich
False-Positive-Müdigkeit	Zu viele Alarme; Techniker deaktivieren Benachrichtigungen	Schwellenwert-Kalibrierung; Alarm-Priorisierung (Hoch / Mittel / Niedrig)
Fehlende Geschäftsführungs-Unterstützung	Pilot läuft, aber Skalierung kommt nicht	Business Case mit echten Zahlen nach Pilotphase präsentieren

6.2 Die fünf kritischen Erfolgsfaktoren

- ▶ **Asset-Fokus statt Technologie-Fokus:** Beginnen Sie mit dem teuersten Ausfall, nicht mit dem attraktivsten Sensor. Der Business Case muss die Technologieentscheidung treiben.
- ▶ **Maintenance-Team früh einbinden:** PdM verändert die Arbeit von Instandhaltern. Ohne deren Buy-in wird das beste Modell ignoriert. Schulung und Co-Design sind keine Option, sondern Erfolgsbedingung.
- ▶ **CMMS-Integration von Anfang an:** Ein Alarm ohne Workflow-Konsequenz ist wertlos. Die Verbindung von PdM-Plattform und Wartungsmanagement-System muss von Tag 1 geplant sein.
- ▶ **Datenqualität vor Algorithmus-Komplexität:** Ein einfaches Anomalie-Modell auf guten Daten schlägt ein komplexes Deep-Learning-Modell auf schlechten Daten jedes Mal.
- ▶ **Modell-Lifecycle einplanen:** Maschinen verändern sich, Produktionsbedingungen ändern sich, Modelle altern. Retraining-Intervalle und Drift-Monitoring müssen von Anfang an ins Betriebskonzept.

7. PdM-Readiness-Check: Wo steht Ihr Unternehmen?

Der folgende Check ermöglicht eine erste Einschätzung der PdM-Bereitschaft in vier Dimensionen. Bewerten Sie jede Aussage mit: Ja (2 Punkte) · Teilweise (1 Punkt) · Nein (0 Punkte).

Dimension A — Asset-Wissen

Aussage	Ja	Teilw.	Nein
Wir kennen unsere Top-10 produktionskritischen Assets.			
Wir haben eine aktuelle Wartungshistorie (Fehlertyp, Datum, Dauer) für die letzten 2 Jahre.			
Wir können unsere jährlichen Stillstandskosten je Asset quantifizieren.			

Dimension B — Daten und Infrastruktur

Aussage	Ja	Teilw.	Nein
An unseren kritischen Maschinen sind bereits Sensoren installiert.			
Wir erfassen Maschinendaten digital und können darauf zugreifen.			
Unser CMMS ist digital und enthält aktuelle Wartungsdaten.			

Dimension C — Organisation und Kompetenz

Aussage	Ja	Teilw.	Nein
Es gibt einen klaren Verantwortlichen für Instandhaltungs-Digitalisierung.			
Das Maintenance-Team ist bereit, datenbasierte Empfehlungen zu nutzen.			
IT und OT arbeiten in unserem Haus konstruktiv zusammen.			

Dimension D — Wirtschaftlichkeit

Aussage	Ja	Teilw.	Nein
Wir können ungeplante Stillstandskosten je Ereignis quantifizieren.			
Das Nutzenpotenzial übersteigt die Pilotinvestition mindestens um Faktor 5.			
Es gibt ein Budget für einen PdM-Pilot (50.000-150.000 EUR).			

Auswertung (max. 24 Punkte)

19-24 Punkte: Hohe PdM-Readiness — Pilotstart zeitnah möglich. Sensorauswahl und Business-Case-Validierung als nächste Schritte.

12-18 Punkte: Mittlere Readiness — Lücken gezielt schliessen (Dateninfrastruktur, CMMS-Qualität, Asset-Inventur).

6-11 Punkte: Grundlagen fehlen — zuerst Wartungshistorie digitalisieren und Asset-Kritikalitätsanalyse durchführen.

0-5 Punkte: Frühphase — PdM als strategisches Ziel setzen; Basis-Digitalisierung priorisieren.

8. Fazit: Predictive Maintenance als strategische Investition

Predictive Maintenance ist keine Technologiestrategie — es ist eine Unternehmensstrategie. Die Frage 'Brauchen wir PdM?' lässt sich einfach beantworten: Jedes Unternehmen, das mehr als 100.000 EUR pro Jahr durch ungeplante Stillstände verliert, hat einen positiven Business Case für PdM — wenn der Implementierungsansatz methodisch sauber ist.

Die entscheidende Erkenntnis aus Hunderten von Industrie-Implementierungen: **PdM scheitert fast nie an der Technologie**, sondern an der mangelnden Verbindung von Sensordaten und Wartungsprozessen, an fehlender Maintenance-Team-Integration und an Business-Cases, die nicht auf echten Betriebsdaten basieren.

Der Weg von der ersten Sensorinstallation zum messbaren ROI ist kürzer als viele Unternehmen erwarten: Mit dem richtigen Use Case, einer fokussierten Pilotplanung und realistischen KPIs sind erste messbare Ergebnisse in 3-6 Monaten erreichbar. Der vollständige ROI innerhalb von 12-24 Monaten ist — gestützt auf dokumentierte Branchenerfahrungen — keine Ausnahme, sondern die Regel.

Drei Prioritäten für Entscheidungsträger

1. Beginnen Sie mit der Kostenquantifizierung: Wie viel kosten Ihre ungeplanten Stillstände jährlich? Diese Zahl ist der Anker Ihres Business Case — und überrascht fast immer.
2. Starten Sie mit dem teuersten Asset, nicht dem einfachsten: Ein starker erster Pilot braucht einen klaren Business Case. Nehmen Sie das Asset, das Sie am meisten Geld kostet.
3. Verbinden Sie PdM mit Ihrem Wartungsprozess von Tag 1: Ein Alarm ohne CMMS-Workflow-Konsequenz erzeugt keinen ROI. Die Technologie ist die einfache Hälfte — der Prozess ist die entscheidende.

Quellen & Weiterführende Dokumente

- ▶ McKinsey & Company / Aberdeen Group / Deloitte: Manufacturing Predictive Maintenance Studies 2023-2026
- ▶ Factory AI (f7i.ai): Predictive Maintenance Cost Savings — The 2026 CFO Guide & ROI Calculator, Februar 2026
- ▶ Oxmaint: Business Case for Predictive Maintenance in Global Manufacturing, Mai 2026
- ▶ Oxmaint: Predictive Maintenance ROI Case Studies from Global Manufacturing Plants, April 2026
- ▶ IIoT World: Predictive Maintenance Cost Savings (JSW Steel USA, Indorama Ventures), 2025-2026
- ▶ Electronic Design / TE Connectivity: Predictive Maintenance Through Vibration and Thermal Sensing, Januar 2025
- ▶ NCD.io: Predictive Maintenance with Vibration Sensors — Complete Starter Guide, Januar 2026
- ▶ Tractian: Top 5 Predictive Maintenance Sensors 2026, Mai 2026
- ▶ MDPI Sensors: TinyML in Industrial IoT Systematic Review, April 2026
- ▶ AlphaBOLD: AI-Powered Predictive Maintenance in Manufacturing — Key Trends 2025-2026, April 2026

Über den Autor

Ralf Platvoet ist Diplom-Ökonom und Inhaber von PPI - Platvoet Performance Intelligence. Er berät Organisationen zu Industrial IoT, Predictive Maintenance Business Cases, Strategic Portfolio Management und Cyber-Compliance. Sein Beratungsschwerpunkt liegt auf der wirtschaftlichen Bewertung von IIoT-Investitionen und der strategischen Steuerung von Industrie-4.0-Transformationsprojekten.

Weitere Whitepapers, interaktive Tools und Ressourcen: platvoet.org