


Wie kann die digitale Transformation Predictive Maintenance unterstützen?

Veränderungen, Konsequenzen, Modelle

Florian Allwein

IU Internationale Hochschule, Erfurt, Deutschland. E-Mail: florian.allwein@iu.org

 <https://orcid.org/0000-0002-2831-7259>

Abstract

Im Zuge der digitalen Transformation werden digitale Technologien in Geschäftsprozesse integriert, um sie effizienter zu gestalten. Die Forschung dazu beschäftigt sich mit Fragen wie der Bestimmung und Erhöhung von Digitalisierungsgraden sowie mit Erfolgsfaktoren und Hindernissen. Ein wichtiger Faktor ist dabei das Bewusstsein dafür, welche Fakten der Welt sich als Daten darstellen lassen und mit welchen Sensoren diese Daten gewonnen werden können. Hier lässt sich eine Brücke zur Predictive Maintenance schlagen, die sich mit der Analyse von Fakten, die etwa den Zustand einer Maschine betreffen, beschäftigt. Allerdings gibt es bis jetzt nur Ansätze dafür, Konzepte und Theorien der digitalen Transformation im Bereich der Predictive Maintenance zu nutzen. Dieser Beitrag diskutiert die Potenziale, die sich aus einem solchen Austausch ergeben könnten. Dazu stellt er Reifegradmodelle als sinnvolles Werkzeug vor, das begleitend zu Projekten zur Predictive Maintenance eingesetzt werden kann. Er entwirft ein Modell, das zeigt, wie die Digitalisierung eines Geschäftsprozesses von der digitalen Transformation profitiert, und wie sich damit Maßnahmen zur Predictive Maintenance planen lassen. Dies wird an Beispielen aus der Literatur diskutiert, die zeigen, wie Smartphones genutzt werden können, um Schäden an Bahnstrecken zu erkennen. Der Beitrag zeigt, dass die digitale Transformation neue Möglichkeiten für Predictive Maintenance eröffnet, gibt Empfehlungen, wie diese erkannt werden können, und diskutiert Ansatzpunkte zu einem engeren Austausch zwischen den Disziplinen.

Schlüsselwörter

Daten; Digitale Transformation; Digitalisierung; Predictive Maintenance; Sensoren; Smartphones

Einleitung

Die Forschung zur digitalen Transformation untersucht Veränderungen des Alltags und der Wirtschaft aufgrund digitaler Technologien aus interdisziplinärer Sicht. Dabei befasst sie sich etwa mit der Frage, wie Organisationen solche Veränderungen herbeiführen und managen können. Ziel kann sein, den digitalen Reifegrad von Organisationen zu erhöhen – ein Bereich, in dem Deutschland nach wie vor Verbesserungspotenzial hat (Schmidt 2024).

Zu den entscheidenden Neuerungen, die die digitale Transformation bringt, gehört, dass wesentlich mehr Daten gewonnen und in Echtzeit ausgewertet werden können. Hier lässt sich die Brücke zur Predictive Maintenance schlagen: Sie lässt sich als ein Beispiel für die Art von Analysen sehen, die durch die digitale Transformation ermöglicht werden, denn es geht ja darum, den Zustand etwa einer Maschine laufend zu messen und auszuwerten, um Wartungsbedarfe genauer zu erkennen. Es liegt nahe, dass es aufgrund solcher inhaltlichen Schnittpunkte einen Austausch zwischen den Disziplinen geben sollte. Es finden sich jedoch bislang nur Ansätze eines solchen Dialogs.

Dieser Beitrag befasst sich daher mit der Frage: „Wie kann die digitale Transformation Predictive Maintenance unterstützen?“. Er zeigt, wie relevante Theorien helfen können, die Auswirkungen der digitalen Transformation auf Predictive Maintenance zu verstehen und somit die digitale Transformation in einer Organisation voranzutreiben. Dazu wird einerseits das bewährte Konzept der Reifegradmodelle vorgestellt, andererseits ein eigenes Modell der Digitalisierung von Prozessen entworfen. Das Modell wird auf ein Beispiel angewandt, um zu verdeutlichen, wie Predictive Maintenance von den Veränderungen der digitalen Transformation profitieren kann. Dies führt zu einer Diskussion, inwiefern die Theorien der digitalen Transformation relevant sind, um den Erfolg von Projekten zur Predictive Maintenance zu unterstützen.

Theoretischer Hintergrund

Forschung zur digitalen Transformation

Die digitale Transformation ist definiert als „erhebliche Veränderungen des Alltagslebens, der Wirtschaft und der Gesellschaft durch die Verwendung digitaler Technologien und Techniken sowie deren Auswirkungen“ (Pousttchi 2019). Eng verwandt ist der Begriff der Digitalisierung, der hier in der Definition von (Verhoef et al. 2021, S. 891) verwendet wird: “Digitalization describes how IT or digital

technologies can be used to alter existing business processes". Bei der Digitalisierung steht also die Veränderung von Prozessen im Mittelpunkt, bei der digitalen Transformation die Konsequenzen, die sich daraus ergeben.

So werden unter anderem Geschäftsprozesse transformiert, indem digitale Technologien auf neuartige Weise genutzt werden. Beispiele dafür sind etwa die Digitalisierung bestehender Produkte oder Dienstleistungen, wie z.B. Musik (Spotify) sowie Geschäftsmodelle, die auf der Verwertung von Kund:innendaten basieren (z.B. Google, Facebook) (Gassmann et al. 2021).

Die Forschung im Bereich der digitalen Transformation befasst sich mit solchen Veränderungen und deren Auswirkungen. Entsprechend spielen Aspekte des Managements und der Organisations- und Sozialwissenschaft eine ebenso große Rolle wie technische Aspekte. Ziel ist dabei, praktische Empfehlungen zu geben, die Organisationen bei der Transformation unterstützen können. Dazu gehören etwa Anleitungen für eine erfolgreiche Transformation (Rogers 2016; van Aerssen et al. 2022; Gassmann und Sutter 2023) oder Analysen des Scheiterns derselben (Dwivedi et al. 2015; Friesike und Sprondel 2021; Resch 2022).

Es existiert eine Vielzahl von Reifegradmodellen, mit denen sich die digitale Reife einer Organisation – unterteilt in verschiedene Aspekte – bewerten lässt (Schallmo et al. 2018; Appelfeller und Feldmann 2023). Eine solche Analyse kann Ausgangspunkt für Veränderungsprojekte in Organisationen sein (Allwein und Heß 2024). Dazu wird zuerst der digitale Reifegrad einer Organisation, einer Abteilung oder eines Prozesses ermittelt (Ist-Stand). Dieser lässt sich, auch wenn standardisierte Checklisten vorliegen, nicht einfach messen. Stattdessen werden z.B. Mitarbeitende interviewt, interne Dokumente ausgewertet oder Kund:innen und andere Stakeholder befragt. Im nächsten Schritt wird ein möglicher Soll-Stand festgelegt, also der Grad an Digitalisierung, der in einem überschaubaren Zeitraum (i.d.R. einige Jahre) erreicht werden kann. Dazu kann auch eine Recherche nach bestehenden technischen Lösungen oder eine Analyse der Konkurrenz erfolgen. Aus der Differenz von Ist- und Soll-Stand ergeben sich schließlich Ansatzpunkte für mögliche Veränderungsprojekte, die von Entscheider:innen priorisiert werden können.

Daten spielen bei der digitalen Transformation eine Schlüsselrolle: Da immer mehr Prozesse in Organisationen digital ablaufen, liegen auch erheblich mehr digitale Daten vor, die sich zudem durch Technologien wie noSQL-Datenbanken und potenziell unbeschränkte Speicherkapazitäten durch Cloud Computing einfach sammeln und in Echtzeit analysieren lassen. So sind zunehmend Fakten der Welt in digitaler Form für Analysen verfügbar. Eine wichtige Quelle für solche Daten sind Sensoren, etwa im Fall von Smartphones, die im privaten Umfeld Daten zu Tatsachen wie der Herzfrequenz einer Person oder der Anzahl der Schritte, die sie am Tag gegangen ist, sammeln. Smartphones enthalten eine Vielzahl von Sensoren, unter anderem Beschleunigungs- und Gyrosensoren, aber auch Barometer und natürlich Kameras und Mikrofone (Apple 2024). Es gibt zahlreiche Versuche, diese in praktischen Anwendungen über den privaten Bereich hinaus nützlich zu machen, etwa zur Leistungskontrolle bei Sportler:innen (McNab et al. 2011) oder zur Unterstützung von Navigationssystemen (Niu et al. 2012). In der produzierenden Industrie sind Sensoren wiederum ein Schlüsselement der cyber-physikalischen

Systeme, die digitalisierte Wertketten ermöglichen, wie sie unter dem Begriff „Industrie 4.0“ diskutiert werden (Vogel-Heuser 2014).

Ein Erfolgsfaktor für die digitale Transformation ist also das Bewusstsein dafür, welche Fakten sich als digitale Daten darstellen lassen und mit welchen Sensoren dies geschehen kann. Entsprechend bilden Prozessdaten eine von fünf Dimensionen im Reifegradmodell des IT-Branchenverbands Bitkom (Appel et al. 2022, S. 16):

Dimension	Kriterium	Operationalisierung
Prozessdaten	Datenerhebung	Prozessdurchläufe (z. B. Logdaten) werden vollständig automatisiert erhoben.
		Prozessdurchläufe (z. B. Logdaten) werden vollständig digital archiviert.
	Datenbereitstellung	Die Bereitstellung von Daten für das Berichtswesen (Reporting) ist vollständig digital.
		Die visuelle Darstellung von Daten erfolgt strukturiert und nutzerfreundlich.
	Datenverwendung	Daten können vollständig durch eine Schnittstelle für die externe Nutzung durch weitere Anwendungen wie z. B. BI bereitgestellt werden.

Tabelle 1 Prozessdaten im Bitkom-Reifegradmodell (eigene Darstellung nach Appel et al. (2022))

Predictive Maintenance

Das Sammeln und die Auswertung von Fakten der Welt in Form digitaler Daten ist auch ein wesentlicher Aspekt der Predictive Maintenance. (Mobley 2002, S. 4) beschreibt den grundlegenden Ansatz:

The common premise of predictive maintenance is that regular monitoring of the actual mechanical condition, operating efficiency, and other indicators of the operating condition of machine-trains and process systems will provide the data required to ensure the maximum interval between repairs and minimize the number and cost of unscheduled outages created by machine-train failures.

Bestehende Forschung zur Predictive Maintenance sieht diese als wichtigen Aspekt der digitalen Transformation im industriellen Bereich (z.B. Albukhitan 2020; Cardoso et al. 2023). (Achouch et al. 2022) zeigen, wie die digitale Transformation Industrie 4.0 und Predictive Maintenance ermöglicht. (Anaba et al. 2024) fokussieren in erster Linie auf mögliche Kosteneinsparungen durch digitale Transformation. Es finden sich insgesamt jedoch nur Ansätze eines Dialogs zwischen den Disziplinen.

Modell: Digitalisierung von Geschäftsprozessen

Im Folgenden wird ein theoretisches Modell vorgeschlagen, das auf Konzepten aus der Literatur zur digitalen Transformation aufbaut (Abbildung 1). Es verdeutlicht, wie die Digitalisierung eines Geschäftsprozesses abläuft und welche Rolle Daten dabei spielen. Außerdem zeigt es, wie die digitale Transformation solche Veränderungen ermöglicht und beschleunigt (Pfeile).

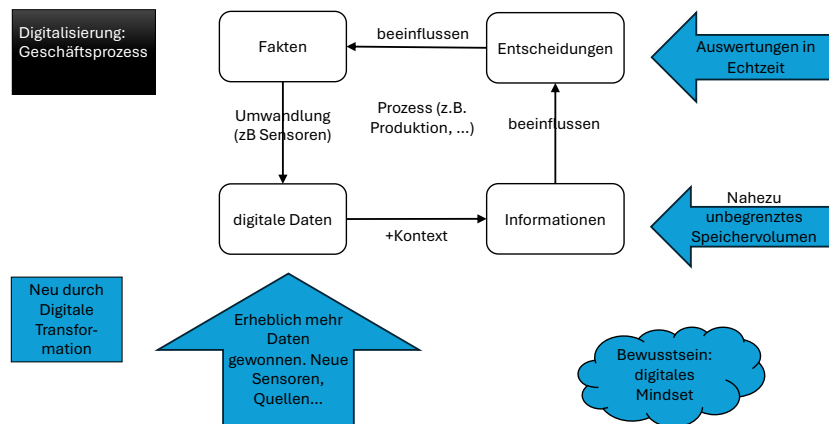


Abbildung 1 Modell (eigene Darstellung)

Im Einzelnen zeigt das Modell:

- Ausgangspunkt des Prozesses sind Fakten der Welt, z.B. die Anzahl der Schritte, die eine Person geht, oder der Zustand einer Maschine.
- Diese werden beispielsweise durch Sensoren in digitale Daten umgewandelt.
- Durch die digitale Transformation können erheblich mehr solcher Daten gewonnen werden, da etwa mehr Sensoren oder neue Datenquellen zur Verfügung stehen.
- Diese digitalen Daten können, um einen entsprechenden Kontext angereichert, als Informationen verwendet werden (Krcmar 2015, S. 11), um Entscheidungen zu unterstützen.
- Informationen können hierbei in Folge der digitalen Transformation in nahezu beliebiger Menge gespeichert und in Echtzeit ausgewertet werden.
- Die Entscheidungen, die so getroffen werden, wirken sich wiederum auf die ursprünglichen Fakten aus (z.B. Person entscheidet sich, mehr zu gehen/ Wartungsintervall der Maschine wird angepasst).
- Schließlich entwickeln erfolgreiche Organisationen ein digitales Mindset, das ihnen dabei hilft, die digitale Transformation erfolgreich zu gestalten. Faktoren,

die das Mindset betreffen, können ebenfalls in Reifegradmodellen abgefragt werden (Appel et al. 2022).

Nach diesem Modell wäre also die „actual mechanical condition“ in der Definition zu Predictive Maintenance von (Mobley 2002, S. 4) ein Faktum, das über Sensoren erfasst wird und somit in Form digitaler Daten vorliegt. Diese werden über das „regular monitoring“ als Informationen in einem geeigneten System ausgewertet, was sich auf die ursprünglichen Fakten auswirkt.

So ist die Frage nach der digitalen Transformation oder dem digitalen Reifegrad von Organisationen, die (im weitesten Sinn) Maschinen nutzen, direkt mit der Frage nach Predictive Maintenance verknüpft. Firmen, die einen niedrigen Digitalisierungsgrad aufweisen, können mithilfe von Reifegradmodellen Projekte zur Digitalisierung planen und würden dabei naturgemäß die Predictive Maintenance als ein wichtiges Feld betrachten. So können ggf. erste Projekte zur Predictive Maintenance als Probelaufe geplant werden. Firmen, die schon Predictive Maintenance nutzen, können anhand des Modells überprüfen, ob sie diese in den richtigen Bereichen und im richtigen Umfang nutzen. Außerdem können sie damit über den Bereich der Predictive Maintenance hinausgehen und auch die Digitalisierung anderer Aspekte diskutieren.

Beispiel: Wartung von Bahnstrecken mittels Smartphones

Die Unterstützung von Predictive Maintenance durch Technologien der digitalen Transformation soll im Folgenden anhand von Beispielen diskutiert werden, die zeigen, wie handelsübliche Smartphones genutzt werden können, um Schäden an Bahnstrecken früher zu erkennen. Hierfür gab es verschiedene Experimente mit Apps, die auf handelsüblichen Smartphones installiert werden, die an verschiedenen Stellen eines Zuges positioniert werden und etwa über den Beschleunigungs- oder Gyrosensor des Smartphones laufend Daten zu Beschaffenheit der Strecken liefern. Da solche Daten im Idealfall bei jeder Fahrt eines Zuges ermittelt werden können, lassen sich aus Abweichungen im Laufe der Zeit Rückschlüsse auf mögliche Wartungsbedarfe ziehen. Erste Ergebnisse sind vielversprechend.

Die Frage nach der Nutzung von Smartphones für die Wartung von Bahnstrecken wird von verschiedenen Forschenden untersucht. (Falamarzi et al. 2019, S. 6) sichten die Literatur zu verschiedenen Techniken zur Wartung von Bahnstrecken und stellen fest, dass Smartphones grundsätzlich positiv gesehen werden:

The combination of different sensors has made smartphones a cost-effective probe which can be used to collect acceleration data, gyroscope and GPS data in railway vehicles, mostly for measuring ride comfort.

Gleichzeitig schränken sie ein, dass die Nutzung der Technologie noch am Anfang steht: „The major drawback of this type of application is that these devices as probes in railway inspection have not been fully developed” (S.8). (Kulkarni 2023) entwickelt und diskutiert ein Smartphone-basiertes System, das Auswertungen zur Predictive Maintenance an Bord eines Zuges durchführen kann. (Nunez et al. 2018) testen verschiedene Systeme, die auf Beschleunigungssensoren basieren – einerseits im Achslager eines Zuges, andererseits in Smartphones, die im Zug mitgeführt werden. Sie stellen fest, dass beide Systeme im Kontext der Predictive Maintenance sinnvoll sein können, wenn sie mit anderen Daten wie GPS-Koordinaten kombiniert werden: „With the smartphone technology it is possible to map over the network the ride comfort, which is important for the users and for the safety.“ (S. 10)

(Stübinger und Stavrianidis 2022) präsentieren eine App, die von Siemens Mobility entwickelt wurde. Damit ist es möglich, Schienen im täglichen Bedarf zu testen. Dies geschieht traditionell mit speziellen Gleismesswägen, die aber naturgemäß nicht täglich eingesetzt werden können. In diesem Beispiel wurden drei Smartphones einen Tag lang in einem Zug platziert und sammelten dort Daten, die zudem mit weiteren externen Daten kombiniert wurden:

The smartphone app enables the recording and use of all relevant data from the smartphone sensors (e.g. Global Navigation Satellite Systems sensor (GNSS), accelerometers and gyroscope) during regular train operation. The optimum use of a smartphone for detecting faults in the infrastructure also requires the combination of additional external and freely available information with the sensor data. For example, the track monitoring smartphone app uses the OpenStreetMap map material that is integrated through a special interface. (S 10)

Zum Vergleich wurde ein traditioneller Messwagen mitgeführt. Die Qualität der Daten war demnach vergleichbar: „Valid use of the data can be established based on the good qualitative comparability of the smartphone data with that of the accelerometers in the train” (Stübinger und Stavrianidis 2022, S. 12). Die App ist in bestehende Mess- und Monitoringlösungen für Züge und Schienen (Vehicle Equipment Measurement Systems, VEMS) eingebunden (Siemens Mobility 2024). Die Arbeitsweise des zugrundeliegenden Systems (Abbildung 2) ähnelt dabei dem Prozess, der in unserem Modell dargestellt ist: Digitale Daten werden aus Sensoren und externen Quellen gesammelt, weiterverarbeitet und für die Analyse bereitgestellt. Daraufhin werden Empfehlungen (z.B. für Wartungsmaßnahmen) gegeben.

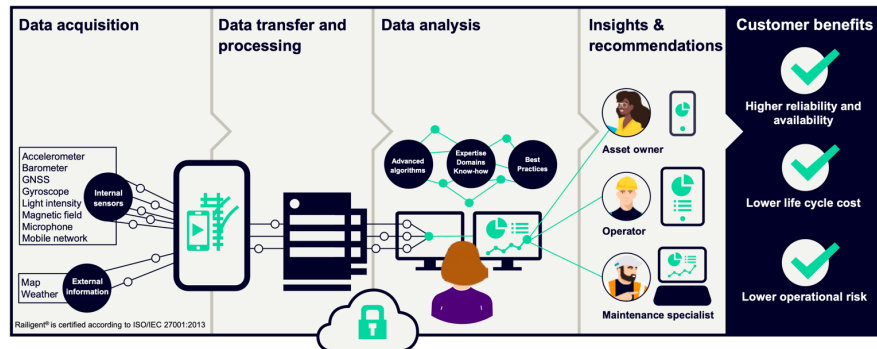


Abbildung 2 Funktionsweise der Smartphone-App (Stübinger und Stavrianidis 2022, S. 11)

Analyse

Betrachtet man das obige Beispiel durch die theoretische Linse unseres Modells, wird die Rolle der Digitalisierung im Zusammenhang mit der Predictive Maintenance deutlich:

- Die Fakten, auf denen der Prozess beruht, sind der Zustand eines Schienenabschnitts. Dieser macht sich im Fall von Störungen durch minimale Abweichungen von den üblichen Bewegungen bemerkbar.
- Diese Fakten werden durch die Sensoren der verwendeten Smartphones (z.B. Beschleunigungssensor) digitalisiert und liegen somit als digitale Daten vor.
- Die Daten werden mit entsprechendem Kontext angereichert (z.B. GPS-Koordinaten, oder: Auswertung, ob sie innerhalb der erwarteten Parameter liegen) und als Informationen dargestellt (z.B. innerhalb des VEMS).
- Diese Informationen werden (automatisch oder manuell durch Expert:innen) ausgewertet und dienen damit als Grundlage für Entscheidungen (also z.B. Wartungsintervall an der Strecke anpassen), was sich in unserem Modell wiederum auf die ursprünglichen Fakten, also den Zustand der Strecke, auswirkt.

Somit werden auch die Neuerungen an diesem Prozess deutlich, die durch die digitale Transformation ermöglicht wurden:

- Es können deutlich mehr Daten gewonnen werden als mit traditionellen Wartungssystemen. Während früher Strecken gelegentlich mit Gleismesswägen abgefahren wurden, kann jetzt grundsätzlich bei jeder regulären Fahrt der Zustand der Strecke gemessen werden. Dazu ist es nur nötig, einzelne Smartphones im Zug zu platzieren und sie an die Infrastruktur zur Auswertung (VEMS) anzuschließen.

- Durch die laufende Messung und die Auswertung der Daten über eine cloudbasierte Lösung lässt sich der Zustand der Strecke nahezu in Echtzeit auswerten. Somit kann die reguläre Wartung zwar nicht ersetzt werden, es ist aber ggf. möglich, Wartungsintervalle je nach Zustand der Strecke entsprechend anzupassen.
- Der Anwendung liegt ein digitales Mindset zugrunde: Durch die Idee, über alltägliche Sensoren eine laufende Auswertung von Daten in Echtzeit durchzuführen, können traditionelle Maßnahmen zur Wartung zumindest unterstützt und ergänzt werden. Potenziell ließe sich dies weiter ausdehnen, da ja zunehmend fast alle Mitarbeitenden und Fahrgäste Smartphones besitzen, auf denen sich gegebenenfalls auch entsprechende Apps installieren ließen.

Die Frage „Wie kann die digitale Transformation Predictive Maintenance unterstützen?“ kann also wie folgt beantwortet werden: Die Veränderungen, die die digitale Transformation bringt, betreffen auch die Kontexte, die für Predictive Maintenance relevant sind. Hier ist insbesondere die zunehmende Verfügbarkeit von Sensoren im Alltag (Smartphones) zu nennen sowie die Möglichkeit, auch große Datenmengen in Echtzeit auszuwerten. Somit können traditionelle Maßnahmen zur Wartung ergänzt und ggf. angepasst werden.

Die Forschung zur digitalen Transformation bietet darüber hinaus wertvolle Anknüpfungspunkte für Predictive Maintenance. Modelle wie das hier vorgestellte können helfen, Diskussionen über das Potenzial für Predictive Maintenance zu strukturieren.

Ebenso eignen sich etwa Reifegradmodelle, um Potenziale für die Digitalisierung von Prozessen zu identifizieren, die über Predictive Maintenance hinausgehen. In diesem Fall kann bei der Erhebung des Ist-Stands und bei der Recherche des gewünschten Soll-Stands gezielt nach Predictive Maintenance gefragt bzw. gesucht werden.

Handlungsempfehlungen

Aus diesen Ergebnissen lassen sich Handlungsempfehlungen für Unternehmen, die Predictive Maintenance nutzen (oder das erwägen), ableiten. Sie können Konzepte aus dem Bereich der digitalen Transformation auf verschiedene Weise nutzen. Eine Analyse des Digitalisierungsgrads der gesamten Organisation (oder relevanter Bereiche) mithilfe eines Reifegradmodells kann ein sinnvoller Ausgangspunkt sein, um Maßnahmen zu definieren und zu priorisieren, die die digitale Transformation im Unternehmen vorantreiben.

Darüber hinaus kann das hier vorgestellte Modell herangezogen werden, um Potenziale für Digitalisierung und insbesondere Predictive Maintenance zu identifizieren. Die Frage, welche Fakten im Unternehmen (etwa in der Produktion) vorliegen

und wie diese digitalisiert und ausgewertet werden können, ist ein guter Ausgangspunkt für weitere Überlegungen zur digitalen Transformation.

Fazit

Es zeigt sich also, dass die Predictive Maintenance einerseits hervorragende praktische Beispiele für digitale Transformation bietet. Gleichzeitig können Theorien aus der Forschung zur digitalen Transformation sinnvoll im Bereich der Predictive Maintenance angewandt werden. Das obige Beispiel illustriert Schnittmengen zwischen den Disziplinen und zeigt, dass sich aufgrund der digitalen Transformation neue Möglichkeiten zum Sammeln und Auswerten von Daten bieten.

Wie wir gesehen haben, stehen Ansätze wie der hier diskutierte noch am Anfang ihrer Entwicklung und können somit allenfalls als Ergänzung zu bestehenden Wartungsmaßnahmen empfohlen werden. Dennoch ist es vielversprechend, sich die Möglichkeiten vor Augen zu halten, die sich durch die digitale Transformation und verwandte Theorien bieten. So ist zu hoffen, dass Praktiker:innen und Forschende aus dem Bereich Predictive Maintenance von den hier vorgestellten Theorien profitieren. Dies könnte sich als Ansatzpunkt zu einem engeren Austausch zwischen den Disziplinen erweisen.

Literaturverzeichnis

- Achouch, Mounia et al. 2022. On Predictive Maintenance in Industry 4.0: Overview, Models, and Challenges. *Applied Sciences* 12: 8081.
- van Aerssen, Benno, Christian Buchholz, und Nicolas Burkhardt. 2022. *Das große Handbuch Digitale Transformation: 222 Methoden und Instrumente für mehr Wandlungsfähigkeit im Unternehmen*. Vahlen, Franz.
- Albukhitan, Saeed. 2020. Developing Digital Transformation Strategy for Manufacturing. *Procedia Computer Science* 170: 664–671.
- Allwein, Florian, und Claudia Heß. 2024. Transformative Kompetenzen für die Digitale Transformation im Fernstudium vermitteln: Das „Projekt Digitale Transformation“ an der IU Internationale Hochschule (angenommen). In *Future Skills mit Online-Angeboten lehren und lernen – Schlaglichter aus Wissenschaft, Wirtschaft und Schule*, Hrsg. Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e.V.
- Anaba, David Chinalu, Azeez Jason Kess-Momoh, und Sodruddeen Abolore Ayodeji. 2024. Digital transformation in oil and gas production: Enhancing efficiency and reducing costs. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research* 6: 2153–2161.
- Appel, Martin et al. 2022. *Leitfaden zum Reifegradmodell Digitale Prozesse 2.0*. Bitkom e.V.
- Appelfeller, Wieland, und Carsten Feldmann. 2023. *Die digitale Transformation des Unternehmens: Systematischer Leitfaden mit zehn Elementen zur Strukturierung und Reifegradmessung*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Apple. 2024. iPhone 15 Pro und iPhone 15 Pro Max - Technische Daten. *Apple (Deutschland)*. <https://www.apple.com/de/iphone-15-pro/specs/>. Zugegriffen: 20. Juni 2024.
- Cardoso, Alberto et al. 2023. Technical Components Integration Using APIs for Predictive Maintenance in the Context of Industry 4.0 Digital Transformation. In *Open Science in Engineering*, Hrsg. Michael E. Auer, Reinhard Langmann und Thrasyvoulos Tsiatsos, 951–960. Cham: Springer Nature Switzerland.
- Dwivedi, Yogesh K. et al. 2015. Research on information systems failures and successes: Status update and future directions. *Information Systems Frontiers* 17: 143–157.
- Falamarzi, Amir, Sara Moridpour, und Majidreza Nazem. 2019. A Review on Existing Sensors and Devices for Inspecting Railway Infrastructure. *Jurnal Kejuruteraan* 31: 1–10.
- Friesike, Sascha, und Johanna Sprondel. 2021. *Träge Transformation. Welche Denkfehler den digitalen Wandel blockieren*. Reclam Verlag.
- Gassmann, Oliver, und Philipp Sutter. 2023. *Digitale Transformation gestalten: Geschäftsmodelle Erfolgsfaktoren Checklisten*. 3., aktualisierte Edition. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Gassmann, Oliver, Karolin Frankenberger, und Michaela Csik. 2021. *Geschäftsmodelle entwickeln. 55 innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator*. 3. Aufl. Carl Hanser Fachbuchverlag.

- Krcmar, Helmut. 2015. *Informationsmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kulkarni, Rohan. 2023. *Onboard condition monitoring of vehicle-track dynamic interaction using machine learning*. KTH Royal Institute of Technology.
- McNab, T., D.A. James, und D. Rowlands. 2011. iPhone sensor platforms: Applications to sports monitoring. *Procedia Engineering* 13: 507–512.
- Mobley, R. Keith. 2002. *An Introduction to Predictive Maintenance*. Elsevier.
- Niu, Xiaoji, Quan Zhang, You Li, Yahao Cheng, und Chuang Shi. 2012. Using inertial sensors of iPhone 4 for car navigation. In *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, 555–561. Myrtle Beach, SC, USA: IEEE <http://ieeexplore.ieee.org/document/6236927/>. Zugegriffen: 13. August 2024.
- Nunez, Alfredo et al. 2018. Smart technology solutions for the NeTIRail-INFRA case study lines: Axle box acceleration and ultra-low cost smartphones. *Proceedings of the 7th Transportation Research Arena 2018*.
- Pousttchi, Key. 2019. Digitale Transformation. *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik*. <https://wi-lex.de/index.php/lexikon/technologische-und-methodische-grundlagen/informatik-grundlagen/digitalisierung/digitale-transformation/>. Zugegriffen: 25. Mai 2023.
- Resch, Michael. 2022. *Digitalwüste Deutschland: Kommunikation per Fax, digitale Bildungslücken – Wie die Verweigerung von mehr Digitalisierung die Zukunft unseres Landes bedroht*. München: Heyne.
- Rogers, David L. 2016. *The Digital Transformation Playbook: Rethink Your Business for the Digital Age*. Columbia Business School Publishing.
- Schallmo, Daniel R.A., Joachim Reinhart, und Evelyn Kuntz. 2018. *Digitale Transformation von Geschäftsmodellen erfolgreich gestalten: Trends, Auswirkungen und Roadmap*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Schmidt, Holger. 2024. Deutschlands digitale Infrastruktur wird besser, die Bildung nicht. *FAZ.NET*. <https://www.faz.net/pro/d-economy/transformation/deutschlands-digitale-infrastruktur-wird-besser-die-bildung-nicht-19844352.html>. Zugegriffen: 15. August 2024.
- Siemens Mobility. 2024. Mess- und Monitoringlösungen für Züge und Schienen. *Siemens Mobility Global*. <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/digitale-loesungen-software/digitale-services/mess-und-monitoringloesungen.html>. Zugegriffen: 23. August 2024.
- Stübinger, Lukas, und Kristin Stavrianidis. 2022. Track monitoring smartphone app. *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*.
- Verhoef, Peter C. et al. 2021. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. *Journal of Business Research* 122: 889–901.
- Vogel-Heuser, Birgit. 2014. Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik. In *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung · Technologien · Migration*, Hrsg. Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser, 37–48. Wiesbaden: Springer Fachmedien.