

Störungen an den Isolierstößen der Schienen mittels präventiver Schadensmusteranalyse in der Instandhaltung erkennen **SISSI**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016
(VIF2016)

September 2018



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien

 Bundesministerium
Verkehr, Innovation
und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:
Messfeld GmbH
Lakeside B07a
9020 Klagenfurt


Messfeld
Kompetenz in
Condition Monitoring

Programmmanagement:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Störungen an den Isolierstößen der Schienen mittels präventiver Schadensmusteranalyse in der Instandhaltung erkennen SISSI

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2016)

AutorInnen:

**Ing. Dipl.Ing. Jutta Isopp
Christina Maltschnig, MSc
Mag. Thomas Aigner
Dr. Karl Rehr
Dr. Richard Brunauer**

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Messfeld GmbH
Logicx consulting & workflow integration GmbH
Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH

Inhalt

1. Projektübersicht	6
1.1. Kurzfassung	6
1.2. Ausgangslage	7
1.3. Innovationsgehalt des Vorhabens und erwartete Ergebnisse	9
1.4. Geplante Vorgangsweise und Methoden	10
2. Zusammenfassung der Arbeiten und die daraus folgenden Ergebnisse.....	14
2.1. Arbeiten in AP2	14
2.2. Zusätzlich erforderliche Arbeiten	20
2.3. Arbeiten in AP3 - Datenanalyse und -aufbereitung	22
2.4. Arbeiten in AP4 - Grobkonzept.....	36
3. Reflexion in Bezug auf das Forschungsziel/frage	53
4. Ausblick – sinnvolle nächste Schritte, Maßnahmen, Empfehlungen	56
5. Resümee	57
6. alternatives Lösungskonzept mittels ÖBB-Messzug	58

1. PROJEKTÜBERSICHT

1.1. Kurzfassung

Momentan muss der Zustand der Schieneninfrastruktur an der Strecke in periodischen, präventiven Prüfzyklen überprüft werden. Es kann aber vorkommen, dass zwischen zwei geplanten Prüfzyklen bereits früher Unregelmäßigkeiten auftreten und diese Störungen im Gesamtsystem verursachen. Um eine effektive und effiziente Erfüllung der verschiedensten Aufgabenstellungen des Betriebs und der Erhaltung zu gewährleisten, ist es nötig sowohl qualitative als auch quantitative Informationen der über große räumliche Distanzen verteilten Schieneninfrastruktur zu sammeln. Im Projekt SISSI werden vorhandene Infrastrukturdaten, GPS-Signale des Triebfahrzeuges und Daten, die mit Hilfe von Onboard-Sensorik gemessen werden, effizient mit Know-how im Instandhaltungsbereich verknüpft und innovative Ansätze zur frühzeitigen Erkennung schadhafter Stellen, die vor der nächsten Untersuchungsperiode eine Störung auslösen, untersucht. Auf diese Art und Weise wird angestrebt, präventiv entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen rechtzeitig vor dem Auftreten von Störungen einzuleiten, ohne punktuelle Kontrollfahrten zu den jeweiligen Streckenabschnitten durchführen zu müssen. Bei diesem Ansatz werden die Zustandsänderungen der Schieneninfrastruktur während dem Betrieb durch Messtechnik im Triebfahrzeug gemessen. Über Analysen von funktionalen Zusammenhängen wird untersucht, ob eine Ableitung auf den konkreten Zustand der Schienen (Isolierstöße) möglich ist und somit frühzeitig drohende Störungen durch die Erkennung von spezifischen Schadensmustern bzw. Überschreitungen von relevanten Schwellwerten zu verhindern. SISSI liefert erste Ergebnisse mit besonderem Augenmerk auf die Schienenisolierstöße, die auf Validierung von vorhandenen Daten über den geforderten TRL hinausgehen. Messfeld hat im letzten Jahr im Rahmen eines Projektes ein Railjet-Triebfahrzeug (116 231) mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet und konnte über ein Jahr Streckendaten (Kräfte, Beschleunigungen) sammeln, auf die im Projekt SISSI zurückgegriffen werden kann. Darüber hinaus wird ein Überblick über für diese Applikation passende Sensorik in einer Sensormatrix dargestellt und verschiedene Konzepte entwickelt und evaluiert. D.h. welche Art von Sensoren benötigt wird, wie hoch die Auflösung sein muss, um die Schäden noch zu erkennen, ob einfache Sensoren (z.B. aus Smartphones) den Anforderungen genügen oder ob hochauflösende Industriesensoren verwendet werden müssen, um diese Isolierstöße zu detektieren. Ein Mehrwert des Projektes liegt auch darin einen Ausblick zu bekommen, um weitere potentielle Störquellen zu identifizieren oder weitere

störungsrelevante Parameter zu bestimmen. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit und gegenseitige Unterstützung verschiedener Bereiche, ermöglicht innovative Ansätze zur Schadensfrüherkennung – beispielsweise durch Bestimmung von Grenzwerten, Kennwertentwicklungen, Mustererkennung oder Erkennung von funktionalen Zusammenhängen. Analysen und Berechnungen der Ergebnisse der vorhandenen Daten aus dem Feldversuch des Vorprojekts der Firma Messfeld können mit abgestimmten Daten der ÖBB INFRA in Verbindung gebracht werden und weiter auf funktionale Zusammenhänge untersucht und bewertet werden. Ein Grobkonzept für eine Integration in die bestehende Systemumgebung des Infrastrukturbetriebes wird ebenfalls erstellt.

1.2. Ausgangslage

Im Infrastrukturbereich hat die Erkennung von potentiellen Störquellen und Gefahrenquellen höchste Priorität, um einen ungehinderten Betrieb des Schienenverkehrs zu gewährleisten und die Fahrsicherheit zu erhöhen. Bisher werden diese Infrastruktur-Inspektionen im Regelfall vom Personal in definierten Prüfzyklen, die auf Verknüpfung von Erfahrungswerten mit vorhandenen Infrastrukturdaten optimiert festgelegt sind, direkt vor Ort an der Strecke durchgeführt und in Form von Inspektionsberichten in der ÖBB INFRA gespeichert. Ansätze, wie onboard mit Sensoren gemessene Daten für einen effizienteren Betrieb genutzt werden können, wurden in einem Vorprojekt mit dem technischen Service der ÖBB und der Firma Messfeld bereits getestet. Bei diesem Projekt geht es aber darum den Zustand bzw. Änderungen an den Radsatzlagern während der Fahrt zu bewerten und Kräfte, die auf das Triebfahrzeug wirken, zu bestimmen. Dieses Projekt bildet eine wesentliche Grundlage für die Durchführbarkeit des hier beschriebenen Forschungsprojektes SISSI. Es gibt bereit ein Triebfahrzeug, das Railjet-Triebfahrzeug 231, das in Zusammenarbeit mit dem Technischen Services der ÖBB mit Messequipment im Rahmen des Projektes "Triebatzbelastung" ausgestattet wurde, um generell die auftretenden Kräfte während dem Betrieb des Triebfahrzeuges zu messen. Die Realisierbarkeit von onboard Sensor-Systemen und die Speicherbarkeit der Messdaten ist somit bestätigt. (Somit können wir, als Firma Messfeld bestätigen, dass es grundsätzlich möglich ist, Sensorik onboard anzubringen und die gemessenen Daten stabil zu speichern.) Die mobile Übertragung der Daten während der Fahrt stellt eine große Herausforderung dar, da es sich um enorme Datenmengen im Terabyte-Bereich handelt.

Im Rahmen des Vorprojektes wurden auch Beschleunigungssensoren an den Radsatzlagern verbaut. Es existieren daher über die vom Railjet 231 gefahrenen Streckenabschnitte durchgängige Beschleunigungsdaten. Der Start des Vorprojektes erfolgte bereits im Februar 2016. Die Betrachtung im Vorprojekt lag allerdings auf der Beurteilung der Belastungen auf die Radsatzlager. Die Daten enthalten aber eben wesentlich mehr Informationen, diese wurden allerdings bis dato noch nicht betrachtet.

Führt eine Störung zum Stillstand eines Triebfahrzeuges oder der Sperrung eines Streckenabschnittes entstehen extrem hohe Kosten. Im Zeitalter des Technologiewandels verringern sich die Kosten für Anschaffung, Installation sowie Betrieb und Wartung zunehmend und stehen in keiner Relation zu dem Geldaufwand, den ein ungeplanter Stillstand während den Betriebszeiten verursacht. Zusätzlicher Treiber ist der rasante technologische Fortschritt in der Entwicklung der Sensorik, der völlig neue Konzepte zur intelligenten, mobilen Zustandsüberwachung innerhalb der ÖBB-Schieneinfrastruktur ermöglicht. Somit ist es der richtige Zeitpunkt um sich mit den Forschungsfragen wo, wie, welche, in welcher Qualität und Quantität und mit welchem Nutzen sich Onboard-Sensorik und die daraus gewonnenen Daten in Bezug auf ihre Einsetzbarkeit bei typischen Aufgaben des Infrastrukturmanagements eignen. SISSI liefert den technologischen Grundstein, um neuartige Ansätze für die Fernüberwachung mittels Onboard-Sensorik zu evaluieren und zu erproben. Im Projektkonsortium bündelt sich eine hohe Expertise und umfangreiche Erfahrung in den notwendigen Bereichen. Das Projekt SISSI eröffnet neue Zugänge zur Nutzung von Sensordaten für den Betrieb und die Erhaltung der Schieneninfrastruktur der ÖBB. Wobei bestmögliche Synergien zwischen den Projektpartnern, deren bisherigen Kenntnissen aus Vorprojekten und bestehenden Initiativen, sowie während der Projektumsetzung, sichergestellt werden.

Bestehende state-of-the-art Konzepte und Werkzeuge im Bereich von komplexen Systemlandschaften, Big-Data- und Business-Intelligence-Anforderungen bieten eine adäquate Grundlage zur Umsetzung und Integration der zu entwickelnden Analysemethoden in einer produktiven Systemumgebung. Um den Herausforderungen einer skalierbaren Systemarchitektur zu begegnen, kommt ein API-led Multi-Tier Konzept zur Anwendung, das eine saubere Trennung zwischen Datenschicht, BusinessLogic-Implementierung und Präsentationsschichten ermöglicht. Im Bereich der Datenschicht werden für den Umgang mit Massendaten Werkzeuge, wie etwa Apache Hadoop,

berücksichtigt. Für die Verknüpfung und Anreicherung der Daten ist das domain-driven-design Architekturpattern ein geeignetes Instrument. Basierend auf den hier entstehenden Domainobjekten wird eine Microservice-Architektur gebildet, die eine hohe Konnektivität und Integrationsfähigkeit, sowohl hinsichtlich der vorhandenen heterogenen Systemlandschaft, als auch für die adäquate Einbindung der Analysemethoden und Standard-Analysewerkzeuge, ermöglicht.

1.3. Innovationsgehalt des Vorhabens und erwartete Ergebnisse

Die grundlegende Überlegung dieses Ausschreibungsschwerpunktes, Onboard-Diagnosesysteme auf Triebfahrzeugen zur Erkennung von potentiellen Störquellen zu verwenden, birgt bereits sehr hohes Innovationspotenzial in sich. Derzeit ist der Infrastrukturbetreiber ÖBB gezwungen, regelmäßig Kontrollfahrten entlang der Schieneninfrastruktur durchzuführen, um beispielsweise Veränderungen an den Isolierstößen der Schienen frühzeitig zu erkennen. Die entwickelten Methoden und Ansätze im Forschungsvorhaben SISSI haben ihren Innovationsgehalt darin, den Betrieb und Erhalt der Schieneninfrastruktur durch Automatisierung wesentlich kostengünstiger zu machen und gleichzeitig eine verbesserte zeitliche und räumliche Überwachungsabdeckung zu erzielen. Anhand von Analysen was einerseits technisch möglich und was aufgabenstellung-bezogen nötig ist, ergibt sich ein zielgerichteter und anwendungsorientierter Bottom-up-Ansatz. In einer Top-down-Analyse wird andererseits die bestehende Datenerfassung auf den Schienenfahrzeugen evaluiert. Hauptziel ist es, funktionale Zusammenhänge zwischen Schwingungsanregungen, die mit Beschleunigungssensoren am Rad-Schiene-System gemessen werden, und den entsprechenden Isolierstößen zu finden. Gibt es erkennbare funktionale Zusammenhänge zwischen den aufgezeichneten Schwingungsmustern und den Isolierstößen, so kann in Zukunft nicht nur der Erhaltungszustand von Isolierstößen erkannt, sondern auch im Sinne von Predictive Analytics eine Prognose abgegeben werden. Eine Forschungsfrage die beantwortet werden soll, ist, ob bestimmte Schwingungsmuster in den Beschleunigungssignalen Rückschlüsse über den Zustand der Infrastruktur zulassen, wie zum Beispiel die momentane Breite des Isolierstoßes, da immer wieder Materialverformungen, verursacht durch die Überrollung, dazu führen, dass eine metallische Materialverbindung zur Überbrückung der elektrischen Isolierung führt. In weiterer Folge sollen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens strategisch integriert

umgesetzt werden, um somit die Sensoren bestmöglich auszuschöpfen und in weiterer Folge gänzlich neue Anwendungsgebiete und Möglichkeiten des Datenmanagements und der -verwertung zu eröffnen. Hierfür wird ein Grobkonzept für eine skalierbare Systemarchitektur geschaffen um die Prozessintegration in die ÖBB INFRA zu ermöglichen.

Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab einen Mehrwert gegenüber der aktuellen Datenerhebungsstrategie und der Synergie des Datenmanagements der einzelnen Unternehmensbereiche des Infrastrukturbetreibers zu generieren. Darauf basierend können Empfehlungen für weitere Umsetzungen abgeleitet werden.

1.4. Geplante Vorgangsweise und Methoden

Die Thematik der Onboard-Diagnosesysteme ist sehr vielfältig, denn es gibt unterschiedlichste Methoden, um Daten zu generieren. Aus diesem Grund ist es für das Projektgelingen essentiell, einerseits den notwendigen breiten Überblick für eine möglichst vollständige Analyse und Bewertung zu gewährleisten und andererseits zielgerichtet in überschaubarer Zeit die Projektziele zu erreichen. Mit fortlaufendem Projektfortschritt ist ein zunehmender Fokus aus methodischer Sicht notwendig, jedoch muss darauf geachtet werden, dass durch zu frühe Vorselektion kein Innovationspotential verloren geht. Auf Erkenntnisse und Erfahrungswissen aus Vorprojekten kann in der Konzeptionsphase zurückgegriffen werden. Um das Interesse des Infrastrukturbetreibers ÖBB nicht aus den Augen zu verlieren, werden immer wieder Workshops mit den jeweiligen Partnern durchgeführt, um weitere Entwicklungsschritte abzustimmen und den Fokus im Sinne des Infrastrukturbetreibers voranzutreiben. Innerhalb des AP3 gibt es einen Iterationszyklus zwischen den einzelnen Arbeitsprozessen der jeweiligen Partner. Erst nach deren Abschluss fließt daraus Input in die Systemarchitektur zur Prozessintegration. Das AP1 läuft parallel zum restlichen F&E-Vorhaben und beinhaltet die Rahmenunterstützung für das Projektgelingen.

Der erste und zweite Task des AP3 betreffen die Datenanalyse und -aufbereitung. Einerseits werden die aufgezeichneten Messdaten nach markanten Datenabschnitten gefiltert und mit dem GPS Signal des Triebfahrzeuges zusammengeführt. Eine Synchronisation der Messwertreihen ergibt strukturähnliche Daten, die im Speziellen für 3.4

bzw. 4.1.3 Anwendung finden. Andererseits gilt es relevante Infrastrukturdaten mit ÖBB INFRA abzustimmen und für die weitere Verarbeitung im Projekt SSSI entsprechend aufzubereiten und bereitzustellen. Dies betrifft insbesondere die Festlegung aussagekräftiger Streckenabschnitte mit ausreichend verfügbaren Isolierstoß-Anlagenstammdaten und entsprechend dokumentierten Inspektionsdaten und Zustandsinformationen.

Nachdem die Beschleunigungsdaten von Messfeld aufbereitet, mit den Informationen zu Schadens- und Erhaltungszustand, von Logicx mit der ÖBB INFRA abgestimmt und ergänzt wurden, untersucht SRFG, ob zwischen Schwingungsmuster und Erhaltungszustand ein funktionaler Zusammenhang besteht. Da dem Konsortium bereits jetzt qualitativ hochwertige Beschleunigungsdaten aus dem Schienennetz der ÖBB vorliegen, werden in erster Linie datengetriebene Methoden angewendet. Das sind allen voran Methoden aus dem Data Mining und dem Maschinellen Lernen (Details sind in Z3.4 bei AP 3 zu finden). Da es sich bei den Daten um sogenannte "gegabelte Daten" handelt, wird ein Supervisor Learning angestrebt. Unter der Voraussetzung, dass die Schwingungsmuster mit geeigneten Parametern dargestellt werden, gewährleistet diese Methode eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass, wenn Zusammenhänge zwischen Schwingungsmuster und Erhaltungszustand existieren, diese auch gefunden werden. Für das Finden von geeigneten Parametern ist in AP3 ein eigener Task vorgesehen. Zusätzlich kann auf die Analysen der vorhandenen Daten in den ersten beiden anderen Tasks von AP3, sowie der gesamten bisherigen Erfahrung aller Partner zurückgegriffen werden. Die Bündelung von Domänenwissen und Methodenkompetenz der drei Partner stellt daher gerade für das AP3 einen besonderen Mehrwert dar und minimiert das Risiko. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets soll jedenfalls eine Liste von Parametern zur Beschreibung von Schwingungsmustern und ein mathematisches Modell zur Klassifizierung sein. Eine Evaluierung von Parameterliste und Modell wird mittels Validierung innerhalb des Maschinellen Lernens ermöglicht. Das generelle Vorgehen orientiert sich an einem für technisch-physikalische Problemstellungen angepassten CRISP-Modell.

Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der ÖBB INFRA erfolgt in AP4 die Grobkonzeption für die Umsetzung der Analysemethoden in der produktiven Systemumgebung. Die gesammelte Erfahrung aus Logicx Referenzprojekten fließt dabei ebenso ein, wie das in einer agilen Projektvorgehensweise abzustimmende Kontextwissen der einzubeziehenden Experten der ÖBB INFRA.

Für eine genauere Beschreibung der Arbeitspakete siehe Kapitel 1.2. Die grundsätzliche Vorgehensweise für eine zielgerichtete und anwendungskonforme Methode wird in der Grafik unterhalb dargestellt. Die Pfeile veranschaulichen die gegenseitige Abhängigkeit bzw. Abstimmung. Besonders hervorgehoben sind die Zusammenhänge im AP3. Der rote Pfeil stellt den (Haupt)Input dar, in grau wird gezeigt für wen der Output in einer weiteren Iterationsschleife relevant wäre.

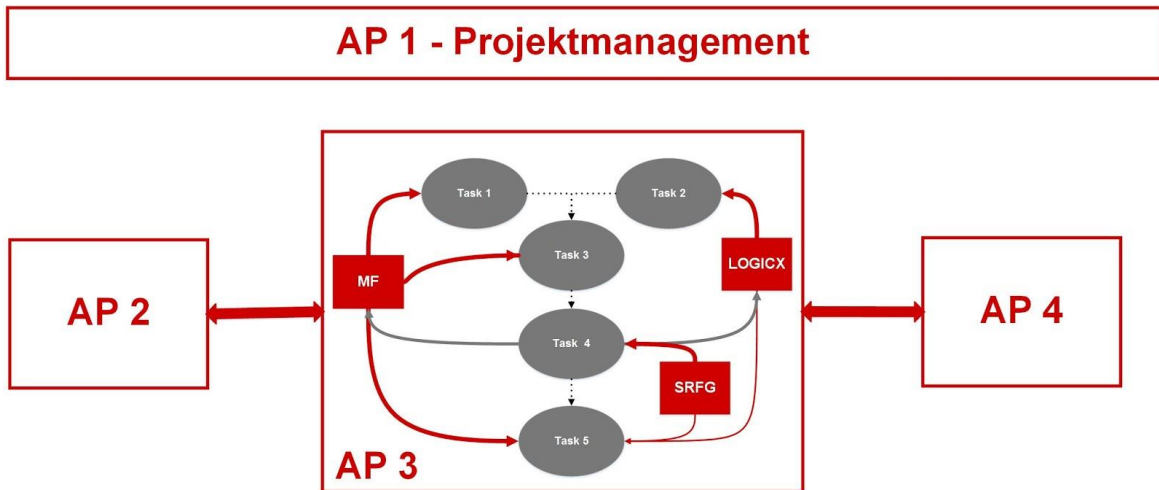


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur

Tabelle 1: Arbeitspaketübersicht

AP 1	Projektmanagement
Z 1.1	Projektstart, Projektkoordination und -kommunikation, Controlling und Reporting
	1.1.1 Kick-off-Meeting
	1.1.2 Zwischenbericht
	1.1.3 Ergebnisbericht
AP 2	Recherche und Konzeptionsphase zum Einsatz von Onboard-Sensorik für Gleiskörper Condition Monitoring
Z 2.1	Überblick Sensorsysteme und Condition Monitoring-Konzepte
	2.1.1 Sensormatrix erstellen
	2.1.2 Unterschiedliche Condition Monitoring-Konzepte entwickeln und evaluieren
Z 2.2	Top-Down-Analyse von Einsatzmöglichkeiten vorhandener Messdaten für Gleiskörper-Zustandsparameter
	2.2.1 Evaluierung der vorhandenen Messdaten im Hinblick auf Gleiskörper-Zustands-Zusammenhänge und Ableitung denkbarer, funktionaler Zusammenhänge der vorhandenen Messdaten zu Zustandsparametern der Gleisinfrastruktur
	2.2.2 Zusammenfassung weiterführender Ideen zur Evaluierung von Condition-Monitoring Einsatzmöglichkeiten von Zustandsparametern der Gleisinfrastruktur
Z 2.3	Bottom-Up Analyse der Rahmenbedingungen des Einsatzes vorhandener Messdaten im Bereich von Gleis-Isolierstößen (Was ist technisch möglich und in Hinblick auf die Aufgabenstellung nötig?)
	2.3.1 Zusammenfassung der technischen Möglichkeiten für Condition-Monitoring von Isolierstößen auf Basis von vorhandenen Messdaten (Messfeld)
	2.3.2 Analyse und Definition der für Instandhaltung repräsentativen Rahmenbedingungen zu Gleis-Isolierstoß-Zustandsdaten (Logicx)
	2.3.3 Zusammenfassung der technischen Möglichkeiten zur Analyse der funktionalen Zusammenhänge im Umfeld vorhandener Messdaten und Gleis-Isolierstößen (SR)
	2.3.4 Ableitung Detailkonzept für die Inhalte der Evaluierung konkreter Einsatzmöglichkeiten eines Condition-Monitorings von Gleis-Isolierstößen
AP 3	Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten vorhandener Messdaten aus dem Messfeld Pilotprojekt für Condition Monitoring von Gleisisolierstößen
Z 3.1	Datenanalyse und –Aufbereitung relevanter vorhandener Messdaten (Messfeld)
	3.1.1 Filtern nach markanten Daten-Abschnitten und deren Verörtlichung
	3.1.2 Synchronisation der Messwertreihen
	3.1.3 Strukturähnliche Daten für 3.4 und 4.1.3 aufbereiten

2. ZUSAMMENFASSUNG DER ARBEITEN UND DIE DARAUS FOLGENDEN ERGEBNISSE

2.1. Arbeiten in AP2

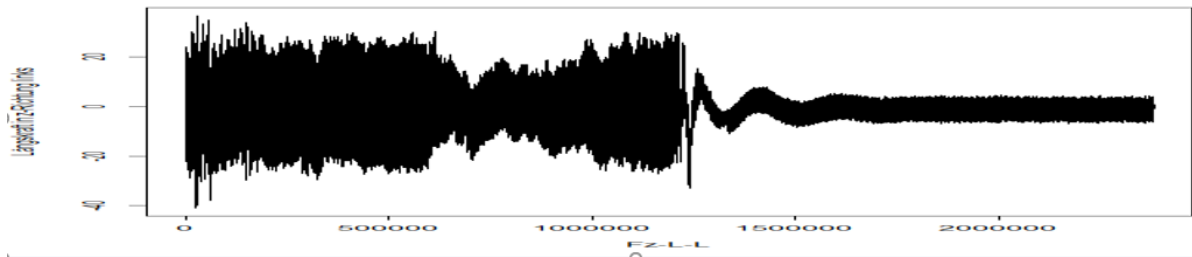
In diesem Arbeitspaket geht es darum, im Rahmen von Recherchen und Konzeptüberlegungen neue und bestehende Ansätze zu entwickeln bzw. deren praktische Einsatzmöglichkeiten zu evaluieren. Es wird ein allgemeiner Überblick über Sensorsysteme und Condition Monitoring-Konzepte gegeben. D.h. welche Art von Sensoren benötigt wird, wie hoch die Auflösung sein muss, um die Schäden noch zu erkennen, ob einfache Sensoren (z.B. aus Smartphones) den Anforderungen genügen oder ob hochauflösende Industriesensoren verwendet werden müssen, um diese Isolierstöße zu detektieren. Anhand genauerer Analysen und Betrachtungen wird darüber hinaus ein Detailkonzept für die Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten der vorhandenen Daten zusammengefasst. Folgende Unterpunkte werden in Hinblick auf die Ziele abgearbeitet:

- **Überblick Sensorsysteme und Condition Monitoring-Konzepte**

Tabelle 2: Sensormatrix

	Schwingungs- messung	Optische Kamera	Infrarotmessung	Ultraschallmessung
Verortung der Stöße	-	+	++	+
Empfindlich geg. Verschmutzung	+++	-	+	++
Robustheit	+++	+	+	++
Messgenauigkeit	+++	++	+	+
Geschwindigkeit der Messung	+++	+	+	++
Kosten	+++	+	+	+++
Aufwand zur Implementierung	+++	+	+	++

a. Schwingungsmessung



PLUS	MINUS
Vorhandene Messdaten	Fehlende Verortung
Messdatenverrechnung vorhanden	Exakte Verortung schwierig
	Isolierstöße nicht immer auf den Strecken vorhanden, die befahren wurden

b. Optische Erkennung - Bildverarbeitung



Lösungen am Markt – derzeit noch Aufwendig und teuer



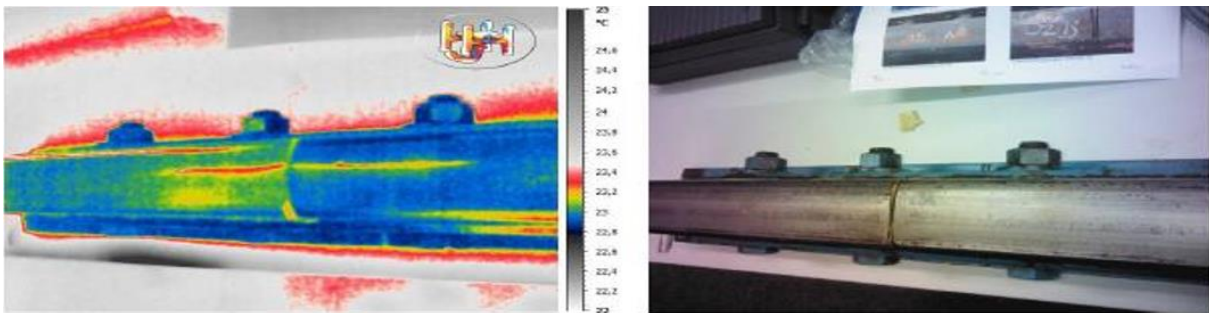
ivii gmbh

Laufendes Projekt Joanneum Research

Umsetzung von optischen
Mustererkennungen mit günstigen Kameras



c. Infrarotmessung



PLUS	MINUS
Einfache Handhabung	Keine genaue Differenzierung der Breiten
Verortung durch Erkennung der Verschraubung einfach	Verschmutzung der Schiene nicht geprüft

d. Ultraschallmessung

PLUS	MINUS
robust	Empfindlich gegen Verschmutzung
Verortung möglich	Ausbreitungsmedium
	Sehr teuer

e. Induktive Sensoren

PLUS	MINUS
robust	Kurze Distanz notwendig um entsprechende Auflösung zu erhalten
Verortung möglich	Niedrige Messgeschwindigkeit
Unempfindlich gegen Verschmutzung	

○ Erhebung der Zustandsformen der Isolierstöße

Im Zuge einer Begehung am Hauptbahnhof Villach wurden verbaute Schienenisolierstöße betrachtet. Zudem konnten am Lagerplatz zahlreiche defekte und entsorgte Isolierstöße genauer untersucht werden. Deren Zustand wurde fotografiert, das Spaltmaß vermessen und in einem sog. „Isolierstoßkatalog“, befindet sich im Anhang, festgehalten. Ebenfalls konnten eingelagerte neuwertige Isolierstöße dokumentiert werden. Leider gibt es keine Aufzeichnung darüber, welcher Isolierstoß präventiv getauscht wurde oder ob dieser wirklich zu einer Störung geführt hat bzw. fehlt die Zuordnung wo welches Isolierstoßbauteil

verbaut worden ist. Grundsätzlich können zwei von außen erkennbare Hauptschadensmuster identifiziert werden. Einerseits können Isolierstöße zusammenwachsen und das dazwischen enthaltene Isolationsmaterial verdrängen. Andererseits kann es vorkommen, dass die Schienen auseinandergezogen werden und das Isolationsmaterial herausbröckelt. In beiden Fällen kann es in weiterer Folge zu leitenden metallischen Verbindungen, die Störungen im Bahnbetrieb auslösen, kommen. Anhand der betrachteten defekten Isolierstöße ist es nicht möglich eine Tendenz zu einem der beiden Schadensmuster herauszufiltern, im Gegenteil es treten häufig auch Mischformen der Schadensbilder auf. Beispielsweise wachsen die Schienen in der Mitte zusammen, an den Rändern gehen diese aber auseinander.

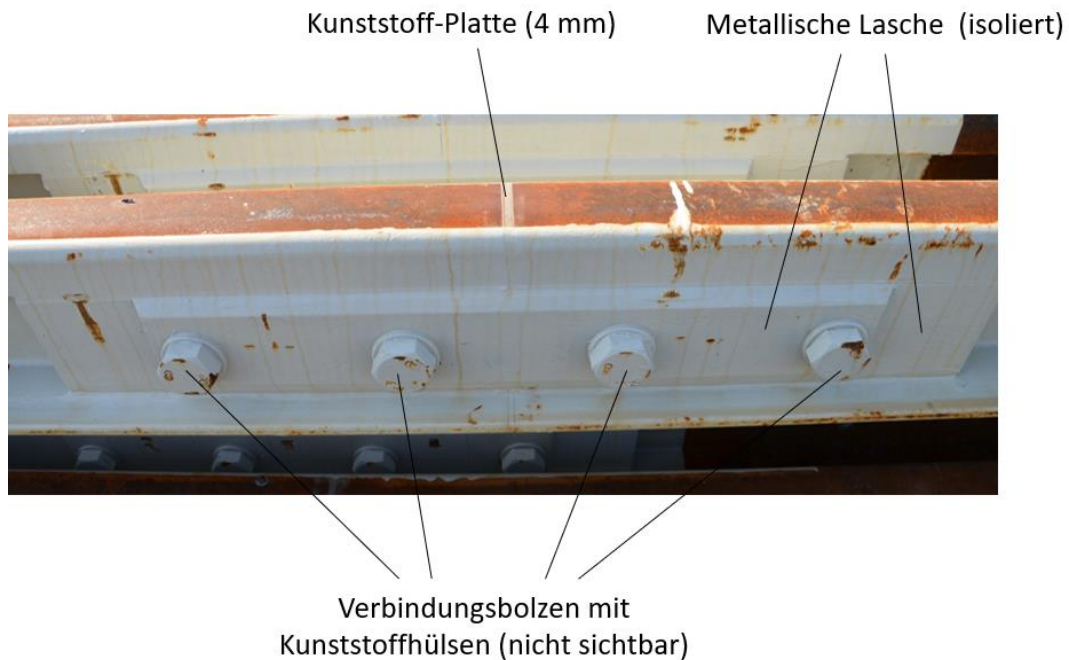


Abbildung 2: Neuwertiger Isolierstoß

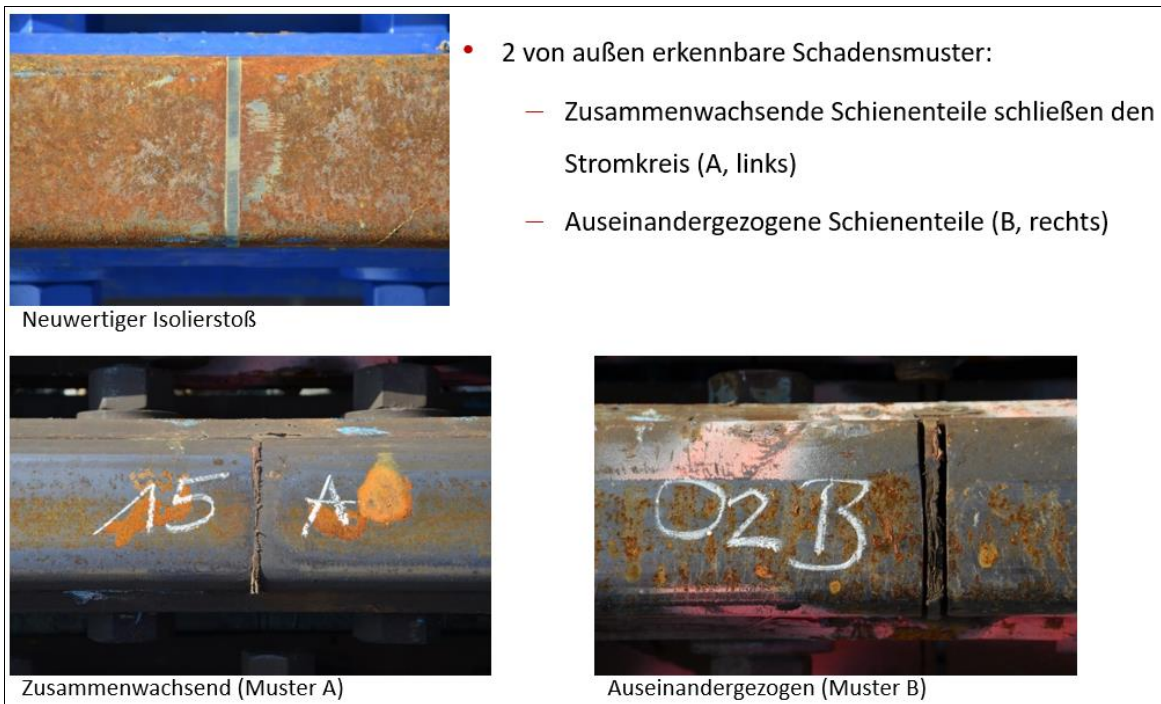


Abbildung 3: Vergleich Schadensmuster

○ **Repräsentative Rahmenbedingungen – Relevante Infrastrukturdaten**

Im Vorfeld der Sensordatenanalyse wurde in Workshops abgestimmt, welche Informationen als Eingangsparameter für die Modellerstellung relevant sein könnten und einen Beitrag zur Zustandsindikation bzw. in weiterer Folge zur Vorhersage von Zustandsänderungen liefern könnten.

a. Lifecycle Informationen zu Isolierstößen

- Die Lebensdauer von Isolierstößen auf durchgehenden Hauptgleisen beträgt rund 8 Jahre, auf nicht durchgehenden Hauptgleisen rund 12 Jahre
- Inspektionen sind derzeit halbjährlich vorgesehen
- Trotz dieser kurzen Intervalle kommt es immer wieder zu Störungen
- Gründe für die, trotz kurzem Inspektionsintervall, häufig auftretenden Störungen könnte eine rapide zunehmende Abnutzung ab einem bestimmten Zustand sein.
- Es ist davon auszugehen, dass hohes Gewicht der überfahrenden Züge sowie Überfahrungen des Isolierstoßes beim Bremsvorgang die Abnutzung beschleunigt.

b. Informationen zu Störungen von Isolierstößen

- Störungsinformationen zu Isolierstößen sind aus SAM (Stör- und Arbeitsmeldesystem) nicht direkt abrufbar, sondern müssen über die Störart und zusätzliche Informationen in eingepflegten Freitexten der Störungs-/Arbeitsmeldungen ermittelt werden.
- Laut Taskforce-Bericht „Isolierstöße“ (2.5.2016) wurden 68 Isolierstöße im Zuge von Störungsmaßnahmen und weitere 95 Isolierstöße präventiv erneuert. Auf der Grundlage dieser Informationen wurden im vorliegenden PoC Isolierstöße ausgewählt und den Analysen zur Modellaufleitung für eine Zustandsindikation unterzogen.

c. Stammdaten

- Isolierstöße waren zum Zeitpunkt der Workshops noch nicht in Anlagendatenbanken erfasst. Es wurde begonnen, die Isolierstöße auf Basis der Schienenteilungspläne in Excel-Listen mit eindeutigen Bezeichnern zur Identifikation zu erfassen. Die Erfassung und Pflege der Isolierstöße in einer Anlagendatenbank ist angedacht.

ISO_Bez	GLS_Bez	GLS_km	Position	Hersteller	Gleisrelais
IS1/4N1-X	W1	NULL	links	NULL	NULL
IS1/4N2-X	W1	NULL	rechts	NULL	NULL
IS1/4N3-X	W1	NULL	links	NULL	NULL
IS1/4N4-X	W1	NULL	rechts	NULL	NULL
IS1/4N5-X	W4	NULL	links	NULL	NULL
IS1/4N6-X	W4	NULL	rechts	NULL	NULL
IS1/4N7-Y	W4	NULL	links	NULL	NULL
IS1/4N8-RI	W4	NULL	rechts	NULL	NULL
IS1/4N9-X	W8	NULL	links	NULL	NULL

- Isolierstoß-Typen / Baujahr (laut Anlagenspezialisten gibt es zwar grundsätzlich Ausführungen mit unterschiedlichen Isoliermaterialien, jedoch ist davon auszugehen, dass inzwischen alle Isolierstöße am aktuellsten Stand sind und zwischen keinen Bautypen unterscheiden werden muss).

d. Verortungsinformationen

- Die Lage der Isolierstöße ist laut Aussage der Anlagenverantwortlichen teilweise auf Basis eines ÖBB Streckensystems (DB776) verfügbar. Für die Zusammenführung mit den Sensordaten, die GPS Referenzen enthalten, ist auch für die Isolierstöße eine GPS-Verortung erforderlich.

e. Zustandsinformationen

- Initial sind Zustandsinformationen für die Modellerstellung erforderlich. Durch die Analyse der Sensordaten unterschiedlicher Isolierstöße mit unterschiedlichen Zuständen sind die spezifischen Muster zu unterscheiden, die wiederum eine Ableitung der Anlagenzustände erlauben. Später, in einem produktiven Systemumfeld, können regelmäßig verfügbare aktuelle Zustandsinformationen zur Modellverbesserung eingesetzt werden. Zustandsinformationen können ggf. auch aus folgenden Ereignissen abgeleitet werden:
 - Störungsmeldung
 - Instandsetzungsmaßnahmen
 - Erneuerungen
- Jedes dieser Ereignisse impliziert einen Defekt (oder entsprechend fortgeschrittene Abnutzung) am Isolierstoß. Vorzugsweise werden die Zustände auch regelmäßig bei den Inspektionen durch das Servicepersonal bewertet und dokumentiert (dies erfordert einen standardisierten Prozess und eine standardisierte Ablage der Zustandsinformationen).

f. Nutzdaten

- Folgende Nutzdaten können im Zuge der Modellverbesserung dazu beitragen, die Ergebnisse zu präzisieren. Insbesondere für die Störungsvorhersage sind ggf. weitere Einflussfaktoren einzubeziehen, weil in Abhängigkeit dieser Faktoren die Abnutzung zeitlich divergiert:
 - Anzahl der Zugfahrten
 - Zughalte (weil diese auf Bremsvorgänge hinweisen, alternativ könnte auch aus den GPS-Daten die Geschwindigkeitsveränderung berechnet werden)
 - Zuggewichte

2.2. Zusätzlich erforderliche Arbeiten

Für die Erreichung einiger Projektziele, war es notwendig zusätzliche ungeplante Arbeitsschritte selbst im Projektteam durchzuführen, da seitens der ÖBB Informationen nicht in erforderlicher Art und Weise vorliegend waren.

○ **Abstimmung und Aufbereitung der Daten im Zuge der Modellverfeinerung weiterer Analysen der funktionalen Zusammenhänge**

Im Zuge des PoC, in dem herausgefunden werden sollte, ob über die verfügbaren Sensordaten (aufgezeichnete Schwingungsdaten an den Triebfahrzeugachsen aus dem Jahr 2016) ein Rückschluss auf den Isolierstoß-Zustand möglich ist, wurden die zwingend erforderlichen Daten für die nachfolgenden Analysen abgestimmt und organisiert:

- a. Bei welchen Isolierstößen hat sich der Zustand während der Aufzeichnungsperiode geändert?
 - Die Analyse der Sensordaten von im Aufzeichnungszeitraum ausgetauschten Isolierstößen sollte die Unterschiede in Sensordatenmuster von schadhafte(n) (vor dem Austausch) und neuen Isolierstößen (nach dem Austausch) liefern. Diese Informationen sind derzeit noch in keinem System abrufbar und mussten daher über Ansprechpartner seitens ÖBB erhoben werden:
 - Erhebung der getauschten Isolierstöße im Jahr 2016
 - Erhebung der Termine der Austauschmaßnahmen (aus den Bautagebüchern)
- b. Wurden diese Isolierstöße durch das datenaufzeichnende TFZ in diesem Zeitraum überfahren?
 - Für die ermittelten ausgetauschten Isolierstöße musste geprüft werden, ob diese auch mit dem TFZ 231 befahren wurden. Über den Schienenteilungsplan (siehe Beispiel Abbildung 4) wurde identifiziert auf welchem Gleis die Isolierstöße liegen. In ARAMIS wurde ausgewertet, ob bzw. wann (Datum/Uhrzeit) das TFZ dieses Gleis überfahren hat.
 - Durch diese Analyse wurde festgestellt, dass im Bahnhof Neumarkt i.d. Steiermark ein getauschter Isolierstoß überfahren wurde.
- c. Wie können die Sensordaten der Überfahung des konkreten Isolierstoßes zugeordnet werden?
 - Die Zuordnung ist nur über den Abgleich der in den Sensordaten mitgeführten GPS-Koordinaten mit den GPS-Koordinaten des Isolierstoßes möglich.
 - Der getauschte Isolierstoß wurde manuell verortet, somit wurde die Identifikation der Sensordaten für „diesen“ Isolierstoß möglich.

- Es wurden auch die anderen Isolierstöße dieses Bahnhofes verortet, um für weitere Isolierstöße die Sensordaten identifizieren zu können.

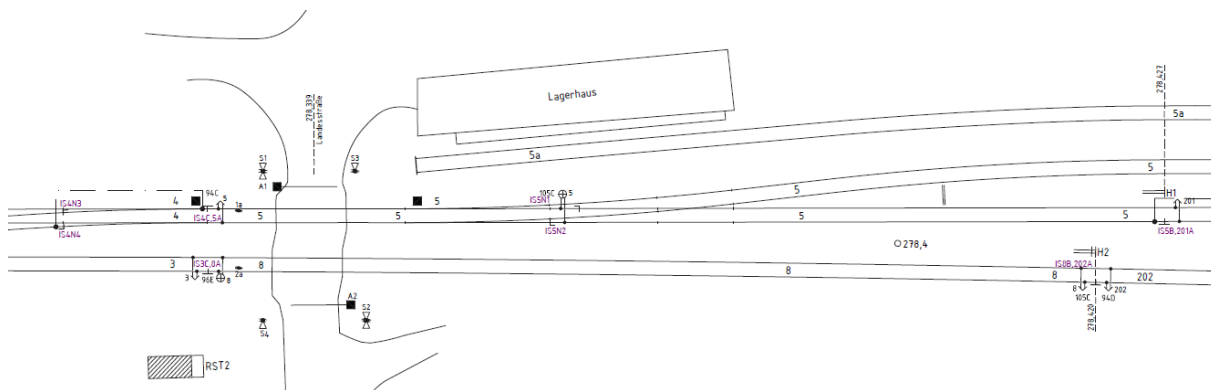


Abbildung 4: Beispiel Schienenteilungsplan in Neumarkt i.d.S.

2.3. Arbeiten in AP3 - Datenanalyse und -aufbereitung

Die folgenden zwei **Kapitel zur Datenanalyse** beschreiben die vom Projektpartner Salzburg Research durchgeführten Arbeiten von **Arbeitspaket AP3** „Evaluierung der Einsatzmöglichkeiten vorhandener Messdaten aus dem Messfeld-Pilotprojekt für Condition Monitoring von Gleisisolierstößen“. Im Detail beinhaltet der Bericht eine Beschreibung der Datenanalyse (Task 3 bis 5) sowie deren Ergebnisse (E 3.3 bis E 3.5). Mit diesem Bericht wurde **Meilenstein 5** (M 5) erreicht; er entspricht auch dem **Deliverable 3** (D 3). Der **Meilenstein 4** (M 4), das Zusammenführen der Daten für die Untersuchung auf funktionale Zusammenhänge, wurde im Zuge der Arbeiten erreicht und entspricht Ergebnis (E 3.3).

Inhaltlich behandelt der Bericht mit **Task 3** alle notwendigen Arbeiten, um die von Messfeld aufgezeichneten historischen Railjet-Befahrungen mit der Lage der Isolierstöße in Verbindung zu bringen. Hierbei war es notwendig, die Railjet-Messdaten für den untersuchten **Bahnhof Neumarkt in der Steiermark** zu schneiden, um in einem ersten Schritt die Datenmenge der historischen **9 Railjet-Befahrungen** zu reduzieren. Vorortbegehung und bereitgestellte Unterlagen der ÖBB ergaben für den untersuchten Bahnhof **11 Isolierstöße und 5 Weichenherzen**. Die Aufzeichnungen der **Vorortbegehung** wurden zur Qualitätssicherung einer notwendigen Validierung unterzogen. Erst im Anschluss erfolgte über ein eigens entworfenes Verfahren die **Synchronisierung** der GPS-Koordinaten der Isolierstöße mit den GPS-Trajektorien der Railjet-Befahrungen. Hierdurch wurde es möglich, die **Schwingungsanregungen** in den Beschleunigungssignalen **den einzelnen Isolierstößen zuzuordnen**. Das Resultat ist ein

plausibilisierter und validierter Datensatz, der für die Analysen die Basis bildete. Mit diesem Datensatz wurde Meilenstein 4 (M 4) erreicht.

Die Aufgabe in **Task 4** war es **auffällige lokale Schwingungsanregungen** aus den Beschleunigungssignalen zu extrahieren. Dies erfolgte **getrennt für jede Schiene**. Das Hauptziel der Datenaufbereitung war es, einen **Datensatz** zu erzeugen, welcher **für visuelle Analysen, Data Mining und Maschinelles Lernen** geeignet ist. Die Zeitreihen der Railjet-Befahrungen wurden zu Tabellen transformiert. Somit ist das direkte Untersuchen einzelner Isolierstöße, Weichenherzen und Schwingungsanregungen möglich. Hierzu wurden geeignete **Parameter entworfen**, um die Schwingungsanregungen beschreiben zu können. Diese Parameter orientieren sich an Schwingungsfrequenzen und Schwingungsenergie.

Für den untersuchten Bahnhof Neumarkt in der Steiermark wurde **keiner der 11 Isolierstöße im Befahrungszeitraum** von 06.10.2016 bis 02.11.2016 **ausgetauscht**. Ein Isolierstoß (IS51C,53/56A) wurde am 24.06.2016 kurz vorher getauscht; ein weiterer (IS53/56D,301A) wurde am 03.04.2017 kurz nach dem Befahrungszeitraum ausgetauscht.

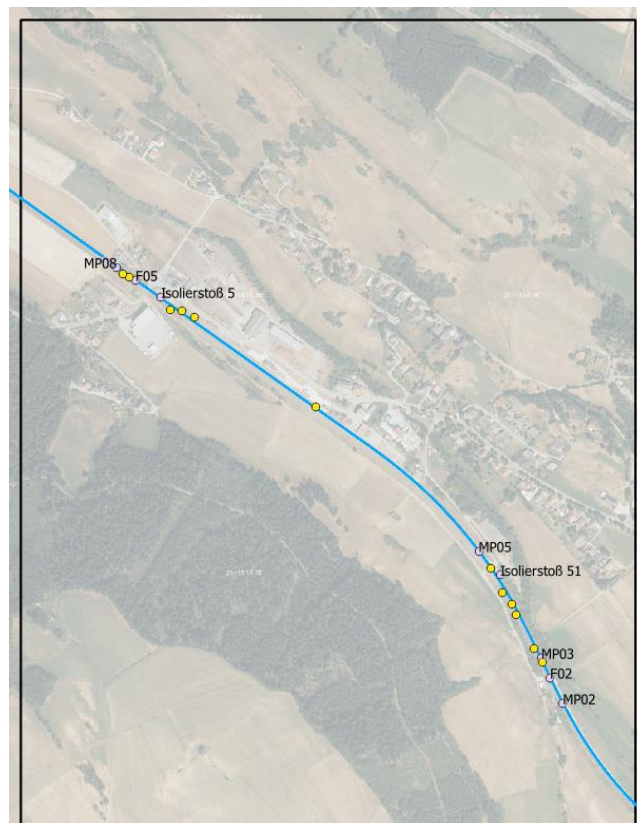


Abbildung 5: Neumarkt i.d.S.

Von den übrigen Isolierstößen waren keine Erhaltungsinformationen vorhanden. In den Datensatz konnten daher **keine Erhaltungsinformationen** aufgenommen werden. Eine systematische und automatisierte Untersuchung (siehe Task 4 (3.4.2 und 3.4.3) und Task 5) für die aufgezeichneten Daten war daher nicht weiter zielführend. Es war auch **keine statistische Auswertung möglich**, da in dem einmonatigen Befahrungszeitraum jeder Isolierstoß nur 9-mal überfahren wurde. Die Anwendung von Methoden des Maschinellen Lernens bzw. jede systematische automatisierte Auswertung wurde dadurch als unseriös erachtet. Wegen der **fehlenden digitalen Daten** der Isolierstöße war eine **Erhebung** mittels Vorortbegehung **sehr aufwändig**. Weitere Bahnhöfe konnten daher nicht untersucht werden. Aufgrund dieser Ausgangsbedingungen wurde im Projektteam gemeinsam festgelegt, dass sich die Arbeiten viel stärker auf die Herausforderungen in Task 3 und Task 4 (3.4.1) konzentrieren sollen. Der hierzu notwendige exemplarisch umgesetzte Prozess wird im Folgenden beschrieben.

○ **Task 3 – Synchronisierung**

Für die Datenanalyse war es notwendig, **bekannte Isolierstöße und Weichenherzen** in den Schwingungsdaten der Railjet-Befahrungen automatisiert zu kennzeichnen. Die Schwingungsanregungen in den Daten der Railjet-Befahrungen konnten so mit hoher Evidenz den Klassen *Isolierstoß*, *Weichenherz* und *Unbekannt* zugeordnet werden. Technisch war hierzu notwendig, die **GPS-Koordinaten der Isolierstöße** aus der Vorortbegehung am Bahnhof Neumarkt in der Steiermark **mit** den GPS-Positionsmessungen der **Railjet-Befahrungen in Verbindung zu bringen**. Das heißt, wann überfuhr der Railjet den Isolierstoß bzw. das Weichenherz. Erst in einem zweiten Schritt wurde in der Umgebung dieser Überfahrung nach einer Schwingungsanregung gesucht (siehe Task 4). Bei einer ersten visuellen Analyse der Schwingungsdaten stellte sich heraus, dass **wesentlich mehr Schwingungsanregungen als Isolierstöße** vorhanden sind. Für eine zukünftige Anwendung ist es aber unumgänglich die Schwingungsanregungen der Isolierstöße von allen anderen differenzieren zu können. Dies wird auch eine der **Kernaufgaben eines zukünftigen Systems** darstellen.

a. Datenbeschreibung

Für die Analysen wurden historische Messdaten aus einem Vorgängerprojekt des Projektpartners Messfeld verwendet. Es handelt sich um 9 Railjet-Befahrungen zwischen Wien und Klagenfurt im Zeitraum 06.10.2016 bis 02.11.2016. Bei allen Fahrten wurden

dieselben Gleisabschnitte im Bahnhof von Neumarkt in der Steiermark überfahren. Acht Befahrungen waren in Süd-Nord-Richtung (L–J–I–G–C–A) eine in Nord-Süd (A–C–G–I–J–L); siehe dazu Abbildung 2. Das mit Sensorik ausgestattete Triebfahrzeug war in allen Fahrten am selben Ende des Zugs, nämlich an dem Ende, das nach Wien ausgerichtet war. Es wurden daher bei allen Fahrten immer dieselben Schienen mit demselben Sensor überfahren.

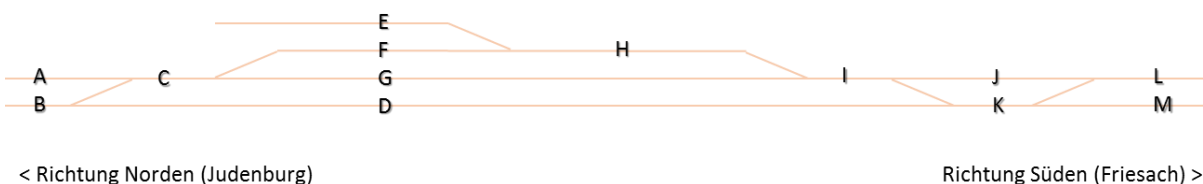


Abbildung 6: Interne Benennung der Gleisabschnitte für die Festlegung der benutzten Gleise

Die historischen **Beschleunigungsdaten und GPS-Positionsdaten** wurden getrennt aber zeitsynchronisiert mit 20.000 bzw. 100 Hz aufgezeichnet (Tabelle 3). Positioniert wurden die piezoelektrischen Schwingungsmesser an der ersten Achse des Triebfahrzeugs am linken und rechten Achsgehäuse. Die X-Achse entspricht der Nick-Achse (jeweils positiv nach außen), die Y-Achse der Roll-Achse (links positiv nach vorne, rechts nach hinten), die Z-Achse der Gier-Achse (beidseitig nach oben positiv). Das Achssystem ist ein Linkssystem. Die Einheit der Beschleunigung ist g. Die genaue Lage des GPS-Sensors ist nicht mehr reproduzierbar. Er wurde aber am/im Triebfahrzeug angebracht. Als Einheit wurde eine Dezimaldarstellung von Bogenminuten gewählt. Die Daten lagen im Textformat als CSV-Dateien vor. Bei den Beschleunigungsdaten sind für eine Fahrt zwischen Wien und Klagenfurt ca. 2,3 GB zu erwarten. Die GPS-Positionen umfassen ca. 2,3 MB.

Tabelle 3: Beschreibung der Daten/Spalten

Beschleunigung, 20.000 Hz	GPS-Position, 100 Hz
Zeit [s]	Zeit [s]
Beschleunigung Links X [g]	Latitude [']
Beschleunigung Links Y [g]	Longitude [']
Beschleunigung Links Z [g]	
Beschleunigung Rechts X [g]	
Beschleunigung Rechts Y [g]	
Beschleunigung Rechts Z [g]	

Als weitere Information lagen die maßstäblichen **Schienenteilungspläne** des Bahnhofs Neumarkt in der Steiermark vor. In ihnen konnte die genaue Lage und Bauart der Isolierstöße sowie der Weichenherzen abgeleitet werden. Ergänzt wurden die Pläne mit einem **Wartungsplan** aller getauschten Isolierstöße und einer **Bestandstabelle** – beides als Excel-Tabelle von der ÖBB bereitgestellt. Eine **Vorortbegehung** mit Mitarbeitern der ÖBB und des Projektpartners Messfeld diente der Ermittlung von aktuellen **Bestandsfotos** sowie von **GPS-Positionsdaten** der Isolierstöße. Mit diesen unterschiedlichen Informationsquellen konnten jene 11 Isolierstöße und 5 Weichenherzen identifizieren werden, die bei den Railjet-Befahrungen (Abschnitte A–C–G–I–J–L in Abbildung 6) überfahren wurden. Das Ergebnis war eine Systemskizze der befahrenen Strecke (vereinfacht in Abbildung 7 dargestellt).

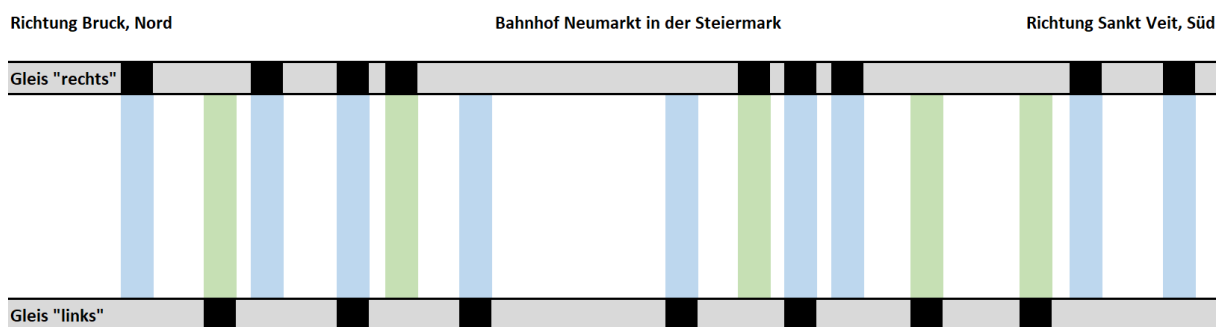


Abbildung 7: Schematische Skizze des Bahnhofs Neumarkt in der Steiermark. Isolierstöße (blaue Querschnitte) und Weichenherzen (grüne Querschnitte) sind durch die schwarzen Quadrate gekennzeichnet.

b. Datenaufbereitung

Die unterschiedlichen Datenquellen mussten nach der Erhebung in einem aufwändigen Prozess semi-automatisch zusammengeführt werden. Es galt vor allem, die Größe der Messdaten der Railjet-Befahrungen zu reduzieren und diese mit den Positionsdaten der Isolierstöße und Weichenherzen zu synchronisieren. Hierbei war es notwendig, eine sehr hohe Evidenz über die korrekte Verortung (betroffene Schiene und Längslage, vgl. Abbildung 7) der Isolierstöße zu haben.

Zur besseren Bearbeitbarkeit wurde um den Bahnhof ein ca. 1,5 km langer Abschnitt aus der gesamten Fahrtstrecke mit Hilfe eines Polygons herausgeschnitten. Dies reduzierte die Daten von 2,3 GB auf eine handhabbare Datengröße von 90 MB je Befahrung. Umgesetzt wurde dieser Schritt mit gängigen Verfahren aus der Verarbeitung von geographischen Informationen. Dazu wurde der erste und letzte Punkt innerhalb des Polygons gesucht. Mit

Hilfe der relativen Zeitstempel in den Daten konnten die Beschleunigungs- und GPS-Positionsdaten geschnitten werden.

In einem nachgesetzten Schritt wurde das GPS-Signal mit dem Beschleunigungssignal zu einem Datensatz zusammengefügt. Dies war möglich, da beide Datensätze die gleichen relativen Zeitstempel verwenden. Die durch das geringere Sampling fehlenden Positionsdaten wurden durch lineare Interpolation ergänzt. Das Ergebnis war ein Datensatz aller Sensordaten (vgl. Tabelle 3) mit einem Sampling von 20.000 Hz.

c. Synchronisation

Anhand der GPS-Positionsdaten der Isolierstöße erfolgte die Zuordnung aller Isolierstöße und Weichenherzen zu den 9 Railjet-Befahrungen. Hierzu wurde die Methode des kürzesten Abstands verwendet. Die GPS-Position des Isolierstoßes wird auf das Polygon der GPS-Trajektorie der Railjet-Befahrung projiziert (Normalabstand). Im Anschluss wird der nächstgelegene Messpunkt (Polygonpunkt) gesucht. Diese Methode liefert eine relativ genaue Zuordnung im 20.000-Hz-Bereich. GPS-Fehler (Trajektorie der Befahrung und GPS-Position des Isolierstoßes), die lineare Interpolation der GPS-Positionen (hochsampeln) und ein etwaiger systematischer Versatz (nicht weiter bekannte Lagedifferenz in der Montage von Schwingungssensor und GPS-Sensor) verfälschen die Zuordnung. Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit im Bahnhofsbereich von max. 135 km/h (37,5 m/s) ergibt sich eine Durchschnittsdistanz zwischen zwei Messpunkten von weniger als 2 mm. Bei üblichen GPS-Fehlern im Meterbereich ist daher zu rechnen, dass die Zuordnung zwischen Isolierstoß und Trajektorie der Befahrung nicht exakt ist. Es ist aber plausibel, dass die korrekte Zuordnung innerhalb von $\pm 0,5$ Sekunden bzw. $\pm 19,7$ m liegt.

Nach erfolgter Zuordnung der jeweiligen Schiene zu den jeweils korrekten Beschleunigungssignalen des Sensors wurde der Datensatz zusätzlich angereichert. Neben den schon erwähnten Daten aus den Sensoren (vgl. Tabelle 3) wurden der Datensatz um die GPS-Distanz und die GPS-Geschwindigkeit ergänzt. Aus der Systemskizze wurden die Bezeichnungen der Isolierstöße lt. Schienenteilungsplan und die Bezeichnung der Weichenherzen übernommen. Zusätzlich wurde ein Dreieckssignal (0-1-0) künstlich generiert, das jeweils 0,5 Sekunden vor und hinter jedem Zugeordneten

Isolierstoß eine „Epsilon-Umgebung“ schafft (Abbildung 8). Der Wert 1 liegt dabei an dem zugeordneten Messpunkt.

Tabelle 4: Durch die Synchronisation ergänzte Daten/Spalten gegenüber Tabelle 1

Ergänzte Daten aus der Synchronisation	Ergänzte Daten aus der Synchronisation
GPS-Distanz [m]	Isolierstoß ID
GPS-Geschwindigkeit [km/h]	Weichenherz ID
	Isolierstoß-Epsilon-Umgebung links
	Isolierstoß-Epsilon-Umgebung rechts
	Weichenherz-Epsilon-Umgebung links
	Weichenherz-Epsilon-Umgebung rechts

Es ist anzumerken, dass nach dieser Zuordnung die Bezeichnungen „Links“ und „Rechts“ in Tabelle 4 nicht mehr jener entspricht, wie sie in den Rohdaten vorliegen. Es handelt sich nicht mehr um das „Links“ und „Rechts“ des ausgerüsteten Triebfahrzeugs, sondern um eine eindeutige Schienenbezeichnung des benützten Gleises. Hiermit wird sichergestellt, dass „Links“ und „Rechts“ unabhängig von der Fahrtrichtung wird, d.h. unabhängig davon, ob das Triebfahrzeug möglicherweise gedreht wurde.

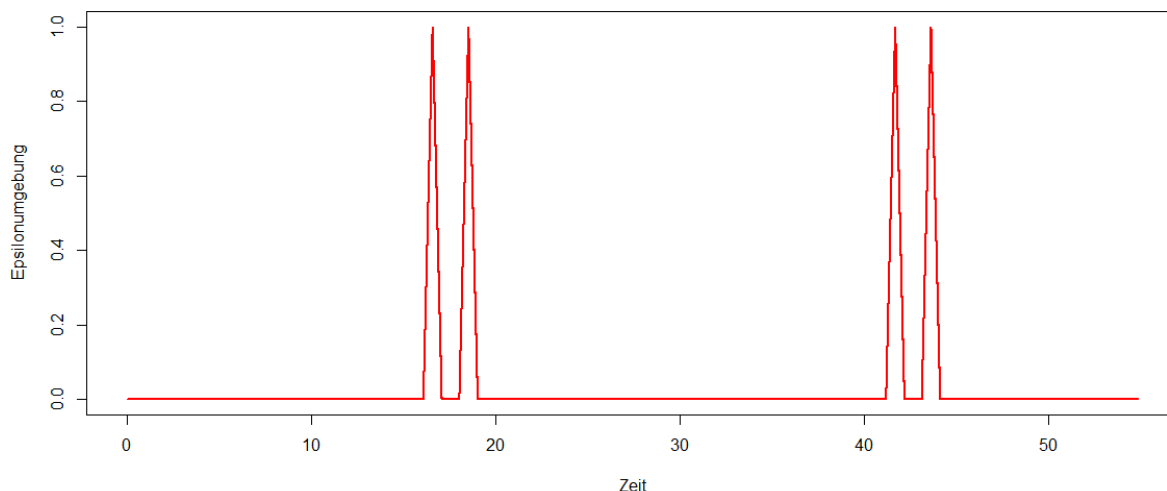


Abbildung 8: Beispiel des Signals der Epsilon-Umgebung der rechten Schiene. In diesem Beispiel wurden in den ca. 55 Sekunde 4 Isolierstößen überfahren.

Das Resultat der Datenaufbereitung ist eine separate CSV-Datei für jede der 9 Befahrungen. Diese Dateien enthalten alle 17 Spalten aus Tabelle 3 und Tabelle 4 und

bilden die Basis für alle weiteren Analysen. Durch die ergänzten Spalten ist die Größe von 85 MB auf ca. 128 MB je Befahrung angewachsen.

Umgesetzt wurden die beschriebenen Prozessschritte mittels eines semi-automatischen Java-Programms und mit dem Programm QGIS – einem Geographischen Informationssystem.

d. Erste Ergebnisse

Abbildung 9 ist exemplarisch für die Schwingungsanregungen in der Vertikalachse bei der Durchfahrt des Bahnhofs in Neumarkt in der Steiermark. Klar erkennbar ist, dass nicht jede Schwingungsanregung in der Epsilon-Umgebung eines Isolierstoßes liegt. Es ist weiter ersichtlich, dass auch Isolierstöße der rechten Schiene (grün) im Beschleunigungssignal der linken Schiene Schwingungen hervorrufen. Es ist auch ersichtlich, dass Isolierstöße nicht unbedingt eine sehr starke Anregung zeigen, z.B. erster roter von rechts.

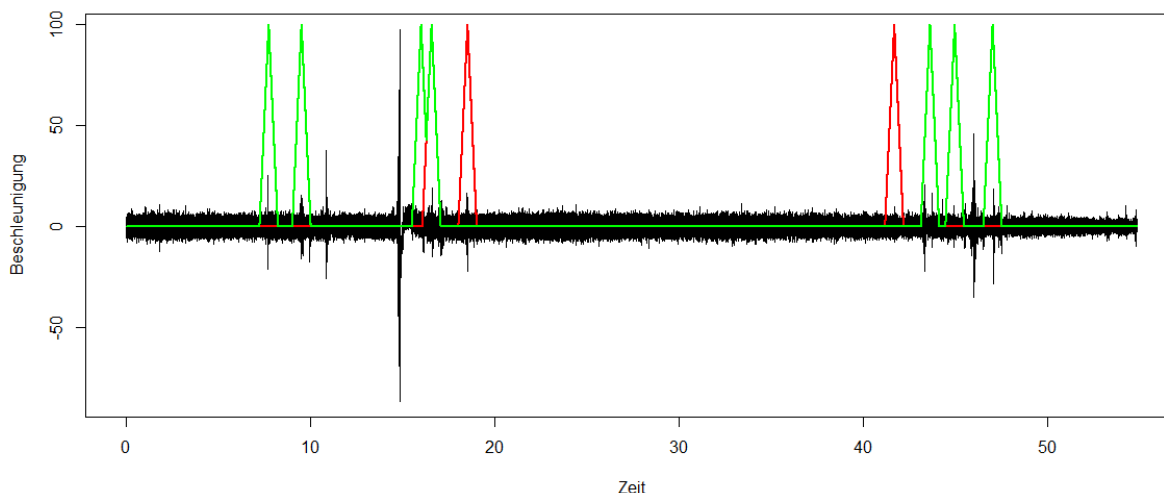


Abbildung 9: Beispiel für das Beschleunigungssignal in Z-Achse (Gier-Achse bzw. Vertikalachse) der linken Schiene einer ausgewählten Befahrung. Die roten und grünen Spitzen zeigen die Epsilon-Umgebung der Isolierstöße auf der linken und rechten Schiene.

Abbildung 10 zeigt einen Detailausschnitt von Abbildung 9 links. Jener Isolierstoß, welcher nach dem Befahrungszeitraum getauscht wurde, ist als zweiter von links erkennbar. Er liegt zwar auf der rechten Schiene, ist jedoch gut im Signal der linken Schiene erkennbar. Interessant ist hier auch, dass in die Epsilon-Umgebung des zweiten Isolierstoßes von links zwei Anregungen fallen, was auf eine weitere lokale Störung hindeutet. Der vor dem Befahrungszeitraum getauschte Isolierstoß (dritter Isolierstoß von links) ist im Beschleunigungssignal hingegen schwach zu erkennen. Die Abbildung zeigt auch, dass

Weichenherzen generell eine sehr starke Schwingungsanregung verursachen. Bei der schwächeren Anregung des ersten Weichenherzens von rechts liegt das Weichenherz auf der anderen, also der rechten Schiene.

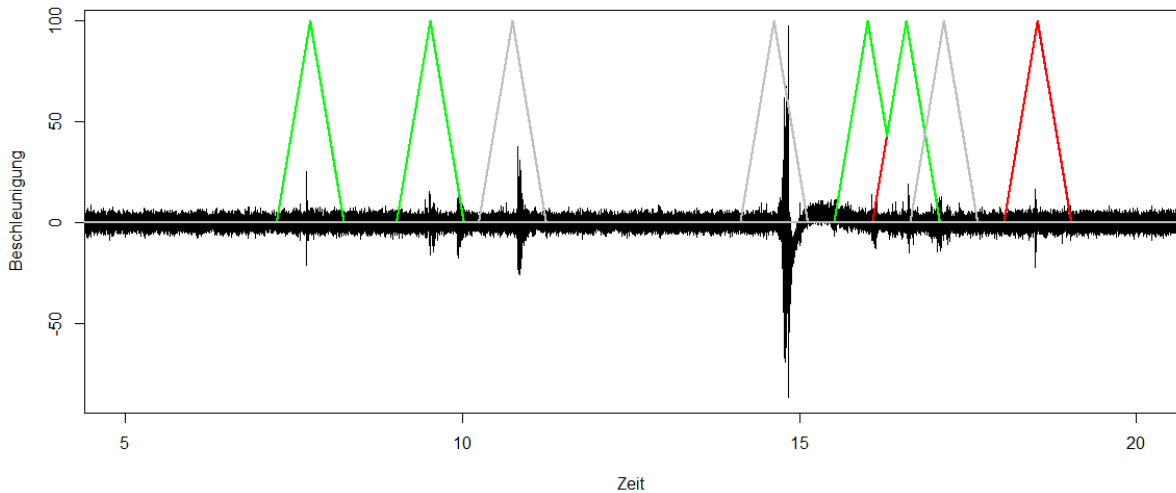


Abbildung 10: Ausschnitt aus Abbildung 9, links. Er wurde um die Epsilon-Umgebungen der Weichenherzen (grau) ergänzt.

○ Task 4 – Parameter

Für die Analyse wurden in einem ersten Schritt aus den Beschleunigungsdaten, also den Vibrationsmessungen, **Störungen** bzw. „unübliche“ lokal begrenzte Schwingungsanregungen **automatisiert extrahiert**. In einem zweiten Schritt wurden für diese Störungen **Parameter generiert**, um sie besser beschreiben zu können. Mit Hilfe der Epsilon-Umgebungen sowie der bekannten Isolierstöße und Weichenherzen konnte in einem dritten Schritt der **nächstgelegene Verursacher** den Störungen **zugeordnet** werden.

a. Ermittlung des Frequenzspektrums

Sowohl die automatisierte Extraktion der Störungen als auch der Parametergenerierung basieren auf einer Analyse der Schwingungsfrequenzen. Hierzu wurde eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) als Fensterfunktion definiert und das Beschleunigungssignal gefiltert. Die FFT transformiert dabei das Zeit-Beschleunigungssignal (Abbildung 11 unten) in ein Zeit-Frequenzspektrum (Abbildung 11 oben). Die hieraus resultierende Matrix wurde in einer Heatmap dargestellt, wobei dunklere Grautöne jeweils höhere Energie in einer bestimmten Frequenz repräsentieren. Gefiltert wurden alle drei Signale der X-, Y- und Z-

Achse der linken und rechten Schiene. Das Ergebnis sind somit 6 Frequenzanalysen je Railjet-Befahrung.

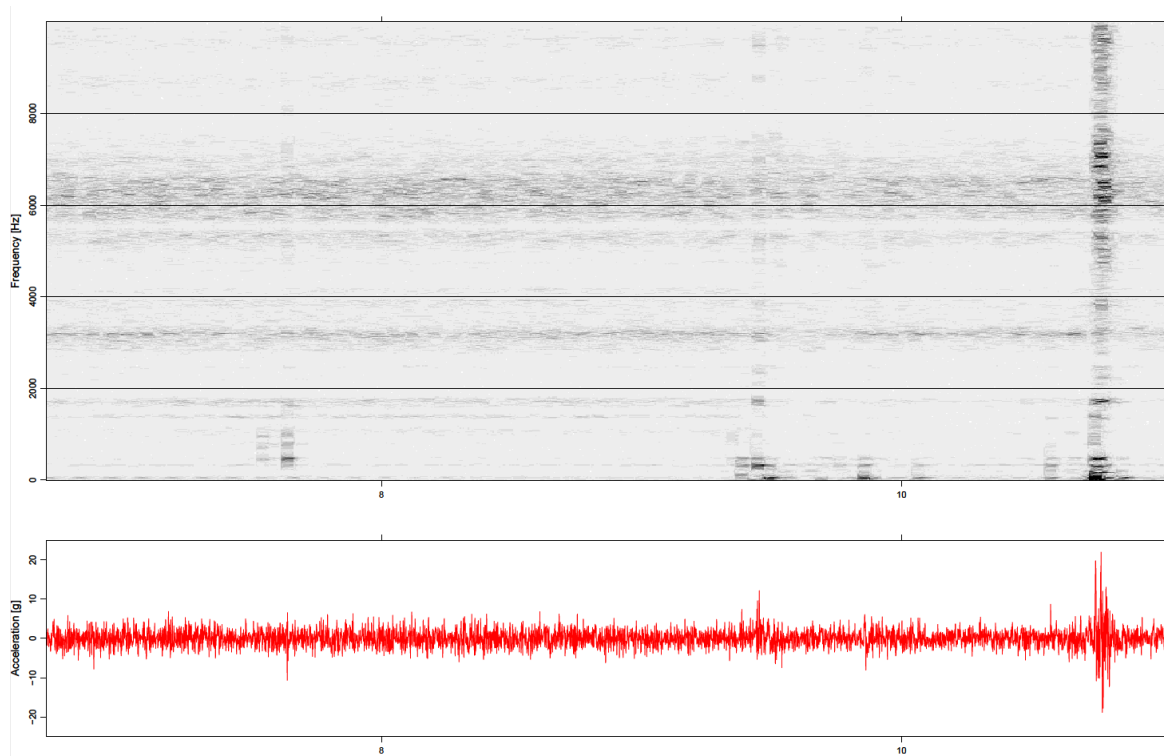


Abbildung 11: Beispiel für das Frequenzspektrum (oben) eines Beschleunigungssignals (unten).

In Abbildung 11 ist gut erkennbar, dass bei einer Railjet-Befahrung konstante Schwingungen auftreten. Dies wird durch die dunkleren horizontalen Bänder repräsentiert. Diese Bänder unterscheiden sich zwischen den Achsen und Schienen und ändern sich eher „längerfristig“. Die dunkleren vertikalen Bänder charakterisieren lokal begrenzte Störungen bzw. Schwingungsanregungen und sind somit in diesem Sinne „unüblich“. Diese Störungen sind Ziel der weiteren Untersuchungen. Interessant ist auch, dass nicht jede lokal begrenzte Störung im Frequenzbereich automatisch im Beschleunigungssignal erkennbar ist. Dies trifft vor allem auf Störungen im Frequenzbereich unter 500 Hz zu.

b. Automatisierte Extraktion von Störungen

Für den nächsten Schritt wurden die Störungen mit Hilfe der Schwingungsenergie identifiziert. Zuerst wurde die Energie eines markanten Frequenzbereichs aufsummiert. Anschließend wurde die Energie der Grundschwingungen abgezogen. Dadurch ist es möglich, über eine einfache Grenzwertüberschreitung die Störstellen automatisiert zu

markieren (Abbildung 12 unten). Diese Störstellen sind als graue Schattierungen im unteren Graphen erkennbar. In einem letzten Schritt wurde der Zeitpunkt der maximalen Energie ermittelt (graue Rauten, unten). Final wurden die identifizierten Störstellen mit den Epsilon-Umgebungen der bekannten Isolierstöße und Weichenherzen überlagert. Diese Überlagerung ist in Abbildung 12 an den grünen (rechte Schiene) und roten (linke Schiene) Epsilon-Umgebungen erkennbar. Zur besseren Lesbarkeit wurden im Frequenzspektrum nur der Mittelpunkt der Epsilon-Umgebung als vertikaler Strich eingezeichnet. Die Störstellen werden für linke und rechte Schiene getrennt ermittelt.

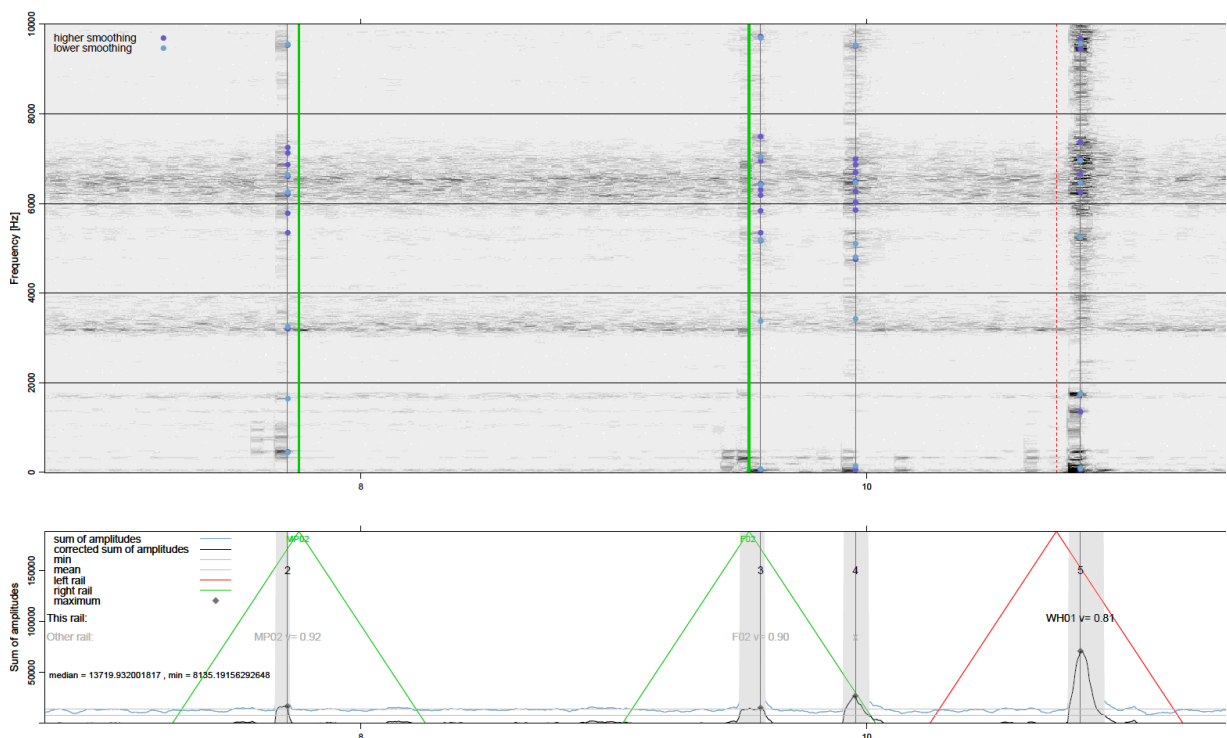


Abbildung 12: Frequenzspektrum (oben) und automatisch extrahierte Störstellen (unten).

Abbildung 12 zeigt auch die Notwendigkeit des Vergleichs von automatisiert erkannten Störungen und bekannten baulichen Ursachen. In der unteren Grafik sind vier Störstellen erkennbar. Es befinden sich aber nur drei bekannte Isolierstöße und Weichenherzen in diesem Bereich. Das heißt, die dritte Störstelle von links hat eine andere Ursache. Die nicht zugeordnete Störung ist auch in einer ersten visuellen Beurteilung nicht markant anders. Eine weitere wichtige Beobachtung betrifft die Genauigkeit der Verortung. Die Spitzen/Zentren der Epsilon-Umgebungen sind relativ nahe an den ermittelten Störungen. Wie schon erwähnt, die gesamte Epsilon-Umgebung dauert eine Sekunde bzw. ist ca. 37,5 m lang (Fahrgeschwindigkeit um die 37,5 m/s). Ähnliche Genauigkeiten und

Beobachtungen sind auch in allen anderen Railjet-Befahrungen, Schienen und Achsen erkennbar.

c. Extraktion von Parametern

In einem finalen Schritt wurden aus den automatisch extrahierten Störungen Parameter extrahiert. Diese Parameter sollen die Störstellen näher beschreiben. Hierzu wurde für jede Störung, die Dauer der Störung und der Mittelwert sowie Maximalwert der Amplitudensumme ermittelt. In einem weiteren Schritt wurden an der Stelle des Maximalwerts die charakteristischen Störfrequenzen ermittelt. Für diesen Zweck wurde das Ergebnis der FFT einmal schwächer und einmal stärker gefiltert. In Abbildung 12 oben sind diese charakteristischen Frequenzen bereits mittels Punkte dargestellt. Für die schwächere Filterung wurden die 10 charakteristischen Frequenzen ermittelt, für die stärkere nur 6. Um für jede extrahierte Störstelle einen finalen Datensatz zu bekommen, wurden die Auswertungen für die X-, Y- und Z-Achse zusammengefasst (siehe Tabelle 5). Für die weitere Analyse ist auch die Zuordnung zwischen linkem und rechtem Signal und bekanntem linken und rechten Isolierstoß ungeeignet. Deshalb wurde auf die Unterscheidung zwischen linker und rechter Schiene verzichtet. Stattdessen wurde die Bezeichnung „bekannter Isolierstoß auf dieser Schiene“ und „bekannter Isolierstoß auf anderer Schiene“ eingeführt. Für die Weichenherzen wurde analog verfahren.

Tabelle 5: Parameter die je automatisch extrahierter Störstelle ermittelt werden

Finaler Datensatz der Störstellen	Finaler Datensatz der Störstellen
Dauer der Störung [s]	Charakteristische Amplituden, X-Achse, schwach gef. 1-10
GPS-Geschwindigkeit [km/h]	Charakteristische Amplituden, X-Achse, stark gef. 1-6
Mittelwert der Amplituden	Charakteristische Frequenzen, X-Achse, schwach gef. 1-10
Maximum der Amplituden	Charakteristische Frequenzen, X-Achse, stark gef. 1-6
	Charakteristische Amplituden, Y-Achse, schwach gef. 1-10
Schiene {L,R}	Charakteristische Amplituden, Y-Achse, stark gef. 1-6

Isolierstoß diese Schiene	Charakteristische Frequenzen, Y-Achse, schwach gef. 1-10
Isolierstoß andere Schiene	Charakteristische Frequenzen, Y-Achse, stark gef. 1-6
Weichenherz diese Schiene	Charakteristische Amplituden, Z-Achse, schwach gef. 1-10
Weichenherz andere Schiene	Charakteristische Amplituden, Z-Achse, stark gef. 1-6
Typ diese Schiene	Charakteristische Frequenzen, Z-Achse, schwach gef. 1-10
Typ andere Schiene	Charakteristische Frequenzen, Z-Achse, stark gef. 1-6

Das Resultat der Analyse aller neun Railjet-Befahrungen ist eine Tabelle mit 219 gefundenen Störstellen die mit 176 Parametern beschrieben sind. Im Mittel wurden daher 24,3 Störstellen identifiziert. Verglichen mit der Anzahl von 11 bekannten Isolierstößen und 5 Weichenherzen werden mehr Störungen erkannt. Was auch zu erwarten war.

Abschließend folgt hier noch ein Beispiel zu den beiden getauschten Isolierstößen. In Abbildung 13 ist Isolierstoß IS53/56D,301A (zweite Epsilon-Umgebung von links) erkennbar. Dieser wurde nach dem Befahrungszeitraum ausgetauscht. Es kann daher ein erhöhter Verschleiß angenommen werden. Verglichen mit allen anderen Befahrungen scheint dieser nicht besonders „anders“ zu sein. Im Vergleich mit allen anderen Befahrungen bleibt das Frequenzmuster der charakteristischen Frequenzen aber ähnlich.

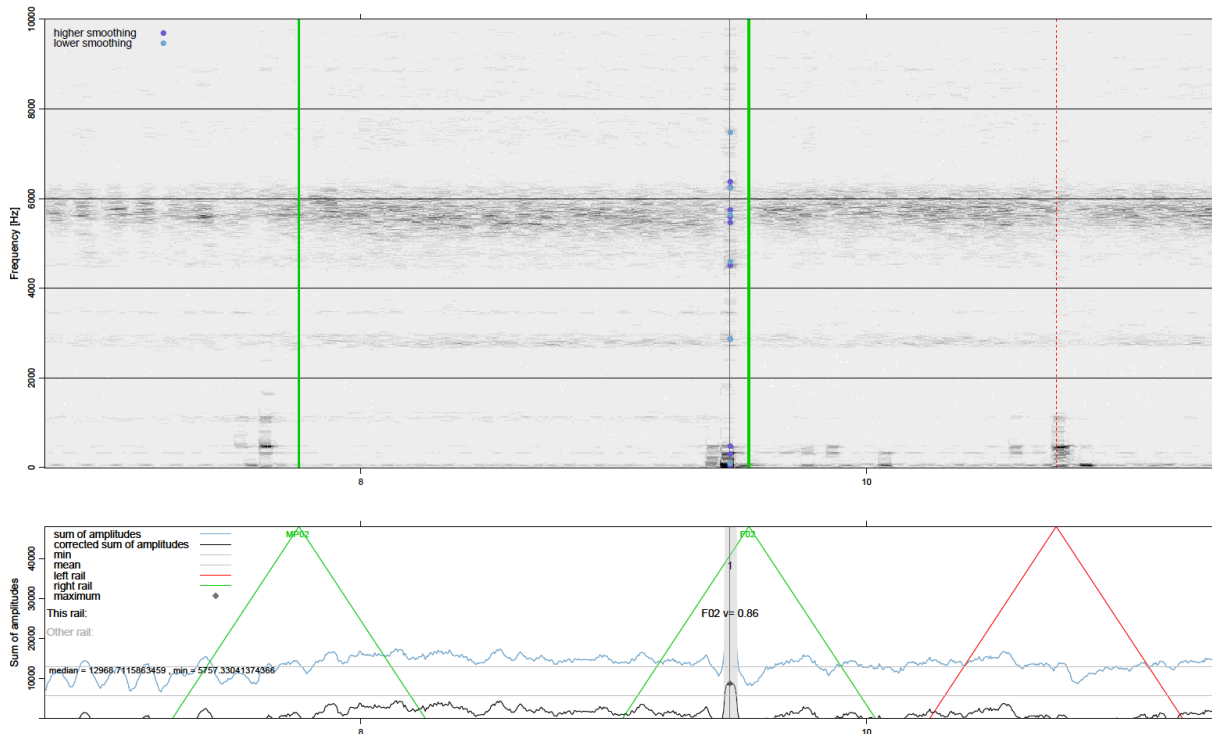


Abbildung 13: Nachträglich getauschter Isolierstoß (zweiter von links).

Ähnlich verhält es sich bei Isolierstoß IS51C,53/56A in Abbildung 14 (zweite Epsilon-Umgebung von links). Dieser Isolierstoß wurde kurz vor dem Befahrungszeitraum getauscht. Bei diesem Stoß ist unmittelbar nichts Besonderes zu beobachten. Aber auch hier, das Frequenzmuster der charakteristischen Frequenzen bleibt über den Betrachtungszeitraum sehr ähnlich.

Die Ergebnisse der Analysen legen für eine zukünftige Weiterverfolgung des Projekts die folgende Arbeitshypothese nahe: Die Schwingungsmuster einzelner Isolierstöße sind individuell, sie bleiben ähnlich über die Zeit. Auf Basis einer visuellen Analyse ist es aber keineswegs offensichtlich, welchen Erhaltungszustand sie haben.

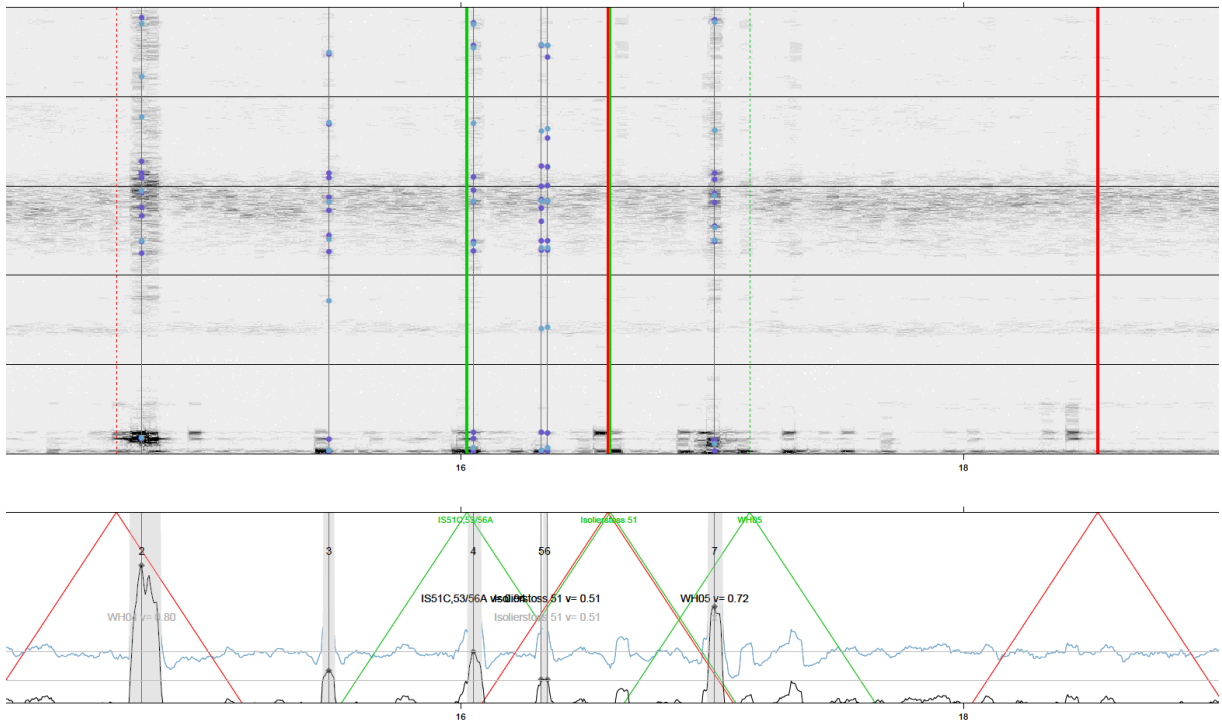


Abbildung 14: Vorher getauschter Isolierstoß (zweiter von links).

2.4. Arbeiten in AP4 - Grobkonzept

Auf der Grundlage der Anforderungen an ein Produktivsystem im vorliegenden Anwendungskontext wurde eine grobe Architektursicht mit den einzelnen Systemkomponenten entworfen, das alle Teilaspekte, beginnend mit der Datensammlung über die Sensoren bis hin zur Integration in der ÖBB Infra Prozesswelt, berücksichtigt.

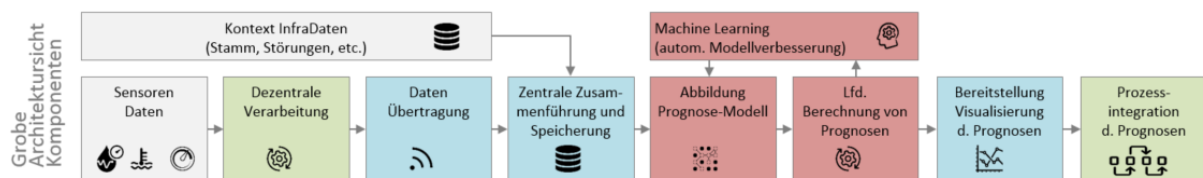


Abbildung 15: Grobkonzept Architekturkomponenten

Auf eine detaillierte Betrachtung der Anforderungen an die einzelnen Architekturkomponenten wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

○ **Beschleunigungssensoren**

In den Triebfahrzeugen montierte Beschleunigungssensoren liefern die Rohdaten, aus denen Zustandsinformationen abgeleitet werden sollen (im aktuellen Setup wurde mit einer Sampling-Rate von 20kHz gearbeitet und es ist davon auszugehen, dass diese nicht reduziert werden soll):

Tabelle 6: Rohdatenausschnitt

accel_L_x	accel_L_y	accel_L_z	accel_R_x	accel_R_y	accel_R_z	time [s]
-0,000196695	0,000308752	0,000895262	-0,00038445	-0,000274777	-0,00012815	5,00E-05
8,94E-06	0,000550747	0,000836253	-0,00069201	0,000107884	0,000317097	0,0001
0,000340939	0,000343323	0,000819564	-0,000630021	-0,000356436	0,000143051	0,00015
0,000360608	0,000278354	0,000717044	-0,000716448	-0,000537038	4,59E-05	0,0002
0,000781417	-0,000242591	0,000582337	-0,000541806	-0,000336766	-0,000160933	0,00025
0,000557899	2,26E-05	0,000494123	-0,000682473	-0,000343919	-5,36E-06	0,0003

Tabelle 7: Legende - Rohdaten

<i>accel_L_x</i>	<i>Linkes Rad Beschleunigung der jeweiligen Achse</i>
<i>accel_L_y</i>	<i>Linkes Rad Beschleunigung der jeweiligen Achse</i>
<i>accel_L_z</i>	<i>Linkes Rad Beschleunigung der jeweiligen Achse</i>
<i>accel_R_x</i>	<i>Rechtes Rad Beschleunigung der jeweiligen Achse</i>
<i>accel_R_y</i>	<i>Rechtes Rad Beschleunigung der jeweiligen Achse</i>
<i>accel_R_z</i>	<i>Rechtes Rad Beschleunigung der jeweiligen Achse</i>

○ **GPS Koordinaten**

Die GPS Koordinaten dienen der Verortung der Sensordaten. Diese sind erforderlich, um die Sensordaten konkreten Anlagen (d.h. den konkreten Isolierstößen) zuordnen zu können.

Eine einfache Installation auf den Triebfahrzeugen hat hohe Priorität. Unter dieser Prämisse wird vorgeschlagen, separate GPS Empfänger einzusetzen, anstelle auf die OnBoard Systeme über das verfügbare Bussystem (Multifunction Vehicle Bus [MVB]) zuzugreifen.

Grundsätzlich bestünde die Möglichkeit, GPS-Informationen über dieses Bussystem mit entsprechender Hardware abzurufen (MVB-Reader). Nach aktuellem Erkenntnisstand sind nur Railjet Triebfahrzeuge mit diesem Bussystem ausgestattet. Dieser Ansatz ist aber im Zuge einer Detailspezifikation zu bewerten und erfordert es, die Freigaben der Verantwortlichen Personen einzuholen.

- **Dezentrale Verarbeitung**

- Abschätzung des Datenvolumens / Einschätzung der Notwendigkeit dezentraler Verarbeitung

Die laufende Aufzeichnung der Beschleunigungsdaten aus den Sensoren führt zu sehr hohen Datenmengen. Auf die Frage zur Speicherung dieser Datenmengen wird in einem späteren Abschnitt (siehe Datenmanagementstrategie) eingegangen.

Eine Abschätzung der Datenmenge für eine Zugfahrt z.B. Wien – Salzburg lässt alleine für diese Strecke ein Datenvolumen von rund 6,5 GB erwarten.

Tabelle 8: Beispiel - Datenmenge

170	min
10.200	sec (Fahrzeit ca. 2:50h)
204.000.000	Werte pro Sensor (bei 20kHz)
1.632.000.000	Werte für alle 6 Sensoren + 2 für TimeStamp
6.528.000.000	in Byte (bei 4 Byte pro Wert)
5.120.000	in Bit/sec

Denkt man an eine kontinuierliche Übertragung, so handelt es sich um einen Datenstrom von 5,12 MBit/s. Eine Online-Übertragung ist daher technisch durchaus denkbar, allerdings ist zu berücksichtigen, dass in der Praxis eine durchgängige Netzverfügbarkeit entlang der Bahnstrecken nicht immer gewährleistet ist.

Selbst bei Machbarkeit der Online-Übertragung der Rohdaten vom Triebfahrzeug weg, kommt es an der zentralen Stelle in der alle Sensordaten zusammengeführt werden, zu sehr hohem Datenaufkommen (viele gleichzeitig fahrende Züge).

Aus diesem Grund wird eine Reduktion des Datenaufkommens direkt am Ort der Entstehung empfohlen.

- Ansätze zur Reduktion des Datenvolumens:
 - *Kompressionsverfahren*
Datenkompression wird üblicherweise unmittelbar im Datenübertragungsservice angewendet (siehe Komponente „Datenübertragung“)
 - *Intelligentes Ermitteln von relevanten Zeitausschnitten aus dem Sensordaten-Stream*

Einsatz des IoT Architekturkonzepts „edge computing“, in dem Verarbeitungsintelligenz in Richtung der Datenquellen verlagert wird.

An dieser Stelle sollte daher die Möglichkeit des sogenannten „edge computings“ in Betracht gezogen werden. Dieses IoT Architekturkonzept sieht neben dem zentralen Sammeln aller Sensor-Rohdaten (z.B. in einer IoT Cloud) und der zentralen Verarbeitung aller Daten, auch den umgekehrten Weg vor: nämlich die Intelligenz in Richtung Daten zu verlagern.

Anhand der Ergebnisse der Datenanalysen in diesem PoC ist bekannt, dass Sensordaten nur 0,5 Sekunden vor- bzw. nach dem Isolierstoß für die Berechnung der Zustandsaussagen erforderlich sind. Werden also nur die Sensordaten bei Überfahung von Isolierstößen zur weiteren Verarbeitung berücksichtigt, dann muss nur noch ein geringer Bruchteil der ursprünglich entstandenen Daten übertragen werden.

Für dieses „Ausschneiden“ der relevanten Sensordaten-Abschnitte ist eine Verarbeitungsintelligenz direkt am Ort der Datenentstehung erforderlich.

Anders als bei typischen IoT Anwendungsfällen, bei denen die Sensorwerte statisch einer konkreten Anlagenkomponente zugeordnet werden können, handelt es sich in diesem Anwendungsfall um bewegliche Sensoren, die geografisch über die Infrastruktur-Anlagen bewegt werden. Die Zuordnung der Sensordaten zu den konkreten Anlagen (Isolierstöße) wird zu einem notwendigen vorgelagerten Verarbeitungsschritt, bevor mit der eigentlichen Kernaufgabe, der Predictive Analytics, begonnen werden kann.

- Herausforderung hinsichtlich Software- oder Stammdatenaktualität bei der Verarbeitung

Die Software zur Edge-Sensordatenverarbeitung kann als sehr stabil eingeschätzt werden. Es ist mit keinen laufenden Aktualisierungen der Algorithmen zu rechnen.

Anders die Stammdaten der Isolierstöße. Diese können sich im Zuge von Erneuerungen ändern. Es besteht also die Notwendigkeit, die Stammdaten der Isolierstöße auf den Edge-Systemen aktuell zu halten. Hierfür ist ein automationsgestützter Deploymentprozess zu implementieren, der die Aktualisierung von Stammdaten (aber auch der Software) für die vielen Edge-Geräte effizient unterstützt.

- Identifikationsdaten der Isolierstöße

Eindeutige Referenz zum Stammdatensatz in den Anlagendaten

- GPS Verortung der Isolierstöße

Über diese Verortungsinformationen können die Sensordaten-Ausschnitte bereitgestellt und diese auf den korrekten Stammdatensatz referenziert werden.

- **Datenübertragung**

Die Abschätzung des Datenvolumens wurde im vorherigen Schritt bereits durchgeführt (5,12 MBit/s Datenstrom bzw. 6,5 GB auf einer Strecke Wien-Linz).

Wird eine der vorgeschlagenen Datenreduktions-Maßnahmen ergriffen, dann ist nach aktueller Einschätzung keine besondere Komplexität hinsichtlich Übertragbarkeit der Sensordaten in das Ziel-System zu erwarten.

Zudem handelt es sich um keine Daten mit besonders hohen Anforderungen an die Sicherheit der Datenübertragung. Aus aktueller Sicht ist es daher nicht nötig, spezifische Software (wie z.B. ASPERA) einzusetzen.

Als mögliche Netzwerke zur Übertragung der Daten von Edge-System am Triebfahrzeug in ein Netzwerk (Unternehmensnetzwerk oder Internet) kommen somit

- Mobiles Datennetz
- WLAN Access Points an den Endbahnhöfen
- GSM-R (Mobile Rail Datennetzwerke)

in Frage.

GSM-R Zugfunk ist üblicherweise für betriebliche Anwendungen vorgesehen. Inwieweit auf diesen Dienst zugegriffen werden darf ist zu klären. Es ist auch zu klären, ob die verfügbare Bandbreite für diesen Anwendungsbereich ausreichen würde.

- **Kontext Infrastrukturdaten**

Neben den Sensordaten werden in Predictive Maintenance Modellen zusätzliche Einflussfaktoren berücksichtigt, welche die Vorhersagegenauigkeit von sich anbahnenden Störungen erhöhen. Diese Kontextdaten sind aus ÖBB Systemen und zentralen Datendiensten (z.B. auch Wetterdaten Services) zu extrahieren.

- **Zentrale Zusammenführung und Speicherung**

Diese Architekturkomponente steht für die Zusammenführung und Speicherung aller im Kontext stehenden Daten unter Berücksichtigung folgender Prämissen:

- Normalisiertes Datenmodell
- Adäquate Datenbereitstellung für die Prognoseprozesse
- Adäquate Historisierung bzw. Archivierung
- **Prognosesystem**

Das Prognosesystem inkludiert die Teilkomponenten

- Modellentwicklung / Modellabbildung
- Modellanwendung
- Modellverfeinerung

Die Entwicklung der Prognosemodelle erfordert Spezialisten im Bereich der Data Science. Software Hersteller bieten in diesem Bereich zwar umfangreiche Tool-Unterstützung, die über automatisierte statistische Analysen oder Machine-Learning Algorithmen Modelle generieren. Experten weisen aber immer wieder darauf hin, dass über diese Methoden nicht immer die optimalen Modelle gefunden werden.

Ist das Modell einmal erstellt, gilt es dieses Modell in der Produktivumgebung einzusetzen (Deployment Prozess).

Im laufenden Betrieb werden die bereitgestellten Sensor- und Kontextdaten anhand des Prognosemodells analysiert und die definierten Aussagen generiert:

- Anlagenzustand (sog. health scores)
- time-to-failure Aussagen (z.B.: Anlage hat im nächsten Monat mit 89% Wahrscheinlichkeit eine Störung)

Ausgehend vom initial bereitgestellten Modell ist eine laufende Optimierung bzw. Detaillierung des Modells vorzusehen. Über angewendete Machine Learning (ML) Ansätze ist es heute möglich, die Modelle im laufenden Betrieb laufend automatisiert zu verbessern. Experten warnen jedoch davor, diese Modellanpassungen automatisiert zuzulassen. Es wird vorgeschlagen, die Ergebnisse der ML Algorithmen als Vorschläge zur Modelljustierung darzustellen und die tatsächliche Modellanpassung im Produktivsystem erst nach einer Validierung des möglichen Verbesserungspotentials durchzuführen.

○ **Bereitstellung Visualisierung & Prognosen**

• Statusinformationen

Im laufenden Betrieb des Systems ist sicherzustellen, dass alle Voraussetzungen zum Erreichen des definierten Einsatzszenarios gegeben sind. Dazu gehört, dass die Sensordaten für alle im Überwachungsbereich definierten Isolierstöße verfügbar sind und darüber hinaus auch in der definierten Periodizität (z.B. mind. eine Datenaufzeichnung pro Woche).

In einer Statusübersicht sollen Warnungen ausgegeben werden, wenn diese Regeln nicht erfüllt werden.

Gründe können eventuell veraltete Stammdaten in den Edge-Verarbeitungssystemen sein (z.B. fehlende Stammdaten von neuen Isolierstößen im Zuge von Erneuerungen oder dem Streckenausbau).

• Anlagenzustandsinformationen und –Prognosen

Visualisierung von erkannten Veränderungen an den Anlagen

- Zustandsänderungen
- Störungsprognosen

Abhängig vom gewünschten Prozess kann diese Visualisierung der Ausgangspunkt für die Einsteuerung von Maßnahmen sein, oder die Prozessintegration in die beteiligten Systeme erfolgt automatisch.

○ **Prozessintegration**

Die Prozessintegration soll sicherstellen, dass die gewonnenen Erkenntnisse (i.d.R. Aussagen zu möglichen Störungen) im Instandhaltungs-Prozess der ÖBB Infra an den richtigen Stellen integriert und die richtigen Maßnahmen angestoßen werden (siehe dazu Abschnitt „Grobkonzept Prozessintegration in die ÖBB INFRA“).

○ **Datenmanagementstrategie**

Die Definition der Datenmanagementstrategie zur effektiven und effizienten Datenbewirtschaftung im Anwendungsgebiet der Predictive Maintenance von Isolierstößen kommt besondere Bedeutung, da in diesem Umfeld mit einem sehr hohem Datenaufkommen zu rechnen ist. Nicht nur die Bewältigung der laufend anfallenden Datenmassen und deren Übertragung über die Netzwerke in die Zielsysteme, auch die Fragen der dauerhaften

Speicherung dieser Daten sind zu klären. Diesen Fragestellungen sollen im Folgenden beleuchtet werden.

Groben Abschätzungen zufolge ist bei Ausstattung der InterCity und RailJet Garnituren mit einem täglichen Datenaufkommen der Sensor-Rohdaten von rund 1,4 Terrabyte zu rechnen.

Tabelle 9: Abschätzung der Fahrzeit

Zugklasse	Anzahl Züge	Fahrzeit (Std.)
InterCity	21	65,74
Railjet	149	551,41
Gesamt	170	617,15

Tabelle 10: Abschätzung Sensordaten an einem Betriebstag für RJ und IC Zugfahrten

617	Std.
2.221.200	sec
44.424.000.000	Werte pro Sensor (bei 20kHz)
355.392.000.000	Werte für alle 6 Sensoren + 2 für TimeStamp
1.421.568.000.000	in Byte (bei 4 Byte pro Wert)

Selbst bei Reduktion der Datenmengen durch intelligentes Ermitteln der relevanten Zeitausschnitte an den Isolierstößen werden über die Jahre massive Datenbestände angehäuft. Zur Bewältigung sind Konzeptansätze in zwei Dimensionen zu entwickeln:

- Technische Konzepte zur Datenspeicherung
- Inhaltliche Konzepte

○ Technische Konzeptsicht

Hinsichtlich der technischen Konzeptsicht ist grundsätzlich zwischen Cloud- und lokalen Rechenzentrums-Lösungen (on premise) zu unterscheiden. Primär fließen Kriterien, wie

- Skalierbarkeit
- Betriebskosten
- Personalverfügbarkeit (Knowhow im mit BigData Datenbanken)
- Datensicherheit
- Connectivity zu Analysealgorithmen

,in die Entscheidungsfindung ein.

Besonderes Augenmerk ist auf die Flexibilität hinsichtlich Skalierbarkeit der Datenbanken zu legen. Cloud-Lösungen haben hier den klaren Vorteil, dass Kapazitäten einfach über Zukauf oder Rückgabe von Ressourcen jederzeit und kurzfristig angepasst werden können. Es besteht kein Investitionsrisiko hinsichtlich angeschaffter Hardware. Der Cloud-Ansatz ist vor allem für eine schrittweise Projektentwicklung geeignet, da ohne große Investitionen ein Predictive Maintenance Projekt gestartet werden kann und z.B. sukzessive das Anwendungsgebiet erweitert werden kann (z.B. Start mit wenigen Strecken und erst schrittweiser Ausbau bis zur Überwachung des Gesamtnetzes).

Die *Datensicherheit* spielt in diesem Anwendungskontext keine besondere Rolle, da es sich bei den Sensordaten um keine für Dritte nutzbare Daten handelt.

Zur Bewertung der *Connectivity* ist die Architektur der restlichen Komponenten zu berücksichtigen. Wird beispielsweise ein überwiegender Cloud-Ansatz gewählt (d.h. auch die Analysealgorithmen werden in der Cloud ausgeführt), dann liegt es nahe, auch die Basisdaten (Sensordaten) in der Cloud abzulegen, um hohen Datentransfer zwischen on premise Datenbanken und Cloud-Services zu vermeiden.

○ Inhaltliche Konzeptsicht

Wie wertvoll sind die Daten? Dieser Frage sollte nach verschiedenen Blickwinkeln bewertet werden, um den Nutzen der Daten und somit die Notwendigkeit zur Speicherung zu beantworten.

- Historisierungsdauer

Wie weit in die Vergangenheit sollen die Sensordaten-Zeitreihen historisiert werden,

damit diese einen Mehrwert für die Predictive Analytics Algorithmen liefern (z.B. für Modell-Training). Daten, die keinen Mehrwert mehr liefern, können gelöscht werden.

- *Aktive Anlagendaten*

Die Haltbarkeit von Isolierstößen ist begrenzt. Nach Austausch eines Isolierstoßes handelt es sich um eine andere Anlage, die aber denselben Stammdatenbezug aufweist. Alle Sensordaten vor dem Austausch können archiviert bzw. gelöscht werden.

- Periodizität der gespeicherten Sensordaten

In welcher „Dichte“ sollen die Sensordaten für dieselbe Anlage gespeichert werden. Ist es notwendig, Sensordaten eines Isolierstoßes mehrfach an einem Betriebstag aufzuzeichnen oder reicht eine Aufzeichnung pro Tag oder sogar Woche. D.h. es werden nicht alle Sensordaten von Zügen gespeichert, sondern nur dann, wenn in der definierten Periodizität noch kein anderer Zug Sensordaten des Isolierstoßes bereitgestellt hat (ggf. ist die Fahrtrichtung bzw. die Qualität der Aufzeichnung in der Bewertung relevant).

- Dynamischer Wert

Unter diesem Begriff wird die Wertigkeit der Daten über bestimmte Abhängigkeiten verstanden. Der Wert von Daten hängt ggf. davon ab, ob eine Veränderung an den Sensordaten erkannt wird. Ist das Sensordatenmuster unverändert zu bereits zuvor aufgezeichneten Daten, dann ist ggf. eine geringere Aufzeichnungsdichte ausreichend (z.B. eine Zeitreihe pro Woche). Werden Veränderungen erkannt, dann macht u.U. eine tägliche Aufzeichnung Sinn.

Unter Berücksichtigung dieser Fragestellungen ist eine geeignete Datenmanagementstrategie zu entwerfen. Die Devise lautet hier: so viel wie nötig, so wenig wie möglich ist, um die Wirtschaftlichkeit in der Datenhaltung zu gewährleisten.

- **Ergänzende Evaluierung der Anwendbarkeit von Predictive-Analysewerkzeugen**

Ausgehend von den Architekturkonzeptüberlegungen wurden verfügbare Lösungen am Markt, für eine produktive Implementierung des skizzierten Systems, evaluiert. Der Anbietermarkt im Bereich der Anlageninstandhaltung wächst, angefeuert durch die Schlagwörter „Digitalisierung“ und „Industrie 4.0“, rasant. Dies zeigt sich auch in einschlägigen Veranstaltungen, wie z.B. den „Instandhaltungstagen“. Nur wenige Anbieter

machen sich aber tatsächlich auf den Weg in die automatisierte Interpretation von Sensordaten über die immer besser unterstützten Methoden der Data Science, in der Zusammenhänge aus massenhaft gesammelten Sensordaten über mathematisch/statistische Ansätze identifiziert und in Modellen zur Zustandsinterpretation bzw. sogar zur Vorhersage der Zustandsentwicklung beschrieben werden.

Ein „Big Player“ in diesem Umfeld und langjährig Systempartner der ÖBB Infra im Bereich Analytics bzw. Business Intelligence ist IBM.

IBM bietet in diesem Themenfeld zwei grundsätzlich verschiedene Lösungen an:

- Standardlösung IBM PMQ (Predictive Maintenance und Quality)
- Watson IoT Platform und BlueMix Cloud Plattform

○ **Standardlösung IBM PMQ**

IBM PMQ wird von den Experten als die „All in One“ Lösung beschrieben. Wie das Lösungsarchitekturschaubild unten zeigt, integriert es alle erforderlichen Komponenten zur Datensammlung und –Integration, Datenspeicherung (Sensordaten, Kontextdaten, etc.), hochperformante Analyse-Laufzeitumgebungen und die darauf aufbauenden logischen Predictive Analytics Services mit BI Analysewerkzeugen.

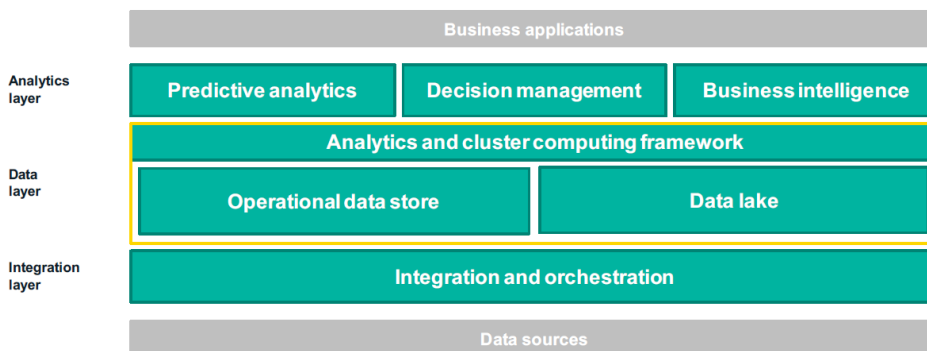


Abbildung 16: Lösungsarchitektur von IBM PMQ [Quelle: IBM]

Alle Komponenten der Lösung sind durch IBM eigene state-of-art Produkte realisiert. So basiert beispielsweise der Kern der Software, die Erstellung und Ausführung statistischer Modelle zum Zweck der Sensor- und Kontextdateninterpretation aus der in diesem Anwendungsbereich bekannten Statistik-Software SPSS.

SPSS bietet eine gut zu bedienende grafische Benutzeroberfläche, die es auch wenig erfahrenen Anwendern erlaubt, Modelle zu generieren und auszuführen. Allerdings täuscht die gute Anwendbarkeit über die Komplexität der Aufgabe hinweg. Das Erstellen von zuverlässigen und hoch präzisen Modellen im Bereich der Predictive Maintenance erfordert

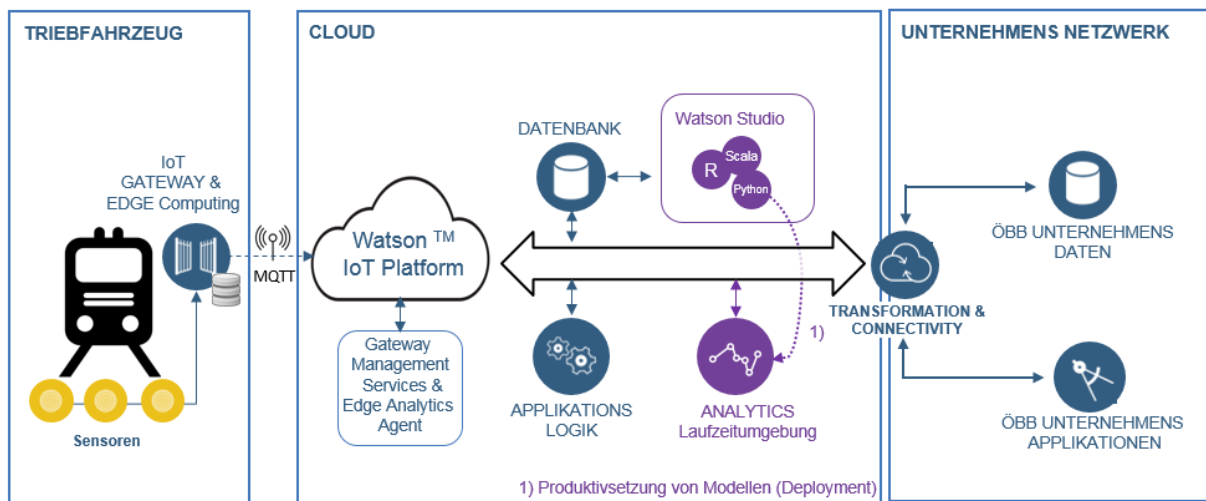


Abbildung 18: Lösungsansatz mit IBM IoT Cloud Services

- **Triebfahrzeug:** Installation der Sensoren, die über A/D Wandler an kompakte Industrierechner angeschlossen werden. Auf diesen Rechnern ist die Edge-Sensordaten-Verarbeitungssoftware und die IoT Gateway Software installiert. Ein ausreichend dimensionierten Datenspeicher (SSD oder HDD) agiert als Pufferspeicher zur Überbrückung von Zeitspannen, in denen keine Verbindung zum Internet aufrecht ist (während der Fahrt am Streckennetz kommt es immer wieder auch zu Ausfällen der mobilen Datenverbindung).
- Für die **Datenübertragung** von den Gateways auf den Triebfahrzeugen zur IoT Cloud Plattform wird das für IoT Anwendungen standardisierte **MQTT Protokoll** vorgeschlagen.
- **Watson IoT Plattform:** Es handelt sich hierbei um einen vollständig gemanagten Cloud-Service der fertig, implementierte Funktionen wie Geräteregistrierung, Konnektivität, schnelle Visualisierung und Speicherung von IoT-Daten bietet.
 - *Gerätemanagement:* unterstützt die Verwaltung der eingebundenen Edge-Geräte (z.B. Registrierung der Geräte, Firmware-Updates, Überblick Funktionsstatus, etc.)
 - Einfache *Speicherung* der von den Edge-Geräten übertragenen Sensordaten
- **Applikationslogik Services:** Flexible Komposition von Runtime-Services zur Implementierung der Applikationslogik. Über diese Services können die Anforderungen an die Datenzusammenführung der über die Watson IoT Plattform bereitgestellten Triebfahrzeug-Sensordaten mit den Stammdaten und weiteren

Kontextdaten, sowie die anschließende Ablage in einer Datenbank implementiert werden.

- **Datenbank Services:** auf der IBM BlueMix Plattform steht eine Reihe von Datenbanken zur Speicherung der Massendaten (Sensordaten) und Kontext-/Stammdaten zur Verfügung (z.B. relationale DB2 Datenbank).
- Zur Unterstützung von statistischen Aufgabenstellungen (Wissensgebiet *Data Science*) steht ein Toolset zur Modellierung im **Watson Studio** bereit. Die hier verfügbaren Tools erlauben eine state-of-art Implementierung von Modellen im Bereich Predictive Maintenance. Die Implementierung kann in Sprachen wie R, Python oder Scala erfolgen. Auch ein Cloud-Tool auf SPSS-Basis soll verfügbar werden.
- Das **Deployment** der Modelle erfolgt in eine **Analytics Laufzeitumgebung**. Dort können die laufend gesammelten Daten anhand der Modelle verarbeitet und die Aussagen zur Anlagenzuständen und Störungswahrscheinlichkeiten generiert werden. Diese Ergebnisse können wieder in Cloud Datenbanken zurückgeführt werden.
- Die Rückführung der Ergebnisse in das ÖBB Unternehmensnetzwerk (Speicherung im Bereich der Anlagendatenbanken, Prozessintegration über Service-Aufrufe anderer Systeme, etc.) wird über *Secure Connectivity Services* realisiert.

Die Cloud Services sind hoch skalierbar (Datenbanken hinsichtlich Speicherkapazität, Laufzeitumgebungen hinsichtlich Verarbeitungskapazität) und ermöglichen somit einen schrittweisen Ansatz zur Entwicklung der Lösung.

Nach Einschätzung der Experten ist im Sinne einer state of art Betrachtung die Cloud-Lösung zu empfehlen.

○ Grobkonzept Prozessintegration in die ÖBB INFRA

In den vorhergehenden Abschnitten wurden Ansätze zur automatisierten Erkennung von Anlagenzuständen, sowohl aus mathematisch/statistischer als auch aus systemischer Sicht, aufgezeigt. Die Ergebnisse sind Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten, wann Anlagenstörungen eintreten könnten, die wiederum in die Instandhaltungsstrategie einfließen müssen, um somit eine erhöhte Anlagenverfügbarkeit zu erreichen.

Zu diesem Zweck ist eine Integration dieser neu gewonnenen Informationen und Erkenntnisse in den bestehenden Instandhaltungsprozess zu gewährleisten, damit die systemgestützte operative Abwicklung der Anlagenbetriebsführung für die erforderlichen Maßnahmen vorgesehen werden können.

In Abstimmung mit dem Geschäftsbereich SAE wurden in einem Grobübersicht die aktuell beteiligten Systeme zusammengefasst (siehe Abb. XX) und die wesentlichen Prozesse dargestellt.

○ Aktuelle System- und Prozesslandschaft

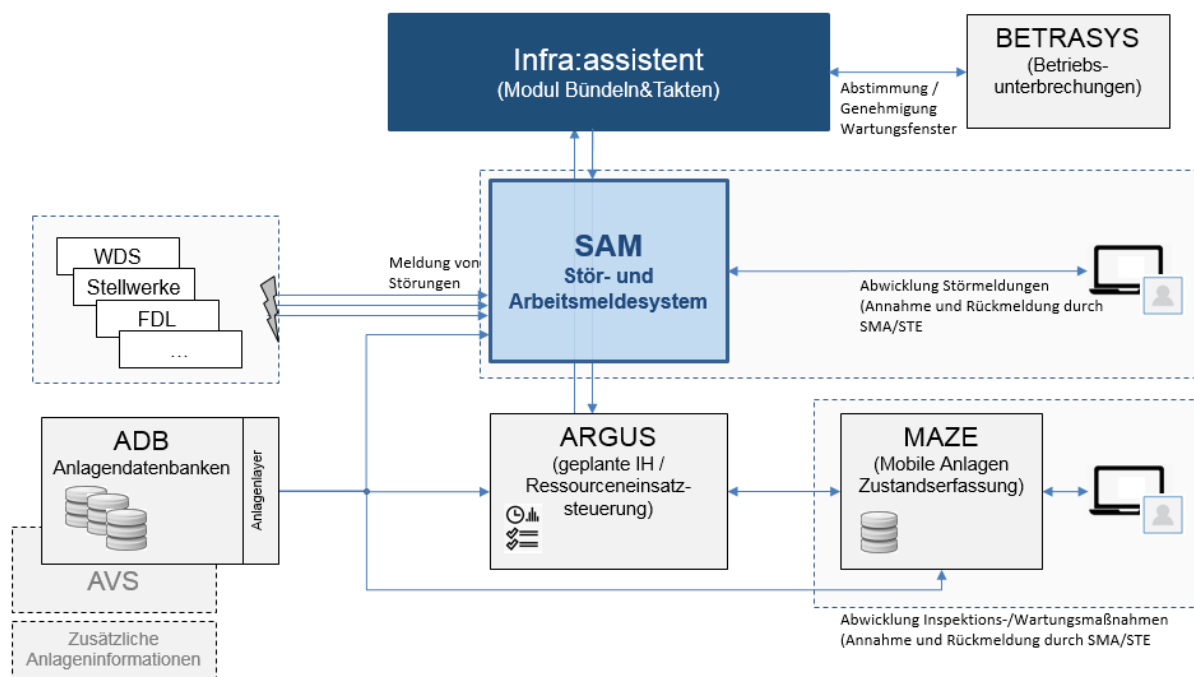


Abbildung 19: Grobübersicht Systeme/Prozesse der Anlageninstandhaltung

Das zentrale System zur Abwicklung von Störungen ist SAM (Stör- und Arbeitsmelde System) und wird flächendeckend von den integrierten Geschäftsbereichen eingesetzt und unterstützt im Wesentlichen folgende Prozesse:

- Störungsmeldung /-Erfassung
- Entstördisposition
- Ursachenerhebung
- Entstörung
- Störungsabschluss
- Analyse

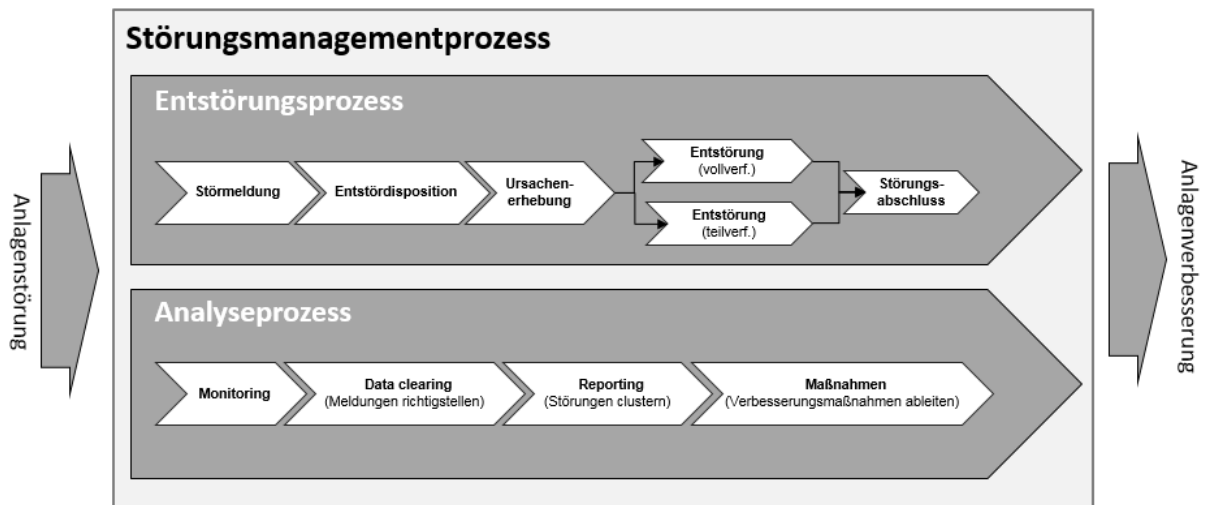


Abbildung 20: Prozessdarstellung Störungsmanagement [Vgl. SAM Basisinformationen, ÖBB Infra, SAE]

○ Integration der Ergebnisse in ÖBB INFRA Systemwelt

In erster Linie sind die Informationen aus dem Prognosesystem (Architekturkomponente „Bereitstellung und Visualisierung der Prognosen“) an folgende Systeme, in Abhängigkeit der Zeitspanne zur prognostizierten Störung, bereitzustellen.

- SAM (1)
- ARGUS (2)
- Anlagendaten-Systeme (3)
- Infra:assistent (4)

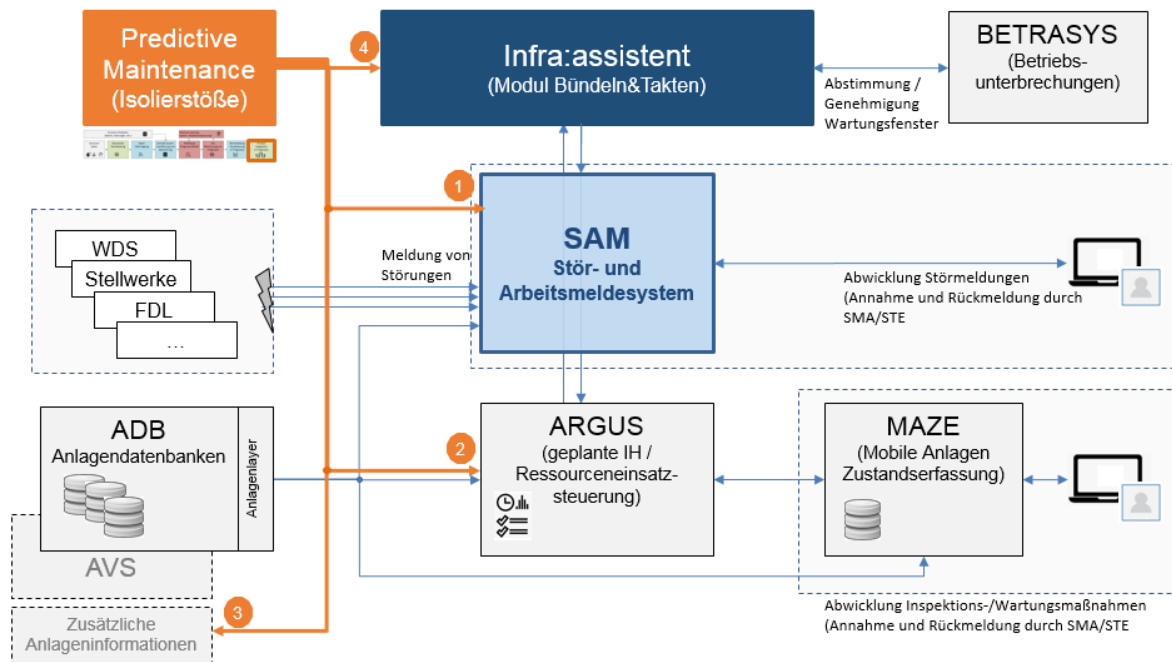


Abbildung 21: Prozess- / Systemintegration der Prognosen

- Unmittelbarer Handlungsbedarf (1)

Erkennt das Prognosesystem eine rasche Verschlechterung des Anlagenzustandes bzw. wurden ggf. im Vorfeld gemeldete mittelfristige Störungsvorhersagen nicht berücksichtigt, dann ist kurzfristig Handlungsbedarf gegeben. Eine Meldung ist somit an SAM weiterzugeben.

Derzeit werden in SAM Meldungen unterschiedlicher Art und Dringlichkeit verarbeitet. Diese können grob in die Kategorie „Mangel“ (z.B. IMMO Qualitäts-Check) bzw. „Störung“ unterteilt werden und sind in unterschiedliche Dringlichkeitsstufen durch Kategorien gekennzeichnet. Beispiele für Kategorie-Fristen

- Kategorie 3 (innerhalb von 3 Werktagen)
- Kategorie 2 (spätestens nächster Werktag)
- Kategorie 1 (Sofortbehebung erforderlich)

Je nach Vorhersagetermin ist die generierte SAM-Meldung mit entsprechender Kategorisierung zu versehen.

- Mittelfristige Prognose der Zustandsverschlechterung (2)

Störungsvorhersagen in weiterer Zukunft können als geplante IH-Maßnahmen in ArguS abgewickelt werden und somit als geplante Maßnahme über den standardisierten IH-

Prozess Ressourceneinsatzgesteuert und abgewickelt werden. Für mittelfristig geplante Maßnahmen besteht ein entsprechender Dispositionsspielraum, dieser ermöglicht ggf. die Zusammenlegung mit anderen Tätigkeiten am Ort der betreffenden Anlagen oder sogar das Zusammenlegen mit der bereits geplanten Inspektions- bzw. Wartungsmaßnahme.

- Anlagenzustand (Health Score) (3)

Für statistische Zwecke ist die Darstellung und die Ablage von Anlagenzuständen, u.U. sogar die zeitliche Entwicklung der Anlagenzustände, anzudenken. Die Kenntnis der Zustände der eingesetzten Anlagen ermöglicht Optimierungen im Anlagenmanagement. Zur Ablage dieser Informationen sind mehrere Ansätze denkbar. Insbesondere im Zusammenhang mit der Entwicklung von AVS (Zielsystem für Anlagenstamminformationen) könnte angedacht werden, dort Zustandsinformationen abzulegen. Alternativ können aber auch andere Ablagesysteme definiert werden (z.B. das Infra Data Warehouse) und diese mit den relevanten Systemen, die Zugriff auf die Anlagenzustände benötigen, verbunden werden.

- Infra:assistent (4)

Aus den Anlagenzuständen bzw. deren zeitliche Entwicklung können in Zusammenhang mit Informationen des LifeCycle Managements Erneuerungsmaßnahmen abgeleitet werden, die im infra:assistent [planner] in die Maßnahmenplanung der Infrastrukturplanung einfließen.

3. REFLEXION IN BEZUG AUF DAS FORSCHUNGSZIEL/FRAGE

Die 9 vorhandenen historischen Railjet-Befahrungen für den Bahnhof Neumarkt in der Steiermark sind zu wenig, um statistisch valide Interpretationen zu ermöglichen bzw. den Erhaltungszustand durch Maschinelles Lernen zu prognostizieren. Zusätzlich fehlen für die Prognose des Erhaltungszustands die notwendigen (digitalen) Informationen.

Nichtsdestotrotz konnten durch die exemplarische Umsetzung des Analyseprozesses sehr gute Einblicke gewonnen werden. Der Analyseprozess wurde prototypisch bis zu jenem Schritt umgesetzt, an dem üblicherweise eine Klassifizierung des Erhaltungszustands stattfinden würde. Das beinhaltet die gesamte Datenaufbereitung wie auch die Extraktion von charakteristischen Parametern.

Auf Basis der Erfahrungen kann abschließend festgehalten werden:

○ **Schieneinfrastruktur:**

- Ein zukünftiges System benötigt eine möglichst genaue Verortung der Isolierstöße in digitaler Form. Für jeden Isolierstoß muss Abschnitt, Gleis und Schiene digital bekannt sein. Im Idealfall sind auch alle anderen baulichen Ursachen für Störungen, z.B. Weichenherzen, digital bekannt.
- Für alle Isolierstöße, Schienen und Gleise wird ein eindeutiges ID-Konzept benötigt, das über die Zeit stabil bleibt.
- Für eine tiefgehende Analyse und eine Entwicklung eines Prognosemodells muss der Erhaltungszustand zum Zeitpunkt der Überfahrt grob bekannt sein. Hierzu würde sich eine einfache Klasseneinteilung in 1 – 3 oder 1 – 5 Klassen eignen. Zusätzlich soll die Art des gegenwärtigen Versagens des Isolierstoßes bekannt sein, z.B. Zusammenwachsen, lockere Schraubverbindungen, ausgebrochene Isolierung.

○ **Bezüglich Befahrungen:**

- Für jede Befahrung muss bekannt sein, welche Abschnitte und Weichen in welcher Richtung und mit welcher Geschwindigkeit befahren wurden. Fahrtrichtung und ev. gedrehtes Triebfahrzeug dürfen keine falsche Zuordnung verursachen. Eine hohe Korrektheit und Genauigkeit der Zuordnung ist unumgänglich, da es zu viele andere Verursacher für Störungen gibt.

○ **Bezüglich Analysen:**

- Ein zukünftiges System muss Störungen automatisch erkennen können. Diese müssen im Anschluss automatisch mit den bekannten Isolierstößen abgeglichen werden. Hierfür sind zwei Teilalgorithmen zu entwickeln:
 1. **Segmentieren** – Erkennung von Störungen mittels Beschleunigungsdaten.
 2. **Referenzierung** – Automatische Referenzierung von bekannten Isolierstößen und erkannten Störungen

Die exemplarischen Umsetzungen mit einem Schwellenwert (1) und einer Epsilon-Umgebung (2) geben hierzu bereits einen ersten Anhaltspunkt.

- Ein zukünftiges System muss jede erkannte Störung in einen einzigen Datensatz (eine Zeile in einer Tabelle) transformieren. Das heißt, der Zeitreihencharakter des

Rohsignals geht verloren. Weiters müssen in diesem Schritt charakteristische Parameter ermittelt werden. Es benötigt daher folgende Algorithmen

3. **Extraktion** – Extraktion von Parametern aus den Zeitreihendaten
4. **Restrukturierung** – Umwandlung der Zeitreihe in einen einzelnen Datensatz
5. **Klassifizierung** – Klassifizierung auf Basis der extrahierten Parameter

Die exemplarische Umsetzung hat bereits gezeigt, dass in den Frequenzspektren, den Amplituden und der Dauer erste charakteristische Parameter sind. Zu den Schritten 3 bis 5 ist anzumerken, dass dies ein traditionelles Vorgehen ist. Moderne Algorithmen des Maschinellen Lernens, z.B. Deep Learning, könnten diese drei Schritte auch ersetzen. Sie können aber auch nur für Schritt 5 eingesetzt werden.

○ **Bezüglich Datenanalysen:**

- Eine direkte Analyse der Beschleunigungssignale scheint nicht geeignet zu sein, um Störungen automatisiert zu erkennen. Es empfiehlt sich das Frequenzspektrum zu betrachten, z.B. mit einer FFT oder Wavelet-Transformation.
- Eine visuelle Analyse der Störstellen von Isolierstößen hat ergeben:
 - Derselbe Isolierstoß hat bei ähnlicher Geschwindigkeit ein ähnliches Muster.
 - Die Muster unterschiedlicher Isolierstöße unterscheiden sich.
 - Es gibt Isolierstöße, die keine oder nur sehr schwache Störungen verursachen.
 - Neben Isolierstößen und Weichenherzen gibt es noch weitere Ursachen für Störungen.
- Die Störungen von Isolierstößen müssen treffsicher von allen anderen unterschieden werden. Es ist damit zu rechnen, dass Fehler in der Zuordnung auftreten werden. Verfahren müssen daher robust gegen vereinzelte falsche Zuordnungen sein.
- Weichenherzen erzeugen wesentlich stärkere Störungen. Sie sind gut unterscheidbar.
- Die Railjet-Befahrungen weisen Grundschrägungen auf. Diese sind als vertikale Bänder gut erkennbar. Stärke und Frequenzen dieser Bänder ändern sich „längerfristig“. Die genauen Ursachen für die Änderungen, z.B. unterschiedliche Fahrgeschwindigkeit, Erhaltungszustand der Gleise oder Resonanzen ist nicht

bekannt. Dieses Phänomen muss bei der automatisierten Extraktion von Störungen berücksichtigt werden.

- Der Einfluss der gefahrenen Geschwindigkeit und der Fahrtrichtung ist mit den vorliegenden Daten nicht zu prüfen. Es empfehlen sich daher folgende gesonderte Untersuchungen:
 - Einfluss der Fahrgeschwindigkeit
 - Einfluss der Fahrtrichtung
 - Ursachen der Grundschrwingungen
 - Bestimmung von sonstigen Ursachen für Störungen
 - Einfluss der anderen Railjet-Achsen

4. AUSBLICK – SINNVOLLE NÄCHSTE SCHRITTE, MAßNAHMEN, EMPFEHLUNGEN

- Eine zukünftige Datenerhebung innerhalb einer größeren Feldstudie kann mit ähnlicher Sensorik und ähnlichem Setup erfolgen. Die gesammelten Daten scheinen für tiefergehende Analysen geeignet.
- Charakteristische Frequenzen von Störungen verteilen sich zwischen 0,1 und 10.000 Hz. Eine Reduktion der Aufzeichnungsfrequenz ist daher erstmals nicht sinnvoll. Eine Erhöhung ist aber auch nicht induziert. Eine fundierte Empfehlung kann aber erst dann gegeben werden, wenn die Aussagekraft der Frequenzparameter untersucht wurde.
- Aufgrund der sanften Geschwindigkeitsänderungen (geringe Beschleunigungswerte) eines Railjets, scheinen 100 Hz für den GPS-Sensors auszureichen. Daten zu Isolierstößen, die während eines starken Bremsmanövers überfahren werden, sollten sowieso aussortiert werden.
- Der Versatz in Zuglängsachse (Roll-Achse) zwischen GPS-Sensor und Schwingungsmesser muss bekannt sein, um zumindest diesen systematischen Fehler zu vermeiden.
- Der verwendete GPS-Empfänger weist auf den ersten Blick im Bahnhofsbereich Neumarkt in der Steiermark eine ausreichende Genauigkeit für die Verortung auf. Die Genauigkeit der GPS-Positionierung ist aber unbedingt für das gesamte Netz zu prüfen.

- Datenmenge und benötigte Rechenleistung (z.B. für FFT, Wavelet-Transformation) ist aufgrund der hohen Aufzeichnungsfrequenz beträchtlich. Eine Vorverarbeitung der Daten (Segmentierung) bereits während der Fahrt ist jedenfalls zweckmäßig.
- **Bereitstellung GPS Verortung der Isolierstöße für weitere Schritte der Modellverfeinerung**

Im Zuge weiterer Detaillierungen ist ein Konzept zu entwickeln, wie die GPS Daten der Isolierstöße systemisch bereitgestellt werden können. Grundsätzlich kommen zwei Ansätze in Betracht.

Einerseits die *manuelle Verortung* im Zuge von IH-Maßnahmen, d.h. das Service-Personal nimmt bei nächster Gelegenheit vor Ort die GPS Koordinaten auf. Es ist zu bedenken, dass ein entsprechendes Gerät bereitgestellt werden muss, um entsprechend zuverlässige Daten hinsichtlich GPS-Genauigkeit und korrekter Zuordnung zum konkreten Isolierstoß-Stammdatensatz sicherzustellen.

Als zweiter Ansatz ist eine *automatisierte bzw. semiautomatisierte* Bereitstellung denkbar. Mögliche Quellen für die Berechnung der GPS-Daten sind:

- Automatisches Erkennen von Isolierstößen aus den Sensordaten und manuelle Zuordnung zum Stammdatensatz durch entsprechende visuelle Unterstützung.
- Berechnung der GPS-Daten über verfügbare Strecken-km Informationen in den Isolierstoßstammdatensatz und ggf. verfügbare oder bereitzustellende GPS-Referenzpunkte in Betriebsstellen.

5. RESÜMEE

- **Positive Erkenntnisse**
 - Identifikation der Schienenisolierstöße ist mit **Schwingungsmessung** machbar
 - **Zuordnung von Örtlichkeit der Isolierstöße zu Auffälligkeiten in den Messdaten ist gut möglich**
 - Fehleroffenbarung auch zu Schienenherzen und weitere Anlagenkomponenten möglich
 - **Konzepte für Systemimplementierung** verfügbar

- **Fehlende oder mangelhafte Ergebnisse**
 - **Absicherung der Datenbasis** – derzeit 1 Bahnhof verortet – es müssten noch weitere Bahnhöfe verortet und zugeordnet werden
 - **Digitale Erfassung der Schienenisolierstöße an der Strecke** der Infrastruktur und deren genaue Verortung
 - Unterscheidung von **GUT – SCHLECHT** ist zu evaluieren
 - **Keine Flächendeckende Erfassung** – Daten sind unter anderem Blickwinkel erfasst worden
 - **Vereinfachung des Messaufbaues** – nur Speicherung im Bahnhofsbereich, nur Speicherung bei Schwellwertüberschreitung ..., Datenübernahme aus dem Fahrzeug
 - **Tiefere Mustererkennung** und Musterzuordnung ist notwendig

6. ALTERNATIVES LÖSUNGSKONZEPT MITTELS ÖBB-MESSZUG

Im Rahmen der Abschlusspräsentation wurden Lösungsansätze mit den Ansprechpartnern der ÖBB diskutiert. Im Zuge der Besprechung offenbarten sich geänderte aktuelle Rahmenbedingungen in Bezug auf den Einsatz und die Verwendung des ÖBB Messzuges. Ein Konzept, welches die Implementierung des Monitorings der Isolierstöße auf dem Messzug vorsieht ist durchaus denkbar. Die Gegebenheiten am Messzug wären ideal, denn dieser ist mit entsprechender hochauflösender Vibrationssensorik sowie einem GPS System ausgestattet. Es steht ausreichend Speicherplatz zur Verfügung und etwaige zusätzliche Sensorik bzw. damit generierte Messdaten können korreliert werden. Zumindest für die sehr wichtig priorisierten Hauptstrecken ist eine ausreichend hohe Befahrungsfrequenz mit dem Messzug gegeben. Die Messfahrten in zeitlichen Intervallen von 6-8 Wochen sind hinreichend, um Verschleißtrends der Infrastruktur, im speziellen Schienenisolierstöße, rechtzeitig erkennen zu können.

Um ein konkretes Konzept ausarbeiten zu können bzw. detaillierte Rahmenbedingungen zu erheben wäre wie besprochen ein Meeting mit den zuständigen Mitarbeitern des ÖBB Messzugteams sinnvoll und wünschenswert.