

Grenzüberschreitende Eisenbahntunnel mit ETCS-Ausrüstung

Technologische und regulatorische Aspekte bei der Planung grenzüberschreitender ETCS-Tunnelprojekte in Europa

JUAN SIMÓN-MUZÁS |
RICHARD KRETZSCHMAR |
CHRISTIAN SCHOLTKA

Mit dem European Train Control System (ETCS) steht eine einheitliche Zugbeeinflussung zur Verfügung, die grenzüberschreitenden Eisenbahnverkehr ohne Wechsel des Fahrzeugs oder Zugbeeinflussungssystems ermöglicht. Diese Interoperabilität bildet die Grundlage für durchgehende Fahrten auf den Transeuropäischen Verkehrsnetzkorridoren (TEN-V). Zunehmend werden auch Tunnelbauwerke, die Staatsgrenzen unterqueren, mit ETCS ausgerüstet. Diese ermöglichen lange grenzüberschreitende Fahrten un-

ter einem durchgehenden Sicherungssystem – ein technologischer Fortschritt im europäischen Bahnverkehr. Trotzdem stellen nationale Unterschiede in Betrieb und Projektierung weiterhin Herausforderungen für die technische Planung dar. Der Beitrag analysiert den Stand aktueller Tunnelprojekte und zeigt typische Muster sowie Entwicklungstendenzen in Planung und Betrieb auf.

Einleitung

Mehr als 25 Jahre nach den ersten Erprobungen [1] hat ETCS ein fortgeschrittenes Reifestadium erreicht und gilt heute als zentrales Element für die Interoperabilität im europäischen Eisenbahnverkehr. Aufgrund ihrer ho-

hen Komplexität sind grenzüberschreitende Eisenbahntunnel jene Infrastrukturbereiche, in denen die Unterschiede zwischen nationalen Teilsystemen, Betriebsvorschriften sowie Sicherheits- und Tunnelausbauanforderungen besonders deutlich sichtbar werden. Neben baulichen, technischen und betrieblichen Herausforderungen sind auch politische, organisatorische und finanzielle Aspekte maßgeblich. Die zwischen den beteiligten Staaten abgestimmten Lösungen sollen für eine optimale Kapazität dieser kostenintensiven Infrastruktur ausgelegt sein und müssen zugleich einen reibungslosen internationalen Schienenverkehr ermöglichen. Geplante und bestehende europäische grenzüberschreitende Eisenbahntunnel sind in Abb. 1 dargestellt. Viele dieser Tunnel sind heute

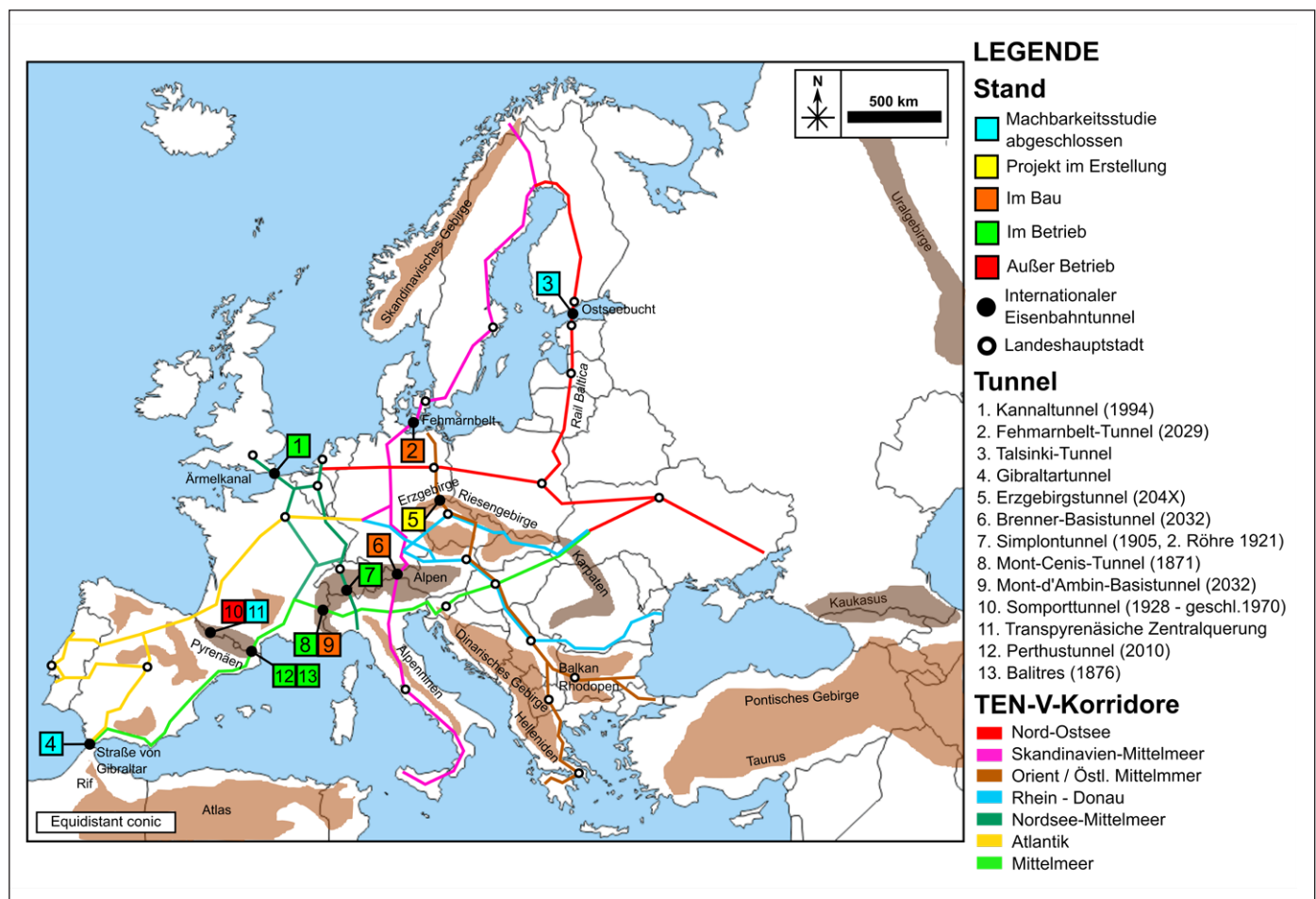


Abb. 1: Grenzüberschreitende Eisenbahntunnel in Europa

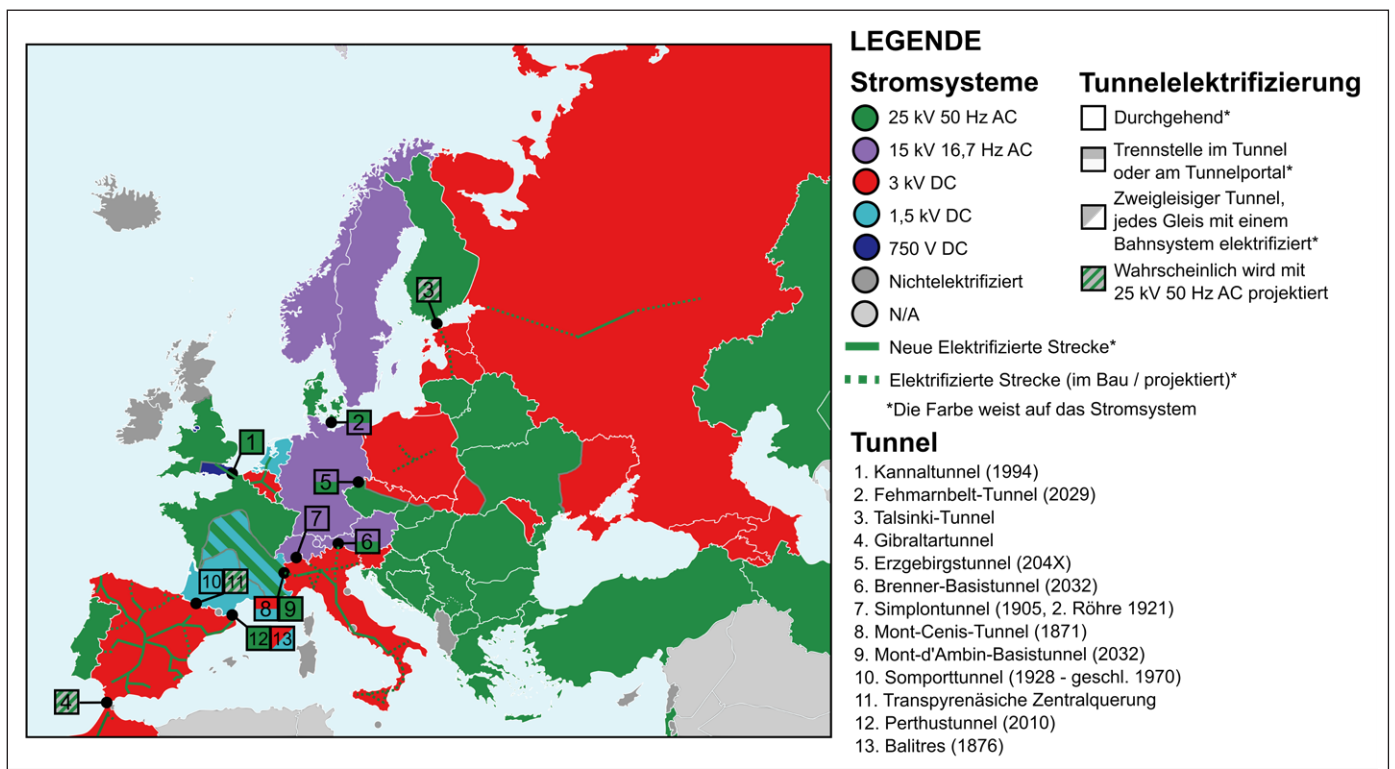


Abb. 2: Historische Traktionssysteme von Vollbahnen und neue Elektrifizierung

Teil des TEN-Verkehrsnetzes. Gebirgstrecken und Bauwerke, oftmals mehr als 100 Jahre alt, sind bzw. werden durch Neubauprojekte und Basistunnel ersetzt.

Im Jahr 2018 waren in Europa fünf grenzüberschreitende Eisenbahntunnel im Betrieb [2, 3]. Zwei weitere Basistunnel und ein Absenktunnel befinden sich derzeit im

Bau. Es wird erwartet, dass bis zum Ende der 2040er Jahre vier neue Projekte in Betrieb sein werden. Als Teil der TEN-V-Korridore werden diese Verbindungen, einschließlich

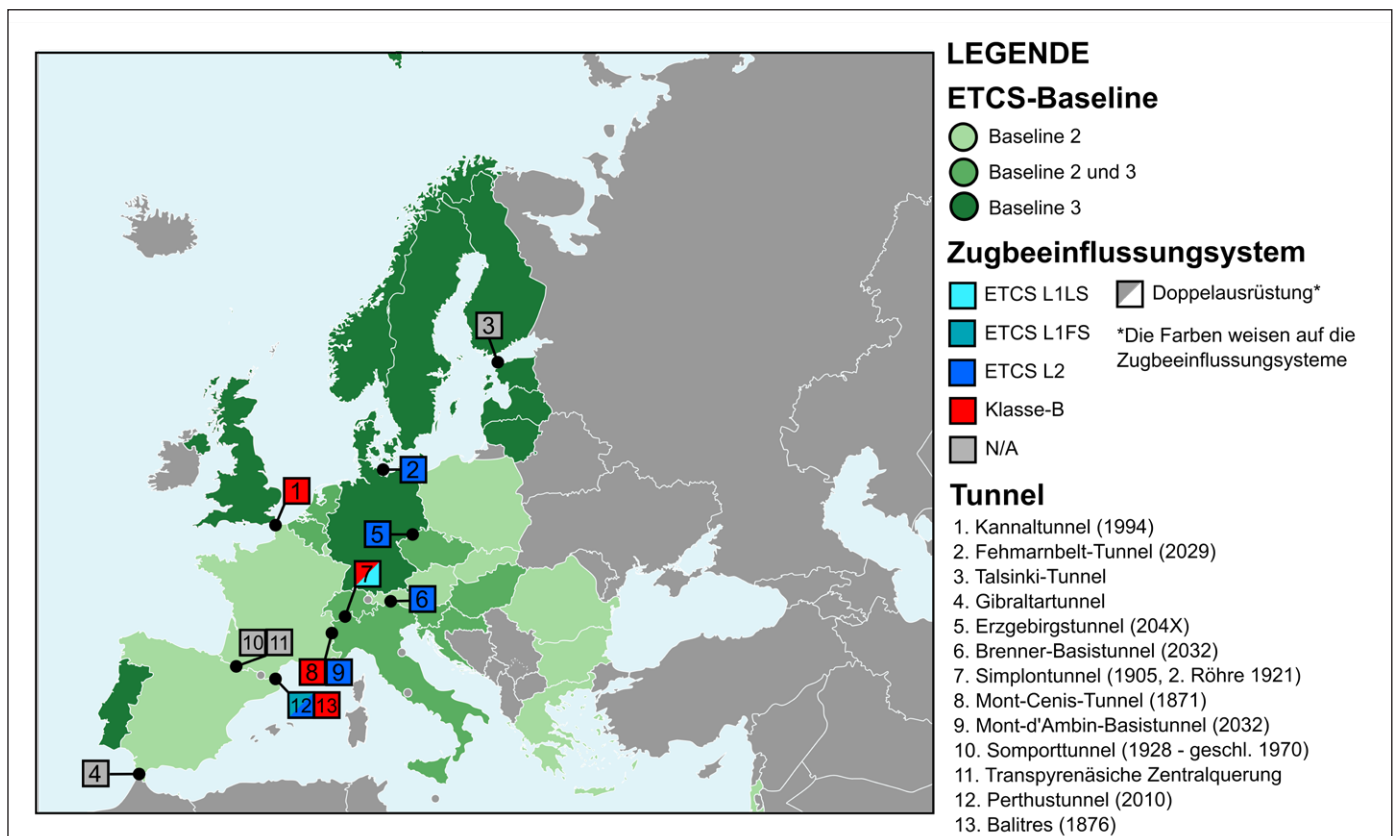


Abb. 3: In den europäischen Ländern verwendete ETCS-Baselines bei neuen Projekten

Schnittstelle	Transition	Aspekte	Zuordnung	
			intranational	international
		nur betrieblich	unterschiedliches Eigentum / Netz ¹	ehemals gemeinsames Eisenbahnsystem ²
		nur technisch	unterschiedliche technische Teilsysteme ³	„ ⁴
		betrieblich und technisch	Kombination von oberen Zellen ⁵	unterschiedliche Eisenbahnsysteme

¹ Je nach Staat z. B. Eigentum des Bundes (DE), Hochgeschwindigkeits-/konventionelles Netz (ES), ² typischerweise nur Lok und Personalwechsel z. B. zwischen ex-jugoslawischen o. ex-UdSSR Republiken, ³ üblicherweise u. a. Bahnstromsysteme (z. B. 25 kV 50 Hz AC – 1,5 kV DC in FR), Zugbeeinflussungssysteme, Sprachfunk, ⁴ rein technische Transitionen ohne Änderung betrieblicher Anforderungen sind an internationalen Staatsgrenzen bislang nicht bekannt, ⁵ einige EIU, z. B. die SBB, stufen ihre Strecken in zwei Geschwindigkeitskategorien mit unterschiedlichen betrieblichen Regeln und getrennten Regelwerken für die Ausrüstung von ETCS L2.

Tab. 1: Einstufung von Schnittstellen und Transitionen

des Eurotunnels, in den kommenden Jahren mit ETCS ausgerüstet.

Übergänge einer Strecke mit grenzüberschreitendem Tunnel

Die wichtigsten Übergänge auf einer grenzüberschreitenden Strecke können in die folgenden sieben Hauptkategorien unterteilt werden [4]:

- Nationales Recht
- Bahnstromsystem
- Leit- und Sicherungstechnik (LST)
- Datenfunk
- Zugfunk
- angewandte Betriebssprache
- Betriebliches Regelwerk.

Zwei zusätzliche wichtige Übergänge sind im grenzüberschreitenden Tunnel zu berücksichtigen:

- Netzgrenze bzw. Grenzpunkt zwischen den Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU)

- bauliche und betriebliche Sicherheitsanforderungen im Tunnel.

Neue europäische Eisenbahntunnel sind nach den Anforderungen der TSI-Sicherheit in Eisenbahntunneln (TSI-SRT) gebaut. Diese wird durch nationale Vorschriften ergänzt, die zusätzliche Aspekte wie z. B. die Breite von Rettungstunneln, Anforderungen an die Instandhaltung oder die technische Ausrüstung regeln [5]. Zwei relevante Übergänge sind die Bahnstromsysteme und die ETCS-Ausrüstung. Abb. 2 gibt einen Überblick über die Bahnstromsysteme [6], und Abb. 3 zeigt die verwendeten ETCS-Baselines für Neubaustrecken in Europa sowie die ETCS-Ausrüstung dieser Tunnel [7].

Transitionen an Staatsgrenzen

Der Internationale Eisenbahnverband (UIC) [8] definiert Schnittstellen als Übergänge zwischen unterschiedlichen technischen Systemen, betrieblichen Anforderungen so-

wie nationalen Gesetzen und Vorschriften. Schnittstellen entstehen, sobald sich mindestens ein politischer (z. B. Staatsgrenze), rechtlicher, technischer oder betrieblicher Aspekt ändert. Auch Kombinationen dieser Faktoren sind möglich. Derartige Systemgrenzen wirkten bislang oft als Hürden für den nahtlosen Schienenverkehr. Im Eisenbahnbereich bezeichnet der Begriff Transition das Verfahren für den Übergang von den technischen Merkmalen eines Eisenbahnsystems auf die eines anderen [8]. Tab. 1 zeigt Schnittstellen und zugehörige Transitionen in Abhängigkeit von ihrer geographischen Lage.

Solange keine vollständige Interoperabilität im europäischen Eisenbahnraum besteht, empfiehlt [8] eine Konfiguration der Teilsysteme nach zwei Strategien: die Doppelausrüstung von Strecken oder Transitionen, mit dem Ziel, dass die Züge reibungslos von einem System in das andere übergehen können. Trotz

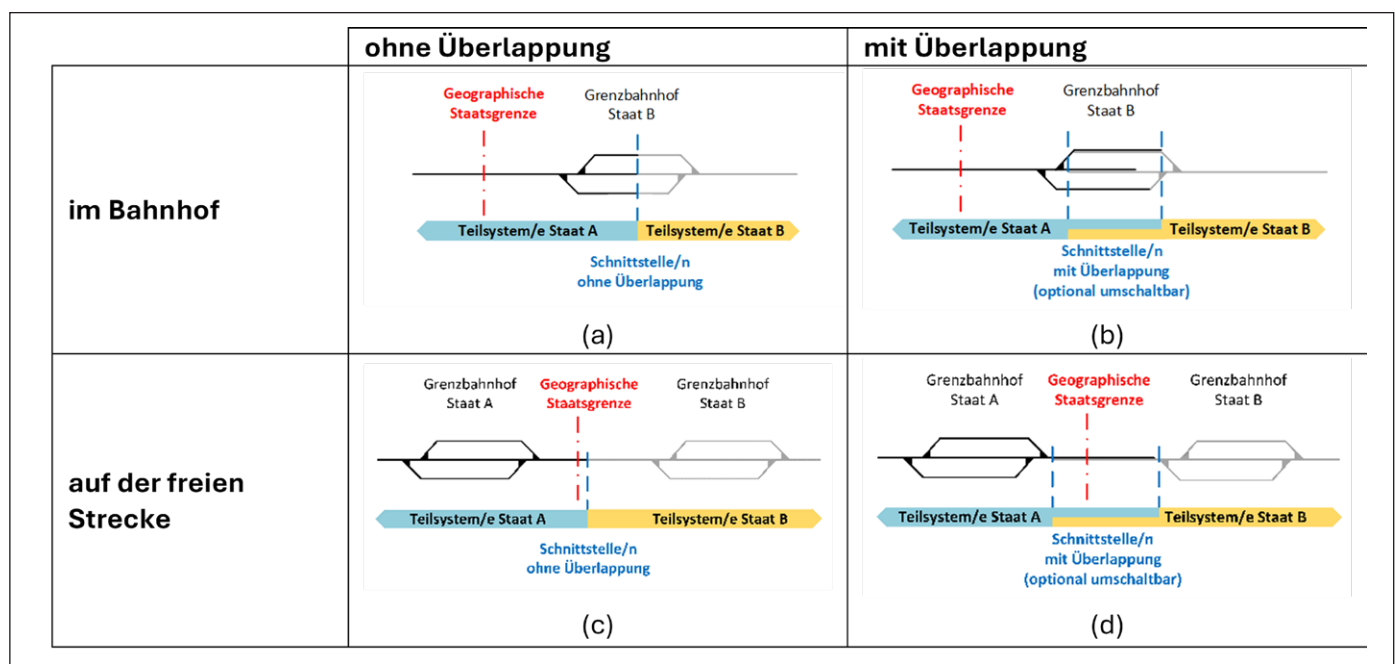


Abb. 4: Verlegung von Transitionen an Staatsgrenzen

der Vielzahl an möglichen Systemübergängen [9] lassen sich bestimmte Muster erkennen (Abb. 4). Der Grenzabschnitt bezeichnet den Teil einer Strecke, an dem die Schnittstellen der Teilsysteme verlegt sind [8]. Dieser Bereich kann sich befinden:

- **im Bahnhof** (Abb. 4a und b): Übergänge wurden in der Vergangenheit aufgrund des damaligen Stands der Technik (z. B. primitive Fernsteuerungssysteme) nur an besetzten Betriebsstellen durchgeführt. Außerdem mussten alle Züge an den Grenzbahnhöfen aufgrund der Zollkontrollen halten. Auf der freien Strecke gab es jedoch Trennstellen (nach Abb. 4c),
- **auf der freien Strecke** (Abb. 4c und d): Für neu geplante grenzüberschreitende Projekte wird diese Variante bevorzugt, da der aktuelle Stand der Technik einen sicheren und leistungsfähigen Übergang auch bei hohen Geschwindigkeiten zwischen Teilsystemen erlaubt. Die Transition kann dadurch auch abseits der Staatsgrenze geplant werden, was betriebliche Abläufe optimiert (z. B. Fehmarnbelt-Tunnel).

In beiden Szenarien können jeweils zwei Untervarianten unterschieden werden. Eine davon ist die Variante mit Systemüberlappung im Bahnhof – wie sie beispielsweise im Bahnhof Domodossola (IT) umgesetzt ist, wo das Bahnstromsystem in bestimmten Hauptgleisen umgeschaltet werden kann. Ein Beispiel ohne Überlappung ist die LST im Grenzbahnhof Bayerisch Eisenstein. Neu projektierte ETCS-Transitionen haben Überlappungen (vgl. Abb. 4d), etwa beim Übergang des Global System for Mobile Communication-Railway (GSM-R) zwischen zwei Ländern. In solchen Fällen muss sich das ETCS-Fahrzeug zunächst im neuen Radio Block Centre (RBC) anmelden. Die Verbindung zum vorherigen RBC darf erst nach erfolgreicher Übergabe abgebaut werden. Die Automatisierung von bestimmten Vorgängen, wie beispielsweise das Schließen und Öffnen des Hauptschalters oder das Absenken und Anheben des Pantographen, würde den Betrieb der Transition erheblich vereinfachen.

ETCS-Transitionen im Tunnel in Europa

Modelle für grenzüberschreitende Eisenbahntunnel

Vor dem Baubeginn müssen sich die beiden beteiligten Staaten für eines der beiden folgenden Modelle entscheiden. Diese Entscheidung hat Auswirkungen auf die technische und betriebliche Planung, die bauliche Umsetzung, die Gestaltung der Transitionen sowie den späteren Betrieb der Strecke.

Das Zwei-EIU-Modell

Das Zwei-EIU-Modell besteht aus einem Transitionsabschnitt, in dem sich die Teilsystemgrenzen befinden. Der Grenzbahnhof muss nicht unbedingt die erste Betriebsstelle nach der Staatsgrenze sein. In der Regel handelt es sich

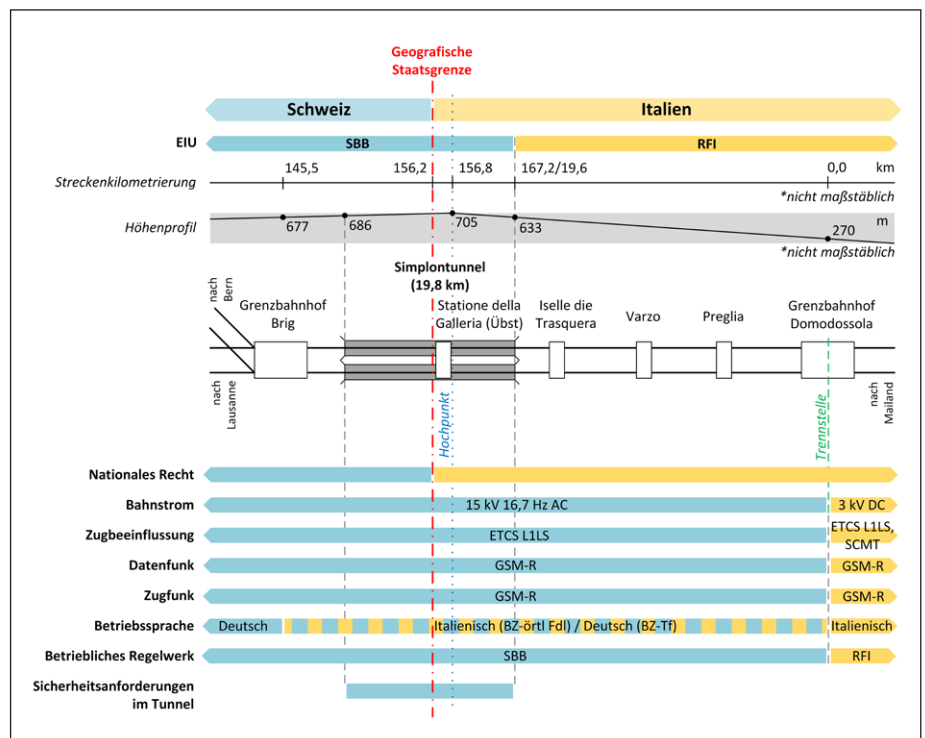


Abb. 5: Transitionsabschnitt im Simplontunnel

bei bestehenden Strecken i. d. R. um einen größeren Bahnhof, an dem sich früher das Zollamt befand. Ein Beispiel ist der Grenzbahnhof Domodossola an der Simplonstrecke (Abb. 5), wo die Übergänge von GSM-R, ETCS, Bahnstrom, Regelwerk und Betriebssprache nach klassischem Ansatz innerhalb des Bahnhofs erfolgen.

Bei einer Aufrüstung der Strecke auf ETCS Level 2 wäre es notwendig, das RBC/RBC-Handover auf die freie Strecke zu verschieben, da das ETCS-Fahrzeuggerät dieses nicht in der Betriebsart Shunting (SH) durchführen kann [10]. Bei Neubaustrecken ist die Identifizierung eines Grenzbahnhofs weniger eindeutig. Sie

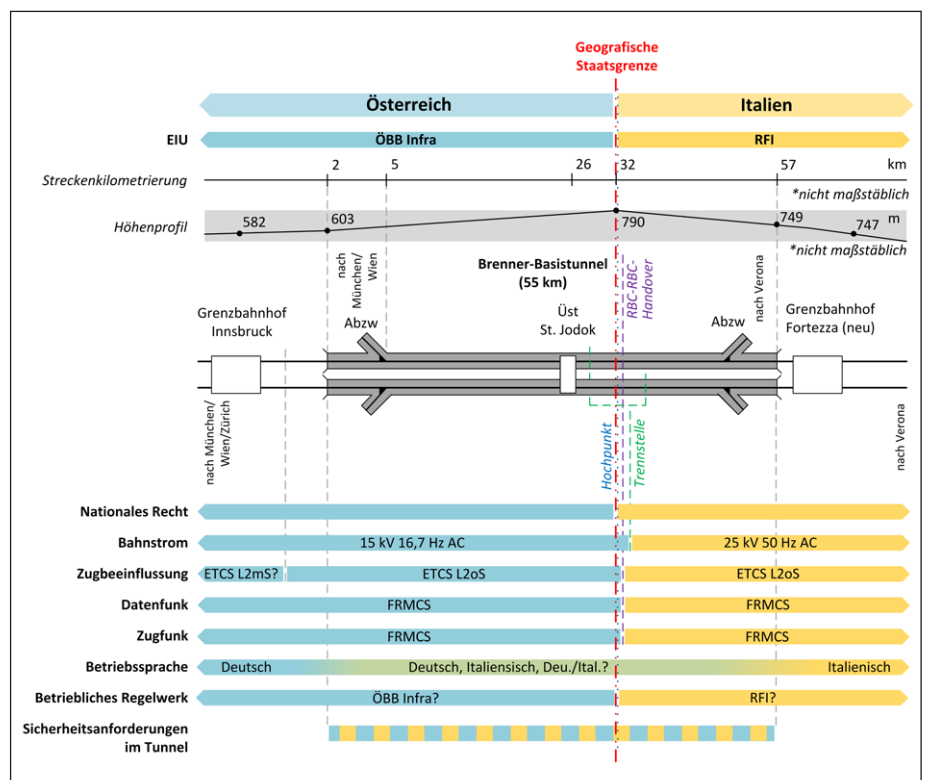


Abb. 6: Mögliche Verlegung der Transitionen im Brenner Basistunnel

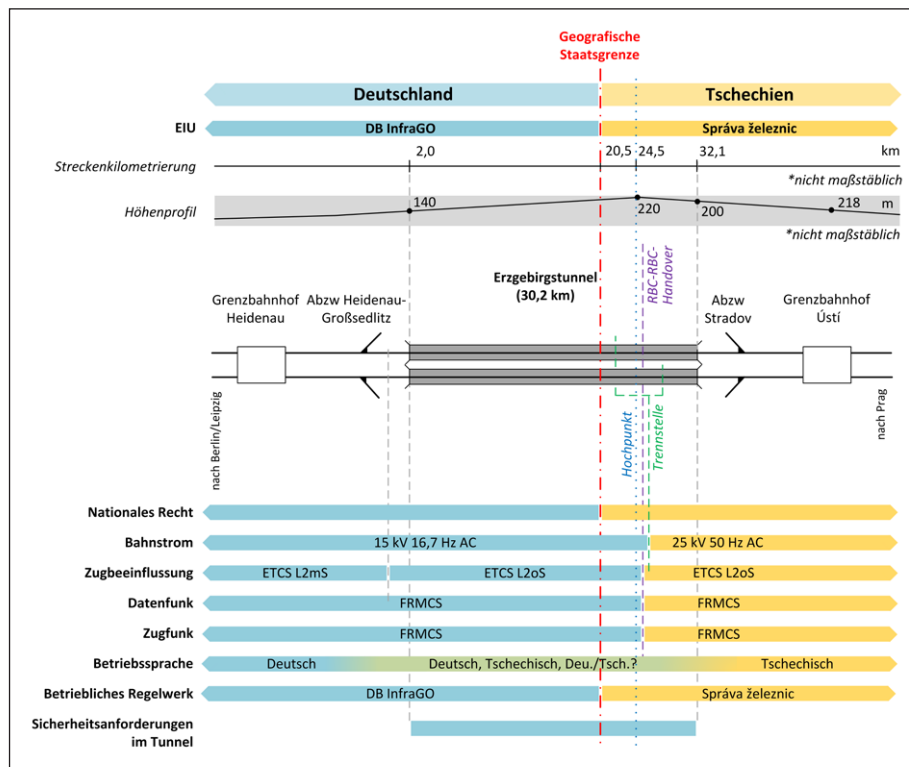


Abb. 7: Mögliche Verlegung der Transitionen im Erzgebirgstunnel

sind in der Regel die benachbarten Zugmeldestellen auf beiden Seiten des Transitionsabschnitts. In aktuellen Neubauprojekten wie dem Brenner Basistunnel und der NBS Dresden – Prag (vgl. Abb. 6 [11] und Abb. 7) ist die Systemtrennstelle der Oberleitung auf freier Strecke geplant – möglichst nahe der geografischen Staatsgrenze bzw. am Hoch-

punkt des Tunnels. Die Trennstelle wird in Hauptfahrtrichtung hinter dem Hochpunkt im Regelgleis angeordnet, um zu verhindern, dass ein Zug bei fehlender Traktion am Hochpunkt zum Stillstand kommt und nicht mehr anfahren kann.

Wenn das RBC/RBC-Handover auf der freien Strecke im Tunnel projektiert ist, wird

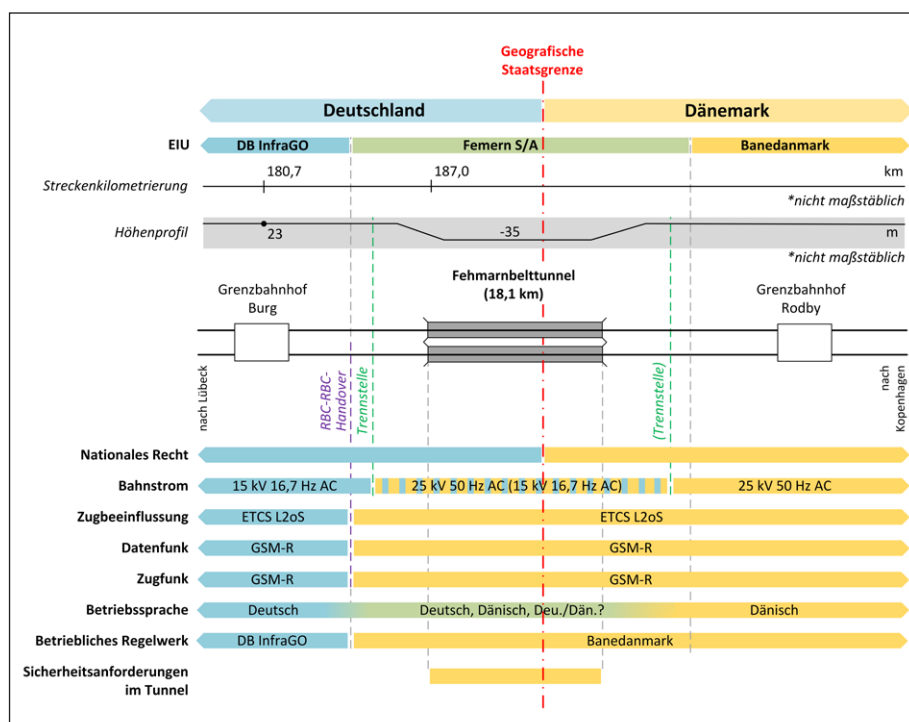


Abb. 8: Option für die Verlegung von Transitionen des Fehmarnbelttunnels

die Implementierung der durchgehenden Betriebsart Reversing (RV) nicht oder eingeschränkt möglich, da derzeit kein RBC-Wechsel während RV möglich ist [12]. Das Zurücksetzen müsste dann betrieblich geregelt werden und kann zu erheblichen Zeitverlusten führen. Außerdem können Balisengruppen nicht mehr als „Last Relevant Balise Group“ (LRBG) im Mode RV verwendet werden. Ebenso ist die Übermittlung von Paket 68 (Track Condition) – beispielsweise zur Ansteuerung von Hauptschalter-Aus oder Stromabnehmer-Senken – nicht mehr möglich [13]. Dies sind drei erhebliche Nachteile dieser Konfiguration.

Andere Projekte (Abb. 8) vermeiden die Positionierung des RBC-Wechsels und die Trennstellen des Bahnstromsystems im Tunnel [12]. In diesem Fall kann die Anwendung des Modus RV im Ereignisfall nahtlos verwendet werden. In den in Abb. 6 und Abb. 7 dargestellten Beispielen befinden sich Zugmeldestellen in unmittelbarer Nähe beider Tunnelportale. Das RBC/RBC-Handover soll nicht in diesen Betriebsstellen projektiert werden, da dort rangiert wird. Außerdem ist die Verlegung von einem RBC/RBC-Handover oder einer Systemtrennstelle der Oberleitung im Rahmen von anderen Betriebsstellen wie Abzweigstellen nicht erwünscht, da die Kosten und Komplexität steigen.

Brenner Basistunnel und Erzgebirgstunnel verfügen über ähnliche Rahmenbedingungen: Abzweigstellen nahe der Tunnelportale, zwei Bahnstromsysteme sowie die geplante Einführung von FRMCS und ETCS Level 2 ohne ortsfeste Signale (L2oS). Der Brenner Basistunnel kann somit als Referenz für den etwa zehn Jahre später in Betrieb gehenden Erzgebirgstunnel dienen.

Das Drei-EIU-Modell

Das Drei-EIU-Modell findet Anwendung, wenn ein unabhängiger Infrastrukturbetreiber (auch Tunnelbetreiber) den grenzüberschreitenden Tunnel sowie einen Teil der Strecke beiderseits der geografischen Staatsgrenze betreibt. In der Regel ist der Zuständigkeitsbereich des Tunnelbetreibers durch die Grenzbahnhöfe begrenzt. Folglich entstehen zwei Systemübergänge:

- Zwischen dem Infrastrukturbetreiber des Staates A und dem Tunnelbetreiber
- zwischen dem Tunnelbetreiber und dem Infrastrukturbetreiber des Staates B.

In Europa existieren zwei grenzüberschreitende Tunnel, die nach dem Drei-EIU-Modell betrieben werden: Zum einen der Eurotunnel, betrieben durch Getlink, der in den kommenden Jahren mit ETCS ausgerüstet werden soll, und zum anderen der Perthustunnel, betrieben durch die EIU LFP Perthus (Abb. 9) [14]. Der Abschnitt des Tunnelbetreibers ist technisch unabhängig von den angrenzenden EIU und wird über eine eigene Betriebszentrale gesteuert. Das

Bahnstromsystem entspricht dem eines benachbarten Infrastrukturbetreibers, ist jedoch über Systemtrennstellen von dessen Netz entkoppelt. Etwa 4 km vom französischen Tunnelportal steht ein Überwerfungsbaupunkt für Regel- und Gegengleis, da in Spanien Rechtsverkehr und in Frankreich Linksverkehr herrscht [14]. Die Übergangsstrecke zwischen dem ETCS vom LFP und dem Klasse-B-Zugbeeinflussungssystem KVB von SNCF Réseau ist ein kurzer Abschnitt, der zwar mit KVB ausgerüstet ist, aber von der Betriebszentrale des LFP gesteuert wird. Der südliche Bahnhofskopf des Rangierbahnhofs Perpignan wird daher von der Betriebszentrale der LFP bedient [14]. Durch die Verlagerung der Transition auf die freie Strecke entfällt eine ETCS-Ausrüstung der Gleise im Rangierbahnhof, was Komplexität und Kosten deutlich reduziert.

Zusammenfassung

Die bisherigen und geplanten Transitionen an Landesgrenzen können aufgrund ihrer Lage im Netz kategorisiert werden. Die Projektierung von Übergängen und Teilsystemen in internationalen Eisenbahntunneln kann entweder einem Zwei- oder Drei-EIU-Modell folgen. Diese fundamentale Entscheidung bestimmt die nachfolgende Planung der Teilsysteme. Die Analyse zeigt, dass bei Neubauprojekten ausschließlich das Zwei-EIU-Modell angewendet wird und die Transitionen (Bahnstromsystem, GSM-R bzw. FRMCS, ETCS etc.) im Tunnel geplant werden. Dies limitiert die uneingeschränkte Nutzung der Betriebsart RV und bestimmter ETCS-Funktionen (Paket 68), da RBC-Wechsel hierfür noch nicht spezifiziert sind. Eine Verlegung dieser Transitionen an die Tunnelportale könnte diese Beschränkungen eliminieren. Existieren jedoch Betriebsstellen an den Tunnelportalen, wird die Auslagerung von Transitionen aus dem Tunnel aufgrund ihrer Komplexität und der Herausforderungen bei RBC-Wechseln in der Betriebsart SH erschwert.

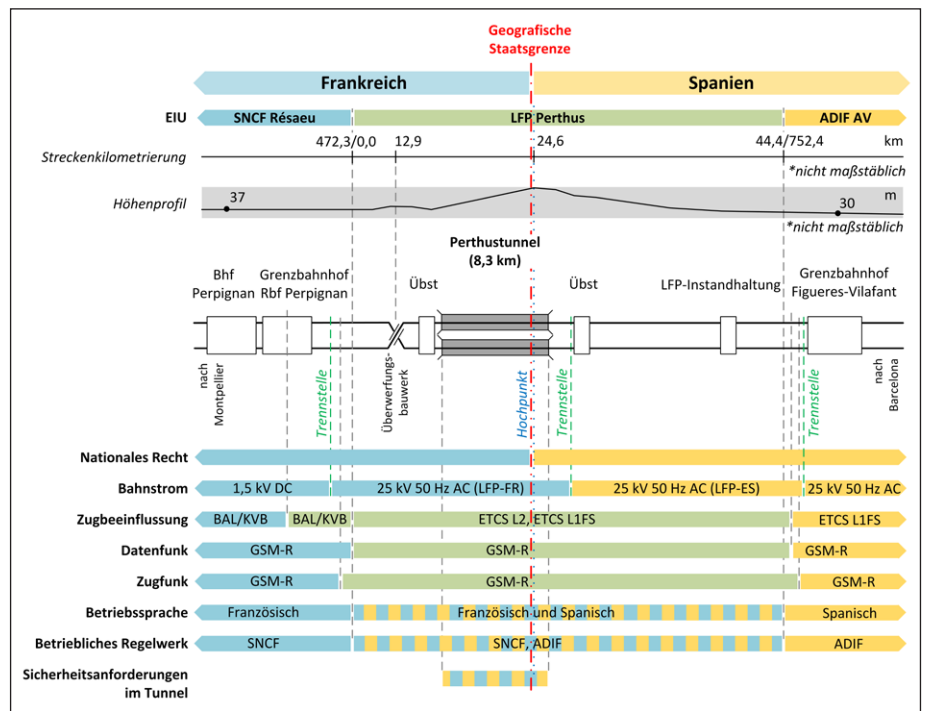


Abb. 9: Perthustunnel und LFP-Strecke zwischen Figueres und Perpignan

DOI 10.61067/251013

QUELLEN

- [1] Doppelbauer, J.; Rhein, D.; Angelov, Ch.; Hartberger, M.: Einführung des neuen Zugsignalisierungssystems ERTMS/ETCS aus der Sicht eines Herstellers. In: e&i Elektronik und Informationstechnik (117), S. 231–235, 3/2000
- [2] Sippel, L.; Nolte, J.; Maarfield, S.; Wolff, D.; Roux, L.: Comprehensive analysis of the existing cross-border rail transport connections and missing links on the internal EU borders. Final Report. Hg. v. Europäische Kommission, 3/2018. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/studies/cb_rail_connections_en.pdf, zuletzt geprüft am 21.06.2025
- [3] Worth, J.: Cross-border Rail, 2024. Online verfügbar unter https://umap.openstreetmap.fr/en/map/crossborderrail-all-the-borders_935041#6/51.014/2.000, zuletzt geprüft am 21.06.2025
- [4] Brune, L.: ETCS an Landesgrenzen. In: Trinckauf, J.; Maschek, U.; Kahl, R. (Hgg.): ETCS in Deutschland. 2. Aufl. Hamburg: GRT Global Rail Academy and Media GmbH, S. 346–358, 2024
- [5] Dupuis, H.: Compared analysis of rules and practices in railway tunnels. 12. ERA Budapest Workshop. Budapest (Ungarn), 10/2024
- [6] Ihme, J.: Schienenfahrzeugtechnik. Antriebsmaschinen, Leistungsübertragung, 3. Aufl.: Springer Fachmedien, 2016

- [7] Brune, L.: Von der Unmöglichkeit, ETCS an Landesgrenzen zu standardisieren (und warum wir es dennoch versuchen sollten), DB Netze, 2022
- [8] Internationaler Eisenbahnverband – UIC: Konzept für einen optimalen Grenzabschnitt. Entwurf 1.0. UIC, Paris (Frankreich), 02/2020
- [9] Brune, L.; Kahnert, P.; Kalkreiber, J.; Lens, B.: ETCS an Landesgrenzen: Interoperabilität und Ausrüstungsvarianten. In: SIGNAL + DRAHT (117) 7+8/2021, S. 23–35,
- [10] UNISIG: ERTMS/ETCS Subset 026: System Requirements Specification. Chapter 4: Modes and Transitions, v4.0.0, 2023
- [11] Albfalterer, R.: Vortrag: Projekt Brenner Basistunnel. Planung der Ausrüstung – aktueller Stand, 11/2022
- [12] Simón-Muzás, J.: Grenzüberschreitende Eisenbahntunnel mit ETCS-Ausrüstung, Hauptseminararbeit, TU Dresden, 12/2024
- [13] Rothbarth, T.: Anwendung des ETCS-Mode Reversing in Eisenbahntunneln, Diplomarbeit, TU Dresden, 02/2025
- [14] TP Ferro: Networks Statement, 2011. Online verfügbar unter <https://web.archive.org/web/2011110010642>, zuletzt geprüft am 22.06.2025



Juan Simón-Muzás, M.Sc.
Werkstudent, Masterstudent
Eisenbahningenieurwesen und
Maschinenbauingenieur
Digitale Schiene Deutschland
DB InfraGO AG, Dresden
juan.simon-muzas
@deutschebahn.com



Dipl.-Ing. (FH) Richard Kretzschmar
Doktorand und wissenschaftlicher
Mitarbeiter
TU Dresden und Deutsches Zentrum
für Schienenverkehrsforschung (DZSF),
Dresden
richard.kretzschmar@tu-dresden.de



Dipl.-Ing. Christian Scholtka
Projektingenieur LST (Neubaustrecke
Dresden – Prag) und PSV-Signaltechnik
DB InfraGO AG, Dresden
christian.scholtka@deutschebahn.com