

# Migrationsstrategie für eine fahrzeugseitige Zugvollständigkeitskontrolle

## The rollout strategy for on-board train integrity migration

Alessa Isberner | Benedikt Scheier | Jakob Geischberger | Michael Mönsters | Florian Brinkmann

Im Rahmen des Shift2Rail (S2R)-Projektes X2Rail-4 wurden Migrationsstrategien für eine Markteinführung von fahrzeugseitigen Zugvollständigkeits-Kontrollsystemen (On-Board-Train-Integrity – OTI) untersucht. Als Optimierungskriterium für die Migration wurden die potenziellen Einsparungen durch den Abbau von Infrastrukturelementen und deren Betriebskosten definiert, die durch OTI obsolet werden. Dazu wurde ein Optimierungsmodell entwickelt, um vor dem Hintergrund definierter Kriterien sinnvolle Migrationsschritte zu bestimmen. Darüber hinaus wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, um die verschiedenen Migrationspfade zu bewerten.

### 1 Zielstellung und Hintergrund

Im Rahmen des S2R Joint Undertaking werden Maßnahmen zur Unterstützung und Verbesserung des Einsatzes fortgeschrittener Leit- und Sicherungssysteme für den Bahnsektor entwickelt [1]. Im Rahmen dieser Aktivitäten werden in den beiden aufeinanderfolgenden Projekten X2Rail-2 und X2Rail-4 OTI-Lösungen zur sicheren Überwachung der Zugvollständigkeit im Betrieb vorgeschlagen. OTI soll als Basistechnologie für European Train Control System Level 3 (ETCS L3) einen Beitrag zur Erkennung der Zugvollständigkeit leisten. Die Technologie ist daher für eine Erhöhung der Streckenkapazität von großer Bedeutung. Neben der Funktionalität als Enabler für ETCS L3 kann OTI auch zur Senkung der Investitionen sowie Betriebskosten beitragen, indem die Technologie eine Reduzierung der streckenseitigen Infrastrukturkomponenten ermöglicht. Bei der Umstellung auf die OTI-Technologie sind somit sowohl wirtschaftliche Aspekte als auch die Erhöhung der Streckenkapazität von Bedeutung. Der hier gewählte Schwerpunkt liegt dabei auf den erstgenannten ökonomischen Aspekten.

Begleitend zur Entwicklung der fahrzeugseitigen Zugintegritätslösungen wurde ein Ausblick auf die OTI-Technologiemigration vorgenommen. Ziel war es, optimierte Migrationspfade, also die Reihenfolge der Umrüstung von Zügen mit OTI im Zuge der flächendeckenden Einführung dieser Technologie, zu ermitteln. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die wirtschaftliche Analyse verschiedener OTI-Migrationsszenarien mit dem Ziel der Kostenminimierung.

Da der volle Nutzen von OTI sich erst im breiteren Kontext der Einführung von ETCS L3 in Europa zeigt, ist es wichtig, die OTI-Migration im Zusammenhang mit der gesamten Entwicklung des Bahnsystems zu betrachten. Dabei wird die Weiterentwicklung gleichzeitiger Migrationsprozesse und Rahmenbedingungen berücksichtigt, wie z. B. die Migration der herkömmlichen Zugsicherungssysteme (Class B) zum europäischen Zugsicherungssystem ETCS, die Umstellung auf digitale automatische Kupplungen (DAK) oder das zukünftige

The development of on-board train integrity (OTI) solutions within the X2Rail-4 project under Shift2Rail (S2R) is accompanied with an outlook on the migration strategies for the rollout. The optimisation criterion for the migration has been defined as the potential savings achieved by dismantling those infrastructure elements that become obsolete as a result of OTI. An optimisation model has been developed to determine the rollout order, while an economic analysis has been performed in order to assess the different migration paths.

### 1 The aim and background

The activities within the S2R Joint Undertaking are conducted to support and enhance the deployment of advanced control-command and signalling systems [1]. OTI solutions aimed at safely monitoring train integrity during operations have been proposed within these activities in the two successive X2Rail-2 and X2Rail-4 projects. As an enabling technology for European Train Control System Level 3 (ETCS L3), OTI is expected to contribute to the implementation of train integrity detection and localisation. It is therefore also relevant to the objective of improving track capacity. In addition to its functionality as an enabler, OTI can also contribute to the overall goal of reducing capital and operating expenditure by allowing the reduction of trackside train detection elements. The economic aspects are just as relevant as track capacity improvements for any migration to train integrity technology. The former has been chosen here as the focus.

An outlook for the technological migration of OTI has been undertaken in order to accompany the development of the on-board train integrity solutions. The objective was to identify optimised migration paths, i.e. the order of retrofitting the trains for the rollout of OTI technology. This paper provides an overview of these economic analyses for different OTI migration scenarios with the objective of minimising costs.

As the full benefits of OTI have to be seen within the broader context of the introduction of ETCS L3 in Europe, it is important to place the OTI migration within the context of the railway development and to consider the numerous constraints. The advancement of simultaneous migration processes and framework conditions must be considered, such as the migration from the legacy train control systems to the ETCS, the conversion to the digital automatic coupler (DAC) or the future railway mobile communication system (FRMCS) [2, 3, 4, 5].

tige Bahn-Kommunikationssystem Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) ([2, 3, 4, 5]).

## 2 Methodischer Rahmen

### 2.1 OTI-Produktklassen

Um die Funktionalität der Zugvollständigkeitskontrolle von der Strecke auf den Zug zu verlagern, wurden in X2Rail-2 und X2Rail-4 drei unterschiedliche OTI-Lösungen (sog. Produktklassen) entwickelt.

Diese Produktklassen definieren die verschiedenen Versionen der OTI-Funktionalität entsprechend der Technologieanforderungen der einzelnen Zuggattungen. Im Einzelnen wird eine Unterscheidung zwischen der Art der Kommunikationstechnologie, der jeweiligen Energieversorgung, der Art der Odometrie sowie der OTI-Architektur selbst vorgenommen.

Die erste Produktklasse ist für feste Zugkompositionen mit einem drahtgebundenen Kommunikationsnetz konzipiert. Die Integrität wird auf Grundlage der Kommunikation zwischen der Zugspitze und dem Ende des Zuges überwacht. Bei Produktklasse 2 wird die Zugintegrität auf Basis des Vergleichs kinematischer Daten von Zugspitze und Zugende (z. B. der kohärenten Bewegung des Zuges im Verhältnis zum Führerstand) erkannt. Die Zugvollständigkeitsüberwachung für Produktklasse 3 findet über wagenspezifische Sensorik statt. Die Vollständigkeit des Zuges wird durch Überprüfung der Kommunikation sowie durch Überwachung des Abstands zwischen benachbarten Wagen überwacht [6].

Die Produktklasse 1 eignet sich für Personenzüge mit fester Zusammensetzung mit durchgängiger Datenleitung sowie für Ganzzüge im Güterverkehr, wenn eine drahtgebundene Kommunikation durch Innovationen wie bspw. einer DAK verfügbar ist. Im Gegensatz dazu haben Einzelwagenzüge eine wechselnde Zusammensetzung und werden daher mit Produktklasse 3 ausgestattet. Produktklasse 2 kann ebenfalls für wechselnde Zugkompositionen ohne drahtgebundene Kommunikation implementiert werden.

Da der Schwerpunkt der Studie auf der Optimierung der Gesamtsystemkosten verschiedener Migrationsszenarien mit gemischtem Verkehr liegt, werden die Zuggattungen den oben genannten OTI-Produktklassen zugeordnet.

### 2.2 Szenariodefinition

Die Umrüstung aller Züge in einer ausgewählten Fallstudie erstreckt sich über einen längeren Zeitraum. Daher werden zwei Szenarien mit unterschiedlicher Umrüstungsdauer (sechs bzw. acht Jahre) für alle Züge im Untersuchungsnetz definiert. Die Migrationszeiträume wurden an die regulären Wartungsintervalle der einzelnen Zuggattungen angepasst. Die dafür notwendigen Werkstattkapazitäten wurden als gegeben angenommen. Am Ende eines Migrationszeitraums sind alle Züge mit ihrer jeweiligen OTI-Technologie ausgestattet.

Für die Wartungsintervalle und die damit verbundenen Laufzeiten der Migrationspfade wurden die in Tab. 1 genannten Annahmen getroffen:

Der zweijährige Migrationszeitraum für Hochgeschwindigkeitszüge leitet sich von den deutlich höheren Kilometerleistungen sowie den Sicherheitsanforderungen ab. Zudem verfügen Hochgeschwindigkeitszüge in der Regel bereits über die notwendigen technischen Vo-

	6-Jahre-Migrationsszenario	8-Jahre-Migrationsszenario
HGV	2 Jahre	2 Jahre
Regional	4 Jahre	4 Jahre
Güterverkehr	6 Jahre	8 Jahre

Tab. 1: Umrüstdauer in den Migrationsszenarien

## 2 The methodological framework

### 2.1 OTI product classes

Three OTI solutions referred to as product classes have been developed in X2Rail-2 and X2Rail-4 in order to shift the train integrity functionality from the trackside to the train.

These product classes outline the different versions of the OTI functionality based on the technological specifications from these projects. In specific terms, a distinction has been made between the type of communication technology, the energy supply, the type of odometry and the OTI architecture itself.

The first product class has been designed for fixed train compositions with a wired communication network. The integrity is monitored on the basis of the communications between the head and the tail of the train. Product Class 2 proposes a solution where the integrity is identified based on a comparison of the kinematic data from the head and the tail of the train (e.g. the coherent movement of the end of the train in relation to the leading cab). This solution can be applied to trains without any wired communication. The train integrity supervision for Product Class 3 works with separation detection sensors installed in each wagon. The train integrity is then monitored by checking that the communication is live, as well as by monitoring the distances between the adjoining wagons [6].

Product Class 1 is aimed at fixed-composition passenger trains with a wired communication network or entire freight trains, if wired communication is available through innovations such as equipment with DAC technology. By contrast, single wagon trains have a varying train composition and are therefore equipped with the Product Class 3 solution. Product Class 2 can also be implemented for variable train compositions without any wired communication.

Since the study is focussed on optimising the total system costs for various mixed traffic migration scenarios, the train types have been assigned to the above OTI product classes.

### 2.2 Scenario definition based on migration periods

Retrofitting all the trains in a chosen case study is a time-consuming operation. The length of the migration period for all the trains in the study network is set in two scenarios (six and eight years). It has been assumed that the workshop capacities for retrofitting the trains will be sufficient once the migration path has been decided upon. The migration periods have been defined so as to be synchronous with the regular maintenance intervals of each train category. The necessary workshop capacity has been assumed as given.

The following assumptions (tab. 1) have been made with regard to the maintenance intervals and therefore the runtimes for the migration paths:

All the trains will be equipped with OTI technology after the migration period. The two-year migration period for high-speed trains has been chosen, because this type of train has to be maintained and inspected much more frequently at the depot than other train types (significantly higher mileage, increased safety requirements). High-speed trains usually al-

	6-year migration scenario	8-year migration scenario
High-Speed	2 years	2 years
Regional	4 years	4 years
Freight	6 years	8 years

Tab. 1: Runtimes for migration paths

raussetzungen für OTI, wie etwa einen Zugdaten-Bus. Oft ist daher nur eine Softwareanpassung erforderlich, um die OTI-Funktion nachzurüsten. Ähnliche Voraussetzungen gelten für Regionalzüge, die ebenfalls hohe Laufleistungen aufweisen und daher in kurzen bis mittleren Intervallen gewartet werden.

Im Vergleich zum HGV und Regionalverkehr ist die Ausrüstung des Güterverkehrs mit OTI-Technologie wesentlich komplexer. Das vorgeschriebene Wartungsintervall für europäische Schienenfahrzeuge beträgt sechs Jahre, mit einer optionalen Verlängerung um zwei Jahre [7]. Während HGV- und Regionalzüge häufiger gewartet werden, ist die Situation bei Güterwagen anders. Aufgrund der zum Teil deutlich geringeren Laufleistung werden Güterwagen in der Regel alle sechs bis acht Jahre einer umfassenden Instandhaltung unterzogen.

Zusätzlich zu den oben definierten Szenarien wird ein Referenzszenario betrachtet, um die Kosten der beiden ausgewählten Migrationsszenarien mit dem Status quo ohne OTI-Ausrüstung zu vergleichen. Im Referenzszenario wird angenommen, dass keine OTI-Technologie eingeführt wurde und die Zugvollständigkeitskontrolle weiterhin durch die Infrastrukturanlagen gewährleistet wird.

**2.3 Optimierungsmodell**

Die netzweite Ausrüstung der Züge im Rahmen der OTI-Migration stellt eine komplexe Herausforderung dar, da die Züge regelmäßig unterschiedliche Strecken befahren, die Dichte der Infrastrukturelemente innerhalb des Netzes variiert und eine zeitgleiche Ausrüstung aller Züge in einem Schritt nicht darstellbar ist. Kernfrage der Migration im mathematischen Sinne ist dabei, in welcher Reihenfolge die Züge auszurüsten sind. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer quantitativen Basis der Ausrüstungsstrategien. Es wird zunächst angenommen, dass streckenseitige Infrastrukturelemente erst dann entfernt werden können, wenn alle Züge, die eine bestimmte Strecke befahren, mit OTI ausgerüstet sind. Aufgrund dieser Annahme hängen die Kosteneinsparungen von der vollständigen Zugausrüstung

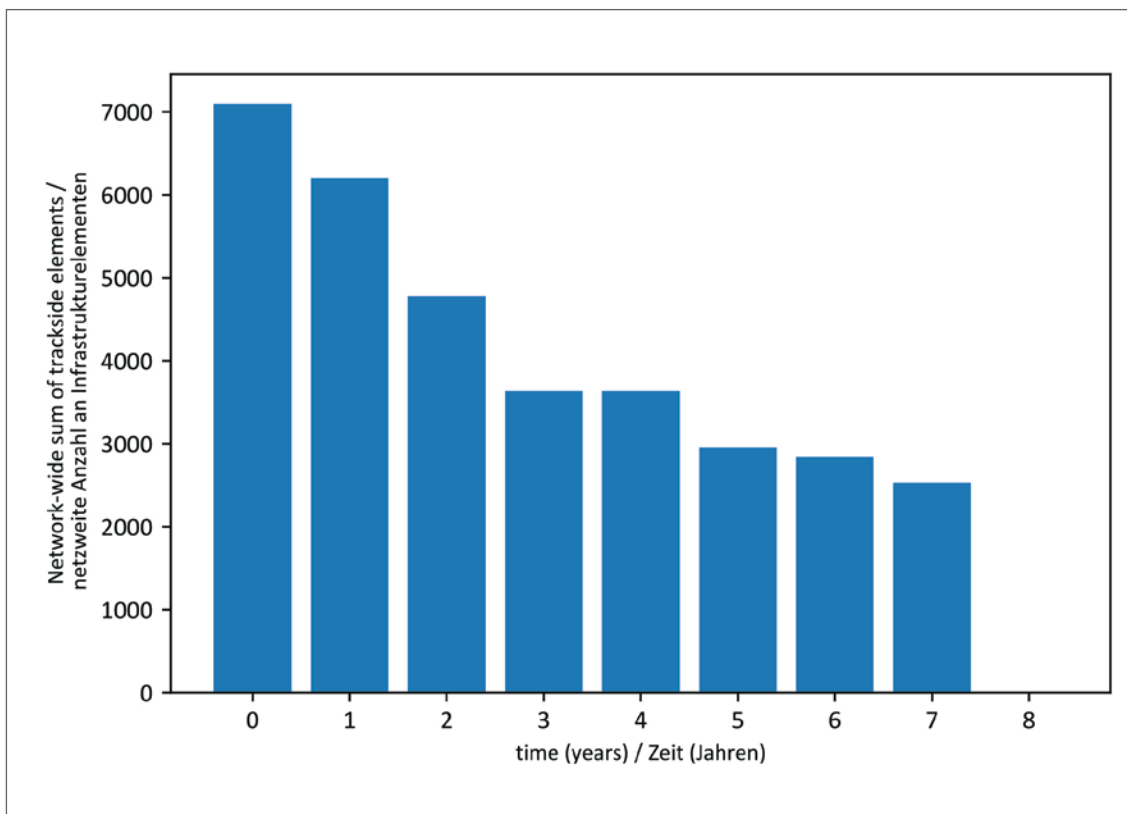
ready have the necessary technical requirements for OTI, such as a train data bus. Often, only a software adaptation is required to retrofit the OTI function. Similar requirements apply to regional trains, which also have a high mileage and are therefore serviced at short to medium intervals.

Equipping freight transport with OTI technology is much more complex when compared to high-speed and regional transport. The mandatory maintenance interval for European railway vehicles is six years, with an optional two-year extension [7]. While high-speed and regional trains are serviced more frequently, the situation with freight wagons is different. Their sometimes significantly lower mileage means that freight wagons are generally inspected every six to eight years for comprehensive maintenance.

In addition to the scenarios defined above, a reference scenario has also been considered in order to compare the costs of the two selected migration scenarios with the status quo. The reference scenario makes the assumption that no OTI technology will be introduced and the train integrity will continue to be monitored by the infrastructure assets.

**2.3 The optimisation model**

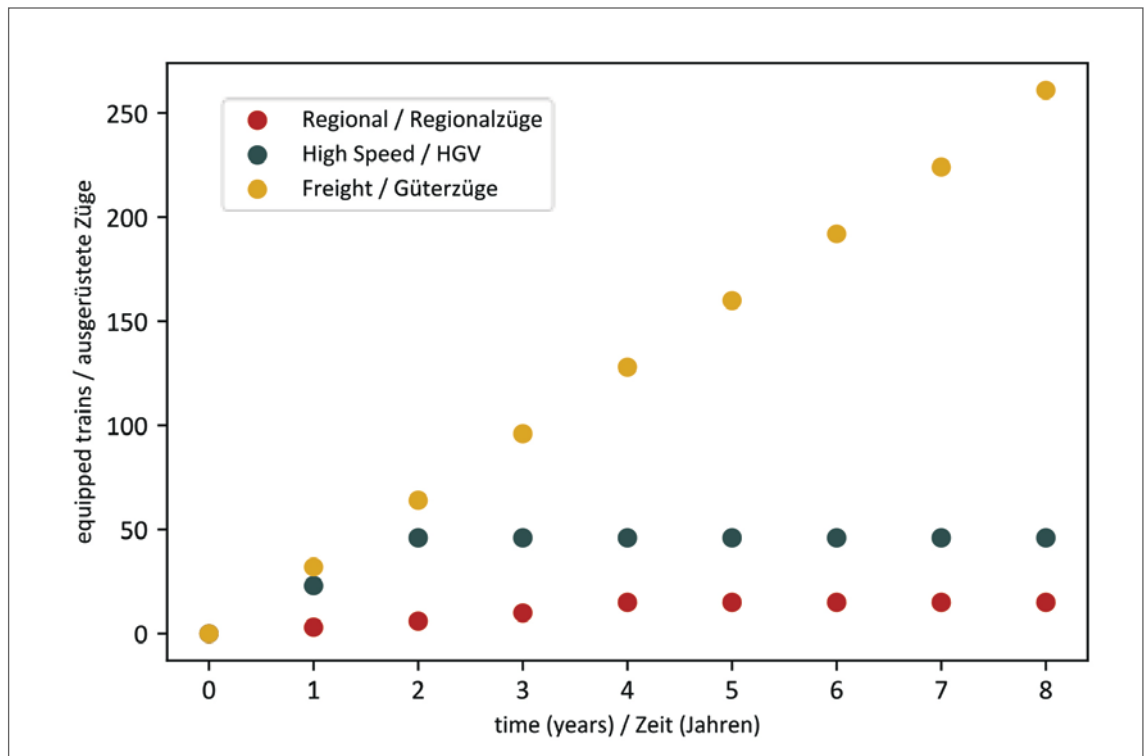
The network-wide retrofitting of trains during the course of the OTI migration constitutes a very complex undertaking, as the trains have different routes that they regularly take, the density of the infrastructure elements varies throughout the network and not all the trains can be equipped at once. Naturally, the question arises as to which trains to equip in which order, thereby pinpointing the need for a quantitative basis for the retrofitting strategies. In an economic context, the cost savings depend on a full train retrofit, while assuming that the trackside infrastructure elements can be removed once all the trains serving a certain line have been equipped with OTI.



**Bild 1: Netzweite Anzahl an Infrastrukturelementen**  
 Fig. 1: The development of the trackside elements across the network

### Bild 2: Entwicklung der OTI-Ausrüstung für jeden Zugtyp

Fig. 2: The development of the OTI equipment for each train type



ab. Dieser Zusammenhang lässt sich mithilfe eines Optimierungsproblems quantitativ formulieren:

In einem Netz,

- in dem Züge einen bestimmten Streckenverlauf haben,
- eine bestimmte Anzahl von Zügen pro Zeitspanne ausgerüstet werden kann und
- die Streckenabschnitte des Netzes eine bestimmte Anzahl von Infrastrukturelementen aufweisen, die potenziell entfernt werden können,

ergeben sich Kosteneinsparungen, wenn alle auf einer Strecke verkehrenden Züge mit der jeweiligen Technologie ausgerüstet sind. Diese Kosteneinsparungen sollten vorzugsweise so früh wie möglich eintreten, was die Zielfunktion des Problems definiert.

Ein Netz von der Größe und topologischen Struktur eines mittelgroßen europäischen Landes mit gemischtem Verkehr (hier: Österreich) wurde als Fallstudie definiert. Damit soll eine größtmögliche Übertragbarkeit der entwickelten Methodik auf reale Szenarien sichergestellt werden, abhängig von den jeweiligen Eingangsdaten, bspw. dem Betriebsprogramm und den Infrastrukturdaten. Folglich beziehen sich die analysierten streckenseitigen Elemente hauptsächlich auf Achszähler, wie sie in Europa üblich sind.

Bild 1 zeigt die Entwicklung der netzweiten Summe der Infrastrukturelemente für die Fallstudie wie oben beschrieben:

Während zu Beginn der Migration ( $t = 0$ ) die gesamte Anzahl der streckenseitigen Infrastrukturelemente (7096) im Netz vorhanden ist, sind nach acht Jahren alle Komponenten entfernt worden. Dazwischen werden von Jahr zu Jahr Züge mit OTI ausgerüstet. Wenn alle Züge, die über eine Kante fahren, ausgerüstet sind, können Infrastrukturelemente von dieser Kante entfernt werden. Bild 1 zeigt hohe Rückbauzeiten in den ersten Jahren, da eine höhere Gesamtzahl von Zügen (sowohl Personen- als auch Güterzüge) ausgerüstet wird.

Bild 2 zeigt, dass alle Hochgeschwindigkeitszüge bereits nach zwei Jahren und die Regionalzüge nach vier Jahren vollständig ausgerüstet sind. Die Ausrüstung von Ganzzügen im Güterverkehr dau-

This correlation can be formulated quantitatively by means of an optimisation problem: in a network where

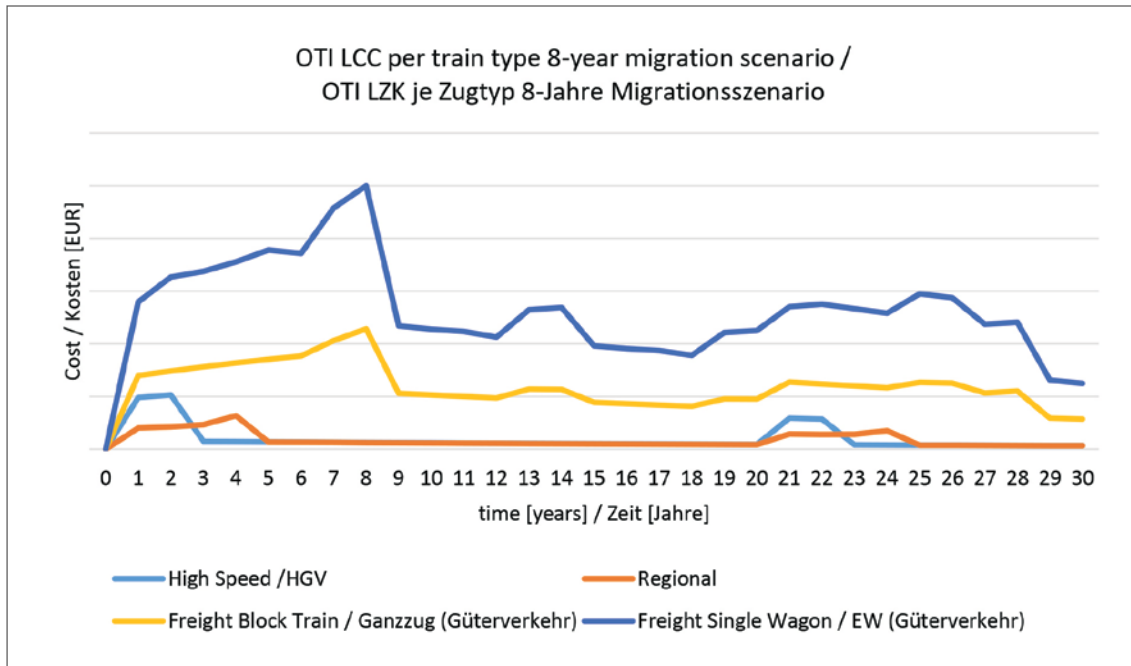
- trains have distinct routes,
  - a certain number of trains can be equipped per timespan and
  - the edges of the network have a distinct number of trackside elements that can potentially be removed,
- cost savings arise once all the trains running on a line have been equipped with the given technology. These cost savings should preferably occur as early as possible, as they define the objective function of the problem.

A network of the size and topological structure of a mid-size European country with mixed-traffic operations (in this case Austria) was defined as a case study. This aims to maximise the transferability of the developed methodology to real-world scenarios, depending on the input data, e.g. the operating program and the infrastructure data. Consequently, the analysed trackside elements mostly refer to axle counters, as they are common in Europe.

Fig. 1 shows the development of the network-wide sum of infrastructure elements for the case study described above:

It can be seen that in year  $t = 0$  the network still has the total amount of trackside elements (7,096), while all of them have been removed by year 8. The trains are equipped with OTI from year to year and, if all the trains passing over one edge have been equipped, the infrastructure elements can be removed from it. Fig 1 shows high removal rates in the initial years, as a higher total number of trains (passenger as well as freight trains) have been equipped.

Fig. 2 shows that all the high-speed trains will be fully equipped by year 2, while all the regional trains will be equipped by year 4. The equipping of complete freight trains will take the full six or eight years respectively. An in-depth insight into the optimisation modelling and a comparison with heuristic methods can be found in [8].



**Bild 3: OTI LZK je Zuggattung 8-Jahre-Migrationsszenario**  
 Fig. 3: The OTI LCC per train type in the 8-year migration scenario

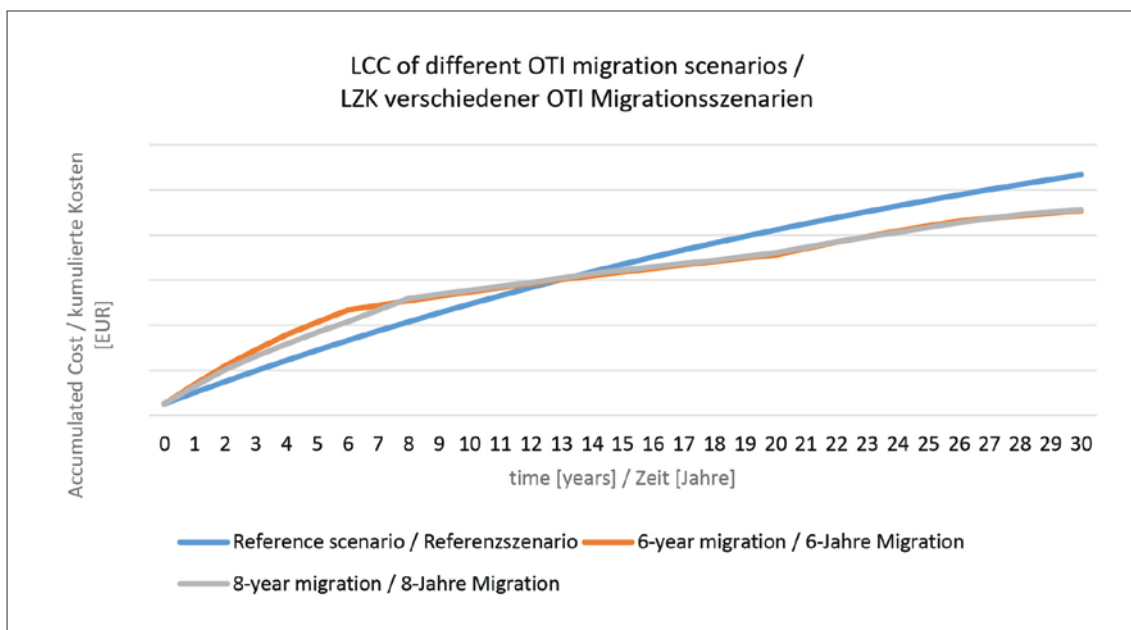
ert volle sechs bzw. acht Jahre. Ein vertiefter Einblick in die Optimierungsmodellierung und ein Vergleich mit heuristischen Methoden ist in [8] zu finden.

**3 Wirtschaftlichkeitsanalyse**

Für die wirtschaftliche Analyse werden Werte für die Lebensdauer sowie die Investitionen (CapEx) und Betriebskosten (OpEx) der Produktklassen benötigt. Da die Kosten auf den Zeitpunkt t = 0 diskontiert werden, wird ein Wert für den kalkulatorischen Zinssatz angenommen. Die Anzahl der Führerstände und die Länge der Personenzüge sowie die Anzahl der Güterwagen werden berücksichtigt. Aus dem Optimierungsmodell werden die Daten über die Zeit für die Umrüstung der Züge und die Demontage der Streckenelemente verwendet.

**3 The economic analysis**

Any economic analysis requires the values for the life span and the capital (CapEx) and operating costs (OpEx) of the product classes. Since the costs are discounted to the time t = 0, a value for the calculation interest rate has been assumed. The number of driver cabins, the length of the passenger trains and the number of freight wagons have been considered. The data from the optimisation model about the time required to equip the trains and dismantle the trackside elements has been used. The lifecycle cost (LCC) analysis has been performed for the retrofit of each train type over the course of the respective maintenance cycle. Fig. 3 shows the costs per year for each train type for the 8-year migration scenario. The figure illustrates the initial capital costs for retrofitting the different train



**Bild 4: LZK für die verschiedenen OTI Migrationsszenarien**  
 Fig. 4: The LCC for different OTI migration scenarios

Die Analyse der Lebenszykluskosten (LZK) wird im Laufe des jeweiligen Wartungszyklus für die Umrüstung jeder Zuggattung durchgeführt. Bild 3 zeigt die Kosten pro Jahr für jede Zuggattung am Beispiel des 8-Jahres-Migrationszenarios.

Bild 3 veranschaulicht die anfänglichen Investitionen für die Umrüstung der verschiedenen Zuggattungen und die jährlichen Betriebskosten. Reinvestitionen fallen bei den Personenzügen erst nach 20 Jahren an. Bei den Güterzügen gibt es jedoch OTI-Komponenten mit einer kürzeren Lebensdauer von sechs Jahren und somit Reinvestitionen, die früher anfallen.

### 3.1 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Analyse wurde für drei Szenarien durchgeführt, zwei verschiedene Migrationspfade und das Referenzszenario. Im Referenzszenario werden keine Investitionen für OTI getätigt, und der Status quo auf der Infrastrukturseite wird beibehalten. Bild 4 zeigt die kumulierten LZK der Szenarien über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren.

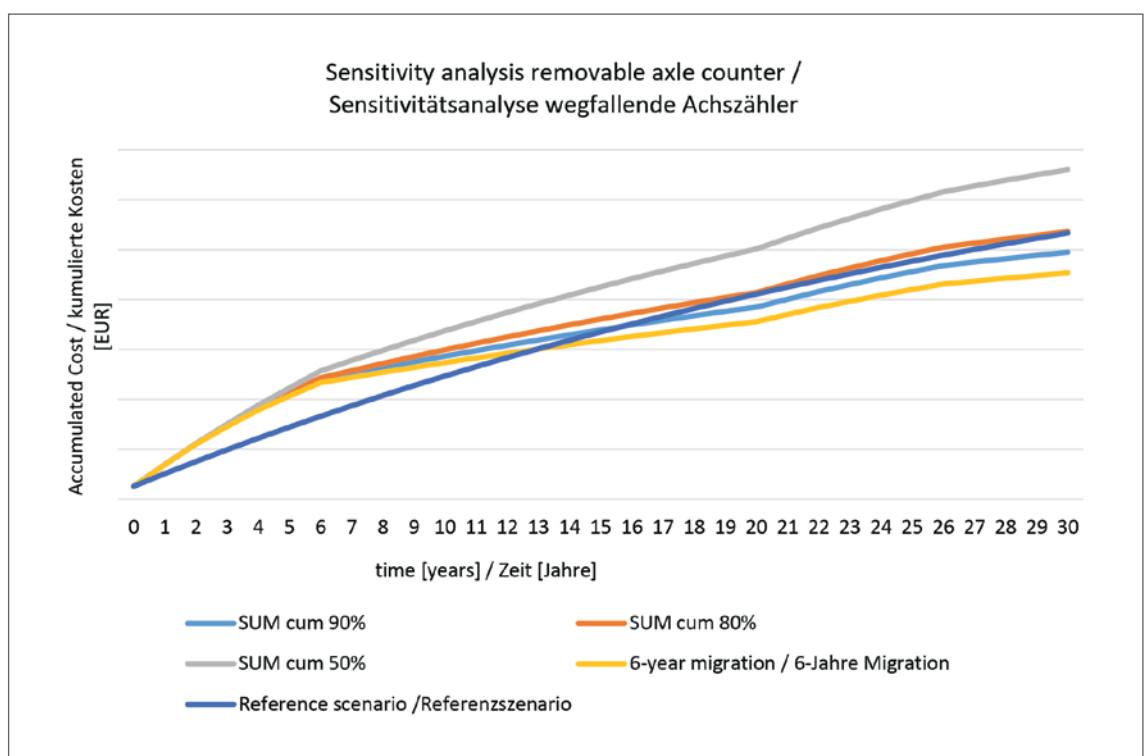
Es wird deutlich, dass die Investitionen in die OTI-Technologie nach etwa 13 Jahren durch die Kostensenkung aufgrund des Wegfalls der Reinvestitionen und der Betriebskosten für die streckenseitige Infrastruktur kompensiert werden (Break-even).

Bild 4 zeigt auch, dass die Kosten für das 6-Jahres-Migrationszenario zu Beginn am höchsten sind, da die Investitionen für die Umrüstung der Züge mit OTI in der kürzesten möglichen Zeit getätigt werden müssen. Durch die Ausrüstung der Züge über einen kurzen Zeitraum können jedoch auch die streckenseitigen Komponenten frühzeitig reduziert werden, sodass die Kosteneinsparungen in diesem Szenario früher als in den anderen Szenarien eintreten.

Nach 30 Jahren sind die kumulierten diskontierten Kosten der beiden Migrationsszenarien um 15 % niedriger als im Referenzszenario. Zwischen den LZK des sechsjährigen und des achtjährigen Migrationsszenarios besteht kein wesentlicher Unterschied (< 1 %).

#### Bild 5: Sensitivitätsanalyse zum Anteil wegfallender Achszähler (6-Jahres-Migrationszenario)

Fig. 5: The sensitivity analysis for different shares of removed trackside elements (the 6-year migration scenario)



types and the annual operating costs. Reinvestment is only incurred after 20 years in the case of the passenger trains. However, freight trains have OTI components with a shorter life span of six years and reinvestment therefore occurs earlier.

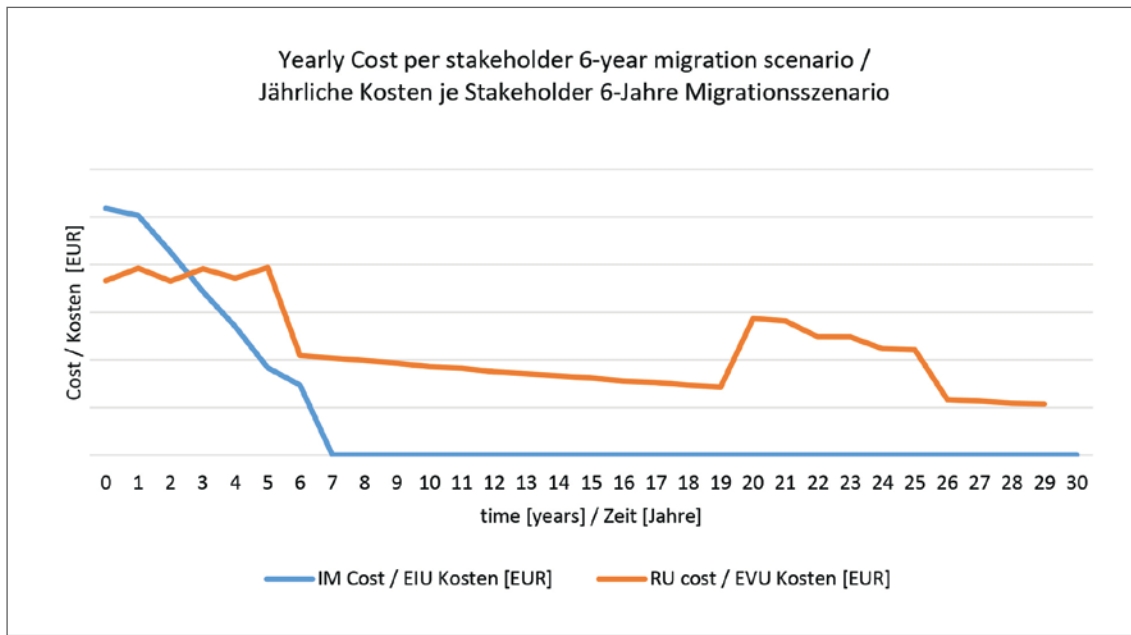
### 3.1 The results of the economic analysis

The analysis has been carried out for three scenarios, two different migration paths and the reference scenario. No investments in OTI are made in the reference scenario and the infrastructure-side status quo is maintained. Fig. 4 shows the cumulative life cycle costs (LCC) of the scenarios over an observation period of 30 years. It is clear that the investments in the OTI technology are compensated after about 13 years by the cost reduction due to the elimination of reinvestments and operating costs for the trackside infrastructure (break-even). Fig. 4 shows that the costs for the 6-year migration scenario are naturally highest at the beginning, as the investments for retrofitting the trains with OTI have to be made in the shortest possible time. However, equipping the trains over a shorter period of time means that the trackside elements can also be reduced early on. As such, the cost savings in this scenario would occur earlier than in the other scenarios.

After 30 years, the cumulative discounted costs of the two migration scenarios are 15 % lower than in the reference scenario. There is not much difference (< 1 %) between the LCC of the 6-year and 8-year migration scenarios.

### 3.2 Sensitivity analysis

Each infrastructure manager (IM) has to determine the number of trackside elements to be kept on the infrastructure, e.g. in the case of having to operate in fall-back mode. A sensitivity analysis has been performed for the number of trackside elements to be removed using the 6-year migration scenario as an example. The break-even for removing 100 % of the trackside



**Bild 6: Jährliche Kosten je Stakeholder – 6-Jahre-Migrations-szenario**  
 Fig. 6: The yearly costs per stakeholder – the 6-year migration scenario

**3.2 Sensitivitätsanalyse**

Der Eisenbahninfrastrukturbetreiber (EIU) legt eine Anzahl streckenseitiger Komponenten fest, die auf der Infrastruktur verbleiben sollen, z. B. für den Betrieb im Rückfallmodus. Es wurde eine Sensitivitätsanalyse für die Anzahl der zu entfernenden streckenseitigen Komponenten durchgeführt, wobei das 6-Jahres-Migrationsszenario als Beispiel dient.

Der Break-even für die Entfernung von 100 % der streckenseitigen Elemente wird bereits nach ~13 Jahren erreicht (Bild 5). Unter Kostengesichtspunkten wird die Migration der Technologie nach 13 Jahren günstiger als die Aufrechterhaltung des Status quo. Wenn 90 % bzw. 80 % der streckenseitigen Elemente entfernt werden, liegen der Break-even bei 16 bzw. 30 Jahren. Für 50 % der verbleibenden streckenseitigen Komponenten gibt es keine Rentabilitätsschwelle.

**3.3 Stakeholderanalyse**

Die Umrüstung von Zügen mit OTI verursacht Investitionen und Betriebskosten für Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und Wagenhalter. Das Entfernen von streckenseitigen Komponenten reduziert die LZK für das Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU). Die Kosten fallen also nicht für denselben Stakeholder an. Daher muss ein Ansatz gefunden werden, um dies auszugleichen, was jedoch nicht Bestandteil der hier durchgeführten Untersuchung war. Die durchgeführte Stakeholder-Analyse berechnet und visualisiert die LZK für jeden Stakeholder.

Im 6-Jahres-Migrationsszenario übersteigen die jährlichen Kosten für das EVU/den Wagenhalter die Kosten für das EIU nach drei Jahren (Bild 6). Die kumulierten Kosten des EVU übersteigen die des EIU in diesem Szenario jedoch erst nach sechs Jahren, d. h. unmittelbar nach der vollständigen Migration.

Bild 7 zeigt die kumulierten jährlichen Kosten der beiden Szenarien für jeden Stakeholder. Sie veranschaulicht den Unterschied zwischen den Migrationspfaden für die Beteiligten. Für das EVU/den Wagenhalter sind die kumulierten Kosten im 6-Jahres-Migrationsszenario höher. Daher ist es vorteilhaft, wenn die Migration später abgeschlossen wird. Die kumulierten Kosten für das EIU sind im 8-Jahres-Szenario höher, wenn die streckenseitigen Komponenten länger am Gleis verbleiben und gewartet werden

elements occurs after ~13 years (fig. 5). From a cost perspective, technology migration becomes cheaper than maintaining the status quo after 13 years. If 90 % or 80 % of the trackside elements are removed, the break-even point occurs after 16 or 30 years respectively. There is no break-even point for 50 % of the trackside elements remaining.

**3.3 Stakeholder analysis**

Retrofitting trains with OTI gives rise to CapEx and OpEX for railway undertakings (RU) and wagon keepers. Removing the trackside elements reduces the LCC for the IM. The costs therefore do not accrue for the same stakeholder. As such, a way has to be found to resolve this situation, albeit that this was not one of the tasks included in this investigation. The conducted stakeholder analysis has calculated and visualised the LCC for each stakeholder. In the 6-year migration scenario, the yearly costs for the RU/wagon keeper exceed the costs for the IM after three years (fig. 6). However, the accumulated costs of the RU exceed those of the IM in this scenario only after six years, i.e. immediately after full migration.

Fig. 7 shows the accumulated yearly costs of the two scenarios for each stakeholder. It illustrates quite well the differences between the migration paths for the stakeholders. The accumulated costs are higher for the RU/wagon keeper in the 6-year migration scenario. It is advantageous for RU/wagon keeper if the migration is completed later. The accumulated costs for the IM are higher in the 8-year scenario if the trackside elements remain on the track and require longer maintenance. However, the difference between these two scenarios is marginal at less than 1 % (fig. 4).

**4 Conclusion**

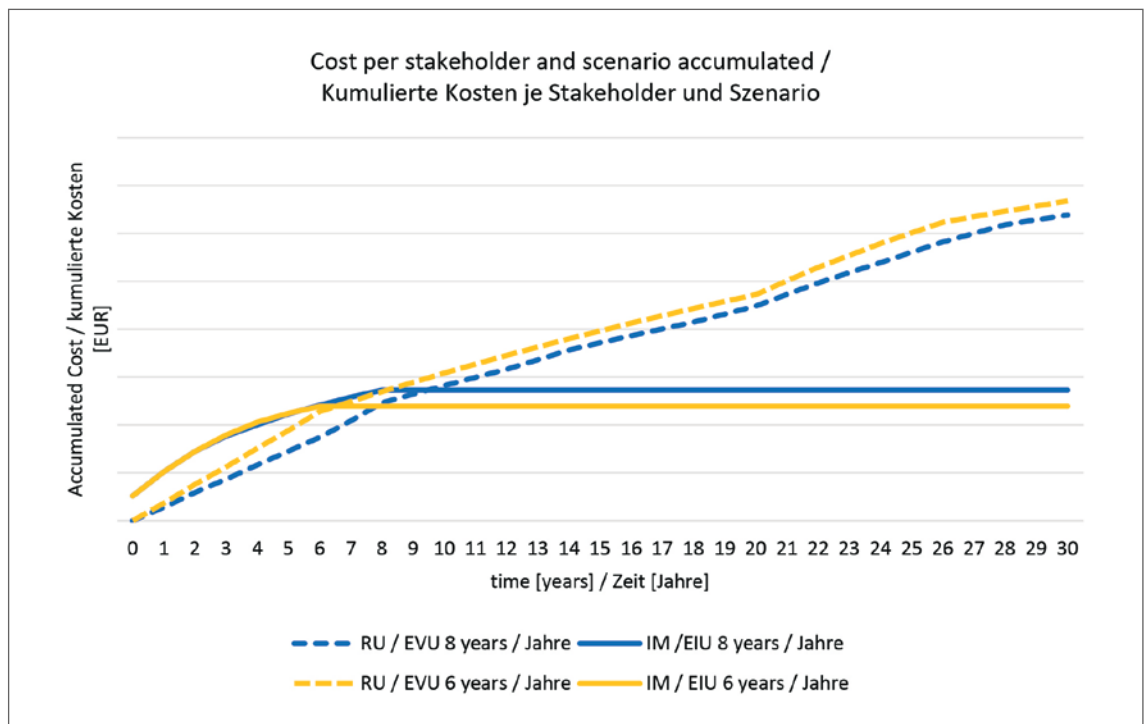
The aim of the analysis of the migration scenarios for the three OTI product classes developed in Shift2Rail was to explore the conditions for a rollout and the opportunities for optimisation.

The optimisation criterion for the migration was defined as potential savings achieved by dismantling and ceasing to op-

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. /  
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten  
 genehmigt / © DW Media Group GmbH

### Bild 7: Kumulierte Kosten je Stakeholder und Szenario

Fig. 7: The accumulated costs per stakeholder and scenario



müssen. Der Unterschied zwischen diesen beiden Szenarien ist jedoch mit weniger als 1 % marginal (Bild 4).

#### 4 Fazit

Ziel der Analyse der Migrationsszenarien für die drei in Shift2Rail entwickelten OTI-Produktklassen war es, die Bedingungen für eine Einführung und die Möglichkeiten zur Optimierung zu untersuchen.

Als Optimierungskriterium für die Migration werden die potenziellen Einsparungen durch den Rückbau von Infrastrukturelementen und deren Betriebskosten definiert, die durch OTI obsolet werden. Die Anzahl der auszurüstenden Züge und die Anzahl der rückzubauenen streckenseitigen Elemente ist in allen Szenarien gleich. Die Reihenfolge, in der die Züge ausgerüstet werden, kann jedoch optimiert werden, sodass die Einsparungen durch die wegfallenden Betriebs- und Wartungskosten dieser Infrastrukturelemente möglichst früh eintreten. Wenn die Züge zum richtigen Zeitpunkt und in der richtigen Reihenfolge mit OTI ausgerüstet werden, können Abschnitte des Netzes folglich so früh wie möglich ohne streckenseitige Komponenten genutzt werden, ohne das Betriebsprogramm einzuschränken. Kostenvorteile für den Infrastrukturbetreiber sind dabei an die Optimierung der Reihenfolge der Ausrüstung der Züge geknüpft, da Kosten für Wartung, Reparatur oder Reinvestition für obsolete Infrastrukturelemente nicht mehr anfallen. Dies ist besonders effektiv für Netzabschnitte mit geringer Verkehrsdichte und einer hohen Anzahl von Infrastrukturelementen. Auf der Investitionsseite stehen die Kosten für die Ausrüstung der Züge, die von den Wagenhaltern getragen werden müssen. Davon ausgehend, müssen aufgrund der wirtschaftlichen Verschiebungen zwischen Infrastrukturbetreibern und Wagenhaltern innerhalb des Gesamtsystems Ausgleichsmechanismen definiert werden, um die von der einen Seite zu tragenden Kosten und die von der anderen Seite eingesparten Kosten auszugleichen. Auf diese Weise kann ein Effizienzgewinn für das gesamte Eisenbahnsystem erzielt werden.

erate those infrastructure elements that will become obsolete as a result of OTI. The number of trains to be equipped and the number of trackside elements to be retrofitted is the same in all scenarios, but the order in which the trains are equipped can be optimised, so that the savings from the eliminated operating and maintenance costs for these infrastructure elements may occur earlier or later. If the trains are equipped with OTI at the right time and in the right order, sections of the network can be operated without any trackside elements as early as possible without restricting the operating program. The cost advantages for the IM are bound to the optimisation of the order for equipping the trains, because the maintenance, repair or reinvestment costs for these infrastructure elements will no longer occur. This is particularly effective for parts of the network with a low density of traffic and a high number of infrastructure elements.

The investment side involves the costs for equipping the trains, which have to be met by the wagon keepers. Balancing mechanisms must therefore be defined within the ecosystem in order to compensate for the costs paid by one party and those saved by another party based on the economic shifts between the infrastructure managers and the wagon keepers. In this way, an efficiency gain can be achieved for the entire railway system.

A new optimisation model has been methodologically developed within this project in order to consider the optimisation criterion and the defined constraints. It prototypically performs a mathematical optimisation of the possible migration paths across a generic, yet close to reality network and operating program. The results have shown the potential of an optimisation approach under the given input parameters.

The illustrated methodology can potentially be applied to larger and more complex use cases even closer to real-world operations depending on the availability and quality of the data as well as the computational resources. Given that the proposed approach has determined optimised migration strategies us-



Methodisch wurde in diesem Projekt ein neues Optimierungsmo-  
dell entwickelt, um das Optimierungskriterium und die definierten  
Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Es führt prototypisch  
eine mathematische Optimierung der möglichen Migrationspfade  
in einem generischen, aber realitätsnahen Netz und Betriebspro-  
gramm durch. Die Ergebnisse zeigen das Potenzial des Optimie-  
rungsansatzes unter den gegebenen Eingangsparametern.  
Abhängig von der Datenverfügbarkeit und -qualität sowie der Re-  
chenkapazität kann die vorgestellte Methodik auch auf größere  
und komplexere Anwendungsfälle angewendet werden, die noch  
näher an der Realität liegen. Da der vorgeschlagene Ansatz mittels  
eines übertragbaren Rechenmodells optimierte Migrationsstrate-  
gien ermittelt, stellt er eine funktionale und dennoch flexible Basis  
für zukünftige Forschungen dar, mit dem Ziel, die zugrundeliegen-  
de Toolkette weiter auszubauen. ■

#### Danksagung

Dieses Projekt wurde vom Joint Undertaking (JU) Shift2Rail im Rah-  
men der Finanzhilfvereinbarung Nr. 881806 finanziert. Das JU er-  
hält Unterstützung aus dem Forschungs- und Innovationspro-  
gramm Horizont 2020 der Europäischen Union und von den Shift-  
2Rail-Mitgliedern außerhalb der Union.



Horizon 2020  
European Union Funding  
for Research & Innovation

#### LITERATUR | LITERATURE

- [1] Shift2Rail, "Shift2Rail Multi-Annual Action Plan (MAAP)", 2015. [Online]. Available: <https://shift2rail.org/publications/multi-annual-action-plan/>
- [2] Behrens, M.; Caspar, M.; Distler, A.; Fries, N.; Hardel, S.; Kreßner, J.; Lau, K.-Y.; Pensold, R.: "Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität", DER EISENBANINGENIEUR 6/2021, pp. 50-55
- [3] Lachhove, C.: "Methode zur Optimierung der Migration von ETCS, Dissertation", 2013. [Online]. Available: [https://elib.dlr.de/90003/1/Dissertation\\_Christoph\\_Lachhove.pdf](https://elib.dlr.de/90003/1/Dissertation_Christoph_Lachhove.pdf)
- [4] DAC4EU, "Digital Automatic Coupling in Rail Freight Traffic", [Online]. Available: <https://www.dac4.eu/en/> [Accessed 2022]
- [5] EDDP, "European DAC Delivery Programme", [Online]. Available: <https://rail-research.europa.eu/eddp-news/> [Accessed 2022]
- [6] X2Rail-2, "D.4.2: Functional architecture & Interfaces specifications & Candidate technologies selection", 2020
- [7] Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO), "§ 32 Abnahme und Untersuchung der Fahrzeuge", 2022. [Online]. Available: [https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/\\_32.html](https://www.gesetze-im-internet.de/ebo/_32.html)
- [8] Geischberger, J.; Isberner, A.; Weik, N.: "Optimizing rollout strategies for migration to moving block signaling – a MINLP-based approach for on-board train integrity monitoring technology", RailBelgrade 2023 – the 10th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA), 25 4 2023

ing a transferrable computational model, it presents a func-  
tional yet flexible basis for future research seeking to further  
narrow the gap to real word circumstances by consistently op-  
timising and refining the underlying tool chain. ■

#### Acknowledgement

This project has received funding from the Shift2Rail Joint Un-  
dertaking (JU) under grant agreement No 881806. The JU re-  
ceives support from the European Union's Horizon 2020 re-  
search and innovation programme and the Shift2Rail JU mem-  
bers other than the Union.

#### AUTOREN | AUTHORS

##### Alessa Isberner, M.Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiterin Design und Bewertung von Mobilitäts-  
lösungen / *Research associate Evaluation of Transportation*  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / *German Aerospace Center*  
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*  
Anschrift / *Address*: Rutherfordstraße 2, D-12489 Berlin  
E-Mail: [alessa.isberner@dlr.de](mailto:alessa.isberner@dlr.de)

##### Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benedikt Scheier, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Design und Bewertung von Mobilitäts-  
lösungen / *Research associate Evaluation of Transportation*  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / *German Aerospace Center*  
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*  
Anschrift / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [benedikt.scheier@dlr.de](mailto:benedikt.scheier@dlr.de)

##### Jakob Geischberger, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Design und Bewertung von Mobilitäts-  
lösungen / *Research associate Evaluation of Transportation*  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / *German Aerospace Center*  
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*  
Anschrift / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [jakob.geischberger@dlr.de](mailto:jakob.geischberger@dlr.de)

##### Michael Mönsters, M.Sc.

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Design und Bewertung von Mobilitäts-  
lösungen / *Research associate Evaluation of Transportation*  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / *German Aerospace Center*  
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*  
Anschrift / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [michael.moensters@dlr.de](mailto:michael.moensters@dlr.de)

##### Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Florian Brinkmann

Gruppenleiter Design und Impact Assessment /  
*Team Leader Design and Impact Assessment*  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. / *German Aerospace Center*  
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*  
Anschrift / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig  
E-Mail: [florian.brinkmann@dlr.de](mailto:florian.brinkmann@dlr.de)