



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**



**ELEKTRISCHE
BAHNEN**



Institut für Bahntechnik GmbH

Kurzfassung

Variantenuntersuchung zur Bahnenergieversorgung des Erzgebirgstunnels auf der geplanten Neubaustrecke Dresden – Prag unter Nutzung von Simulationsverfahren

Kurztitel: Variantenuntersuchung Bahnenergieversorgung
Erzgebirgstunnel

Version: 2.0

Datum: 02.07.2024

Autoren: Dipl.-Ing. Anna Fišer

Dipl.-Ing. Jan Pape

Dr.-Ing. Sven Körner

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

1 Motivation und Zielstellung

Im Zuge der Schaffung transeuropäischer Eisenbahnkorridore im sogenannten TEN-Netz wird aktuell eine leistungsfähige Neubaustrecke zwischen der sächsischen Landeshauptstadt Dresden und der tschechischen Hauptstadt Prag geplant (siehe Abbildung 1).

Die Neubaustrecke soll einerseits die bestehende zweigleisige Hauptstrecke durch das Elbtal über Bad Schandau (D) und Děčín (CZ) entlasten und andererseits in die geplante Hochgeschwindigkeitsstrecke von Ústí nad Labem nach Prag in Tschechien einmünden, um zukünftig die Transportkapazität der Eisenbahn auf dieser wichtigen europäischen Relation deutlich zu erhöhen und die Fahrzeiten signifikant zu verkürzen.

Bestandteil der neuen Hochleistungsstrecke wird ein circa 30 km langer Erzgebirgstunnel sein, der zu etwa zwei Dritteln seiner Länge auf deutschem und zu einem Drittel auf tschechischem Staatsgebiet verläuft. Für den Tunnel existiert ein gemeinsamer Planungsraum.

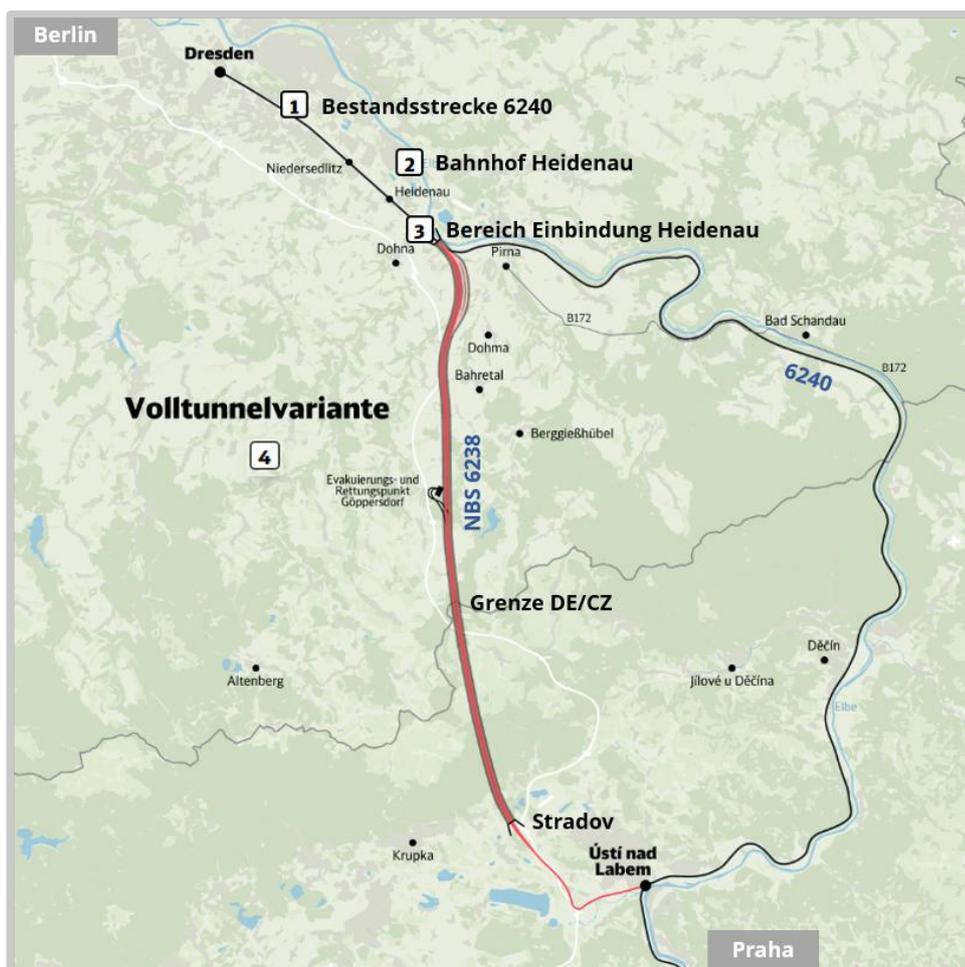


Abbildung 1: Streckenverlauf der geplanten Neubaustrecke Dresden – Prag im Abschnitt Dresden – Ústí nad Labem, Volltunnelvariante

Ein Übersichtslängsschnitt der Strecke ist in Abbildung 2 inklusive Bergprofil dargestellt.

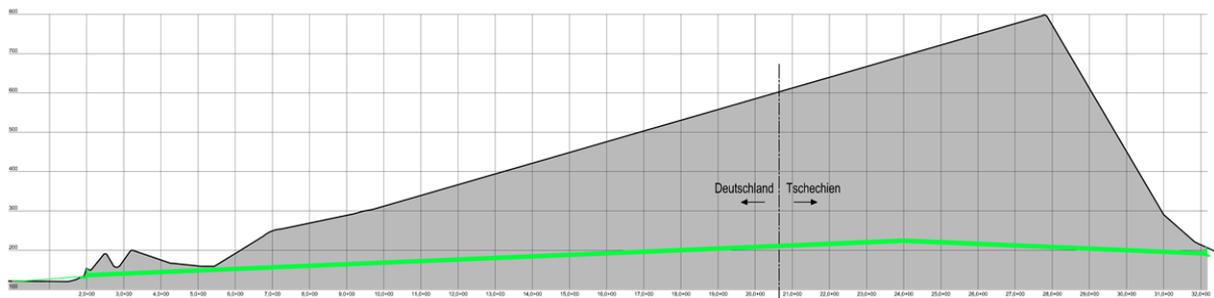


Abbildung 2: Übersichtslängsschnitt Erzgebirgstunnel, [1]

Für die Neubaustrecke mit dem grenzüberschreitenden Erzgebirgstunnel wurden im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung [2] ausgehend vom geplanten Betriebsprogramm verschiedene Varianten der Bahnenergieversorgung entwickelt und hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit und Vorteilhaftigkeit bewertet.

Insbesondere wurden dabei die Lage der Systemtrennstelle (STS) zwischen dem deutschen AC 15 kV 16,7 Hz-Bestandsnetz und dem geplanten AC 25 kV 50 Hz-Bahnenergiesystem (bisher: DC 3 kV) in Tschechien, die Gestaltung der Einspeisungen und die Wahl der Fahrleitungsbauart im Tunnel mit modernen Simulationswerkzeugen untersucht.

Beim Entwurf der Speisestruktur insbesondere für den Erzgebirgstunnel sind neben den elektrotechnischen Parametern auch Aspekte des Bahnbetriebs, der Verfügbarkeit, der Tunnelsicherheit und der Instandhaltung zu berücksichtigen.

Aufbauend auf die wissenschaftliche Untersuchung [2] wurde eine vertiefende Systemuntersuchung zur Speisekonzeption [7] durchgeführt und eine weitere Variante der Bahnenergieversorgung simuliert und analysiert. Alle Untersuchungsvarianten werden hinsichtlich der Spannungshaltung, Ausnutzung der Stromtragfähigkeit und Verlustenergie der Fahrleitungsanlage technisch und energetisch beurteilt und verglichen.

2 Variantenbildung und Methodik

2.1 Variantenbildung

Die Neubaustrecke bindet auf beiden Seiten des Erzgebirgstunnels in die bestehenden Bahnnetze mit ihren nationalen Elektrifizierungssystemen ein. Während auf deutscher Seite das System AC 15 kV 16,7 Hz mit leistungsfähigen 16,7-Hz-Erzeugeranlagen bereits vorhanden ist, soll in Tschechien zukünftig das System AC 25 kV 50 Hz die u. a. im Raum Ústí nad Labem derzeit bestehende Bahnenergieversorgung mit DC 3 kV ablösen.

Bei der Herstellung einer Verbindung zwischen den beiden Elektrifizierungssystemen muss das Zusammenschalten oder Überbrücken der Fahrleitungsabschnitte mit unterschiedlicher Spannung und Frequenz ausgeschlossen werden. Deshalb ist auf der Neubaustrecke für den Wechsel der Spannungssysteme zwingend eine Systemtrennstelle erforderlich.

Die Variantenbildung der Bahnenergieversorgung des Erzgebirgstunnels stützt sich auf die folgenden strukturellen und betrieblichen Untersuchungskriterien:

1. Systemstruktur und Schaltungskonzept
 - a. Lage der Systemtrennstelle
 - b. Gestaltung der Einspeisungen
2. Fahrleitungsbauart im Tunnel
 - a. Kettenwerk
 - b. Deckenstromschiene
3. Betriebskonzept
 - a. Tagfahrplan
 - b. Nachtfahrplan

jeweils für Normal- und Worst-Case-Betrieb

Die untersuchten Varianten werden nach den möglichen Lagen der Systemtrennstelle wie folgt gebildet:

Variante 1	STS an Nähe Staatsgrenze	(Tunnelscheitelpunkt)
Variante 2	STS in CZ	(Tunnelportal, außerhalb des Tunnels)
Variante 3	STS in DE	(Tunnelportal, außerhalb des Tunnels)

Die notwendigen Einbindungen in die übergeordneten Energieversorgungssysteme in Deutschland und in Tschechien sind für alle aufgestellten Varianten technisch machbar.

Für die **Variante 1** (Abbildung 3) ist nur eine beidseitig einseitige Speisung des Tunnelabschnittes aus dem 16,7-Hz- und dem 50-Hz-Bahnstromnetz möglich. Am Tunnelscheitelpunkt ist jeweils eine Kuppelstelle (Querkupplung) zwischen den beiden separat gespeisten Tunnelröhren vorgesehen, um die Spannungshaltung zu verbessern.

Aufgrund von Unsicherheiten in der bisherigen Planung und der unklaren Lage des entweder neu zu errichtenden 50-Hz-Unterwerks in Tschechien oder der Nutzung von einem der bereits bestehenden Netzanschlusspunkte in Koštov oder in Světec werden verschiedene Speiselängen auf dem tschechischen Staatsgebiet untersucht. Somit ergeben sich für die Variante 1 drei unterschiedliche Ausführungen:

- 1A Neues Unterwerk in unmittelbarer Nähe des Tunnelportals CZ
- 1B Bestehender Unterwerks-Standort in Koštov (bisher DC 3 kV), ca. 10 km vom Tunnelportal CZ entfernt
- 1C Bestehender Unterwerks-Standort in Světec (bisher DC 3 kV), ca. 30 km vom Tunnelportal CZ entfernt

In den Varianten 1B und 1C ist aus Gründen der Spannungshaltung ein Autotransformatoren-System vom Unterwerk bis zum Tunnelportal auf der tschechischen Seite vorgesehen (alle 10 km werden zwei Autotransformatoren angeordnet). Im Tunnel selbst werden keine Autotransformatoren installiert.

Das bestehende Gleichrichterunterwerk in Koštov ist an das 22-kV-Netz angeschlossen. Für das Gleichrichterunterwerk in Světec besteht ein direkter Anschluss an das 110-kV-Netz. Der Unterwerksstandort in Světec verfügt somit über eine deutlich höhere Kurzschlussleistung als der näherliegende Standort in Koštov.

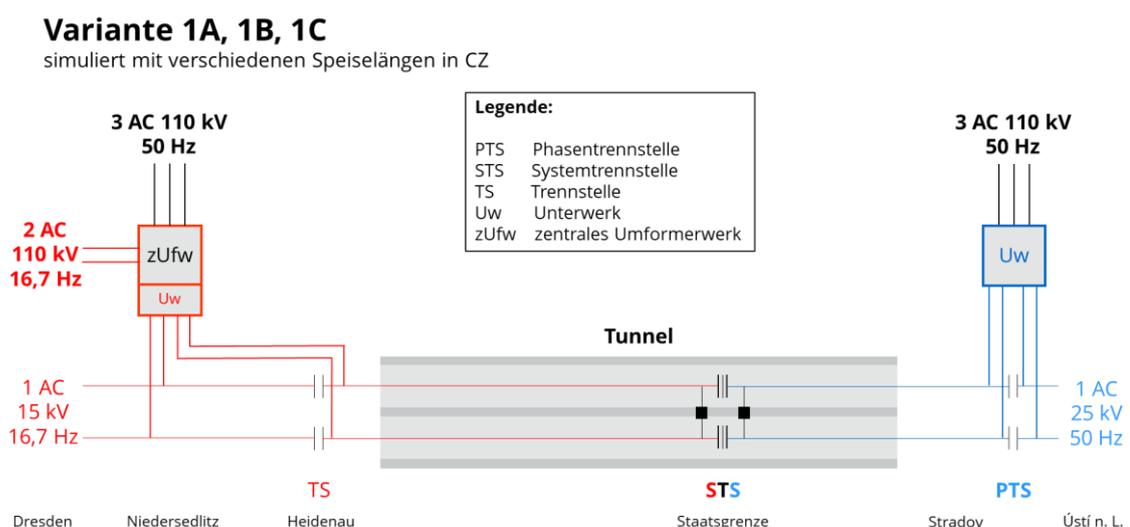


Abbildung 3: Variante 1, Systemtrennstelle Tunnelscheitelpunkt, beidseitig einseitige Speisung des Tunnels mit AC 15 kV 16,7 Hz und AC 25 kV 50 Hz

Für die Varianten 2 und 3 wird jeweils zwischen einer einseitigen (A) und einer zweiseitigen (B) Speisung des Erzgebirgstunnels unterschieden.

Anhand der Simulationsergebnisse aus Variante 1 kann die **Variante 2A** (STS in CZ, einseitige Speisung des Tunnels aus DE mit AC 15 kV 16,7 Hz) aufgrund der schlechten Werte der Spannungshaltung direkt ausgeschlossen werden. Ein technisch zwar denkbare, aber insbesondere im Tunnel aufwendiges Autotransformatorensystem mit 2AC 2x15 kV 16,7 Hz wird ausgeschlossen.

Für die Bahnenergieversorgung des Erzgebirgstunnels mit einer Systemtrennstelle in Tschechien wird somit ausschließlich die zweiseitige Speisung mit dem System AC 15 kV 16,7 Hz (**Variante 2B**, Abbildung 4) betrachtet. Diese erfolgt aus dem bestehenden Unterwerk in Dresden-Niedersedlitz und einem neuen dezentralen 16,7-Hz-Umrichterwerk in der Nähe des tschechischen Tunnelportals. Für den Parallelbetrieb des Unterwerks und des Umrichterwerks ist die Spannung-Pilotsignal-Regelung vorgesehen, für die in Deutschland in vergleichbaren Speisekonfigurationen langfristig positive Betriebserfahrungen vorliegen.

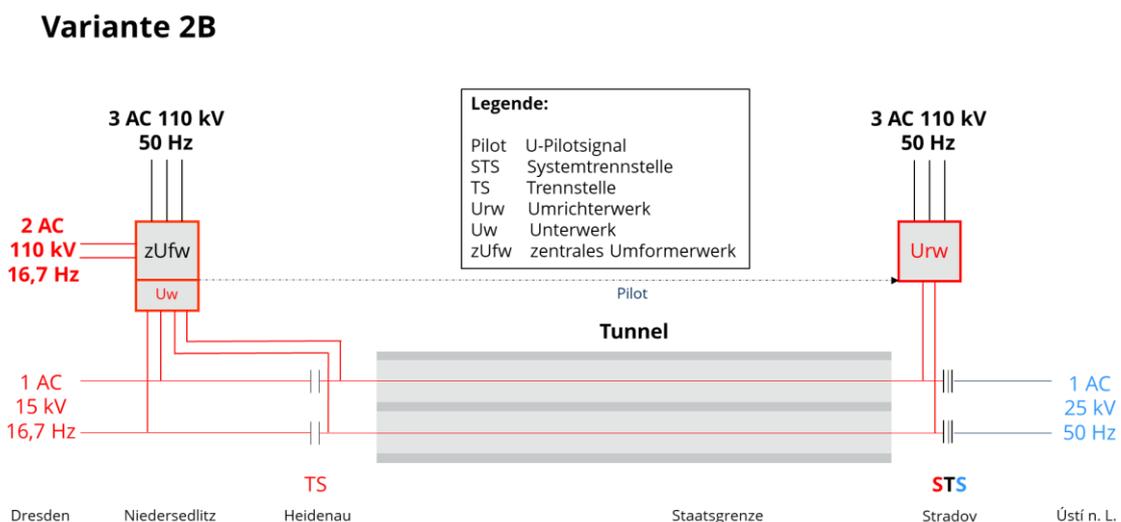


Abbildung 4: Variante 2B, Systemtrennstelle CZ, zweiseitige Speisung des Tunnels mit AC 15 kV 16,7 Hz

Die **Variante 3A** (STS in DE, einseitige Speisung aus CZ mit AC 25 kV 50 Hz) kann wegen einer zu schlechten Spannungshaltung direkt ausgeschlossen werden. Ein technisch zwar denkbare, aber insbesondere im Tunnel aufwendiges Autotransformatorensystem mit 2AC 2x25 kV 50 Hz wird ausgeschlossen.

Für die **Variante 3B** mit Systemtrennstelle in DE existieren mehrere technisch mögliche Untervarianten, die den Erzgebirgstunnel entweder beidseitig einseitig oder zweiseitig mit AC 25 kV 50 Hz speisen.

Im einfachsten Fall werden auf beiden Seiten des Tunnels klassische 50-Hz-Unterwerke vorgesehen. Für den Anschluss dieser Unterwerke in Deutschland und in Tschechien kommen zwei unterschiedliche und räumlich weit voneinander entfernte 110-kV-Netze zum Einsatz, wodurch nicht die gleichen Phasenlagen gewährleistet werden können. Aus diesem Grund benötigt diese Variante neben der Systemtrennstelle in Deutschland zusätzlich eine Phasentrennstelle im Tunnel (**Variante 3B-1**), womit ein betrieblicher Nachteil einer doppelten Schutzstreckenstruktur entsteht. Zudem kann damit nur eine beidseitig einseitige Speisung realisiert werden, die bereits in Variante 1 grundsätzlich untersucht und als nachteilig erkannt wurde. Somit wird diese Untervariante nicht weiterverfolgt.

Ohne Phasentrennstelle im Tunnel würde es über die 25-kV-Fahrleitung zu einer dauerhaften Kopplung der speisenden 110-kV-/ 50-Hz-Netze kommen, die zu unerwünschten Transferleistungen führen kann. Hierfür müssten Spezialtransformatoren in den Unterwerken eingesetzt werden (**Variante 3B-2**), für die es im Bahnbereich keine Referenzen und Erfahrungen gibt. Daher wird auch diese Untervariante als nachteilig ausgeschlossen.

Durch den Einsatz eines an das 50-Hz-Unterwerk in Tschechien mittels Spannung-Pilotsignal-Regelung gekoppelten 50-Hz-Umrichters in Deutschland (**Variante 3B-3**, Abbildung 5) entfällt das Problem der direkten Netzverbindung auf der 110-kV-Ebene über die 25-kV-Fahrleitung. Weiterhin besteht keine Notwendigkeit einer Phasentrennstelle am Tunnelscheitelpunkt, woraus eine vorteilhafte zweiseitige Speisung des Tunnels resultiert. Für die Pilotsignalregelung gibt es in Deutschland langjährige Erfahrungen aus dem 16,7-Hz-Netz, die auf die 50-Hz-Speisung direkt übertragbar sind.

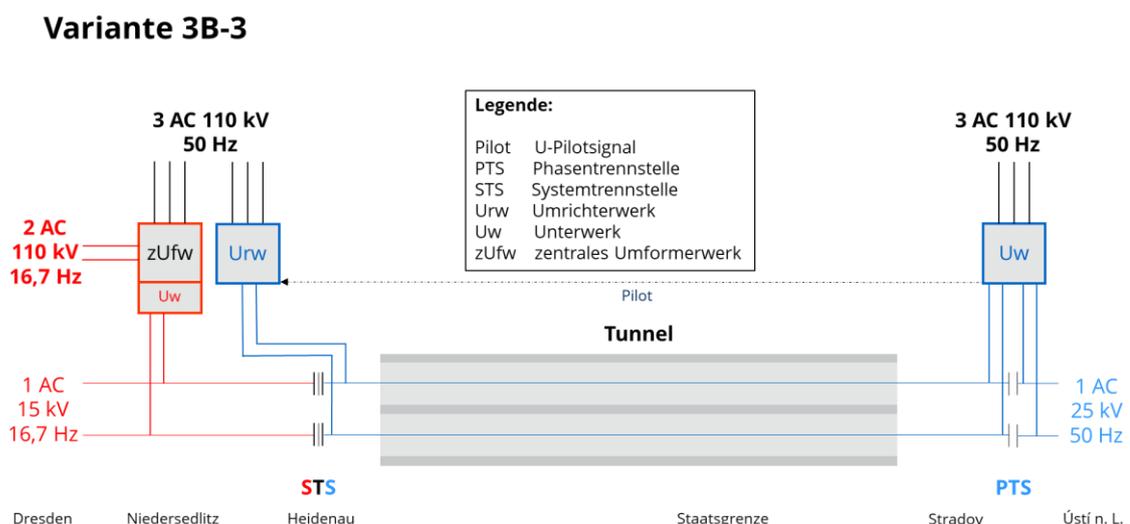


Abbildung 5: Variante 3B, Systemtrennstelle DE, zweiseitige Speisung des Tunnels mit AC 25 kV 50 Hz

2.2 Methodik

Für den Tunnel wurden auf Basis der Verkehrlichen Aufgabenstellung (VAst) [3] und der Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchung (EBWU) [4] Betriebskonzepte gebildet, welche bahnbetrieblich und fahrdynamisch unter Nutzung der kommerziellen Software OpenTrack [5] im Zeitschrittverfahren modelliert wurden. Hierbei wurden jeweils sowohl ein Tag- und ein Nachtfahrplan jeweils als Normal- und Worst-Case-Betriebsfall (Zeitraum maximaler Auslastung) unter Ansatz typischer Zug-, Fahrzeug- und Antriebsdaten untersucht und die höchsten Belastungen ermittelt.

Die Tabelle 1 veranschaulicht die im Modell untersuchten Betriebsprogramme.

Tabelle 1: Anzahl der Züge je Richtung

Zugkategorie ¹	Normalbetrieb, Tagfahrplan	Worst-Case-Betrieb, Nachtfahrplan
SPFV	1 je 60 Minuten	-
SPNV	1 je 120 Minuten	-
SGV	4 je 60 Minuten	12 je 60 Minuten

Der Erzgebirgstunnel wird in den Nachtstunden ausschließlich durch den Güterverkehr genutzt. Der Worst-Case-Betrieb des Nachtfahrplans mit einem dichten Takt von 5 Minuten ergibt die höchste Verkehrslast, prägt die Gesamtenergiemenge im Netz und bestimmt somit die notwendige Anlagenauslegung. Der Tagfahrplan im Normalbetrieb wird durch hohe Leistungen der einzelnen Fahrzeuge dominiert und ist energetisch repräsentativ für den Dauerbetrieb.

Im Zusammenwirken mit der Bahnbetriebssimulation in OpenTrack [5] wurden durch Co-Simulation mit der kommerziellen Software OpenPowerNet [6] das elektrische Netz der Bahnenergieversorgung modelliert und die sich einstellenden elektrischen Lastflüsse in den elektrischen Energieanlagen quasistationär berechnet.

Im Ergebnis der Simulationen liegen einerseits die Fahrschaubilder sämtlicher Züge zur Validierung der Betriebsprogramme sowie andererseits alle Spannungs-, Strom- und Leistungsverläufe über Zeit und Ort einschließlich der zugehörigen Energien und Verlustbilanzen zur Bewertung der untersuchten Varianten vor. Die Simulationsergebnisse erlauben einen qualitativ und quantitativ hochwertigen Vergleich der untersuchten Betriebsszenarien und Energieversorgungskonzepte. Für die anschließende Bewertung aus elektrotechnischer Sicht wurden technisch-wirtschaftliche Kriterien herangezogen.

¹ SPFV - Schienenpersonenfernverkehr, SPNV – Schienenpersonennahverkehr, SGV - Schienengüterverkehr

3 Bewertungskriterien und Ergebnisse

3.1 Bewertungskriterien

Die Variantenuntersuchung zur Beurteilung der technischen Machbarkeit, Leistungsfähigkeit, Energieeffizienz und Verfügbarkeit der zukünftigen Bahnenergieversorgung stützt sich auf die folgenden normativen und wirtschaftlichen Bewertungskriterien:

1. Spannungshaltung
 - a. minimale Spannung am Stromabnehmer nach DIN EN 50163
 - b. mittlere nutzbare Spannung am Stromabnehmer nach DIN EN 50388-1
2. Belastung und Stromtragfähigkeit der Fahrleitung
3. Verlustenergie der Fahrleitungsanlage ab Unter-/Umrichterwerk

Aufgrund des frühen Projektstandes (Vorplanung) erfolgte bei der Untersuchung der Bahnenergieversorgung des Erzgebirgstunnels vorerst noch keine Beurteilung der vorgelegerten Netze einschließlich der Unterwerksauslegung und der Komponentendimensionierung. Im Fokus der technischen Machbarkeit des grenzüberschreitenden Streckenabschnittes stehen neben der strukturellen und betrieblichen Betrachtung der Bahnenergieversorgung vor allem die Anforderungen an die Oberleitungsausrüstung des Erzgebirgstunnels, die für die weitere Planung frühzeitig zu ermitteln sind.

3.2 Ergebnisse

Zur Beurteilung der **Spannungshaltung** im Fahrleitungsnetz nach den gültigen Normen DIN EN 50163 und DIN EN 50388-1 wurde eine ortsabhängige Auswertung der zeitlichen Spannungsverläufe aller Fahrzeuge für alle Fahrleitungsabschnitte vorgenommen. Diese hat ergeben, dass die minimal auftretenden Spannungen am Stromabnehmer für alle untersuchten Varianten im Normal- sowie Worst-Case-Betrieb innerhalb normativer Grenzen liegen. Die zweiseitige Speisung führt dabei in allen Betriebsfällen sowohl mit einem Kettenwerk als auch mit einer Deckenstromschiene zu deutlich stabileren Spannungsverhältnissen im Tunnel.

Hinsichtlich der mittleren nutzbaren Spannung $U_{\text{meanuseful}}$ nach EN 50388 sind die variantenspezifischen Anlagendimensionierungen und -auslegungen ausreichend bemessen.

In der Variante 1A mit Kettenwerk im Worst-Case-Betrieb liegt der Wert der mittleren nutzbaren Spannung um 3 V unter dem normativen Vorgabewert, was aufgrund der gewählten restriktiven Eingangsparameter jedoch vernachlässigbar ist. In allen anderen Szenarien liegt der Wert über dem normativen Vorgabewert.

Die Anforderungen an die Spannungshaltung werden für die **Variante 3B-3** (STS in Deutschland, 2-seitige Speisung bei 25 kV, 50 Hz Nennspannung) sowohl im Normalbetrieb als auch im Worst-Case-Betrieb **am besten** erfüllt.

In Abbildung 6 sind die im gesamten 2-h-Simulationszeitraum aufgetretenen ortsabhängigen Minimalspannungsverläufe an den Stromabnehmern aller Fahrzeuge richtungsbezogen dargestellt.

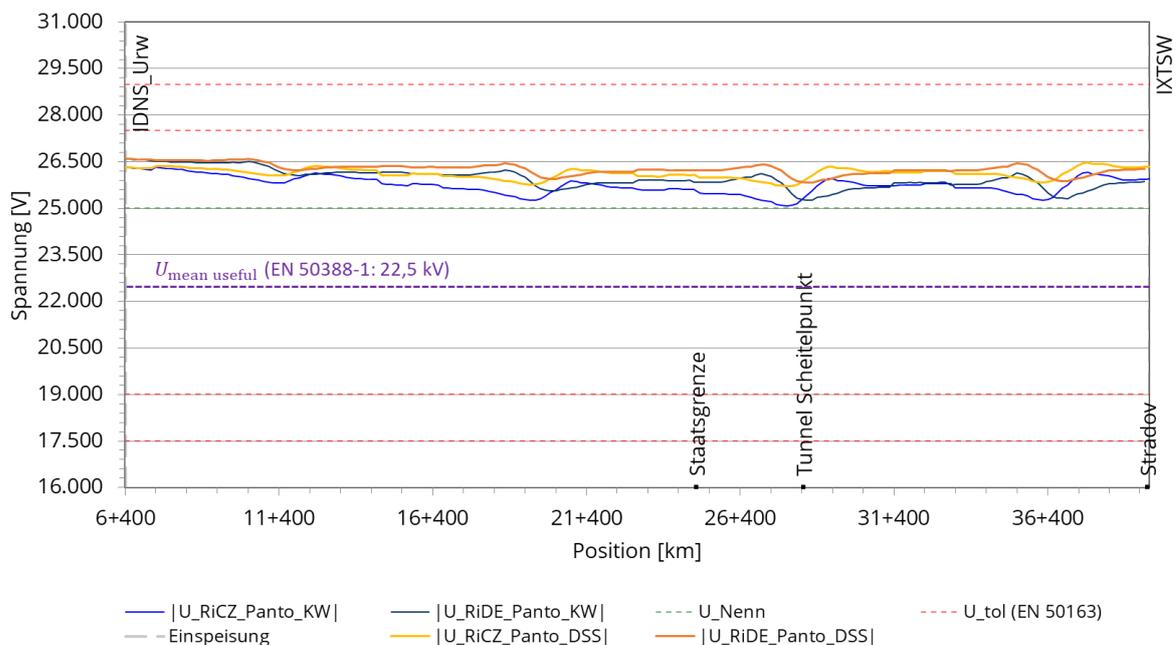


Abbildung 6: Vergleich der Spannungshaltung Kettenwerk vs. Deckenstromschiene, Variante 3B-3 im Worst-Case-Betriebsfall, 25 kV Netzanteil, Legende: KW – Kettenwerk, DSS – Deckenstromschiene, RiDE – Gleis in Richtung Deutschland, RiCZ – Gleis in Richtung Tschechien)

Für die Beurteilung der **Belastung der Fahrleitungsanlage** wurden für die Zeitbereiche 1 s, 300 s und 900 s die maximal auftretenden Ströme in den elektrischen Leitern variantenspezifisch ermittelt (exemplarische Darstellung in Abbildung 7) und zeitlich bezogen zusammengefasst.

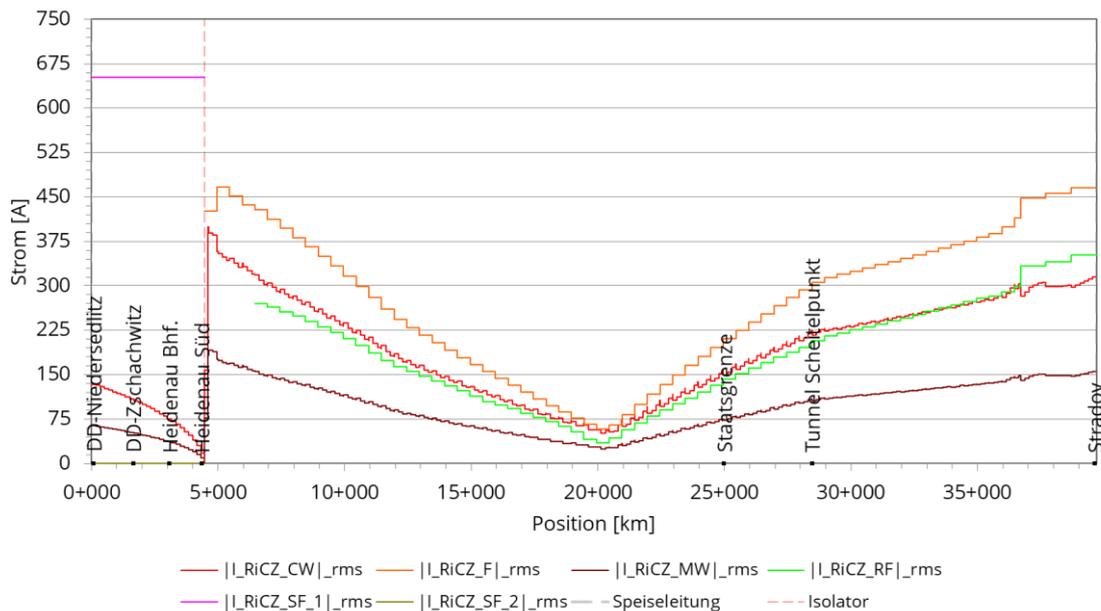


Abbildung 7: Maximale Belastungsströme (Fahrleitung und Speiseleitungen) in Variante 2B mit Kettenwerk, Legende: CW – Fahrdraht, MW – Tragseil, RF – Rückleiter, SF – Speiseleitung, F – Verstärkungsleitung

Anschließend wurde der Quotient aus dem jeweiligen Maximalstromwert zur Stromtragfähigkeit gebildet. Dieser Ausnutzungsfaktor ist für alle untersuchten Varianten in Tabelle 3 dargestellt und farblich visualisiert.

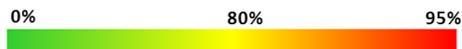
Der ermittelte 900-s-Wert wurde mit dem Wert der Dauerstromtragfähigkeit (siehe Tabelle 2) verglichen. Der-300-s-Wert wurde im Vergleich mit dem 1,3-fachen Dauerwert und der 1-s-Spitzenwert im Vergleich zum 2-fachen Dauerwert überschlägig bewertet. Gerade im 1-s-Kurzzeitbereich sind die Stromtragfähigkeitswerte tatsächlich um Größenordnungen höher als das Zweifache der Dauerstromtragfähigkeit. Diese vereinfachte Herangehensweise wurde in der aktuellen Planungsphase gewählt, da auf aufwändige Berechnungen der Strombelastbarkeit mit thermodynamischen Eingangsparametern, die bisher ebenfalls noch unbekannt sind, verzichtet werden sollte.

Die abgeschätzten Stromtragfähigkeitswerte gelten für 16,7 Hz. Bei 50 Hz reduzieren sich die Werte in geringem Maße. Durch die höhere Nennspannung im 50 Hz System sind die Ströme jedoch überproportional bei gleicher Leistung geringer, sodass überschlagsmäßig mit den gleichen Stromtragfähigkeitswerten wie bei 16,7 Hz gerechnet wurde.

Tabelle 2: Dauerstromtragfähigkeit der Leiter

	Dauerstromtragfähigkeit in A
Re 250 mit Verstärkungsleitung	1.230
Deckenstromschiene Sicat SR mit Fahrdraht AC-120	3.446
2xAl 240 (Bündelleiter)	1.378

Tabelle 3: Ausnutzung der Stromtragfähigkeit von Fahrleitung und Speiseleitung (SL 1)



				15 kV								25 kV				
Ausnutzung Stromtragfähigkeit in %				Re250+VL		SL 1		DSS		SL 1		Re250+VL		DSS		
	Fahrplan		Variante	Zeitbereich	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE	RiCZ	RiDE
STS TSP	Tag	Normalbetrieb	1A	1 s	84%	76%	51%	54%	26%	25%	56%	59%	29%	36%	7%	10%
				300 s	88%	81%	67%	71%	29%	26%	66%	69%	18%	25%	6%	8%
				900 s	75%	69%	57%	60%	25%	21%	56%	59%	19%	22%	6%	7%
	Nacht	Worst-Case-Betrieb		1 s	78%	64%	53%	57%	26%	21%	57%	61%	25%	27%	7%	7%
				300 s	89%	75%	63%	67%	28%	20%	61%	65%	17%	21%	5%	5%
				900 s	116%	98%	82%	87%	37%	25%	80%	84%	22%	28%	7%	7%
STS DE	Tag	Normalbetrieb	3B-3	1 s	66%	30%							43%	34%	13%	10%
				300 s	20%	16%							52%	40%	17%	13%
				900 s	17%	17%							45%	37%	15%	12%
	Nacht	Worst-Case-Betrieb		1 s	30%	22%							52%	29%	16%	9%
				300 s	13%	16%							58%	35%	19%	11%
				900 s	17%	21%							75%	46%	25%	15%
STS CZ	Tag	Normalbetrieb	2B	1 s	62%	55%	24%	25%	16%	17%	24%	25%				
				300 s	57%	44%	34%	36%	18%	20%	34%	35%				
				900 s	48%	39%	32%	34%	16%	17%	32%	33%				
	Nacht	Worst-Case-Betrieb		1 s	59%	34%	27%	29%	20%	13%	27%	29%				
				300 s	65%	44%	37%	39%	20%	15%	37%	39%				
				900 s	83%	57%	48%	50%	26%	20%	47%	50%				

Die Ergebnisse zeigen, dass die **Stromtragfähigkeit** der Kettenwerksfahrleitung bei einseitiger Speisung mit dem deutschen Nennspannungsniveau (**Variante 1A**) grenzwertig bis ungenügend ist. In der Variante 1A sind die Belastungen im Worst-Case-Betrieb Nacht bei der Ausführung mit Kettenwerk unzulässig hoch. Bereits im Normalbetrieb ist bei diesem Szenario die Ausnutzung der Stromtragfähigkeit am höchsten.

In der **Variante 3B-3** haben die untersuchten Fahrleitungen im Tunnelbereich (Kettenwerk und Deckenstromschiene) eine ausreichende Stromtragfähigkeit im Vergleich zu den auftretenden Strömen im Betrieb.

Das Ziel der **energetischen Betrachtung** ist die variantenspezifische Beurteilung des Gesamtenergiebedarfs sowie die Ermittlung der Verlustenergie der Fahrleitungsanlage. Hierfür wurden die Verluste der Fahrleitungsanlage aus den Simulationen für einen 2-h-Simulationszeitraum und Normalbetrieb nach EBWU (siehe [4]) bestimmt. Diese sind in folgender Abbildung 8 gegenübergestellt, wobei die unterschiedlichen Gesamtverluste zwischen den einzelnen Varianten auf die variantenspezifisch unterschiedlich langen Streckenanteile im 15-kV- bzw. 25-kV-Netz zurückzuführen sind.

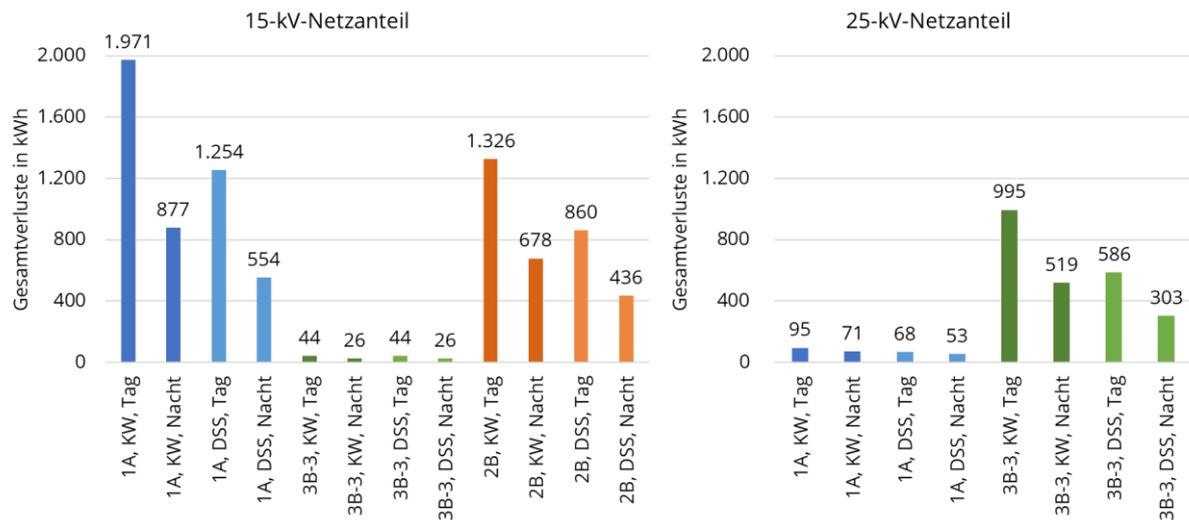


Abbildung 8: Gesamtverluste der Fahrleitungsanlage (2-h-Simulationszeitraum, Normalbetrieb nach EBWU), Legende: Variante (1A, 2B, 3B-3) gemäß Kapitel 2.1, KW – Kettenwerk, DSS – Deckenstromschiene

Um eine direkte Vergleichbarkeit der Verlustenergie im 24-h-Betrieb zu gewährleisten, muss die gleiche Tagestransportleistung als Vergleichsbasis zugrunde gelegt werden. Auf Basis der Tagesganglinien aus der EBWU wurden richtungsspezifisch die Zugzahlen je Zugklasse ermittelt. Für jede Zugklasse (SPFV, SPNV, SGV) wurde variantenspezifisch die Verkehrsarbeit in Tonnenkilometern sowie die aufgenommene Energie am Stromabnehmer aus den Normalbetriebsszenarien Tag und Nacht netz- und richtungsspezifisch bestimmt. Aus der aufgenommenen Energie am Stromabnehmer und den Verlusten in der Fahrleitung wurde ein Verhältnis gebildet und zur Ermittlung der gesamten Verlustenergie genutzt. Der dabei entstehende Fehler aufgrund spezifisch geringerer Verluste bei besserer Spannungshaltung im Vergleich zur simulierten Spitzenstunde geht zur sicheren Seite und wird in der Betrachtung vernachlässigt. Die Einzelergebnisse werden anschließend variantenbezogen zu den Werten des 24-h-Betriebs, zu den Gesamtverlusten der Fahrleitungsanlage, der Tagestransportleistung und zum Gesamtenergiebedarf der aufgenommenen Energie am Stromabnehmer zusammengestellt.

Im Normalbetrieb wird innerhalb von 24 h eine betriebliche Transportleistung von ca. 14.143.940 tkm erbracht. Die modellierten Zugfahrten nehmen dabei am Stromabnehmer eine absolute Energie in Höhe von ca. 426.101 kWh auf.

Auf Basis der simulierten Ergebnisse kann der Gesamtenergiebedarf ab Unterwerksausgang (Tabelle 4) sowie die Verlustenergie der Fahrleitungsanlage für das Betriebsprogramm eines Tages nach der EBWU (Tabelle 5) ermittelt und zwischen den Fahrleitungsarten verglichen werden. Das Maxima und das Minima der jeweiligen Werte sind farblich hervorgehoben.

Tabelle 4: Gesamtenergiebedarf ab Unterwerksausgang je 24 h

Variante	E_{KW}	E_{DSS}	$E_{KW} - E_{DSS}$	$(E_{KW} - E_{DSS}) / E_{KW}$
1A	442.312 kWh	436.375 kWh	5.937 kWh	1,34%
2B	438.054 kWh	434.033 kWh	4.021 kWh	0,92%
3B-3	434.089 kWh	430.826 kWh	3.263 kWh	0,75%
	Max	Min	Max-Min	(Max-Min) / Max
<i>Extremwerte</i>	<i>442.312 kWh</i>	<i>430.826 kWh</i>	<i>11.486 kWh</i>	<i>2,60%</i>

Tabelle 5: Verlustenergie der Fahrleitungsanlage je 24 h

Variante	$E_{KW,V}$	$E_{DSS,V}$	$E_{KW,V} - E_{DSS,V}$	$(E_{KW,V} - E_{DSS,V}) / E_{KW,V}$
1A	16.637 kWh	10.639 kWh	5.998 kWh	36,05%
2B	10.915 kWh	7.064 kWh	3.851 kWh	35,28%
3B-3	8.611 kWh	5.213 kWh	3.398 kWh	39,46%
	Max	Min	Max-Min	(Max-Min) / Max
<i>Extremwerte</i>	<i>16.637 kWh</i>	<i>5.213 kWh</i>	<i>11.424 kWh</i>	<i>68,67%</i>

Das Sunburstdiagramm der Abbildung 9 zeigt die hierarchische Gegenüberstellung der variantenspezifischen Verlustenergie der Fahrleitungsanlage für den 24-h-Betrieb mit tageszeit- und netzspezifischen Anteilen. Im Inneren des Kreises ist die Transportarbeit und die aufgenommene Energie am Stromabnehmer aufgetragen. Resultierend aus dem Betriebsprogramm ist sie für alle Varianten gleich und erlaubt somit eine entsprechende direkte Vergleichbarkeit der untersuchten Varianten. Im Uhrzeigersinn sind beginnend die Varianten mit höchster Verlustenergie der Fahrleitungsanlage (Variante 1A Kettenwerk) bis zur Variante mit der geringsten Verlustenergie der Fahrleitungsanlage (Variante 3B-3 Deckenstromschiene) geordnet dargestellt.

Nach Analyse der Simulationsergebnisse lassen sich die folgenden Aussagen ableiten:

- Variantenspezifisch ist die Verlustenergie bei Einsatz von Deckenstromschienen immer geringer als bei der Kettenwerkskonfiguration.
- Die Varianten mit zweiseitiger Speisung haben fahrleitungsspezifisch immer geringere Verluste als die einseitig gespeisten Varianten.
- Die Varianten, die größere Netzanteile mit höherer Nennspannung (25 kV) haben, haben stets die geringsten Verluste.
- Der Einsatz der Deckenstromschiene senkt das Verlustniveau gegenüber dem Kettenwerk je nach Variante um ca. 35 bis 39 %.
- Der Gesamtenergiebedarf sinkt mit Deckenstromschiene gegenüber Kettenwerk um maximal 1,34 % (einseitig gespeist) bzw. 0,92 % (zweiseitig gespeist).
- Die verlustminimale Variante (3B-3, zweiseitig, Deckenstromschiene) verringert gegenüber der Ausgangsvariante (1A, einseitig, Kettenwerk) das Verlustniveau um 68,67 % und den Gesamtenergiebedarf um 2,60 %.

Die energieeffiziente Konfiguration aller untersuchten Varianten ist die Variante 3B-3 mit Deckenstromschiene. Diese Variante hat die geringsten Gesamtverluste der Fahrleitungsanlage und somit auch den geringsten absoluten Gesamtenergiebedarf im Vergleich zu allen untersuchten Varianten. **Die Variante 3B-3 mit Deckenstromschiene** ist damit **aus elektrotechnischer Sicht die Vorzugsvariante**.



Tag	25 kV	637 kWh
Nacht	25 kV	212 kWh
Tag	25 kV	457 kWh
Nacht	25 kV	158 kWh
Tag	15 kV	281 kWh
Nacht	15 kV	83 kWh
Tag	15 kV	281 kWh
Nacht	15 kV	83 kWh
Nacht	25 kV	971 kWh

Abbildung 9: Hierarchische Gegenüberstellung der variantenspezifischen Verlustenergie der Fahrleitungsanlage (24-h-Betrieb mit tageszeit- und netzspezifischen Anteilen)

4 Empfehlung und weiterer Untersuchungsbedarf

Aufgrund der verbesserten Spannungshaltung, der höheren Stromtragfähigkeit und des geringeren Verlustniveaus (Annahme des gleichen Tunnelquerschnitts) wird im Erzgebirgstunnel der Einsatz einer Deckenstromschiene empfohlen.

Die durchgeführten Simulationen haben gezeigt, dass die Variante 3B-3 mit zweiseitiger Speisung mit AC 25 kV 50 Hz durch ein Unterwerk in Tschechien sowie einen Umrichter in Deutschland (Systemtrennstelle am Tunnelportal DE) als elektrotechnische Vorzugsvariante zu empfehlen ist. Aufgrund der Lage der Systemtrennstelle in Deutschland müssen weitere Kriterien (z. B. die Anfahrt eines Güterzuges in die Steigung vor dem Tunnelportal und die Länge der Systemtrennstelle bei manueller Bedienung des Fahrzeughauptschalters) bei der Variantenentscheidung berücksichtigt werden.

Wegen der deutlich besseren Spannungshaltung und der erheblich geringeren Leitungsverluste wird grundlegend die zweiseitige Speisung des Erzgebirgstunnels aus elektrotechnischer Sicht empfohlen.

Bei einer zweiseitigen Speisung des Erzgebirgstunnels ergeben sich jedoch Herausforderungen durch die Einspeisung auf unterschiedlichen Staatsgebieten durch zwei verschiedene Betreiber (DB AG und Správa Železnic). Beispielsweise wären mit der Eigentumszugehörigkeit der elektrotechnischen Anlagen verbundene Themen auf beiden Staatsgebieten zu klären (u.a. die Zutritts- und Schaltberechtigungen für einen 50-Hz-Umrichter in Deutschland oder einen 16,7-Hz-Umrichter in Tschechien). Aufgrund der unterschiedlichen Regelwerke der beiden Betreiber müssen Schnittstellen, Anwendungsbereiche und Zuständigkeiten abgestimmt und vereinbart werden. Weiterhin ist wegen der landesspezifischen Energietarife und steuerrechtlichen Abrechnung ein gemeinsames Strompreismodell oder eine Aufteilung der Energieabrechnung notwendig.

Neben der Problematik dieses Schnittstellenmanagements ist die Wirtschaftlichkeit einer zweiseitigen Speisung aufgrund

- einer nur geringen Reduktion des Verlustniveaus und
- einer vermutlich nicht ausreichenden Rentabilität der Anlageninvestition im Vergleich mit den Ersparnissen durch geringere Verlustenergie

über den Anlagenlebenszyklus zu untersuchen.

Für die bevorstehenden Planungsphasen werden darüber hinaus die folgenden technischen Untersuchungen empfohlen:

- detaillierte Betrachtung von Ausfallschaltzuständen insbesondere unter den Gesichtspunkten Tunnelsicherheit / Rettungskonzept, Instandhaltung und Betrieb mit verringerter Leistungsfähigkeit;
- Konzipierung und detaillierte Betrachtung der Bahnenergieversorgung auf tschechischer Seite insbesondere für den Knoten Ústí nad Labem und die Neubaustrecke Ústí – Praha unter Berücksichtigung der Umstellung von DC 3 kV auf AC 25 kV 50 Hz, der Einbindung der zu errichtenden leistungsfähigeren Unterwerke in das Landesnetz (ggf. mit Unsymmetrie) und der möglichen Speisearten (konventionelle Speisung mit Transformatoren und Phasentrennstellen versus Speisung durch Umrichter).

Quellenverzeichnis

- [1] *Inge Planung*: NBS Dresden - Prag: PA 2 – Erzgebirgsbasistunnel, Rettungskonzept, 2023.
- [2] Fišer, Anna: Variantenuntersuchung zur Bahnenergieversorgung des Erzgebirgstunnels auf der geplanten Neubaustrecke Dresden – Prag unter Nutzung von Simulationsverfahren. Dresden, Technische Universität Dresden, Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik. Diplomarbeit. 2023
- [3] *Menz; Prien*: Verkehrliche Aufgabenstellung für Strecken und Knoten Neubaustrecke Dresden - Prag im Abschnitt Heidenau - Ústí nad Labem, 2021.
- [4] *DB Netz AG (Hrsg.)*: EBWU NBS Dresden - Prag: Soll-Betriebsprogramm auf Soll-Infrastruktur, 2020.
- [5] <http://www.opentrack.ch>
- [6] <https://www.openpowernet.de>
- [7] IFB Institut für Bahntechnik GmbH: Untersuchung Bahnenergieversorgung Erzgebirgstunnel Strecke Dresden – Prag. Bericht Nr. 2024-712030-699.0. 2024