



QUO VADIS ETCS?

Bedeutung der Implementierung des European Train Control System für den automatisierten Fahrbetrieb

Exposee

In diesem Impulspapier des Arbeitskreises Schiene von innocam.NRW wird das European Train Control System (ETCS) beleuchtet, das die Interoperabilität im europäischen Schienenverkehr verbessert und Sicherheitsstandards erhöht. Die Implementierung erfolgt schrittweise in verschiedenen Ausbaustufen, wobei Chancen wie Effizienzsteigerungen und Risiken wie hohe Kosten erörtert werden. Strategien und Handlungsempfehlungen für einen erfolgreichen Rollout werden vorgestellt, um die Digitalisierung und Automatisierung des Schienenverkehrs voranzutreiben.

Christian Frowein
christian.frowein@ifs.rwth-aachen.de





Inhaltsverzeichnis

Management Summary	2
Einleitung	3
Motivation zur Einführung von ETCS	5
Ursprünge und Verbreitung von ETCS	6
Rollout-Strategien und Handlungsempfehlungen	8
Fazit und Ausblick	10
Quellenverzeichnis	11





Management Summary

Der Arbeitskreis Schiene ist Teil des Kompetenznetzwerks innocam.NRW, das die automatisierte und vernetzte Mobilität (AVM) in Nordrhein-Westfalen vorantreibt. Im Netzwerk sind die Verkehrsträger Wasser, Straße, Schiene und Luft repräsentiert. Ein zentrales Element der AVM auf der Schiene und Gegenstand dieses Impulspapiers ist das European Train Control System (ETCS), ein einheitliches Zugbeeinflussungssystem, das die Interoperabilität im grenzüberschreitenden europäischen Schienenverkehr verbessert.

Das European Train Control System (ETCS) hat mehrere Ausbaustufen. Level 1 nutzt klassische Signaltechnik und überträgt punktuelle Informationen über Balisen im Gleis. Level 2 ermöglicht eine kontinuierliche digitale Übertragung von Fahrinformationen via Zugfunk, was höhere Automatisierungsgrade unterstützt. Level 3 integriert die Überwachung der Zugvollständigkeit. Dadurch kann die Kapazität von Strecken signifikant gesteigert werden.

Die Einführung von ETCS begann in den 1990er Jahren und schreitet aufgrund technischer sowie regulatorischer Herausforderungen nur langsam voran. Die Implementierung birgt sowohl Chancen als auch Risiken: Vorteile sind erhöhte Sicherheit, Effizienzsteigerungen und verbesserte Interoperabilität; Risiken umfassen die damit verbundenen hohen Kosten für Umrüstung von Infrastruktur und Bestandsfahrzeugen, lange Umsetzungszeiten sowie die technische Kompatibilität zwischen alten und neuen Systemen.

Länder wie Luxemburg und die Schweiz können durch die schrittweise Implementierung von ETCS bereits Fortschritte vorweisen. Für einen erfolgreichen Rollout von ETCS können grundsätzlich unterschiedliche Strategien zur Anwendung kommen:

- Flächendeckende Implementierung von ETCS
- Streckenselektive Priorisierung hochfrequentierter Hauptstrecken
- Koexistenz von ETCS mit alternativen Technologien auf isolierten Strecken

Die Entscheidung für eine Umsetzungsstrategie sollte alle relevanten Stakeholder auch auf europäischer Ebene einbeziehen. Aus Sicht des Arbeitskreises Schiene ist Folgendes von hoher Bedeutung: Eine gesicherte Finanzierung ist entscheidend für den Erfolg der Implementierung. Ein konsequentes Festhalten an der Umsetzung minimiert Inkonsistenzen und gewährleistet planerische Sicherheit für die Beteiligten.



Einleitung

Der Arbeitskreis Schiene ist eine Initiative von innocam.NRW, das als Kompetenznetzwerk für automatisierte und vernetzte Mobilität (AVM) in Nordrhein-Westfalen fungiert. Ziel dieses Arbeitskreises ist es, Experten aus Industrie, Wissenschaft und Politik zusammenzubringen, um die Digitalisierung und Automatisierung des Schienenverkehrs in NRW voranzutreiben. Die interdisziplinäre Zusammensetzung ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung des Ansatzes zur Entwicklung und Implementierung innovativer Technologien im Schienenverkehr. Durch die enge Zusammenarbeit der verschiedenen Akteure werden praxisnahe Lösungen erarbeitet und deren Umsetzung vorangetrieben.

Die Eisenbahn gilt seit Jahrzehnten als eines der sichersten und als das ökologisch nachhaltigste Verkehrsmittel. Einen wichtigen Anteil am hohem Sicherheitsniveau haben Zugbeeinflussungssysteme, die unter anderem dafür Sorge tragen, dass zwei Züge nicht denselben Streckenabschnitt (Blockabschnitt) befahren dürfen, um so Zusammenstöße zu vermeiden.

Das European Train Control System (ETCS) ist ein einheitliches europäisches Zugbeeinflussungssystem für den Vollbahnbereich, das entwickelt wurde, um den grenzüberschreitenden Schienenverkehr zu harmonisieren und zu sichern [1]. Ziel ist es, nationale Systeme durch ein standardisiertes Protokoll zu ersetzen, das die Interoperabilität zwischen verschiedenen Ländern und Betreibern gewährleistet. ETCS kann darüber hinaus eine entscheidende Rolle bei der Steigerung der Sicherheit, Effizienz und Kapazität des Schienenverkehrs spielen [2]. Durch die Implementierung dieses Systems können technische Barrieren abgebaut und eine einheitliche Infrastruktur geschaffen werden, die den Schienenverkehr in Europa langfristig wirtschaftlicher und noch umweltfreundlicher gestaltet [2]. Die Erhöhung von Streckenkapazitäten erhöht Pünktlichkeit und Fahrplanstabilität und trägt damit zur weiteren Attraktivitätssteigerung des Schienenverkehrs bei.

ETCS ist in verschiedene Ausbaustufen bzw. Level unterteilt, die unterschiedliche Funktionen und Automatisierungsgrade bieten. Jedes dieser Level bringt spezifische Anforderungen und Vorteile mit sich, insbesondere in Bezug auf die Aufgaben und potenziell die Notwendigkeit des Triebfahrzeugführers.

ETCS Level 1 stellt die erste Stufe der Digitalisierung im Bahnverkehr dar. In dieser Stufe bleibt die streckenseitige Signaltechnik erhalten, während ETCS punktuell Informationen von fest im Gleis installierten Balisen an das Triebfahrzeug überträgt. Da die Fahrweise in Level 1 nicht kontinuierlich überwacht wird, bleibt ein Triebfahrzeugführer notwendig, um das Fahrzeug sicher zu führen und auf unvorhergesehene Ereignisse zu reagieren. [3] Ein Mehrwert entsteht bei dieser Variante vornehmlich durch die europaweite Harmonisierung.

Mit ETCS Level 2 erfolgt die Übertragung von Fahrinformationen kontinuierlich über eine digitale Funkverbindung, die über GSM-R realisiert wird. Durch diese Technologie können streckenseitige Signale weitgehend entfallen, da der



Triebfahrzeugführer alle relevanten Informationen direkt auf dem Führerstandsanzeiger erhält. Dieses System ermöglicht über die europäische Harmonisierung hinaus eine Automatisierung der Fahraufgabe. Die Anwesenheit eines Triebfahrzeugführers ist jedoch weiterhin erforderlich. Seine Hauptaufgabe besteht darin, Systemmeldungen zu überwachen und im Bedarfsfall einzugreifen. [3] Eine weitergreifende Möglichkeit zur Automatisierung wird mit ETCS Level 3 erreicht. Diese Ausbaustufe integriert eine Überwachung der Zugvollständigkeit unter Nutzung einer kontinuierlichen Funkübertragung. Dadurch entfällt die Notwendigkeit fester Blockabschnitte, was eine erhebliche Kapazitätssteigerung auf der Strecke ermöglicht. Obwohl das System einen hochautomatisierten Betrieb unterstützt, bleibt das Fahrpersonal weiterhin erforderlich. Die kontinuierliche Überwachung der Betriebssicherheit sowie die Reaktion auf betriebliche Unregelmäßigkeiten machen den Triebfahrzeugführer weiterhin zu einem unverzichtbaren Bestandteil des Systems. [4] Eine Gegenüberstellung der beschriebenen Level ist in Abb. 1 gegeben.



Abb. 1 Überblick ETCS-Level in Anlehnung an [3]

Eine besondere Form der Überwachung innerhalb von ETCS ist der sogenannte Betriebsmodus Full Supervision (FS). Dieser Betriebsmodus kann mit allen drei ETCS-Leveln implementiert werden [5]. In diesem Betriebsmodus wird sichergestellt, dass der Zug jederzeit innerhalb der definierten Streckenparameter vollständig überwacht wird. Sämtliche sicherheitsrelevanten Informationen werden direkt über ETCS gesteuert [5]. Dies bedeutet, dass der Triebfahrzeugführer keine Signale mehr interpretieren muss, da alle relevanten Fahrweisungen über das System bereitgestellt werden. Die kontinuierliche Überwachung der Fahrweise reduziert das Risiko menschlicher Fehler.

Das Zugbeeinflussungssystem ETCS stellt damit eine mögliche Basis für die Einführung automatisierter Funktionen dar. Erst durch eine Kombination von ETCS mit dem Automatic Train Operation (ATO) System kann ein vollständig fahrerloser Betrieb realisiert werden [6]. Bei ATO GoA 3 (GoA: Grade of Automation, dt.: Automatisierungsgrad) fährt der Zug automatisiert, jedoch bleibt ein Mitarbeiter an Bord, der im Notfall eingreifen kann [6]. Dies stellt eine Zwischenstufe dar, bei der der Automatisierungsgrad erhöht wird, während gleichzeitig eine menschliche Absicherung vorhanden bleibt. Der höchste Automatisierungsgrad wird mit ATO GoA 4 erreicht. In dieser Stufe erfolgt der Betrieb vollkommen fahrerlos, ohne jegliches Personal an Bord [6]. Die technische Umsetzung eines solchen Betriebs



setzt jedoch umfangreiche sicherheitstechnische Maßnahmen voraus. Dazu zählen insbesondere fortschrittliche Systeme zur Hinderniserkennung, eine zuverlässige Infrastrukturüberwachung sowie eine enge Integration der notwendigen technischen Einrichtungen in das Gesamtsystem Bahn. Aufgrund dieser hohen Anforderungen ist der fahrerlose Betrieb derzeit nur in speziell ausgerüsteten Infrastrukturen, wie beispielsweise U-Bahnen oder bestimmten S-Bahn-Strecken, denkbar. Für den regulären Fern- und Regionalverkehr sind zusätzliche Entwicklungen und Anpassungen erforderlich, um den Weg für einen vollautomatisierten Betrieb zu ebnen.

Ein vollständig fahrerloser Betrieb auf Basis von ETCS kann demnach erst durch Kombination der Betriebsart Full Supervision mit ATO GoA 4 realisiert werden [5][6]. Bis dahin bleibt der Triebfahrzeugführer ein essenzieller Bestandteil des Betriebs, insbesondere zur Überwachung der Systeme, zur Behebung von Störungen und zur Sicherstellung einer reibungslosen Betriebsabwicklung. Eine Gegenüberstellung der bekannten Aufgaben von Triebfahrzeugführerinnen mit den Automatisierungsgraden (GoA) ist in Abb. 2 dargestellt.

	GoA1	GoA2	GoA3	GoA4
Fahraufgabe	Triebfahrzeug-führende	Automatisch	Automatisch	Automatisch
Fahrgastwechsel	Triebfahrzeug-führende	Triebfahrzeug-führende	Zugpersonal	Automatisch
Streckenbeobach-tung	Triebfahrzeug-führende	Triebfahrzeug-führende	Automatisch	Automatisch
Störfallmanage-ment	Triebfahrzeug-führende	Triebfahrzeug-führende	Zugpersonal	Zentrale

Abb. 2 Aufgabenverteilung bei fortschreitendem Automatisierungsgrad [7]

Motivation zur Einführung von ETCS

Die Implementierung von ETCS bietet zahlreiche Vorteile für den Schienenverkehr. Einer der größten Vorteile liegt in der Möglichkeit des automatisierten Fahrbetriebs, der durch ETCS Level 2 und insbesondere Level 3 in Kombination mit ATO realisierbar wird. Dies ermöglicht eine effizientere Zugsteuerung, kürzere Blockabstände und eine optimierte Fahrdynamik, wodurch die Kapazität des bestehenden Streckennetzes erheblich gesteigert werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die Verbesserung der Sicherheit. Durch die kontinuierliche Überwachung und Steuerung der Zuggbewegungen können menschliche Fehler minimiert und Unfälle verhindert werden. Darüber hinaus bietet ETCS eine erhöhte Interoperabilität, da es nationale Systeme ersetzt und den grenzüberschreitenden Bahnverkehr erleichtert [2]. Dies reduziert betriebliche Hürden und fördert den europäischen Bahnsektor.



Trotz der vielversprechenden Möglichkeiten gibt es auch erhebliche Risiken bei der ETCS-Implementierung. Eines der größten Risiken ist eine ungeplante und kostspielige Umsetzung. Die Erfahrung in verschiedenen europäischen Ländern zeigt, dass die Einführung von ETCS häufig teurer und langwieriger ist als ursprünglich vorgesehen. Hohe Investitionskosten für Infrastruktur, Fahrzeuge und Schulungen stellen eine zentrale Herausforderung dar. Zudem besteht das Risiko, dass die Implementierung aufgrund finanzieller oder organisatorischer Schwierigkeiten ins Stocken gerät und letztendlich nicht konsequent oder umfänglich umgesetzt wird. Ein weiteres Problem ist die Übergangsphase zwischen alten und neuen Systemen, die eine komplexe technische und betriebliche Koordination erfordert. Insbesondere die Nachrüstung bestehender Fahrzeuge mit ETCS kann hohe Kosten und betriebliche Einschränkungen mit sich bringen [8]. In der Schweiz erfolgt die Migration der ETCS-Level in mehreren Stufen [9]. Ziel ist es, das gesamte Bahnnetz langfristig mit ETCS Level 2 auszurüsten, um nationale Zugsicherungssysteme schrittweise zu ersetzen [9]. Ein wesentlicher Vorteil dieser Umstellung ist die Vereinheitlichung von Sicherheitsstandards und die Erhöhung der Streckenkapazität. Herausforderungen bestehen jedoch in der Koordination mit bestehenden Fahrzeugflotten, die teils mit älteren Sicherungssystemen ausgerüstet sind, sowie in der Integration mit den internationalen Standards. Die Schweiz verfolgt dabei einen schrittweisen Ansatz, der sowohl auf stark frequentierten Strecken als auch in Randgebieten die Umstellung ermöglicht, ohne den Betrieb maßgeblich zu stören.

Ursprünge und Verbreitung von ETCS

Die Einführung von ETCS wurde bereits in den 1990er Jahren angestoßen, um die Vielzahl nationaler Zugbeeinflussungssysteme zu harmonisieren [14]. Erste Pilotprojekte wurden in verschiedenen europäischen Ländern umgesetzt, wobei die Implementierung aufgrund technischer und regulatorischer Herausforderungen nur langsam voranschritt [1]. Erst mit der Einführung konkreter europäischer Vorgaben und Förderprogramme gewann die Umsetzung an Dynamik.

Der aktuelle Ausbaufortschritt in Europa ist in Abb. 3 dargestellt. Mit ETCS ausgerüstete Strecken sind dort in blauer Farbe markiert. Es können große länderspezifische Unterschiede festgestellt werden.

Luxemburg hat sich frühzeitig für eine landesweite Implementierung von ETCS entschieden und nutzt eine streckenselektive Umsetzung, um den technologischen Wandel schrittweise zu realisieren [11]. Dabei wurde aufgrund der begrenzten Größe des Schienennetzes insbesondere auf ETCS Level 1 gesetzt. Auch die beiden weiteren Beneluxstaaten Belgien und die Niederlande sind im Ausbau von ETCS weit fortgeschritten (vgl. Abb. 3).

In der Schweiz spielt die Implementierung von ETCS eine zentrale Rolle im Rahmen der Modernisierung der Bahninfrastruktur. Die Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) haben mit der Einführung von ETCS früh begonnen, um den grenzüberschreitenden Verkehr zu erleichtern und die Kapazität sowie die Sicherheit des Bahnnetzes zu erhöhen. Besonders verbreitet ist hier ETCS Level 1, das bereits





Rollout-Strategien und Handlungsempfehlungen

Ein erfolgreicher Rollout von ETCS erfordert aus Sicht des Arbeitskreises Schiene eine klare und langfristig ausgelegte, mit verlässlichem Zeithorizont unterfütterte, Strategie. Diese sollte sich an den spezifischen Anforderungen des deutschen Bahnnetzes orientieren und eine schrittweise Einführung vorsehen. Eine detaillierte Roadmap ist notwendig, um Investitionssicherheit zu gewährleisten und einen reibungslosen Übergang sicherzustellen. Das Festhalten an dieser Roadmap über Legislaturperioden hinaus ist von höchster Bedeutung. Folgende Varianten der Implementierung sind nach Ansicht des Arbeitskreises Schiene denkbar.

Variante 1 – Flächendeckende ETCS-Implementierung

Ein wichtiger Schritt ist die verpflichtende Ausstattung aller relevanten Neufahrzeuge mit ETCS. Nur auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass neue Züge sofort in ETCS-gestützten Strecken eingesetzt werden können, ohne dass kostspielige Nachrüstungen erforderlich sind.

Eine mögliche Übergangsstrategie könnte der Einsatz von ETCS Level 1 sein, ähnlich wie in Luxemburg bereits erfolgreich umgesetzt. Dies würde es ermöglichen, bestehende Strecken schrittweise mit ETCS auszustatten, ohne unmittelbar eine kostenintensive vollständige Migration auf höhere Level vornehmen zu müssen. Langfristig sollte ein vollständiger Rollout von ETCS Level 2 oder 3 angestrebt werden. Dieser bietet maximale Effizienzgewinne und Sicherheitsvorteile, erfordert jedoch die umfangreichsten Investitionen in Infrastruktur und Fahrzeuge. So wurden in einer Studie aus dem Jahr 2018 Kosten von 28 Mrd. Euro infrastrukturseitig und 4 Mrd. Euro für die Umrüstung von Bestandsfahrzeugen veranschlagt [15]. Aktualisierte Zahlen aus dem Jahr 2024 stehen mit insgesamt 58 Mrd. Euro zu Buche unter der Annahme einer Realisierung bis einschließlich der 2040er Jahre [16]. Durch operative Einsparungen soll ein Break-even im Jahr 2063 erreicht werden [16].

Variante 2 – Streckenselektive Priorisierung

Eine streckenselektive Einführung von ETCS mit der Priorität auf Hauptmagistralen kann eine sinnvolle Option sein. Eine solche Strategie würde die finanzielle Belastung verteilen und gleichzeitig die spezifischen Vorteile von ETCS – die Erhöhung von Kapazität und Pünktlichkeit – schnell nutzbar machen, die ohnehin auf Hauptstrecken von erhöhter Bedeutung sind. Die infrastrukturseitige Ausrüstung der vier wichtigen Korridore Emmerich–Basel, Puttgarden–Nürnberg–München, Dresden(–Prag) und Aachen–Frankfurt (Oder) wurde 2010 mit 4,5 Mrd. Euro veranschlagt [17].

Variante 3 – Koexistenz von ETCS mit anderen Technologien

Eine weitere Möglichkeit besteht in der streckenselektiven Einführung von ETCS ohne das notwendige Ziel, das System auf 100 % des deutschen Streckennetzes zu betreiben. Diese Variante bietet sich beispielsweise für Inselstrecken an, die mit dem Hauptnetz nicht in physischer Verbindung stehen. Während auf dem Hauptnetz ETCS betrieben wird, kann auf Inselstrecken etwa das Fahren auf Sicht mit Sensortechnik und Intelligenz an Bord, vergleichbar zum Kraftfahrzeug, stattfinden. Bei artreinem Betrieb und Vernetzung der zum Einsatz kommenden Fahrzeuge untereinander ist





der Einsatz eines infrastruktur- und fahrzeugseitigen Zugsicherungssystems verzichtbar. Eine solche Lösung führt zu ökonomischen Vorteilen beim Betrieb von Inselstrecken, die sich in aller Regel in ländlichen Gebieten befinden. Insbesondere bei Reaktivierungsstrecken ist so die Anfangsinvestition deutlich niedriger und die Wahrscheinlichkeit für eine positive wirtschaftliche Bewertung steigt.

Jede der vorgestellten Varianten hat spezifische Vor- und Nachteile. Während eine streckenselektive Implementierung Kosten reduziert und betriebliche Flexibilität bietet, könnte eine sofortige flächendeckende Einführung langfristig effektiver sein. Daher ist eine differenzierte Abwägung notwendig, um eine optimale, auf die vorliegenden Gegebenheiten und Bedürfnisse angepasste Strategie zu entwickeln. Ziel dieses Papiers ist es, Handlungsoptionen transparent zu machen – ohne eine spezifische Rollout-Variante in den Mittelpunkt zu stellen. Die endgültige Auswahl muss von Politik, Betreibern und Industrie getroffen werden.

Die folgenden Handlungsgrundsätze sind beim Rollout von ETCS aus Sicht des Arbeitskreises Schiene zentral. Dabei handelt es sich ausdrücklich um einen Appell des Arbeitskreises und nicht notwendigerweise um die Meinung des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen.

- Die vorgestellten Strategien müssen auf die vorherrschenden Bedarfe unter Berücksichtigung ihrer spezifischen Vor- und Nachteile abgestimmt sein und konsequent verfolgt werden, um widersprüchliche Entwicklungen zu vermeiden.
- Die Entscheidung zu einer Umsetzungsstrategie muss unter Einbezug aller relevanten Stakeholder auf nationaler und europäischer Ebene getroffen werden. Dabei ist das Sicherstellen der Finanzierung über Legislaturperioden hinaus ein zentrales Element für den Erfolg der Implementierung. Diese Notwendigkeit gilt insbesondere für die sogenannten nichtbundeseigenen Eisenbahnen (NE-Bahnen), die in der Regel durch Länder und Kommunen oder privatwirtschaftlich betrieben werden, und für private Gleisanschlüsse.
- Ein konsequentes Festhalten an der Umsetzung ist notwendig, um einerseits Inkonsistenzen im System zu minimieren, vor allem aber, um planerische Sicherheit für alle beteiligten Stakeholder zu gewährleisten.





Fazit und Ausblick

Die Einführung von ETCS stellt eine der bedeutendsten technologischen Veränderungen im europäischen Schienenverkehr dar. Die Vorteile in Bezug auf Sicherheit, Kapazität und Effizienz sind unbestreitbar, doch die Herausforderungen sind ebenso erheblich. Ein geordneter und strategisch geplanter Rollout ist essenziell, um Kosten und Risiken zu minimieren. Besonders wichtig ist die enge Zusammenarbeit zwischen Bahnunternehmen, Industrie, Politik und Wissenschaft, um tragfähige Lösungen zu entwickeln.

Die nächsten Jahre werden entscheidend sein, um den Umstieg auf ETCS erfolgreich zu gestalten. Dabei müssen sowohl infrastrukturelle als auch betriebliche Aspekte berücksichtigt werden. Insbesondere die Integration von ETCS mit weiteren digitalen Technologien wie ATO wird in Zukunft eine zentrale Rolle spielen.

Der Arbeitskreis Schiene von innocam.NRW kann durch seine interdisziplinäre Expertise und die Vernetzung entscheidender Akteure einen wichtigen Beitrag zur Gestaltung dieses Transformationsprozesses leisten. Ziel sollte es sein, innovative Ansätze zu entwickeln, die sowohl wirtschaftlich tragfähig als auch technologisch zukunftssicher sind. Der Arbeitskreis wird die gewonnenen Erkenntnisse weiternutzen und sich vertiefend mit Themen wie dem fahrerlosen Fahren mit Sensortechnik auf Sicht oder den Hürden bei der Zulassung fahrerloser Systeme beschäftigen.





Quellenverzeichnis

- [1] Deutscher Bundestag, Wissenschaftliche Dienste; Sachstand „European Train Control System – Koordination auf nationaler und europäischer Ebene“; WD 5-073/24; 2024; PDF: <https://www.bundestag.de/resource/blob/1015562/WD-5-073-24-pdf.pdf>
- [2] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR); Wirtschaftlichkeit des ETCS; Bericht; 2010; PDF: https://elib.dlr.de/65649/1/Wirtschaftlichkeit_ETCS_100930.pdf
- [3] Europäische Kommission, DG MOVE; ETCS Levels and Modes; Webartikel; 2023; https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/ertms/what-ertms-and-how-does-it-work/etcs-levels-and-modes_en
- [4] Klinge B. u. a.; On-board Train Integrity as Enabler for ETCS Level 3; IRSE ASPECT-Paper; 2022; https://www.researchgate.net/publication/361792014_Onboard_Train_Integrity_as_enabler_for_ETCS_Level_3
- [5] European Union Agency for Railways (ERA); ERTMS Operational Principles and Rules; Version 5.0; 2019; PDF: [https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/Appendix%20A%20to%20TSI%20PE%20\(Updated_%2009_04_2019\).pdf](https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/Appendix%20A%20to%20TSI%20PE%20(Updated_%2009_04_2019).pdf)
- [6] Siemens Mobility; ATO over ETCS als Schlüssel für mehr Effizienz, Kapazität und Nachhaltigkeit; Signal + Draht 9/2021; PDF: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b8f4e9c4-dcc0-4bbb-b50c-53b6253706ff/13-24-suwalski-wuensche.pdf>
- [7] Digitale Schiene Deutschland; Automatic Train Operation; <https://digitale-schiene-deutschland.de/Automatic-Train-Operation>; Zugriff: 17.06.2025
- [8] Siemens Mobility & DB Systemtechnik; ETCS- und LZB80E-Nachrüstung von Bestandsfahrzeugen; Signal + Draht 7/8-2024; PDF: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ed59ac5e-2085-4fb6-8b07-914010e524f6/siemens-mobility-ETCS-und-LZB80E-Nachrüstung-SD-technicalarticle-de-en.pdf>
- [9] Bundesamt für Verkehr (BAV), Schweiz; Fachseite „European Train Control System (ETCS)“; 2024; <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/verkehrsmittel/eisenbahn/fachinformation/en/zugbeeinflussung.html>
- [10] Rat der Europäischen Union; Council Directive 96/48/EC on the Interoperability of the Trans-European High-Speed Rail System; 1996; <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1996/48/oj>





[11] Ministère de la Mobilité, Luxemburg; National Implementation Plan ERTMS 2024; 2024; PDF: https://transport.ec.europa.eu/document/download/848744b2-78ef-4c68-a46e-d69beab51c5c_en?filename=NIP_ERTMS_2024_LU.pdf

[12] UNIFE – European Rail Supply Industry; Factsheet „ERTMS Deployment in Switzerland“; 2021; PDF: <https://www.ertms.net/wp-content/uploads/2021/06/6-ERTMS-Deployment-in-Switzerland.pdf>

[13] OpenRailwayMap; OpenRailwayMap – Europäische Eisenbahnkarte; <https://openrailwaymap.org/>; Zugriff: 17.06.2025

[14] Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung (DZSF); ETCS-Fahrzeugnachrüstung unter Bauraumaspekten; Eisenbahningenieur 10/2024; PDF: https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Downloads/DZSF/Veroeffentlichungen/Fachveroeffentlichungen/2024/2024-10_Fachartikel_EI_ETCS_Fahrzeugumruistung.pdf

[15] Bundesministerium für Verkehr (BMV); Neuausrichtung der Gesamtstrategie zur Digitalisierung der Schiene; 2024; PDF: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/neuausrichtung-digitalisierung-schiene.pdf?__blob=publicationFile

[16] Bundesministerium für Verkehr (BMV); Machbarkeitsstudie zum Rollout von ETCS/DSTW; 2018; PDF: https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/E/machbarkeitsstudie-digitalisierung-schiene.pdf?__blob=publicationFile

[17] Deutscher Bundestag; Antwort auf eine kleine Anfrage zur Digitalisierung der Schiene; BT-Drucksache 17/7618; 2017; PDF: <https://dserver.bundestag.de/btd/17/076/1707618.pdf>

