

Integration automatisierter Eisenbahnfahrzeuge in die derzeitige Betriebsführung

Damit fahrerlose Eisenbahnfahrzeuge Zug- und Rangierfahrten durchführen können, müssen noch zahlreiche Voraussetzungen erfüllt werden. Technische Entwicklungen sowie betriebliche Gründe forcieren die Umsetzung eines fahrerlosen Betriebs bei der Eisenbahn. Dafür sind allerdings Anpassungen vorzunehmen, da fahrerlose Fahrzeuge die herkömmlichen Fahrzeuge nicht ohne Weiteres ersetzen können.



1. Einleitung

Das System Eisenbahn ist maßgeblich durch die Spurführung und lange Bremswege gekennzeichnet. Aufgrund der Spurführung ist der Verkehrsträger Schiene für fahrerloses bzw. automatisiertes Fahren gut geeignet. Bei Metros, die sich jedoch teilweise erheblich von der Eisenbahn unterscheiden, entspricht eine fahrerlose Betriebsdurchführung bereits heute dem Stand der Technik. Aufgrund mehrerer Einflussfaktoren, beispielsweise entsprechender technischer Entwicklungen, gewinnt das fahrerlose Fahren nun auch bei der Eisenbahn immer mehr an Bedeutung. Allerdings müssen hierfür noch zahlreiche Anpassungen u. a. an den Fahrzeugen, dem Fahrweg sowie der Leit- und Sicherungstechnik vorgenommen werden.

Mit dem fahrerlosen Betrieb bei der Eisenbahn werden mehrere Ziele verfolgt. Dabei soll insbesondere die Attraktivität des Verkehrsträgers, z. B. durch einen Service-on-demand, gesteigert werden. In diesem Artikel wird zunächst die heutige Betriebsdurchführung bei der Eisenbahn erläutert. Dabei wird auch die Notwendigkeit nach Fahrdienstleitern¹⁾ (Fdl) und Triebfahrzeugführern (Tf) beschrieben. Anschließend wird auf die Automatisierung

im schienengebundenen Verkehr eingegangen. Hierbei wird u. a. ein Vergleich zwischen der Metro und Eisenbahn vorgenommen. Die Ergebnisse zur Umsetzbarkeit eines fahrerlosen Eisenbahnbetriebs werden abschließend dargestellt.

2. Betriebsdurchführung bei der Eisenbahn

Bei der Durchführung der ersten Zugfahrten vor über 175 Jahren waren noch keine sicherungstechnischen Abhängigkeiten vorgesehen. Mit dem technischen Fortschritt und den damit einhergehenden steigenden Geschwindigkeiten sowie einem stetig wachsenden Zugaufkommen nahm die Technisierung bei der Eisenbahn kontinuierlich zu. Bei der heutigen Betriebsdurchführung sind dennoch neben der vorhandenen Sicherungstechnik Fdl und Tf weiterhin unersetzlich und sorgen für eine sichere Betriebsabwicklung. Für die Betriebsdurchführung wird bei der Eisenbahn in Deutschland insbesondere zwischen dem *Zugmeldeverfahren*, *Signalisierten Zugleitbetrieb* und *Zugleitbetrieb* unterschieden (vgl. Tabelle 1). Welches Betriebsverfahren auf einer Eisenbahnstrecke angewendet werden soll, ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig und wirkt sich auf die Anforderungen an die Fahrzeuge, den Fahrweg sowie die Leit- und Sicherungstechnik aus [1]. Insbesondere die Streckenhöchstgeschwindigkeit sowie das prognostizierte Zugaufkommen sind



Albrecht Morast, M. Sc.
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Verkehrswissenschaftliches
Institut der RWTH Aachen
morast@via.rwth-aachen.de



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nils Nießen
Institutsleiter
Verkehrswissenschaftliches
Institut der RWTH Aachen
niessen@via.rwth-aachen.de

bei der Auswahl entscheidend. Aufgrund der damit einhergehenden Infrastrukturausstattung sind spätere Änderungen des Betriebsverfahrens zwar grundsätzlich möglich, allerdings auch mit hohen Kosten verbunden.






Das Zugmeldeverfahren wird in Deutschland auf etwa 95% der Strecken

Mit dem fahrerlosen Betrieb bei der Eisenbahn werden mehrere Ziele verfolgt.



¹⁾ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird das generische Maskulin verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Tabelle 1: Vergleich der Betriebsverfahren

	Zugmeldeverfahren	Signalisierter Zugleitbetrieb	Zugleitbetrieb
 Kommunikation	Signale / Führerstandsanzeige	Signale	mündliche und schriftliche Aufträge
 Höchstgeschwindigkeit	300 km/h	100 km/h	80 km/h
 Streckenkapazität			
 Automatisierung	gering	-	-

angewendet [2]. Dabei agieren im Regelbetrieb Fdl und Tf unabhängig voneinander. Die Fdl sind in Stellwerken für das sichere Einstellen der Fahrstraßen verantwortlich, wofür u. a. auch Dokumente, beispielsweise Zugmeldebücher, zu führen sind. Tf arbeiten dagegen in einem Triebfahrzeug eines Zuges oder einer Rangierfahrt. Zu den wesentlichen Aufgaben eines Tf gehören vorrangig

- das sichere und verantwortungsvolle Fahren und Bedienen eines Triebfahrzeugs,
- die Beachtung der Eisenbahnsignale,
- die Regelung der Fahrgeschwindigkeit,
- die Fahrwegbeobachtung und
- eine energiesparende Fahrweise.

Im Normalfall erkennt ein Tf anhand eines Signalbegriffs, ob er für seine Fahrzeugbewegung eine Zustimmung erhalten hat und seine Fahrt beginnen bzw. fortsetzen darf. Bei Abweichungen vom Regelbetrieb und dem Vorliegen von Störungen, beispielsweise bei Signal- oder Weichenstörungen, ist häufig ein unmittelbares Zusammenarbeiten zwischen Fdl und Tf erforderlich. Hierbei übernimmt der Mensch eine noch verantwortungsvollere Aufgabe als im Regelbetrieb, da technische Abhängigkeiten regelkonform umgangen werden müssen. Daher müssen für das Diktieren eines schriftlichen Befehls oder das Stellen eines Ersatzsignals zahlreiche Voraussetzungen erfüllt sein, um weiterhin eine sichere Betriebsdurchführung gewährleisten zu können. Kleine Unachtsamkeiten können bereits zu gravierenden Folgen führen.

Insbesondere die sichere Aufrechterhaltung des Betriebs bei Abweichungen verdeutlicht die Notwendigkeit nach Fdl und Tf. Aber auch im Regelbetrieb sind verschiedene Ausprägungen der techni-

schen Unterstützung zu unterscheiden. Ein Fdl in einem mechanischen Stellwerk muss z. B. vor jeder Zugfahrt die Fahrstraße durch Hinsehen auf Freisein überprüfen, wohingegen die Zuglenkung in einem Elektronischen Stellwerk im Regelbetrieb selbsttätig die Tätigkeiten übernehmen kann. Im Triebfahrzeug muss ein Tf im Normalfall den beschriebenen Aufgaben nachgehen. Nur auf wenigen Strecken, sofern die entsprechende Ausrüstung auch auf dem Triebfahrzeug vorhanden ist, kann die Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB) die Geschwindigkeit eines Zuges automatisch regeln [3].

3. Automatisierung im schienengebundenen Verkehr

Neben dem Eisenbahnverkehr zählen auch Straßen-, Stadt- und U-Bahnen zum schienengebundenen Verkehr. Die Anforderungen an die Verkehrsmittel unterscheiden sich teilweise grundlegend; unterschiedliche Gesetze bilden den jeweiligen Rechtsrahmen ab. Eine fahrerlose Betriebsdurchführung entspricht bei U-Bahnen dem Stand der Technik. In Deutschland verkehrt z. B. die U-Bahn Nürnberg seit 2008 auf bestimmten Linien ohne Fahrer [4]. Insgesamt nimmt die Bedeutung fahrerloser U-Bahnen immer mehr zu: So wurden im Jahr 2018 weltweit auf über 1.000 Kilometern in mehr als 40 Städten innerstädtische schienengebundene Verkehrsmittel fahrerlos betrieben – mit zunehmender Tendenz insbesondere in Asien [5].

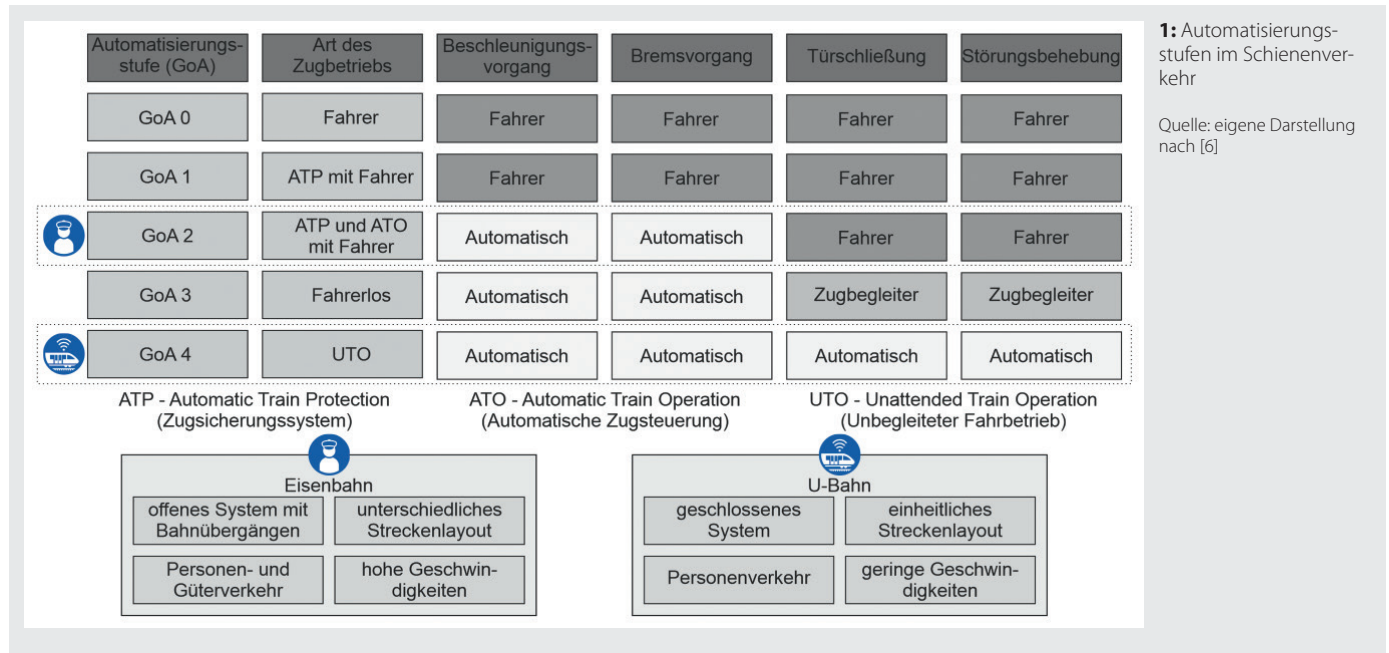
Abhängig von den jeweiligen Aufgaben, welche entweder durch das Fahrzeug oder einen Fahrer durchgeführt werden, wird zwischen unterschiedlichen Automatisierungsstufen (GoA – Grade of Automation) unterschieden. Bei der höchsten Automatisierungsstufe GoA 4, welche im

städtischen schienengebundenen Personennahverkehr zur Anwendung kommt, führen die fahrerlosen Fahrzeuge nicht nur automatisch das Beschleunigen und Bremsen durch, sondern auch den Türschließvorgang sowie die Störungsbehebung. Bei der Eisenbahn ist der Stand der Technik dagegen mit GoA 2 vergleichbar. Es gibt technische Systeme, die selbsttätig das Beschleunigen und Bremsen übernehmen. Allerdings ist ein Fahrer weiterhin für die Türschließung und die Störungsbehebung verantwortlich. Darüber hinaus werden sowohl bei der U-Bahn als auch der Eisenbahn niedrigere Automatisierungsstufen angewendet. Das Rangieren findet beispielsweise in GoA 0 statt, da aufgrund der geringen Geschwindigkeit auf Sicht gefahren wird. Bild 1 stellt die einzelnen Automatisierungsstufen gegenüber. Darin sind außerdem die wesentlichen Unterschiede zwischen der Eisenbahn und der U-Bahn dargestellt.

Aufgrund der wesentlich größeren Komplexität im Vergleich zur U-Bahn kann bei der Eisenbahn noch nicht auf einen Tf verzichtet werden. Allerdings gibt es bereits spezielle Züge, die fahrerlos fahren. Beispiele stellen einzelne Güterzüge auf eigenen Gleisen im Minenverkehr in Brasilien und Australien oder Testbetriebe mit Passagierzügen dar [7].

Fahrerlose Fahrzeuge können die herkömmlichen Fahrzeuge nicht ohne Weiteres ersetzen.





4. Umsetzbarkeit eines fahrerlosen Eisenbahnbetriebs

Ein fahrerloser Betrieb kann die Attraktivität der Eisenbahn steigern. Damit einhergehend werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Dazu zählen ein Service-on-demand, Kapazitätssteigerungen und Ressourceneinsparungen [8]. Eine Umsetzung dahingehend scheint aufgrund der zunehmenden Digitalisierung möglich, allerdings auch sehr aufwendig zu sein. Grundsätzlich muss ein fahrerloser Zug nahezu alle Aufgaben eines Tf übernehmen können. Zahlreiche technische Systeme können das Beschleunigen und Bremsen sowie Regeln der Fahrgeschwindigkeit ohne menschliches Einwirken realisieren. Für die erforderliche Informationsbereitstellung sind mehrere Möglichkeiten vorhanden, sodass sich die Fahrzeuge an die Anforderungen der jeweiligen Eisenbahnstrecke anpassen lassen. Allerdings sind auch unterschiedliche Betriebsverfahren möglich, was wiederum Auswirkungen auf die Fahrzeug- und Infrastrukturausstattung hat [9]. Kameras können für eine zuverlässige Fahrwegbeobachtung und das Erkennen der Signalbegriffe sorgen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Züge ihre Geschwindigkeit nicht nur aufgrund der zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeit, sondern auch aufgrund der Fahrwegbeobachtung anpassen müssen. Dies bedeutet, dass beim Erkennen von Unregelmäßigkeiten im Fahrweg eine Bremsung ausgelöst werden muss. Solche Entscheidungen muss die Technik

selbsttätig und innerhalb kürzester Zeit treffen.

In mehreren Quellen, bspw. in [10], wird beschrieben, dass fahrerlose Eisenbahnfahrzeuge zunächst für einen Betrieb mit einer Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h ausgelegt werden sollten. Die Geschwindigkeit, die somit mit U-Bahnen vergleichbar ist, wird mit dem Bremsweg und der damit notwendigen Sicht- bzw. Sensorreichweite begründet. Aufgrund der Systemeigenschaften der Eisenbahn, der geringen Haftreibung und der Spurführung, resultiert im Vergleich zum Straßenverkehr ein langer Bremsweg. Auf Basis der festgelegten Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 70 km/h lässt sich der Bremsweg berechnen. Dazu wird zunächst die masseunabhängige Bremsverzögerung berechnet (eine detaillierte Beschreibung zur Berechnung befindet sich in [11]):

$$a_b = g \cdot \mu = 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0,1 = 0,981 \frac{m}{s^2} \quad (1)$$

- mit a_b Masseunabhängige Bremsverzögerung
- g Fallbeschleunigung
- μ Haftreibungsbeiwert

Bei Metros entspricht eine fahrerlose Betriebsdurchführung bereits dem Stand der Technik.

Daraus lässt sich der Bremsweg für eine Geschwindigkeit von 70 km/h berechnen:

$$s = \frac{v^2}{2 \cdot a_b} = \frac{70^2 \frac{m^2}{s^2}}{2 \cdot 0,981 \frac{m}{s^2}} = 192,7 \text{ m} \approx 200 \text{ m} \quad (2)$$

- mit s Bremsweg
- v Geschwindigkeit des Zuges

Die Sicht- bzw. Sensorreichweite muss mindestens dem Bremsweg entsprechen, wenn die Reaktionszeit vernachlässigt wird. Dies bedeutet, dass die Technik der fahrerlosen Fahrzeuge bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h etwa 200 m nach vorne sehen muss. Ist dies nicht möglich, muss die Geschwindigkeit reduziert werden, was beispielsweise auch bei unsichtigem Wetter vorzunehmen ist.

Die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von 70 km/h stellt eine Einschränkung dar, weil die meisten durch einen Tf bedienten Züge wesentlich schneller fahren können. Daher ist abzuwägen, wo fahrerlose Fahrzeuge bei der Eisenbahn zunächst eingesetzt werden sollten. Die im 2. Kapitel vorgestellten Betriebsverfahren liefern bereits erste Ansätze, für welches Verfahren fahrerlose Fahrzeuge zu bevorzugen sind. Dabei ist u. a. festzulegen, wie die fahrerlosen Fahrzeuge Informationen für ihre Fahrzeugbewegung erhalten sollen. So kann die Auswertung der Signalbegriffe durch die Kameras für die Fahrwegbeobachtung in Betracht gezogen werden. Dies hat den Vorteil, dass stellwerkseitig keine Anpassungen vorzunehmen wären. Sowohl im Regelbetrieb als auch bei Abweichungen

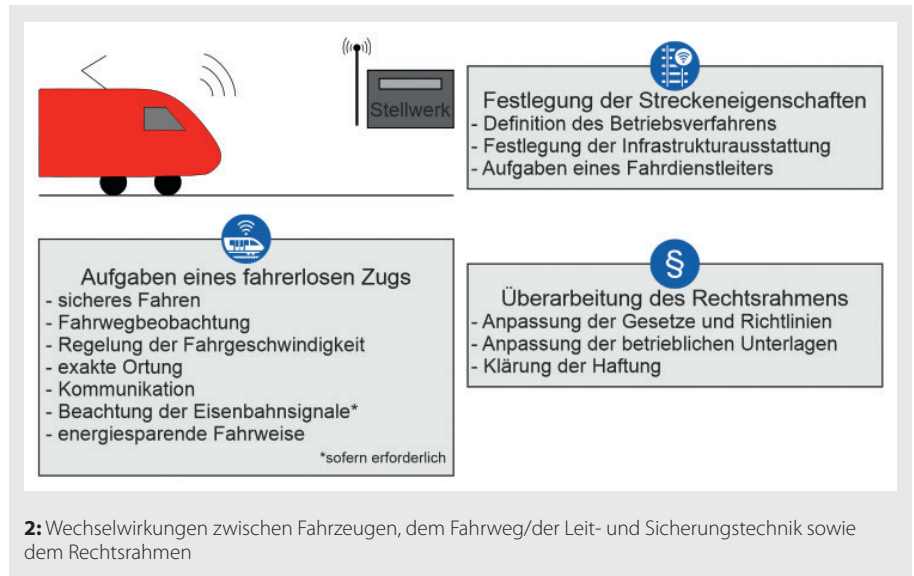
durch das Stellen von Zusatzsignalen, beispielsweise das Ersatz- oder Vorsichtsignal, kann technisch erkannt werden, ob das Fahrzeug erlaubterweise an einem Signal vorbeifahren darf. Allerdings ergeben sich bei diesem Verfahren auch Probleme. Die fahrerlosen Fahrzeuge können keine Informationen erhalten, wenn ein Nothalt erteilt und anschließend der Weiterfahrt zugestimmt oder zwingendermaßen ein schriftlicher Befehl ausgestellt werden muss. Außerdem lassen sich bei dem Verfahren keine wesentlichen Kapazitätssteigerungen erzielen, da die fahrerlosen Fahrzeuge dann – wie die herkömmlichen Züge – im festen Raumabstand folgen müssten.

Strecken, auf welchen der Zugleitbetrieb zur Anwendung kommt, sind oftmals durch geringe Höchstgeschwindigkeiten und eine einfache Infrastrukturausstattung gekennzeichnet. Daher bieten solche Strecken, häufig als Regionalstrecken bezeichnet, weitaus mehr Potenziale für fahrerlose Fahrzeuge. Die mündlichen und schriftlichen Aufträge zur Kommunikation können im Vergleich zu einem Betrieb mit Signalen einfacher durch Techniken ersetzt werden. Beispielsweise lassen sich dort Verfahren mit einer kontinuierlichen Funkverbindung zwischen den Stellwerken und fahrerlosen Fahrzeugen zum Datenaustausch leichter umsetzen. Außerdem ist dadurch eine Änderung vom Fahren im festen in den wandernden Raumabstand leichter umsetzbar, wodurch sich zusätzlich die Kapazität der häufig über mehrere Kilometer langen Abschnitte signifikant steigern lässt. Durch die dort zulässigen Streckenhöchstgeschwindigkeiten sind außerdem die Unterschiede zwischen den herkömmlichen und fahrerlosen Fahrzeugen geringer.

Im Allgemeinen müssen fahrerlose Fahrzeuge neben den Aufgaben, die ein Tf durchzuführen hat, weitere Funktionen übernehmen. Diese sind dann insbesondere von der Strecke und des dort geltenden Rechtsrahmens abhängig. Einen Überblick mit den wesentlichen Aspekten stellt Bild 2 zusammenfassend dar, wobei sich die einzelnen Punkte teilweise gegenseitig beeinflussen.

5. Zusammenfassung

Der Eisenbahnbetrieb in Deutschland wird vorrangig durch das Zugmeldeverfahren, den Signalisierten Zugleitbetrieb und den Zugleitbetrieb durchgeführt. Abhängig von den Anforderungen an die Betriebsdurchführung wird daraus ein



entsprechendes Verfahren gewählt. Bei allen Verfahren sind Fdl und Tf derzeit notwendig.

Bedingt durch technische Entwicklungen ist nun neben dem städtischen schienengebundenen Personennahverkehr auch bei der Eisenbahn ein fahrerloser Betrieb umsetzbar, wobei die Technik dann nahezu alle Aufgaben eines Tf zuverlässig übernehmen muss. Wenn die Fahrzeuge autonom verkehren sollen, ist aufgrund der Interaktionen mit der Umwelt und der eingeschränkten Sicht- bzw. Sensorreichweite die Höchstgeschwindigkeit begrenzt. Daher sind fahrerlose Fahrzeuge nicht für alle Eisenbahnstrecken gleich gut geeignet. Strecken mit einer möglichst einfachen Betriebsdurchführung stellen sich für fahrerlose Fahrzeuge vorteilhaft dar, weil technische Änderungen dort recht einfach realisiert werden können. Dennoch ist ein fahrerloser Eisenbahnbetrieb weiterhin mit enormen Herausforderungen verbunden. •

Literatur

[1] U. Maschek: Sicherung des Schienenverkehrs, 4. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2018.
 [2] M. Scheppan: „Der Zugleitbetrieb – das Betriebsverfahren für einfache betriebliche Verhältnisse,“ In: Deine Bahn, 12/2006, S. 54 – 59.
 [3] J. Janicki, H. Reinhard, M. Ruffer: Schienenfahrzeugtechnik, 4. Auflage, DB-Fachbuch, 2020.
 [4] A. May, T. Luber, B. Meier-Alt: „Aktuelle Entwicklungen im Nürnberger U-Bahn-System,“ In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 1+2/2012, S. 40 – 48.
 [5] Union Internationale des Transports Publics (UITP): World Report on Metro Automation 2018, [Online] <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/>

Statistics-Brief-Metro-automation_final_web03.pdf (abgerufen am 22.03.2021, 13:45 Uhr).
 [6] DIN EN 62290: Bahnanwendungen – Betriebsleit- und Zugsicherungssysteme für den städtischen schienengebundenen Personennahverkehr – Teil 1: Systemgrundsätze und grundlegende Konzepte, 2015-06.
 [7] C. Gralla: „Sind wir bereit für den fahrerlosen Verkehr im Nah- und Fernverkehr?,“ In: Signal + Draht (108), 4/2016, S. 6 – 14.
 [8] M. Pelz, B. Dickgießer: „Lösungen für automatisiertes Fahren im Fern-, Güter- und Regionalverkehr,“ In: Signal + Draht (107), 9/2015, S. 35 – 39.
 [9] A. Morast, F. Hampel, P. Laumen, N. Nießen, C. Schindler: „Integration von fahrerlosen Triebwagen in den Eisenbahnbetrieb,“ In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 6/2019, S. 32 – 35.
 [10] A. von Stillfried, C. Schindler: „Fahren auf Sicht – Ein Betriebskonzept für den fahrerlosen Nahverkehr,“ In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2020, S. 22 – 27.
 [11] J. Pacht: Systemtechnik des Schienenverkehrs, 10. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2021.

Summary

Integration of automatized railway vehicles into current operational management

On the one hand, the railway is predestined for autonomous driving due to the track guidance. On the other hand, the complexity of the transport mode has a negative impact on the implementation. Now, new technologies present possibilities to realize autonomous operation. Here, requirements to the vehicles, the route and the control command and signalling technology as well as the legal framework are to be considered.