

# Teleoperierte Triebfahrzeugführung als Rückfallebene der Hochautomation

## Teleoperation as a fallback solution for highly automated rail traffic

Jan Gripenkoven | Christian Meirich | Michael Roth | Mirko Caspar | Hardi Hungar

Der Eisenbahnbetrieb der Zukunft soll hochautomatisiert und digital sein, darin herrscht unter Betreibern und Fachleuten weitestgehend Einigkeit. Was diese Begrifflichkeiten in der Praxis tatsächlich implizieren, muss je nach Anwendungsfalls systematisch betrachtet werden. Am Beispiel einer Zugfahrt in einem Szenario ohne Lokomotivführer im Führerstand (Grade of Automation (GoA) 3–4 [1]) lassen sich eine Vielzahl an Fragestellungen identifizieren, die zu berücksichtigen sind, bevor diese Vorstellung im Regelbetrieb auch in nicht geschlossenen Bahnsystemen Realität werden kann. Im Folgenden werden relevante Handlungsfelder für Forschung und Praxis dargestellt.

### 1 Einleitung

Im In- und Ausland wurden in der jüngeren Vergangenheit bereits erste Testfahrten mit hochautomatisierten Eisenbahnen durchgeführt. Der ferngesteuerte Laborzug „Lucy“ wurde im Jahr 2019 im Erzgebirge testweise in Betrieb genommen und erfolgreich über ein 5G Mobilfunknetz ferngesteuert [2]. Die Niederländische Eisenbahn (Nederlandse Spoorwegen) ließ kurz danach auf einem Streckenabschnitt zwischen Lelystad und Zwolle einen Personenzug automatisch fahren [3]. Auch die SNCF konnte erfolgreich einen ferngesteuerten Zug zwischen Villeneuve-Saint-Georges und Juvisy testen und misst diesem Testbetrieb eine hohe strategische Bedeutung bei [4]. Bei der Nürnberger U-Bahn wird eine vollautomatische Fahrweise bereits seit Jahren umgesetzt, jedoch in einem geschlossenen Netz, zu dem Unbefugte keinen Zutritt haben [5]. Ein unerlaubter Eingriff in den Bahnbetrieb wird hier sofort detektiert und der Zugbetrieb im betroffenen Abschnitt eingestellt. Diese Versuche illustrieren deutlich das Zielbild des fahrerlosen Eisenbahnbetriebs, zeigen aber auch eine Vielzahl flankierender Fragestellungen auf. Da der Fahrer im gegenwärtigen Bahnbetrieb eine maßgeblich Rolle im Bereich der Entstörung bzw. des Fahrens in der Rückfallebene darstellt, muss vor allem bedacht werden, wie ein Eisenbahnfahrzeug zukünftig in einer nicht planmäßigen Situation zu steuern wäre.

### 2 Heute Lokomotivführer, morgen Remote Train Operator?

Im Falle fahrzeuginterner und -externer Störsituationen ist es plausibel, dass ein hochautomatisiertes Schienenfahrzeug für einen bestimmten Zeitraum als Rückfallebene manuell gesteuert wird. Manuell gesteuert bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass ein geschulter Mitarbeiter eines Eisenbahnverkehrsunternehmens im Schienenfahrzeug die Steuerung übernehmen muss. Manuell ge-

Operators and experts in the rail domain agree that the railway operations of the future should be highly automated and digitalised. What these terms actually imply in practice must be systematically considered depending on the application. Without doubt, a large number of issues need to be considered before this idea can become reality in regular operations in non-closed railway systems. Using the example of a train journey in a scenario without a train driver in the driver's cab (Grade of Automation (GoA) 3–4), a closer analysis has identified the key factors which have to be regarded. Based on this analysis, relevant fields of action for research and practice have been identified and presented in this article.

### 1 Introduction

Initial test runs with highly automated trains have already been conducted in Germany as well as abroad. The remote-controlled laboratory train known as „Lucy“ was operated in the eastern German Region of Erzgebirge in 2019 and successfully remote-controlled via a 5G mobile network [2]. The Dutch Railways (Nederlandse Spoorwegen) successfully operated a GoA 2 passenger train shortly after that on a railway section between Lelystad and Zwolle [3]. The SNCF has also successfully tested a remote-controlled train between Villeneuve-Saint-Georges and Juvisy and has assigned great strategic importance to this test operation [4]. Fully automated subway trains have been a central part of the underground transport in Nuremberg, Germany for years. However, subway operations are carried out in a closed network which cannot be accessed by unauthorised persons [5]. Any unauthorised intrusion in the subway operations will be detected and the operations in the affected section will be stopped. These trials clearly illustrate a trend towards driverless railway operations, but also reveal a variety of accompanying questions. Since the driver in current railway operations plays a crucial role in the management and elimination of any interference, it is important to consider how a railway vehicle would be controlled in fallback situations in the future.

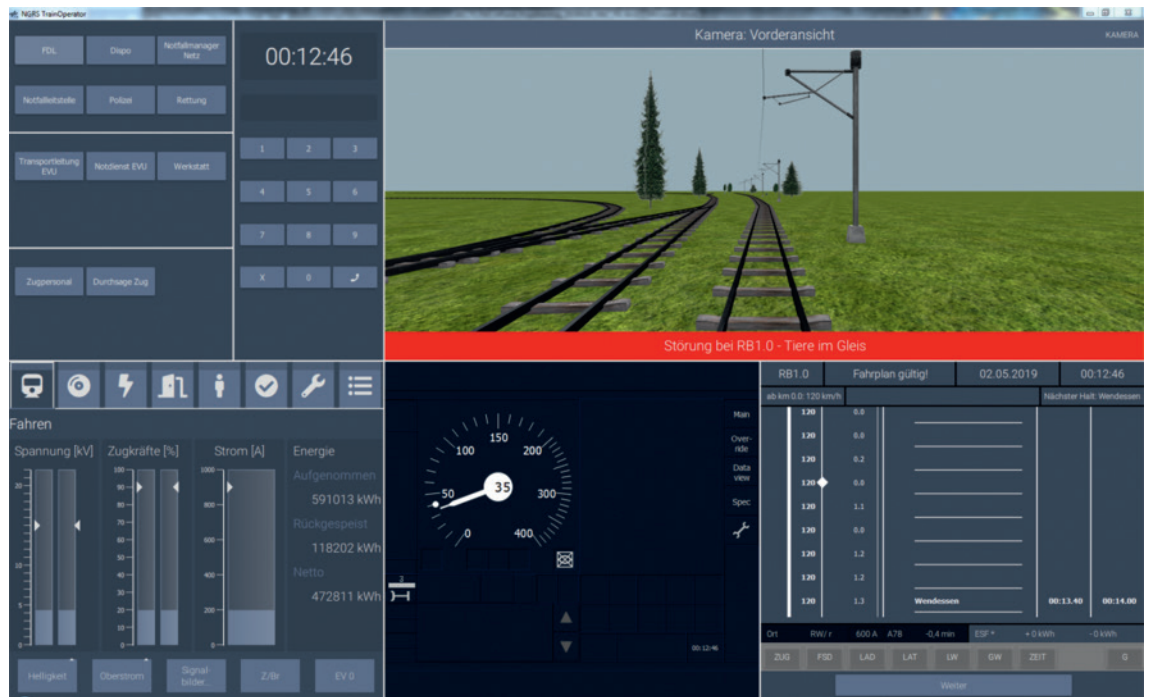
### 2 Train driver today, remote train operator tomorrow?

In the event of an internal vehicle malfunction or external disturbance, it appears plausible that a highly automated rail vehicle would have to be controlled manually for a certain period of time as a fallback solution. However, manually controlled does not necessarily mean that a rail transport company's trained employee has to take over control inside the rail vehicle. Within this context, manually

**Bild 1: Entwurf des Arbeitsplatzes eines Remote Train Operators, der in dem dargestellten virtuellen Szenario die Steuerung übernehmen musste aufgrund von Tieren im Gleis**

Fig. 1: The design of the human machine interface for a Remote Train Operator who has had to take control due to the incursion of animals near the track in a virtual scenario

Quelle / Source: [6]



steuert kann in diesem Zusammenhang auch als teleoperiert gesteuert aufgefasst werden. Dies würde implizieren, dass ein Remote Train Operator [6] aus einer Zentrale heraus den Status automatisierter Zugfahrten überwacht, sie bei Bedarf fernsteuert oder die Fahrzeuge soweit möglich entstört. Dieser steuernde Eingriff sollte nur bei Bedarf stattfinden. Eine durchgehende Fernsteuerung im Betriebsablauf ist weder effizient noch wirtschaftlich umsetzbar. Ein von Brandenburger und Naumann (2019) erarbeitetes Konzept [6, 7] zeigt den Entwurf eines nutzerorientierten Arbeitsplatzes für einen Remote Train Operator im Eisenbahnverkehr und illustriert Ansätze für betriebliche Abläufe der wechselseitigen Übergaben zwischen Remote Train Operator und Automation (Bild 1).

Werden Konzepte des teleoperierten Bahnbetriebs weitergedacht, eröffnen sich eine Vielzahl von Forschungsfragen zur technischen Ausgestaltung, den betrieblichen Implikationen und den sich verändernden Arbeitsabläufen. Dieses Szenario stellt daher einen bedeutenden Forschungsgegenstand der interdisziplinären Bahnforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) dar. In verschiedenen Forschungsprojekten wird durch Forschende unterschiedlicher Fachrichtungen untersucht, welche

- Technologiebausteine für die Fernsteuerung von Schienenfahrzeugen benötigt werden,
- betrieblichen Randbedingungen beachtet werden müssen,
- Anforderungen an Kommunikationssysteme bestehen,
- nutzerzentrierten Anforderungen an einen Remote-Train-Operator-Arbeitsplatz aus Human-Factors-Sicht gestellt werden müssen und
- wie ein derartiges Gesamtsystem künftig zugelassen werden könnte.

In den folgenden Abschnitten werden wesentliche Handlungsfelder auf dem Weg zum hochautomatisierten, teleoperierten Bahnbetrieb auszugswise dargestellt.

### 3 Technologien für die Ortung und Umfelderkennung

Ein zentraler Technologiebaustein zur Realisierung des ferngesteuerten Eisenbahnverkehrs ist die algorithmische Aufarbei-

controlled can also be understood to mean teleoperated. This would imply that a Remote Train Operator who is in charge [6] monitors the status of the automated railway operations from a control room, controls them remotely, if it becomes necessary to do so, and manages any interference. This active intervention should only take place when necessary. Continuous remote control by one remote operator for one train would be neither efficient nor economical.

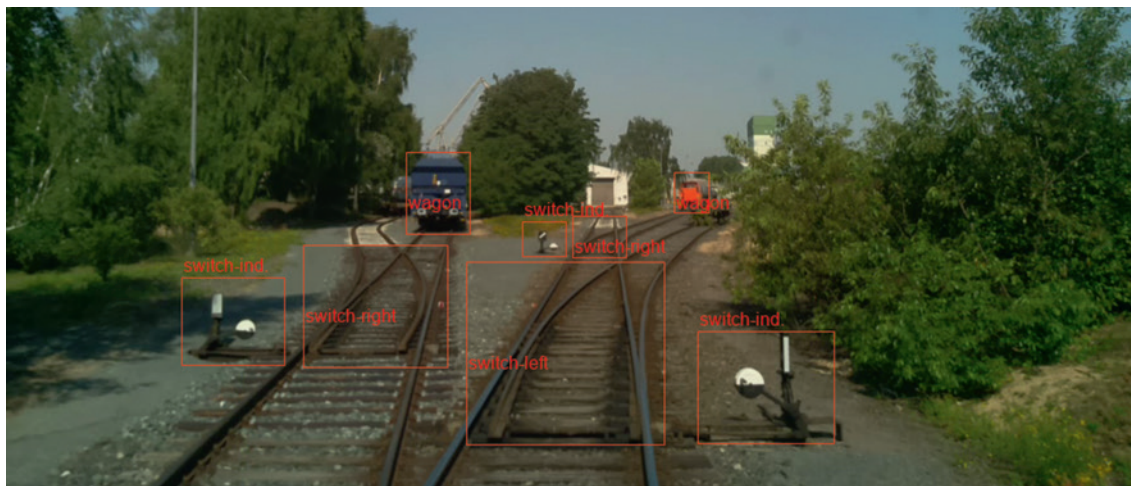
A concept developed by Brandenburger and Naumann (2019) [6, 7] shows the possible design of a user-centred workstation for a Remote Train Operator in rail traffic and illustrates approaches for the operating processes of the mutual shifts of responsibility between the Remote Train Operator and the automation (fig. 1). If teleoperated railway operation concepts are taken into further consideration, a large number of research questions emerge regarding the technical layout, the operational implications and the changing work processes. This scenario is therefore an important field of research within the interdisciplinary railway research at the German Aerospace Center (DLR). Researchers from different disciplines in a number of projects are investigating which

- technological modules are required for the remote control of rail vehicles,
- boundary conditions in railway operations have to be taken into account,
- communication system requirements are relevant,
- user-centred requirements for a Remote Train Operator workplace have to be taken into account from the perspective of human factors and
- how such an overall system could be approved in the future.

The following sections contain an outline of some of the most relevant fields of research which should be dealt with on the road to highly automated, remote controlled railway operations of the future.

### 3 Positioning and environment perception technology

A key technology for the realisation of automated and remotely operated railway systems involves the intelligent processing of



**Bild 2: Beispiel für KI-Bildverarbeitung**

Fig. 2: An example of AI image processing

Quelle / Source: DLR

tung von Sensordaten. Für die kontinuierliche und exakte Ortung der Schienenfahrzeuge in der Infrastruktur werden die Daten von GNSS (Global Navigation Satellite System)-Empfängern (z. B. GPS, Galileo), inertialen Messeinheiten (Fahrzeugbeschleunigungen und -drehraten), Geschwindigkeitssensoren (z. B. optisch oder Doppler-Radar), Balisenlesern und weiterer On-Board-Sensorik fusioniert. Darüber hinaus muss das Umfeld des Schienenfahrzeugs erfasst werden. Die Umfelderkennung dient der Erkennung von Objekten auf und neben den Schienen, um damit verbundene Risiken zu bewerten und bei Bedarf eine Notbremsung einzuleiten. Als Sensortechnologien werden hierbei Laser-Scanner, Radare und Kameras (inkl. Infrarot) eingesetzt. Die Ortung von Schienenfahrzeugen unterscheidet sich deutlich von der Ortung eines Automobils auf der Straße, insbesondere aufgrund der Gleisbindung und bahnspezifischer Technik wie Balisen. Im Bereich der Umfelderkennung sind sich Schienen- und Straßenverkehr jedoch sehr ähnlich. Die zuvor genannten Sensoren werden in beiden Verkehrsmodalitäten eingesetzt. Allerdings hat die intensive Förderung der Hochautomatisierung des Straßenverkehrs diesem Anwendungsbereich in den letzten Jahren einen technologischen Vorsprung gegenüber dem Schienenverkehr beschert. Ein Beispiel ist der Stand der Technik bei der Verarbeitung von Kameradaten, um Objekte zu detektieren und relativ zum Fahrzeug zu verorten. Hierbei werden Methoden der künstlichen Intelligenz (KI, insb. „Deep Learning“) angewendet, welche mithilfe von umfassenden Datensätzen trainiert werden und traditionelle Methoden der Bildverarbeitung in der Genauigkeit und Zuverlässigkeit übertreffen. KI-Lösungen zur Umfelderkennung sind bereits Gegenstand von schienenverkehrsbezogenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten, können bislang jedoch noch nicht im eisenbahnbetrieblichen Sinne sicher umgesetzt werden. Daher ist in diesem Bereich Grundlagenforschung erforderlich, um den Stand der Technik auf ein Niveau zu heben, der es ermöglicht, KI-Methoden im Eisenbahnverkehr gewinnbringend anwenden zu können. Darüber hinaus müssen Lösungen ermittelt und geschaffen werden, die es ermöglichen, KI-Anwendungen für den Eisenbahnbetrieb zu qualifizieren. Bild 2 zeigt ein Beispiel der algorithmischen Bildverarbeitung aus dem Schienenverkehr.

#### 4 Datenübertragung

Die Übertragung von Informationen zwischen dem Zug und dem Fernbedienplatz ist eine entscheidende Herausforderung für die Umsetzung des teleoperierten Fahrens. Aus technischer Sicht ist

sensor data to extract valuable information. The continuous positioning of rail vehicles can be achieved by fusing the data from the GNSS receivers (e. g. GPS and Galileo), inertial measurement units (IMU, acceleration and turn rates), speed sensors (e. g. optical or Doppler-radar), balise readers and other on-board sensors. Laser and radar sensors as well as cameras (including IR) can also be used to detect and track objects on and in the vicinity of the rails. The positioning of rail vehicles is a lot different to the positioning of road vehicles due to the rail-constrained motion and the rail-specific balise technology. However, the environment perception shows many similarities. For instance, cameras can be employed for both road and rail use. The automotive sector has seen a number of technological advances due to the great amount of attention paid to autonomous road vehicles in recent years. “Artificial intelligence” (AI) and “deep learning” approaches, which have been trained on large data sets, dominate the recent image processing and object detection literature. More importantly, AI methods substantially outperform more traditional image processing approaches in terms of accuracy and reliability. AI methods for environment perception are already playing an important role in railway related research and development projects. However, they have yet to be implemented in a way which meets the safety requirements of the railway industry. Therefore more fundamental research will be necessary in order to lift the state of the art to a level which enables the productive use of AI technology in railways. An example of AI based image processing is shown in fig. 2.

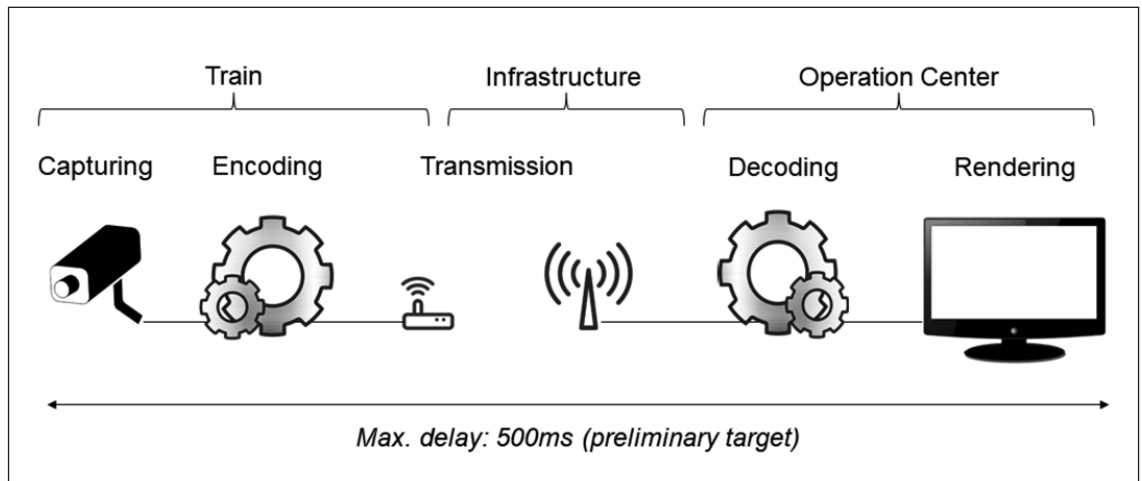
#### 4 Data transmission

The transmission of data between the train and the remote cab is a key challenge for the realisation of teleoperations. From a technical point of view, the wireless communication between a moving train and the infrastructure is a bottle neck along the overall communication path, since it defines the performance, safety, security and availability.

The first task involves the analysis of the application requirements. On the one hand, control commands (cab to train) and status information (train to cab) need to be transferred. Typically, these are only single telegrams with a few parameters. As such, less bandwidth will be requested by the transmission system. However, the high demands on reliability, availability and especially on low latencies have to be met. The correct order of the telegrams needs to be guaranteed by the appropriate protocols.

**Bild 3: Verzögerungszeiten entlang der Videoübertragungsstrecke**

Fig. 3: Delays in video transmission



dabei die drahtlose Kommunikation zwischen dem sich bewegenden Zug und der Infrastruktur der Flaschenhals entlang der gesamten Kommunikationskette. Hieraus ergeben sich Zusammenhänge zwischen Leistungsfähigkeit, Safety, Security und der Verfügbarkeit.

Zur Umsetzung müssen zunächst die Anforderungen der Applikation analysiert werden. Zum einen müssen Kontroll- und Statusinformationen zwischen Zug und Fernbedienplatz ausgetauscht werden. Hierbei handelt es sich üblicherweise um Telegramme mit einer geringen Anzahl von Parametern, sodass geringe Bandbreitenanforderungen bestehen. Wichtig ist jedoch, dass eine zuverlässige und latenzarme Übertragung sichergestellt wird. Insbesondere die korrekte Reihenfolge der Telegramme muss durch geeignete Protokolle sichergestellt werden.

Zum anderen müssen Informationen über das Umfeld des Zuges am Bedienplatz des Remote Train Operators zur Verfügung gestellt werden. Die naheliegende Lösung ist die Übertragung eines oder mehrerer Video-Streams. Auch hier sind möglichst geringe Latenzen in der Datenübertragung gefordert, da zu große Verzögerungszeiten zu falschen Entscheidungen seitens des Remote Train Operator führen können. Bild 3 illustriert, wo in der Datenverarbeitungs- und -übertragungskette Verzögerungszeiten entstehen können.

Offensichtlich entstehen die Verzögerungszeiten nicht nur bei der Übertragung von Informationen, sondern auch bei der Verarbeitung der Sensor- bzw. Videobilder. Sensoren oder Kameras benötigen Zeit für das Aufzeichnen und Vorverarbeiten einzelner Bilder. Das resultierende Datenvolumen ist üblicherweise sehr hoch und kann nicht direkt über die verfügbaren, drahtlosen Kommunikationssysteme übertragen werden. Enkodieralgorithmen sorgen für die Verringerung des Datenvolumens. Dies erfolgt bspw. durch die Komprimierung einzelner Sensorbilder oder durch Extraktion von Veränderungen zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Bildern. Am anderen Ende der Verarbeitungskette erzeugen Dekodierverfahren wieder vollständige Sensorbilder, die dann angezeigt werden können. Die verwendeten Verfahren haben großen Einfluss auf die entstehenden Verzögerungszeiten, die Bildstabilität und das Datenvolumen.

Außerdem bestimmt die verlässlich verfügbare Bandbreite des drahtlosen Kommunikationssystems die einzusetzenden Kompressionsraten, sodass die Datenströme mit geringer Latenz und ohne Pufferung auf der Empfängerseite übertragen werden können. Hohe Kompressionsraten führen meist jedoch zum Verlust von Informationen zwischen dem aufgezeichneten und dem an-

On the other hand, information about the train's surrounding environment has to be provided to the Remote Train Operator. One obvious solution is the transmission of one or more video streams. Low latencies are mandatory as well since a delayed image may lead to incorrect decisions by the Remote Train Operator. Fig. 3 illustrates possible sources of delays within the overall video processing and transmission chain.

Obviously, not only communication systems generate latencies, but image processing systems do also. Sensors, such as cameras, need time to capture and pre-process single images. The resulting amount of data is typically very high and cannot be transmitted directly via a wireless communication system. Encoding algorithms help to decrease the amount of data by compressing single sensor frames or by extrapolating incremental changes between consecutive pictures. On the other side of the chain, the decoding algorithms generate complete sensor pictures for rendering. The chosen algorithms have an important impact on the resulting delays, image stability and the amount of data.

Additionally, the available bandwidth in the wireless communication system influences the compression rates which are necessary to transfer the stream with less latency and without buffering on the receiver side. High compression rates typically mean a loss of information between the original sensor image and the rendered one for the operator. From a human factors point of view, an important challenge involves the identification of what information and what quality of information is required by the operator in order to ensure safe railway operations. In dedicated situations, it might be necessary to enhance a single, compressed sensor image with additional information.

Systems must therefore be defined and developed in order to allow the extraction of the relevant information from the sensor images and the transfer of this information to the remote operator without any compression losses. Special representations or highlighting in the rendered images (e.g. detected objects in front of the moving train) may support the operator's awareness. The possibility of zooming or focusing special parts of the sensor image can help improve the information quality and deal with the dependencies between the wireless bandwidth and latencies. Furthermore, it must be possible to allow for a certain degree of flexibility in railway operations based on the inevitable variance in the data transmission rate. For example, a varying latency in the data transmission might result in a request for a variable maximum speed of the remote control drive.

gezeigten Sensorbild. Aus Human Factors-Perspektive ist die Analyse wichtig, welche Informationen in welcher Qualität vom Remote Train Operator für die sichere Abwicklung benötigt werden. In bestimmten Situationen kann es notwendig sein, einzelne Sensorbilder mit zusätzlichen Informationen anzureichern.

Hierfür müssen Systeme spezifiziert und entwickelt werden, die die Extraktion relevanter Informationen aus dem Sensorbild und die verlustfreie Übertragung erlauben. Die Aufmerksamkeit des Remote Train Operator kann durch die Anzeige der zusätzlichen Informationen oder durch das Hervorheben besonderer Bildeigenschaften, bspw. gefundener Objekte im Fahrweg, gesteigert werden. Auch das Vergrößern oder punktuelle Erhöhen der Bildqualität kann helfen, die nötigen Kompromisse zwischen nötigen Informationen und zur Verfügung stehender Bandbreite bzw. resultierenden Latenzen effizient und dynamisch zu behandeln. Des Weiteren muss die Möglichkeit geschaffen werden, auf Basis der unvermeidlichen Verzögerungen auch betrieblich Einfluss auf die Fahrt zu nehmen. Zum Beispiel kann eine variierende Latenz in der Datenübertragung die Anforderung nach einer veränderbaren Maximalgeschwindigkeit der Fernsteuerfahrt nach sich ziehen.

## 5 Test und Zulassung des teleoperierten Bahnbetriebs

Grundlage der Zulassung des teleoperierten Eisenbahnbetriebs muss ein Sicherheitskonzept sein, in dem für die verschiedenen Betriebsmodi Sicherheitsziele – akzeptable Risikoniveaus – abgeleitet sind. Das Niveau wird sich an dem eines manuell gesteuerten Zuges orientieren.

Im automatisierten Betrieb muss die Technik mit einem Triebfahrzeugführer in zwei Bereichen verglichen werden. Zum einen im Bereich des Einhaltens aller durch die Leit- und Sicherungstechnik (LST) vorgegebenen Restriktionen. Hier sollte ein technisches System die menschliche Zuverlässigkeit übertreffen können; für den Nachweis ist auf etablierte Methoden zurückzugreifen. Zum anderen müssen Unfälle im teleoperierten Betrieb durch den Remote Train Operator mindestens so effektiv vermieden werden können, wie dies durch einen Triebfahrzeugführer im Fahrzeug heutzutage geschieht. Der Triebfahrzeugführer hat zwar systemgemäß nur geringen Einfluss auf Unfallhäufigkeit und Unfallschwere. Dennoch ist ein Vergleich anzustellen, wo eine Einschätzung der Leistungsfähigkeit der Sensorik der wohl schwierigste Aspekt ist. Dies ist im Fall des teleoperierten Betriebs von noch größerer Bedeutung, der im Folgenden genauer betrachtet wird.

Im teleoperierten Betrieb muss sich der Bediener auf die übermittelten Daten von Kameras und gegebenenfalls zusätzlichen Sensortypen verlassen können. Kameras allein werden ein unvollständigeres Bild der Umwelt liefern als das, was der Triebfahrzeugführer direkt aus der Lokomotive wahrnehmen würde. Andere Sensoren haben ihre jeweils eigene Charakteristik hinsichtlich Datenerfassung und Aufbereitungsmöglichkeit. Der Vergleich der Informationsverarbeitung zwischen Triebfahrzeugführern im Fahrzeug und Remote Train Operator lässt sich vermutlich nur durch empirische Tests unter Einsatzbedingungen ermitteln. Dies eröffnet aufgrund der hohen Variabilität der Umweltbedingungen einen großen Testraum. Es wird eine Herausforderung darstellen, diesen vollumfänglich zu beschreiben, Tests auszuwählen und die Ergebnisse in ihrer Auswirkung auf die Betriebssicherheit zu bewerten. Da eine valide Modellierung aller Informationsverarbeitungsketten im Gesamtsystem, bestehend aus Mensch und Technik, nicht verfügbar ist, sollte eine szenariobasierte Analyse erwogen werden: In den Szenarien werden die Einflussgrößen auf die Sensorik

## 5 The testing and certification of teleoperated railway operations

The basis for the certification process for remotely controlled railway operations has to be a safety concept which defines acceptable levels of risk for the different modes of operation. The acceptable level of risk will be based on the one for manual operation.

With regard to automated operations, the technology must be compared with human train drivers in two aspects. Firstly, it must be ensured that the restrictions issued by the signal technology will be obeyed. With regard to this requirement, it can be assumed that a technical system will be able to outperform human operators. This can be shown using established verification methods. Secondly, accidents should be avoided in teleoperation mode at least as effectively as in manual mode. Of course, the train driver in current railway operations has little influence over accidents. However, a comparison must be performed. Assessing the influence of the sensors appears to be the most challenging aspect, even more so in the case of teleoperations, which is discussed next.

In teleoperations, the operator must rely on transmitted camera data and the information provided by further sensors. Cameras provide a less complete picture of the environment in comparison to what an on-board operator can see. Other sensors have their own characteristics regarding data acquisition and improvement capabilities. A comparison of the information processing capabilities between on-board train drivers and Remote Train Operators will likely have to be conducted using empirical tests under (close to) real test conditions. Due to the high variability of the possible influences, the number of potential test scenarios is large. The complete description of the test space, the selection of the tests and the evaluation of the results with respect to the safety aspects will be challenging. Hence, a scenario-based analysis should be considered where relevant influences on the sensors (fog, rain, leaves, dirt, etc.) are combined with the operating parameters. To assess the criticality of detected relevant situation, human-in-the-loop tests can be conducted. This way, the accident avoidance probability can be determined. Regulations for teleoperations can be derived on the basis of these results. For instance, speed limits can be derived from the required safety level and the environmental conditions. Finally, the frequency of the occurrence of certain modes of operation should be considered in the safety analysis. It might not suffice to prove each single mode as being safe enough. There might be an unacceptable increase of risk, if the automated operations have availability issues and the teleoperations do not compare in terms of safety. Additionally, fault detection and performance degradation need to be taken into account.

## 6 The impact of disruptions on railway operations

The use of driverless vehicles promises positive effects in multiple areas. The persistent difficulties in finding qualified engine drivers could be mitigated. Furthermore, schedules with higher train frequencies could be viable, improving the quality of service in the railway system. Still, the management of any interference and the mitigation as well as the definition of suitable fall-back solutions for fully automated railway operations is a central challenge in railway operations. As described earlier based on the example of the Nuremberg underground, driverless operations have been realised for many years and have led

(Nebel, Regen, Blätter, Verschmutzung etc.) mit betrieblichen Faktoren kombiniert. In detektierten relevanten Situationen kann die Unfallträchtigkeit durch Einbeziehen einer Testperson bewertet werden. So kann dann das jeweilige Unfallvermeidungspotenzial bestimmt werden. Anhand der Vergleichsresultate können dann Betriebsvorschriften für die Teleoperation bemessen werden, die beispielsweise durch Senken der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen das angestrebte Sicherheitsniveau erreichen.

Schließlich muss in der Sicherheitsbetrachtung noch die Häufigkeit der Betriebsmodi berücksichtigt werden. Es reicht nicht aus, wenn sowohl der automatische Betriebsmodus als auch der teleoperierte Fahrmodus als Rückfallebene hinsichtlich der Sicherheit unbedenklich sind: Steht die Automation wegen hoher Ausfallraten der Technik oft nicht zur Verfügung, sodass auf einen vermutlich unsichereren teleoperierten Modus umgeschaltet werden muss, könnte das in Summe in einer unakzeptablen Risikohöhen resultieren. Gleichfalls sind natürlich noch Ausfallerkennung und mögliche erkannte oder unerkannte Systemdegradationen zu berücksichtigen.

## 6 Auswirkungen von Störfallszenarien auf den Eisenbahnbetrieb

Der Einsatz fahrerloser Fahrzeuge verspricht positive Auswirkungen in unterschiedlichen Bereichen. Das anhaltende Problem, geeignetes Fahrpersonal zu finden, könnte entschärft werden. Darüber hinaus könnte eine höhere Taktichte im Fahrplan ermöglicht und die Attraktivität der Bahn als Verkehrsmittel weiter gesteigert werden. Die Entstörung und die Definition geeigneter Rückfallebenen für den automatisierten Bahnbetrieb ist jedoch anspruchsvoll und ein entscheidender Baustein. Wie eingangs für die Nürnberger U-Bahn beschrieben wurde, ist dort bereits seit mehreren Jahren eine vollautomatische Fahrweise umgesetzt, mit der ebenfalls eine erhöhte Fahrzeugtaktung erreicht werden konnte. Um im Störfall jedoch rechtzeitig vor Ort zu sein, wurde innerhalb des Netzes an strategisch wichtigen Bahnhöfen ausreichend Personal positioniert. Da hierdurch zwar ein geringer Aufwand je Fahrt, aber hohe Kosten je Streckenkilometer entstehen, lässt sich diese Verfahrensweise in der Regel nicht auf regionale oder Fernverkehrsstrecken übertragen.

Versagen beispielsweise wesentliche Fahrzeugkomponenten eines fahrerlosen Schienenfahrzeugs wie die Sensorik oder die Ortungseinheit, oder auch Teile der Infrastruktur, müssen für diese systeminternen Störungen betriebliche Rückfallebenen existieren. Auch das Aufrüsten einer Lokomotive oder ein erneutes Hochfahren stellen systeminterne Herausforderungen dar, für die vor allem in einem unbegleiteten GoA 4-Szenario technisch-betriebliche Lösungen gefunden werden müssen. Neben diesen systeminternen Herausforderungen müssen für eine Vielzahl externer Sonderfälle ad hoc Lösungswege definiert werden. Zum Beispiel bei extremen Witterungsbedingungen oder im Falle der Anwesenheit von Tieren oder Personen in Gleisnähe muss ein Modus vorhanden sein, der weiterhin einen sicheren und effizienten Betrieb erlaubt. Im Szenario des teleoperierten Eisenbahnbetriebs bedeutet dies, dass der Remote Train Operator sich auf den betroffenen Zug aufschalten muss.

Es ist zu prüfen, inwiefern bestehende Richtlinien Anwendung finden können, ob sie erweitert, um- oder neugeschrieben werden müssen. Im Beispiel von Tieren oder Personen im Gleis (externes Störfallereignis) muss nach der DB-Richtlinie 408 der betroffene Streckenabschnitt auf Sicht mit einer maximalen Geschwindig-

to increased track capacities. Strategically important stations throughout the network are manned with railway staff in order to guarantee a prompt response in case of disruptions. This approach is tailored to small networks with large train numbers. It cannot be scaled to regional and long-distance routes.

If, for instance, any essential components of a driverless vehicle fail, such as the obstacle detection sensors, the geolocation system or the infrastructure components, those system-internal failures have to be bypassed in order to allow continued basic operations. Equipping a locomotive or system reboots are also additional internal challenges which become increasingly important in unattended GoA 4 scenarios. Thus, technical and operating solutions have to be determined. Aside from these internal hurdles, multiple external threats also have to be dealt with ad hoc. Examples range from extreme weather conditions to animals or people on the line. For each case, safe and efficient operations need to be guaranteed as well as possible. With regard to the scenario of remotely operated trains, it can be inferred that the Remote Train Operator is only needed for active actions on an impacted train.

Further analysis is needed to figure out whether existing railway regulations can be used unchanged or whether amendments would be needed. With regard to the example of trespassers (an external disruption event), the Ril 408 DB-directive dictates that it is necessary to clear the whole affected track section on sight with a maximum speed of 40 km/h. A live camera broadcast to the Remote Train Operator would be capable of fulfilling this requirement without the need for personnel on board the train. However, the safely permitted speed depends on the quality and delay of the transmitted camera image and the expected delay of the transmission of remote commands. The data transmission quality therefore has to be incorporated into the regulations and operating concepts. In the case of low transmission quality (as a consequence of limited visibility due to heavy snow, for example), the permitted speed has to be lowered below 40 km/h. This increases the required time to pass through a given track section and subsequently the duration of the existence of the disruption. An operating concept for remotely operated trains should therefore provide sufficient timetable reserves for variations in the driving speed due to the reduced quality of the sensor input.

## 7 The human role in teleoperated rail transport

The scenario of remotely controlled railway operations has at least two fields of research which need to be taken into account from the perspective of the human factor. On the one hand, the role of the Remote Train Operator, which does not yet exist, has to be defined with regard to its work content and scope. Psychological criteria should also be taken into account within this context [8]. On the other hand, the equipment needed by the Remote Train Operator to carry out the control activity should be designed on the basis of the requirements of the working staff and be well-suited to the task.

From a psychological perspective, the scenario of teleoperated railway operations which only require active manual control and attention for a limited time span promises advantages when compared to the scenario of highly automated rail operations with a train driver. If the train driver only has to monitor the ride and has no active task over a longer period of time, this might have a negative impact on his overall performance. Generally, it is hard for humans to sustain their attention in moni-

keit von 40 km/h freigefahren werden. Durch eine Kamerabildübertragung aus dem Triebfahrzeug in die Zentrale kann diese Aufgabe bereits durchgeführt werden, ohne dass eine Person im Schienenfahrzeug anwesend sein muss. Die als akzeptables Risiko zu erlaubende Maximalgeschwindigkeit im Störbetrieb steht im teleoperierten Fahrszenario allerdings in einem unmittelbaren Zusammenhang mit der Qualität und Aktualität des empfangenen Kamerabildes sowie der prognostizierten Verzögerungszeiten zum Übertragen der Fernsteuerkommandos. Daher muss der Aspekt der Datenübertragung als variable Größe in zu erstellende Betriebskonzepte für einen teleoperierten Eisenbahnverkehr einfließen. Bei wechselhafter Datenübertragungsqualität muss, wie heutzutage auch bei schlechter Sicht, die Geschwindigkeit unter Umständen auch unter 40 km/h abgesenkt werden. Dies erhöht die erforderliche Dauer der Freifahrt eines Streckenabschnitts und damit auch die Bestehenszeit der Störung, was Auswirkungen für den gesamten Betrieb nach sich zieht. In einem Betriebskonzept sollten demnach Fahrplanreserven für Schwankungen vorgesehen werden, die sich durch Qualitätseinbußen der Sensordaten aus der Umgebungserfassung (z. B. aufgrund schlechter Witterung) oder der Datenübertragung ergeben können.

## 7 Der Mensch im teleoperierten Eisenbahnbetrieb

Aus Human Factors-Perspektive birgt das Szenario des teleoperierten Bahnbetriebs mindestens zwei Themenfelder, die gezielt berücksichtigt werden müssen. Zum einen ist die in der Praxis noch nicht existierende Rolle des Remote Train Operators hinsichtlich ihrer Arbeitsinhalte und -umfänge zu definieren. Dabei sollten arbeitspsychologische Kriterien berücksichtigt werden [8]. Zum anderen sollten die Arbeitsmittel, die zur Durchführung der fernsteuernden Tätigkeit benötigt werden, bediener- und aufgabenangemessen gestaltet werden.

Ein teleoperierter Bahnbetrieb, in dem eine manuelle Steuertätigkeit ebenso wie die Aufmerksamkeit des Steuernden nur zeitlich begrenzt erforderlich ist, verspricht aus psychologischer Perspektive Vorteile gegenüber dem Szenario eines hochautomatisierten Bahnbetriebs mit Triebfahrzeugführer. Wenn ein Triebfahrzeugführer über einen längeren Zeitraum weitestgehend ohne aktive Handlung ist und hauptsächlich für die Überwachung der Fahrt benötigt wird, kann sich dies negativ auf seine Handlungssicherheit auswirken. Generell fällt es Menschen schwer, ihre Aufmerksamkeit bei Überwachungstätigkeiten in Abwesenheit relevanter Ereignisse über einen längeren Zeitraum aufrecht zu erhalten [9]. Monotone Aufgaben dieser Art kommen in vielen hochautomatisierten Arbeitszusammenhängen vor und können zur Folge haben, dass Arbeitskräfte nicht gut in der Lage sind, schnell und sicher einzugreifen, wenn dies erforderlich ist. Wird dementsprechend die Tätigkeit des Triebfahrzeugführers zu monoton, kann dies dazu führen, dass auf relevante Aspekte in der Fahrumgebung langsamer reagiert wird und die Arbeit generell ermüdender wird. Solche Effekte wurden bei Triebfahrzeugführern im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie bereits bei einem GoA 2-Fahrszenario ermittelt, das mit einer manuellen Fahraufgabe mit PZB (Punktförmige Zugbeeinflussung) verglichen wurde, die vom Betätigungsumfang angemessener erschien [10]. Automatisierung kann also ein Sicherheitsrisiko bergen, wenn nicht der Mensch im Bahnbetrieb und der Wandel seiner Arbeitsinhalte systematisch bedacht werden. Bezogen auf den automatisierten Bahnbetrieb muss daher sowohl im Sinne der Sicherheit als auch im Sinne der Mitarbeitenden die Gestaltung der Arbeitsplätze grundlegend überdacht werden.

toring activities for long periods of time, especially in the absence of any relevant events which regularly interrupt the monitoring [9]. Monotonous tasks of this type occur in many highly automated work contexts and decrease the capability of operators to intervene quickly and safely when required. Accordingly, if the train driver's task becomes any more monotonous as a consequence of higher degrees of automation, this might lead to an increased reaction time to relevant aspects in the driving environment and to increased fatigue. These effects of underload have been shown for drivers in a driving simulator study in a GoA 2 driving scenario which was compared to a manual driving task. The manual driving task appeared to be more appealing with regard to the resulting workload level [10]. Automation can therefore lead to a safety risk, if the relevance of humans in railway operations is underestimated. With regard to automated railway operations, the design of current workplaces needs to be reconsidered thoroughly, both for the sake of safety and the employees.

In addition to the psychological effects of sustained attention in monitoring tasks, the interaction design is also an essential aspect within the scenario of teleoperated railway operations which needs to be treated with care. The broadcast of live camera images to the hypothetical workplace of the train operator especially raises issues with regard to the necessary image quality. It has to be established which quality is sufficient for the detection performance of the Remote Train Operator which equals the detection performance of a train driver inside a locomotive. If this is not possible, the image quality which allows the Remote Train Operator to carry out his task with regard to an acceptable (to be defined) level of risk should be identified. Various aspects should be taken into account, including changing speeds, lighting conditions and weather conditions. If, for example, only the transmission of an image of limited quality can be guaranteed due to limited bandwidth, an examination should be undertaken as to whether and what kind of additional information could support the Remote Train Operator in his task. Additional information could occur in various forms, for example coloured image overlays could be used to highlight certain sensed objects in the vicinity of the tracks.

## 8 Concluding remarks

As long as all the components work and interact as intended, a highly automated railway system can be projected to increase the performance, reliability, and punctuality of railway operations, while reducing the size of the workforce needed. However, the potential emergence of interruptions demands good fallback solutions, either technical or manual, to limit any negative effects. Automation therefore does not imply that human operators have no role or decreased responsibility. On the contrary, human Remote Train Operators might even have to supervise larger parts of railway operations than before. They might supervise and monitor several trains with automation aiding wherever no human interaction is necessary. The Remote Train Operator will act as a fallback solution where required to actively control unmanned trains in certain cases. Several research and operating aspects have been discussed in this article in order to illustrate this interaction between human operators and the automation. Important topics include positioning, environment perception, communication and data, operational aspects, operator workplace design and certification. ■

Neben psychologischen Effekten der Daueraufmerksamkeit ist die Interaktionsgestaltung ein wesentlicher Aspekt, der im Zusammenhang mit dem Szenario des teleoperierten Eisenbahnbetriebs gut geplant werden muss. Gerade die Wiedergabe eines Live-Kamerabildes am am hypothetischen Arbeitsplatz des Remote Train Operators wirft die Frage auf, welche Qualität die Kameradaten haben müssen. Es sollte untersucht werden, welche Bildqualität erforderlich ist, damit der Remote Train Operator eine so gute Detektionsleistung der Fahrumgebung gewährleisten kann, wie dies dem Triebfahrzeugführer in der Lokomotive möglich wäre. Falls das nicht möglich ist, sollte die Bildqualität ermittelt werden, mit der ein Remote Train Operator den Betrieb ausreichend gut unter Berücksichtigung eines (zu definierenden) akzeptablen Risikoniveaus durchführen kann. Dabei sollten verschiedene Aspekte berücksichtigt werden, unter anderem wechselhafte Geschwindigkeiten, Lichtverhältnisse und Witterungsbedingungen. Kann zum Beispiel aufgrund einer beschränkten Bandbreite nur die Übertragung eines Bildes eingeschränkter Qualität gewährleistet werden, sollte untersucht werden, ob und in welcher Form ergänzende Informationen den Remote Train Operator bei seiner Tätigkeit unterstützen könnten. Dies könnte in verschiedenen Formen erfolgen, zum Beispiel über farbige Bildüberlagerungen zur Hervorhebung sensorisch erfasster Objekte.

## 8 Zusammenfassung

Solange ein hochautomatisiertes Bahnsystem fehlerfrei funktioniert, kann es sowohl die Leistungsfähigkeit, die Zuverlässigkeit als auch die Pünktlichkeit bei geringerem Personaleinsatz erhöhen. Für den Fall einer Störung sind jedoch Rückfallebenen in Form von technischen oder personellen Lösungen zu definieren und umzusetzen, damit die betrieblichen Auswirkungen so gering wie möglich bleiben. Automatisierung bedeutet dabei nicht, dass der Mensch in der Zukunft des Eisenbahnbetriebs keine Rolle mehr spielen wird. Im Gegenteil, ein Remote Train Operator wird potenziell einen größeren Teil des Eisenbahnbetriebs überwachen, da die Automation ihm steuernde Tätigkeiten abnimmt. Er wird potenziell als Rückfallebene zur Steuerung einer Vielzahl von Fahrzeugen auf bestimmten Strecken dienen und das sonst fahrerlose Schienenfahrzeug in Sonderfällen fernsteuern. Um dieses Szenario zu konkretisieren, wurden in diesem Beitrag wichtige Themen der Forschung und Entwicklung dargestellt. Wichtige Handlungsfelder eröffnen sich unter anderem in den Bereichen der Ortung, der sensorischen Umfelderkennung, der Datenübertragung, der Betriebsabläufe, der Arbeitsplatzgestaltung und der Zulassungsprozesse. ■

## LITERATUR | LITERATURE

- [1] Railway applications - Automated Urban Guided Transport (AUGT) - Safety requirements (IEC 62267:2009); German version EN 62267:2009
- [2] Melzer, T.: Konzeption neuer Technologien für autonomes Fahren, DER EISENBAHNINGENIEUR, 02/2020
- [3] Vosman, Q. (11. Dezember 2019): IRJ - International Railway Journal. Abgerufen am 02. 03. 2020 von <https://www.railjournal.com/technology/ns-conducts-first-ato-test/>
- [4] Zasiadko, M. (12. Juli 2019): RailTech.com. Abgerufen am 02. 03. 2020 von <https://www.railtech.com/digitalisation/2019/07/12/sncf-tests-its-first-autonomous-train/?gdp=accept>
- [5] Müller, R.: Eine automatische U-Bahn für Nürnberg, ZEV + DET Glas. Ann. 125 (2001) 1, S. 25–28
- [6] Brandenburger, N.; Naumann, A.: Der Arbeitsplatz des Train Operator im Fokus, DER EISENBAHNINGENIEUR, 11/2019, S. 13–17
- [7] Brandenburger, N.; Naumann, A.: Enabling automatic train operation through human problem solving, SIGNAL+DRAHT, 03/2018, S. 6–13
- [8] Brandenburger, N.; Naumann, A. (2018): From in-cabin driving to remote interventions - Train driver tasks change with railway automation. Retrieved from <https://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2018/10/Brandenburger2018Poster.pdf>
- [9] Edkins, G. D.; Pollock, C. M.: The influence of sustained attention on Railway accidents. Accident Analysis & Prevention, (29) 04/1997, pp. 533-539. doi:10.1016/S0001-4575(97)00033-X
- [10] Brandenburger, N.; Wittkowski, M.; Naumann, A. (2017): Countering Train Driver Fatigue in Automatic Train Operation. In Sixth International Human Factors Rail Conference (pp. 57-65). London, UK

## AUTOREN | AUTHORS

### Dr. Jan Grippenkoven

Gruppenleiter Tätigkeitsanalyse und Bewertung /  
 Researcher and Team Leader Human Factors, Task Analysis and Evaluation  
 E-Mail: jan.grippenkoven@dlr.de

### Dr. Christian Meirich

Gruppenleiter Angebotsplanung und Betrieb /  
 Researcher and Team Leader Traffic Evaluation, Operational Planning and Mobility  
 E-Mail: christian.meirich@dlr.de

### Dr. Michael Roth

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Technologiefeld Datenerfassung und Informationsgewinnung /  
 Researcher Data Management and Knowledge Discovery, Sensor Systems  
 E-Mail: m.roth@dlr.de

### Dr. Mirko Caspar

Wissenschaftlicher Mitarbeiter Verifikations- und Validierungsmethoden /  
 Researcher Verification and Validation Methods  
 E-Mail: mirko.caspar@dlr.de

### Dr. Hardi Hungar

Gruppenleiter Verifikations- und Validierungsmethoden /  
 Researcher and Team Leader Verification and Validation Methods  
 E-Mail: hardi.hungar@dlr.de

Alle Autoren | all authors:

Institut für Verkehrssystemtechnik  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.  
 Anschrift / Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig