

25. Verkehrswissenschaftliche Tage 2016

Infrastrukturbewirtschaftung im digitalen Zeitalter – Der lange Weg zur zustandsorientierten Instandhaltung

Thomas Böhm¹, Katrin Lüddecke², Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer²

¹ DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik,
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

² DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik,
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig

1 Einleitung

Zum Erhalt ihrer Wettbewerbsfähigkeit sind Eisenbahninfrastrukturbetreiber seit jeher gezwungen, eine hohe Verfügbarkeit der Gleise, Signale, Stellwerke, etc. zu niedrigen Betriebsaufwänden zu gewährleisten. Mit wachsendem Verkehrsaufkommen sinken die freie Kapazität und oftmals auch die Robustheit gegenüber Störungen. Obwohl jedes einzelne Element für sich eine hohe Verfügbarkeit besitzt (in der Regel über 99,9%), kommt es in Summe nach wie vor zu vielen infrastrukturbedingten Störungen im deutschen Eisenbahnnetz. Die resultierenden Verspätungen sind ein großes Ärgernis für Fahrgäste und verursachen hohe Kosten. Verspätungen beliefen sich im Jahr 2014 bei der Deutschen Bahn AG (DB) auf rund 12,5 Millionen Minuten [1]. Abhilfe verspricht hier eine zustandsorientierte Instandhaltung, die auf einer automatischen, kontinuierlichen Überwachung mit Zustandsdiagnose und -prognose basiert. Dadurch wird die Instandhaltung effizienter, es wird schneller entört und Ausfälle werden verhindert. Gerade mit den viel propagierten Möglichkeiten der Digitalisierung und Industrie 4.0 scheint das Ziel greifbar zu sein. So verwundert es nicht, dass die DB eine Reihe von 4.0-Initiativen gestartet hat, die in vielerlei Hinsicht explizit auf die Digitalisierung setzen [2]. Die Digitalisierung ist derzeit vor allem durch Endverbraucher bzw. Konsumentenelektronik getrieben, denn nirgends sind die Wachstumsraten bei Nutzern und Daten höher. TV-Sender, Radio und Zeitungen übermitteln Jahr für Jahr sechs Prozent mehr Information. Die Datenübertragung via Telefon und Internet ist dagegen um 28 Prozent pro Jahr gewachsen, gut viermal so schnell wie die Weltwirtschaft [3]. Das Wachstum liegt nicht zuletzt daran, dass die erzeugenden und verarbeitenden Geräte im Jahrestakt leistungsfähiger werden. Zudem haben die Geräte einen kurzen Lebenszyklus von zwei bis vier Jahren. Das wiederum ermöglicht Inventionen, die schnell den Markt durchdringen. Investi-

¹ Korrespondierender Autor: thomas.boehm@dlr.de, www.dlr.de/ts/

² Katrin.lueddecke@dlr.de, www.dlr.de/ts/

tionsgüter wie die Schieneninfrastruktur sind hier im Nachteil, erst recht da sie nur im netzartig verteilten Verbund ihren Nutzen entfalten. Beispielsweise stiftet ein einzelner Streckenabschnitt, der mit dem Europäischen Zugleitsystem ETCS ausgerüstet ist, wenig Nutzen, wenn es keine komplementär ausgerüsteten Fahrzeuge gibt und kein Übergang zu konventionellen Strecken möglich ist. Im Endverbrauchermarkt verteilen sich die Kosten auf sehr viele Individuen, während Ausgaben bei Investitionsgütern meist von einem bis wenigen Unternehmen getragen werden. Viel wichtiger ist jedoch, dass es keinen Zweitverwertungsmarkt gibt. Konsumentenelektronik wird häufig ersetzt, bevor das Ende der technischen Lebensdauer erreicht ist. Mobiltelefone werden dabei zur Finanzierung der Neuanschaffung oft in den Gebrauchtmärkten weiterverkauft. Dies ist bei Infrastruktur selten bis gar nicht der Fall. Auch deshalb werden Investitionsgüter deutlich langsamer digitalisiert als Gebrauchsgüter. Die Investition muss sich erst vollständig amortisieren. Weil ein Besitzer lange an seine Investition gebunden ist, ist es besonders wichtig, diese während der Besitzdauer effizient zu betreiben. Es ist schon lange bekannt, dass eine zustandsorientierte Instandhaltung mit automatischer Diagnose und Prognose die beste Strategie darstellt, um Investitionsgüter bzw. Eisenbahninfrastruktur bei hoher Verfügbarkeit kosteneffizient instand zu halten [4][5]. Dazu bedarf es jedoch Sensoren, Kommunikation und Algorithmen. Das sind gerade jene zentralen Elemente der Digitalisierung, die die Infrastruktur noch nicht vollständig besitzt und die erst nachgerüstet oder mit neuen Anlagengenerationen eingeführt werden müssen.

Ganz allgemein muss die Digitalisierung also zunächst einmal finanziert und verbreitet werden, bevor ihr Potenzial ausgeschöpft werden kann. Dies vorausgesetzt werden im Folgenden notwendige Grundlagen für eine effiziente Infrastrukturbewirtschaftung beschrieben, insbesondere für eine hohe Verfügbarkeit. Anhand der eigenen Erfahrungen aus fast zehn Jahren Forschung zur automatischen Zustandsüberwachung werden Herausforderungen und Lösungsansätze diskutiert. Dies adressiert Datenerfassung, Georeferenzierung von Messungen, Datenmanagement und Algorithmen der Zustandsinterpretation. Auf diese Weise wird deutlich, warum der Weg vielleicht doch weiter ist als angenommen. Denn neben hohen Investitionen und der langen Lebensdauer der Infrastrukturanlagen bringt auch die Digitalisierung ihre eigenen Hemmnisse mit sich.

2 Herausforderungen bei der Digitalisierung

Die Herausforderungen, die um und mit der Digitalisierung entstehen, werden entlang der Verarbeitungskette von Daten zu Informationen diskutiert. Auch wenn die Punkte stark verknüpft sind, wird dem komplexen Thema auf diese Weise eine gewisse Struktur verliehen.

2.1 Datenerfassung

Digitalisierung heißt zunächst erst einmal digitalisieren. Es müssen kontinuierlich Daten über die Infrastruktur erhoben werden. Dabei stellen sich die Fragen, was kontinuierlich tatsächlich bedeutet und zu welchen Parametern Daten erhoben werden. Als Antwort auf die Frage des Zeitintervalls könnte auf die bestehenden Regelwerke zu den Inspektionsfristen verwiesen werden. Zum Beispiel bestimmen die Konzernrichtlinien (KoRil) für die Instandhaltung des Oberbaus [6] und für Leit- und Sicherungstechnik (LST) [7] Fristen für die Inspektion. Die vorgeschriebenen Inspektionsintervalle sind daran ausgerichtet, dass zwischen den Inspektionen aufkommende Verschleißphänomene nicht zu sicherheitskritischen Fehlern führen.

Demnach sind Weichen jede Woche bis alle vier Wochen zu inspizieren, je nachdem welcher der drei Belastungskategorien die jeweilige Weiche angehört [7]. Sollen jedoch Störungen frühzeitig erkannt werden, reicht dies nicht mehr aus, insbesondere da der Großteil der Störungen vom Antriebs- und Verschlussystem der Weiche ausgehen. Eine kontinuierliche Überwachung muss daher mindestens jeden Umlauf aufzeichnen. Dafür gibt es bereits existierende Lösungen wie SIDIS W compact von SIEMENS, Roadmaster von voest alpine oder Poss von Strukton. Diese Systeme messen hauptsächlich elektrische Parameter während des Weichenumlaufs. Die Herausforderung liegt dann in der automatischen Auswertung dieser Messungen (siehe Abschnitt 2.4).

Im Gegensatz zum punktförmigen Element Weiche sind Gleise linienförmige Elemente. Die Überwachung muss also ortsveränderlich erfolgen. Durchgehende Hauptgleise werden jeden Monat bis alle sechs Monate zum Zweck der Inspektion begangen [6]. Spezielle Messfahrzeuge erfassen zusätzlich die Gleisgeometrie oder den Schienenzustand alle drei bis 24 Monate. Durch exponentielles Wachstum können sich kleinere Mängel der Schienenoberfläche in der Zeit zwischen zwei Messungen derart verschlechtern, dass die folgende Wartung die Lebensdauer der Schiene deutlich verringert. Zwischenmessungen verbessern diese Situation. Schätzungsweise ist eine Erfassung im Wochenintervall für Schienenfehler ausreichend kontinuierlich, wenn die Schiene singular betrachtet wird. Die Digitalisierung bietet aber gerade Chancen in der Kombination verschiedener Datenquellen. Im konkreten Beispiel der Weichen können auch die Beschleunigungs- oder Akustikmessungen für die Beurteilung des Weichenzustands herangezogen werden, die eigentlich für Schienenoberflächenfehler intendiert sind. Deshalb sollte das Messintervall für die Schiene kleinstmöglich ausfallen, um sich weitestgehend an die Weichenumläufe anzunähern. Dies gilt auch ganz allgemein: Die Frequenz einer automatischen Erfassung sollte für alle Anlagen so hoch wie möglich sein, damit wechselseitig Daten genutzt werden können. Da jedoch weder zusätzliche Trassen für Messfahrten noch weitere Messfahrzeuge wirtschaftlich erstrebenswert sind, werden seit einigen Jahren Regelzugmesssysteme entwickelt und erprobt [8]. Diese Lösungen müssen selbstverständlich wesentlich kostengünstiger sein als Messzüge. Einen dreistelligen Betrag sollte ihre Anschaffung nicht übersteigen. Trotzdem müssen sie eine ausreichende Messgenauigkeit erreichen.

Wenn es darum geht, welche Parameter mittels Sensorik erfasst werden, kann die Antwort nicht so pauschal ausfallen wie beim Zeitintervall. Jedes Infrastrukturelement zeigt seinen Zustand durch verschiedene Phänomene. Diese können durch direkte oder indirekte Parameter gemessen werden. Eine Ultraschallmessung der Schiene offenbart direkt den Zustand im Inneren und an der Oberfläche, während Beschleunigungswerte und Akustik auf Oberflächenfehler hindeuten. In der Regel bedarf es eines längeren iterativen Prozesses die richtigen und relevanten Parameter zu bestimmen und mit technischen Mitteln zu erfassen. Beispielsweise existieren die erwähnten Stellstrommessungen am Weichenantrieb schon seit Beginn der Jahrtausendwende, aber erst die umfangreichen Analysen der letzten Jahre haben gezeigt, welche Größen dabei aussagekräftig sind und mit welchen zusätzlichen Daten sie angereichert werden müssen [9][10][11].

Sobald sich ein Betreiber für eine konkrete Sensorik entschieden hat, begibt er sich bereits wieder in denselben Zyklus aus Anschaffung, Besitz und Ersatz wie auch schon für seine eigentliche Infrastruktur. Hier unterscheiden sich die Werkzeuge der Digitalisierung nur in ihrer kürzeren Lebensdauer von der klassischen Infrastruktur. Der Betreiber ist gut darin be-

raten, von Anfang an die Austauschbarkeit von Komponenten zu berücksichtigen, etwa durch eine flexible modulare Architektur. Diese soll es erlauben abgängige Sensoren mit neuen Versionen oder ganz neuer Technik zu ersetzen. Solch eine flexible Architektur wurde am DLR Institut für Verkehrssystemtechnik (TS) für das mobile Labor RailDrIVE entworfen und implementiert. Das RailDrIVE dient der Erprobung verschiedener Sensoren und deren Daten nutzenden Algorithmen (nähere Informationen in [12]). Für diesen Zweck müssen verschiedenste Sensoren leicht und schnell austauschbar sein, unabhängig von der nachfolgenden Datenverarbeitung und -interpretation.

2.2 Kommunikation

Im Idealfall hat der Eisenbahninfrastrukturbetreiber seine Elemente und auch viele Regelzüge mit Technik ausgerüstet, so dass sie Daten erfassen. Das wirft weitere Herausforderungen der Digitalisierung auf. Wie sollen diese Daten von der Sensorik zur weiteren Verarbeitung gelangen? Die heutige Telekommunikationsinfrastruktur ist dafür noch gar nicht ertüchtigt. Das prototypische Regelzugmesssystem, welches vom DLR TS entwickelt wurde, liefert derzeit rund 66 MB pro Stunde von einem einzigen Zug. Im Netz der DB sind täglich rund 1290 eigene Fernverkehrs- und circa 23.000 eigene Regionalverkehrszüge unterwegs [13]. Kommen zusätzlich Daten optischer Systeme hinzu, beispielsweise von Videokameras oder Laserscannern bei der Überwachung des Lichtraumprofils oder des Fahrdrachts, sind die Datenmengen noch um ein Vielfaches höher. Häufig werden Messdaten noch auf Wechselfestplatten gespeichert, um sie im Depot zur Analyse zu tragen oder per Netzwerk auf einen zentralen Server zu laden. Der Zeitverzug zwischen Erfassung und Auswertung verhindert eine Verarbeitung in Echtzeit. Aber gerade die Echtzeitverarbeitung (und Analyse) ist für die schnelle Fahrgastinformation und eine schnelle Reaktion der Instandhaltung essentiell, wenn Störungen verhindert oder zumindest ihre Auswirkungen minimiert werden sollen. Deswegen braucht es eine Kommunikationstechnik, die – im Gegensatz zur vorhandenen – für große Datenmengen vieler mobiler Quellen geeignet ist. Mobilfunkstandards der vierten (LTE) und sicher der fünften Generation (5G) erfüllen diese Anforderungen. 5G wird allerdings vermutlich erst 2020 Marktreife erreichen [14].

Bei der Kommunikation ist nicht allein die Bandbreite ausschlaggebend. Auch die Netzabdeckung spielt eine wesentliche Rolle. Dabei ist zu überlegen, ob öffentliche Netze eine richtige Wahl sind. In puncto Priorisierung beim Routing von Daten ist ein eigenes Netz von Vorteil. Deshalb ist ggf. die Anbindung an das Bahneigene Glasfasernetz (IKI-Ringe) ein besserer, wenn auch teurerer Weg, der zugleich die Qualität und Verfügbarkeit des Telekommunikationsnetzwerks erhöht. Ein weiterer Aspekt bei der Kommunikation von Messtechnik ist die Erreichbarkeit per eindeutiger Kennung, gemeint ist die IP-Adresse. Der Adressraum im Internetprotokoll IPv4 ist seit 2011 theoretisch erschöpft [15]. Durch dynamische Vergabe und Subnetze (Network Address Translation) können zwar auch weiterhin neue Endpunkte angeschlossen werden, allerdings nur begrenzt. Eine volle Vernetzung aller Endpunkte, also aller Messsensoren für eine Zustandsüberwachung, wird ohne IPv6 nicht gelingen. D.h. alle notwendigen Geräte müssen modern genug sein, mit diesem Protokoll zu arbeiten.

2.3 Datenmanagement

Vorausgesetzt die Kommunikationsinfrastruktur bietet den IPv6-Geräten eine ausreichende 5G Netzabdeckung, um die vielen Daten zu bewegen, muss die nächste Herausforderung der Digitalisierung gemeistert werden. Die auflaufenden Daten müssen gemanagt werden.

Die Menge der Daten zu speichern und zu verteilen ist dabei rein technisch unproblematisch. Die Schwierigkeit liegt im Austausch, in der Verknüpfung sowie in der zeitlichen und räumlichen Attribuierung der Daten als Vorbereitung für informationsextrahierende Algorithmen. Schon heute sind Daten von Messungen, Strecken, Verkehren, etc. vorhanden und teilweise verknüpft. Beispielsweise enthält DB GIS raumbezogene Daten, IRISSYS Daten von Gleismessfahrten und SAP statische Anlagendaten sowie Störungsmeldungen. Das Diagnose- und Analyse-System (DIANA) der DB AG verknüpft unterschiedliche Überwachungs- und Steuerungssysteme für die Infrastruktur. Die Plattform nutzt den Open Platform Communications Unified Architecture Standard (OPC UA), um Daten von Sensoren in fest definiertem, maschinenlesbarem Format zu verarbeiten und bereitzustellen. Durch die selbstbeschreibenden Datenformate und die Gesamtarchitektur ist das Management flexibel und unabhängig von der Hardware. Solche Datenformate müssen für alle Anlagentypen samt den relevanten Überwachungsparametern definiert werden. Dies ermöglicht einen einfachen Austausch bzw. die Verknüpfung von unterschiedlichen Daten ohne manuellen Aufwand. Außerdem können leicht Analyse- und Visualisierungswerkzeuge integriert werden.

Während die Definition und Implementierung der Datenformate eher eine Fleißarbeit ist, liegt die größere Herausforderung darin, die korrekte räumliche und zeitliche Attribuierung der Überwachungsdaten sicherzustellen. Mit zeitlicher Attribuierung ist ein einheitliches und synchrones Zeitsystem gemeint, z.B. Universal Time Coordinated (UTC). Diese muss bei allen Aufzeichnungen mit verfügbar sein. Mit räumlicher Attribuierung ist die Georeferenzierung von Messdaten gemeint. Bei Messfahrten bewegt sich ein Fahrzeug unterschiedlich schnell, während die Sensorik mit konstanten Frequenzen aufzeichnet. Dadurch variiert entlang des Gleises die Raumdistanz zwischen zwei Messimpulsen. Außerdem ist nicht sicher bekannt, welches Gleis befahren wurde. Es kann gerade in Knoten leicht ein Gleiswechsel stattfinden. In der Praxis werden deshalb Gleisfehler 100m-Abschnitten zugeteilt. Vor ihrer Behebung muss dann durch manuelle Begehung die genaue Stelle identifiziert werden. Auch eine automatische Dokumentation darüber, wie sich ein Schienenfehler über mehrere Messungen hinweg entwickelt, ist ohne Georeferenzierung problematisch. Dies wäre aber für eine Prognose essentiell. Zwar existieren algorithmische Ansätze, um Messphänomene in verschiedenen Zeitreihen anhand eines charakteristischen Musters wiederzuerkennen [16]. Diese Ansätze sind jedoch aufwändig zu entwickeln, auf Einzelphänomene spezialisiert und nicht generalisierbar. Die Georeferenzierung mittels Globaler Navigations-Satelliten-Systeme (GNSS) ist ein allgemeingültiger Weg. Auf dem Markt gibt es zwar sehr genaue Ortungssysteme. Sie sind mit Kosten im fünfstelligen Bereich für eine Regelzugausrüstung unwirtschaftlich. Deshalb wird am DLR TS eine Multi-Sensor-Georeferenzierung erforscht, die mit kostengünstigen Standardkomponenten arbeitet [17]. Im Gegensatz zur herkömmlichen GNSS-Ortung werden alle verfügbaren Satellitensignale (GPS und GLONAS Rohdaten) in Verbindung mit Referenzstation und Daten der korrigierten Satellitenbahn verwendet. Im sogenannten Real-Time-Kinematic (RTK) Verfahren wird eine Genauigkeit erreicht, die einer alleinigen GNSS-Ortungslösung überlegen ist. Dies hat die Erprobung auf dem Diagnosemessfahrzeug der Schweizerischen Bundesbahn (SBB) gezeigt. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, ermittelt die RTK-Lösung auch nach der Weichenüberfahrt eine gleisgenaue Position (orange Punkte), während die Stand-Alone-GNSS-Ortung (rote Punkte) dies nicht sicherstellen kann. Für die Georeferenzierung in Bereichen mit ungenügender Satellitenverbindung wird die RTK-Lösung mit weiteren Daten eines Doppler Radars, eines Beschleunigungssensors, von Balisen und einer digitalen Streckenkarte fusioniert. Das Ergebnis liefert auch unter

schlechten Bedingungen eine glisselektive Ortungsgenauigkeit. [17] Allerdings liegt bei einer Distanz ab 800 m ohne Satellitenkontakt derzeit die Grenzen dieses Verfahrens. Deshalb muss weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit betrieben werden, bevor mehrere Messreihen des gleichen Ortes automatisch versioniert und in ihrer Entwicklung verfolgt werden können.

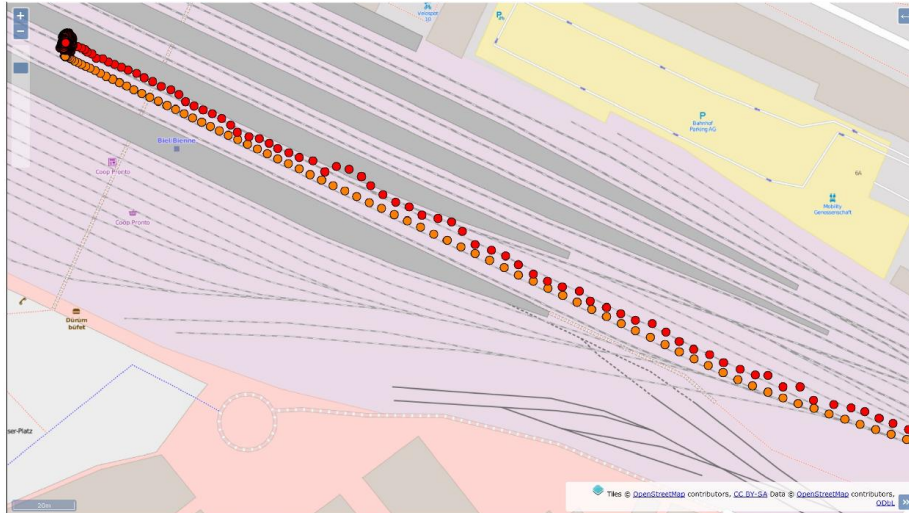


Abbildung 1: Ortung mit Real-Time-Kinematic (orange Punkte) und mit Stand-Alone-GNSS (rote Punkte); Quellen: [17] mit Hintergrundkarte OpenStreetMap [18]

2.4 Algorithmen

Wird davon ausgegangen, dass Erfassung, Kommunikation und Datenmanagement gelöst sind, müssen letztlich noch Informationen aus den Daten gewonnen werden. Denn die Digitalisierung ist kein Selbstzweck, sondern muss im Fall der Infrastrukturbewirtschaftung zu höherer Verfügbarkeit und geringeren Kosten führen. Obwohl in dieser Hinsicht auch Einsatzplanung, Werkzeugoptimierung und Investitionsplanung wichtige Profiteure der Digitalisierung sind, wird ein bestimmter Fokus gesetzt. Anhand der Sensordaten sollen Fehler detektiert, Ursachen diagnostiziert und die verbleibende Nutzungsdauer (RUL) automatisch ermittelt werden. Diese Themen werden unter dem Begriff Prognose und Gesundheitsmanagement (PHM) aggregiert und verwenden Statistik und Data Mining. Die Algorithmen im Bereich PHM sind so zahlreich, wie die Infrastrukturelemente selbst. Die Suche nach passenden, performanten Algorithmen ist ein zeitaufwändiger, iterativer Prozess, bei dem auch bahnspezifisches Expertenwissen für die Plausibilisierung der Ergebnisse benötigt wird. Daten sind nicht gleichbedeutend mit Informationen, denn dazwischen steht die Analyse. Mit ihrer Hilfe wird ein mathematisches Modell erzeugt, das einen Zusammenhang zwischen Messdaten und Zustand herstellt. Hierfür kommen überwachte Lernverfahren in Betracht. Diese Verfahren werden so bezeichnet, weil die Muster von bekannten vergangenen Ereignissen (Fehlfunktion) abgeleitet sind. Der maschinelle Lernprozess ähnelt dem menschlichen. Als Kind wird uns gezeigt, was ein Hund, eine Katze, eine Kuh, etc. ist. Wir selbst identifizieren die beschreibenden Merkmale und speichern diese. Wenn wir dann ein Tier sehen, gleichen wir die Merkmale ab und bestimmen die Art. Solche Algorithmen - sogenannte Klassifikationsverfahren - existieren in sehr vielfältiger Ausprägung, beispielsweise in Form künstlicher Neuronaler Netze, als Entscheidungsbäume oder als Stützvektorenmaschinen. Sie alle besitzen Vor- und Nachteile, die in der Literatur ausführlich dargestellt werden, z.B.

in [19]. Einige sind gut für den Menschen lesbar, andere benötigen wenig Speicherplatz oder Rechenaufwand und wieder andere eignen sich nur bei kleiner Merkmalsanzahl oder sind aufwändig zu parametrieren. Aber bei allen Verfahren muss der Anwender diese gut genug kennen, um das Verfahren zu wählen und zu parametrieren, welches zu seinem Problem und zu seiner Datenstruktur passt.

Sollen nun überwachte Lernverfahren bei der datengetriebenen, zustandsabhängigen Instandhaltung angewendet werden, braucht es Störungen mit gut dokumentierten Ursachen. Hierfür kann theoretisch SAP die Grundlage bilden. Beispielsweise sind darin für Weichen der DB Netz AG Störungsursachen wie etwa zugefahrene Isolierstöße, verbogene Spurstangen, mangelnde Gleitfähigkeit der Gleitstühle, blockierende Verschlüsse oder Fremdkörper dokumentiert. Die Ursachen werden mit Messdaten und weiteren externen Daten fusioniert. Jede Ursache bildet nun eine eigene Klasse, für die eine Zuordnungsvorschrift anhand der fusionierten Datenbasis gefunden werden muss. Selten ist nur ein einzelner Parameter selbst aussagekräftig. In der Regel werden für jeden Parameter charakteristische Merkmale der Messreihen betrachtet, z.B. Maxima/Minima, Mittelwert, Varianz/Streuung und Frequenzanteile. Und auch ein einzelnes dieser Merkmale reicht kaum aus, vor allem da es mehrere Ursachen gibt. Darüber hinaus können die Grenzen zwischen den Klassen auch häufig nicht linear verlaufen. Abbildung 2 (links) veranschaulicht einen Fall, bei dem zu erkennen ist, dass die drei dargestellten Ursachen nicht anhand von zwei Merkmalen zu diagnostizieren sind. Erst durch ein weiteres Merkmal kann eine Zuordnungsvorschrift gebildet werden (Abbildung 2 rechts). Auch die Korrelationseigenschaft der Merkmale untereinander ist ein entscheidender Aspekt, weil Abweichungen einzelner Merkmale für sich genommen unauffällig sind (siehe Abbildung 3 oben). Erst in ihrer Korrelation fällt auf, dass der Normalzustand verlassen wurde (siehe Abbildung 3 unten). Wie schon bei der Wahl der relevanten zu erfassenden Messgrößen ist auch die Wahl aussagekräftiger Merkmale und Korrelationsbeziehungen erfolgsentscheidend bei der Digitalisierung, denn Menschen sind keineswegs mehr in der Lage diese Datenmengen und -vielfalt auszuwerten.

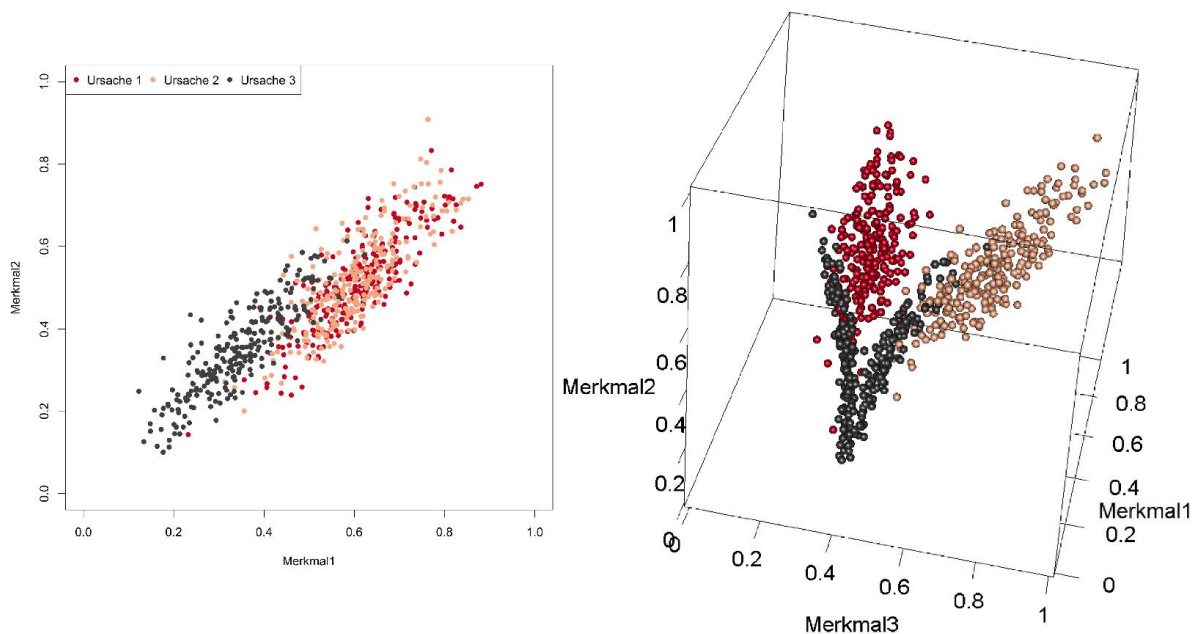


Abbildung 2: Beispiel von Störungsursachen im zweidimensionalen, normierten Merkmalsraum (links) und im dreidimensionalen Raum; Quelle [20]

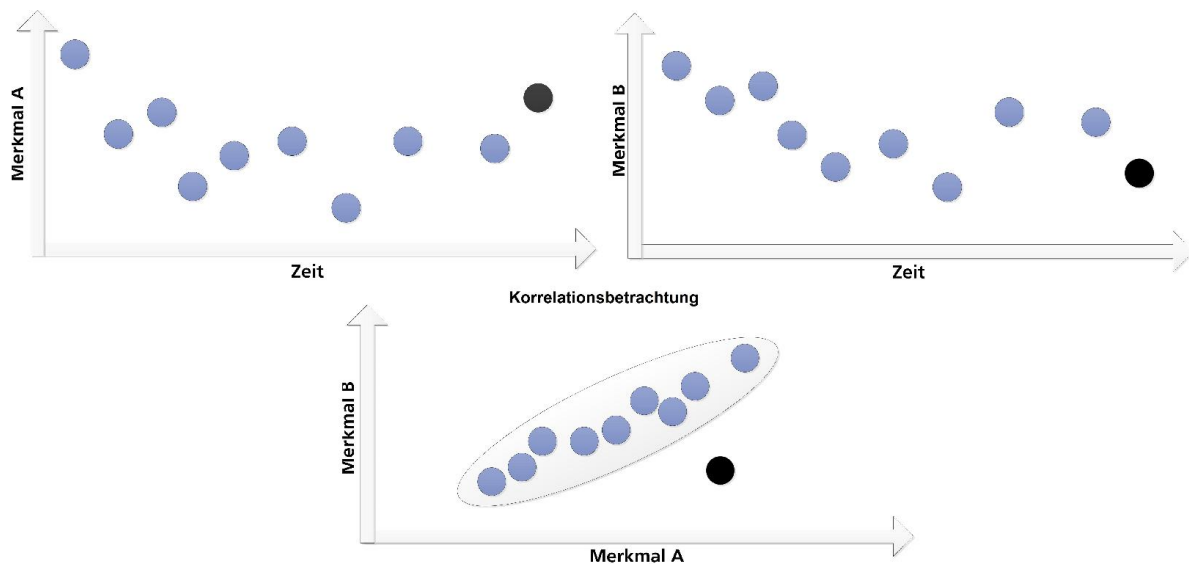


Abbildung 3: Unauffällige Abweichung bei Einzelbetrachtung von Merkmalen (oben) gegenüber der auffälligen Abweichung bei Korrelationsbetrachtung (unten); Quelle: [11]

So leistungsfähig Data Mining und Mustererkennung auch sind, wenn die Datenqualität nicht gegeben ist, bleibt das Ziel unerreicht. Denn die überwachten Lernverfahren liefern zwar sehr genaue Ergebnisse, aber stützen sich nun mal darauf, dass die Zielklassen bekannt sind. In verschiedenen Anwendungsprojekten hat sich gezeigt, dass vor allem die Ursachendokumentation meistens nicht die Mindestanforderungen erfüllt, um eine automatische Zustandsbeurteilung praktisch umzusetzen.

Solange die Datenbasis keine ausreichende Qualität bietet, um überwachte Verfahren anzuwenden, kann auf unüberwachte Verfahren zurückgegriffen werden, insbesondere Methoden der statistischen Prozessüberwachung (SPC). Diese sind zwar in puncto Ursachenerkennung weniger leistungsfähig, können aber Fehler sehr gut detektieren. Die Grundidee bei der SPC ist, alle ermittelten Merkmale eines Infrastrukturelementes auf nur 2 repräsentative Größen abzubilden. Eine dieser Größen repräsentiert hierbei die Veränderungen in den Merkmalswerten selbst. Die zweite Größe detektiert Abweichungen in den Korrelationseigenschaften der Merkmale. Anhand allein dieser beiden Größen ist es möglich, eine Fehlerdetektion zu implementieren. Hierbei werden mit Hilfe eines repräsentativen Satzes von historischen Messdaten entsprechende Alarmgrenzwerte rein statistisch bestimmt. Bei der angestrebten Diagnose werden dann anhand der aktuellen Messdaten genau diese zwei repräsentativen Größen ermittelt und mit den vorab bestimmten Grenzwerten verglichen. Werden die Grenzwerte überschritten, wird automatisch ein Alarm generiert. Der Vorteil bei diesem Vorgehen ist, dass abgesehen von der Auswahl geeigneter Messgrößen, kein weiteres Expertenwissen über das zu diagnostizierende Infrastrukturelement nötig ist. Ebenfalls werden keine Messdaten über bereits degradierte und fehlerhafte Elemente benötigt. Der Nachteil ist, dass eine Diagnose und somit eine gezielte, schnelle Entstörung kaum möglich ist. Die Prognose ist zwar möglich, erfolgt aber ebenfalls ursachenunspezifisch. Deshalb muss sich die Dokumentation als Ausgangspunkt überwachten Lernens verbessern, durch eine technische Unterstützung und durch bessere organisatorische Rahmenbedingungen. Hier schließt

sich der Kreis, da eine bessere Dokumentation von Instandhaltungs- und Baumaßnahmen in der Infrastruktur vor allem durch Automatisierung und Digitalisierung erreicht werden muss.

3 Fazit

Anhand der ausgeführten Erläuterungen und Beispiele wird deutlich, dass längst nicht alle Wege für eine optimale Infrastrukturbewirtschaftung im digitalen Zeitalter ergründet sind. Im Folgenden seien die wichtigsten Herausforderungen noch einmal zusammengefasst.

- Die Frequenz einer automatischen Erfassung sollte für alle Anlagen so hoch wie möglich sein, damit wechselseitig Daten genutzt werden können.
- Um die relevanten Parameter und die passende Sensorik zu bestimmen, ist ein längerer iterativer Prozess notwendig.
- Es muss eine flächendeckende Kommunikationsinfrastruktur vorhanden sein, die luft-schnittstellenbasierte Übertragungsgeschwindigkeiten von mindestens 100 Mbit/s (LTE) abdeckt und IPv6-fähig ist. Damit gelingt es, das Datenvolumen und die Vielzahl von Sensoren einzubinden und zu nutzen.
- Maschinenlesbare, selbstbeschreibende Datenformate sind für alle Anlagentypen und ihre relevanten Zustandsparameter notwendig, damit Daten effizient ausgetauscht und verknüpft werden können.
- Erst eine synchrone zeitliche und genaue räumliche Attribuierung erlaubt ein Datenmanagement, in welchem Daten über universelle Attribute verknüpft und automatisch versioniert werden können. Dies ist insbesondere für die Prognose unersetzlich.
- Zur Entwicklung leistungsfähiger überwachter Lernverfahren für die Diagnose und Prognose ist eine zuverlässige, korrekte Dokumentation von Störungsursachen und Gegenmaßnahmen unabdingbare Voraussetzung.
- In einem zeitaufwändigen, iterativen Prozess sind sowohl geeignete Merkmale aus Messdaten als auch passende Algorithmen zu identifizieren bzw. zu entwickeln, die eine automatische, performante und zuverlässige Diagnose und Prognose des Infrastrukturzustands erlauben.

An all diese Punkte schließt sich die Forderung nach einem unterbrechungsfrei digitalen Kanal für Anwenderfeedback an. Denn selbst wenn es bereits Ansätze für Instandhaltungsroboter gibt, spielt der Mensch noch lange eine zentrale Rolle in der Anlagenbewirtschaftung – auch im digitalen Zeitalter.

4 Literatur

- [1] DB NETZ AG: *Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2014 : Internetversion*. Frankfurt am Main, Mai 2015
- [2] DB AG: *Digitalisierung 4.0*. URL <http://mobil.deutschebahn.com/db-mittendrin/total-digital-film-zur-digitaloffensive-der-db/> – Überprüfungsdatum 2016-01-16
- [3] HILBERT, Martin; LOPEZ, Priscila: *The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information*. In: *Science* 332 (2011), Nr. 6025, S.60-65

- [4] BSL MANAGEMENT CONSULTANTS ; R+R BURGER UND PARTNER AG: *InfraCost : The Cost of Railway Infrastructure*. Final Report. Paris, June 2002. – Final Report
- [5] BIEDERMANN, Hubert: *Leistungs- und kostenorientiertes Anlagenmanagement : Gestaltungselemente zur Kostenminimierung und Effizienzsteigerung*. Köln : TÜV-Verl., 2004 (Reihe Praxiswissen für Ingenieure Instandhaltung)
- [6] DB NETZ AG: *Richtlinie 821: Oberbau inspizieren*. Frankfurt am Main, 2010
- [7] DB NETZ AG: *Richtlinie 892: LST - Anlagen montieren und instandhalten*. Frankfurt am Main, 2002
- [8] WOLTER, Klaus Ulrich ; ERHARD, Franz ; GABLER, Hans ; HEMPE, Thomas: *Fahrzeugseitige Überwachung der Infrastruktur im Regelbetrieb : Kontinuierlich inspizieren – Instandsetzung gezielt planen – Qualität und Nachhaltigkeit prüfen*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (2014), 7+8, S. 32–36
- [9] GUTSCHE, Katja ; BÖHM, Thomas: *e-Maintenance of Railway Assets Based on a Reliable Condition Prediction*. In: *International Journal of Performability Engineering* Vol. 7 (2011), Nr. 6, S. 573–582
- [10] BÖHM, Thomas: Accuracy Improvement of Condition Diagnosis of Railway Switches via External Data Integration. In: BOLLER, Christian (Hrsg.): *Proceedings of the Sixth European Workshop on Structural Health Monitoring*. Germany, 2012, S.1550-1558
- [11] SCHENKENDORF, René; LINDER, Christian; BÖHM, Thomas: Potenziale, Techniken und Algorithmen für die Zustandsdiagnose und -prognose bei LST-Elementen. In: VDEI (Hrsg.): *EIK Eisenbahningenieurkalender 2015 : Jahrbuch für Schienenverkehr & Technik 2015*. Hamburg : DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2014, S. 159–172
- [12] LÜDDECKE, Katrin; KLUGE, Andreas: *Mobiles Labor RailDrIVE - Synchrone Erfassung von Sensordaten*. In: *EI - Eisenbahningenieur* 65 (2014), Nr. 01, S. 46–49
- [13] DB MOBILITY LOGISTICS AG: *Daten & Fakten 2014*. Berlin, 2015
- [14] EL HATTACHI, Rachid; ERFANIAN, Javan: *5G White Paper*. 2015
- [15] NUMBER RESOURCE ORGANIZATION (NRO): *Free Pool of IPv4 Address Space Depleted*. Montevideo, 03.02.2011. URL <https://www.nro.net/news/ipv4-free-pool-depleted> – Überprüfungsdatum 2016-01-24
- [16] LINDER, Christian; OEHLER, Alexander: *Klassifikation von Oberbaufehlern am Beispiel Weichen*. In: *EI - Eisenbahningenieur* 65 (2014), Nr. 11, S. 19–22
- [17] JOHANNES, Lars; ALMEIDA, Eduardo C. V.; GROSS, Jörn C. ; ADAM, Stephan: *Georeferenzierte Erfassung von Messdaten mit Schienenfahrzeugen*. In: *EI - Eisenbahningenieur* 66 (2015), Nr. 11, S. 12–17
- [18] www.openstreetmap.org/copyright : (c) OpenStreetMap contributors
- [19] MAIMON, Oded (Hrsg.); ROKACH, Lior (Hrsg.): *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*. 2. ed. Boston (MA USA) : Springer Science+Business Media LLC, 2010
- [20] SCHENKENDORF, René; BÖHM, Thomas: *Aspekte einer datengetriebenen zustandsabhängigen Instandhaltung : (Teil 3) Zustandsdiagnose und -prognose*. In: *EI - Eisenbahningenieur* 65 (2015), Nr. 5, S. 43–49