

Machbarkeitsstudie zur Verknüpfung von Bahn- und Energieleitungsinfrastrukturen

Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse und Empfehlungen der Gutachter

Bearbeiter: Leibniz Universität Hannover
Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik
Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
Appelstraße 9a
30167 Hannover

Technische Universität Dresden
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik
Professur für Elektrische Bahnen
Hettnerstraße 3
01069 Dresden

Technische Universität Clausthal
Institut für deutsches und internationales Berg- und Energierecht
Arnold-Sommerfeld-Straße 6
38678 Clausthal-Zellerfeld

1 Zusammenfassung

1.1 Los 1 „Technische Machbarkeit der Nutzung von Bahnstromtrassen für Freileitungs- und Kabeltrassen öffentlicher Energieversorgung“

Fasst man die Ergebnisse zu Los 1 „Technische Machbarkeit der Nutzung von Bahnstromtrassen für Freileitungs- und Kabeltrassen öffentlicher Energieversorgung“ zusammen, so lässt sich feststellen, dass eine Nutzung der Bahnstromtrassen für Freileitungs- und Kabeltrassen öffentlicher Energieversorgung grundsätzlich möglich ist. Hierbei ergeben sich jedoch erhebliche Unterschiede in der Bewertung der verschiedenen untersuchten Betriebsmittel. Die folgenden Szenarien sind für diese Bewertung untersucht worden:

Szenario A: Vollständiger Erhalt und Weiterbetrieb des bestehenden zentralen 16,7-Hz-Bahnstromübertragungsnetzes unter der Voraussetzung einer Leitungstrassenbündelung mit der 50-Hz-Landesenergieversorgung im bestehenden Trassenraum, keine Dezentralisierung der Bahnstromversorgung

Variante A1.1: Abbau der vorhandenen Bahnstromfreileitung und Neubau einer Freileitung in klassischer Stahlgitterbauweise mit je zwei 380-kV-Drehstrom- und 110-kV- Bahnstromkreisen

Variante A1.2: Abbau der vorhandenen Bahnstromfreileitung und Neubau einer Freileitung in Wintrack-Bauweise mit je zwei 380-kV-Drehstrom- und 110-kV-Bahnstromkreisen

Variante A2: Abbau der vorhandenen Bahnstromfreileitung und Neubau einer Freileitung mit je zwei ± 400 -kV-Gleichstrom und 110-kV- Bahnstromkreisen

Variante A3: Neubau von je zwei ± 320 -kV/1000-MW-Gleichstromkabeln links und rechts der vorhandenen Bahnstrom-Freileitung

Szenario B: Vollständiger oder zumindest teilweiser Entfall des 16,7-Hz-Bahnstromübertragungssystems, vollständige oder teilweise Dezentralisierung der Bahnstromversorgung

Variante B1.1: Abbau der vorhandenen Bahnstromfreileitung und Neubau einer Freileitung mit zwei 380-kV-Drehstromkreisen

Variante B1.2: Abbau der vorhandenen Bahnstromfreileitung und Neubau einer Freileitung in Wintrack-Bauweise mit zwei 380-kV- Drehstromkreisen

Variante B2: Abbau der vorhandenen Bahnstromfreileitung und Neubau einer Freileitung mit zwei ± 400 -kV-Gleichstromkreisen

Variante B3: Abbau der vorhandenen Bahnstromfreileitung und Neubau von vier ± 320 -kV/1000-MW-Gleichstromkabeln

Für eine grobe Abschätzung der Investitions- und Betriebskosten bei Nutzung des Bahnstromtrassenraumes für Höchstspannungs-(HöS-)Freileitungen und -Kabel der öffentlichen Energieversorgung wurde auf Basis von existierenden Studien ein Ausbauszenario im HöS-Netz entwickelt, das einen Leistungstransport auf vier Leitungsverbindungen von den Erzeugungsschwerpunkten in Norddeutschland in die Verbrauchszentren in Süddeutschland und damit dem zukünftig erwarteten Transportszenario von Nord nach Süd und Ost nach West Rechnung trägt. In diesem Ausbauszenario werden Leitungstrassen mit einer Gesamtlänge von 2246 km entlang entsprechender Bahnstromleitungen genutzt. Die Kostenbewertungen erfolgten mit der Barwertmethode über einen Zeitraum von 30 Jahren.

Bei der Untersuchung der 380-kV-Drehstrom-Freileitungen wurde festgestellt, dass eine Nutzung der Bahnstromtrasse mit den heute üblichen Stahlgitterkonstruktionen zu einer erheblichen Verbreiterung des Schutzstreifens führt. Die Maste sind zudem mit einer üblichen Höhe zwischen ca. 40 und 60 m etwa doppelt so hoch wie bei einer typischen 110-kV-Bahnstrom-Freileitung (etwa 30 m Höhe), was zu einer erhöhten Sichtbarkeit führt. Die auftretenden elektrischen und magnetischen Felder liegen unterhalb der Grenzwerte der 26. BImSchV, sind aber wesentlich höher als die einer Bahnstromfreileitung. Sollen die vorhandenen Bahnstromsysteme auf dem gleichen Gestänge mitgeführt werden, so ergibt sich hieraus eine weitere Erhöhung der Maste um ca. 10 m. Außerdem ist, insbesondere bei unsymmetrischen Fehlern, mit einer starken Beeinflussung der Bahnstromkreise durch die Drehstromkreise zu rechnen, die diese Lösung nur für kurze Strecken von einigen Kilometern Länge (ca. 50 km¹) geeignet macht. Aus wirtschaftlicher Sicht treten bei den klassischen 380-kV-Drehstrom-Freileitungen die insgesamt geringsten Kosten in Höhe von 6,79 Milliarden Euro ohne bzw. 7,23 Milliarden Euro bei Mitführung der Bahnstromsysteme (nur Investitions- und Betriebskosten) auf.

Eine erhebliche Verringerung der Trassenbreite lässt sich durch die Verwendung von alternativen Kompaktmastformen wie z. B. dem Wintrack-Mast erreichen. Mit diesen Masten wird

¹ A. Moser: Machbarkeitsstudie zur Verlegung von Bahn- und Drehstromkreisen auf einem Gemeinschaftsgestänge. Wissenschaftliche Studie der RWTH Aachen im Auftrag der DB Energie GmbH, 2012.

es dann auch möglich, die Schutzstreifenbreite einer Bahnstromfreileitung einzuhalten. Ein 380-kV-Wintrack-Mast ist dabei mit 57 m Höhe aber ebenfalls erheblich höher als ein typischer Bahnstrommast. Außerdem treten erhebliche Mehrkosten in Höhe von 3,09 Milliarden Euro gegenüber den Standard-Freileitungen auf, die sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Bei einer zu engen Führung der Leiterseile ist ferner mit Einschränkungen in der Betriebsführung zu rechnen, da eine Besteigung der Maste, z. B. zu Wartungszwecken, nur unter Abschaltung beider Stromkreise möglich ist. Weiterhin bestehen heute noch kaum Betriebserfahrungen mit Kompaktmasten, und eine gemeinsame Führung von Drehstrom- und Bahnstromkreisen ist aufgrund der großen Beeinflussung ebenfalls auf kurze Strecken (siehe oben) beschränkt.

Auch 380-kV-Drehstromkabel sind prinzipiell im Trassenraum einer Bahnstromfreileitung einsetzbar, wobei sich etwa vier Drehstromkreise im Schutzstreifen der Bahnstromfreileitung unterbringen lassen. Hierdurch wird zwar ungefähr die Übertragungsleistung einer Drehstrom-Doppelfreileitung erreicht, diese nimmt aber aufgrund der hohen kapazitiven Ladeströme schon für kurze Längen ab. Aus diesem Grund sind die Ladeströme der Kabel bereits ab Längen von ca. 25-30 km durch die Aufstellung von Drosselspulen zu kompensieren. In einer Studie im Auftrag des BMU² wurde ermittelt, dass dieser hohe technische Aufwand und die daraus resultierenden Mehrkosten sowie die hohen Investitionskosten Drehstrom-Kabel für die in dieser Machbarkeitsstudie angedachte großräumige Energieübertragung über längere Strecken ungeeignet machen.

Die Untersuchung von ± 400 -kV-Gleichstrom-Freileitungen ergab, dass diese mit den klassischen Stahlgittermasten ebenfalls erheblich breitere Schutzstreifen und deutlich höhere Maste erfordern als eine typische Bahnstrom-Freileitung. Prinzipiell ist aber auch hier der Bau von Gleichstrom-Kompaktmasten mit den oben genannten Vorteilen denkbar, wodurch wie bei den Drehstrom-Kompaktmasten entsprechende Mehrkosten entstehen. Da solche Maste aber bisher noch nicht ausgeführt wurden, besteht hier noch Untersuchungs- und Entwicklungsbedarf.

Weitere Mehrkosten entstehen bei der HGÜ dadurch, dass eine Kopplung mit dem Drehstromnetz nur über Umrichter erfolgen kann. Dies schlägt sich nicht nur in höheren Investitions- sondern auch in höheren Verlustkosten im Vergleich zu der Drehstrom-Übertragung nie-

² L. Hofmann, C. Rathke, M. Mohrmann: BMU-Studie "Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen" Bericht der Arbeitsgruppe Technik/Ökonomie., Energieforschungszentrum Niedersachsen, Göttingen: Cuvillier Verlag, 2012.

der. Die Barwerte der Gesamtkosten sind bei der HGÜ mit Freileitungen daher für das betrachtete Netzausbauszenario um ca. 3 Milliarden Euro höher als bei der Drehstrom-Übertragung mit Standard-Freileitungen. Dies entspricht einem Mehrkostenfaktor von 1,40.

Sollen die Bahnstromfreileitungen auf dem gleichen Gestänge mitgeführt werden, sind bei der Nutzung der HGÜ Vorteile gegenüber der Drehstrom-Leitung zu erwarten. Diese resultieren daraus, dass hier mit wesentlich geringeren gegenseitigen Beeinflussungen zu rechnen ist und so auch lange Parallelführungen technisch möglich sein sollten. Da für diese Variante keine Betriebserfahrungen vorliegen, besteht allerdings noch ein erheblicher Untersuchungs- und Entwicklungsbedarf. Insgesamt betrachtet scheint aber die Nutzung der HGÜ-Technologie bei einer Parallelführung mit Bahnstromkreisen auf einem gemeinsamen Gestänge die technisch sinnvollste Lösung zu sein.

Die Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder der HGÜ-Freileitung zeigte bei den hier betrachteten Mastbildern vergleichsweise geringe Feldstärken. Da für Gleichfelder in der 26 BImSchV bisher keine gesetzlichen Grenzwerte definiert wurden, kann hier kein Nachweis der Zulässigkeit geführt werden. Es steht aber zu erwarten, dass die elektrischen und magnetischen Emissionen beim Bau einer HGÜ-Freileitung aufgrund ihrer geringen Höhe unproblematisch sein werden.

Der Bau von ± 320 -kV-Gleichstromkabeln im Trassenraum der Bahnstromfreileitung besitzt den großen Vorteil, dass sich zum einen keine Erweiterung des Schutzstreifens ergibt und zum anderen die Bahnstromfreileitung unverändert bleibt und unter Einhaltung entsprechender Mindestabstände auch während der Bauarbeiten nicht abgeschaltet werden muss.

Anders als bei den Drehstrom-Kabeln ergeben sich durch die Verwendung von Gleichstrom keine Längenbegrenzungen, so dass die HGÜ mit Kabeln auch über größere Strecken problemlos eingesetzt werden kann. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Trassierung von Kabelstrecken nicht nach den gleichen Grundsätzen erfolgt wie bei Freileitungen. Die tatsächliche Nutzbarkeit hängt daher immer vom konkreten Verlauf der betrachteten Leitungen ab. Die Legung von HGÜ-Erdkabeln ist hierbei nicht nur auf den Trassenraum von Bahnstromleitungen beschränkt, sondern kann gegebenenfalls auch im Trassenraum von bestehenden 110-, 220- oder 380-kV-Drehstromfreileitungen erfolgen.

Die HGÜ mit Kabeln besitzt kein äußeres elektrisches Feld, und die magnetische Feldstärke liegt bei einer typischen Auslegung etwa im Bereich des Erdmagnetfeldes.

Diesen Vorteilen stehen erhebliche Mehrkosten von ca. 14 Milliarden Euro (Faktor 2,97) zur Drehstrom-Freileitung mit Standardmasten gegenüber. Diese resultieren im Wesentlichen daraus, dass mit den heutigen HGÜ-Kabeln maximal 1200 MW Leistung übertragen werden kann und daher die Legung von vier HGÜ-Kabelsystemen erforderlich ist, um die Leistung von zwei Drehstromfreileitungssystemen zu erreichen. Die HGÜ mit Erdkabeln ist damit die mit Abstand teuerste Lösung aller untersuchten Varianten.

Insgesamt ist festzuhalten, dass bei Erhalt einer zentralen Bahnstromversorgung und der damit verbundenen Mitführung der Bahnstromfreileitung (Variante A) von den hier untersuchten Betriebsmitteln nur die HGÜ mit Freileitungen oder Erdkabeln für den Einsatz auf längeren Strecken geeignet erscheint. Hierbei ist dann besonders bei der Verwendung von HGÜ-Erdkabeln mit erheblichen Mehrkosten gegenüber 380-kV-Standard-Freileitungen zu rechnen. Bei der Verwendung von HGÜ-Freileitungen ist außerdem der Bau von gegenüber der ursprünglichen Bahnstromfreileitung spürbar größeren Masten notwendig. Die Verwendung von Freileitungen mit parallelen Dreh- und Bahnstromkreisen erscheint aufgrund der Beeinflussungsproblematik nicht möglich zu sein. Die Legung von Drehstrom-Kabeln im Trassenraum einer Bahnstromleitung ist zwar technisch prinzipiell machbar, jedoch scheidet ein Einsatz auf längeren Strecken aufgrund der hohen kapazitiven Ladeströme, der damit einher gehenden begrenzten Übertragungskapazität, sowie dem hohen Kompensationsaufwand und den hohen Kosten aus.

Kann das Bahnstromnetz dezentralisiert und damit auf eine Mitführung der Bahnstromfreileitung verzichtet werden (Variante B), so ist die 380-kV-Drehstrom-Freileitung mit Standardmasten die technisch und wirtschaftlich günstigste Lösung. Hierbei ist mit einer gegenüber der Bahnstromfreileitung deutlichen Verbreiterung des Trassenraumes bei gleichzeitig erheblich höheren Masten zu rechnen. Eine Einhaltung des vorhandenen Trassenraumes ist nur mit speziellen Kompaktmasten möglich. Diese führen jedoch zu deutlichen Mehrkosten und bei zu kleinen Phasenabständen auch Einschränkungen in der Betriebsführung durch die Notwendigkeit, zu Wartungszwecken stets beide Stromkreise abschalten zu müssen.

1.2 Los 2 „Technische Machbarkeit der Dezentralisierung des Bahnstromnetzes“

Im Los 2 wurde die Option der Dezentralisierung der bestehenden zentralen 16,7-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland untersucht. Den Hintergrund dafür bildete die erwogene

Nutzung vorhandener Energieleitungstrassen des 2AC 110-kV-/ 16,7-Hz-Bahnstromübertragungsnetzes der DB Energie GmbH für neue Energieleitungstrassen der 50-Hz-Landesenergieversorgung.

Während die Untersuchungen in den Losen 1 und 3 grundsätzlicher Art im Sinne der Machbarkeit sind, war im Los 2 von einem konkret existierenden zentralen Bahnstromnetz auszugehen, welches den Zugbetrieb auf dem überwiegenden Teil der elektrifizierten Strecken der DB AG sicherstellt. Untersuchungen zur Dezentralisierung dieses Netzes erfordern somit die Einbeziehung der konkreten Netzstruktur, der Anlagenkonfigurationen, des Leistungs- und Energiebedarfes sowie der Netzbetriebsführung und -instandhaltung. Hierzu erfolgten detaillierte Analysen auf Basis von aktuellen internen Geschäftsdaten der DB Energie GmbH, die dem Gutachter umfassend zur Verfügung gestellt wurden.

Ausgehend von dem ermittelten Bedarf an neuen überregionalen Trassen für die Landesenergieversorgung und den technischen Verträglichkeitsuntersuchungen zur Leitungstrassenbündelung aus Los 1 sowie der aktuellen 16,7-Hz-Netzstruktur in Deutschland wurden für die Untersuchungen in Los 2 insgesamt **vier Szenarien** zur Dezentralisierung der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung entwickelt:

Szenario A: Vollständiger Erhalt und Weiterbetrieb des bestehenden zentralen 16,7-Hz-Bahnstromübertragungsnetzes unter der Voraussetzung einer (machbaren) Leitungstrassenbündelung mit der Landesenergieversorgung im bestehenden Trassenraum, **keine Dezentralisierung** der Bahnstromversorgung

Szenario B1: Erhalt eines reduzierten, aber zusammenhängenden zentralen 16,7-Hz-Bahnstromübertragungsnetzes, Entfall einzelner 16,7-Hz-Leitungstrassen zugunsten neuer Energieleitungstrassen der Landesenergieversorgung, **regionale Dezentralisierung** der Bahnstromversorgung

Szenario B2: Entfall zentraler Leitungstrassen des 16,7-Hz-Bahnstromübertragungsnetzes zugunsten neuer Energieleitungstrassen der Landesenergieversorgung, Erhalt und Weiterbetrieb mehrerer regionaler, nicht mehr zusammenhängender 16,7-Hz-Bahnstromübertragungsnetze, **überregionale Dezentralisierung** der Bahnstromversorgung

Szenario B3: Entfall des gesamten 16,7-Hz-Bahnstromübertragungsnetzes, **vollständige Dezentralisierung** der Bahnstromversorgung

Das Szenario A (keine Dezentralisierung) wurde gleichsam als Referenz für alle weiteren Szenarien B1 bis B3 (mit Dezentralisierung) genutzt.

Da die Untersuchungen im Los 2 zeitparallel zu den Losen 1 und 3 durchgeführt werden mussten, unterstellen die Dezentralisierungsszenarien B1 bis B3 auftragsgemäß, dass eine gemeinsame Trassenführung von Bahn- und Landesenergieleitungen technisch bzw. rechtlich nur schwer oder gar nicht machbar ist und somit vorhandene Bahnstromleitungstrassen aufgegeben und die betroffenen Streckenbereiche dezentral mit Bahnenergie 16,7 Hz eingespeist werden müssen.

Die durchgeführte Untersuchung zu vorhandenen Technologien der Bahnstromerzeugung hat ergeben, dass eine **dezentrale Bahnstromversorgung** mit Sonderfrequenz technisch **grundsätzlich machbar** ist. Dies zeigen einerseits die langjährigen Betriebserfahrungen in den Bahnnetzen Norwegens, Schwedens und der USA, andererseits existieren heute mit der Umrichtertechnik neue, effizientere Technologien als noch vor 10 bis 20 Jahren. Allerdings hängt die Wirtschaftlichkeit von zentraler oder dezentraler Sonderfrequenzversorgung sehr stark vom Charakter des elektrifizierten Streckennetzes, vom Bahnbetrieb, vom Leistungs- und Energiebedarf und von den Einflussmöglichkeiten auf die Energiebezugspreise (Stromgestehungskosten) ab. Insbesondere Letzteres wirkt sich überproportional in der Gesamtbilanz aus. Grundsätzlich gilt aus der langjährigen Erfahrung: große, engräumig vermaschte Netze mit hohem Gesamtenergiebedarf rechtfertigen eine zentrale Bahnstromversorgung, wenig vermaschte Netze mit einzelnen (langen) Streckenästen und geringem Gesamtenergiebedarf sind vorteilhaft dezentral zu versorgen. Diese Aussage konnte im Ergebnis der vorliegenden Untersuchungen am konkreten Netzbeispiel der DB AG eindeutig auch quantitativ bestätigt werden.

Die vier o.g. Szenarien wurden im Detail technisch und wirtschaftlich analysiert. Zum einen wurde die konkrete Einspeisesituation in das unverändert vorhandene 16,7-Hz-Fahrleitungsnetz einschließlich Anlagenauslegung, Netzanbindung, Leitungstrassenführung und Migrationskonzept untersucht, zum anderen wurde für alle Szenarien eine wirtschaftliche Bewertung durchgeführt. Dafür wurde neben der Ermittlung der bahnstromseitig erforderlichen anlagentechnischen Mengengerüste und Investitionen sowie der kalkulatorischen Restwerte der infolge Dezentralisierung nicht mehr benötigten, aber noch nicht vollständig abgeschriebenen zentralen Bahnstromanlagen ein **Lebenszykluskostenmodell** für einen Prognosezeitraum von **30 Jahren** entwickelt. Damit wurden die Differenzkosten der o.g. vier Szenarien für den

Prognosezeitraum 2011 ... 2040 auf Basis der Mengen- und Kostenwerte der DB Energie (Stand 2010) ermittelt.

Im Ergebnis der planerischen und wirtschaftlichen Untersuchungen musste zunächst das **Szenario B1** als **unrealistisch** ausgeschlossen werden. Aufgrund der konkreten Anlagenkonfigurationen im Bahnstromnetz und der gemäß Los 1 benötigten Trassen für neue Energieleitungen der Landesversorgung war es nicht möglich, ein reduziertes, aber noch zusammenhängendes Bahnstromübertragungsnetz zu entwerfen. Grund hierfür ist, dass die benötigten neuen Energieleitungstrassen überwiegend auf den Haupttrassen der vorhandenen Bahnstromübertragungsleitungen von Nord nach Süd (zwei Trassen) sowie von West nach Ost (eine Trasse) verlaufen müssen. Fallen diese zentralen Bahnstromtrassen weg, entstehen zwangsläufig mehrere „Restnetze“, die nicht mehr miteinander verbunden sind. Diese Konfiguration wird jedoch durch das Szenario B2 abgebildet, wodurch Szenario B1 obsolet wird. Auch hinsichtlich der anlagentechnischen Mengengerüste unterscheiden sich die konkret entworfenen Szenarien B1 und B2 nur marginal, weshalb nur Szenario B2 weiter verfolgt wurde.

Im Ergebnis der Untersuchungen zu Los 2 können zusammenfassend folgende Aussagen formuliert werden:

- Aus technischer, bahnbetrieblicher und betriebswirtschaftlicher Sicht ist der Weiterbetrieb des vorhandenen zentralen Bahnstromnetzes (**Szenario A**, keine Dezentralisierung) die eindeutige **Vorzugslösung**. Ausschlaggebend dafür sind die mengenmäßige und zeitkritische Beschaffbarkeit dezentraler Erzeugerkomponenten, die Risiken der Migration (Verfügbarkeit von Grundstücken und Gewährleistung des durchgehenden elektrischen Zugbetriebes) sowie die laufenden Kosten für Netzbetrieb (Abschreibungen, Instandhaltung, Betriebsführung) und Energiebezug. Letztere bestimmen mit einem Anteil von ca. 80 % eindeutig die Lebenszykluskosten. Abhängig von Varianzen bei den Stromgestehungskosten und der Inflationsrate resultieren für dieses Szenario Lebenszykluskosten über 30 Jahre – abgezinst auf 2011 – zwischen 22,4 und 23,4 Milliarden EUR.
- Eine vollständige Dezentralisierung der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung nach **Szenario B3** würde neben den risikobehafteten Aspekten der Beschaffbarkeit und der Migrationsstrategie kumulierte Lebenszykluskosten über 30 Jahre – abgezinst auf 2011 – von 28,7 bis 37,0 Milliarden EUR hervorrufen. Diese Variante ist demnach im Betrachtungszeitraum zwischen 6,3 und 13,5 Milliarden EUR teuer als der Weiterbetrieb des zentral versorgten Netzes, ohne dass der elektrische Eisenbahnverkehr davon Nutzen hätte. Der überwiegende

Kostenanteil (70 ... 80 % je nach Varianz) kommt aufgrund der höheren Stromgestehungskosten bei dezentralem Betrieb und der deutlich kostenintensiveren dezentralen Erzeugeranlagen (Umrichterwerke) zustande. Zudem würden in diesem Fall vorhandene zentrale Bahnstromanlagen mit einem kalkulatorischen Restwert von ca. XXX EUR (Stand Ende 2010) nicht mehr weitergenutzt. Schließlich müssten alle bestehenden langfristigen Lieferverträge der DB Energie mit zentralen 16,7-Hz-Energieerzeugern vorzeitig gekündigt werden. Eine **vollständige Dezentralisierung** der deutschen 16,7-Hz-Bahnstromversorgung wird daher vom Gutachter **nicht empfohlen**.

- Eine teilweise Dezentralisierung der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung nach **Szenario B2** geht aufgrund des konkreten Trassenbedarfs zwangsläufig mit einem Zerfall des zusammenhängenden 16,7-Hz-Hochspannungsnetzes der DB Energie GmbH in mehrere regionale Restnetze einher. Damit fiel eine wesentliche wirtschaftliche Steuerungsgröße der zentralen Bahnstromversorgung über die günstigeren Energiebezugpreise zumindest teilweise weg. Zusätzlich müsste auf ca. einem Drittel des elektrifizierten deutschen Streckennetzes eine dezentrale 16,7-Hz-Energieversorgung über 62 neue Umrichterwerke jeweils mit Anschluss an regionale 3AC-Hochspannungsnetze aufgebaut werden. Dies betrifft vorrangig hoch belastete Bahnstrecken. Insbesondere die Verfügbarkeit entsprechend großer zusätzlicher Grundstücke in der Nähe heutiger Unterwerke und die Migrationsstrategie ohne Unterbrechung des elektrischen Zugbetriebes machen dieses Szenario planerisch und bahnbetrieblich **risikoreich**. Hinsichtlich der Lebenszykluskosten ist, selbst ohne Ansatz höherer Stromgestehungskosten in den zentralen Restnetzen, mit zusätzlichen Lebenszykluskosten – abgezinst auf 2011 – von 2,3 bis 5,0 Milliarden EUR zu rechnen. Der kalkulatorische Restwert nicht mehr genutzter zentraler 16,7-Hz-Bahnstromanlagen belief sich auf knapp 200 Mio. EUR. Eine teilweise Dezentralisierung nach **Szenario B2** ist somit aus Sicht des Gutachters ebenfalls **nicht empfehlenswert**, solange dabei zentrale Bahnstromtrassen mit hoher Auslastung und Netzbildungswirkung aufgegeben werden müssen. Für einzelne Leitungstrassen mit geringerer Belastung bzw. in Randbereichen des Netzes ohne leistungsstarke zentrale Erzeuger ist diese Option aber vorstellbar. Hierfür sind jedoch im konkreten Fall detaillierte planerische Untersuchungen durchzuführen.
- Hinsichtlich der beabsichtigten **Parallelführung** von Bahnstrom- und Energieleitungsinfrastrukturen sollten Lösungen bevorzugt werden, die einerseits den **Weiterbetrieb der zentralen Bahnstromversorgung** gewährleisten und andererseits hinsichtlich der Migra-

tion nur geringstmögliche Beeinträchtigungen des elektrischen Zugbetriebes hervorrufen. Aus Sicht des Gutachters kommt dafür technologisch vorrangig eine **HGÜ-Kabeltrassenlösung** im vorhandenen Trassenraum der 2AC 110-kV-/ 16,7-Hz-Bahnstromleitungen in Frage. Für die Migration (Planung, Bautechnologie, temporäre Ersatzlösungen im Bahnstromnetz, Inbetriebsetzung, Fehlerbehandlung) müssen jedoch noch geeignete Lösungen entwickelt werden. Hierbei sind insbesondere die Anforderungen aus dem Netzbetrieb der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung zu berücksichtigen (Leistungsbedarf, temporäre Abschaltungen bzw. Außerbetriebnahmen einzelner Leitungsabschnitte), um Beeinträchtigungen des elektrischen Zugbetriebes zu minimieren.

1.3 Los 3 „Untersuchung der rechtlichen Rahmenbedingungen“

Untersucht wurden rechtliche Fragen der Bündelung von Übertragungsleitungen mit Bahnstromleitungen (Variante A-I: Gemeinschaftsgestänge, Variante A-II: Parallelführung) sowie der Nutzung freigegebener Bahnstromleitungstrassen (Variante B: Wegfall der Bahnstromleitung infolge Dezentralisierung der Bahnstromversorgung). Einbezogen wurde die technische Ausführung als Frei- oder Erdkabel sowie in Drehstrom- oder Gleichstromtechnik.

Alle untersuchten Varianten sind aus rechtlicher Sicht grundsätzlich zulässig. Im Einzelfall kann die Verwirklichung scheitern, etwa die Parallelführung von Leitungstrassen an besonderen Engstellen. Je nach Ausgestaltung bedarf die Umsetzung der Mitwirkung von DB Energie (insbesondere Varianten A-I und B). Eine Erdverkabelung begegnet derzeit aufgrund der sehr eingeschränkten Verfügbarkeit eines Planfeststellungsverfahrens und der restriktiven Regelungen zur Kostenanerkennung besonderen Schwierigkeiten.

Für die Planung der Übertragungsleitung ist ein Bundesfachplanungs- bzw. Raumordnungsverfahren selbst dann erforderlich, wenn der vorhandene Trassenraum einer Bahnstromleitung genutzt wird. Für die Bahnstromleitung ist kein (erneutes) Planungsverfahren notwendig.

Für die Zulassung der Übertragungsleitung ist ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen, auch wenn eine vorhandene Bahnstromleitungstrasse genutzt wird. Ein Planfeststellungsverfahren ist auch für die Änderung der Bahnstromleitung in den Varianten A-I und B erforderlich, in der Variante A-II nur, soweit Änderungen erfolgen. In der Variante B sind zusätzliche Zulassungsverfahren für die im Zuge der Dezentralisierung erforderlichen neuen Umrichterstationen und deren Anschlussleitungen an das öffentliche 110-kV-Netz erforderlich.

Für Gleichstrom-Übertragungsleitungen ergeben sich keine grundsätzlichen Unterschiede zu Drehstrom-Übertragungsleitungen. Allerdings haben die zusätzlich erforderlichen Umrichterstationen erheblichen Raumbedarf und bedürfen ihrerseits der Zulassung.

Für Übertragungsleitungen, die als Erdkabel ausgeführt werden, ist außerhalb des NABEG weder ein Raumordnungsverfahren originär vorgesehen noch besteht in den hier relevanten Fallgestaltungen die Möglichkeit der Planfeststellung. Sollte die Erdverkabelung auf der Höchstspannungsebene zukünftig stärker zum Einsatz kommen, wäre eine entsprechende Anpassung der Raumordnungsverordnung (RoV) und des § 43 EnWG sinnvoll.

Die bestehenden Nutzungsrechte der Deutschen Bahn decken die Errichtung von Übertragungsleitungen nicht ab. In allen Varianten sind für die Übertragungsleitung neue Nutzungsvereinbarungen zu treffen und Entschädigungen zu leisten. In der Variante A-I sind neue Vereinbarungen auch bezüglich der Bahnstromleitungen zu treffen.

In allen Varianten ergeben sich sowohl auf der Ebene der Planungsverfahren als auch der Zulassungsverfahren nur sehr beschränkte Möglichkeiten einer gesetzlich vorgesehenen Verfahrensvereinfachung. Ggf. können Angaben aus den Verfahren zu Bahnstromleitungen in den Umweltbericht für die Übertragungsleitung aufgenommen werden.

Außerhalb gesetzlich geregelter Verfahrensvereinfachungen kann die Bündelung von Übertragungsleitungen mit Bahnstromleitungen oder die Nutzung freigegebener Bahnstromleitungstrassen aufgrund entsprechender Trassierungsgrundsätze beschleunigende Wirkung haben. Den Behörden erleichtern diese Trassierungsgrundsätze die Prüfung alternativer Korridor- oder Trassenführungen; bei einer etwaigen gerichtlichen Kontrolle erhöhen sie die Sicherheit hinsichtlich der Bestandskraft der Alternativenwahl.

Die Bündelung von Übertragungsleitungen mit Bahnstromleitungen bzw. die Nutzung freigegebener Bahnstromleitungstrassen kann sich auch aufgrund des Vorbelastungsgrundsatzes, wonach Vorbelastungen die Schutzwürdigkeit betroffener Grundstücke mindern, beschleunigend auswirken. Dies gilt insbesondere für die Ausführung der Übertragungsleitung als Freileitung, in eingeschränktem Maße aber auch im Falle der Ausführung als Erdkabel.

Beim Vergleich des Raumbedarfs der untersuchten Varianten ist die Errichtung der Übertragungsleitung in einer freigegebenen Bahnstromleitungstrasse (Variante B) am günstigsten zu beurteilen. Bei der Abwägung der betroffenen Belange in den Planungs- und Zulassungsverfahren erleichtert dies die Entscheidung zu Gunsten des Leitungsbaus. Allerdings ist jeweils

eine Einzelfallprüfung erforderlich, die die Zulassung eines solchen Leitungsverlaufs aufgrund besonderer Belastungen ausschließen kann, etwa bei Ortsquerungen. Außerdem ergibt sich zusätzlicher Raumbedarf für die Umrichterstationen und Anschlussleitungen. Aus dem Blickwinkel des Raumbedarfs am nächstgünstigsten erscheinen die Führung auf Gemeinschaftsgestänge und die Erdverkabelung unterhalb der Bahnstromleitung, während die Parallelführung der Übertragungsleitung neben der Bahnstromtrasse am raumintensivsten wirkt.

Bei einem Vergleich des Verfahrensaufwands schneidet Variante A-II (Parallelführung) am günstigsten ab, da zusätzliche Verfahren hinsichtlich der Bahnstromleitung grundsätzlich nicht erforderlich sind. Insbesondere in Variante A-I (Gemeinschaftsgestänge) können sich Verfahrensverzögerungen aufgrund ungeklärter technischer Fragen der gegenseitigen Beeinflussung von Übertragungsleitung und Bahnstromleitung ergeben. In Variante B (Dezentralisierung) ist zusätzlich die Zulassung der neuen Umrichterstationen und Anschlussleitungen erforderlich, die ihrerseits mit dem Bau der neuen Übertragungsleitung koordiniert werden muss, der erst nach Freigabe der Bahnstromleitungstrasse möglich ist.

2 Empfehlungen der Gutachter

In der Gesamtbetrachtung der Ergebnisse der drei Lose geben die Gutachter die folgenden Empfehlungen:

- Aus technischer, bahnbetrieblicher und betriebswirtschaftlicher sowie rechtlicher Sicht ist der **Weiterbetrieb des vorhandenen zentralen Bahnstromnetzes** (Szenario A, keine Dezentralisierung) die eindeutige **Vorzugslösung**.
- Die parallele Nutzung des Bahnstromtrassenraums durch **16,7-Hz-Bahnstrom- und Drehstromfreileitungen** auf einem gemeinsamen Mast erscheint aufgrund der Beeinflussungsproblematik **nur auf kurzen Streckenabschnitten möglich**. Zudem wäre diese Variante im Trassenraum der Bahnstromleitungen nur mit noch in der Entwicklung befindlichen Kompaktmastformen machbar.
- Eine gemeinsame Nutzung des Trassenraums durch die vorhandene **16,7-Hz-Bahnstromfreileitung und Drehstrom-Kabelsysteme** erscheint aufgrund der hohen kapazitiven Ladeströme und der damit einhergehenden begrenzten Übertragungskapazität, des hohen Kompensationsaufwands und der hohen Kosten **nicht sinnvoll**.

- Die Parallelführung von **16,7-Hz-Bahnstromfreileitungen und HGÜ-Erdkabelsystemen** ist im vorhandenen Trassenraum möglich und ist aus Sicht des Bahnbetriebs die **bevorzugte Variante**, da einerseits der Weiterbetrieb der zentralen Bahnstromversorgung gewährleistet bleibt und andererseits bei einer Migration keine bzw. nur geringe Beeinträchtigungen des elektrischen Zugbetriebes zu erwarten sind. Allerdings ist diese Lösung die **mit Abstand teuerste Netzausbauvariante**. Außerdem muss beachtet werden, dass eine Verlegung von Erdkabeln im Trassenraum der Bahnstromleitung **technisch nicht immer möglich** ist (z. B. bei Talüberspannungen, in felsigem Gebiet oder bei Siedlungskreuzungen).
- Aus rechtlicher Sicht ist bei Parallelführung von **16,7-Hz-Bahnstromfreileitungen und HGÜ-Erdkabelsystemen** vorteilhaft, dass für die Bahnstromleitungen keine erneuten Planungs- und Zulassungsverfahren durchgeführt oder neue Nutzungsrechte erworben werden müssen. Die Trassenführung für die HGÜ-Erdkabel wird durch die Bündelung erleichtert. Allerdings kann die Erdverkabelung im vorhandenen Trassenraum in Teilbereichen ausgeschlossen sein (z. B. aus Naturschutzgründen). Außerdem begegnet eine Erdverkabelung im derzeitigen Rechtsrahmen aufgrund der sehr eingeschränkten Verfügbarkeit eines Planfeststellungsverfahrens und der restriktiven Regelungen zur Kostenanerkennung Schwierigkeiten.
- Mit Blick auf **wirtschaftliche Gesichtspunkte** erscheint die Parallelführung von **16,7-Hz-Bahnstrom- und HGÜ-Freileitungen** auf einem gemeinsamen Mast als die **bevorzugte Variante**. Hierbei müssen aber im Gegensatz zur Legung von HGÜ-Erdkabeln Lösungen für eine aus Sicht des Bahnbetriebs störungsarme Migration entwickelt werden, da vorhandene Bahnstromfreileitungsmaste durch neue kombinierte Maste in Kompaktbauweise ersetzt werden müssten.
- Aus rechtlicher Sicht erleichtert das Gemeinschaftsgestänge für **16,7-Hz-Bahnstrom- und HGÜ-Freileitungen** die Trassenführung erheblich. Für die Bahnstromleitung sind zwar neue Zulassungsverfahren und in der Regel neue Nutzungsrechte erforderlich, doch werden diese Verfahren mit der Übertragungsleitung verknüpft. Zu prüfen ist, inwieweit sich Verzögerungen durch ungeklärte technische Fragen ergeben könnten und inwieweit das Gemeinschaftsgestänge wegen des vorübergehenden Weiterbetriebs der Bahnstromleitung neben der alten Trasse errichtet werden muss.

- Die Errichtung paralleler **HDÜ- und HGÜ-Freileitungen auf eigenem Gestänge** könnte das Migrationsproblem für den Bahnbetrieb beheben und neue Zulassungsverfahren und Nutzungsrechte für die Bahnstromleitung entbehrlich machen. Die Trassenführung ist aufgrund der größeren Trassenbreite schwieriger, profitiert aber grundsätzlich von der Bündelung. Eine parallele **HDÜ-Freileitung** ist die mit Abstand günstigste Variante, während die parallele **HGÜ-Freileitung** demgegenüber mit erheblichen Mehrkosten verbunden ist.
- Der Bau von **HGÜ-Kabelsystemen** kann natürlich auch im Trassenraum von vorhandenen HöS-Freileitungen erfolgen. Ebenso könnten **HGÜ-Freileitungen** auch auf vorhandenen Freileitungen auf einem dann zu errichtenden gemeinsamen Mast unter der Voraussetzung mitgeführt werden, dass es zu keinen Beeinflussungsproblemen kommt.
- Insgesamt besteht noch ein erheblicher weiterer Untersuchungsbedarf z. B. hinsichtlich der Themen Parallelführung und gegenseitige Beeinflussung von Drehstrom-, Bahnstrom- und Gleichstromsystemen, Aufwand für die Entwicklung und Erprobung von Kompaktmastbauformen sowie Weiterentwicklung der Trassierungsgrundsätze für Leitungsbündelung, die über den Zeit- und Untersuchungsrahmen dieser Machbarkeitsstudie hinausgehen.