



Bericht

Titel: Systemskizze der Bahnenergieversorgung
2AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1AC 15 kV 16,7 Hz
für das Pilotprojekt „Elektrifizierung Eifelbahn“

Kurztitel: Systemstudie Eifel - Systemskizze

Version: 2.0

Auftraggeber: DB Energie GmbH

Auftragnehmer: IFB Institut für Bahntechnik GmbH

Im Unterauftrag:

Technische Universität Dresden

Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“

Professur für Elektrische Bahnen

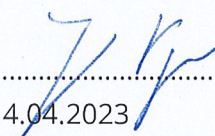
Berichtsnummer: 2022-619250-652.0

Datum: Dresden, den 14.04.2023

Versionshistorie

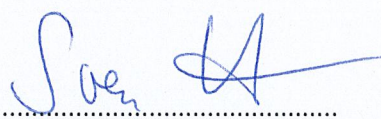
Datum	Version	Autor	Änderung/Aktualisierung
12.08.2022	1.0	JP	Abschluss Phase 1
14.04.2023	2.0	JP	Abschluss Phase 2
14.04.2023	2.0	DSK	Release

Erstellt: Dipl.-Ing. Jan Pape



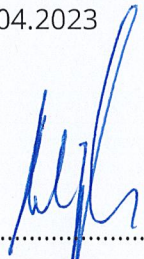
 14.04.2023

Geprüft: Dr.-Ing. Sven Körner



 14.04.2023

Freigegeben: Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan



 14.04.2023

Projektteam

TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Dipl.-Ing. Jan Pape (Projektleiter TU Dresden)

Dipl.-Ing. Jule Klepin

Institut für Bahntechnik GmbH

Dr.-Ing. Sven Körner (Projektleiter IFB)

Dipl.-Ing. Enrico Brandes

Dipl.-Ing. Holger Neumann

M.Sc. Abel Bitrián Benedí

Dipl.-Ing. Simon Hoffmann

Dipl.-Ing. Eckert Fritz

Dipl.-Ing. Volker König

Dipl.-Betriebswirt (BA) Lars Windrich

B.Sc. Benjamin Tietz

Dokument	Titel
Hauptdokument	Systemskizze der Bahnenergieversorgung 2AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1AC 15 kV 16,7 Hz für das Pilotprojekt „Elektrifizierung Eifelbahn“
Anlage 01	Lastflusssimulation
Anlage 02	Fehlerströme
Anlage 03	Schutzkonzept
Anlage 04	Netzresonanzen
Anlage 05	Kabelbau
Anlage 06	Empfehlung Überspannungsableiter
Anlage 07	Gutachterliche Stellungnahme Abstand der 2x25 kV-Phasenleiter
Anlage 08	Elektrische und magnetische Felder
Anlage 09	Steckbriefe für Lastenhefte

Inhaltsverzeichnis

Versionshistorie	2
Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	8
1 Einleitung	11
2 Systemübersicht	12
2.1 Status quo der Bahnenergieversorgung	12
2.1.1 Unterscheidung in zentrale und dezentrale Bahnenergieversorgung	12
2.1.2 Bahnenergieerzeugung (nur zentrale Bahnenergieversorgung)	13
2.1.3 Bahnenergieübertragung (nur zentrale Bahnenergieversorgung)	14
2.1.4 Bahnenergieverteilung	15
2.1.5 Bahnenergiezuführung.....	17
2.1.6 Rückstromführung und Erdung	19
2.2 Aufbau des Bahnenergieversorgung 2AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1AC 15 kV 16,7 Hz.....	19
2.3 Pilotprojekt „Elektrifizierung Eifelbahn“	20
2.3.1 Hintergrund und Randbedingungen	20
2.3.2 Systemaufbau in der Region Eifel	21
2.4 Ausbauzustand des Restnetzes.....	27
2.4.1 Bestandsnetz	27
2.4.2 Zukünftiger Netzausbau	27
3 Anforderungen und Untersuchungsszenarien	29
3.1 Grundlegender Ablauf der Dimensionierung	29

3.2	Szenarien für die Zugfahrt- und Lastflusssimulation	29
3.2.1	Bahnbetriebskonzept.....	29
3.2.2	Ausfallszenarien	29
3.2.3	Lastfall für das Restnetz.....	30
4	Ergebnisse der Systemstudie.....	31
4.1	Spannungshaltung	31
4.2	Dimensionierung der Betriebsmittel	31
4.2.1	Betriebsfall	31
4.2.2	Fehlerfall.....	31
4.3	Fehlererkennbarkeit und Schutzkonzept	32
4.4	Mastbilder und Instandhaltungskonzept	32
4.5	Niedrigste Resonanzfrequenz	32
4.6	Transitleistungen im 2x25 kV-System.....	33
4.7	Blindleistungskompensation	33
4.8	Transiente Überspannungen im 2x25 kV-System.....	33
4.9	Einsatz von 110 kV-Hybridschaltmodulen	34
4.10	Niederfrequente elektrische und magnetische Felder	34
4.11	Zusammenfassung	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Systemübersicht der zentralen Bahnenergieversorgung (Darstellung TU Dresden).....	13
Abbildung 2.2:	Typische Bahnstromleitung mit zwei Stromkreisen (links), Bildquelle: Wikipedia Commons	15
Abbildung 2.3:	Typischer Tragmast einer Bahnstromleitung (rechts), Bildquelle: Ebf-Zeichnungswerk.....	15
Abbildung 2.4:	Single-Line-Diagramm der Eifelbahn	22
Abbildung 2.5:	Eifelnetz mit zur Verkabelung vorgesehenen Abschnitten des 2x25 kV-Netzes auf der Eifelbahn (Datenquellen: OpenStreetMap, DB Open-Data-Portal)	23
Abbildung 2.6:	Einbindung des elektrifizierten Eifelnetzes in das Bestandsnetz, grün dargestellt sind neue bzw. geänderte Anlagen (Bildquelle: DB Energie, bearbeitet durch IFB/TUD).	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Streckentypen der Eifelbahn (DB-Strecke Nr. 2631).....	24
Tabelle 2.2: Streckentypen der Voreifelbahn (DB-Strecke Nr. 2645).....	26
Tabelle 2.3: Streckentyp der Erfttalbahn (DB-Strecke Nr. 2634).....	26
Tabelle 3.1: Ausfallszenarien für die Lastflusssimulation.....	30

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungen (Ortsnamen siehe unten)

AC	Wechselstrom (engl. <i>alternating current</i>)
Al	Aluminium
AT	Autotransformator
BEV	Bahnenergieversorgung
BL	Bahnstromleitung (110 kV-Ebene)
Cu	Kupfer
DB	Deutsche Bahn AG
DB En	DB Energie GmbH
DB N	DB Netz AG
DC	Gleichstrom (engl. <i>direct current</i>)
dUfw	dezentrales Umformerwerk
dUrw	dezentrales Umrichterwerk
Ebs	Ebs-Zeichnungswerk
FD	Fahrdraht
FL	Fahrleitung
HSL	Hauptschaltleitung
HVZ	Hauptverkehrszeit
IFB	IFB Institut für Bahntechnik GmbH
IEC	International Electrotechnical Commission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KM	Streckenkilometer
Ks	Kuppelstelle
Kw	Kraftwerk
LEV	Landesenergieversorgung
MVK	Mastvorderkante
NF	Negative Feeder
NOSPE	niederohmige Sternpunkterdung
OL	Oberleitung
OLA	Oberleitungsanlage

OSPE	ohne Sternpunkterdung
RESPE	Resonanzsternpunkterdung
Re	Regelbauart
RhB	Rhätische Bahn
Ril	Richtlinie
RL	Rückleitung
RMS	Effektivwert (engl. <i>root mean square</i>)
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SK	Stromkreis
SO	Schienenoberkante
Sp	Schaltposten (15 kV-Ebene)
Sw	Schaltwerk (110 kV-Ebene)
TS	Tragseil (Längstragseil)
TUD-EB	Technische Universität Dresden, Professur für Elektrische Bahnen
Uw	Unterwerk (Bahnenergieversorgung, 1AC)
ZBDK	Zeitgewichtete Belastungsdauerkurve
ZES	Zentrale Schaltstelle
zUfw	zentrales Umformerwerk
zUrw	zentrales Umrichterwerk

Abkürzungen der Ortsnamen von Bahnenergieversorgungsanlagen

DS 100	Ril 463	Station
IKB	-	Sp Bonn
IKEU	Ex	Uw Euskirchen (2x25 kV-Uw)
IKFIN	Fc	Nk Fischenich
IKKAS	-	Sp Kalscheuren
IKKAL	-	Ks Kall
IKGU	Kö	zUfw/zUrw/Uw Köln (Knoten-Uw)
IKJU	Jt	Uw Jünkerath (2x25 kV-Uw)
IKSID	Sf	Uw Sindorf (Block-Uw)
ISBIT	By	Uw Bitburg (2x25 kV-Uw)
ISBRB	-	Ks Birresborn
ISEG	-	Sp Ehrang
ISKU	Ks	Uw/Nk Karthaus (Zwischen-Uw)
ISSH	Sn	zUfw/Uw Saarbrücken (Knoten-Uw)

Abkürzungen von Transformator-Schaltgruppen (μ PAS-Wicklungstypen)

l, i	Zweiphasenwicklung
P, p	Einphasenwicklung
N, n	Sternpunkt

1 Einleitung

Zum Erreichen des ambitionierten Ziels der Bundesregierung, die durch das Hochwasser im Jahr 2021 zerstörten Bahnstrecken in der Region Eifel („Eifelstrecken“) bis Ende 2026 zu elektrifizieren, werden die DB Energie GmbH und die DB Netz AG ein neuartiges Bahnenergieversorgungssystem anwenden.

Dieses beinhaltet im Vergleich zu den bestehenden, betriebserprobten Systemen der zentralen und dezentralen Sonderfrequenz-Bahnenergieversorgung die Bündelung von (zentraler) Bahnenergieübertragung und Fahrleitung. Dadurch werden die Betroffenheiten durch die Bahnelektrifizierung minimiert und die Planungs- und Genehmigungsprozesse deutlich verkürzt.

Für die Bahnenergieübertragung wird ein Zweiphasensystem genutzt, dessen Phasen je die in DIN EN 50163 normierte, europäische Bahn-Nennspannung von 25 kV Leiter-Erde führen (2AC 2x25 kV 16,7 Hz). Die Fahrleitungsspannung beträgt 15 kV (1AC 15 kV 16,7 Hz). Die 2x25 kV-Systeme werden in Form von Verbindungsleitungen oder Kabeln als Teil der Oberleitungsanlage parallel zur Strecke mitgeführt.

Da ein derartiges System zwar normativ abgesichert ist, bislang jedoch keine Referenzprojekte existieren, ergibt sich eine Vielzahl zu untersuchender ingenieurtechnischer Aufgaben- und Fragestellungen.

In Phase 1 des Projekts „Systemstudie Eifel“ von Mai bis August 2022 haben die Professur für Elektrische Bahnen an der TU Dresden (TUD) und die IFB Institut für Bahntechnik GmbH (IFB) in Kooperation mit DB Energie und DB Netz das grundlegende technische Systemdesign entwickelt und zwingende technische Ausschlusskriterien identifiziert und untersucht.

Nach dem qualifizierten Systementscheid seitens der DB wurde in Phase 2 des Projekts „Systemstudie Eifel“ von Oktober 2022 bis April 2023 das technische Systemdesign abgeschlossen.

Diese Systemskizze dokumentiert mit ihren Anlagen die durchgeführten Arbeiten.

2 Systemübersicht

2.1 Status quo der Bahnenergieversorgung

2.1.1 Unterscheidung in zentrale und dezentrale Bahnenergieversorgung

Deutsche elektrifizierte Vollbahnen werden grundsätzlich mit Wechselstrom (AC) mit einer *Sonderfrequenz* von 16,7 bzw. $16 \frac{2}{3}$ Hz gespeist, was einem Drittel der in Europa verwendeten Netzfrequenz der Landesenergieversorgung von 50 Hz entspricht. Die o. g. Sonderfrequenz wird außer in Deutschland noch in Norwegen, Schweden, Österreich und der Schweiz verwendet und hat technisch-historische Gründe.

Für die Bahnenergieversorgung mit Sonderfrequenz existieren zwei grundlegende Systemaufbauten, die sich im Kern wie folgt unterscheiden:

1. Zentrale Bahnenergieversorgung

Es gibt ein bahneigenes Hochspannungsnetz (2AC 110 kV 16,7 Hz), das sogenannte zentrale *Bahnstromnetz*. Dieses überträgt die Bahnenergie von den Erzeugeranlagen (Kraftwerke, zentrale Umrichter- und Umformerwerke) zu den Unterwerken, welche die Bahnstrecken speisen. Der Systemaufbau der zentralen Bahnenergieversorgung ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

2. Dezentrale Bahnenergieversorgung

Es gibt kein zentrales Bahnstromnetz. Die Bahnenergie wird unmittelbar am Ort der Einspeisung in die Bahnstrecken aus dem Landesnetz entnommen und durch dezentrale Umformer- und Umrichterwerke umgewandelt.

In Deutschland wird überwiegend die zentrale Bahnenergieversorgung verwendet; ein ausgedehntes Netzgebiet mit dezentraler Bahnenergieversorgung befindet sich gegenwärtig nur in Nordostdeutschland in den Bundesländern Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern.

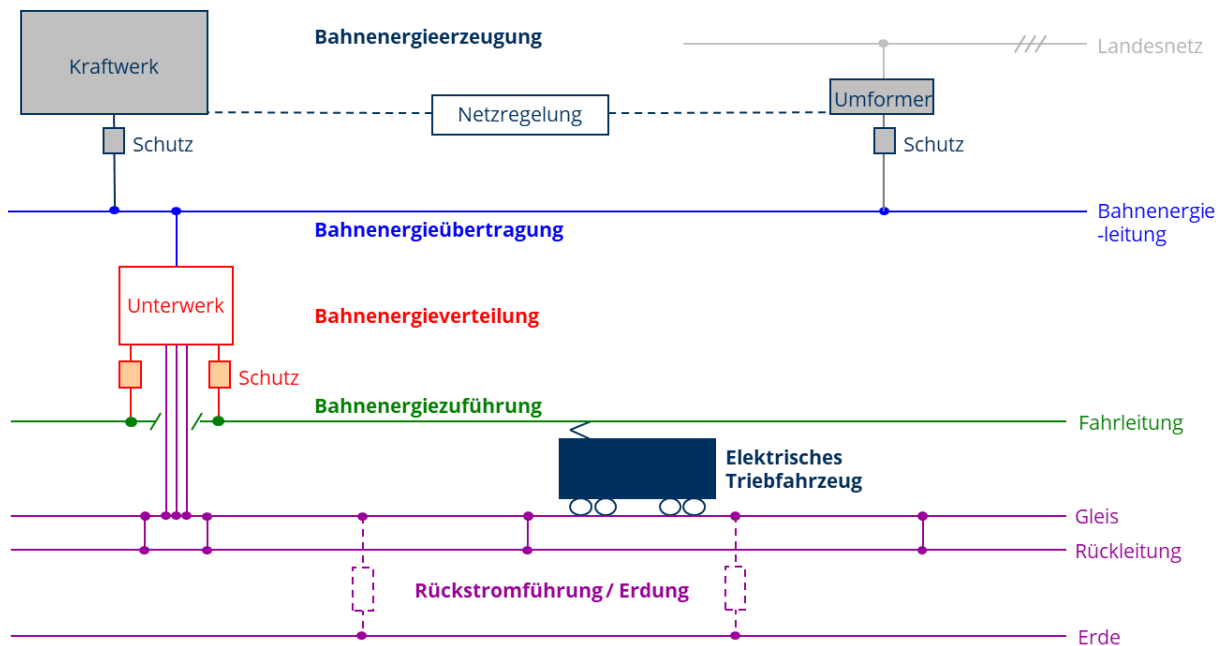


Abbildung 2.1: Systemübersicht der zentralen Bahnenergieversorgung (Darstellung TU Dresden)

2.1.2 Bahnenergieerzeugung (nur zentrale Bahnenergieversorgung)

Bahnenergieerzeugung bezeichnet die Erzeugung von elektrischer Energie für die Bahnenergieversorgung, die sogenannte *Bahnenergie*. Folgende Typen von *Erzeugeranlagen* (im elektroenergie-technischen Sinne) werden aktuell in Deutschland eingesetzt:

- *Kraftwerke* (Kw) erzeugen aus Primärenergiequellen Bahnenergie. In Deutschland werden aktuell thermische Kraftwerke, Laufwasserkraftwerke und ein Pumpspeicherkraftwerk bei der Bahnenergieversorgung eingesetzt. Pumpspeicherkraftwerke besitzen die Besonderheit, dass sie nicht nur als Erzeuger fungieren, sondern auch als Verbraucher Bahnenergie speichern können. Dies wird für den Ausgleich der Schwankungen der hochdynamischen Bahnlast genutzt.

Abhängig davon, ob ein Kraftwerk nur Bahnenergie erzeugt oder auch elektrische Energie für das Landesnetz, wird die Bezeichnung *Bahnkraftwerk* oder *Gemeinschaftskraftwerk* verwendet.

Der Anteil von Kraftwerken an der deutschen Bahnenergieerzeugung sinkt durch die Ablösung von thermischen Kraftwerken zur Erreichung der politischen und DB-eigenen Klimaziele stetig. Mittelfristig werden nur noch Laufwasser- und Pumpspeicherkraftwerke vorhanden sein.

Eine zukünftige Herausforderung wird darin bestehen, regenerative Energieerzeuger und ggf. Speicher direkt in die Bahnenergieversorgung ohne Durchleitung durch das Landesnetz einzubinden. Hierbei sind auf der Erzeugerseite die volatilen, regenerativen Energiequellen und auf der Verbraucherseite die charakteristische, durch den

geplanten Deutschland-Takt tendenziell noch dynamischer werdende Bahnbelastung bei der Netzregelung und -betriebsführung (siehe unten) zu berücksichtigen.

- *Zentrale Umformerwerke* (zUfw) wandeln elektrische Energie aus dem Landesnetz mithilfe von rotierenden elektrischen Maschinen in Bahnenergie um. Auf Landesnetzseite des Umformers wird eine Asynchronmaschine mit Schleifringläufer eingesetzt, die über eine Welle mit einer bahnseitig angeordneten Synchronmaschine mechanisch verbunden ist. Durch das einstellbare Verhältnis zwischen mechanischer Drehzahl und Drehfeldfrequenz bei Asynchronmaschinen mit Schleifringläufer kann eine frequenzelastische Netzkupplung zwischen Landes- und Bahnnetz realisiert werden.

Wegen eines höheren Instandhaltungsaufwands und eines schlechteren Wirkungsgrads insb. im Teillastbetrieb wurden seit den 1990er-Jahren zentrale Umformerwerke zunehmend durch zentrale Umrichterwerke ersetzt. Zur Wahrung der Netzstabilität und Erfassung von Netzfehlern ist vorgesehen, dass die noch vorhandenen zentralen Umformerwerke am Netz verbleiben und sogar bereits außer Betrieb genommene Umformer wieder genutzt werden.

- *Zentrale Umrichterwerke* (zUrw) wandeln elektrische Energie aus dem Landesnetz mithilfe von statischen Umrichtern in Bahnenergie um. Grundlegend basiert die Wirkungsweise von Umrichtern auf geregelten Schaltvorgängen mit leistungselektronischen Schaltern (in dieser Anwendung aktuell typisch in Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)- oder Integrated Gate-Commutated Thyristor (IGCT)-Technologie).

Die *Netzregelung* wird durch Frequenz-Wirkleistungs- f - P -Regelung und Spannungs-Blindleistungs- U - Q -Regelung der Erzeuger anhand ihrer Erzeugercharakteristik (Grund-, Mittel- oder Spitzenlasterzeuger), der aktuellen Netzführung und der Netzbetriebsplanung realisiert. Somit stellt das Bahnstromnetz ein gegenüber dem Landesnetz unabhängig geregeltes Netz dar.

2.1.3 Bahnenergieübertragung (nur zentrale Bahnenergieversorgung)

Bahnenergieübertragung bezeichnet die Übertragung von Bahnenergie von den Erzeugeranlagen (Bahnenergieerzeugung) zu den Unterwerken (Bahnenergieverteilung). Hierzu dient das zweipolig isolierte, sogenannte *Bahnstromnetz*, welches in Deutschland eine Länge von ca. 8.000 km besitzt und als Verbundnetz mit dem Österreichischen und Schweizer Bahnstromnetz mit einer Gesamtlänge von ca. 12.000 km betrieben wird.

Die Nennspannung liegt in Deutschland bisher ausschließlich bei 110 kV, in Österreich neben 110 kV (überwiegend) auch teilweise bei 55 kV (Region Wien). In der Schweiz werden Nennspannungen von 132 kV (überwiegend) und 66 kV (v. a. bei der Rhätischen Bahn im Kanton Graubünden) verwendet.

Die *Bahnstromleitungen* des Bahnstromnetzes sind in der Regel als Freileitungen mit zwei Stromsystemen ausgeführt, d. h. mit vier Leiterseilen zuzüglich eines Erdseils. Die zwei

Leiter eines Stromsystems besitzen mit -55 kV bzw. $+55\text{ kV}$ Nennspannung (in Deutschland) im Betrieb eine nahezu symmetrische Spannung gegenüber Erde. Abbildung 2.2 zeigt eine typische Bahnstromleitung, Abbildung 2.3 einen typischen Tragmast.

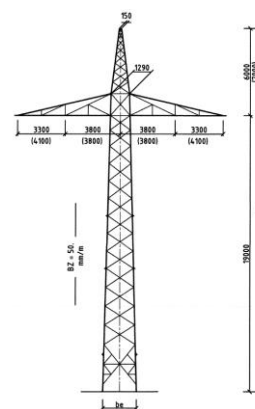


Abbildung 2.2: Typische Bahnstromleitung mit zwei Stromkreisen (links), Bildquelle: Wikipedia Commons

Abbildung 2.3: Typischer Tragmast einer Bahnstromleitung (rechts), Bildquelle: Ebf-Zeichnungswerk

In Deutschland und Österreich wird das Bahnstromnetz als sogenanntes induktiv gelöstes Netz mit *Resonanzsternpunktterdung* (RESPE) betrieben und bildet das weltweit mit Abstand größte zusammenhängende Netz dieser Art. Die Resonanzsternpunktterdung ermöglicht den Weiterbetrieb bei einfachen, temporären Erdschlüssen (ein Leiter besitzt z. B. durch Überschlag an einem Isolator eine Verbindung zur Erde) ohne Abschaltung des fehlerhaften Stromsystems, was die Verfügbarkeit der Energieversorgung erhöht. Für die Kompensation des kapazitiven Erdschlussfehlerstroms sind verteilt im Netz i. d. R. über Mittelpunktbildner angeschaltete *Erdschlusslöschspulen* angeordnet; zur Kompensation des Reststroms dient eine Reststromkompensationsanlage in Borken.

Das Schweizer Bahnstromnetz ist größtenteils mit niederohmiger Sternpunktterdung (NOSPE) ausgeführt und muss daher gegenüber dem deutschen und österreichischen Netzteil über Kuppeltransformatoren galvanisch getrennt werden.

Werden außerhalb von Knoten-Unterwerken mehrere Bahnstromleitungen miteinander verknüpft, so wird die zugehörige Anlage als *Schaltwerk* bezeichnet, wobei verschiedene Sammelschienenstrukturen möglich sind.

2.1.4 Bahnenergieverteilung

2.1.4.1 Unterwerke bei zentraler Bahnenergieversorgung

Bahnenergieverteilung bezeichnet die Umspannung und Verteilung der Bahnenergie aus dem 110 kV -Bahnstromnetz (Deutschland) in das 15 kV -Fahrleitungsnetz in sogenannten Unterwerken. Die *Unterwerke* (Uw) beinhalten mehrere fahrleitungsseitig niederohmig geerdete Einphasen-Transformatoren mit abgestuftem Übersetzungsverhältnis, (je nach

Lage im Netz) 110 kV-Schaltanlagen und -Sammelschienen, 15 kV-Schaltanlagen und -Sammelschienen sowie Sekundärtechnik (insbesondere Schutz- und Leittechnik).

Abhängig von der Lage im Bahnstromnetz werden Unterwerke unterteilt in:

- *Knoten-Uw*: Volleinführung einer oder mehrerer BL in das Unterwerk;
- *Zwischen-Uw* oder *eingeschleiftes Uw*: Einschleifung in einen Stromkreis einer BL;
- *Block-Uw*: Anbindung im Doppelstich an eine BL.

Typische Leistungsklassen für neu errichtete Unterwerke der DB sind 2x15 MVA, bei geringer belasteten Anlagen auch 2x10 MVA, bei besonders hoch belasteten Anlagen 3x15 MVA.

2.1.4.2 Dezentrale Umrichter- und Umformerwerke bei dezentraler Bahnenergieversorgung

Bei der dezentraler Bahnenergieversorgung wird die Bahnenergie dezentral aus dem Landesnetz entnommen und durch dezentrale Umrichterwerke (dUrw) und dezentrale Umformerwerke (dUfw) in Bahnenergie umgerichtet bzw. umgeformt und in die Strecke eingespeist. Die Anbindung an das Landesnetz erfolgt auf mindestens Netzebene 3 (110 kV-Hochspannungsebene).

Für dezentrale Umrichterwerke sind Leistungsklassen von 2x15 MW oder 3x15 MW bei stärker belasteten Anlagen üblich. Dezentrale Umrichterwerke können auch synchron mit den zentral gespeisten Netzbereichen betrieben werden, da eine *frequenzelastische Netzkupplung* durch den Umrichter möglich ist. Hierzu wird im Normalbetrieb die Pilotsignalregelung nach Xie verwendet, bei der die Spannungszeiger des benachbarten Unterwerks bzw. der benachbarten Unterwerke unter Berücksichtigung von Signallaufzeiten und Streckenimpedanzen den Spannungs-Sollwert des dezentralen Umrichterwerks bilden. Im Ausfallbetrieb werden Frequenz-Wirkleistungs-/f-P-Statiken und Spannungs-Blindleistungs-/U-Q-Statiken verwendet, wobei Ausgleichsleistungen über die 15 kV-Ebene möglichst vermieden werden sollen.

Dezentrale Umformerwerke sind in Deutschland mit Synchron-Synchron-Umformern ausgeführt (Leistungsklasse 10 MVA pro Umformer), die im Gegensatz zu den in zentralen Umformerwerken verwendeten Umformern sowohl auf Landes- als auch auf Bahnnetzseite Synchronmaschinen besitzen. Dadurch ist die Frequenz des Bahnnetzes fest an jene des Landesnetzes gekuppelt, was als *frequenzstarre Netzkupplung* bezeichnet wird.

Zwischen frequenzelastisch und frequenzstarr betriebenen Netzbereichen müssen sog. *Schutzstrecken* mit Auftrennung der Fahrleitung angeordnet werden, die eine kurzschlussverursachende Spannungsverschleppung zwischen den Netzbereichen bei Fahrzeugüberfahrt ausschließen.

Wie in der zentralen Bahnenergieversorgung werden die Umformer zunehmend durch Umrichter ersetzt, wodurch auch ursprünglich frequenzstarr gespeiste Netzbereiche wie z. B. zwischen Dresden und Berlin mit den dUrw Cottbus, Doberlug-Kirchhain, Lohsa und Frankfurt(Oder) im Netzverbund mit dem frequenzelastischen Netz betrieben werden können. Dies bietet den Vorteil, dass einseitige Speisesituationen (mit schlechterer Spannungshaltung und höheren Verlusten) aufgelöst werden können und auf die Schutzstrecken (Instandhaltungsaufwand und betriebliche Einschränkung wegen leistungsloser Durchfahrt) verzichtet werden kann. Der Schutz und die Betriebsführung von durch mehrere dUrw gespeisten, größeren und vermaschten Netzbereichen gilt hingegen als sehr anspruchsvoll.

2.1.5 Bahnenergiezuführung

2.1.5.1 Grundlagen und klassisches System mit 1AC 15 kV 16,7 Hz

Bahnenergiezuführung bezeichnet die Zuführung der Bahnenergie von den Unterwerken über die Fahrleitung zu den Fahrzeugen.

Als *Fahrleitung* werden bei der deutschen Vollbahn überwiegend Kettenwerks-Oberleitungen, in besonderen Fällen wie z. T. Tunneln auch Stromschienenoberleitungen verwendet. Die Nennspannung beträgt 15 kV und die Grenzwerte der Spannung am Stromabnehmer sind in DIN EN 50163 normiert. Bedingt durch die hohe Lastdynamik und die ortsveränderlichen Fahrzeuge (Verbraucher, die im Falle von nahezu allen aktuell eingesetzten Fahrzeugen durch generatorisches Bremsen auch als Erzeuger fungieren können) sind die Spannungstoleranzen im Vergleich zu anderen elektroenergie-technischen Anwendungen sehr groß.

Die Fahrleitung kann neben Fahrdraht und (Längs-)Tragseil weitere Leiter umfassen:

- *Verstärkungsleitungen* sind parallel mit der Oberleitung geschaltet und erhöhen den wirksamen Leiterquerschnitt, wodurch *ceteris paribus* die (belastungsabhängigen) Spannungsfälle entlang der Oberleitung verringert werden.
- *Speiseleitungen* (bzw. Speisekabel) verbinden z. B. die Streckenabgänge eines Unterwerks mit den angrenzenden Speiseabschnitten der Fahrleitung (mit Leistungsschalter) oder in Bahnhöfen verschiedene Bahnhofsschaltgruppen (mit Trennschaltern).
- *Umgehungsleitungen* werden bei eingleisigen Strecken parallel zur Oberleitung (mit Trennschaltern) geschaltet, um einerseits die Verfügbarkeit der Energiezuführung bei Ausfall eines OL-Abschnitts zu gewährleisten und andererseits die Streckenimpedanz von eingleisigen Strecken zu senken bzw. an zweigleisige Strecken anzugleichen.

- *Verbindungsleitungen* sind Leitungen zur Verbindungen von Schaltanlagen untereinander wie beispielsweise die 2x25 kV-Leiter bei der neuartigen Bahnenergieversorgung 2AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1AC 15 kV 16,7 Hz.
- *Rückleiterseile* stellen einen zusätzlichen parallelen Leiter der Rückleitung dar und verringern den Rückstrom in Gleis und Erde. Sie werden insbesondere als Maßnahme zur Minimierung elektrischer und magnetischer Felder verwendet, da sie durch ihre Lage in Nähe des Kettenwerks die o. g. Felder wirksam kompensieren können. Weiter verringern sie die Strecken- und Rückleitungsimpedanz, wodurch sie auch zur Verbesserung der Spannungshaltung und/oder bei schwierigen Erdungsverhältnissen eingesetzt werden (Nachweis von Berührungsspannungen gemäß DIN EN 50122-1).

Verstärkungs-, Speise-, Umgehungs- und Verbindungsleitungen werden auch zusammengefasst als *Bahnenergieleitungen* bezeichnet.

Werden außerhalb von Unterwerken schutztechnisch abgegrenzte Abschnitte, sog. *Schutzabschnitte*, gebildet (z. B. in Bahnhöfen mit mehreren abgehenden Strecken), so wird die zugehörige Anlage als *Schaltposten* (Sp) bezeichnet. Analog zu den Schaltwerken auf der 110 kV-Ebene sind verschiedene Sammelschienenstrukturen möglich. Werden lediglich zwei Schutzabschnitte einer Strecke schutztechnisch abgegrenzt, so wird die Anlage als *Kuppelstelle* (Ks) bezeichnet.

2.1.5.2 Autotransformatoren-System mit 2AC 30/15 kV 16,7 Hz

Im Autotransformatoren-System (AT-System, auch: Zweispannungssystem) wird dauerhaft eine weitere Spannungsebene entlang der Fahrleitungsanlage mitgeführt, die zugehörigen Leiter werden als *Negative Feeder* bezeichnet (Verstärkungsleitungen werden beim AT-System auch als *Positive Feeder* bezeichnet). Beim typischerweise verwendeten, sog. symmetrischen Autotransformatorensystem wird für den Negative Feeder die um 180 ° phasenversetzte Fahrleitungsspannung genutzt, d. h. -15 kV in Deutschland.

Zwischen Oberleitung und Negative Feeder werden in regelmäßigen Abständen die sog. *Autotransformatoren* angeordnet, die Transformatoren in Sparschaltung bezeichnen. Außerhalb des Abschnitts zwischen zwei Autotransformatoren ergibt sich die Aufteilung des Zugstroms auf Oberleitung/Positive Feeder und Negative Feeder; der Stromanteil über Gleis und Erde wird verringert. Die Unterwerksabstände können erhöht werden.

Wegen der zwei phasenversetzten Spannungen mit Nutzung des Mittelpunkts wird das System mit 2AC 30/15 kV 16,7 Hz bezeichnet, bei 25 kV-Bahnsystemen entsprechend mit 2AC 50/25 kV 50 Hz.

In Deutschland besitzt das AT-System nur eine geringe Verbreitung auf drei Strecken, eine weitere Strecke wird derzeit im AT-System elektrifiziert (ABS Oldenburg – Wilhelmshaven).

2.1.6 Rückstromführung und Erdung

Rückstromführung bezeichnet die Rückführung der Bahnenergie von den Fahrzeugen zu den Unterwerken durch die Rückleitung.

Die *Rückleitung* dient der Rückführung des Triebstromes und wird entsprechend der DB Ril 997 und den technischen Regelwerken ausgeführt.

2.2 Aufbau des Bahnenergieversorgung

2AC 2x25 kV 16,7 Hz + 1AC 15 kV 16,7 Hz

Im Kern basiert das System darauf, die Systemebenen Bahnenergieübertragung und Bahnenergiezuführung entlang einer gesamten Strecke mit der Oberleitungsanlage zu bündeln, wobei das Bahnenergieübertragungssystem sowohl mit Verbindungsleitungen als auch als mit Kabeln ausgeführt werden kann.

Um eine gesetzliche und normative Einstufung als Oberleitungsanlage (OLA) und die Nutzung von am Markt verfügbaren und bereits für Bahnanwendungen zugelassenen OLA-Komponenten zu ermöglichen, wird die höchste bei Oberleitungsanlagen europäischer Bahnsysteme eingesetzte Spannung von 25 kV Nennspannung (Leiter-Erde-Spannung) gemäß DIN EN 50163, Abschnitt 4.1 für die Bahnenergieübertragung gewählt. Durch die Verwendung eines symmetrischen Zweiphasensystems (analog zum 110 kV-Bahnenergieübertragungsnetz) ergibt sich eine Leiter-Leiter-Spannung von 50 kV. Weil die zwei Leiter-Erde-Spannungen nur je 25 kV betragen, wird die Bezeichnung 2x25 kV-Netz gewählt. Zur Gewährleistung der (n-1)-Sicherheit werden zwei Systeme eingesetzt.

Für das 2x25 kV-Netz muss zwingend eine *niederohmige Sternpunktterdung* (NOSPE) verwendet werden. Eine Sternpunktverlagerung, wie sie insb. bei Erdschlüssen in Netzen mit Resonanzsternpunktterdung (RESPE) oder ohne Sternpunktterdung (OSPE) auftritt, kann wegen der dann dauerhaft auftretenden Überbeanspruchung der Isolatoren nicht toleriert werden. Des Weiteren würde die Ausführung als RESPE-Netz auch größere Schutzabstände und Kabel sowie sonstige Betriebsmittel mit höheren Isolationsspannungen erfordern.

Das 2x25 kV-Netz wird aus dem 110 kV-Bahnstromleitungsnetz über *Netzkupplungstransformatoren* gespeist. Zur Gewährleistung der (n-1)-Sicherheit sind mindestens zwei Transformatoren pro Netzkupplung anzuordnen.

Aus dem 2x25 kV-Netz wird das 15 kV-Fahrleitungsnetz über Unterwerkstransformatoren gespeist. Zur Gewährleistung der (n-1)-Sicherheit sind mindestens zwei Transformatoren je Unterwerk anzuordnen.

2.3 Pilotprojekt „Elektrifizierung Eifelbahn“

2.3.1 Hintergrund und Randbedingungen

Bei dem verheerenden Hochwasser im Juli 2021 wurden u. a. die folgenden Bahnstrecken im Eifelnetz stark beschädigt bzw. teilweise zerstört:

- Eifelbahn Hürth-Kalscheuren (– Euskirchen) – Trier-Ehrang (DB-Strecke Nr. 2631, 163,5 km Streckenlänge);
- Voreifelbahn Bonn – Euskirchen (DB-Strecke Nr. 2645, 34,2 km Streckenlänge);
- Erfttalbahn Euskirchen – Bad Münstereifel (DB-Strecke Nr. 2634; 14 km Streckenlänge; Nebenbahn mit 60 km/h Höchstgeschwindigkeit).

Der Bund und die Landesregierungen von Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz beabsichtigen, nach der Instandsetzung bzw. dem Wiederaufbau der o. g. Bahnstrecken die beschleunigte Elektrifizierung zu forcieren. Über die o. g. Strecken hinaus könnte weiter die Bördebahn Euskirchen – Düren (DB-Strecke Nr. 2585) elektrifiziert werden.

Für die Elektrifizierung der Eifelstrecke im nördlichen Abschnitt Hürth-Kalscheuren – Kall (53,3 km Streckenlänge), der Voreifelbahn und der Erfttalbahn liegt eine Finanzierungsvereinbarung zwischen der Landesregierung von Nordrhein-Westfalen, dem Zweckverband Nahverkehr Rheinland und der Deutschen Bahn vor, wobei die Streckenelektrifizierung für die Förderung auf Grundlage des Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG) beim Bund angemeldet ist.^{1 2}

Bezüglich der Elektrifizierung der Eifelstrecke im südlichen Abschnitt Kall – Trier-Ehrang (110,2 km Streckenlänge) finden Gespräche zwischen dem Land Rheinland-Pfalz und der Deutschen Bahn statt. Sie wird vom Bund unterstützt. Politische Wunschvorstellung ist eine Elektrifizierung bis Ende der 2020er Jahre.^{3 4}

DB Netz und DB Energie beabsichtigen eine Elektrifizierung des Eifelnetzes bis Ende 2026.

¹ Land macht schnellere Elektrifizierung der Eifelstrecken möglich – Finanzierung abgesichert. <https://www.deutschebahn.com/pr-duesseldorf-de/aktuell/regionale-presseinformationen/Land-macht-schnellere-Elektrifizierung-der-Eifelstrecken-moeglich-Finanzierung-abgesichert--7271362>. Zugriffen am 2. März 2022.

² Ministerium für Verkehr NRW - Land macht schnellere Elektrifizierung der Eifelstrecken möglich – Finanzierung abgesichert. https://www.vm.nrw.de/presse/pressemitteilungen/Archiv-des-VM-2022/2022_02_10_Elektrifizierung-Eifelstrecken/index.php. Zugriffen am 2. März 2022.

³ Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage [...]: Wiederaufbau der Eifelstrecke nach der Flutkatastrophe, Deutscher Bundestag, Drucksache 19/32644.

⁴ SWR Aktuell: „Elektrifizierung der Eifelstrecke soll bis Ende der 2020er passieren“, <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/trier/elektrifizierung-der-eifelstrecke-soll-bis-ende-der-2020-jahre-passieren-100.html>. Zugriffen am 2. März 2022.

Vorhandene Bahnenergieversorgungsinfrastruktur ist jedoch nur im Knoten Köln sowie mit der linken Rheinstrecke und der Moselstrecke gegeben. Daher würde bei „konventioneller Elektrifizierung“ die Neuerrichtung von Bahnstromleitungen von erheblicher Länge erforderlich werden. Alternativ wären mehrere dezentrale Umrichterwerke (in erster Abschätzung ohne teilweise Nutzung des AT-Systems drei) inklusive Landesnetzanbindung auf mindestens 110 kV-Hochspannungsebene (Netzebene 3) erforderlich. Die Realisierung der o. g. Varianten bis Ende 2026 ist angesichts der in Deutschland typischen Realisierungszeiträume nur schwer vorstellbar.

2.3.2 Systemaufbau in der Region Eifel

Der grundlegende Systemaufbau ist in Abbildung 2.4 (siehe auch Abbildung 2.6 auf S. 28) dargestellt. Das 2x25 kV-Netz wird entlang der gesamten Eifelbahn (mit Ausnahme von ca. 9 km am nördlichen Streckenbeginn) mitgeführt. In Abstimmung mit DB Netz (Regionalbereiche Mitte und West) wurden die in Abbildung 2.5 dargestellten und Tabelle 2.1 angegebenen Abschnitte mit gegenüber dem Ist-Zustand zweigleisigem Ausbau und Kabelanteilen des 2x25 kV-Netzes als Grundlage der Untersuchung des Systems festgelegt.

Für die Eifelbahn ergeben sich 65,7 km an verkabelten Abschnitten im 2x25 kV-System, was einem **Kabelanteil von ca. 40 %** entspricht. Da die südliche Netzanbindung vom Schaltposten Ehrang zur Netzkupplung beim Bestands-Unterwerk Kartenhaus vollständig als Kabelstrecke ausgeführt wird (ca. 14 km Trassenlänge), ergeben sich **insgesamt ca. 80 km an Kabelstrecken im 2x25 kV-Netz**.

Die für die Voreifelbahn angesetzten Streckentypen sind in Tabelle 2.2 angegeben, der Streckentyp der Erfttalbahn in Tabelle 2.3.

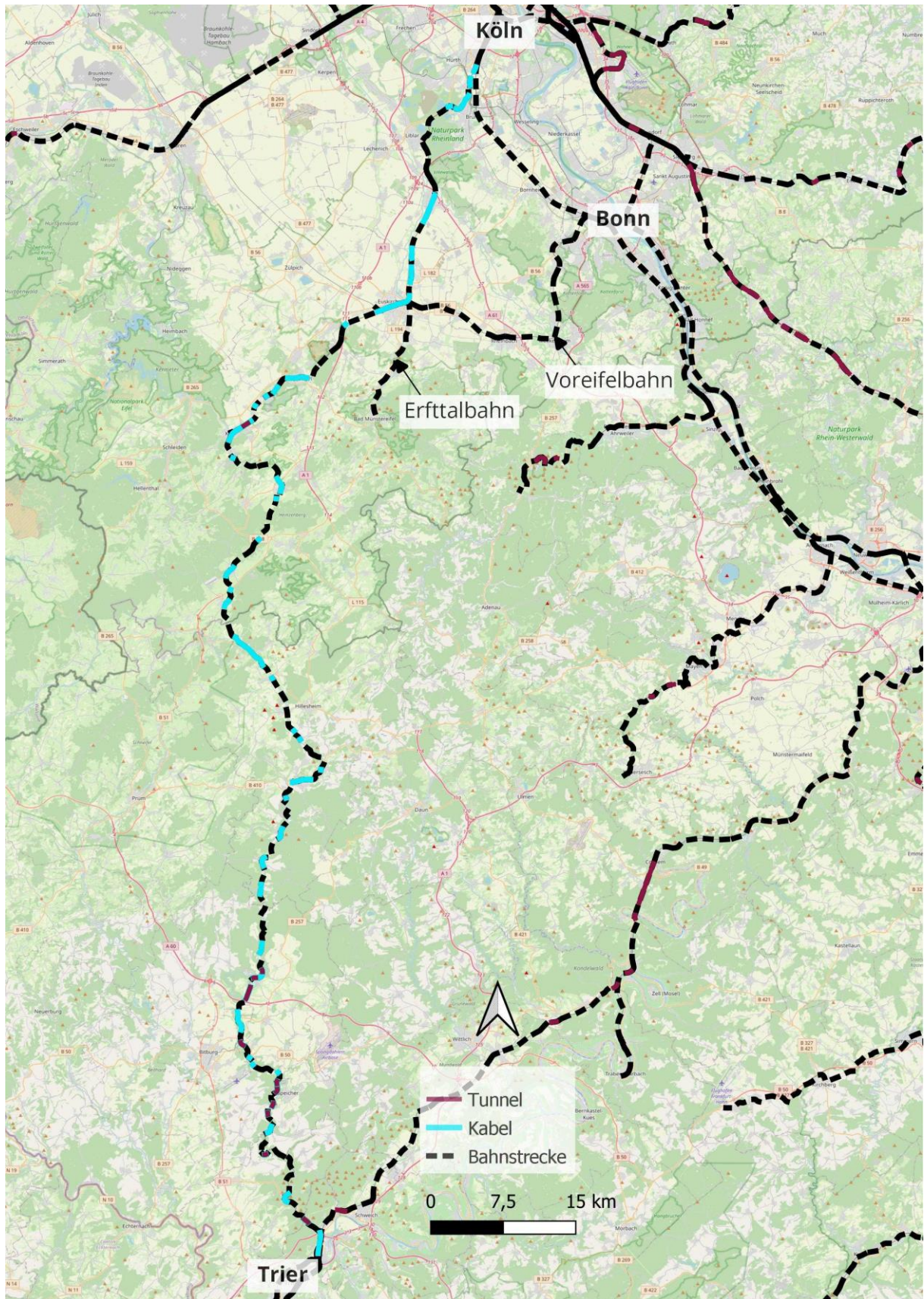


Abbildung 2.5: Eifelnetz mit zur Verkabelung vorgesehenen Abschnitten des 2x25 kV-Netztes auf der Eifelbahn (Datenquellen: OpenStreetMap, DB Open-Data-Portal)

Tabelle 2.1: Streckentypen der Eifelbahn (DB-Strecke Nr. 2631)

KM von	KM bis	Anzahl Gleise	2x25 kV-OLA / -Kabel	Streckentyp
KM 0,0: Sp Kalscheuren (IKKAS)				
0,0	0,3	2	-	5
KM 9,0: Nk Fischenich (IKFIN, Fc) (Führung der 2x25 kV-Verbindungsleitungen mit ca. 0,5 km Trassenlänge als Kabel)				
9,0	17,5	2	OLA	1
17,5	20,2	2	Kabel	3
20,2	23,4	2	OLA	1
23,4	24,3	2	Kabel	3
24,3	25,2	2	OLA	1
25,2	26,1	2	Kabel	3
26,1	26,6	2	OLA	1
26,6	26,7	2	Kabel	3
26,7	28,1	2	OLA	1
28,1	30,1	2	Kabel	3
KM 30,1: Uw Euskirchen (IKEU, Ex)				
30,1	31,9	2	Kabel	3
31,9	35,3	2	OLA	1
35,3	35,5	2	Kabel	3
35,5	42,4	2	OLA	1
42,4	44,5	2	Kabel	3
44,5	45,6	2	OLA	1
45,6	46,5	2	Kabel	3
46,5	47,3	2	OLA	1
47,3	47,4	2	Kabel	3
47,4	48,9	2	OLA	1
48,9	49,0	2	Kabel	3
49,0	50,7	2	OLA	1
50,7	53,3	2	Kabel	3
KM 53,3: Ks Kall (IKKAL)				
53,3	53,8	2	Kabel	3
53,8	55,7	2	OLA	1
55,7	55,8	2	Kabel	3
55,8	61,8	2	OLA	1
61,8	64,3	2	Kabel	3
64,3	68,9	2	OLA	1
68,9	69,4	1	Kabel	4
69,4	70,3	1	Kabel	4
70,3	72,8	1	OLA	2
72,8	73,9	1	Kabel	4
73,9	74,7	2	Kabel	3
74,7	75,8	2	OLA	1
75,8	75,9	2	Kabel	3
75,9	76,6	2	OLA	1

KM von	KM bis	Anzahl Gleise	2x25 kV-OLA / -Kabel	Streckentyp
76,6	79	2	Kabel	3
79	81,2	2	OLA	1
81,2	83,0	2	Kabel	3
KM 83,0: Uw Jünkerath (IKJU, Jt)				
83,0	85,8	2	Kabel	3
85,8	86,5	2	OLA	1
86,5	86,9	2	Kabel	3
86,9	87,5	1	Kabel	4
87,5	90,7	1	OLA	2
90,7	91,5	1	Kabel	4
91,5	92,7	1	OLA	2
92,7	93,5	1	Kabel	4
93,5	94,1	1	OLA	2
94,1	94,2	1	Kabel	4
94,2	96,1	1	OLA	2
96,1	98,5	2	OLA	1
98,5	101,0	2	Kabel	2
101,0	103,2	1	Kabel	4
103,2	104,2	1	OLA	2
104,2	104,3	1	Kabel	4
104,3	107,0	1	OLA	2
107,0	108,3	1	Kabel	4
KM 108,3: Ks Birresborn (ISBRB)				
108,3	109,7	2	Kabel	3
109,7	111,7	2	OLA	1
111,7	113,6	2	Kabel	3
113,6	114,6	2	OLA	1
114,6	115,4	2	Kabel	3
115,4	116,6	1	Kabel	4
116,6	117,4	1	OLA	2
117,4	119	1	Kabel	4
119	121,6	1	OLA	2
121,6	123,2	1	Kabel	4
123,2	124,6	1	OLA	2
124,6	124,7	1	Kabel	4
124,7	125,1	1	OLA	2
125,1	128,5	1	Kabel	4
128,5	130,2	1	OLA	2
130,2	131,4	1	Kabel	4
KM 131,4: Uw Bitburg (ISBIT, By)				
131,4	132,1	2	Kabel	3
132,1	133,3	1	OLA	2
133,3	133,8	1	Kabel	4
133,8	134,5	1	OLA	2

KM von	KM bis	Anzahl Gleise	2x25 kV-OLA / -Kabel	Streckentyp
134,5	136,3	1	Kabel	4
136,3	138,6	1	OLA	2
138,6	139	2	OLA	1
139	139,7	2	Kabel	3
139,7	140,1	1	OLA	2
140,1	141,3	1	Kabel	4
141,3	142,1	1	OLA	2
142,1	143,1	1	Kabel	4
143,1	143,9	1	OLA	2
143,9	144,1	1	Kabel	4
144,1	145,5	1	OLA	2
145,5	145,7	1	Kabel	4
145,7	146,4	2	Kabel	3
146,4	149,1	2	OLA	1
149,1	149,3	2	Kabel	3
149,3	152	2	OLA	1
152	153,7	1	Kabel	4
153,7	155,8	1	OLA	2
155,8	158,3	1	Kabel	4
158,3	160,8	2	OLA	1
160,8	161,3	2	Kabel	3
161,3	163,4	2	OLA	1
163,4	163,5	2	Kabel	3
KM 163,5: Sp Ehrang (ISEG)				
Führung der 2x25 kV-Verbindungsleitungen vom Sp Ehrang über ca. 14 km Trassenlänge als Kabel bis Nk/Uw Karthaus (ISKU, Ks)				

Tabelle 2.2: Streckentypen der Voreifelbahn (DB-Strecke Nr. 2645)

KM von	KM bis	Anzahl Gleise	Streckentyp
KM 0,0: Sp Bonn (IKB)			
0,0	34,2	2	5
KM 34,2: Uw Euskirchen (IKEU, Ex)			

Tabelle 2.3: Streckentyp der Erfttalbahn (DB-Strecke Nr. 2634).

KM von	KM bis	Anzahl Gleise	Streckentyp
KM 0,0: Uw Euskirchen (IKEU, Ex)			
0,0	13,8	1	8
KM 13,8: Stich Bad Münstereifel (KMUE)			

2.4 Ausbauzustand des Restnetzes

2.4.1 Bestandsnetz

In Abstimmung mit DB Energie werden folgende Annahmen für den Ausbauzustand des Restnetzes in den zum Eifelnetz benachbarten Netzbereichen getroffen:

1. Die **Erzeugeranlagen in Köln und Saarbrücken** bleiben unverändert gegenüber dem Ist-Zustand (Köln: 3x25 MW rotierend, 2x37,5 MVA statisch; Saarbrücken: 2x25 MW rotierend).
2. Der geplante **BL-Ringschluss Uw Bengel – Uw Koblenz** wird als zum geplanten Inbetriebnahmezeitpunkt Ende 2026 als **nicht sicher realisiert** angenommen und daher bei der Lastflusssimulation und der Konzeption des Netzschutzes nicht berücksichtigt (Abbildung des *worst case*).
3. Die **Netzkupplung Fischenich** wird mit Volleinführung in die BL 563 Uw Köln – Uw Sindorf eingebunden.
4. Die **Netzkupplung Karthaus** wird zwischen den Unterwerken Karthaus und Saarbrücken in die BL 498 eingeschleift. Zwischen dem Unterwerk und der Netzkupplung Karthaus wird dafür eine kurze Bahnstromleitung (< 100 m Länge) errichtet.
5. Die **Führung des 2x25 kV-Netzes im Raum Trier** vom Uw Karthaus zum Sp Ehrang wird in Abstimmung mit DB Netz, Regionalbereich Mitte entlang der Trierer Weststrecke mit 14 km Trassenlänge und vollständig als Kabelstrecke angenommen. Dies stellt aufgrund der langen zusätzlichen Leitung auf der 2x25 kV-Ebene den *worst case* im Vergleich zu anderen denkbaren Möglichkeiten der südlichen Netzanbindung an das 110 kV-Bahnenergieübertragungsnetz dar.
6. Bei der Berechnung der minimalen Kurzschlussströme (siehe Anlage 02) und der niedrigsten Resonanzfrequenz (siehe Anlage 04) wird weiter angenommen, dass **zwei von drei Umformern in Köln und beide Umformer** in Saarbrücken AUS sind.

Die Einbindung des Eifelnetzes in das 110 kV- und 15 kV-Bestandsnetz ist überblicksmäßig in Abbildung 2.6 dargestellt.

2.4.2 Zukünftiger Netzausbau

Für die Berechnung der maximalen Kurzschlussströme (Anlage 02) wird folgender Netzausbau angenommen:

- zweisystemige Bahnstromleitung Uw Bengel – Uw Karthaus, Einschleifung der Uw Bengel und Uw Karthaus zwischen Uw/zUfw Saarbrücken und Uw Koblenz;
- zweisystemige Bahnstromleitung Uw Sindorf – Uw Stolberg;
- zentrales Umrichterwerk mit 2x40 MW an der BL 486.

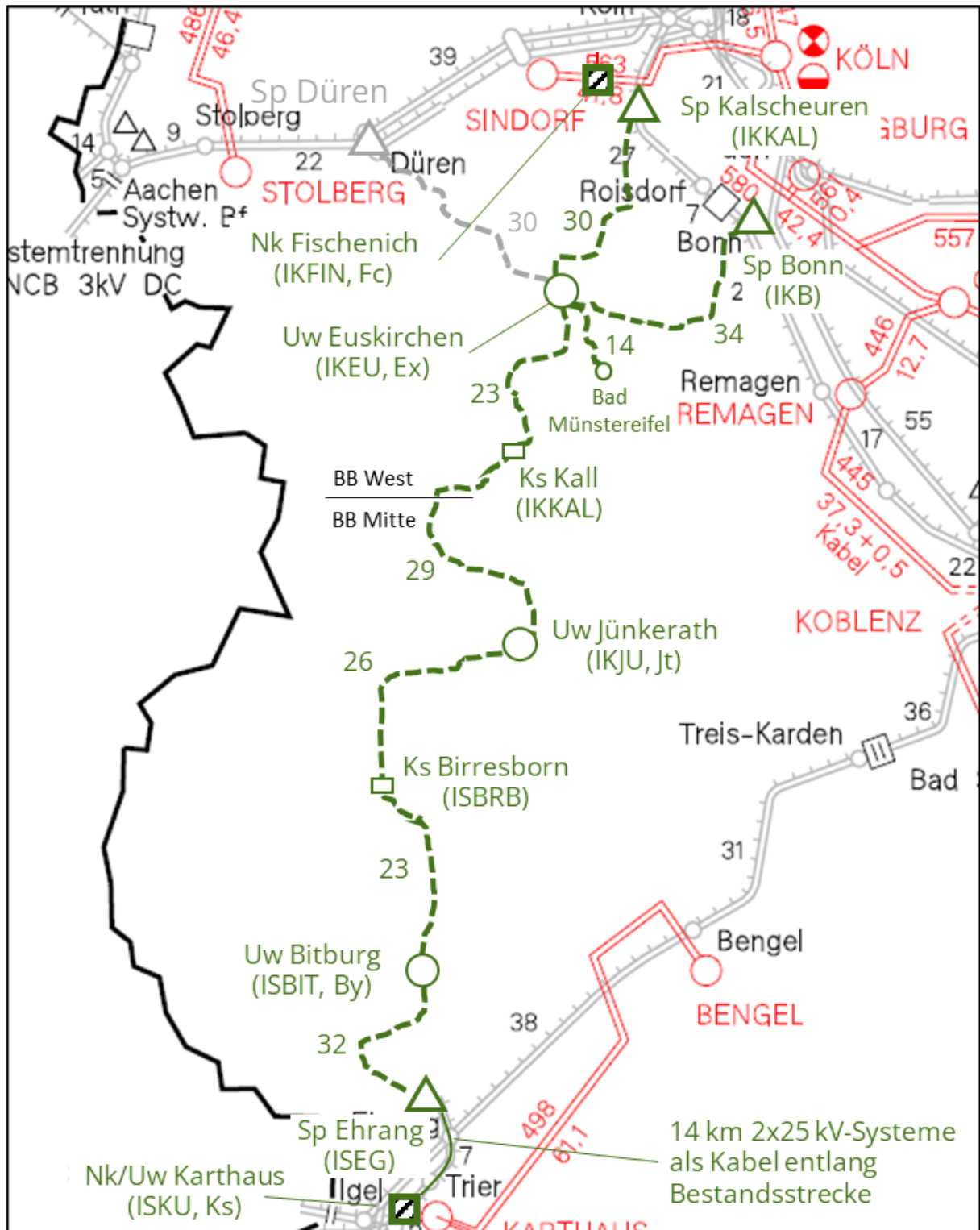


Abbildung 2.6: Einbindung des elektrifizierten Eifelnetzes in das Bestandsnetz, grün dargestellt sind neue bzw. geänderte Anlagen (Bildquelle: DB Energie, bearbeitet durch IFB/TUD).

3 Anforderungen und Untersuchungsszenarien

Im Folgenden werden die allgemeinen und für die Region Eifel speziellen Anforderungen und Beurteilungskriterien sowie Betriebs- und Ausfallszenarien dargestellt.

3.1 Grundlegender Ablauf der Dimensionierung

Die Dimensionierung von Bahnenergieversorgungsinfrastruktur ist ein iterativer Prozess: Aufgrund der verkehrlich vorgegebenen, benötigten Leistungsfähigkeit und RAMS-Anforderungen wird zunächst ein grundlegendes Systemdesign festgelegt (Anlagenstruktur, Standorte, Leistungsklassen von Betriebsmitteln et cetera). Hierzu sind insbesondere bereits bestehende Infrastrukturen und deren ggf. vorhandene Planungen in anderen Projekten zu berücksichtigen.

Für das Eifelnetz wird die angesetzte Systemstruktur in Kapitel 2.3.2 und 2.4 beschrieben.

Im Anschluss wird das Systemdesign anhand der einschlägigen, nachfolgend dargestellten Anforderungen aus Normen, ggf. Betreiber-Richtlinien sowie ggf. Gesetzen und Verordnungen validiert und optimiert. Dabei werden ggf. Änderungen an dem vorher festgelegten Systemdesign (Struktur und Komponenten) vorgenommen, bis alle Anforderungen erfüllt sind.

Die Ergebnisse der Auslegung und Dimensionierung mittels Simulation sind in Anlage 01 ausführlich dargestellt und werden nachfolgend an den jeweiligen Stellen im Ergebnis wiedergegeben.

3.2 Szenarien für die Zugfahrt- und Lastflusssimulation

3.2.1 Bahnbetriebskonzept

Für die Systemauslegung mittels Zugfahrt- und Lastflusssimulation wird ein Betriebsszenario zugrunde gelegt, welches einen zu erwartenden Zugbetrieb mit maximaler elektrischer Anlagenauslastung abbildet (siehe Anlage 01). Dabei werden auch mögliche Umleiterverkehre und Betriebsabweichungen berücksichtigt. Diese Vorgehensweise entspricht DIN EN 50388, Abschnitt 1.

3.2.2 Ausfallszenarien

Grundlegend sind bei der Auslegung des Systems die folgenden Ausfallszenarien zu betrachten:

- (n-1)- und (n-2)-Ausfallszenarien für 2x25 kV-Stromkreise, Unterwerks- und Kuppeltransformatoren;
- (n-1)-Ausfallszenarien für angrenzende 110 kV-Stromkreise;
- (n-1)-Ausfallszenarien von Erzeugeranlagen, insb. von rotierenden Erzeugern.

Für die Lastflusssimulation des Eifelnetzes werden die in Tabelle 3.1 aufgeführten Ausfallszenarien betrachtet.

Tabelle 3.1: Ausfallszenarien für die Lastflusssimulation

Szenario Nr.	Betriebsmittel AUS
00	Normalschaltzustand
01	110 kV-SK IKGU – IKSID 1 (BL 563) AUS
02	110 kV-SK ISSH – ISKU 1 (BL 499) AUS ¹
03	2x25 kV-SK IKFIN – IKEU 1 AUS
04	2x25 kV-SK IKFIN – IKEU 1 und IKFIN – IKEU 2 AUS ²
05	2x25 kV-SK IKEU – IKJU 1 AUS
06	2x25 kV-SK IKEU – IKJU 1 und IKEU – IKJU 2 AUS
07	2x25 kV-SK IKJU – ISBIT 1 AUS
08	2x25 kV-SK IKJU – ISBIT 1 und IKJU – ISBIT 2 AUS
09	2x25 kV-SK ISBIT – ISKU 1 AUS
10	2x25 kV-SK ISBIT – ISKU 1 und ISBIT – ISKU 2 AUS ³
11	Unterwerkstransformator IKEU 1 AUS
12	Unterwerkstransformatoren IKEU 1, IKEU 2, IKEU 3 AUS
13	Unterwerkstransformator IKJU 1 AUS
14	Unterwerkstransformatoren IKJU 1, IKJU 2 AUS
15	Unterwerkstransformator ISBIT 1 AUS
16	Unterwerkstransformatoren ISBIT 1, ISBIT 2 AUS
17	Netzkupplungstransformator IKFIN 1 AUS
18	Netzkupplungstransformator ISKU 1 AUS
1) kritischeres (n-1)-Ausfallszenario, da Uw/Nk Karthaus nur Zwischen-Uw ist	
2) äquivalent zu Komplettausfall Netzkupplung Fischenich	
3) äquivalent zu Komplettausfall Netzkupplung Karthaus	

3.2.3 Lastfall für das Restnetz

Für das Restnetz wird in Abstimmung mit der DB Energie GmbH der sogenannte Lastfall 07 (Starklast, Morgen-HVZ im Winter) mit Messzeitpunkt Oktober 2019 zugrunde gelegt. Der Lastfall bildet erzeugte und verbrauchte Wirk- und Blindleistungen an den 110 kV-Sammelschienen der Erzeugeranlagen und Unterwerke als 15-Minuten-Mittelwerte ab. Zusätzlich werden statische Lasten auf der 15 kV-Ebene angrenzend an die Eifelstrecke angesetzt, welche in Anlage 01 dokumentiert werden.

4 Ergebnisse der Systemstudie

4.1 Spannungshaltung

Die Spannungshaltung der Fahrleitungsspannung wurde mittels einer zu DIN EN 50641 konformen, kombinierten Bahnbetriebs- und Lastflusssimulation untersucht. Dabei wurden ein bahnbetriebliches *worst case*-Szenario und neben dem Normalschaltzustand auch 18 (n-1)- und (n-2)-Schaltzustände untersucht. **Die Einhaltung der Anforderungen aus DIN EN 50163 und DIN EN 50388 konnte in allen simulierten Fällen nachgewiesen werden.**

Die Anlage 01 dokumentiert die Untersuchungsmethodik und -ergebnisse detailliert.

4.2 Dimensionierung der Betriebsmittel

4.2.1 Betriebsfall

Die Dimensionierung der Netzkupplungs- und Unterwerkstransformatoren sowie der Leitungen sowohl im 2x25 kV- als auch im 15 kV-System wurde mittels einer zu DIN EN 50641 konformen, kombinierten Bahnbetriebs- und Lastflusssimulation abgeleitet. Dabei wurden ein bahnbetriebliches *worst case*-Szenario und neben dem Normalschaltzustand auch 18 (n-1)- und (n-2)-Schaltzustände untersucht. **Die Oberleitungen der ein und zweigleisigen Strecke sowie die 2x25 kV-Verbindungsleitungen sind ausreichend dimensioniert. Mit den abgeleiteten technischen Spezifikationen für die Lastenhefte (Anlage 09) sind die Netzkupplungs- und Unterwerkstransformator sowie die Kabel im 2x25 kV-System ausreichend dimensioniert.**

Die Anlage 01 dokumentiert die Untersuchungsmethodik und -ergebnisse detailliert.

4.2.2 Fehlerfall

Für die Komponenten Netzkupplungs- und Unterwerkstransformator sowie Spannungswandler, Stromwandler, Leistungsschalter, Trennschalter, Überspannungsableiter und Kabel im 2x25 kV-System wurden die dimensionierungsrelevanten Stoßkurzschlussströme und thermisch gleichwertigen Kurzschlussströme ermittelt. Dabei wurde ein mit DB Energie abgestimmter, zukünftiger Netzzustand mit Ausbau von Erzeugeranlagen und Leitungen für maximale Kurzschlussströme berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse wurden bei der technischen Spezifikationen der Betriebsmittel berücksichtigt (Anlage 09). **Damit sind die o. g. Betriebsmittel ausreichend dimensioniert.**

Die Anlage 02 dokumentiert die Untersuchungsmethodik und -ergebnisse detailliert.

4.3 Fehlererkennbarkeit und Schutzkonzept

Für alle auftretenden Leitungsfehler inklusive Zwischensystemfehler zwischen dem 2x25 kV- und dem 15 kV-System wurden die für die Beurteilung der Fehlererkennbarkeit relevanten minimalen Kurzschlussströme ermittelt. Dabei wurde ein mit DB Energie abgestimmter *worst case*-Netzzustand mit Ausfall mehrerer benachbarter Umformer berücksichtigt. Durch eine nachgelagerte Auswertung in Kombination mit den Ergebnissen der kombinierten Bahnbetriebs- und Lastflusssimulation wurde die Fehlererkennbarkeit bei Kurzschlüssen der 15 kV-Oberleitung beurteilt.

Mit dem erstellten Schutzkonzept werden alle auftretenden Fehlerfälle sicher beherrscht. Durch die Errichtung von Kuppelstellen in Kall und Birresborn kann auf der 15 kV-Ebene das betrieblich bewährte 15 kV-Schutzkonzept vollumfänglich umgesetzt werden. Es werden ausschließlich Schutzfunktionen eingesetzt, die bereits bei der DB und/oder bei anderen Betreibern erfolgreich im Einsatz und für die am Markt verfügbare und zugelassene Schutzgeräte genutzt werden können.

Die Anlage 02 dokumentiert die Untersuchungsmethodik und -ergebnisse detailliert. Die Anlage 03 erhält das erstellte Schutzkonzept.

4.4 Mastbilder und Instandhaltungskonzept

Unter Berücksichtigung zahlreicher und z. T. gegenläufiger Anforderungen wurden in Kooperation mit DB Netz, DB Energie und SIGNON Mastbilder für die Fahrleitungsanlage bestehend aus der 15 kV-Oberleitung und den 2x25 kV-Verbindungsleitungen entwickelt.

Zum notwendigen Abstand der Phasenleiter +25 kV und –25 kV wurde eine gutachterliche Stellungnahme durch einen EBA anerkannten Sachverständigen für Elektrotechnische Anlagen abgegeben, welche in Anlage 07 vorliegt.

Ein DB-intern abgestimmtes und von den verantwortlichen Personen freigegebenes Instandhaltungskonzept liegt vor.

4.5 Niedrigste Resonanzfrequenz

Wegen des im Vergleich zum DB-Bestandsnetz deutlich erhöhten Kabelanteils der Eifelstrecke (→ Kapazitäten) und bei anderen Betreibern im Netzbetrieb aufgetretenen Problemen wurde eine Untersuchung des elektrotechnischen Resonanzverhaltens und insb. der niedrigsten Resonanzfrequenz der Eifelstrecke durchgeführt. Bei der Modellierung wurden *worst case*-Bedingungen bei der Modellierung unterstellt und es wurden neben dem Normalschaltzustand auch in Hinblick auf die Resonanzfrequenz ungünstige (n-1)- und (n-2)-Ausfallzustände von Transformatoren untersucht. **Die zulässige niedrigste Resonanzfrequenz von 120 Hz im DB-Netz zuzüglich eines mit DB Energie**

abgestimmten Sicherheitsabstandes von 20 Hz wird im Normalschaltzustand wie auch in den untersuchten Ausfallschaltzuständen sicher überschritten.

Die Anlage 04 dokumentiert die Untersuchungsmethodik und -ergebnisse detailliert.

Bei wesentlichen Änderungen des Systemdesigns (maßgeblich sind die Länge der Kabelstrecken und der Kapazitätsbelag des eingesetzten Kabeltyps) wird eine erneute Berechnung empfohlen.

4.6 Transitleistungen im 2x25 kV-System

Durch statische Lastflussberechnungen unter Annahme mehrerer mit DB Energie abgestimmter *worst case*-Netzzustände mit Ausfall von Leitungen und Erzeugeranlagen wurde in Phase 1 der Systemstudie **nachgewiesen, dass die auftretenden Transitleistungen im 2x25 kV-System beherrschbar sind.** Diese Aussage ist auch bei der geänderten Systemkonfiguration in Phase 2 der Systemstudie weiterhin gültig.

Durch die Inbetriebnahme des geplanten Bahnstromleitungs-Ringschlusses zwischen den Unterwerken Bengel und Koblenz wird das Problem möglicher Transitleistungen über dem 2x25 kV-System in der Region Eifel irrelevant.

4.7 Blindleistungskompensation

In der untersuchten Systemkonfiguration (maßgeblich sind die Länge der Kabelstrecken und der Kapazitätsbelag des eingesetzten Kabeltyps) ist eine Blindleistungskompensation nicht erforderlich. Die von der Systemauslastung abhängige Blindleistung kann aus dem Bestandsnetz bereitgestellt werden.

4.8 Transiente Überspannungen im 2x25 kV-System

Wegen der zahlreichen und z. T. im kurzen Abstand auftretenden Übergänge Verbindungsleitung – Kabel im 2x25 kV-System wurde eine Untersuchung zur Ausbreitung und Überlagerung von Wanderwellen durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass transiente Überspannungen auftreten können, die zu einer Überbeanspruchung und Zerstörung der Kabel führen können. **Um die Kabelabschnitte zu schützen, wird empfohlen, an den Übergängen Verbindungsleitung – Kabel jeweils Überspannungsableiter vorzusehen.**

Die Anlage 06 dokumentiert die Untersuchungsmethodik und -ergebnisse detailliert. Die Anforderungen an die Überspannungsableiter sind in den technischen Spezifikationen für die Lastenhefte in Anlage 09 enthalten.

4.9 Einsatz von 110 kV-Hybridschaltmodulen

Sollten keine 2x25 kV-Leistungsschalter und -Trennschalter auf Basis der in Anlage 09 definierten technischen Spezifikationen am Markt verfügbar sein, so können auf Basis der durch DB Energie bereitgestellten Lastenhefte die verfügbaren Hybridschaltmodule für das 110 kV-Bahnstromleitungsnetz (mit Ausnahme der Wandler) verwendet werden.

4.10 Niederfrequente elektrische und magnetische Felder

Für die Streckentypen mit 2x25 kV-System (ein- oder zweigleisig, 2x25 kV-Verbindungsleitungen oder -Kabel) wurden die elektrischen und magnetischen Felder berechnet und die Ausnutzung der Grenzwerte nach 26. BImSchV beurteilt. Dabei wurden für die felderregenden Spannungen bzw. Ströme *worst case*-Bedingungen im Sinne der „maximalen betrieblichen Anlagenauslastung“ unterstellt. **Die Grenzwerte werden eingehalten. Mit dem durchgehenden Einsatz von Rückleiterseilen entlang der gesamten Eifelstrecke sind die wirtschaftlich effizienten und technisch gebotenen Minimierungsmaßnahmen nach 26. BImSchVVwV ausgeschöpft.**

Die Anlage 08 dokumentiert die Untersuchungsmethodik und -ergebnisse detailliert.

4.11 Zusammenfassung

Kriterium	Ergebnis
Spannungshaltung	Die Grenzwerte nach DIN EN 50163 und DIN EN 50388 werden im Normal- und Ausfallbetrieb eingehalten.
Dimensionierung der Betriebsmittel	Die Betriebsmittel sind ausreichend für Normal- und Ausfallbetrieb und unter Berücksichtigung des zukünftigen Netzausbaus dimensioniert. Die Untersuchungsergebnisse sind bei den technischen Spezifikationen der Betriebsmittel berücksichtigt.
Fehlererkennbarkeit und Schutzkonzept	Alle auftretenden Fehler sind mit dem erstellten Schutzkonzept beherrschbar.
Mastbilder und Instandhaltungskonzept	Technisch machbare Mastbilder und ein DB-intern freigegebenes Instandhaltungskonzept liegen vor.
Niedrigste Resonanzfrequenz	Das Kriterium der niedrigsten zulässigen Resonanzfrequenz wird im Normal- und Ausfallbetrieb sicher eingehalten.
Blindleistungskompensation	Nicht erforderlich, die Blindleistung kann aus dem Bestandsnetz bereitgestellt werden.
Transiente Überspannungen im 2x25 kV-System	Zum Schutz der 2x25 kV-Kabel werden Überspannungsableiter eingesetzt.
Einsatz von 110 kV-Hybridschaltmodulen	Der Einsatz der aktuell bei der DB verfügbaren 110 kV-Hybridschaltmodule im 2x25 kV-System ist möglich (Leistungs- und Trennschalter).
Niederfrequente elektrische und magnetische Felder	Die von dem kombinierten 2x25 kV / 15 kV-System ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder sind in Bezug auf die Grenzwerte nach 26. BImSchV unproblematisch und werden durch die eingesetzten Rückleiterseile maßgeblich minimiert.