

# **Machbarkeitsstudie zur Verknüpfung von Bahn- und Energieleitungs- infrastrukturen**

## **Ergebnisbericht zu Los 2 „Technische Machbarkeit der Dezentralisierung des Bahnstromnetzes“**

Bearbeiter: Technische Universität Dresden  
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik  
Professur Elektrische Bahnen  
Hettnerstr. 1-3  
01062 Dresden

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan  
Dr.-Ing. Sabine Hammer  
Dipl.-Ing. Andreas Albrecht  
Dipl.-Ing. Matthias Holfeld  
Dipl.-Ing. Sven Körner

Der Bericht besteht aus 82 Seiten.

Dresden, 05.06.2012

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 Ausgangslage und Zielsetzung</b>	<b>4</b>
<b>2 Methodik der Bearbeitung</b>	<b>6</b>
2.1 Arbeitspakete	6
2.2 Abgrenzung der Untersuchungsinhalte	9
2.3 Schnittstellen mit den Untersuchungen von Los 1 und Los 3	10
<b>3 Bestandsanalyse der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland</b>	<b>11</b>
3.1 Gesamtstruktur	11
3.2 Teilsysteme	12
3.2.1 Bahnenergieerzeugung	12
3.2.2 Bahnenergieübertragung	14
3.2.3 Bahnenergieverteilung	15
3.2.4 Bahnenergiezuführung	15
3.3 Elektrische Triebfahrzeuge	15
<b>4 Technologien zur dezentralen Streckeneinspeisung</b>	<b>18</b>
4.1 Netzaufbau	18
4.2 Dezentrale Bahnenergieerzeugung	19
4.2.1 Rotierende Umformer	19
4.2.2 Statische Umrichter	20
4.3 Betriebsführung	21
4.3.1 Inselbetrieb dezentraler Umrichter	21
4.3.2 Parallelbetrieb dezentraler Umrichter mit einem Zentralen Bahnstromnetz	22
4.3.3 Parallelbetrieb dezentraler Umrichter mit dezentralen Umformern	25
4.3.4 Parallelbetrieb ausschließlich dezentraler Umrichter	25
4.4 Bewertung im Vergleich zur zentralen Bahnstromversorgung	26
<b>5 Varianten zur Dezentralisierung des Bahnstromnetzes</b>	<b>28</b>
5.1 Definition von Szenarien	28
5.1.1 Trassenbedarf und Leitungsführung der Landesenergieversorgung (Overlay-Netz)	28
5.1.2 Ableitung von Modellszenarien für die Dezentralisierung	31
5.2 Beschreibung der Untersuchungsszenarien	33
5.2.1 Szenario A: Erhalt aller Bahnstromtrassen bei Parallelführung des Overlay-Netzes („Referenzszenario“)	33
5.2.2 Szenario B1: Entfall einzelner Bahnstromtrassen zugunsten des Overlay-Netzes („regionale Dezentralisierung“)	38
5.2.3 Szenario B2: Entfall wichtiger Bahnstromtrassen zugunsten des Overlay-Netzes und Bildung von Bahnstrom-Teilnetzen („überregionale Dezentralisierung“)	42
5.2.4 Szenario B3: Entfall aller Bahnstromtrassen („vollständige Dezentralisierung“)	45
<b>6 Technische Machbarkeit der Dezentralisierung</b>	<b>47</b>

6.1	Grundsätze	47
6.1.1	Leistungsbedarf und Betriebsmitteldimensionierung	47
6.1.2	Ermittlung der Mengengerüste für die Szenarien	51
6.1.3	Netzanschluss	55
6.1.4	Netzanschlussbedingungen	55
6.1.5	Grundsätze für den Flächenbedarf bei Dezentralisierung	56
6.1.6	Flächenbedarf für Umrichterwerke	56
6.1.7	Verfügbarkeit von Grundstücksflächen in Bahntrassennähe	57
6.1.8	Verfügbarkeit von Netzanschlüssen	58
6.2	Umsetzungsstrategie	58
6.2.1	Szenario A	58
6.2.2	Szenario B1 und B2	59
6.2.3	Szenario B3	61
6.3	Betriebsführung	61
6.3.1	Szenario A	61
6.3.2	Szenarien B1 und B2	62
6.3.3	Szenario B3	64
6.4	Einordnung der Ergebnisse der Szenarien A und B1 bis B3	64
<b>7</b>	<b>Kosten-/ Nutzenbewertung</b>	<b>65</b>
7.1	Methodik	65
7.1.1	Lebenszykluskostenmodell	65
7.1.2	Ungenutztes Anlagenvermögen und vertragliche Bindungen	68
7.1.3	Sonstige Kosten	69
7.2	Quantitative Bewertung	69
7.2.1	Investitionen	69
7.2.2	Betriebskosten	71
7.2.3	Lebenszykluskosten	72
7.3	Fazit	74
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>75</b>
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>80</b>
<b>Anhang 1</b>	<b>Lastfluss auf Bahnstromleitungen</b>	<b>81</b>
<b>Anhang 2</b>	<b>Grundriss des Umrichterwerkes Hof</b>	<b>82</b>

## 1 Ausgangslage und Zielsetzung

Gegenstand dieses Leistungsabschnittes ist das 2AC 110-kV-16,7-Hz-Bahnstromversorgungsnetz der DB Energie mit den daran angeschlossenen Bahnunterwerken zur Einspeisung der elektrifizierten Eisenbahnstrecken.

Ausgehend vom Trassenbedarf für neue Transportleitungen der Landesenergieversorgung, die auf vorhandenen Bahnstromtrassen verlaufen sollen, werden mehrere Szenarien für eine Dezentralisierung der Bahnstromversorgung entwickelt und nach technischen sowie ökonomischen Kriterien bewertet. Untersucht wird dabei, ob und wie die bestehende zentrale Bahnstromversorgung mit autarker 16,7-Hz-Energieerzeugung und zweipoligen Bahnstromfreileitungen 2AC 110 kV zur Speisung der Bahnunterwerke 110/ 15 kV auf eine teilweise oder gar vollständige dezentrale Versorgung mit Umrichtern zur Spannungs- und Frequenztransformation umgerüstet werden kann. Es werden die technischen Möglichkeiten und die Spezifika des dezentralen Netzbetriebes beschrieben.

Zusätzlich zu den in Los 1 bereits durchgeführten Arbeiten zum Trassenverlauf wird eine Bestandsanalyse der Bahnunterwerke, der Leitungsbelastung und der Erzeuger im zentralen Bahnstromnetz der DB Energie vorgenommen. Anhand des in Los 1 ermittelten Trassenbedarfs wird analysiert, welche Teile des Hochspannungsnetzes der Bahn je nach Szenario von der Dezentralisierung betroffen sein können. Darauf aufbauend werden modellhafte Netzpläne für ein zukünftiges, teilweise oder vollständig dezentralisiertes Bahnstromversorgungsnetz entwickelt. Zusätzlich wird untersucht, ob und wie die dann - zumindest teilweise – dezentralisierte 16,7-Hz-Bahnstromversorgung aus dem Netz der Landesenergieversorgung eingespeist werden kann. Anhand der Untersuchungsergebnisse wird die technische Machbarkeit bewertet.

Auf Basis der für alle Szenarien ermittelten Mengengerüste für die Bahnstromanlagen wird des Weiteren eine Kostenschätzung der notwendigen Investitionen und der laufenden Betriebskosten für den dezentralen Bahnstromnetzbetrieb vorgenommen. Zusätzlich werden auf Basis der aktuellen Bahnenergiemengen im zentralen Netz der DB Energie GmbH die Differenzkosten für den Energiebezug bei zunehmender Dezentralisierung des Netzes ermittelt. Alle Kostenwerte fließen abschließend in ein Lebenszykluskostenmodell über 30 Jahre für den Zeitraum 2011 bis 2040 ein. Als bahnseitige Nutzenpotenziale können diesen Kosten nur die

entfallenden Instandhaltungs- und Netzbetriebskosten für das nicht mehr vorhandene Bahnstromleitungsnetz und die nach der Umstellung aufgelassenen Unterwerke gegenübergestellt werden.

Im Ergebnis wird herausgestellt und bewertet, ob und wie die Bahnstromversorgung gesichert werden kann, wenn bestehende Bahnstromfernleitungen für den Bahnstromtransport zukünftig entfallen und die betroffenen Netzbereiche durch dezentrale Umrichterwerke – bei laufendem Bahnbetrieb – versorgt werden müssen.

## 2 Methodik der Bearbeitung

### 2.1 Arbeitspakete

Zur Bearbeitung der Aufgabenstellung wurden einzelne Arbeitspakete (AP) mit folgenden Inhalten definiert:

#### **AP 2-1: Bestandsanalyse der Bahnstromanlagen im Bereich der DB Energie**

In diesem Arbeitspaket wurde eine Bestandsanalyse der vorhandenen 16,7-Hz-Bahnstromanlagen der DB Energie GmbH vorgenommen, um eine detaillierte Ausgangsbasis für die Untersuchungen zur Dezentralisierung zu schaffen..

Im Einzelnen wurden dabei anhand der übergebenen Daten der DB Energie GmbH folgende Aspekte analysiert:

- Trassenverlauf und Beseilung im 2AC 110 kV / 16,7 Hz-Bahnstromübertragungsnetz,
- Unterwerksstandorte, Schaltanlagenkonfigurationen 110 kV und 15 kV, installierte Leistung, Redundanzkonzept,
- Grundstücksgrößen und Grundstückslagen der Unterwerke bezüglich der Bahntrassen,
- Leistungs- bzw. Energiebedarf der Unterwerke (Jahresmittelwert, max. 15-min-Mittelwert, Spitzenwert) zur Kategorisierung der Belastung,
- Standorte und Konfigurationen bestehender dezentraler Umrichterwerke mit Direkt einspeisung in die Fahrleitung,
- Leistungs- bzw. Energiebedarf der Umrichterwerke (Jahresmittelwert, max. 15-min-Mittelwert, Spitzenwert) zur Kategorisierung der Belastung,
- Erzeugerstandorte und –leistungen der Einspeiser ins zentrale Bahnstromnetz,
- Kostensituation im Bahnstromnetz.

#### **AP 2-2: Verfügbare Technologien zur dezentralen Streckeneinspeisung**

Dieses Arbeitspaket widmete sich der Beschreibung vorhandener Technologien zur dezentralen Bahnstromversorgung mit Sonderfrequenz 16,7 Hz.

Im Einzelnen beinhaltet dies:

- Aufbau und Funktion dezentraler Umrichterwerke,
- verfügbare Umrichtertechnologien, Marktsituation (Produkte, Hersteller),
- Betriebsweise von Umrichterwerken,
- Auslegungsanforderungen (Leistung, Regelung, Schutz),
- Platzbedarf,
- Netzanschlussbedingungen auf der Drehstromseite,
- Vergleich mit Unterwerken.

### **AP 2-3: Entwurf von Varianten zur Dezentralisierung des Bahnstromnetzes**

In diesem Arbeitspaket wurden ausgehend von dem im Los 1 erarbeiteten Trassenbedarf für neue Energieleitungen der Landesenergieversorgung mehrere Szenarien für die Dezentralisierung des deutschen Bahnstromnetzes entworfen. Die Varianz der Szenarien reicht vom Erhalt bzw. der vollständigen Wiedererrichtung des zentralen Bahnstromnetzes bis hin zur kompletten Dezentralisierung. Bei Dezentralisierung erfolgt der Ersatz von Unterwerken durch Umrichterwerke mit Anbindung an vorhandene oder neu zu errichtende 50-Hz-Drehstrom- oder ggf. Gleichstromnetze.

Folgende Szenarien wurden 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.

#### **AP 2-4: Leistungs- und Flächenbedarf für dezentrale Einspeiseanlagen**

Dieses Arbeitspaket widmete sich aufbauend auf der Bestandsanalyse in AP 2-1 dem Leistungs- und Energiebedarf an den Einspeisestellen in die Fahrleitung (Unterwerke) und auf allen bestehenden 110-kV-Bahnstromleitungen. Dies war notwendig, um die erforderliche Anlagenauslegung für die dezentrale Netzstruktur soweit abzuschätzen, dass später detaillierte Mengengerüste für die Ermittlung der Investitions- und Netzbetriebskosten sowie der Energiebezugskosten vorgenommen werden konnten. Des Weiteren wurde der Flächenbedarf von 16,7-Hz-Unterwerken, Umrichterwerken und Drehstrom-Anschlussleitungen analysiert, um später die Machbarkeit einschätzen und die Kosten für den Grunderwerb ermitteln zu können.

#### **AP 2-5: Kosten-/ Nutzenbewertung der Dezentralisierung**

Ausgehend von den Mengengerüsten aus AP 2-3 und den Auslegungsdaten aus AP 2-4 wurden in diesem Arbeitspaket die erforderlichen Investitionen für die Anlagenerrichtung, die Netzbetriebskosten sowie die kalkulatorischen Restwerte der infolge Dezentralisierung nicht mehr benötigten, aber noch nicht vollständig abgeschriebenen zentralen Bahnstromanlagen für alle Szenarien ermittelt. Unter Ansatz der aktuellen Bahnenergiemengen im zentralen Bahnstromnetz und modellhafter Energiebezugpreise für zentrale bzw. dezentrale Bahnstromversorgung sowie der Investitions- und Betriebskosten wurde ein Lebenszykluskostenmodell für einen Prognosezeitraum von 30 Jahren erstellt. Damit wurden die Differenzkosten der entwickelten Szenarien für den Prognosezeitraum 2011 ... 2040 auf Basis der Mengen- und Kostenwerte der DB Energie (Stand 2010) ermittelt. Berücksichtigt wurden bei den Prognosen auch variable Ansätze für die Inflationsrate, jedoch keine Finanzierungskosten.



ten. Gleichfalls wurden mögliche Entschädigungszahlungen nicht einbezogen, da die Ergebnisse auch ohne diese bereits eindeutige Tendenzen auswiesen.

## **AP 2-6: Ergebnisdokumentation und -präsentation**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die Untersuchungsmethodik und die Ergebnisse in dem vorliegenden Abschlussbericht dokumentiert, kommentiert sowie eine Ergebnispräsentation erstellt.

## **2.2 Abgrenzung der Untersuchungsinhalte**

Die vorliegende Untersuchung widmet sich gemäß Leistungsbild der Ausschreibung ausschließlich der Dezentralisierung des bestehenden zentralen 16,7-Hz-Bahnstromversorgungsnetzes der DB Energie.

Im Einzelnen bedeutet das folgende Abgrenzungen:

- Es wird keine Umstellung der Bahnstromversorgung der DB Energie auf das Stromsystem 1AC 25 kV 50 Hz untersucht. Dies würde einerseits eine detaillierte Betrachtung zur Isolationskoordination im gesamten 15-kV-Fahrleitungsnetz der DB Netz AG und andererseits eine Analyse zur Neubeschaffung eines Großteils der weitgehend neuwertigen elektrischen Triebfahrzeuge aller Betreiber erfordern. Beide Fragestellungen waren nicht Bestandteil des Leistungsbildes.
- Es wird keine Untersuchung zu andersartigen zentralen Bahnstromversorgungsvarianten (z.B. 3 AC 380 kV 16,7 Hz) durchgeführt, da diese keine Dezentralisierung darstellen.
- Die vorhandenen Einspeisepunkte in die Oberleitungsanlagen der DB Netz AG und die 15-kV-Fahrleitungsschaltung werden grundsätzlich beibehalten. Hintergrund dafür ist, dass die Einspeisestruktur der Unterwerke und die Fahrleitungsschaltung außer von elektrischen Gesichtspunkten maßgeblich von betrieblichen Anforderungen bestimmt werden, an denen sich durch die Art der Versorgung nichts ändert. Neue Umrichterwerke zur dezentralen Einspeisung sind somit in unmittelbarer Nähe der bestehenden Unterwerke zu errichten.
- Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass der elektrische Zugbetrieb im Zuge der Dezentralisierung weder temporär noch dauerhaft unterbrochen wird. Diese bedeutet,

dass sämtliche Anlagen zur dezentralen Bahnstromversorgung vor der Außerbetriebnahme der bestehenden zentralen Bahnstromanlagen errichtet und in Betrieb gesetzt werden müssen.

### **2.3 Schnittstellen mit den Untersuchungen von Los 1 und Los 3**

Im Los 1 wurde der grundsätzliche Trassenbedarf für neue Energieleitungstrassen in Deutschland durch Auswertung von Netzstudien überschlägig ermittelt (zwei Nord-Süd- und eine West-Ost-Trasse mit definierten Verknüpfungspunkten zum Höchstspannungsnetz) und für Los 2 zur Verfügung gestellt. Gemeinsam mit den Gutachtern von Los 1 wurden darauf aufbauend mögliche Trassenführungen auf bestehenden Bahnstromleitungstrassen entwickelt. Hierbei wurden insbesondere Aspekte des Leistungsbelages, der Erzeugeranbindung, der Netzbildungswirkung und konkreter lokaler Problemzonen der betroffenen Bahnstromtrassen berücksichtigt.

Ebenfalls gemeinsam mit Los 1 wurden mögliche technische Konfigurationen der Parallelführung im Trassenraum analysiert. Zudem wurden aktuelle Kostenwerte ausgetauscht und miteinander abgestimmt.

An die Gutachter von Los 3 wurden mögliche technische Trassenbündelungsvarianten sowie Informationen zum der Bedarf an Flächen für neue Umrichterwerke und Drehstromanschlussleitungen übergeben.

Schließlich wurde mit den Gutachtern aus Los 1 und Los 3 eine gemeinsame Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse sowie eine abschließende Empfehlung erarbeitet.

## 3 Bestandsanalyse der 16,7-Hz-Bahnstromversorgung in Deutschland

### 3.1 Gesamtstruktur

Die Eisenbahn ist in Deutschland der Elektroenergieverbraucher mit dem größten Einzelenergiebedarf. Allein der Gesamtenergiebedarf aller Konzernunternehmen der DB AG beträgt aktuell ca. 11,3 TWh. Dieser gliedert sich auf in die elektrische Traktionsenergie für den Fahrbetrieb der Züge (ca. 9,6 TWh) sowie die elektrische Energie für den Betrieb der bahntechnischen und sonstigen Anlagen (z.B. Weichenheizungen 110 GWh, Zugvorheizanlagen 120 GWh, allgemeine 50-Hz-Versorgung 1470 GWh).

Circa 90 Prozent der Schienenverkehrsleistung auf den Strecken der DB Netz AG werden heute mit elektrischer Energie erbracht. In Zukunft wird dieser Anteil durch weitere Elektrifizierung und den Einsatz von Hybrid- bzw. Speicherfahrzeugen auf nichtelektrifizierten Strecken noch zunehmen. Die verlässliche Deckung des Elektroenergiebedarfs und der effiziente Einsatz dieser Energie sind zentrale Themen für die Wettbewerbs- und Zukunftsfähigkeit des Eisenbahnverkehrs in Deutschland.

Die in Deutschland verwendete und von der Landesfrequenz 50 Hz abweichende Bahnstrom-Sonderfrequenz von 16,7 Hz (früher 16 2/3 Hz) ist historisch bedingt und wurde bereits in der Anfangszeit der Streckenelektrifizierung nach 1912 gewählt, um elektrische Triebfahrzeuge mit Einphasenwechselstrom-Kommutatorfahrmotoren technisch und wirtschaftlich vorteilhaft betreiben zu können. Obwohl diese Anforderung heute zunehmend in den Hintergrund tritt, hat sich die Sonderfrequenz insbesondere hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Energieeinkaufs, der Verfügbarkeit der Bahnstromversorgung, des Netzbetriebes, der Energieeffizienz im Fahrleitungsnetz sowie bahnbetrieblich bewährt. Bei den europäischen Eisenbahnen werden gegenwärtig über 50 % der elektrisch erbrachten Transportleistung mit diesem Sonderfrequenz-Bahnstromsystem versorgt.

Zur Versorgung der elektrifizierten Eisenbahnstrecken in Deutschland betreibt die Deutsche Bahn AG ein eigenes Energieübertragungsnetz mit der Nennspannung 2AC 110kV 16,7 Hz. Dieses auch als „Bahnstromnetz“ bezeichnete Übertragungsnetz hat eine Netzausdehnung von ca. 7.800 km Trassenlänge und versorgt aktuell ca. 180 Bahnunterwerke. In das Bahnstrom-

netz speisen Kraftwerke mit 16,7-Hz-Einphasengeneratoren sowie zentrale Umformer- und Umrichterwerke verschiedener Energieversorgungsunternehmen ein.

Für den Netzbetrieb mit allen Schalthandlungen, die Leistungsregelung und die Instandhaltung des Bahnstromnetzes sowie den Energieeinkauf ist das Konzernunternehmen DB Energie GmbH zuständig.

Aus dem 110-kV-Bahnstromnetz wird der überwiegende Teil der mit der Nennspannung 1AC 15 kV 16,7 Hz elektrifizierten Eisenbahnstrecken über Einphasentransformatoren und einpolige Schaltanlagen eingespeist. In Netzbereichen, in denen das zentrale 2AC-110-kV-Übertragungsnetz aus historischen Gründen nicht vorhanden ist (vorrangig Nordostdeutschland), werden die Fahrleitungsanlagen über rotierende Umformer oder leistungselektronische Umrichter mit Sonderfrequenz dezentral aus 50-Hz-Drehstromnetzen der Landesenergieversorgung gespeist. Die über rotierende Umformer dezentral gespeisten Strecken lassen sich wegen des starren Frequenzverhältnisses von 3 : 1 zum 50-Hz-Landesnetz nicht mit den zentral gespeisten Strecken zusammenschalten. Insofern existieren heute in Deutschland noch zwei getrennte Netzbereiche, deren Fahrleitungsanlagen intern jeweils vollständig elektrisch durchgekuppelt betrieben werden können. Nach dem zukünftig angestrebten Ersatz aller rotierenden Umformer durch Umrichter wird eine Zusammenschaltung des gesamten 16,7-Hz-Fahrleitungsnetzes der DB Netz AG möglich.

## 3.2 Teilsysteme

### 3.2.1 Bahnenergieerzeugung

Die gesamte installierte Erzeugerleistung für Bahnstrom mit Sonderfrequenz beträgt ca. XXX MW. Die 16,7-Hz-Energieerzeuger sind weiträumig über das gesamte Bahnstromnetz verteilt. Große Erzeugerleistungen sind vorrangig in Lastschwerpunkten konzentriert. Es gibt Grundlasterzeuger (hauptsächlich Laufwasser-, Kernkraft- und Kohlekraftwerke), Mittellasterzeuger (Dampfkraft-, Umformer- und Umrichterwerke) und Spitzenlasterzeuger (Umformer- und Umrichter- sowie Pumpspeicherwerke).

Die 16,7-Hz-Einphasen-Synchrongeneratoren in Kraft- und Umformerwerken sind Spezialmaschinen, die nur in geringer Stückzahl gefertigt wurden. Durch das pulsierende Drehmoment ist eine federnde Aufstellung erforderlich. Aufgrund der Einphasigkeit ist die Ständer-

wicklung über den Maschinenumfang nur teilbewickelt, wodurch die elektromagnetische Ausnutzung und die Leistungsdichte geringer sind als bei Dreiphasenmaschinen. Wegen dieser Spezifika und des geringen Teillastwirkungsgrades ist es heute wirtschaftlicher, die Bahnenergie mittels dreiphasiger Maschinen der Landesenergieversorgung zu erzeugen und anschließend über statische Umrichter in Einphasenenergie zu wandeln. Neuere Bahnstromerzeuger bedienen sich dieser Technologie.

Der aktuelle Energiemix der DB AG ist noch dominiert von thermisch erzeugter elektrischer Leistung (Kohle, Gas, Nuklear). Allerdings kann bereits heute ein überdurchschnittlich hoher regenerativer Anteil von über 20 % (Wind, Wasser) ausgewiesen werden. Erklärtes Ziel der DB AG ist es, bis 2050 vollständig auf regenerative Energie umzusteigen und damit eine emissionsfreie Mobilität auf der Schiene anzubieten.

Mit Ausnahme zweier kleiner Wasserkraftwerke besitzt die DB Energie selbst keine eigenen Kraftwerke zur Erzeugung der Bahnenergie mit Sonderfrequenz. Der Energiebezug aus den 16,7-Hz-Kraftwerken anderer Betreiber ist über langfristige Verträge abgesichert. Die Mehrzahl der Umformer- und dezentralen Umrichterwerke ist jedoch im Eigentum der DB Energie und wird von dieser betrieben.

Die infolge des Zugbetriebes hochdynamische Bahnlast mit Lastgradienten von bis zu  $\pm 300$  MW/s stellt besondere Anforderungen an die Leistungsregelung im Bahnstromnetz (d.h. Regelung des Erzeugereinsatzes) und den Energieeinkauf. Die DB Energie nutzt hierfür spezialisierte Werkzeuge zur fahrplan- und erfahrungsbasierten Lastprognose. Auf Basis von Prognose- und IST-Werten übernimmt die Hauptschaltleitung (HSL) der DB Energie in Frankfurt/M. die Funktion der netzweiten Leistungsregelung. Einer zentralen Sekundärregelung für alle Erzeuger ist dabei die Primärregelung der einzelnen Erzeuger nach individueller Frequenz-Wirkleistungscharakteristik (sogenannte f-P-Statik) unterlagert. Grundlasterzeuger fahren mit „steiler“ Statik, d.h. sie ändern bei Frequenzschwankungen ihre Leistung nur geringfügig. Spitzenlasterzeuger haben eine „flache“ Statik und übernehmen somit die Leistungsspitzen. Im Bahnstromnetz wird derzeit eine Regelleistung von ca. XXX MW vorgehalten. Die für den Netzbetrieb benötigte Blindleistung wird möglichst regional in Bedarfsnähe erzeugt. So kann es durchaus vorkommen, dass bestimmte Erzeuger vorrangig (oder sogar ausschließlich) im Phasenschieberbetrieb laufen.

Die zukünftig geplante weitere Umstellung der Bahnenergieerzeugung zugunsten höherer Anteile der Umrichter-Einspeisung sowohl in das 110-kV-Bahnstromnetz als auch in die 15-kV-Fahrleitungsanlagen bietet aus heutiger Sicht vor allem energiewirtschaftliche Vorteile, die in der hohen Regeldynamik sowie dem hohen Wirkungsgrad der Umrichter auch bei großer Lastdynamik und damit in größeren Freiheitsgraden bei der Wahl der Energiebezugs begründet sind. Zudem haben leistungselektronische Umrichter inzwischen deutlich geringere Lebenszykluskosten als rotierende Umformer, die aus Spezialmaschinen bestehen.

### 3.2.2 Bahnenergieübertragung

Der Leitungsaufbau des Bahnstromnetzes ist zweipolig mit entgegengesetzter Phasenlage, die Leiter-Erde-Nennspannung beträgt je 55 kV pro Phase. Daraus ergibt sich für die Energieübertragung eine Leiter-Leiter-Nennspannung von 110 kV. Das Bahnstromnetz hat aktuell eine Trassenlänge von 7.785 km und ist landesweit – mit Ausnahme im Raum nordöstlich von Berlin – vorhanden. Das Netz wird landesweit durchgekuppelt und mit resonanzgeerdetem Sternpunkt betrieben, was die Löschfähigkeit und den Weiterbetrieb ohne Schalthandlungen bei flüchtigen einpoligen Erdschlüssen sichert. Der für die Löschfähigkeit zulässige maximale Erdschlussreststrom ist derzeit fast erreicht. Aus diesem Grund sind großräumige Netzerweiterungen und die Installation von Kabelstrecken mit hoher kapazitiver Wirkung nicht ohne weiteres möglich.

Mit dem weitgehend identisch aufgebauten 110-kV-Bahnstromnetz der Österreichischen Bundesbahn besteht ein galvanischer Netzverbund über zwei Bahnstromleitungen. Mit dem 132-kV-Bahnstromnetz der Schweiz gibt es ebenfalls zwei Netzkupplungen über Trenntransformatoren, da das Schweizer Netz mit starrer Sternpunkterdung betrieben wird.

Die Bahnstromleitungen führen in der Regel 2 Systeme  $\pm 55\text{kV}$ , d.h. 4 Einzelleiter bzw. Leiterbündel. In Lastschwerpunkten und bei Verzeigungen können bis zu 4 Systeme auf einem Mast mitgeführt werden.

Die Beseilung richtet sich nach der Last auf den Leitungsabschnitten. XXX. Für Sonderbetriebsfälle haben die Leitungen entsprechende Belastungsreserven.

Der Netzbetrieb des 110-kV-Bahnstromnetzes wird von der Hauptschaltleitung der DB Energie in Frankfurt geführt. Das gesamte Netz ist mit Fernwirktechnik ausgestattet.

### 3.2.3 Bahnenergieverteilung

Die Einspeisung der Oberleitungen des ca. 18.000 km langen elektrifizierten Streckennetzes erfolgt über 182 Unterwerke. Diese sind hinsichtlich ihres Anschlusses an das 110-kV-Bahnstromnetz als Block- oder Knotenunterwerke ausgeführt. Sie besitzen jeweils eine zwei-polige 110-kV-Freiluftschaltanlage, in der Regel zwei einphasige Leistungstransformatoren 110/15 kV (meist 2x10 MVA oder 2x15 MVA) und eine sogenannte Normschaltanlage für die 15-kV-seitige Verteilung. Jedes 15-kV-Streckenabgangsfeld hat einen Leistungsschalter und eine Fahrleitungsschutzeinrichtung. Die Zuführung zu den Oberleitungsanlagen der Strecke erfolgt über Kabel oder kurze Freileitungen. Die Rückleiteranschlüsse an den Schienen werden ebenfalls über Kabel ins Unterwerk zurückgeführt.

### 3.2.4 Bahnenergiezuführung

Die streckenseitige Energiezuführung zu den elektrischen Triebfahrzeugen wird über Kettenwerksoberleitungen realisiert. Die Oberleitungsanlagen gehören zum Zuständigkeitsbereich der DB Netz AG. Die Oberleitung ist aus bahnbetrieblichen und schutztechnischen Gründen in einzelne Speiseabschnitte unterteilt, die separat vom Unterwerk eingespeist und geschaltet werden können. Standardmäßig werden die Speiseabschnitte der Oberleitung zweiseitig von zwei benachbarten Unterwerken eingespeist. In der Mitte zwischen zwei benachbarten Unterwerken befindet sich in der Regel eine sogenannte Kuppelstelle, die im Fehlerfall eine Auftrennung zwischen den angrenzenden Speiseabschnitten ermöglicht. Die separate Versorgung der Speiseabschnitte dient vorrangig der Selektivität im Fehlerfall. Das gesamte Fahrleitungsnetz der DB Netz AG im Bereich der zentralen Bahnstromversorgung wird elektrisch durchgekuppelt betrieben. Dies hat bahnbetriebliche und energetische Vorteile.

Zur Rückstromführung dienen die Fahrschienen und ggf. zusätzliche Rückleitungsseile, die zu den Fahrschienen parallelgeschaltet sind. Die gesamte Rückleitungsanlage ist aus Gründen des Berührungsschutzes gut leitend mit der Erde – vorrangig über die Mastfundamente – verbunden. Ein Teil des Traktionsrückstromes fließt damit abschnittsweise immer durch die Erde.

## 3.3 Elektrische Triebfahrzeuge

Die elektrischen Triebfahrzeuge werden mit einer auf das Bahnstromsystem angepassten Antriebsausrüstung versehen. Beim System 1 AC 15 kV 16,7 Hz wurden Lokomotiven bis An-

fang der 1990er Jahre als Direktmotorlokomotiven ausgeführt. Dabei wird die Fahrleitungsspannung über den Fahrzeugtransformator herabgesetzt und über ein Schaltwerk in verschiedenen Stufen den Wechselstromkommutatormotoren zur Stellung von Zugkraft und Geschwindigkeit zur Verfügung gestellt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Wechselspannung nach dem Fahrzeugtransformator gleichzurichten und dann über ein Schaltwerk mit Widerständen die Stellung von Zugkraft und Geschwindigkeit der Mischstrommotoren zu bewerkstelligen. Modernere elektrische Lokomotiven und Triebzüge seit den 1980er Jahren werden in Drehstromantriebstechnik ausgeführt. Bei ihnen versorgt ein Umrichter nach dem Transformator die Drehstromasynchronmotoren mit einer in Amplitude, Frequenz und Phasenfolge veränderlichen Drehspannung zur Stellung von Zugkraft und Geschwindigkeit.

Triebfahrzeuge mit Gleichrichtertechnik und solche in Drehstromantriebstechnik lassen sich so ausrüsten, dass sie noch unter weiteren Bahnstromsystemen (Mehrsystemfähigkeit) verkehren können. Allerdings wird dieser technische und finanzielle Mehraufwand nur dann in Kauf genommen, wenn ein prognostiziertes Einsatzprofil dies rechtfertigt.

Elektrische Triebfahrzeuge können in Triebzüge und Lokomotiven unterschieden werden. Mit dem Stand von 2010 waren bei den Konzerntöchtern der DB AG folgende Triebfahrzeuge nach Tabelle 1 eingesetzt [1]:

**Tabelle 1: Anzahl der elektrischen Triebfahrzeuge des DB Konzerns Stand 2010 [1]**

Triebzüge	Fernverkehr	235	6 % mehrsystemfähig
Triebzüge	Nahverkehr	1128	0 % mehrsystemfähig
Lokomotiven		2455	24 % mehrsystemfähig

Wie Tabelle 1 zeigt, sind die wenigsten elektrischen Triebfahrzeuge des DB Konzerns mehrsystemfähig. Neben diesen sind noch viele private Bahngesellschaften mit stark variierenden Triebfahrzeugzahlen auf dem elektrifizierten Streckennetz unterwegs. Wegen der jahrelangen Weigerung des DB Konzerns alte Lokomotiven an private Wettbewerber zu veräußern, haben diese vielfach in moderne Fahrzeuge investiert.

Vierachsige Lokomotiven in Drehstromantriebstechnik haben Traktionsleistungen am Treibrad von 5,0 ... 6,4 MW, ältere vierachsige Direktmotorlokomotiven von 3,0 ... 3,5 MW.



Fernverkehrstriebzüge wie der ICE 3 haben 8,0 MW Traktionsleistung am Treibrad, Triebzüge des Regionalverkehrs um die 2,5 MW pro Einheit, die je nach Konfiguration auch in Mehrfachtraktion eingesetzt werden können. Alle Triebfahrzeuge in Drehstromantriebstechnik sind rückspeisefähig und können beim Bremsen mit der elektrischen Betriebsbremse Strom in das Fahrleitungsnetz zurückspeisen.

## 4 Technologien zur dezentralen Streckeneinspeisung

### 4.1 Netzaufbau

Dezentrale Streckenspeisung bedeutet, dass an jedem Standort der Bahnenergieeinspeisung in die Fahrleitung neben der 15-kV-seitigen Verteilung in die Streckenabgänge eine Erzeugung der Spannung 1 AC 15 kV 16,7 Hz erfolgen muss, ohne dass ein übergeordnetes Bahnstromnetz mit Sonderfrequenz besteht. Die vorhandenen Übertragungsnetze der Landesenergieversorgung mit 3 AC 50 Hz werden für die Energiebereitstellung genutzt, an jedem Einspeisestandort erfolgt eine Umartung (Umformung oder Umrichtung) in Spannungsamplitude, -frequenz und Phasenanzahl. Das setzt voraus, dass die Drehstromnetze an der Einspeisestelle über eine entsprechende Kurzschlussleistung verfügen, um die benötigte Leistung der elektrischen Bahn liefern zu können (im Standardfall 2 x 15 MVA). Dazu ist ein Anschluss an die 110-kV-Ebene i.d.R. ausreichend, in Norwegen nutzt man für den Anschluss auch Mittelspannungsnetze [9].

Historisch gesehen waren Schweden und Norwegen Vorreiter bei der Anwendung dieser Art der Bahnenergieversorgung, da in diesen Ländern die Vollbahn-Elektrifizierung zu einer Zeit vorangetrieben wurde, als bereits landesweite Drehstromnetze existierten (Schweden: 1926 [4]). Somit wurde keine Notwendigkeit gesehen, ein zweites Energieversorgungssystem parallel dazu für die Bahn aufzubauen. Außerdem besitzen diese geografisch eher langgestreckten Länder besonders Richtung Norden Eisenbahnnetze mit geringem Vermaschungsgrad, aber dafür mit langen Stichstrecken, die ohnehin entlang der elektrischen Infrastruktur verlaufen.

In Deutschland wurde die dezentrale Streckeneinspeisung ab den 1970er Jahren für Neuelektrofizierungen im Netz der Deutschen Reichsbahn der DDR angewendet, um unabhängig von Importen großer Elektromaschinen zu sein, wie sie für die Zentrale Bahnenergieversorgung benötigt werden. Als Folge dessen wird trotz des kontinuierlichen Ausbaus der Zentralen Bahnenergieversorgung nach 1990 der Nordosten Deutschlands (Mecklenburg-Vorpommern, nördliches und östliches Brandenburg) nach wie vor dezentral gespeist. Wegen des geringen Verkehrsaufkommens auf diesen Strecken und der Schwierigkeiten im Zusammenhang mit

der Errichtung von neuen Bahnstromleitungen der Zentralen Bahnenergieversorgung wird dies auch langfristig Bestand haben.

Die Fahrleitung dient der Stromübertragung zu den unter ihr verkehrenden Zügen. Durch die Spannung von 15 kV und den geringen Querschnitt ist sie nicht zum Energietransport über längere Strecken (z.B. mehrere Speiseabschnitte mit je 30...50 km Länge) geeignet. Eine strommäßige Belastung zusätzlich zu der des elektrischen Zugbetriebes muss ausgeschlossen werden, da ansonsten Schutzauslösungen durch Überströme mit Unterbrechung des Zugbetriebes die Folge wären.

Die elektrische Ausrüstung dezentraler Streckeneinspeisungen muss für die Erzeugung der größten strommäßigen Belastung (Lastspitzen) im Hinblick auf Höhe und Dauer im Speisebereich dimensioniert sein, da eine Vergleichmäßigung der Bahnlast vieler einzelner Unterwerke über ein übergeordnetes Netz nicht gegeben ist. Dadurch ergibt sich im Vergleich zur Zentralen Bahnenergieversorgung eine Überdimensionierung der Anlagen mit einer schlechteren Ausnutzung.

## **4.2 Dezentrale Bahnenergieerzeugung**

### **4.2.1 Rotierende Umformer**

Zur dezentralen Streckenspeisung wie sie seit den 1920er Jahren in Schweden und Norwegen angewendet wird, konnten zur damaligen Zeit nur rotierende Umformer eingesetzt werden. Sie wurden als fahrbare Wagen aufgebaut und in Hallen an den Strecken aufgestellt.

Die Maschinensätze bestehen aus einer Drehstromsynchronmaschine und einer Einphasensynchronmaschine auf einer gemeinsamen Welle. Das Polpaarzahlverhältnis beträgt 3 : 1, womit die Frequenzübersetzung erreicht wird. Auf der Welle befinden sich noch die Erreger- einrichtungen für die beiden Hauptmaschinen. Über Transformatoren und Schaltanlagen erfolgt der Anschluss der Drehstromsynchronmaschine an das Drehstromnetz und der Einphasensynchronmaschine an das Fahrleitungsnetz. Der Leistungsfluss ist bidirektional möglich.

Auch die in der DDR hergestellten Umformer sind fahrbar auf speziellen Wagen aufgebaut. Sie haben eine Wirkleistung von 8 MW und eine Scheinleistung von 10 MVA, bis zu vier Stück wurden in einem Umformerwerk aufgestellt [3]. Aufgrund der Frequenzvorgabe durch das Drehstromnetz und der beiden Synchronmaschinen auf einer Welle ist die Frequenz auf

der Bahnseite immer genau ein Drittel der aktuellen Frequenz des Drehstromnetzes. Es kann keine Frequenz-Leistungs-Regelung auf der Bahnseite erfolgen. Die Leistungsverteilung auf die Umformer bzw. die benachbarten Umformerwerke entlang der durchgekuppelten Fahrleitungsanlage erfolgt mittels Verstellung der Erregung hauptsächlich der Einphasenmaschine und damit der Polradwinkel der Maschinen zueinander.

Nachteilig sind der Instandhaltungsaufwand der rotierenden Maschinensätze und der relativ geringe Wirkungsgrad im Teillastbereich, der prinzipbedingt bei der dezentralen Speisung häufig auftritt. Umformer werden deshalb nicht mehr beschafft und sind keine Option für die weitere Untersuchung.

#### 4.2.2 Statische Umrichter

Mit der Verfügbarkeit leistungsfähiger abschaltbarer Leistungshalbleiter war die Herstellung von statischen Umrichtern seit Mitte der 1980er Jahre möglich. In Deutschland ist diese Technologie zur Umartung von Drehstrom in einphasigen Bahnstrom seit 1993 im Einsatz. Aufgrund vieler Vorteile wie geringerer Instandhaltungsaufwand, besserer Wirkungsgrad im Teillastbereich und geringerer Platzbedarf bei der Aufstellung sind Umrichter mittlerweile bei Neubeschaffung unangefochten.

Der überwiegende Teil der derzeitigen Umrichter sind so genannte Zwischenkreisumrichter, bei denen der drehstromseitige Teilumrichter und der bahnstromseitige Teilumrichter durch einen Gleichspannungszwischenkreis entkoppelt sind. Mittels drehstromseitigen Teilumrichters erfolgt die Wandlung von 3 AC 50 Hz in Gleichspannung. Dafür können netzgeführte zwölfpulsige Gleichrichterschaltungen oder gepulste, selbstgeführte Brückenschaltungen zum Einsatz kommen. Letztgenannte sind Standard im Leistungsbereich 15 MW. Sie erlauben einen netzfreundlichen Betrieb mit  $\cos \phi = 1$  und amplitudenmäßig geringen höherfrequenten Oberschwingungen am Drehstromnetz. Aus der Gleichspannung im Zwischenkreis wird mittels mehrerer (mindestens vier) am Zwischenkreis parallelgeschalteter gepulster B2-Brücken am Bahnstromsummiertransformator wieder 1 AC 16,7 Hz erzeugt. Je mehr Spannungsstufen vorhanden sind, umso besser lässt sich eine sinusförmige Ausgangsspannung erreichen.

Neben die klassischen Zwischenkreisumrichter tritt seit wenigen Jahren der sogenannte Multilevel-Umrichter, bei dem durch viele in Serie geschaltete gepulste B2 Brücken in drei parallelen Zweigen durch geschickte Ansteuerung der einzelnen Spannungsstufen sowohl dem

Drehstromnetz ein sinusförmiger Strom entnommen wird als auch auf der Bahnstromseite eine sinusförmige Spannung bereitgestellt wird. Bei Anschluss an die 15-kV-Ebene benötigt der Multilevel-Umrichter nicht einmal einen bahnstromseitigen Transformator, da sich bei der Standardleistung von ca. 15 MW und den verwendeten Leistungshalbleitern bereits eine Ausgangsspannung im gewünschten Spannungsbereich ergibt.

Für Netzkupplungsumrichter besteht ein kleiner Anbietermarkt. Die Firmen ABB, Siemens und Convertteam (früher Alstom) liefern heute diese Technik an die DB Energie und andere 16,7-Hz-Bahnstromversorger. Die DB Energie entwickelte ein Standard-Umrichterkonzept [11] mit dem Ziel, aus der Leistung eines Einzelumrichters von 15 MW beliebig skalierbare Umrichterwerke höherer Leistung zu bilden und Entwicklungsarbeit bei den Herstellern einzusparen. Die Einzelumrichter selbst sind dabei in Containern unterbracht, so dass Montagezeiten vor Ort sehr kurz gehalten werden können. Ursprünglich sollte damit auch eine eingeschränkte Portabilität der Anlagen erreicht werden.

Der Anschluss an 3 AC 50 Hz erfolgt an der 110-kV-Ebene. Danach erfolgt eine Spannungstransformation auf etwa 20 kV, mit der die Leistungshalbleiter betrieben werden. Ein dezentrales Umrichterwerk der DB Energie hat bei den bisher ausgeführten dezentralen Anlagen mit direkter Fahrleitungseinspeisung 2 x 15 MW (interne Bezeichnung: Streckenumrichterwerk). Dafür ist allerdings weniger die benötigte Leistung, sondern wie bei den Unterwerken die vorzuhaltende Redundanz verantwortlich. Durch ihren hohen Wirkungsgrad im Teillastbereich ist der ständige Parallelbetrieb zweier relativ schlecht ausgenutzter Anlagen aber weniger kostenintensiv als bei den Umformern.

Die jährlichen Ausfallzeiten der bisherigen Umrichter sind gering. Maximal zwei Tage im halben Jahr wird ein Umrichterblock für Instandsetzungsarbeiten abgeschaltet. Allerdings sind die Anlagen für Betriebsmittel der elektrischen Energieversorgung noch relativ neu (<20 Jahre), so dass eine Gesamteinschätzung noch nicht abschließend möglich ist.

## 4.3 Betriebsführung

### 4.3.1 Inselbetrieb dezentraler Umrichter

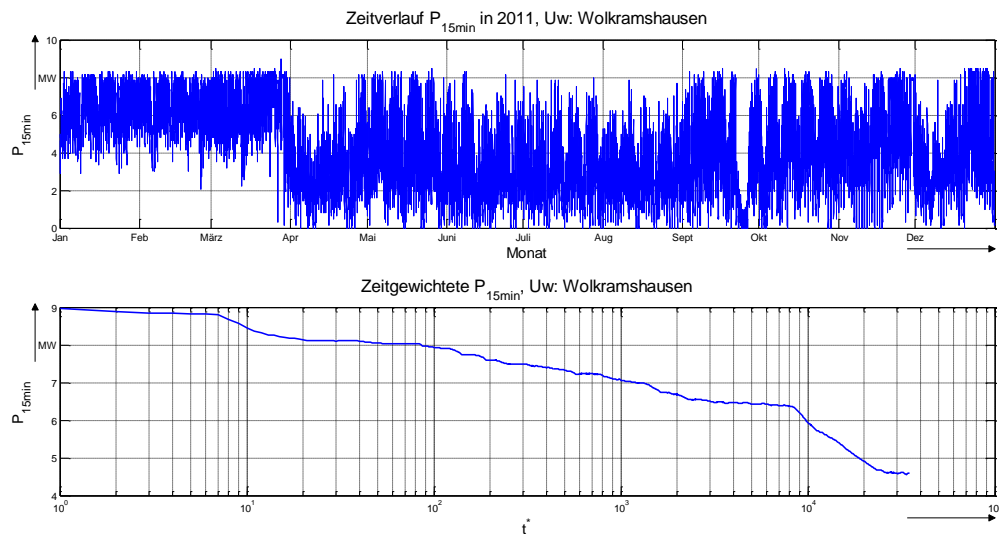
Inselbetrieb bedeutet, dass ein Umrichterwerk (mit mehreren Einzelumrichtern) ein Netz allein, d.h. ohne eine Verbindung zu anderen Netzbereichen mit weiteren Bahnstromerzeugern

(Umrichtern, Umformern, Kraftwerken) versorgt. Jede Wirk- und Blindleistungsanforderung, die durch die Last vorgegeben wird, muss sofort geliefert werden, eine Leistungsregelung kann nicht erfolgen. Das Umrichterwerk muss lediglich die Spannung im zulässigen Bereich halten. Die Frequenz kann konstant gehalten werden. Ein derartiger Netzbetrieb ist nicht anzustreben, da ein solches Umrichterwerk für die höchsten auftretenden Leistungsspitzen auszuliegen wäre und diese dann auch abrechnungsrelevant für den Energieeinkauf sind. Werden dann aus Redundanzgründen mehrere Einzelumrichter parallel betrieben, so ergibt sich eine sehr geringe Ausnutzung der Anlagen.

Bei der hier zu untersuchenden Dezentralisierung sind solche ungünstigen Netzkonstellationen aber zumindest zeitweise denkbar.

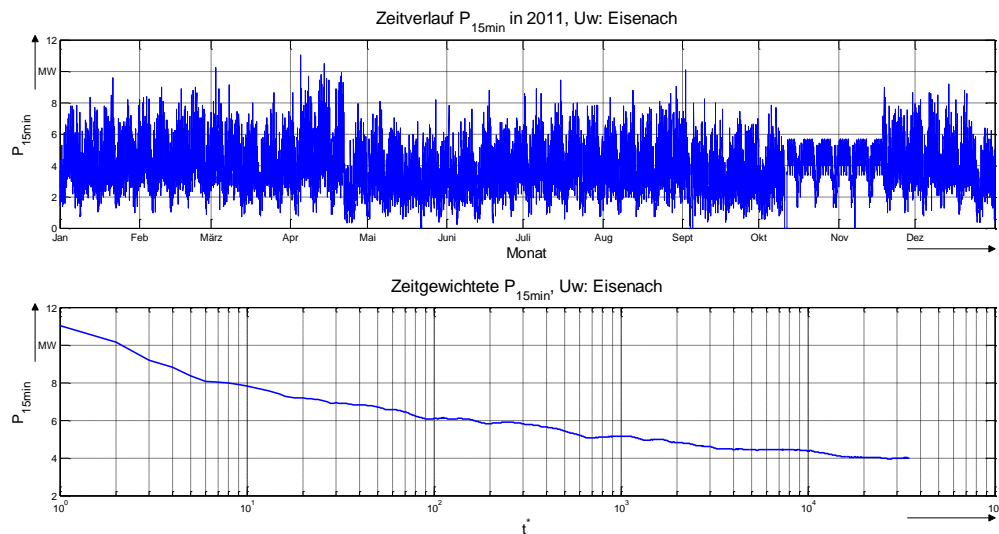
#### **4.3.2 Parallelbetrieb dezentraler Umrichter mit einem Zentralen Bahnstromnetz**

Der Parallelbetrieb des dezentralen Umrichterwerkes zu Unterwerken der Zentralen Bahnenergieversorgung wird derzeit an drei Standorten von DB Energie, nämlich Genin, Wolkranshausen und Doberlug-Kirchhain, praktiziert. Kennzeichnend für diese Werke ist, dass das dezentrale Umrichterwerk stets von Unterwerken des Zentralen Bahnstromnetzes flankiert wird und nicht etwa mehrere Umrichterwerke allein entlang einer Strecke speisen. Das Umrichterwerk muss seine Ausgangsspannung so einstellen, dass sie in Betrag und Phasenlage genau zwischen den Ausgangsspannungen der benachbarten Unterwerke liegt, um Ausgleichsströme über die Fahrleitung zu minimieren. Es muss den Frequenzschwankungen des Zentralen Bahnstromnetzes folgen. Eine Teilnahme an der Frequenz-Leistungsregelung wie die anderen Einspeiser des Zentralen Bahnstromnetzes kann jedoch nicht stattfinden. Über diese prinzipielle Einstellung hinaus erfolgt noch die Überwachung des 15-min-Leistungsmittelwertes, um den Energieeinkauf vom 3 AC 110 kV 50 Hz-Netz zu optimieren, so dass bei drohender Überschreitung eine Senkung der Umrichterausgangsspannung erfolgen kann. Damit wird die im Speisebereich anfallende Leistung durch den Zugbetrieb auf die Nachbarunterwerke verlagert, zum Preis höherer Ausgleichsströme und Verluste über der Fahrleitung.



**Abbildung 1: Verlauf der 15-min-Leistungswerte und deren zeitgewichtete Belastungsdauerkurve für das Urw Wolkramshausen**

In Abbildung 1 sind die 15-min-Leistungsmittelwerte des Jahres 2011 des Urw Wolkramshausen dargestellt. Darunter sind diese Leistungswerte zeitgewichtet. Deutlich ist die Begrenzung der Leistung auf etwa 9 MW im Jahresverlauf zu erkennen. Darüber hinaus gehende Leistungsanforderungen müssen von den benachbarten Uw übernommen werden. Aus der zeitgewichteten Belastungsdauerkurve ist die Dauer der auftretenden Belastung ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass die begrenzte Leistung von ca. 9 MW über  $7 \times 15$  min also maximal 105 min lang auftritt. Erst bei größeren Betrachtungszeiträumen nimmt die mittlere Leistung ab. Wird zum Vergleich ein Unterwerk an einem ähnlichen Standort betrachtet (Abbildung 2), sind folgende Unterschiede zu erkennen.



**Abbildung 2: Verlauf der 15-min-Leistungswerte und deren zeitgewichtete Belastungsdauerkurve für das Uw Eisenach**

Bei dem Beispiel des Unterwerks Eisenach treten Leistungsspitzen sowohl positiv als auch negativ zu einem Jahresmittelwert von 4 MW am auf. Die maximale 15-min-Leistungsspitze ist mit 11 MW höher als beim Urrichterwerk, sie tritt nur einmalig und nicht über einen längeren Zeitraum auf. Für größer werdende Betrachtungszeitfenster nimmt die Mittelleistung kontinuierlich ab.

Die Mitteilung über die Spannung der Nachbarunterwerke erhält das Umrichterwerk über eine redundant verlegte Nachrichtenübertragung auf Lichtwellenleiterbasis von jedem der Nachbarunterwerke. Es wird die gesamte Spannungsvollschwingung übertragen. Dieses System wird U-Pilot genannt [6]. Es erfordert durch die Übertragungswege zusätzliche Infrastruktur entlang der Eisenbahnstrecke.

Der Betrieb mit mehreren Umrichterwerken entlang einer Strecke mit Parallelbetrieb zu einem Zentralen Bahnstromnetz wurde bislang noch nicht angewandt. Eine Leistungsregelung ist über das System U-Pilot ebenfalls denkbar, wäre allerdings nicht so effektiv wie derzeit. Es müsste dahingehend angepasst werden, dass die Limitierung aller 15-min-Mittelwerte der Urw Berücksichtigung finden würde. Allerdings kann eine Leistungsspitze im Fahrleitungsnetz aufgrund der höheren Impedanzen gegenüber dem 110-kV-Bahnstromnetz nicht über mehrere Speiseabschnitte verschoben werden. Hier besteht noch Forschungsbedarf.



### 4.3.3 Parallelbetrieb dezentraler Umrichter mit dezentralen Umformern

Diese Betriebsweise wird in Schweden angewendet. Hier wurde zunächst nur über Umformer gespeist, ab den 1970er Jahren ersetzten die ersten Umrichter die Umformer. Heute überwiegen die Umrichter. Die Umformer geben durch ihre Polräder im unbelasteten Zustand die Phasenlage der bahnseitigen Ausgangsspannung vor. Aufgrund der günstigeren Spannungshaltung durch die dann mögliche zweiseitige Speisung wird die Fahrleitungsanlage durchgekuppelt betrieben. Dies ist unproblematisch, solange der Lastwinkel der Umformer und Umrichter auf der Bahnseite einen Wert von etwa  $30^\circ$  bis  $40^\circ$  nicht übersteigt. Dies kann durch große Lastwinkelunterschiede im Drehstromnetz, aber noch stärker durch große Belastungsunterschiede im Bahnstromnetz verursacht werden. Zur besseren Lastaufteilung begann Schweden in den 1990er Jahren mit dem Aufbau eines eigenen 1 AC 130 kV-Bahnstromnetzes, das parallel zur Fahrleitung an die Umformer- und Umrichterwerke angeschlossen ist [5]. Diese Leitungen sind aber nicht nur niederohmige Verstärkungsleitungen, sondern an diesen sind auch Unterwerke zwischen den Umformer- und Umrichterwerken angeschlossen. Allerdings wurden dadurch die Lastwinkelunterschiede im Fahrleitungsnetz der Bahn zwischen Süden und Norden so groß, dass es aufgetrennt betrieben werden muss.

### 4.3.4 Parallelbetrieb ausschließlich dezentraler Umrichter

Soll ein gesamter Netzbereich dezentral über Umrichterwerke gespeist werden, so wie es derzeit im Nordosten Deutschlands mit den dezentralen Umformerwerken geschieht, so kann auch innerhalb dieses Netzbereiches die für die Spannungshaltung und Übertragungsverlustminimierung vorteilhafte Zusammenschaltung des Fahrleitungsnetzes erfolgen. Da ein nennenswerter Energietransport über die Fahrleitungen aber ausgeschlossen werden muss, könnte in diesem Netzbereich keine Frequenz-Wirkleistungs-Regelung eingesetzt werden. Folglich wäre es ausreichend, durch alle Umrichter eine konstante einheitliche Frequenz (z.B.  $16\frac{2}{3}$  Hz) zu erzeugen. Über die Stellung der Phasenlage der Ausgangsspannung der Umrichter könnte sogar ein unterschiedlicher Lastwinkel auf der Drehstromseite ausgeglichen werden. Zunächst muss erst einmal jedes Umrichterwerk die in seinem Speisebereich auftretenden Wirk- und Blindleistungen selbst bereitstellen. Mittels Senkung der Ausgangsspannung kann auch hier eine Verlagerung auf Nachbarumrichterwerke z. B. bei drohender Überlastung erfolgen. Dieses Prinzip wurde unter dem Begriff Kennlinienumschaltung bereits bei den dezentralen Umformerwerken angewandt.

Eine Leistungsregelung in dezentral gespeisten Netzbereichen ist letztendlich immer eine Spannungsregelung. Die Frequenz schwankt bei den Umformern prinzipbedingt nur mit den Frequenzschwankungen im Drehstromnetz, bei den Umrichtern könnte sie konstant sein.

#### **4.4 Bewertung im Vergleich zur zentralen Bahnstromversorgung**

Die Energiebereitstellung bei dezentraler Bahnenergieversorgung erfolgt nahe des Ortes der Einspeisung in die Fahrleitung. Ausgehend von der Leistungsfähigkeit der heutigen Unterwerke im Zentralen Netz, aber auch aus Redundanzgründen, sind Umrichterwerke mit 2 bis 3 x 15 MW Wirkleistung und 18 MVA Scheinleistung zu errichten. Dazu ist ein Netzanschluss in der 3 AC 110 kV-Ebene ausreichend. In Deutschland kann davon ausgegangen werden, dass Netze dieser Spannungsebene flächendeckend vorhanden sind. Allerdings werden kurze (geschätzt: 2-3 km) neue Drehstromzuleitungen notwendig. Dezentral betriebene Netzbereiche können mit durchgeschalteter Fahrleitungsanlage und damit hinsichtlich des Spannungsfalls und der Fahrleitungsverluste genauso günstig betrieben werden, wie derzeit die Unterwerke im Zentralen Bahnstromnetz.

Die Leistungsregelung kann nur über die Veränderung der Ausgangsspannung in Betrag und Phase auf der Fahrleitung erfolgen. Damit wird im Speisebereich benötigte Leistung auf benachbarte Umrichterwerke verlagert. Eine Leistungsübertragung über längere Distanzen ist aufgrund der vergleichsweise hohen Fahrleitungsimpedanz (Faktor 50 zu 110-kV-Bahnstromleitungen [4]) nicht möglich und auch nicht erwünscht, um Fahrleitungen nicht strommäßig zu überlasten. So können zwar lokale Lastspitzen verteilt werden, dennoch wird es nicht möglich sein, die dezentralen Umrichterwerke so konsequent in ihrem 15-min-Wirkleistungsmittelwert zu begrenzen, um die Energiekosten niedrig zu halten, wie es derzeit mit den wenigen dezentralen Umrichterwerken zwischen zwei zentralen Unterwerken möglich ist. Wegen der höheren Leistungspreise für die Wandlung der Bahnenergie aus dem 3 AC 50 Hz-Netz und den bei Dezentralisierung entfallenden Kraftwerken, die direkt und preiswert Leistung mit Bahnfrequenz erzeugen (und an denen DB Energie vertragsmäßig beteiligt ist), werden bei Dezentralisierung die Gestehungskosten der Energie für die DB Energie zwangsläufig steigen. In Anbetracht der großen Bahnstrom-Energiemenge von über 10 TWh pro Jahr bestimmt dieser Aspekt maßgeblich die Wirtschaftlichkeit. Dies ist auch der wesentliche Grund dafür, dass nach der Wiedervereinigung 1990 der Ausbau des zentralen

Bahnstromnetzes auf dem Gebiet der ehemaligen Deutschen Reichsbahn konsequent vorange-  
trieben wurde. Die im weiteren Untersuchungsverlauf angestellten Wirtschaftlichkeitsbetrach-  
tungen untermauern diese Aussage eindeutig.

Im Gegensatz zu den heutigen Unterwerken, die im Wesentlichen nur aus Schaltanlage und  
Transformator bestehen, ist auf Grund der höheren Komponentenanzahl des Umrichters (zu-  
sätzlich: Halbleiter, Kühlanlage) eine geringere Verfügbarkeit denkbar, auch wenn dies der-  
zeit von DB Energie aufgrund des geringen Alters der Anlagen nicht so eingeschätzt wird. Al-  
lerdings liegen die Erfahrungen erst seit 1993 vor, die sich im Hinblick auf älter werdende  
Umrichteranlagen noch ändern könnten.

## 5 Varianten zur Dezentralisierung des Bahnstromnetzes

### 5.1 Definition von Szenarien

#### 5.1.1 Trassenbedarf und Leitungsführung der Landesenergieversorgung (Overlay-Netz)

Voraussetzung für die Errichtung eines Overlay-Netzes unabhängig von dessen Ausprägung als HDÜ oder HGÜ sind leistungsfähige Netzknoten des bestehenden 3 AC 380 kV 50 Hz-Netzes, an denen dieses angebunden werden könnte. In Abstimmung mit den Bearbeitern aus Los 1 sind folgende Netzknoten für die weitere Bearbeitung identifiziert und festgelegt worden:

- A...Brunsbüttel
- B...Diele
- C...Landesbergen
- D...Wustermark
- E...Dauersberg
- F...Grafenrheinfeld
- G...Neckarwestheim
- H...AKW Isar

Diese sind in ihrer Lage zu den bestehenden Anlagen der Bahnenergieversorgung in Deutschland in Abbildung 3 dargestellt (siehe dazu auch Los 1 Kapitel 8.2).



Abbildung 3: 3-AC-380-kV-50-Hz-Netzknotten (grün) und zu überbrückende Trassenlücken (grün)

Ausgehend von diesen Netzknotten wurden Bahntrassen ausgewählt, die diese Knoten tangieren und in Abstimmung mit dem Auftraggeber einen Nord-Süd bzw. einen Ost-West-Verlauf

haben. Bei den meisten dieser Knoten ist eine direkte Anbindung durch Bahnstromtrassen nicht gegeben, es müssten dann noch Strecken von wenigen bis zu 35 km überbrückt werden. Es ergeben sich folgende mögliche Trassenverläufe entlang bestehender Bahnstromtrassen:

- ***Ost-West-Verbindung***

Vom Knotenpunkt D (Wustermark) westlich Berlins wird ein Anschluss an die Bahnstromtrasse zwischen dem Uw Priort und dem Sw Nitzahn hergestellt. Danach wird der Trassenverlauf der Bahnstromleitung über Heeren, Solpke, Lehrte, Hameln, Osnabrück bis Münster genutzt. Hier und in Lehrte besteht eine Anbindung an die oder Kreuzung mit den Nord-Süd-Trassen.

- ***Westliche Nord-Süd-Verbindung***

Vom Netzknoten B (Diele) wird eine Verbindung zur Bahnstromtrasse zwischen den Uw Leer und Haren geschaffen. Ab dort wird die Bahnstromtrasse über Salzbergen nach Münster genutzt. Hier ergibt sich ein Knotenpunkt zur Ost-West-Verbindung. Von Münster aus wird die Bahnstromtrasse nach Datteln genutzt. Hier ergibt sich nun die Möglichkeit zweier alternativer Trassenverläufe. Bevorzugt wird die Nutzung der Bahnstromtrasse in Richtung Hagen, um den 3 AC 380 kV 50 Hz-Netzknoten E (Dauersberg) zwischen den Uw Finnentrop und Rudersdorf anzuschließen. Hier ist wieder eine Überbrückung ohne Bahnstromtrasse notwendig. Vom Uw Rudersdorf wird die Bahnstromtrasse weiter über das Uw Fronhausen in Richtung Offenbach, Höchst, Mannheim, Neckarelz genutzt, um den Netzknoten G (Neckarwestheim) zu erreichen.

Eine Alternative bestünde darin, die Bahnstromtrasse von Datteln durch das Ruhrgebiet über Marl, Duisburg, Köln, Orscheidt und Limburg bis Flörsheim zu nutzen. An dieser Trasse sind jedoch zahlreiche Erzeuger und Bahnunterwerke angeschlossen, wodurch sich im Zuge eines Umbaus bzw. bei Auflassung größere Auswirkungen auf den Zugbetrieb ergeben würden.

- ***Mittlere Nord-Süd-Verbindung***

Der Netzknoten A (Brunsbüttel) wird zwischen den Uw Neumünster und Elmshorn über eine Zuleitung an die bestehende Bahnstromtrasse geführt, die dann in südlicher Richtung nach Sw Nenndorf geht. Hier ergeben sich die Alternativen westlich über Rothenburg, Wunstorf nach Rethen in Richtung Süden zu gehen, um so den Netzknoten C (Landesbergen) anzuschließen oder aber östlich über Hamburg, Uelzen, Lehrte nach Rethen zu gelangen. In beiden Fällen

wird entweder in Lehrte oder Rethen die Ost-West-Verbindung erreicht. Weiter in südlicher Richtung wird die Bahnstromtrasse über Kreiensen, Eichenberg und Bebra genutzt. Zwischen Fulda und Mottgers besteht das Problem, dass die BL aus Richtung Bebra, die Leitung aus Richtung Fulda nur kreuzt, aber keine Verbindung besteht. Dessen ungeachtet wird ab dieser Kreuzung die Bahnstromtrasse von Fulda nach Mottgers und von da ab weiter über Würzburg bis zum Stich nach Emskirchen genutzt. Über den Stich zum Uw Waigolshausen kann fast der Netzknoten F (Grafenrheinfeld) erreicht und damit an diese Nord-Süd-Verbindung angeschlossen werden. Weiter in Richtung Nürnberg muss nun wieder ein Stück ohne Bahnstromtrasse überbrückt werden, um ab Nürnberg wieder dem Verlauf der BL Richtung Denkendorf und Ingolstadt zu folgen. Von Ingolstadt wird über Landshut der Netzknoten H (Isar) erreicht.

- ***Alternative Östliche Nord-Süd-Verbindung***

Für den Energietransport aus Mecklenburg-Vorpommern in Richtung Süden könnte zum Teil die Bahnstromtrasse ab Sw Nitzahn in südlicher Richtung genutzt werden. Von der Ostseeküste bis zur beschriebenen Ost-West-Verbindung existiert allerdings kein Zentrales Bahnstromnetz, so dass bei dieser Variante zunächst mehrere hundert Kilometer überbrückt werden müssten. Ab dem erwähnten Sw Nitzahn wird dann die Bahnstromtrasse über die Uw Muldenstein, Leipzig-Wahren, Weimar, Ebensfeld bis Nürnberg genutzt. Hier würde schließlich die Mittlere Nord-Süd-Verbindung Richtung H (Isar) erreicht.

### **5.1.2 Ableitung von Modellszenarien für die Dezentralisierung**

Für die Darstellung einer denkbaren Bandbreite von Möglichkeiten wurden für die Dezentralisierung des bisherigen Bahnstromnetzes vier verschiedene Modellszenarien entwickelt, die einem Grad der Dezentralisierung von nahe 0% bis 100% entsprechen. Dabei wird indirekt dem Rechnung getragen, dass bei einer Umsetzung auch eine Zeitspanne für Übergangslösungen und Umbauten existieren muss, in der dann zumindest Teile dieser Szenarien auftreten können. Mit der Festlegung auf vier typische Szenarien wird also lediglich der Darstellungsaufwand eingeschränkt, keinesfalls aber werden die sich ergebenden technischen und materiellen Konsequenzen verdeckt.

- ***Szenario A***

Das Szenario A ist das Basisszenario mit dem Iststand 2010. Das bedeutet, dass bis auf kurze Bauzustände das komplette heute vorhandene 2 AC 110 kV 16,7 Hz-Bahnstromnetz erhalten

bleibt oder nach Integration von Landesenergietrassen wieder errichtet wird. Unabhängig davon, welche technische Lösung der Mitführung für das Overlay-Netz durch die Untersuchungen in Los 1 präferiert wird, ist am Ende der Umbauten wieder ein deutschlandweites Bahnstromnetz mindestens mit dem Stand von 2010 existent. Einschränkungen ergeben sich während der Bauphase, die unter der Maßgabe des durchgehenden elektrischen Zugbetriebes zu erfolgen hat. Eine Dezentralisierung der Versorgung erfolgt nicht. Das Szenario A wird als Basis- bzw. Referenzszenario für den späteren wirtschaftlichen Vergleich genutzt.

- ***Szenario B1***

Das Szenario B1 unterstellt die in 5.1.1 vorgeschlagenen Netzanschlussknoten für das Overlay-Netz A bis H und die Trassenverbindungen. Entlang dieser Trassen wird das 110-kV-Bahnstromnetz abgebaut. Die betroffenen Unterwerke werden auf dezentrale Umrichterwerke umgebaut. Die bislang an diesen Trassen angeschlossenen Bahnstromerzeuger wie Kraftwerke und Umformer fallen für die Bahnstromerzeugung weg, bestehende Umrichter werden hinsichtlich einer Weiternutzung untersucht. Ziel dieses Szenarios sollte der Erhalt eines reduzierten, aber noch gesamtdeutschen Bahnstromnetzes mit Wegfall der für das Overlay-Netz benötigten Trassen sein.

- ***Szenario B2***

Im Szenario B2 wird B1 dahingehend erweitert, dass das Overlay-Netz in Richtung der Landesgrenzen entlang bestehender Bahnstromtrassen erweitert wird, um somit einen europäischen Stromtransport über dieses neue Netz organisieren zu können. Dabei wird in Kauf genommen, dass sich dadurch kein gesamtdeutsches Bahnstromnetz mehr erhalten lässt und es mehrere Teilnetze geben wird. Wie in B1 werden betroffene Unterwerke durch neue Umrichterwerke ersetzt, rotierende Erzeuger (Kraftwerke und Umformer) stillgelegt und bestehende Umrichterwerke auf eine Weiternutzung geprüft.

- ***Szenario B3***

Das spekulative Szenario B3 beschreibt schließlich die 100%ige Dezentralisierung des bisherigen Bahnstromnetzes. Damit werden alle Trassen des Bahnstromnetzes aufgelassen und möglicherweise für die allgemeine Energieversorgung nutzbar. Damit verbunden ist der Ersatz aller Unterwerke durch Umrichterwerke und die Auflassung aller Bahnkraftwerke (außer denen, die direkt in die Fahrleitung speisen) und Zentralen Umformerwerke. Für die Umrich-



ter gilt das unter B1 und B2 geschriebene. Das Szenario B3 ist das obere Grenzwertszenario (worst case) und soll zudem auch der Vermutung Rechnung tragen, dass ggf. langfristig der Betrieb mehrerer kleiner Bahnstrom-Restnetze nicht sinnvoll ist.

Allen Dezentralisierungsszenarien ist gemein, dass die entfallenden Bahnstromleitungen entlang hoch belasteter Eisenbahnstrecken verlaufen und diese mit Bahnenergie versorgen. Die Eingriffe betreffen somit die Hauptabfuhrstrecken der DB Netz AG.

## 5.2 Beschreibung der Untersuchungsszenarien

### 5.2.1 Szenario A: Erhalt aller Bahnstromtrassen bei Parallelführung des Overlay-Netzes („Referenzszenario“)

In diesem Minimalszenario wird davon ausgegangen, dass die Infrastruktur des Overlay-Netzes entsprechend den Vorstellungen in 5.1.1 in den bisherigen Trassenverlauf des Bahnstromnetzes integriert wird. Nach vollständiger Errichtung des Overlay-Netzes ist das Bahnstromnetz mindestens in seiner derzeitigen Ausrüstung vorhanden. In der Zeit dazwischen gibt es Bauzustände, die die zeitweise Abschaltung einzelner Stromkreise, die Verlegung von Umgehungskabeln oder aber auch die Außerbetriebnahme einer kompletten Trasse zwischen zwei Unterwerksstandorten enthalten können. Prinzipiell sind dabei für die Integration zwei Varianten denkbar.

#### *1) Errichtung hybrider Masten für Bahnstromfreileitungen und Freileitungen für das Overlay-Netz*

In dieser Variante müssen zunächst abschnittsweise die Masten und Leitungen des Zentralen Bahnstromnetzes demontiert werden. Dies kann aber nur so erfolgen, dass die Unterwerke entlang der Bahnstromtrasse wenigstens noch aus einer Richtung versorgt werden. Dies schließt aus, dass mehrere hundert Kilometer Bahnstromleitung auf einmal umgebaut werden können, da dann der elektrische Zugbetrieb entlang dieser Strecke(n) eingestellt werden müsste. Da gemäß den Lastflüssen, dargestellt durch die Strichdicke in Abbildung 4 und Abbildung 5, im Zentralen Bahnstromnetz nach Einschätzung der DB Energie folgende Abschaltmöglichkeiten für Bauzustände von Bahnstromleitungen gesehen werden (Legende in der Tabelle 2), verbietet sich ein großflächiges Baugeschehen. Während die grün markierten Leitungen auch für längere Zeit (2 - 3 Monate) außer Betrieb gehen könnten, ist dies bei den orange

oder rot dargestellten nicht ohne weiteres möglich. Es könnte zwar eine kurzzeitige Abschaltung täglich erfolgen, aber nur von einem der zwei Stromkreise einer Leitung. Bei den rot markierten Leitungen müsste zudem der Einsatz der Erzeuger angepasst werden. Hier sind außer den betrieblichen Einschränkungen auch wirtschaftliche Einbußen für die DB Energie zu erwarten. Für den Weiterbetrieb von Bahnstromkreisen während des Umbaus können Ersatzgestänge errichtet werden, sofern dafür Platz zur Verfügung steht. Für kurze Strecken von bis zu 400 m können Baueinsatzkabel zur Anwendung kommen. Aufgrund dieser kurzen überbrückbaren Strecken stehen letztgenannte einem großräumigen zügigen Umbau im Wege.

**Tabelle 2: Legende für Abbildung 4 und Abbildung 5**

Farbe	Anzahl Stromkreise	Abschaltdauer	Bemerkung
grün	2	2 – 3 Monate	mit Schutzstrecke
gelb	1	2 – 3 Monate	
orange	1	täglich	
rot	1	täglich	mit Anpassung des Erzeugereinsatzes

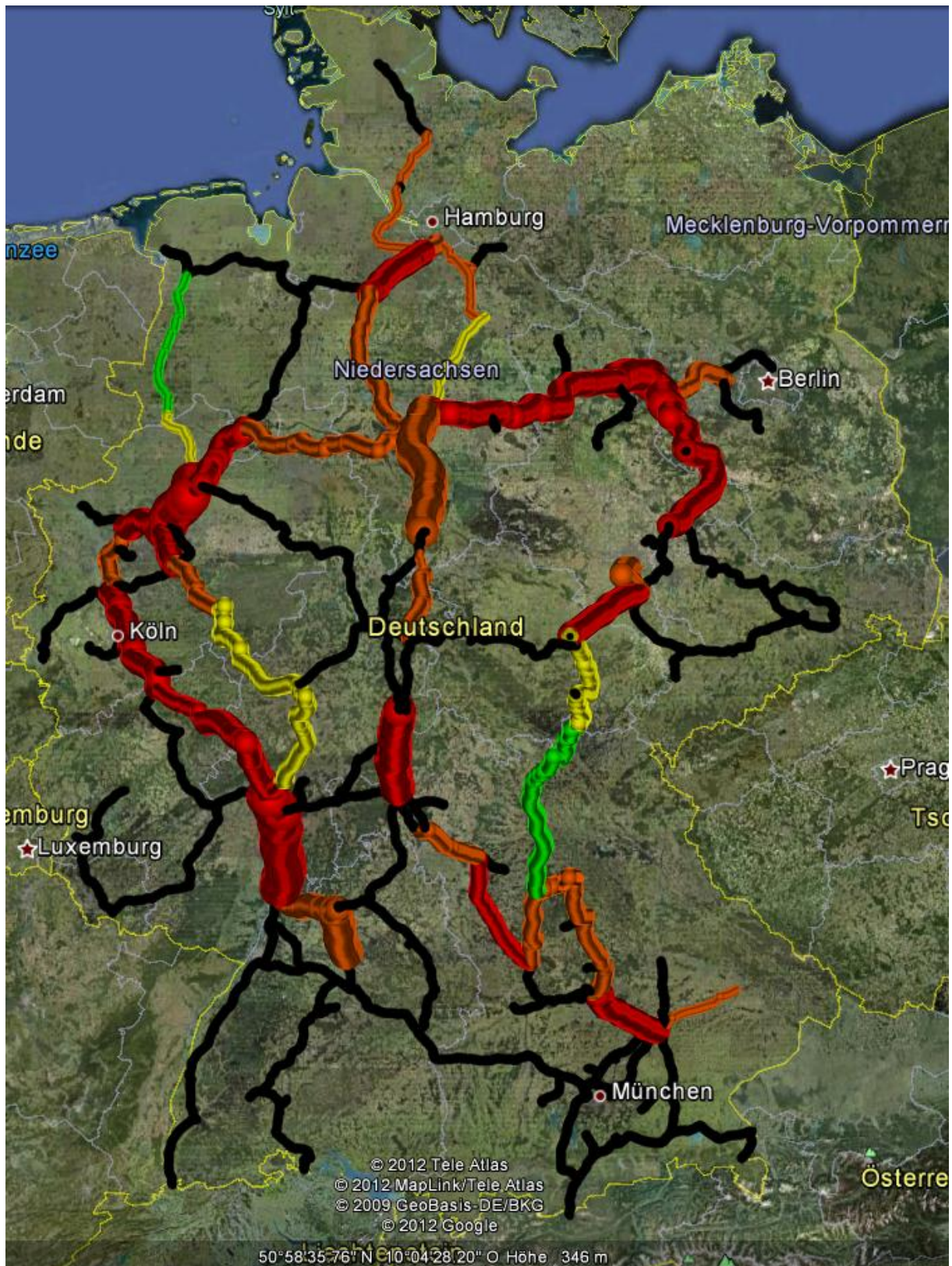


Abbildung 4: Lastfluss im Bahnstromnetz (Minutenmittelwert) und Abschaltmöglichkeiten von Leitungen

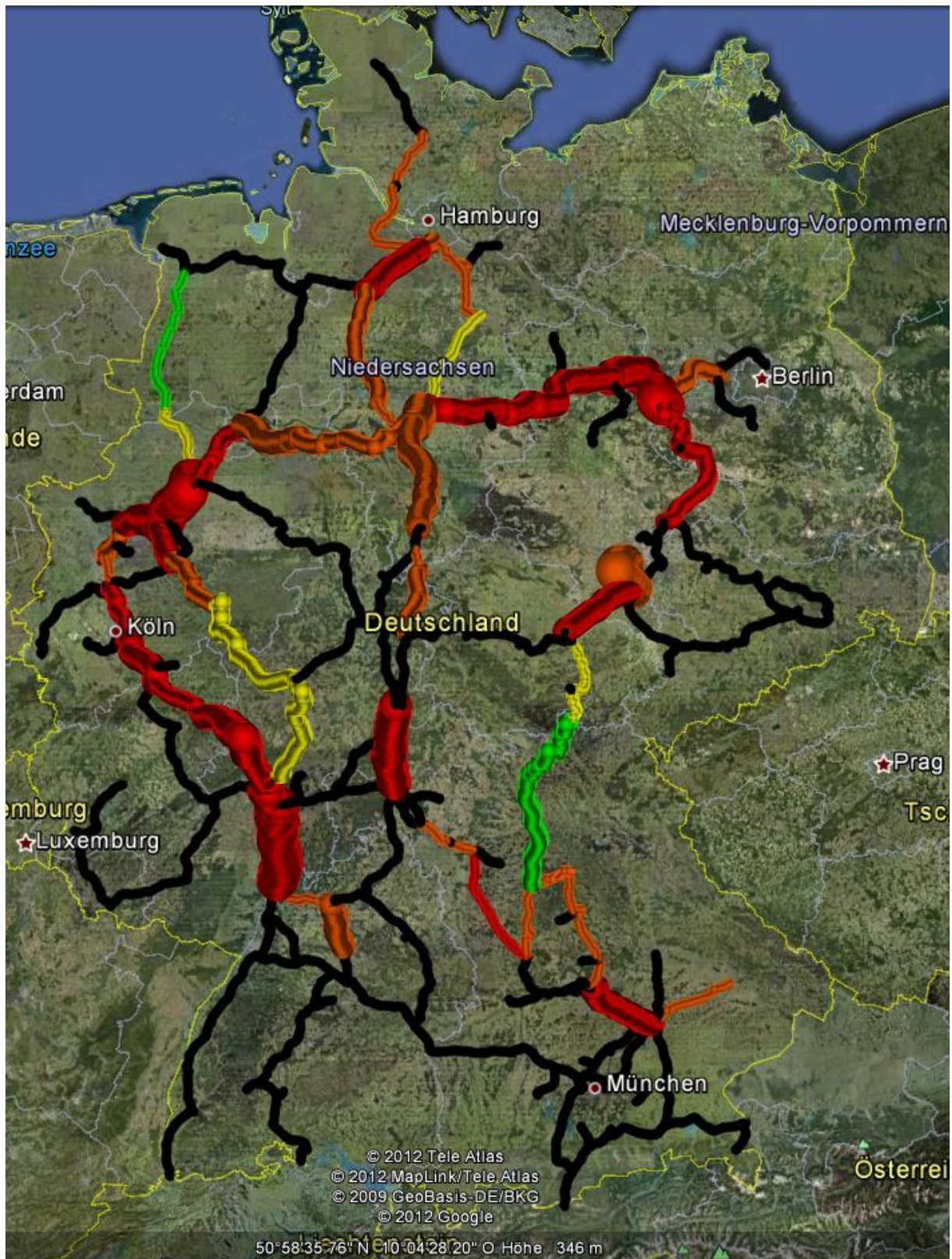


Abbildung 5: Lastfluss im Bahnstromnetz (Stundenmittelwert) und Abschaltmöglichkeiten von Leitungen

## ***2) Verlegung von Kabeln des Overlay-Netzes in den Trassenraum der bestehenden Bahnstromfreileitung***

Diese Variante wird den Betrieb des bestehenden Bahnstromnetzes vermutlich am wenigsten beeinträchtigen. Wie in Los 1 Kap. 5.3 dargestellt, können Kabel grundsätzlich in Trögen unterhalb der Bahnstromfreileitung in deren Trassenraum angeordnet werden. Im Sinne des Arbeitsschutzes wird es während des Baugeschehens unter der Bahnstromfreileitung zu Abschaltungen kommen müssen. Allerdings ist hier die Abschaltung eines Stromkreises wahrscheinlich ausreichend, wenn Kabeltröge links und rechts der Masten und unterhalb der Leiterseile der Stromkreise ausgehoben werden müssen.

Die Anwendung der beiden Varianten Hybridmast oder Kabel unterstellt, dass die bisherige Bahnstromleitung über eine ca. 2 x 18 m breite Trasse (s. Los 1 Kap. 5.2.4) verfügt. Dies ist jedoch nicht immer der Fall. So gibt es Ausführungen der Bahnstromleitung, bei denen die Leiterseile auf verstärkten Fahrleitungsmasten über Bahngelände mitgeführt werden. Solch eine Trassierung besteht u.a. in Nürnberg, Gerresheim, Fulda, im Berliner Raum und im Nordwesten Deutschlands bei Emden. Hier kann also die vorhandene Trasse für ein Overlay-Netz nicht genutzt werden, weil für die Ausführung als Hybridmast kein Trassenraum zur Verfügung steht und weil die Ausführung als Kabeltrasse eine Verlegung im Bereich der Eisenbahnstreckeninfrastruktur erfordern würde.

Des Weiteren sind die Unterwerksstandorte oftmals so gewählt, dass von ihnen ein Eisenbahnknoten mit elektrischer Energie versorgt wird. Diese Knoten finden sich oft in urbanen Gebieten mit dichter Bebauung, weshalb auch die Bahnstromleitungen diese Gebiete queren. Ein markantes Beispiel dafür ist das Ruhrgebiet. Durch weitere Bautätigkeit in den vergangenen Jahrzehnten und die Zersiedelung der Städte gibt es Trassenabschnitte, in denen die Bahnstromleitung unterbaut wurde (siehe Abbildung 6).



**Abbildung 6: Unterbaute Bahnstromleitung im Raum Köln**

Hier wird eine Kabelführung unmöglich und eine Hybridmastlösung wird zumindest auf Widerstände stoßen.

### **5.2.2 Szenario B1: Entfall einzelner Bahnstromtrassen zugunsten des Overlay-Netzes („regionale Dezentralisierung“)**

In 5.1.1 wurden Anschlussknoten für das zu errichtende Overlay-Netz festgelegt und Trassenvorschläge zwischen diesen Knoten entlang der bestehenden Bahnstromtrassen unterbrei-

tet. Bei einer genaueren Betrachtung der heutigen Netzstruktur kann daraus folgende Vorzugslösung der Trassenführung gemäß Abbildung 7 entwickelt werden:

Für die westliche Nord-Süd-Verbindung zwischen B...Diele und G...Neckarwestheim über E...Dauersberg wird ab Datteln die östliche Trassenvariante aus 5.1.1. gewählt. Gegen die Wahl der westlichen Trasse sprechen die hohe Leitungsbelastung des Bahnstromnetzes auf der westlichen Trasse durch das Ruhrgebiet gemäß Abbildung 4, die Anbindung der Schnellfahrstrecke Rhein-Main und die ungünstige Trassierung dieser Leitung durch dicht bebauten Gebiet.

Die mittlere Nord-Süd-Verbindung von A...Brunsbüttel bis H...Isar über C...Landesbergen und F...Grafenrheinfeld, wie sie unter 5.1.1 beschrieben ist, weist nur eine Alternative für den Raum westlich von Hamburg auf. Bei einer genauen Betrachtung der örtlichen Verhältnisse stellte sich heraus, dass es unerheblich ist, ob vom Sw Nenndorf aus die Trasse Richtung Hamburg (östlich) oder Richtung Rotenburg (westlich) weiterverfolgt wird. In beiden Fällen entfällt die Bahnstromleitung zwischen Sw Nenndorf und Lehrte (orange dargestellt in Abbildung 7), da Masten zwischen Sw Nenndorf und HH-Harburg gemeinsam mit der wegfallenden Trasse zwischen Elmshorn und Sw Nenndorf genutzt werden. Ähnlich verhält es sich im Netzknoten Lehrte. Somit wurde für das Overlay-Netz Richtung Netzknoten C...Landesbergen die Bahnstromtrasse über Buchholz, Rotenburg und Eystrup vorgesehen, um Landesbergen direkt zu erreichen. Im Süden besteht zwischen dem Unterwerk Emskirchen und dem Knoten Nürnberg keine Bahnstromleitung, trotzdem wurde dieser direkte Weg für das Overlay-Netz gewählt, um Umwege zu vermeiden und die Wasserkraftwerke an der Donau nicht vom Bahnstromnetz abzuschneiden.

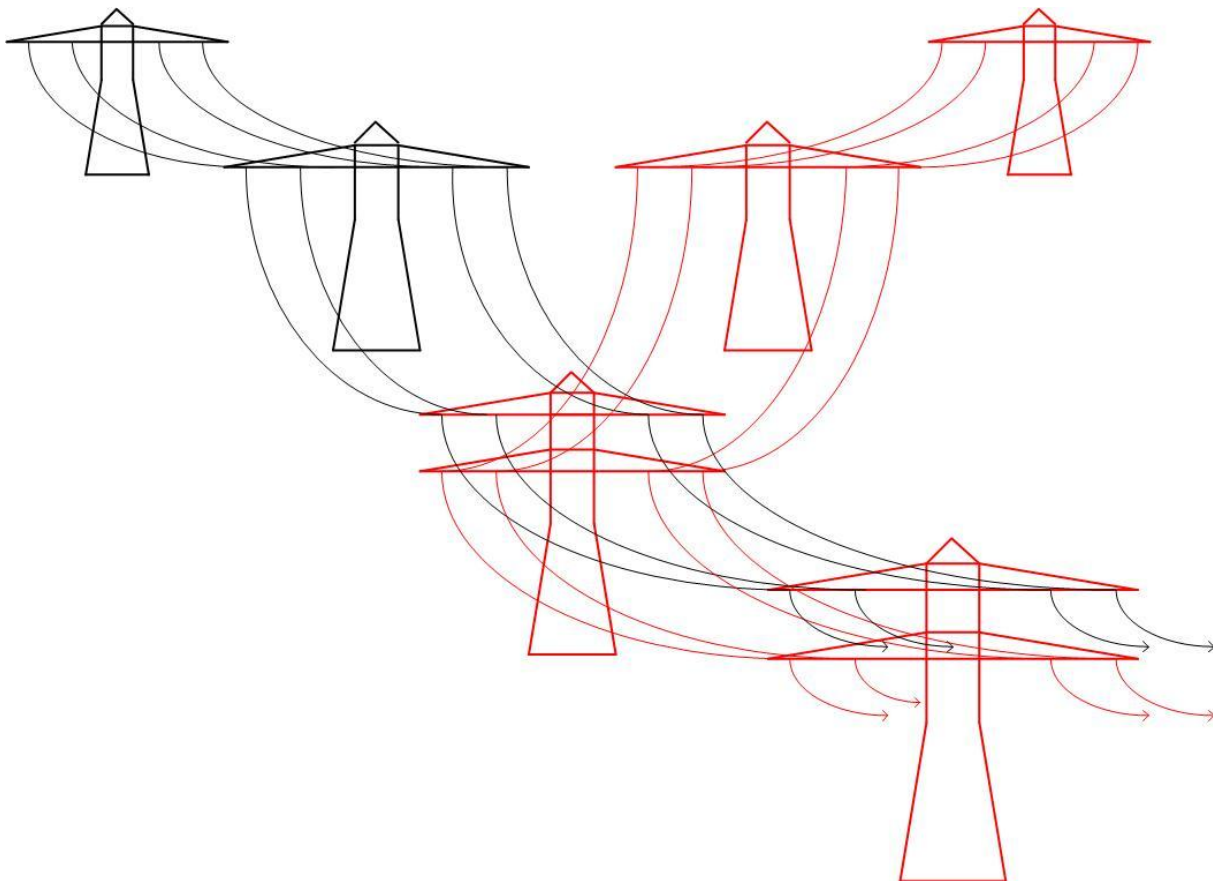
Aus den Vorgaben von Los 1 Kap. 8.2 ergibt sich nur eine einzige mögliche Ost-West-Verbindung über bestehende Bahnstromtrassen, wie sie in 5.1.1 beschrieben ist. In Rethen und Münster ergeben sich Verknüpfungspunkte zu den Nord-Süd-Trassen.



Abbildung 7: Szenario B1: Netzknoten Overlay-Netz (grün), Trassenverlauf Overlay-Netz (rot), verbleibendes Bahnstromnetz (gelb), wegfallende Bahnstromleitungen, Unterwerke und Bahnstromerzeuger (orange)



Entgegen der ursprünglichen Annahme ist der Erhalt eines gesamtdeutschen Zentralen Bahnstromnetzes bereits in dieser Ausbaustufe der Dezentralisierung nicht mehr möglich. Nahezu jede Errichtung des Overlay-Netzes über betrieblich sinnvolle Entfernungen von mehr als hundert Kilometern und damit Auflassung von Bahnstromleitungen bedeutet an Knoten im Bahnstromnetz, auch vom Abbau eigentlich nicht betroffene Leitungen mit zu kappen. Denn entgegen der vereinfachten Darstellung in der Karte der Abbildung 7 sind Leitungen zu Bahnnetzknotten oder Knotenunterwerken hin oft wie in Abbildung 8 geführt.



**Abbildung 8: Führung zweier Bahnstromleitungen viersystemisch auf einem gemeinsamen Mast**

Fällt nun eine Trasse zugunsten des Overlay-Netzes weg (rot) so wird auch der Weiterbetrieb der unbeteiligten Leitungen (schwarz) unmöglich. Dadurch sind auch in der Abbildung 7 mehr Anlagen des Zentralen Bahnstromnetzes orange gekennzeichnet (d.h. vom Rückbau betroffen), als direkt von den Leitungen des Overlay-Netzes (rot) betroffen sind.

Da das Zentrale Bahnstromnetz nicht in seiner bisherigen Gesamtheit erhalten werden kann, entstehen die fünf gelb markierten Teilnetze in Abbildung 7.

Im Raum Bremen kann ein Bahnstromnetz gespeist vom Kraftwerk und Umrichter Bremen-Mittelsbüren verbleiben.

Im Westen Deutschlands kann ein Bahnstromnetz zwischen dem westlichen Ruhrgebiet und der Grenze zu den BeNeLux-Ländern und zu Frankreich gespeist durch die Umrichterwerke Düsseldorf, Köln und Limburg und das Umformerwerk Saarbrücken erhalten bleiben.

Den flächenmäßig größten Teil deckt das Bahnstromnetz im Bereich Hessen, Süd-Bayern und Baden-Württemberg ab. Während dessen Netzteile in den letztgenannten Bundesländern nach einer Dezentralisierung übrig bleiben, wird unterstellt, dass die bisher nur als Leitungskreuzungen vorhandenen Bahnstromleitungen Bebra-Borken und Körle-Kirchheim sowie Fulda-Gemünden und Fliesen-Bebra in Hessen durch Setzen von zusätzlichen Masten verbunden werden können. Dieses Netz könnte auch den derzeitigen Netzverbund mit Österreich und der Schweiz beibehalten.

Im Osten und Südosten Deutschlands würde ein Bahnstromnetz vom Kraftwerk Kirchmöser bei Brandenburg als nördlichstem Punkt über das „Sächsische Dreieck“ und Thüringen sowie über Nürnberg bis zu den Wasserkraftwerken der Donau bestehen bleiben.

Schlussendlich bliebe im Berliner Raum noch ein kleines Netz bestehen, das nur vom Umrichterwerk Thyrow gespeist wird.

### **5.2.3 Szenario B2: Entfall wichtiger Bahnstromtrassen zugunsten des Overlay-Netzes und Bildung von Bahnstrom-Teilnetzen („überregionale Dezentralisierung“)**

Bereits in 5.2.2 wurde die Unmöglichkeit der Erhaltung eines gesamtdeutschen Bahnstromnetzes bei der Herausnahme von Trassen zugunsten des Overlay-Netzes festgestellt. Vor diesem Hintergrund ist das Szenario B2 lediglich als Erweiterung des Szenarios B1 zu sehen, denn eine Teilnetzbildung erfolgte bereits dort.

Das in Szenario B1 entwickelte H-förmige Overlay-Netz könnte für den Stromtransport innerhalb Europas in Richtung der Landesgrenzen zur Schweiz bzw. zu Frankreich im Südwest-

ten und nach Österreich im Südosten entlang der Bahnstromtrassen erweitert werden (s. Abbildung 9).

Im Vergleich zu B1 entfällt das Zentrale Bahnstromnetz entlang der Oberrheinischen Tiefebene von Basel bis Mannheim und damit auch eine Bahnstromnetzakupplung zur Schweiz. Des Weiteren entfällt die Bahnstromtrasse von Landshut über Rosenheim nach Stein in Österreich.

Durch diese Erweiterungen werden die übrigen in 5.2.2 beschriebenen verbliebenen Bahnstromnetze nicht berührt.



Abbildung 9: Szenario B2: Netzknoten Overlay-Netz (grün), Trassenverlauf Overlay-Netz (rot), verbleibendes Bahnstromnetz (gelb), wegfallende Bahnstromleitungen, Unterwerke und Bahnstromerzeuger (orange)

#### **5.2.4 Szenario B3: Entfall aller Bahnstromtrassen („vollständige Dezentralisierung“)**

Das Szenario B3 bedeutet die vollständige Dezentralisierung der Bahnenergieversorgung in Deutschland nach Abbildung 10. In diesem theoretischen Maximalszenario werden alle Bahnstromleitungen und –erzeugeranlagen, sofern sie für eine dezentrale Versorgung nicht nutzbar gemacht werden können, abgebaut. Die freiwerdenden Trassen können dann einer anderweitigen Nutzung zugeführt oder aufgelassen werden. Das Beispiel der dezentralen Bahnstromversorgung von Schweden [5] zeigt aber, dass eine Bahnstromverteilung über ein paralleles Hochspannungsnetz mit dem Anschluss von Unterwerken insbesondere in Verbrauchsschwerpunkten wirtschaftlicher sein kann, als die Errichtung möglichst vieler Umrichterwerke. Die Vorteile der Vergleichmäßigung der Bahnbelastung überwiegen die Nachteile des Betriebes eines eigenen Hochspannungsnetzes. Vor diesem Hintergrund und diesen Erfahrungen ist der vollständige Wegfall aller Bahnstromleitungen als äußerst unwahrscheinliches Szenario anzusehen.



Abbildung 10: Szenario B3: Vollständige Dezentralisierung

## 6 Technische Machbarkeit der Dezentralisierung

### 6.1 Grundsätze

#### 6.1.1 Leistungsbedarf und Betriebsmitteldimensionierung

Bei der Energieversorgung elektrischer Bahnen kommen Grundsätze der allgemeinen Elektroenergieversorgung, wie das n-1-Ausfallkriterium zur Anwendung. So sind alle in Deutschland errichteten Unterwerke mindestens mit zwei Transformatoren ausgerüstet. Es existieren ältere Transformatoren mit einer Nennscheinleistung von 10 MVA, die meisten und alle neueren Unterwerke sind aber mit Transformatoren der Nennscheinleistung 15 MVA ausgerüstet. So ergeben sich standardmäßig Unterwerke mit 30 MVA Nennscheinleistung. Stark belastete Unterwerke insbesondere an großen Bahnknoten sind mit drei Transformatoren ausgestattet, sie haben also 45 MVA.

Charakteristisches Merkmal der Speisung von elektrischen Bahnen ist die ortsveränderliche Last. Aufgrund dieser Ortsveränderung ist die Spannung am Ort des Fahrzeugs schwankend in Abhängigkeit der Entfernung zum Einspeisepunkt. Zur Einhaltung der zulässigen Spannungstoleranzen (dauernd: +15%/-20% [10]) mit einem vertretbaren Aufwand an Infrastruktur (Fahrleitungsanlage, Verstärkungsleitungen...) sind Unterwerksabstände von etwa 50...60 km mit dem System 1 AC 15 kV 16,7 Hz möglich. Dabei wird die Fahrleitungsanlage zwischen den Unterwerken stets durchgeschaltet betrieben, um die Spannungshaltung zu verbessern. Dadurch stellt sich noch ein weiterer günstiger Effekt ein. Bremsen moderne elektrische Triebfahrzeuge, so speisen sie Strom und damit Leistung in die Fahrleitung zurück. Diese Leistung wird von fahrenden Triebfahrzeugen aufgenommen, die sich elektrisch gesehen nah beim rückspeisenden Fahrzeug befinden. Die Wahrscheinlichkeit dazu, dass dieser Fall eintritt, ist bei durchgekuppeltem Fahrleitungsnetz viel größer als bei getrenntem. Damit werden Übertragungsverluste vermieden, die bei Einspeisung in die Hochspannungsebene zusätzlich auftreten würden.

Moderne elektrische Triebfahrzeuge haben Einzelleistungen von 6,4 MW (vierachsige Lokomotive) und 16 MW (2 x ICE 3 Triebzug) am Treibrad. Diese liegen größenordnungsmäßig im Bereich der Unterwerksleistung. Sie weisen dabei eine hohe Dynamik auf, die mit Lastgradienten von ca. 1 MW/s auftreten kann. Da nicht alle Triebfahrzeuge gleichzeitig mit vol-

ler Leistung betrieben werden, kann von einer Vergleichmäßigung der Leistungsspitzen im Bereich der Unterwerke ausgegangen werden, insbesondere wenn die Fahrleitungen zum nächsten Unterwerk durchgekuppelt betrieben werden.

Die Durchschaltung des Fahrleitungsnetzes ist also in vieler Hinsicht vorteilhaft und sollte stets angewendet werden. Dies ist nicht möglich, wenn zentrale Bahnstromnetze große Lastwinkelunterschiede aufweisen oder wenn ein zentrales und ein dezentral gespeistes Netz, welche nicht miteinander synchronisiert werden können, aufeinandertreffen. In diesen Fällen müssen dann Schutzstrecken in die Fahrleitung eingebaut werden, die für eine zweigleisige Strecke ca. 800 000 EUR kosten und stets betriebliche Fehlerquellen darstellen.

Im Zentralen Bahnstromnetz gleichen sich einzelne Leistungsspitzen aus den Speiseabschnitten der Unterwerksbereiche im überlagerten Hochspannungsnetz aus. Bei dezentraler Speisung der Unterwerksbereiche ist diese Möglichkeit nur begrenzt gegeben.

Elektrotechnische Betriebsmittel sind in Abhängigkeit ihres Aufbaus kurzzeitig überlastbar. Entscheidend hierbei sind die thermischen Zeitkonstanten der stromführenden Materialien und deren Volumen. Beispielhaft ist dies in einer älteren Darstellung aus [3] in Abbildung 11 zu sehen.



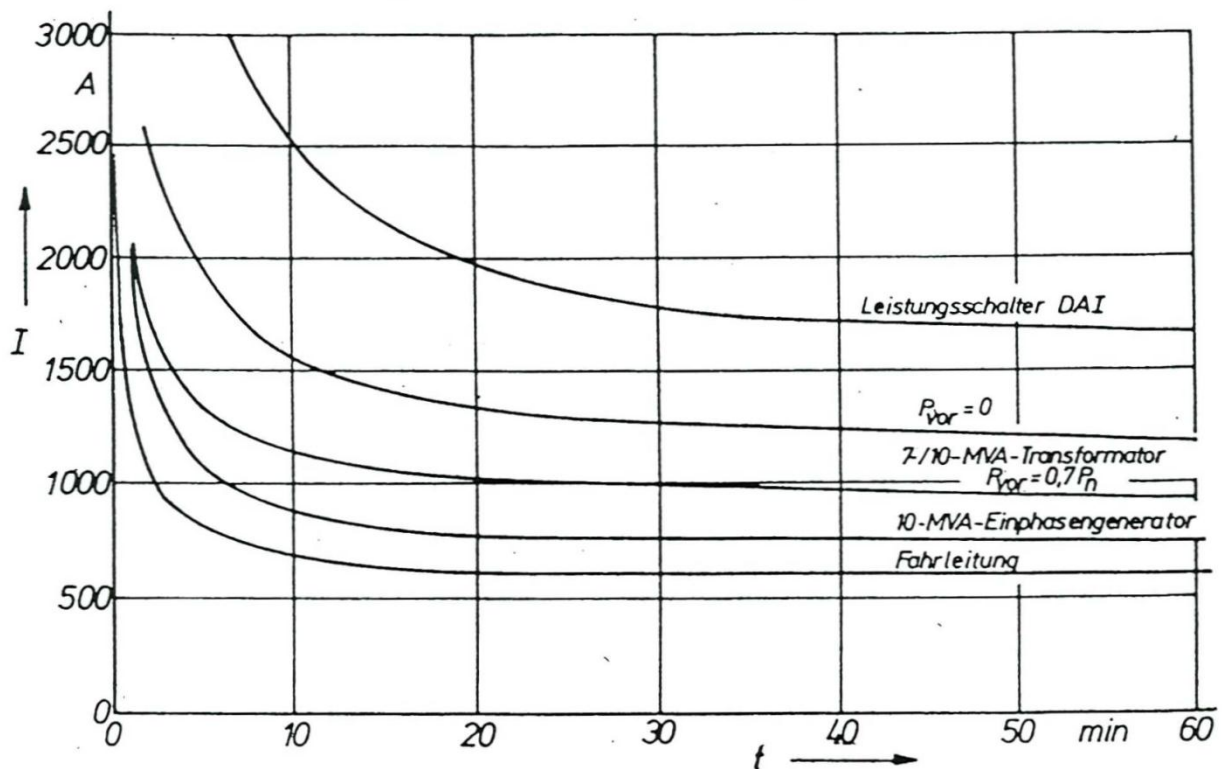


Abbildung 11: Kurzzeitbelastbarkeit elektrotechnischer Betriebsmittel der 16 2/3 Hz Bahnenergieversorgung [3]

Diese Überlastbarkeit kann beim Einsatz der Anlagen ausgenutzt werden, um Überdimensionierung und damit Kosten zu vermeiden.

Die Einphasensynchronmaschinen als schwächstes Glied der Synchron-Synchron-Umformer des dezentral gespeisten Netzteiltes im Nordosten Deutschlands sind 3 min lang mit dem 1,7-fachen der Nennleistung überlastbar. Transformatoren sind selbst nach einer Vorbelastung von 70 % der Nennleistung mehrere Minuten mindestens doppelt überlastbar.

Für Umrichter wird aufgrund der kurzen thermischen Zeitkonstanten der Halbleiterbauelemente vom Hersteller eine Überlastbarkeit von 1,2 - 1,4 im Sekundenbereich angegeben [7], [8]. Diese kurzzeitig wesentlich geringere Überlastbarkeit im Vergleich zu den Transformatoren kann durch die etwas höhere Scheinleistung von 18,75 MVA eines Umrichters und durch die Möglichkeit der Leistungsregelung durch Spannungsabsenkung kompensiert werden.

Da eine konkrete Analyse der derzeitigen Unterwerksbelastung an den 182 Standorten im Rahmen dieser Studie nicht möglich war, wird auf Basis der Leistungsmittel- und Energiewerte der Unterwerke im Folgenden vereinfachend davon ausgegangen, dass sich Unterwerke

mit zwei Transformatoren durch Umrichterwerke bestehend aus zwei Umrichtern mit je 15 MW Wirkleistung und 18,75 MVA Scheinleistung ersetzen lassen.

Darüber hinaus existieren stark belastete Unterwerke, die sich meist an Netzknoten des Bahnstromnetzes in Ballungsräumen befinden und dort eine tragende Rolle bei der Einspeisung spielen, die mit drei Transformatoren ausgerüstet sind. Diese werden in der folgenden Betrachtung jeweils durch Umrichterwerke mit drei Umrichtern ersetzt. Dies betrifft die folgenden zwölf Unterwerke nach Tabelle 3:

**Tabelle 3: Stark belastete Unterwerke mit drei Transformatoren**

Region	Unterwerk
Nord	Uw Harburg
Nord	Uw Lehrte
Nord	Uw Ritterhude
Nord	Uw Wunstorf
West	Uw Dortmund
West	Uw Duisburg
West	Uw Gerresheim
Mitte	Uw Koblenz
Mitte	Uw Weiterstadt
Südwest	Uw Mannheim
Südwest	Uw Vaihingen
Süd	Uw Nürnberg

Zwar existieren derzeit weitere Unterwerke im Netz der DB Energie mit drei Transformatoren, allerdings rechtfertigt deren Leistungs- und Energiebedarf nicht den Einsatz von drei Umrichtern bei der Dezentralisierung.

## 6.1.2 Ermittlung der Mengengerüste für die Szenarien

Die Menge der betroffenen Anlagen für die Dezentralisierungsszenarien B1 bis B3 folgt direkt aus der Abbildung 7, Abbildung 9 und Abbildung 10 zuzüglich der Überlegungen zu den bisherigen Erzeugern des Bahnstromnetzes.

### ▪ *Szenario B1*

Die rückzubauenden Elemente des Zentralen Bahnstromnetzes sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

**Tabelle 4: Rückzubauende Elemente für Szenario B1**

Rückzubauende Elemente	Anzahl/Länge
Unterwerke	51
Umformer-/Umrichterwerke	4
Umbau Kraftwerke	4
110 kV-Freileitungen, Trasse	3.079 km
110 kV-Maste	10.101
110 kV-Leiteseile	13.913 km
110 kV-Erdseile	2.720 km
110 kV-Kabel	1 km
110 kV-Isolatoren	106.655

Wie in Tabelle 4 ersichtlich sind vom Rückbau Bahnstromerzeuger betroffen. Inwiefern das Zentrale Umformerwerk in Hamburg-Harburg mit XXX MW und der Zentrale Umformer in Lehrte mit XXX MW für eine dezentrale Speisung genutzt werden könnten, kann im Rahmen dieser Studie nicht abschließend beantwortet werden. Ein Weiterbetrieb wird wahrscheinlich unwirtschaftlich sein. Die Zentralen Umrichter in Lehrte mit XXX MW sind für die dezentrale Speisung überdimensioniert. Eine Weiternutzung ist aber theoretisch denkbar, wenn man unterstellt, dass Umrichter auch im Teillastbereich noch akzeptable Wirkungsgrade erreichen können.

Für den elektrischen Bahnbetrieb nutzlos werden die Wärmekraftwerke Datteln mit 303 MW, Lünen mit 110 MW, Mannheim mit 190 MW. Derartig große Leistungen können nicht in die für den Energietransport über weite Strecken ungeeignete Fahrleitung eingespeist werden. Am Ort der Einspeisung würde direkt nur ein Bruchteil davon benötigt. Die weitere Nutzung des Laufwasserkraftwerks Vohburg mit 23,3 MW ist ausgeschlossen, da in seiner Nähe kein Unterwerksstandort ist.

Für die dezentrale Bahnstromversorgung sind folgende Elemente entsprechend Tabelle 5 zu errichten.

**Tabelle 5: Neu zu errichtende Elemente für Szenario B1**

Neu zu errichtende Elemente	Anzahl/Länge
Dezentrale Umrichterwerke	51
Streckenumrichter	109
Neubau 3AC 110 kV-Leitung	161 km

Durch die Ausrüstung mit zwei oder drei Umrichtern je Umrichterwerk entsteht für die 51 Unterwerksstandorte ein Bedarf von 109 Umrichtern á 15 MW. Die benötigten Längen der Drehstromanbindung wurden anhand vorhandenen Kartenmaterials bestimmt.

▪ **Szenario B2**

Die rückzubauenden Elemente des Zentralen Bahnstromnetzes sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

**Tabelle 6: Rückzubauende Elemente für Szenario B2**

Rückzubauende Elemente	Anzahl/Länge
Unterwerke	62
Umformer-/Umrichterwerke	5
Umbau Kraftwerke	5
110 kV-Freileitungen, Trasse	3.542 km

110 kV-Maste	11.846
110 kV-Leiteseile	15.790 km
110 kV-Erdseile	3.183 km
110 kV-Kabel	1 km
110 kV-Isolatoren	125.245

Zusätzlich zu den vorgenannten wird in diesem Szenario noch das Wasserkraftwerk Bad Reichenhall mit 7,2 MW vom Zentralen Netz genommen. Es könnte als dezentraler Erzeuger weiter in den bisherigen Unterwerksstandort Reichenhall einspeisen, dies bedarf aber einer genaueren Untersuchung. Das Zentrale Umformerwerk in Karlsruhe mit 53 MW würde ebenfalls obsolet. Ein Weiterbetrieb als dezentraler Bahnstromerzeuger ist nicht sinnvoll.

Für die dezentrale Bahnstromversorgung sind folgende Elemente entsprechend Tabelle 7 zu errichten.

**Tabelle 7: Neu zu errichtende Elemente für Szenario B2**

Neu zu errichtende Elemente	Anzahl/Länge
Dezentrale Umrichterwerke	62
Streckenumrichter	131
Neubau 3AC 110 kV-Leitung	170 km

Gegenüber Szenario B1 ist die Anzahl der neu zu errichtenden Elemente nur geringfügig angestiegen, weshalb im Folgenden beide Szenarien in ihren Auswirkungen immer gemeinsam betrachtet werden.

▪ **Szenario B3**

Die rückzubauenden Elemente bei vollständiger Dezentralisierung des Zentralen Bahnstromnetzes sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

**Tabelle 8: Rückzubauende Elemente für Szenario B3**

Rückzubauende Elemente	Anzahl/Länge
Unterwerke	182
Umformer-/Umrichterwerke	21
Umbau Kraftwerke	16
Freileitungen, gesamt	7.785 km
110 kV-Maste	28.444
110 kV-Leiteseile	37.967 km
110 kV-Erdseile	7.685 km
110 kV-Kabel	6 km
110 kV-Isolatoren	290.950

In Erweiterung der Betrachtungen in den vorangegangenen Szenarien wird im Szenario B3 generell davon ausgegangen, dass ein Weiterbetrieb der großen Wärmekraftwerke Kirchmöser mit 160 MW und Schkopau mit 110 MW, der Wasserkraftwerke der Donau und am Mittlere-Isar-Kanal und aller Zentralen Umformerwerke bei der dezentralen Bahnstromversorgung unmöglich oder technisch und wirtschaftlich unsinnig sind. Von großen Zentralen Umrichterwerken, die aus mehreren Standardumrichtern aufgebaut sind, wie Limburg und Thyrow mit je mit 120 MW könnten zumindest Teilanlagen mit neuen Ausgangstransformatoren für die dezentrale Streckenspeisung weitergenutzt werden, sofern sie sich in der Nähe von Bahnstrecken oder bisherigen Unterwerksstandorten befinden.

**Tabelle 9: Neu zu errichtende Elemente für Szenario B3**

Neu zu errichtende Elemente	Anzahl/Länge
Dezentrale Umrichterwerke	182
Streckenumrichter	376
Neubau 3AC 110 kV-Leitung	439 km

An den bisherigen 182 Unterwerksstandorten müssen entsprechend Tabelle 9 insgesamt 376 neue Umrichter á 15 MW errichtet werden. Dazu werden neue Drehstromzuleitungen mit einer Gesamtlänge von 439 km benötigt.

### 6.1.3 Netzanschluss

Der Netzanschluss der zu errichtenden Umrichterwerke muss am Drehstromnetz in einer Spannungsebene erfolgen, bei der die vom Umrichter verursachten Netzurückwirkungen auf Grund eines möglichst kleinen Verhältnisses von Anschlussleistung bezogen auf die Kurzschlussleistung der Drehstromnetzebene vom Netzbetreiber tolerierbare Grenzwerte unterschreiten. Bei einer maximalen Anschlussleistung eines Umrichterwerkes von 56,25 MVA im Verhältnis zur Kurzschlussleistung von 3 AC 110 kV 50 Hz-Netzen in Deutschland mit 1 bis 3 GVA ist diese Spannungsebene ausreichend. Der Anschluss an eine höhere Spannungsebene, wie z. B. an das 3 AC 380 kV 50 Hz-Netz verursacht höheren technischen Aufwand und Kosten durch wesentlich größere Schaltanlagen und Transformatoren, ohne dass eine Notwendigkeit dafür gegeben wäre. Deshalb ist gemäß Kapitel 4.4 auch stets nur der Anschluss an die 110-kV-Netze unterstellt worden.

Der Anschluss der Umrichterwerke an eine HGÜ-Verbindung kann aus technischer Sicht ebenfalls ausgeschlossen werden. Es müsste zunächst eine Heruntersetzung der hohen Übertragungsspannungen (200 kV und darüber, s. Los 1 Kap. 6.5.) auf etwa einen Wert von 20 kV erfolgen, aus der dann die Fahrleitungsspannung generiert werden kann (vgl. Standardumrichter der DB Energie [11]). Dies könnte mit einem VSC entsprechend Los 1 Kap. 1.3.3.3 bewerkstelligt werden. Danach müsste noch ein Transformator die Spannung heruntersetzen. Eine derartige Anlage würde hohe Kosten verursachen, sehr große geometrische Ausmaße annehmen und sehr schlecht ausgenutzt sein.

### 6.1.4 Netzanschlussbedingungen

Umrichter in der Leistungsklasse 15 MW verfügen nach dem Stand der Technik über gepulste, selbstgeführte leistungselektronische Schaltungen am Drehstromnetz. Mit diesen lassen sich die Netzurückwirkungen in Form von Harmonischen minimieren, aber auch jegliche Grundschwingungsblindleistung durch das Betreiben mit Leistungsfaktor  $\cos \varphi = 1$  kann vermieden werden. Netzanschlussbedingungen an das 3 AC 110 kV 50 Hz-Netz werden durch die Netzbetreiber festgelegt. Die Norm DIN EN 50 160 [12] kann angewendet werden.

Daneben kommen die Richtlinien des VDEW zu Netzurückwirkungen [13] und Anschlussbedingungen der VDN [14] zur Anwendung.

### 6.1.5 Grundsätze für den Flächenbedarf bei Dezentralisierung

Für den unterbrechungsfreien elektrischen Zugbetrieb muss bei einer Veränderung der Energieversorgung zunächst das bestehende System so lange weiterbetrieben werden können, bis ein neues komplett installiert ist. Wenn ein Umbau von zentraler zu dezentraler Energieversorgung an einem Standort erfolgen soll, muss somit zunächst ein Umrichterwerk mitsamt der Drehstromanbindung neben einem bestehenden Unterwerk errichtet werden. Das heißt, dass entsprechende Flächen zunächst erworben werden müssen.

Im Rahmen dieser Studie kann keine Bewertung für alle Umrichterwerksstandorte im Hinblick auf die genauen benötigten Flächen erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass jedes Umrichterwerk über eine 3 AC 110 kV 50 Hz-Anbindung bestehend aus einem Drehstromtransformator pro Umrichterblock á 15 MW und einer Schaltanlage verfügen muss. Weiterhin ist Fläche für die entsprechende Anzahl Umrichterblöcke und die 1 AC 15 kV 16 2/3 Hz-Transformatoren und die 15-kV-Schaltanlage nötig.

### 6.1.6 Flächenbedarf für Umrichterwerke

Der Flächenbedarf wurde anhand des Grundrisses des Umrichterwerkes Hof ermittelt (Anhang 2 Grundriss des Umrichterwerkes Hof). Dieses Umrichterwerk besteht aus zwei Umrichtern á 15 MW und speist zukünftig dezentral die Strecke Hof – Reichenbach/Sachsen. Im Grundriss sind neben der Umrichteranlage noch Autotransformatoren, die bei dezentralen Umrichterwerken nicht per se notwendig sind, aufgestellt. Deren Platzbedarf wurde nicht berücksichtigt. Aufgrund der Tatsache, dass das Grundstück nicht rechteckig ist, wurden die Abmessungen teilweise anhand der gegebenen Abmessungen abgeschätzt und aufgerundet. Es ergeben sich folgende Werte nach Tabelle 10:

**Tabelle 10: Flächenbedarf von dezentralen Umrichterwerken**

Gesamtfläche Urw mit 2 x 15 MW	2800 m <sup>2</sup>
darin: 3 AC 110 kV 50 Hz-Schaltanlage	900 m <sup>2</sup>
Gesamtfläche Urw mit 3 x 15 MW	4200 m <sup>2</sup>



Bei einer Gesamtfläche von 2800 m<sup>2</sup> für ein Umrichterwerk mit 2 Umrichtern benötigt allein die 3 AC 110 kV 50 Hz-Schaltanlage 900 m<sup>2</sup> Platz. Mangels vorhandener Referenzanlage wurde der Flächenbedarf eines Umrichterwerkes mit drei Umrichtern mit dem 1,5-fachen Wert der bekannten Anlage abgeschätzt.

**Tabelle 11: Gesamtflächenbedarf für dezentrale Umrichterwerke**

Szenario B1	152 600 m <sup>2</sup>
Szenario B2	183 400 m <sup>2</sup>
Szenario B3	526 400 m <sup>2</sup>

In Tabelle 11 ist der Gesamtflächenbedarf der Szenarien B1, B2 und B3 angegeben. Dieser Flächen müssen vor einem Umbau der Bahnenergieversorgung verfügbar sein und erworben werden.

### 6.1.7 Verfügbarkeit von Grundstücksflächen in Bahntrassennähe

Die Verfügbarkeit von Grundstücksflächen in Bahntrassennähe und im Bereich der bisherigen Unterwerke (Randbedingung: Einspeisung in die Fahrleitung wird nicht verändert) wurde für die Szenarien B1 bis B3 untersucht. Dies konnte allerdings nur theoretisch aber standortscharf über Luftbildaufnahmen anhand der Bebauung um das bisherige Unterwerk erfolgen.

**Tabelle 12: Anzahl nicht verfügbarer Grundstücke für Umrichterwerksstandorte**

Szenario B1	2
Szenario B2	5
Szenario B3	18

In Tabelle 12 ist die Anzahl der Standorte angegeben, bei denen eine Errichtung von Umrichterwerken in der Nähe bisheriger Unterwerke nicht möglich ist, da keine theoretisch freie Fläche vorhanden ist. Bei einer konkreten Betrachtung der jeweiligen Baugründe, Eigentumsverhältnisse, Dienstbarkeiten subterranean Medien usw. werden sich die in Tabelle 12 angegebenen Zahlen noch erhöhen. Daraus ergeben sich entsprechende Risiken für die Machbarkeit der Dezentralisierung.

Da die neuen Umrichterwerke betriebsbereit sein müssen, bevor die Bahnstromleitung zu den Unterwerken abgeschaltet werden kann, muss unabhängig von den bisher belegten Flächen auch eine neue 3 AC 110 kV 50 Hz-Zuleitung errichtet werden, für die natürlich auch Platz vorhanden sein muss.

**Tabelle 13: Trassenlänge nicht verfügbarer Anschlussleitungen zu den Umrichterwerken**

Szenario B1	2,7 km
Szenario B2	2,7 km
Szenario B3	93,4 km

In Tabelle 13 sind die Längen der Drehstromzuleitungen für die Szenarien B1 bis B3 zusammengestellt, die in der Umsetzung augenscheinlich nicht möglich sind. Auch hier werden bei genaueren Betrachtungen der einzelnen Zuleitungstrassen sicher noch weitere Längen hinzukommen. Dies stellt ein weiteres Risiko für die Migration dar.

### 6.1.8 Verfügbarkeit von Netzanschlüssen

Eine dezidierte Untersuchung der verfügbaren 3 AC 110 kV 50 Hz-Leitungen am Ort der bis zu 182 Unterwerke im Szenario B3 erfolgte an Hand frei zugänglichen Kartenmaterials. Es wird davon ausgegangen, dass Netze der 3 AC 110 kV 50 Hz-Ebene deutschlandweit verfügbar sind. Die nötigen Gesamtanschlusslängen für den Ersatz der Unterwerke durch Umrichterwerke sind in Tabelle 5, Tabelle 7 und Tabelle 9 enthalten. Dabei wird unterstellt, dass an den Standorten die Kurzschlussleistung ausreichend für den Anschluss von bis zu  $3 \times 18,75 \text{ MVA} = 56,25 \text{ MVA}$  ist. Dies ist bei den 110 kV-Netzen in Deutschland in der Regel gegeben.

## 6.2 Umsetzungsstrategie

### 6.2.1 Szenario A

Die Umsetzung des Szenarios A mit Hybridmasten kann in ähnlicher Weise erfolgen, wie sonstige Ersatzneubauten von Bahnstromleitungen, bei denen auch die Maste neu gebaut werden (s. auch Los 1 Kap. 5.4). Die wenigsten Bahnstromleitungen entlang des für das H-förmige Overlay-Netz vorgesehenen Netzes lassen sich mit allen beiden (oder mehr) Strom-

kreisen ohne Ersatzmaßnahmen mehrere Wochen oder Monate ausschalten (entsprechend Abbildung 4). Demzufolge werden meist Ersatzmaßnahmen für den Bauzeitraum notwendig. Für kurze Strecken außer Betrieb genommener Leitung (bis zu 400 m) können Baueinsatzkabel verwendet werden. Diese sind für 110 kV verfügbar. Damit kann allerdings kaum eine Abspannlänge der Leitungsseile überbrückt werden, die üblicherweise mehrere Feldlängen á ca. 300 m (s. Los 1 Kap. 3.8.4) umfasst. Ersatzweise können auch Ersatzgestänge aus klappbaren Masten neben der umzubauenden Bahnstromleitung errichtet werden, sofern ausreichend Platz dafür vorhanden ist. Selbst wenn eine Bahnstromtrasse aus Lastflussgründen komplett abgeschaltet werden kann, so ist dies doch nur zwischen zwei Unterwerken möglich. Damit bleibt gewährleistet, dass die Unterwerke über zwei Bahnstromkreise redundant weiter versorgt werden können.

Besondere Schwierigkeiten sind beim Umbau von Netzknoten zu erwarten, vor allem wenn wie in Abbildung 8 mehrere Bahnstromkreise auf einem Mast geführt werden. Da in einigen urbanen Gebieten die Bahnstromleitung auf verstärkten Fahrleitungsmasten geführt ist und nicht über eine Trasse im klassischen Sinne verfügt, kann z. B. im Raum Nürnberg und Fulda das geplante Overlay-Netz nur unter Umgehung dieser Gebiete auf eigenen neuen Trassen geführt werden.

### **6.2.2 Szenario B1 und B2**

Maßgebend für die Umsetzung der Dezentralisierung ist der unterbrechungsfreie elektrische Bahnbetrieb. Ein großflächiger Ersatz der Elektrotraktion durch dieselbetriebene Lokomotiven oder Triebwagen kann weder von der Anzahl der benötigten Fahrzeuge her geleistet werden noch kann es energiepolitisch gewollt sein. Dies bedeutet grundsätzlich, dass zunächst die Infrastruktur der Dezentralen Bahnenergieversorgung parallel zur funktionsfähigen bestehenden Zentralen aufgebaut werden muss. Wird unterstellt, dass bis auf wenige Ausnahmen ein Grundstück in der Nähe bestehender Unterwerke in entsprechender Größe verfügbar ist, so ist nach Auskunft von DB Energie für die Umsetzung der nötigen Drehstromanbindung zum Umrichterwerk mit einem Zeitraum von bis zu drei Jahren zu rechnen. Das ist länger als die reine Errichtungszeit der Anlagen, vorausgesetzt die Hersteller sind in der Lage, im Szenario B1 109 und im Szenario B2 131 Umrichter innerhalb dieses Zeitraumes zu liefern, was bezweifelt werden muss. Je nach örtlichem Widerstand werden sich somit nicht alle neuen dezentralen Umrichterwerke gleichzeitig in Betrieb nehmen lassen.

Der Beginn der Dezentralisierung einer Bahnstromtrasse sollte an den Enden, an denen keine Bahnstromerzeuger einspeisen, und in der Mitte zwischen zwei Erzeugerstandorten, die meist auch Netzknoten sind, in Richtung dieser erfolgen. Beispielhaft sei dies für den östlichen Teil der Ost-West-Verbindung zwischen Sw Nitzahn und Lehrte in Abbildung 12 dargestellt.

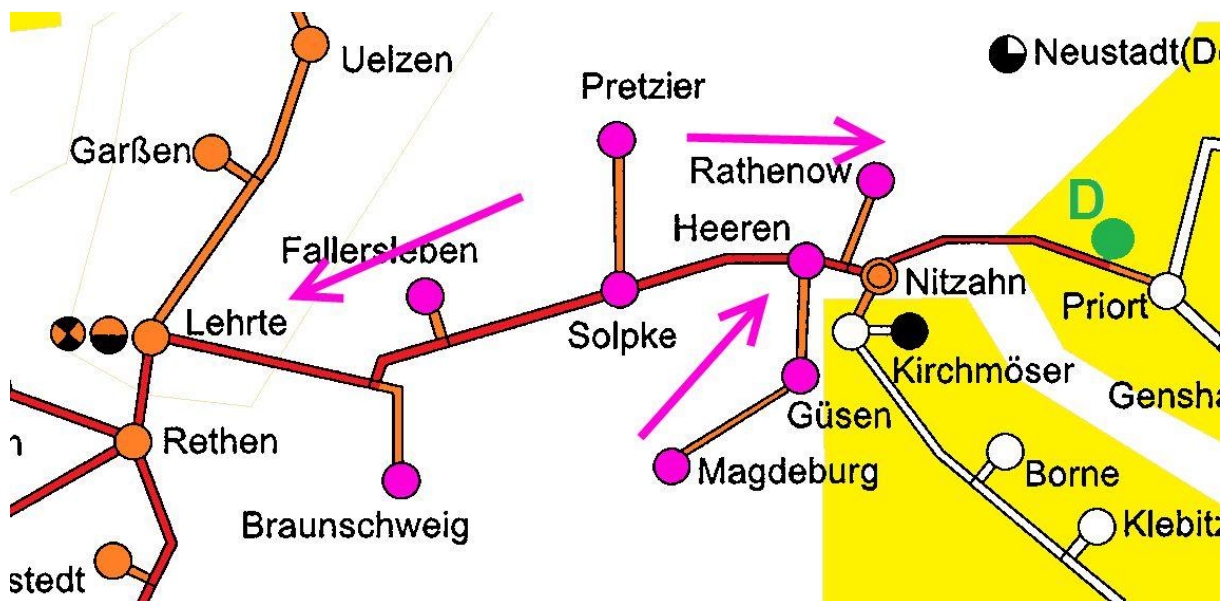


Abbildung 12: Umsetzungsstrategie Szenarien B

Die violett ausgefüllten Unterwerksstandorte sollten in Richtung der violett markierten Pfeile auf Umrichterbetrieb umgestellt werden. An den Enden der bisherigen Bahnstromleitung, wie in Magdeburg oder Pretzier, sollte begonnen werden. Die dahin führenden Bahnstromleitungen können dann vom Ende her eingekürzt werden. Die entlang des für das Overlay-Netz vorgesehenen Trassenraumes führende Bahnstromleitung (rot) muss allerdings so lange durchgängig in Betrieb bleiben, bis die auf ihr fließenden Lastströme zu anderen Regionen durch die Dezentralisierung in diesen oder durch die dauerhafte Anpassung des Erzeugereinsatzes auf ein für den Netzbetrieb unbedeutendes Niveau gesunken sind. Danach können die Bahnstromleitungen auf die Standorte der verbliebenen Unterwerke eingekürzt werden.

Da zunächst an den Ausläufern des Bahnstromnetzes mit dem Umbau begonnen werden muss, ist die eigentlich gewünschte Trasse für den Aufbau des Overlay-Netzes erst relativ spät im Baugeschehen verfügbar.

Für die Umsetzung des Szenarios B2 muss zusätzlich der Netzverbund zu den Partnern SBB in Haltingen und ÖBB in Steindorf gekündigt werden.

### 6.2.3 Szenario B3

Zusätzlich zu der in 6.2.2 ausgeführten Umsetzungsstrategie, die dann natürlich viel großflächiger erfolgen wird, muss im Szenario B3 der Netzverbund zur SBB und ÖBB gänzlich aufgekündigt werden. Eine Netzstützung bei Lastunter- oder -überdeckung in den Netzregionen ist dann nicht mehr möglich.

## 6.3 Betriebsführung

### 6.3.1 Szenario A

Die Betriebsführung des Szenarios A wird sich von der jetzigen Betriebsführung nicht wesentlich unterscheiden. In der Umbauphase sind die gleichen Maßnahmen zu ergreifen, wie sie auch heute bei Bauzuständen zur Anwendung kommen. Dabei kann die Abbildung 4 als Anhaltspunkt dienen, welche Leitungen während des Baugeschehens unproblematisch auch länger abgeschaltet werden können oder welche Leitungen im heutigen Netzbetrieb kaum entbehrlich sind und nur stromkreisweise kurzzeitig abgeschaltet werden können. Letzteres trifft beispielsweise auf die Ost-West-Verbindung zu, eine Bahnstromleitung, die heute an ihrer Leistungsgrenze betrieben wird, da die thermischen Kraftwerke Kirchmöser und Schkopau besonders in den Nachtstunden mehr Leistung einspeisen als im östlichen Netzteil des Bahnstromnetzes benötigt wird. Besonders die für das Overlay-Netz interessanten Bahnstromtrassen sind im Normalbetrieb auch stark belastet. Deshalb wird nahezu jede Abschaltung Anpassungen im Erzeugereinsatz zur Folge haben. Dies kann unter Umständen bedeuten, Energie teurer einkaufen und thermische Kraftwerke im ungünstigen Teillastbereich betreiben zu müssen. Für die Umsetzung des Szenarios A sind mehrere Jahre anzusetzen, die damit zu ständigen betrieblichen Einschränkungen führen werden und die Verfügbarkeit senken. Günstig für die Betriebsführung während der Realisierung des Szenarios A wäre die Variante der Kabelverlegung. Hier kann davon ausgegangen werden, dass nur während eines Teiles des Baugeschehens Bahnstromleitungen abgeschaltet werden müssen, während dies bei der Hybridmastlösung und der unvermeidlichen Nutzung von Baueinsatzkabeln und / oder Ersatzgestängen sehr häufig der Fall sein wird, vor allem wenn diese Ersatzlösung nur für kurze Strecken eingesetzt werden können. Kabelstrecken erhöhen den Erdschlussreststrom der angewendeten Resonanzsternpunktterdung durch ihre hohe Betriebskapazität. Es besteht grundsätzlich die Gefahr, die Löschfähigkeit des Netzes zu verlieren. Da das bisherige Bahnstromnetz

nach Aussage der DB Energie bereits an der Grenze der Löschfähigkeit betrieben wird, muss der Kabelanteil im Netz niedrig gehalten werden.

### 6.3.2 Szenarien B1 und B2

In der Umsetzungsstrategie 6.2.2 wurde beschrieben, dass die Umstellung auf dezentralen Betrieb von den Enden der Bahnstromleitung her oder von den Ausläufern zu Unterwerken hin erfolgen sollte. Diese bereits auf dezentrale Versorgung umgebauten Streckenabschnitte lassen sich frequenzelastisch parallel zu den noch verbliebenen Unterwerken betreiben. Entstehen allerdings mit dem Wegfall weiterer Bahnstromleitungen die in 5.2.2 beschriebenen Teilnetze, so kann auch eine Auftrennung des bisher durchverbundenen Fahrleitungsnetzes notwendig werden, wenn die Synchronisation der Teilnetze nicht möglich ist oder durch zu große Lastwinkelunterschiede Ausgleichströme in unzulässiger Höhe über die Fahrleitung zu fließen beginnen. Zwischen den Fahrleitungsabschnitten der Teilnetze sind stets Schutzstrecken erforderlich, um eine Trennung aus vorgenannten Gründen zu ermöglichen.

Bahnstromleitungen entlang einer Trasse des H-förmigen Overlay-Netzes müssen so lange in Betrieb bleiben, bis das letzte verbliebene Unterwerk auf ein neues Umrichterwerk umgestellt wurde. Bahnstromerzeuger des bisherigen Zentralen Bahnstromnetzes sollten mit der sinkenden Netzbelastung des verbliebenen Zentralen Bahnstromnetzes zurückgebaut werden. Allerdings müssen zurückzubauende Bahnstromerzeuger so lange betrieben werden, bis das letzte Unterwerk dieser Netzregion abgeschaltet ist. Dies wird die Auslastung dieser Erzeugeranlagen über längere Zeit stark verschlechtern und einen unrentablen Netzbetrieb zur Folge haben.

Das Bahnstromteilnetz im Raum Bremen kann vom Kraftwerk und Umrichter Bremen-Mittelsbüren gespeist werden. Die 210 MW, die diese Bahnstromerzeuger besitzen, sind für das verbliebene Restnetz vermutlich ausreichend, wenn nicht sogar überdimensioniert. Mit dem Umrichter steht ein Spitzenlasterzeuger für diesen Netzteil zur Verfügung. Das thermische Kraftwerk ist teilweise vom Gichtgasangebot des benachbarten Hüttenwerkes abhängig.

Im Westen Deutschlands kann ein Bahnstromnetz zwischen dem westlichen Ruhrgebiet und der Grenze zu den BeNeLux-Ländern und zu Frankreich gespeist durch die Umrichterwerke Düsseldorf (30 MW), Köln (70 MW) und Limburg (120 MW) und das Umformerwerk Saarbrücken (25 MW) erhalten bleiben. Ob die lokal vorhandenen Einspeiser ausreichend für den

Netzbetrieb im Ruhrgebiet sind, kann nicht abschließend ohne Lastflussanalyse beurteilt werden.

Den flächenmäßig größten Teil deckt das Bahnstromnetz im Bereich Hessen, Süd-Bayern und Baden-Württemberg ab. Während dessen Netzteile in den letztgenannten Bundesländern nach einer Dezentralisierung übrig bleiben, wird unterstellt, dass die bisher nur als Leitungskreuzungen vorhandenen Bahnstromleitungen Bebra - Borken und Körle - Kirchheim sowie Fulda - Gemünden und Flieden - Bebra in Hessen durch Setzen von zusätzlichen Masten verbunden werden können. Dieses Netz könnte auch den derzeitigen Netzverbund mit Österreich und der Schweiz beibehalten. Die Versorgung im nördlichen Teil dieses Teilnetzes ist nur wenig redundant, da wegen der o.g., heute nicht verbundenen Bahnstromleitungen nur eine Leitungsverbindung besteht und allein das Umformerwerk Borken mit 33 MW in diesen Netzteil speist. Ohne Lastflussanalyse ist auch hier nicht abzuschätzen, ob ausreichend Erzeugerleistung in diesem Netzteil zur Verfügung steht.

Im Osten und Südosten Deutschlands würde ein Bahnstromnetz vom Kraftwerk Kirchmöser bei Brandenburg als nördlichstem Punkt über das „Sächsische Dreieck“ und Thüringen sowie über Nürnberg bis zu den Wasserkraftwerken der Donau bestehen bleiben. Dieses Netz ist durch die beiden großen Wärmekraftwerke im Osten Deutschlands, die Wasserkraftwerke der Donau und die Umformerwerke Dresden (50 MW) und Nürnberg (30 MW) ausreichend mit elektrischer Energie versorgt. Fraglich ist, ob die hohe Erzeugerleistung aus dem Osten ausschließlich über die eine vorhandene Leitung nach Süden transportiert werden kann.

Schlussendlich bliebe im Berliner Raum noch ein kleines Netz bestehen, das nur vom Umrichterwerk Thyrow mit 120 MW gespeist wird. Das Umrichterwerk selbst besteht aus mehreren Einzelumrichtern, ist also redundant. Ob dessen Leistung in allen Betriebszuständen ausreichend ist, kann nicht abschließend beurteilt werden.

Statt einem Lastverteiler (Hauptschaltleitung), wie er heute in Frankfurt/Main für das Gesamtnetz vorhanden ist, wäre für alle Teilnetze ein Lastverteiler einzurichten, der den Einsatz von Grund- und Spitzenlasterzeugern nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten regelt. Die dezentralen Umrichterwerke können je nach Fahrleitungsschaltung mit Teilnetzen frequenzelastisch parallel betrieben werden. Wegen der durch die Schutzstrecken aufgetrenn-

ten Fahrleitungsabschnitte können zur Verbesserung der Spannungshaltung zusätzliche Verstärkungsleitungen oder gar Autotransformatorsysteme notwendig werden.

### **6.3.3 Szenario B3**

Die Betriebsführung des Szenarios B3 wird sich während der Umbauphase nicht von den Szenarien B1 und B2 unterscheiden. Das Szenario B3 ist im Endzustand ein rein dezentraler Netzbetrieb wie er in Schweden durchgeführt wird (vgl. Kap. 4.3.4). Die Überwachung der Umrichter könnte wieder zentral erfolgen. Eine Lastverteilung im Bahnstromnetz kann, wie in 4.3.4 beschrieben, nur eingeschränkt über kurze Strecken vorgenommen werden. Damit entfallen viele Aufgaben des bisherigen Netzbetriebes, wie Einsatzplanung von Kraftwerken, strategischer Energieeinkauf und die Schaltung der Bahnstromleitungen. Die Erfahrung in Schweden hat allerdings gezeigt, dass ein reiner Umformer-/Umrichterbetrieb bei vermaschten Netzen mit großen Verbraucherschwerpunkten nicht sinnvoll ist. Es kann notwendig werden, hochgespannte Verstärkungsleitungen zu betreiben und das Fahrleitungsnetz aufzutrennen, um Ausgleichsströme gering zu halten.

## **6.4 Einordnung der Ergebnisse der Szenarien A und B1 bis B3**

Die entwickelten Szenarien A und B1 bis B3 mit ihren technischen Konsequenzen hinsichtlich Migration und Betriebsführung sowie der Anzahl betroffener Anlagen und benötigter Flächen stellen eine hypothetisch mögliche Bandbreite von Null bis 100 % Dezentralisierung des bisherigen Bahnstromnetzes dar. Mit Hilfe dieser Szenarien wurden beispielhaft die konkreten Probleme und Konsequenzen der Dezentralisierung skizziert. Bei einer Umsetzung auch nur eines Teiles der jeweiligen Szenarien muss damit gerechnet werden, dass die beschriebenen ökonomischen, rechtlichen und technischen Herausforderungen anteilmäßig auftreten werden. Es ist allerdings darüber hinaus davon auszugehen, dass bei Detailplanungen noch bislang unbeachtete Aspekte zum Tragen kommen werden. Insbesondere wird eine genauere Netzbetrachtung mit Lastflussanalyse die Möglichkeiten der Außerbetriebnahme von Bahnstromleitungen, sei es temporär oder dauerhaft, einschränken und den Um- oder Abbau des Bahnstromnetzes zumindest verlangsamen.

Alle Szenarien der Dezentralisierung weisen somit ein hohes planerisches, technisches und betriebliches Migrationsrisiko auf. Dieses wird umso größer, je mehr Anlagen von der Dezentralisierung betroffen sind.



## 7 Kosten-/ Nutzenbewertung

### 7.1 Methodik

#### 7.1.1 Lebenszykluskostenmodell

Zur wirtschaftlichen Bewertung der Dezentralisierung des Bahnstromnetzes wurde im Rahmen der Untersuchung ein Lebenszykluskostenmodell (LCC-Modell) entwickelt. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit der Dezentralisierung sowohl Investitionen für den Anlagenneu- bzw. -umbau als auch veränderte laufende Netzbetriebs- und Energiekosten verbunden sind. Bahnbetrieblich bringt die Umstellung der Bahnstromversorgung keinerlei Vorteile, weshalb den o.g. Kosten im Sinne einer Wirtschaftlichkeitsbewertung ausschließlich die Erlöse aus dem Verkauf nicht mehr verwendbarer Anlagenteile und Grundstücke der DB Energie GmbH als Nutzenspotenziale gegenübergestellt werden können. Zusätzliche Nutzenspotenziale, die sich ggf. aus einer Betreiberrolle der DB Energie GmbH für das neue Overlay-Energienetz ergeben könnten, werden hier nicht betrachtet, da sie organisatorisch und rechtlich rein spekulativ sind.

Da Bahnstromanlagen langlebige Wirtschaftsgüter mit Abschreibungszeiträumen von mehrheitlich 20 bis 25 Jahren sind, ist eine Augenblicksbetrachtung der Kostenseite nicht zielführend. Aus diesem Grund wurde das entwickelte Lebenszykluskostenmodell in Abstimmung mit den Gutachtern von Los 1 für einen Prognosezeitraum von 30 Jahren (2011 – 2040) auf Basis aktueller Einzelkostenwerte der DB Energie GmbH (Stand 2010) angelegt. Damit können die Differenzkosten der einzelnen Szenarien für die Dezentralisierung berechnet und veranschaulicht werden, worauf sich letztlich auch die abschließende gutachterliche Bewertung und Empfehlung stützt.

Folgende Kostenpositionen sind im Lebenszykluskostenmodell berücksichtigt:

- Investitionen in neue dezentrale Umrichterwerke, ausgedrückt durch jährliche Abschreibungen (linear über jeweils 20 Jahre),
- Investitionen in neue 3AC 110 kV-Drehstrom-Anschlussleitungen, ausgedrückt durch jährliche Abschreibungen (linear über jeweils 25 Jahre),
- Abschreibungen für Unterwerke im Bestand (linear über jeweils 20 Jahre),

- Abschreibungen für zentrale Umformer- und Umrichterwerke im Bestand (linear über jeweils 20 Jahre),
- Abschreibungen für 110 kV-Bahnstromleitungen im Bestand (linear über jeweils 25 Jahre),
- jährliche Instandhaltungskosten für Unterwerke, Umformer- und Umrichterwerke im Bestand des zentralen Netzes,
- jährliche Instandhaltungskosten für Bahnstromleitungen im Bestand,
- jährliche Instandhaltungskosten für neue dezentrale Umrichterwerke,
- jährliche Instandhaltungskosten für neue 3AC 110 kV-Anschlussleitungen,
- Energiebezugspreise (Stromgestehungskosten) für zentralen und dezentralen Netzbetrieb, Aufteilung entsprechend den anteiligen Energiemengen der einzelnen Unterwerke bzw. Umrichterwerke in den Szenarien,
- Berechnung der Zeitwerte (Absolutwerte) und der Barwerte (auf das gewählte Anfangsjahr 2011 abgezinste LCC),
- Vergleich der Barwerte (auf 2011 abgezinste LCC) als Differenzkosten.

Obwohl der Neubau und die Instandhaltung der zusätzlichen 3AC 110 kV-Anschlussleitungen für die Umrichterwerke nicht in der Verantwortung der DB Energie GmbH liegen, wurden die dafür anfallenden Kosten hier mit berücksichtigt. Für die Gesamtbilanz sind sie aufgrund ihres geringen Anteils jedoch eher vernachlässigbar.

Kosten für den Grunderwerb für die neuen Umrichterwerke und die 3AC 110 kV-Anschlussleitungen wurden ebenfalls ermittelt, im Lebenszykluskostenmodell aber nicht berücksichtigt. Einerseits haben auch diese Kosten kaum Auswirkungen auf die Gesamtbilanz, andererseits kann unterstellt werden, dass diese Kosten durch Verkauf der frei werdenden Unterwerks- und Leitungstrassenflächen in etwa ausgeglichen werden können.

Für die Berechnung der Lebenszykluskosten wurden folgende Randbedingungen angesetzt:

- jährliche Teuerungsrate (Inflation) von wahlweise 0%, 1%, 2% und 3%,
- Ersatzinvestitionen für alle Anlagen mit Weiterbestand nach Ablauf des Abschreibungszeitraumes jeweils in Höhe von 30% des Neuwertes zum Zeitwert,

- keine Finanzierungskosten in Form jährlicher Kreditzinsen.

Da die Mengen- und Kostendaten sowie die Leistungs- und Energiewerte der DB Energie vollständig für das Jahr 2010 vorlagen, wurde dieses Jahr als Ausgangsbasis für die Kostenermittlung gewählt. Daraus ergab sich der Betrachtungszeitraum 2011 – 2040. Die Ermittlung der Barwerte erfolgte durch Abzinsung auf das erste Betrachtungsjahr 2011.

Ein methodisches Problem für den Differenzkostenvergleich zwischen weiterhin zentraler und anteilig oder vollständig dezentraler Bahnstromversorgung auf Basis der Lebenszykluskostenrechnung ergab sich aus der Tatsache, dass die Anlagen im vorhandenen zentralen Bahnstromnetz zum übergroßen Teil nicht neuwertig, sondern bereits teilweise oder vollständig abgeschrieben sind. In diesem Falle würden alle Kostenbetrachtungen, die sich auf die vorhandene zentrale Bahnstromversorgung beziehen und diese mit einer neuwertigen dezentralen Versorgungsstruktur vergleichen, ein zwar kurzfristig realistisches, aber langfristig verzerrtes Bild ergeben. Auch bei langfristigem Fortbestand des zentralen Netzes sind kontinuierliche Ersatzinvestitionen in die Anlagen erforderlich, die im Lebenszykluskostenmodell entsprechend zu berücksichtigen sind. Um vor diesem Hintergrund keinen zusätzlichen Interpretationsspielraum zu schaffen, wurde – im Sinne einer grundsätzlichen gutachterlichen Betrachtung – die folgende Vorgehensweise gewählt: In der Lebenszykluskostenberechnung wurden die jährlichen Abschreibungen für die Anlagen der zentralen Bahnstromversorgung ebenfalls auf Basis von Neuinvestitionen zum Preisstand 2010 und linearem Abschreibungsmodell berücksichtigt. Zusätzlich wurden – außerhalb des Lebenszykluskostenmodells – die kalkulatorischen Restwerte der vorhandenen zentralen Bahnstromanlagen separat für jede einzelne Anlage ermittelt. Je nach Dezentralisierungsszenario kann damit zusätzlich der „unge nutzte Restwert“ als Gesamtwert ausgewiesen werden, der sich infolge der Auflassung dieser Anlagen ergibt. Die ermittelte Größenordnung gibt außerdem einen groben Anhaltspunkt, welches Erlöspotenzial in diesen Anlagen noch steckt, auch wenn kalkulatorischer Restwert und Verkaufserlös natürlich keinesfalls identisch oder proportional zueinander sind. Das quantitative Ergebnis der LCC-Analyse unterstützt jedoch diese Vorgehensweise, da Stromgestehungskosten und Abschreibungen für Neuanlagen die absolut dominanten Kostentreiber sind.

Da es sich bei der vorliegenden Untersuchung um einen prinzipiellen Vergleich auf Basis hypothetischer, aber realitätsnaher Szenarien handelt, ergibt sich mit der gewählten Vorgehens-

weise ein langfristig realistisches Bild, welches weder die kurzfristig notwendigen hohen Investitionen noch die langfristig dominanten Netzbetriebskosten zu Lasten einer der Varianten vernachlässigt. Das LCC-Modell soll somit grundsätzlich die folgende Frage beantworten: „Wie unterscheiden sich langfristig die Kosten einer zentralen und einer dezentralen Bahnstromversorgung mit Sonderfrequenz unter den konkreten Netzbedingungen in Deutschland?“

### 7.1.2 Ungenutztes Anlagenvermögen und vertragliche Bindungen

Bei Dezentralisierung des Bahnstromnetzes wird ein Teil der vorhandenen zentralen Bahnstromanlagen (Bahnstromleitungen, Unterwerke, zentrale Umformer- bzw. Umrichterwerke) nicht mehr benötigt. Einen Überblick über die zugehörigen Mengengerüste der Szenarien gibt nachstehende Tabelle 14.

**Tabelle 14: Überschlägliche Mengengerüste für den Rückbau zentraler Bahnstromanlagen**

Szenario	Unterwerke		Umformer-/ Umrichterwerke		2 AC 110 kV-Bahnstromleitung	
	Anzahl	Fläche 1.600 [m <sup>2</sup> ]	Anzahl	Fläche 4.000 [m <sup>2</sup> ]	Trassenlänge [km]	Fläche 75 [m <sup>2</sup> ]
<i>pro Stck / pro km</i>						
A	0	0	0	0	0	0
B1	51	81.600	4	16.000	3.079	230.925
B2	62	99.200	5	20.000	3.542	265.650
B3	182	291.200	21	84.000	7.785	583.875

Eine Verwendung dieser Anlagen im dezentralisierten Netz ist – mit Ausnahme ggf. einiger Umrichterkomponenten – nicht möglich. Insofern bleibt das in diesen Anlagen gebundene Anlagevermögen (Restwert) ungenutzt, muss aber durch Abschreibungen weiter bedient werden. Für die wirtschaftliche Bewertung wurden die kalkulatorischen Restwerte zum Zeitpunkt 2010 für alle betroffenen Anlagen auf Basis der entwickelten Netzszenarien ermittelt. Nachstehende Tabelle 15 zeigt die resultierenden Werte.

**Tabelle 15: Ungenutzte kalkulatorische Restwerte zentraler Bahnstromanlagen**

XXX

Zusätzlich wären in den Dezentralisierungsszenarien B1 ... B3 bestehende langfristige Stromlieferverträge zwischen DB Energie und Kraftwerksbetreibern mit vereinbarten Abnahmemengen für 16,7-Hz-Energie zu kündigen. Die rechtlichen und finanziellen Konsequenzen können hier nicht im Einzelnen beurteilt werden, allerdings werden die Energiebezugskosten für dezentrale Versorgung mit vielen Anschlusspunkten der Umrichterwerke an lokale 110-kV-Netze in jedem Falle gegenüber den heutigen Verhältnissen mit zentraler Versorgung ansteigen. Ursache sind einerseits die höheren Arbeitspreise bei Anschluss an 3AC 110-kV-Netze und die höheren Leistungspreise durch den fehlenden Lastausgleich im 110-kV-Bahnstromnetz. Dieser Umstand wurde im Lebenszykluskostenmodell dadurch berücksichtigt, dass für dezentral versorgte Netzbereiche anteilig höhere Energiebezugskosten angesetzt wurden. Konkret wurden dafür modellhaft Differenzen von 0,01 / 0,02 und 0,03 EUR/kWh angesetzt. Dies wirkt sich entscheidend auf das Gesamtergebnis aus.

### **7.1.3 Sonstige Kosten**

Im Zuge der Umnutzung von bisher an die zentrale Bahnstromversorgung gebundenen Flächen bzw. des Flächenneuerwerbs sind Entschädigungszahlungen an Grundstückseigner, Rechtsstreitkosten und Genehmigungskosten im Rahmen der Planungen zu erwarten. Diese Kosten hängen von der konkreten Problemlage im Einzelfall ab und können deshalb in der vorliegenden Machbarkeitsuntersuchung nicht individuell und netzweit ermittelt werden. Insofern werden sie auch im Lebenszykluskostenmodell nicht mit berücksichtigt, sind aber bei der Entscheidungsfindung unbedingt als zusätzliches finanzielles (und planerisches) Risiko zu berücksichtigen. Für die ausgewiesenen Differenzkosten zum Bahnstromnetzbetrieb spielen sie insofern keine Rolle, da diese Kosten in allen Fällen der Integration von Energieleitungen der Landesversorgung auf Bahnstromtrassen anfallen werden, es sei denn, es bleibt bei der ausschließlichen Nutzung der Trassen durch die Bahnstromleitungen.

## **7.2 Quantitative Bewertung**

### **7.2.1 Investitionen**

Zur Ermittlung der bahnstromseitigen Investitionen wurden die Mengengerüste für die modellhaften Szenarien aufgestellt. Diese beinhalten die erforderlichen dezentralen Umrichterwerke, die 3AC 110-kV-Anschlussleitungen und den zugehörigen Grunderwerb. Die notwendigen Leitungstrassenlängen wurde konkret ermittelt, die zu erwerbende Grundfläche für An-

schlussleitungen mit 100 m<sup>2</sup> pro laufendem Kilometer (3 Mastfundamente a 33 m<sup>2</sup>) angesetzt. Nachstehende Tabelle 16 zeigt die Mengengerüste.

**Tabelle 16: Übersichtliche Mengengerüste für den Neubau dezentraler Bahnstromanlagen**

Szenario	Umrichterwerk Typ 1 (2 UR)		Umrichterwerk Typ 2 (3 UR)		Urw Gesamtfläche [m <sup>2</sup> ]	3 AC 110 kV-Anschluss	
	Anzahl	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Anzahl	Fläche [m <sup>2</sup> ]		Trassenlänge [km]	Fläche [m <sup>2</sup> ]
<i>pro Stck / pro km</i>		<b>2.800</b>		<b>4.200</b>			<b>100</b>
A	0	0	0	0	0	0	0
B1	46	128.800	5	21.000	149.800	161	16.100
B2	57	159.600	5	21.000	180.600	170	17.000
B3	170	476.000	12	50.400	526.400	439	43.900

Über aktuelle Kostenwerte der DB Energie GmbH - wiederum Mittelwerte - wurden daraus die Investitionen berechnet. Nachstehende Tabelle 17 zeigt die Größenordnungen. Die vollständige Dezentralisierung des Bahnstromnetzes würde Investitionen von ca. 3,7 Milliarden EUR erfordern, wobei noch keine Entschädigungszahlungen und Rechtsstreitkosten eingerechnet wurden.

**Tabelle 17: Übersichtliche Investitionen für den Neubau dezentraler Bahnstromanlagen**

Szenario	Urw Typ 1 (2 UR)	Urw Typ 2 (3 UR)	Urw Flächenerwerb [Mio EUR]	3 AC 110 kV-Anschluss		Gesamt Invest Urw + 3 AC 110 kV [Mio EUR]
	Errichtung 19,20 [Mio EUR]	Errichtung 24,15 [Mio EUR]		Errichtung 0,3 [Mio EUR]	Flächenerwerb [Mio EUR]	
A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B1	883,20	120,75	5,20	48,30	0,56	1.058,01
B2	1.094,40	120,75	8,61	51,00	0,81	1.275,57
B3	3.264,00	289,80	34,30	131,70	2,86	3.722,66

Die Investitionen wurden mit Ausnahme der Grunderwerbskosten in lineare Abschreibungsätze umgewandelt. Nach Abstimmung mit DB Energie wurden für Bahnstromanlagen jeweils 20 Jahre und für Bahnstrom- und Freileitungen jeweils 25 Jahre Abschreibungszeitraum angesetzt. Die Zeiträume ergeben sich als Mittelwerte für die wertbestimmenden Großkom-

ponenten, kurzfristigere Reinvestitionen in kleinere Anlagenteile (z.B. Informations- und Kommunikationstechnologie) sind damit abgegolten.

Als Referenz wurden gleichfalls die linearen Abschreibungen für die vorhandenen zentralen Bahnstromanlagen auf Basis der Neuwerte zum Zeitpunkt 2010 ermittelt. Dies betrifft Bahnstromleitungen, Unterwerke sowie zentrale Umformer- und Umrichterwerke im Eigentum der DB Energie. Die anlagentechnischen Mengengerüste sind in Kapitel 7.1.2 aufgeführt. Das Gesamtvermögen (Neuwert 2010) beläuft sich auf ca. XXX EUR, der aktuelle kalkulatorische Restwert wurde anlagenspezifisch mit XXX EUR ermittelt. Die große Differenz zeigt, dass die Anlagen einerseits schon vor längerer Zeit zu günstigeren Preisen beschafft wurden und andererseits bereits zu erheblichen Teilen abgeschrieben sind. Für den Vergleich mit den Dezentralisierungsvarianten wurden die Abschreibungen auf Basis des Neuwertes 2010 angesetzt.

Jeweils nach Ablauf des Abschreibungszeitraumes wurden für alle Anlagen, die weiter im Bestand verbleiben, Ersatzinvestitionen in Höhe von 30 % des Neuwertes, allerdings zum Zeitwert nach 20 bzw. 25 Jahren, angesetzt und wiederum als lineare Abschreibungen berücksichtigt. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass derartige Anlagen in der Regel deutlich länger als der Abschreibungszeitraum genutzt werden. Da der Betrachtungszeitraum im Lebenszykluskostenmodell nach 30 Jahren endet, schlagen die Ersatzinvestitionen allerdings nicht wesentlich auf das Gesamtergebnis durch.

### **7.2.2 Betriebskosten**

Als Betriebskosten wurden zum einen die Instandhaltungskosten für Unterwerke, Umformer bzw. Umrichterwerke, Bahnstromleitungen und Drehstromanschlussleitungen im Lebenszykluskostenmodell berücksichtigt. Diese wurden aus aktuellen Daten der DB Energie wiederum als Mittelwerte gebildet. Kosten für die Netzbetriebsführung (z.B. Besetzung Hauptschaltleitung, Entstördienst usw.) wurden nicht explizit angesetzt, da vereinfachend davon ausgegangen wird, dass sich diese in den einzelnen Szenarien nicht wesentlich unterscheiden werden bzw. aufgrund ihrer geringen Größenordnung nicht dominant auf das Gesamtergebnis einwirken.

Zum anderen wurden als wesentliche laufende Kosten die Energiebezugskosten angesetzt. Dafür wurden je nach Szenario die Energiemengen anteilig für zentral und dezentral versorgte

Netzbereiche berechnet. Basis bildete der Gesamtenergiebedarf für 16,7-Hz-Energie im zentralen Netz des Jahres 2010 von 10,51 TWh. Vereinfachend wurde unterstellt, dass sich dieser Energiebedarf bei Dezentralisierung nicht verändert, d.h. dass die Betriebsleistung im elektrifizierten Streckennetz konstant bleibt und die Netzverluste bei dezentraler Versorgung sich nicht signifikant verändern. Zwar entfallen die Verluste auf den nicht mehr benötigten 110-kV-Bahnstromleitungsabschnitten, andererseits sind bei der dezentralen Einspeisung zusätzliche Umrichterverluste sowie höhere Übertragungsverluste im Fahrleitungsnetz infolge des fehlenden Lastausgleichs zu erwarten. Es wird vereinfachend unterstellt, dass sich diese gegenläufigen Effekte ausgleichen.

Für die Energiebezugskosten wurden im dezentralen Netzbetrieb modellhaft höhere Preise angesetzt. Hierbei wurden für alle Szenarien jeweils 3 Varianten mit Differenzen von 0,01 / 0,02 und 0,03 EUR/kWh berechnet, was Steigerungen um 17 bis 50 % entspricht. Die Ergebnisse des LCC-Vergleichs zeigen, dass dies mit einem Anteil von 70 ... 80 % je nach Szenario der entscheidende Kostenblock ist.

### 7.2.3 Lebenszykluskosten

Im Lebenszykluskostenmodell wurden alle oben beschriebenen Kostenpositionen als jährliche Einzelkosten auf die Jahre 2011 – 2040 verteilt und summiert. Die laufenden Betriebskosten und die Energiebezugskosten wurden entsprechend den jeweils gültigen Teuerungsraten eskaliert, die Abschreibungen sind als linear konstante Werte berücksichtigt. Grundstückskosten werden nicht abgeschrieben und bleiben aufgrund der eingangs beschriebenen Größen- und Ausgleichseffekte im Modell unberücksichtigt. Durch Summation der Jahreswerte wurden die Zeitwerte ermittelt, aus denen dann über Abzinsung auf das Jahr 2011 die Barwerte als Vergleichsgrundlage berechnet wurden. Da die im Einzelnen verwendeten Zahlen z.T. interne Geschäftsdaten der DB Energie GmbH sind, wird auf eine detaillierte Darstellung im vorliegenden Bericht verzichtet.

Die nachstehende Tabelle 18 zeigt exemplarisch das Gesamtergebnis einer LCC-Berechnung für einen modellhaften Energiebezugspreisunterschied von 0,02 EUR/kWh.



**Tabelle 18: Ergebnisbeispiel der Lebenszykluskostenberechnung für die Bahnstromversorgung**

Szenario	LCC 30 Jahre Barwert 2011	LCC 30 Jahre Barwert 2011	LCC 30 Jahre Barwert 2011	LCC 30 Jahre Barwert 2011
	Inflation 0% p.a. [Mio EUR]	Inflation 1% p.a. [Mio EUR]	Inflation 2% p.a. [Mio EUR]	Inflation 3% p.a. [Mio EUR]
A	23.424	23.031	22.697	22.412
B1	26.614	26.134	25.722	25.367
B2	27.221	26.718	26.287	25.916
B3	33.827	33.074	32.426	31.866

Aufgrund des hohen Bahnenergieumsatzes von 10,51 TWh pro Jahr werden die LCC-Ergebnisse in allen Fällen dominiert von den Energiebezugspreisen. Als zweiter wichtiger Kostenblock erscheinen die Abschreibungen auf die Anlagen, die bei dezentraler Versorgung aufgrund der vergleichsweise teuren Umrichterwerke höher ausfallen als bei zentraler Versorgung.

Die durch Vergleich der Szenarien A und B3 ermittelten Differenzkosten zwischen zentraler und dezentraler Bahnstromversorgung über einen Lebenszyklus von 30 Jahren ab 2011 bewegen sich je nach Varianz der Energiebezugspreise und der jährlichen Inflationsraten zwischen minimal 6,3 Milliarden EUR und maximal 13,5 Milliarden EUR (Barwert 2011).

Bei nur teilweiser, aber überregionaler Dezentralisierung (Vergleich der Szenarien A und B2) liegen die Differenzkosten zwischen minimal 2,3 Milliarden EUR und maximal 5,0 Milliarden EUR (Barwert 2011). Aufgrund der Nichtberücksichtigung von Entschädigungszahlungen und Rechtstreitkosten sind diese Zahlen als Minimalwerte zu verstehen. Kosten, die infolge temporärer Unterbrechungen des elektrischen Zugbetriebes bei der Migration entstehen, sind hierbei ebenfalls noch nicht mitgerechnet.

Die Dezentralisierung ruft also in jedem Falle deutlich höhere laufende Kosten für die Bahnstromversorgung in Deutschland hervor. Da diesen erhöhten Kosten keinerlei relevanter Nutzen für das elektrische Bahnsystem gegenübersteht, kann die abschließende Bewertung rein auf Basis der Kostendifferenzen erfolgen.

### 7.3 Fazit

Die Dezentralisierung der Bahnstromversorgung in Deutschland würde in den nächsten 30 Jahren je nach Szenario zusätzliche laufende Kosten im ein- bis zweistelligen Milliardenbereich hervorrufen, ohne dass dem elektrischem Bahnbetrieb dadurch ein nennenswerter Nutzen entsteht. Die möglichen Verkaufserlöse nicht mehr benötigter Anlagen, Komponenten und Grundstücke sind dagegen marginal, wobei Aufwendungen für den Rückbau dieser Anlagen noch gar nicht mitgerechnet wurden.

Grundlegend kann man aus dem durchgeführten Kostenvergleich folgende Aussage ableiten: Ein stark vermaschtes elektrifiziertes Sonderfrequenz-Bahnnetz mit hohem Leistungs- und Energiebedarf rechtfertigt aus technischer und vor allem aus wirtschaftlicher Sicht den Betrieb eines eigenen Bahnstromnetzes. Die Aufwendungen für den Aufbau und den Betrieb eines zentralen Bahnstromnetzes werden durch die wirtschaftlichen Vorteile beim Energiebezug und durch die höheren Kosten für dezentrale Erzeugeranlagen mehr als ausgeglichen.

Insofern kann eine Dezentralisierung des deutschen Bahnstromnetzes nicht empfohlen werden.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

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 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, Er-

halt 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-Fahr-

leitungsnetz 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 (2 Trassen) sowie von West nach Ost (1 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 13,6 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 beläuft sich auf knapp

XXX 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 Migration 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.

## Quellenverzeichnis

- [1] N.N.: Elektrischer Betrieb bei der Deutschen Bahn im Jahre 2010. Elektrische Bahnen 109 (2011) Heft 1-2 S. 3-49
- [2] Biesenack, H. u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006
- [3] Schmidt, P.: Energieversorgung elektrischer Bahnen. VEB transpress Verlag für Verkehrswesen, Berlin 1988
- [4] Autorenkollektiv: Handbuch Energieversorgung elektrischer Bahnen. VEB Verlag Technik, Berlin 1975
- [5] Bülund, A.: Aufbau eines 130-kV-Bahnenergienetzes in Schweden. Elektrische Bahnen 93 (1995) Heft 1-2 S. 38-42
- [6] Xie, J.; Schmidt, R.: Regelungskonzept für spannungsgeführte 15-kV-Umrichterwerke. Elektrische Bahnen 100 (2002) Heft 12 S. 458-465
- [7] Albrecht, A.: Protokoll der Besprechung vom 21.02.2012 mit DB Energie und BNetzA in Frankfurt/M.
- [8] Albrecht, A.: Protokoll der Besprechung vom 05.03.2012 mit DB Energie in Frankfurt/M.
- [9] Behmann, U.; Schütte, Th.: Umrichter in der 50-Hz-Bahnenergieversorgung – von Europa in die Welt. Elektrische Bahnen 110 (2012) Heft 5 S. 201-207
- [10] DIN EN 50 163:2004 Bahnanwendungen – Speisespannungen von Bahnnetzen
- [11] Schmidt, R.: Standardumrichterkonzept der DB Energie. Elektrische Bahnen 98 (2000) Heft 10 S. 354-357
- [12] DIN EN 50 160:2010 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen
- [13] Grundsätze für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen, VDEW, 1992
- [14] TransmissionCode 2007, VDN Version 1.1, August 2007



## Anhang 1 Lastfluss auf Bahnstromleitungen

Tabelle XXX

## Anhang 2 Grundriss des Umrichterwerkes Hof

