

Der föderierte Rail-Data-Space: Ein skalierbarer Marketplace für Daten, Dienste und Digital-Twins

Dieser Beitrag zeigt, wie im Projekt MOTIONAL durch den föderierten Rail-Data-Space mit Marketplace ein interoperables, datensouveränes Fundament für Digital-Twins und weitere domänenspezifische Anwendungen entwickelt und in Use-Cases zur Anwendung gebracht wird.

Einleitung

Die europäische Zieldefinition einer vertrauenswürdigen, interoperablen und souveränen Datenökonomie hat in den vergangenen Jahren durch regulatorische Maßnahmen wie den Data Governance Act

und den Data Act (vgl. ETR 6/2025) sowie durch Initiativen wie Gaia-X und die International Data Spaces Association (IDSA) (vgl. ETR 3/2025) an Dynamik gewonnen [1]. Auf dieser Grundlage entstehen sektorale föderierte Data-Spaces, die den souveränen Austausch von Daten ermöglichen,



Nicolás Ortiz, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Deutsches Zentrum für Luft- und
Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für
Verkehrssystemtechnik
nicolas.ortizkammrath@dlr.de



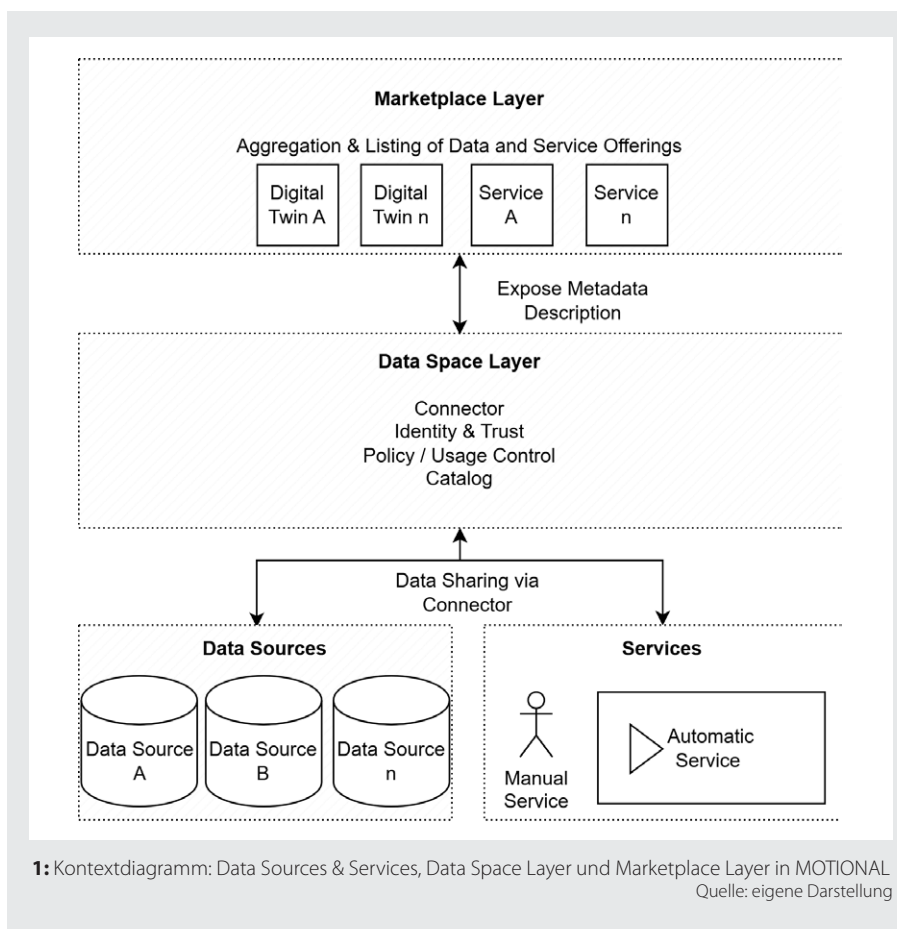
Dr. Alexander Meierhofer

Lead Researcher
Virtual Vehicle Research GmbH,
Department R, Rail Systems
alexander.meierhofer@v2c2.at



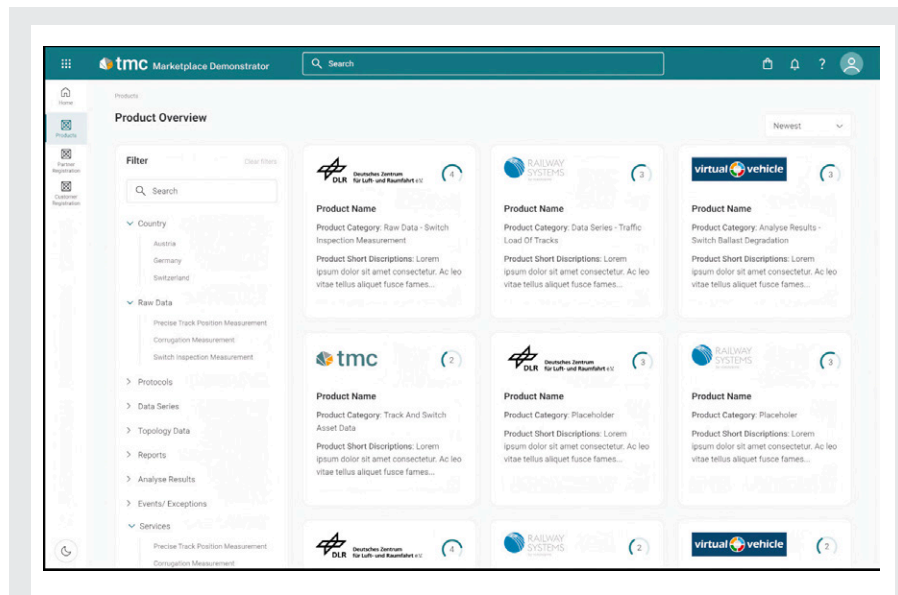
DDr. Stefan H. Reiterer

Team Leader Integration Auto-
mation
Virtual Vehicle Research GmbH,
Department E, Co-Simulation &
Software
stefan.reiterer@v2c2.at



ohne dass diese aus den IT-Systemen der Eigentümer extrahiert und zentralisiert werden müssen (vgl. ETR 07-08/2025) [2].

Im Bahnsektor spielt diese Entwicklung eine besondere Rolle, da datengetriebene Prozesse vom Fahrbetrieb über die Infrastrukturplanung und -diagnose bis hin zur Wartung traditionell stark fragmentiert sind. Das bringt Herausforderungen mit sich, die eine neue Form des kooperativen Wissens- und Datenaustauschs erfordern, bei dem Modelle, Simulationen und Daten unter klar definierten rechtlichen und finanziellen Rahmenbedingungen sicher



2: Mock-up des Graphical-User-Interface des Marketplace, über den User die angebotenen Daten und Services entsprechend ihrer Rechte durchsuchen und filtern können Quelle: eigene Darstellung

und effizient geteilt werden können. Aus diesem Grund adressiert das EU-Flagship Project 1 MOTIONAL des Europe's Rail Joint Undertaking die digitale Transformation des Bahnsystems u.a. mit dem Ziel, einen European-Rail-Data-Space (ERDS) und die zugehörigen digitalen Dienste aufzubauen [3]. In der prozeduralen und technischen Implementierung eines Datenökosystems für den Bahnsektor werden verschiedene Forschungsstränge zusammengeführt und integriert. Die verbindende Schlüsselfunktion des zukunftsfähigen Bahnsystems wird dabei vom föderierten Data-Space übernommen. Neben dem sicheren Austausch von Daten beinhaltet dieser auch einen Marketplace, d.h. einen menschen- und maschinenlesbaren Katalog für den Zugang und Austausch von Services, wie z.B. Digital-Twin-Anwendungen. Auf diese Weise können in MOTIONAL Anwendungsfälle durch die Kopplung eines föderierten Data-Space mit Mehrwertdiensten wie Digital-Twin-Anwendungen, Digital-Product-Passport oder Product-Carbon-Footprint sowie der dafür benötigten Datensätze abgebildet werden.

Der vorliegende Text fasst zentrale Entwicklungen aus MOTIONAL zu Data-Space, Marketplace und inhaltliche Kopplungen mit Use-Cases zusammen und kontextualisiert sie entlang der generellen Funktionsweise von Marketplace und Rail-Data-Space, der Abbildung von Digital-Twin-Use-Cases sowie der Skalierbarkeit in

einem Ausblick auf zukünftige europäische Aktivitäten und Use-Cases im Bahnsektor.

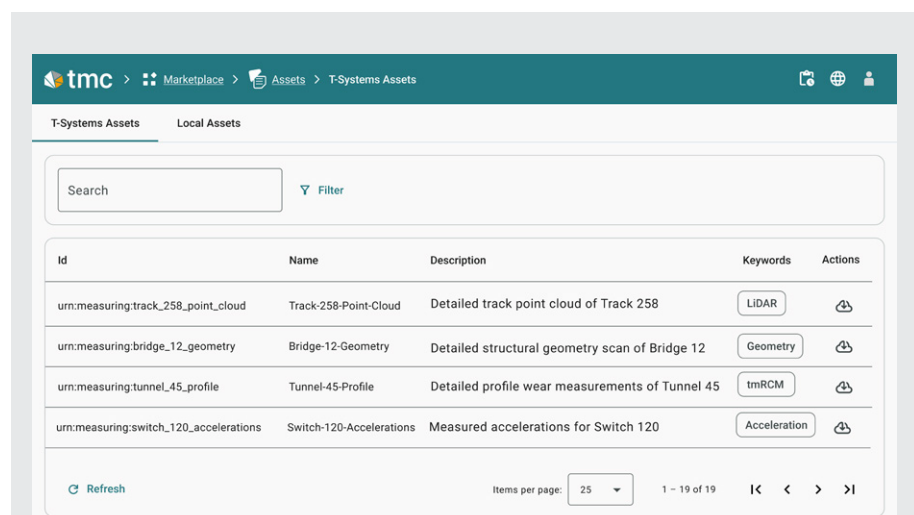
European-Rail-Data-Space mit Marketplace-Layer

Der European-Rail-Data-Space basiert auf einer föderierten Architektur, die den sicheren, regelbasierten und souveränen Austausch von Daten zwischen unterschiedlichen Akteuren im Bahnsystem ermöglicht. Zentrale Elemente dieser Infrastruktur sind Data-Space-Connectoren, ein domänen-spezifischer Metadata-Broker sowie ein angebundener Daten- und Servicekatalog

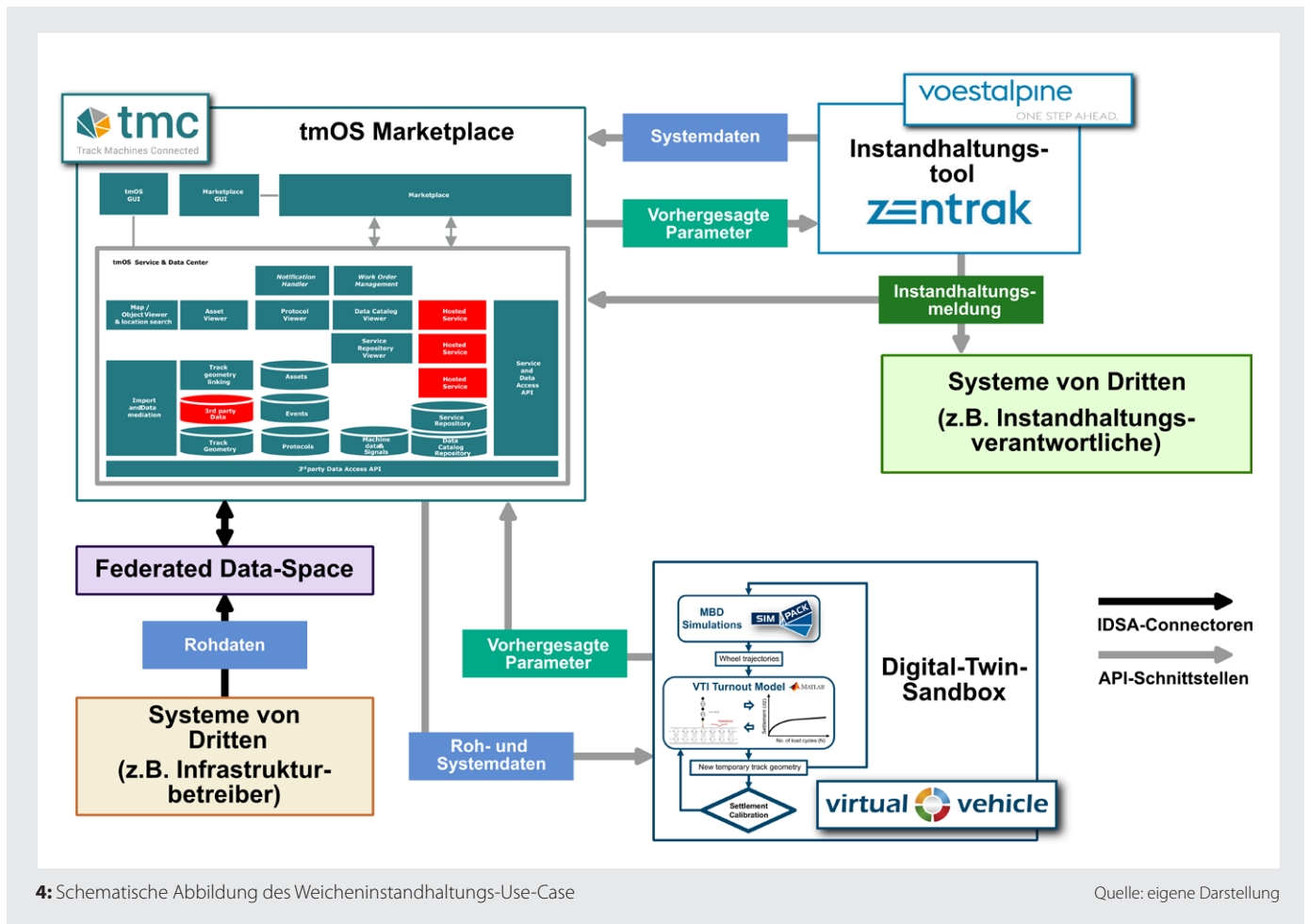
(Marketplace), welche gemeinsam eine interoperable, skalierbare und EU-konforme Datenökosystemstruktur bilden (siehe Abbildung 1).

Um die Souveränität der einzelnen Teilnehmer zu wahren und ihre Daten und geistiges Eigentum zu schützen, werden vor dem eigentlichen Datentransfer Zugriffs- und Nutzungsbedingungen zwischen den Parteien ausgehandelt. Basis dafür sind die bereitgestellten Metadaten, die über einen Connector zugänglich gemacht werden. Er fungiert als Schnittstelle zum Data-Space. Denn ganz im Gegensatz zu anderen Lösungen, wie etwa einem Data-Lake, verbleiben die Daten und Services so lange innerhalb der Systemgrenzen des Anbieters, bis die notwendigen Bedingungen erfolgreich verhandelt wurden. Erst dann öffnet der Connector einen sicheren Kanal für den Transfer. Somit können Organisationen den Grad der Offenheit nach dem Prinzip der Datensouveränität festlegen und Datenprodukte an Bedingungen knüpfen, unter denen ein Zugriff und eine Nutzung erfolgen darf. Der Metadata-Broker nutzt die durch den Connector verfügbaren Metadaten für die semantische Beschreibung, Auffindbarkeit und Vermittlung von Datenangeboten, indem er sie katalogisiert und so eine transparente Sicht auf verfügbare Datenquellen schafft. [4, 5, 6]

Somit verknüpft der Data-Space-Layer die in Organisationen des Ökosystems befindlichen Datenquellen und Services über Connectoren, Identity- und Trust-Mechanismen, Policies und Katalogservices mit dem Marketplace und den aggregierten Daten- und Serviceangeboten (siehe Ab-



3: Graphical-User-Interface der derzeit umgesetzten Produktivumgebung Quelle: eigene Darstellung



4: Schematische Abbildung des Weicheninstandhaltungs-Use-Case

Quelle: eigene Darstellung

bildung 1). Auf dieser infrastrukturellen Basis bietet der Marketplace eine einheitliche Interaktionsoberfläche, über die Teilnehmende sowohl Datensätze als auch datenbasierte Services wie z.B. Simulationen oder Digital-Twin-Anwendungen selektieren und konsumieren können (siehe Abbildung 2 und 3). Besonders die zuletzt genannte Form der Anwendung wird, wie im Kontextdiagramm gezeigt, ermöglicht: durch den Zugang zu aktuellen Daten des realen „Zwillings“ können die Simulationen des physikalischen Systems aktualisiert, kalibriert und validiert werden, um somit ein digitales Abbild (Digital-Twin) des realen Systems zu erzeugen [7]. Der Digital-Twin kann also im Bahnkontext dynamische virtuelle Modelle einer physischen Entität erzeugen, welche Rohdaten aus der realen Umgebung sammeln und verarbeiten. Das dient dazu, Objekte oder Prozesse zu visualisieren, Vorhersagen zu treffen, Anomalien zu erkennen und die Entscheidungsfindung zu unterstützen, um die Leistung zu verbessern oder das Wissen über die Entitäten des Bahnsystems zu erweitern. [8]

Die Kombination aus Connectoren, semantischem Brokering und dem Marketplace-Layer ermöglicht es, Daten und Algorithmen kontrolliert und bedarfsgerecht miteinander zu verknüpfen. Dadurch können zielgerichtete und qualitativ hochwertige Analyse- und Simulationsergebnisse generiert werden. Auf diese Weise werden komplexere Use-Cases aus dem Bahnsektor unterstützt, die einer kombinierten Daten- und Serviceverfügbarkeit bedürfen.

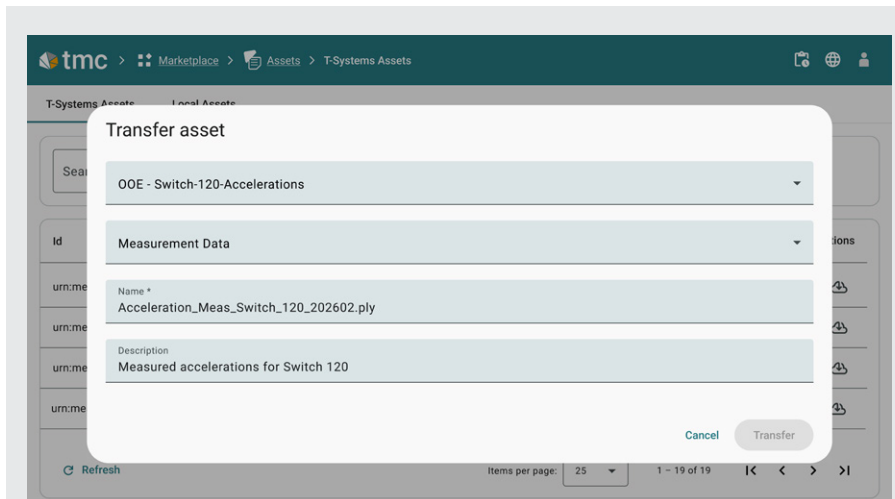
Railway Use-Cases mit Digital-Twin-Anwendungen

So stellt der Digital-Twin im Bahnsektor neben weiteren Services und Mehrwertdiensten die Chance dar, konsistente Modellierungs- und Steuerungsmechanismen zu etablieren, die Planung, Betrieb und Instandhaltung auf einer gemeinsamen, formalisierten Datenbasis zusammenführen. Durch die im Rahmen von MOTIONAL entwickelten Use-Cases kann diese Zielsetzung demonstriert werden: Dabei wird der Rail-Data-Space genutzt, um eine föderierte

Datenbasis aufzubauen, auf der Simulationen fußen und die für Digital-Twin-Anwendungen nutzbar gemacht werden können (siehe Abbildung 1). Diese Use-Cases bilden dann spezifische physische Bahnsysteme und dessen Teilsysteme virtuell ab, analysieren sie und sind im Weiteren in der Lage, zukünftiges Verhalten vorherzusagen, wodurch im Bahnsystem Predictive-Maintenance-Szenarien umsetzbar werden.

Abbildung 4 zeigt die Funktionsweise und Interaktionsmöglichkeiten des Marketplace anhand des von Track Machines Connected GmbH („tmc“), voestalpine Digital Track Management GmbH und Virtual Vehicle Research GmbH entwickelten Use-Cases „Schotterdegradation im Weichenbereich“ [9], welcher bereits als Demo funktionsfähig implementiert ist. Hierbei liegt der Fokus auf der Beschreibung des Gesamtprozesses und der Systemintegration, nicht auf der detaillierten Ausgestaltung des zugrunde liegenden Simulationsmodells.

Um die Instandhaltung einer Weiche zu optimieren, werden unterschiedliche Daten aus verschiedenen Quellen gesammelt:



5: Beispiel für eine bereits integrierte Datenübertragung

Quelle: eigene Darstellung

So können einerseits stationäre Sensoren in der Weiche Daten liefern, andererseits können überfahrende Messwagen oder andere mit Sensorik ausgestattete Fahrzeuge die Datenbasis erweitern. Auch Wetterdaten oder Daten aus händisch durchgeführten Messungen können verarbeitet werden. Diese Rohdaten aus den unterschiedlichen Systemen Dritter (siehe Abbildung 4) können dann über IDSA-konforme Connectoren dem Data-Space zur Verfügung gestellt werden. Der tmcOS-Marketplace ist in der Lage, darauf zuzugreifen, ebenso wie auf eigens spezifizierte API-Schnittstellen zu weiteren Systemen (z. B. Zentrak), um diese zusätzlichen Daten (hier Systemdaten) wiederum im Data-Space nutzbar zu machen. Der Marketplace verwendet die bereitgestellten Meta-Informationen aller verfügbaren Services und Daten zur Erstellung eines menschen- und maschinenlesbaren Katalogs (siehe Abbildung 2 und 3). Entsprechend der Anforderungen des Use-Cases kann hierbei auch eine Verbindung zwischen bereitgestellten Daten und solchen, die in spezifische Services verarbeitet werden, hergestellt werden. Der Marketplace überträgt die benötigten Roh- und Systemdaten dann zur Digital-Twin-Sandbox, wo sie zunächst passend aufbereitet werden müssen. Anschließend werden daran die freien Parameter der Simulation trainiert und das zukünftige Verhalten der Weiche vorhergesagt. Die entstandenen Vorhersagen können nun wieder über den Marketplace zugänglich gemacht und damit im Sinne der Predictive-Maintenance weiterverwertet werden. In dem in Abbildung 4 präsentierten Use-Case werden die Vorher-

sagen über eine API-Schnittstelle an das Instandhaltungstool Zentrak übermittelt, welches darauf basierend Instandhaltungsmeldungen generiert und diese wiederum an Systeme von Dritten weiterleitet oder an den tmcOS-Marketplace zurückspielt. Damit werden diese Informationen Instandhaltungsverantwortlichen zugänglich gemacht und diesen ist es dann möglich, darauf basierend Instandhaltungsentscheidungen zu treffen oder in Zukunft sogar ganz automatisiert Instandhaltungsaufträge generiert zu bekommen.

Ähnlich diesem Use-Case ist es auch möglich, andere Beispiele abzubilden. Dabei kann es um instandhaltungstechnisch relevante Fragestellungen gehen, wie etwa der Entwicklung der Gleislage in der Strecke, Verschleiß oder RCF in engen Bögen und auch der Entwicklung von Federkennlinien an Fahrzeugen. Aber auch der Zustand von Türen, Klimaanlage, Lebenszeiten von Batterien, Eigenschaften der Bremsen oder auch der Digital-Product-Passport können hierbei, unter Berücksichtigung entsprechender Zugangsrechte, bereitgestellt werden.

Eine weitere Anwendung ist die „Simulation as a Service“, bei der interne Vorgänge vorab abstrahiert und z.B. in einer Functional Mockup Unit (FMU) [10] gekapselt werden, um eine standardisierte und wiederverwendbare Nutzung zu ermöglichen. Für die Umsetzung müssen sowohl der entsprechende Service als auch alle hierfür erforderlichen Datenquellen im Service- und Datenkatalog des Marketplace beschrieben und registriert sein. Um einen Überblick über die angebotenen Daten

und Services zu erhalten, kann eine graphische Benutzeroberfläche mit Filtern und Suchfunktionen nach dem passenden Angebot durchsucht werden. Danach können die benötigten Daten gezielt ausgewählt und übertragen werden (siehe auch das Beispiel in Abbildung 5). Neben dem Beziehen der erforderlichen Eingangsdaten umfasst das Serviceangebot die automatisierte Durchführung der Simulation zur Berechnung der Schotterdegradation, welche nicht innerhalb des Marketplace, sondern in einer externen Simulationsumgebung des Service-Anbieters ausgeführt wird. In der Folge werden die relevanten Daten zwischen Marketplace und Simulationsumgebung automatisiert ausgetauscht, die Simulation initiiert und die resultierenden, aufbereiteten Ergebnisse anschließend wieder über den Marketplace für den Kunden bereitgestellt.

Durch die Verbindung von Sensordaten aus der Infrastruktur, Fahrzeugdaten, betrieblichen Steuerungsinformationen sowie domänenkonformen Metadaten entsteht so bei entsprechender Skalierung ein mehrschichtiges, modellbasiertes Abbild des Systems, das zentrale Sektoranforderungen erfüllt: Rückverfolgbarkeit, souveräne Datenbereitstellung, Interoperabilität über standardisierte Schnittstellen sowie Auditierbarkeit. Die föderierte Architektur des Rail-Data-Space gewährleistet dabei, dass Datenquellen aus unterschiedlichen Organisationen wie Infrastrukturbetreiber, EVU, Wartungsdienstleister oder kommunale Mobilitätsakteure über Connectoren eingebunden werden, während sie zugleich die Souveränität über ihre Daten behalten. Erst nach semantisch und technisch verifizierter Einigung über Nutzungsrichtlinien erfolgt die Freigabe zur Einbindung in das Digital-Twin-Modell oder andere Daten- und Serviceangebote. Dadurch entsteht ein eindeutiger, reproduzierbarer und vertrauenswürdiger Datenfluss und es ist von der Erhebung der Daten bis zur Anwendung die Kontrolle über die Daten gewährleistet.

Fazit

Durch die in MOTIONAL umgesetzte Verbindung souverän verwalteter Daten und algorithmischer Dienste sowie simulationsbasierter Analytik, entsteht ein kohärentes Gesamtbild, das den Weg hin zu einer digitalisierten, resilienten und prädiktiv optimierten europäischen Eisenbahn vorgeben kann. Das Daten- und Serviceangebot über

den Marketplace kann wesentliche Voraussetzungen für die digitale Transformation des europäischen Bahnsektors darstellen, weil es über die föderierte Data-Space-Architektur den Anforderungen an Datensouveränität, Transparenz und regulatorische Compliance entspricht. Kombiniert, ergibt sich dadurch ein technologischer Lösungsansatz für eine zukunftsfähige Daten- und Serviceökonomie im Bahnkontext, der in der Lage ist, Anwendungsfälle mit einem höheren Komplexitätsgrad umzusetzen. •

DOI 10.61067/260333

Förderhinweis

The Project is Co-funded by the European Union under grant agreement No. 101101973. The project is supported by the Europe's Rail Joint Undertaking and its members.

Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the Europe's Rail Joint Undertaking. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

They would also like to thank the supporting industry partners Track Machines Connected GmbH and voestalpine Digital Track Management GmbH.



Literatur

- [1] European Commission, "Strategy for Data". [Online]. Verfügbar: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/strategy-data>. [Zugriff: 11.12.2025].
- [2] European Commission, "Common European Data Spaces". [Online]. Verfügbar: <https://digitalstrategy.ec.europa.eu/en/policies/data-spaces>. [Zugriff: 11.12.2025].
- [3] Europe's Rail, "FP1 MOTIONAL – European Rail Network and Mobility Management". [Online]. Verfügbar: <https://rail-research.europa.eu/pages/fp1-motional/objectives>. [Zugriff: 11.12.2025].
- [4] N. Jahnke, I. Jussen-Lengersdorf, T. Schoormann, F. Möller, „Designing Federated Data Marketplaces in Industrial Production: Findings from a Prototypical Implementation“, 19th International Conference on Wirtschaftsinformatik, Würzburg, Germany, 2024.
- [5] B. Otto, A. Burmann, „Europäische Dateninfrastrukturen“, Informatik Spektrum, Vol. 44, No. 4, pp. 283 - 291, 2021.

- [6] A. Gieß, T. Schoormann, F. Möller, I. Gür, „Discovering data spaces: A classification of design options“, Computers in Industry, Vol. 164, 2025.
- [7] M. M. Rathore, S. A. Shah, D. Shukla, E. Bentafat, and S. Bakiras, „The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: A systematic literature review, challenges, and opportunities“, IEEE Access, vol. 9, pp. 32030-32052, 2021.
- [8] E. Krmac and B. Djordjevic, „Digital twins for railway sector: Current state and future directions“, IEEE Access, vol. 12, pp. 108597-108615, 2024.
- [9] S. H. Reiterer, A. Meierhofer, I. Vidovic, M. Forberger, B. Stuntner, and J. Nowotny, „Railway marketplace for data, know-how and services“, in Modelica Conferences, pp. 901–907, 2025.
- [10] FMI Working Group, Functional Mock-up Interface for Model Exchange and Co-Simulation, Version 2.0.2, 2020.

Summary

The federated Rail Data Space: A scalable marketplace for data, services and digital twins

This article shows how the MOTIONAL project is using the federated Rail Data Space with Marketplace to develop an interoperable, data-sovereign foundation for digital twins and other domain-specific applications and its application in use cases.

Die beste Abdichtung und der beste Kabelschutz für Schienenfahrzeug-Hersteller



Zertifizierung hinsichtlich Flamm-, Rauch- und Toxizität (FST)
Spring-Fast® SL-FST – EN 45545-2 flamm- und hitzebeständig, raucharme, geringe Toxizität.
Seal-Fast – EN 45545-2 flamm- und rauchbeständig



Silikon und TPE
Spring-Fast SL-FST – TPE beständig gegen Hitze, Witterungseinflüsse und UV-Strahlung
Seal-Fast – Silikon ist flexibel, langlebig, beständig gegen Hitze, Witterungseinflüsse und UV-Strahlung.



Metallverstärkt
Spring-Fast SL-FST – Der gekapselte Stahlkern benötigt keinen Klebstoff – spart 49 % Kosten im Vergleich zu geklebten Nylon-Alternativen
Seal-Fast – Edelstahlkern sorgt für Kantenfestigkeit bei Stößen und Vibrationen.

Kostenlose Musterkits finden Sie unter [Devicetech.com/samples](https://www.Devicetech.com/samples)

DTI device technologies GmbH +49 40 350 85 128



DTI device technologies GmbH