



Abschlussbericht

LANGFASSUNG

Fahrdrahtlose Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen des Vollbahnverkehrs

(Aktenzeichen Ministerium 2-4332.62-DLR-IFF/5)

Auftraggeber

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg
Neues Schloss
Schlossplatz 4
70173 Stuttgart

Aktenzeichen Ministerium 2-4332.62-DLR-IFF/5
DLR-Angebot vom 08.02.2012

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Fahrzeugkonzepte
Prof. H. E. Friedrich
Pfaffenwaldring 38-40
D-70569 Stuttgart, GERMANY
Tel.: +49 (0)711/6862-256
Fax: +49 (0)711/6862-258

Projektleiter: Dr. Joachim Winter
Tel.: +49 (0) 711/6862-274
E-Mail: joachim.winter@dlr.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Marktanalyse	6
2.1	Quellen	11
3	Stand der Technik	12
3.1	Physikalische und technologische Grundlagen der induktiven, kontaktlosen Energieübertragung	13
3.2	Prinzipieller Systemaufbau und Komponenten	15
3.3	Existierende Anwendungen mit berührungsloser Energieübertragung	18
4	Randbedingungen	20
4.1	Induktiv übertragbare Leistung	20
4.2	Restriktionen durch das vorgegebene Lichtraumprofil	21
4.3	Restriktionen hinsichtlich des realisierbaren Luftspalts	22
4.4	Positionstoleranz des Energieübertragungssystem	22
4.5	Identifikation zu erwartender Risikobereiche	23
4.6	Risikobereich der EMV gegenüber Personen	24
4.7	Quellen	29
5	Systementwurf	30
5.1	Streckenseitige Komponenten	32
5.2	Fahrzeugseitige Komponenten	34
5.3	Weitere Komponenten	35
5.4	Konzeption der Wicklungselemente	38
5.5	Konzeptvarianten	43
5.6	Technische Auslegung	50
5.7	Konstruktion des Sekundärwicklungssystem	56
5.8	Zusammenfassung	61
5.9	Auswirkungen der geänderten Spulenabmessungen	62
5.10	Quellen	63
6	Integration der Komponenten in den Oberbau	65
6.1	Oberbauformen	65
6.2	Integrationsmöglichkeiten der FEÜ in den Oberbau	67
6.3	Verteilung der Oberbauformen	69
6.4	Ansätze für die Einführung der fahrdrahtlosen Energieübertragung	71

6.5	Quellen.....	72
7	Alternative Ansätze zur Streckenausrüstung	73
7.1	Motivation	73
7.2	Referenzstrecke.....	74
7.3	Einfluss der fahrzeugseitigen Ausrüstung auf die Spulenüberdeckung.....	80
7.4	Quellen.....	92
8	Versorgungselektronik.....	93
8.1	Vergleich der Fahrzeugdaten	93
8.2	Einspeisung in Deutschland	94
8.3	Systemkomponenten.....	96
8.4	Auslegung	98
8.5	Zusammenfassung und Fazit.....	113
8.6	Quellen.....	114
9	Übertragungssystem	116
9.1	Feldberechnungen.....	116
9.2	Auslegung der Wicklungssysteme.....	127
9.3	Zusammenfassung	136
9.4	Quellen.....	136
10	Abschätzungen zu Zuverlässigkeit und Instandhaltung	138
10.1	Definition der Analysegegenstände.....	138
10.2	Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit	147
10.3	Instandhaltungsaufwand für das NGT-System im Vergleich zu oberleitungsgebundenen Systemen.....	161
10.4	Einfluss der geänderten Spulenabmessungen	164
10.5	Zusammenfassung	165
10.6	Quellen.....	167
11	Kostenabschätzung.....	168
11.1	Motivation für Fahrdrahtlose Energieübertragung aus Kostensicht	169
11.2	Kostencharakteristik des Oberleitungssystems	171
11.3	Kostencharakteristik der fahrdrahtlosen Energieübertragung	174
11.4	Zusammenfassung	184
11.5	Quellen.....	186
12	Zusammenfassung und Ausblick.....	188

Die nachfolgend zusammengefassten Ergebnisse des durch das Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg geförderten Forschungsprojektes „Fahrdradtlose Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen des Vollbahnverkehrs“ wurden im Zeitraum vom 17. Juli 2012 bis zum 31. Dezember 2013 durch das Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Zusammenarbeit mit dem Institut für Elektrische Energiewandlung und dem Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart erarbeitet.

Autoren

Institut für Fahrzeugkonzepte, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Dr.-Ing. Joachim Winter, Stefan Kaimer M.Sc., Dipl.-Ing. Christopher Kalatz, Johannes Pagenkopf M.Sc.,
Dipl.-Ing. Sebastian Streit

Institut für Elektrische Energiewandlung, Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour, Dipl.-Ing. Mike Böttigheimer, Dipl.-Ing. Philipp Seitz

Institut für Maschinenelemente - Bereiche Schienenfahrzeugtechnik & Zuverlässigkeitstechnik, Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Prof. Dipl.-Ing. Dieter Bögle, Dipl.-Ing. Simon Mayer,
Dipl.-Ing. (FH) Peter Müller

1 Einleitung

von Dr.-Ing. Joachim Winter und Dipl.-Ing. Sebastian Streit

Elektrische Bahnsysteme sind dadurch gekennzeichnet, dass die elektrische Energie von den ortsfesten Anlagen der Bahnenergieversorgung zu den ortsveränderlichen Verbrauchern übertragen werden muss und umgekehrt. Die Zuführung der elektrischen Energie wird streckenseitig durch Oberleitungen realisiert. Die Stromübertragung auf das Fahrzeug erfolgt bei konventionellen elektrischen Vollbahnen des Regional- und Fernverkehrs über Schleifkontakte eines oder mehrerer auf dem Dach befindlicher Stromabnehmer. Dieses Übertragungssystem ist durch eine Reihe von betrieblichen Nachteilen gekennzeichnet. Zum einen ist das Kontaktsystem verschleißbehaftet, was zur Folge hat, dass sowohl Oberleitungen als auch die Schleifleisten der Stromabnehmer zyklisch ausgetauscht werden müssen. Zum anderen führen die Stromabnehmer zu einer signifikanten Lärmemission und einem nicht zu vernachlässigenden aerodynamischen Widerstand. Verschleiß, Lärmemission und aerodynamische Widerstandskraft sind proportional zur Fahrgeschwindigkeit. Folglich trägt das Übertragungssystem aufgrund des Kontaktverschleißes maßgeblich zu den Lebenszykluskosten des Gesamtsystems Bahn bei, wirkt durch die Lärmemission negativ auf die Bahnperipherie und führt durch den zusätzlichen aerodynamischen Widerstand zu einem höheren Energiebedarf. Hinzu kommt, dass das Übertragungssystem äußeren Einflüssen unterliegt, welche das Kontaktverhalten zusätzlich negativ beeinflussen und die Verfügbarkeit des Gesamtsystems einschränken können – bis hin zum temporären Systemausfall. Insbesondere bei tiefen Temperaturen führt Eisbehang an den Oberleitungen zu einer vermehrten Lichtbogenbildung, die einen starken Anstieg des Verschleißes zur Folge hat. Aus den genannten Gründen ist es deshalb sinnvoll, auf das bisherige Übertragungssystem, bestehend aus Oberleitungsanlage und Stromabnehmer, zu verzichten und stattdessen die Energie berührungslos und damit verschleißfrei vom Fahrweg auf das Fahrzeug zu übertragen.

Heute existieren im Bereich der Straßenbahnen bereits erste Anwendungen mit einer berührungslosen Energieübertragung auf Basis eines induktiven Übertragungsprinzips. Die übertragbare Leistung ist dabei derzeit auf etwa 250 kW beschränkt. Die Herausforderung bei der Anwendung eines derartigen Übertragungsprinzips auf Vollbahnen ergibt sich in erster Linie infolge einer deutlich größeren zu übertragenden Leistung. Ziel der Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts ist es, einen Machbarkeitsnachweis für eine kontinuierliche, induktive Energieversorgung von Schienenfahrzeugen des Vollbahnverkehrs zu erbringen.

2 Marktanalyse

von Dr.-Ing. Joachim Winter und Johannes Pagenkopf M.Sc.

Eine Einschätzung der Potentiale der fahrdrahtlosen Energieübertragung im Schienenverkehr erfordert eine erweiterte Betrachtung im Kontext des Verkehrssystems Hochgeschwindigkeitsschienenverkehr sowie der betroffenen Infrastruktursubsysteme, insbesondere der Fahrbahn und Bahnenergieversorgung.

Die Verkehrsleistung im Personenverkehr auf der Schiene wird Prognosen zufolge in den nächsten Jahren weltweit ansteigen. Insbesondere der Hochgeschwindigkeitsverkehr entwickelt sich dynamisch, auch in Gegenden, die über anspruchsvolle klimatische Bedingungen verfügen. Es wird ein Anstieg des Netzes von Hochgeschwindigkeitsstrecken von derzeit (2012) etwas über 17.000 km auf 42.000 km im Jahr 2025 prognostiziert, der überwiegende Teil der neuen Strecken wird in China entstehen (vgl. Abb. 2.1). Von den etwa 2 800 Billionen Passagierkilometern (Pkm) im gesamten Schienenverkehr im Jahr 2010 entfielen etwa 220 Billionen Pkm auf den Hochgeschwindigkeitsverkehr (Internationaler Eisenbahnverband (UIC), 2010). Dies entspricht einem Anteil von etwa 8 %.

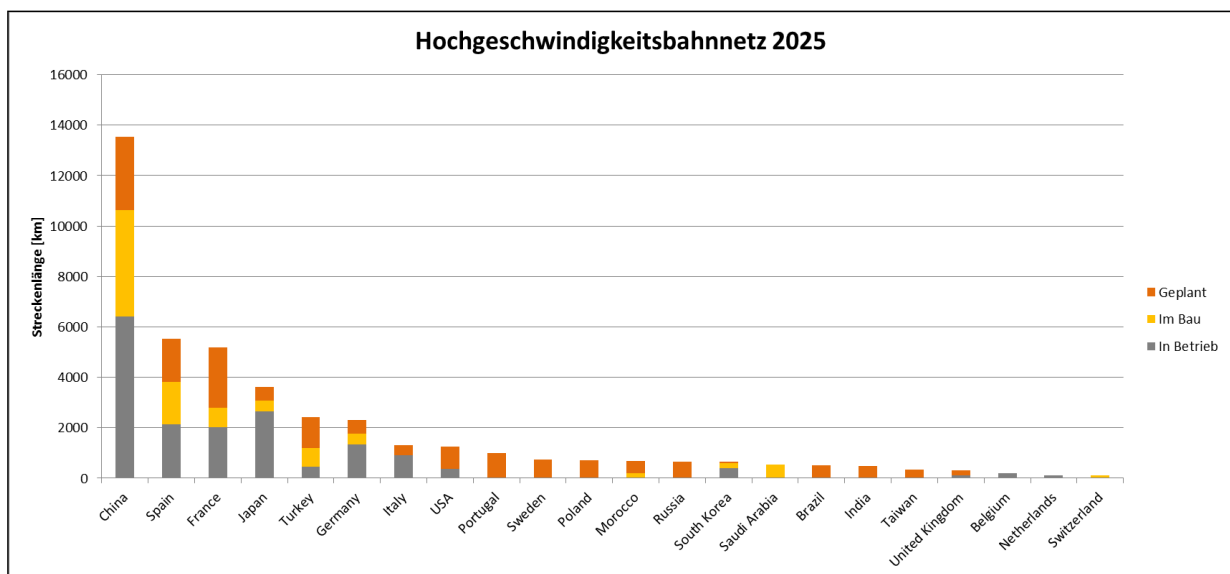


Abb. 2.1: Länge der Hochgeschwindigkeitsstrecken¹

¹ Im Bau befindliche Strecken sind solche, die sich derzeit (2012) in der Bauphase befinden, geplante Strecken umfassen den Zeithorizont bis 2025, nach [3], eigene Darstellung

Ein entscheidender konstruktiver Aspekt des Gesamtsystems der induktiven Energieübertragung ist die physische Integration der Induktionsspulen in den Oberbau, also in die Fahrbahn.

Es existieren zwei Klassen von Fahrbahnen: Der Schotteroberbau und das System Feste Fahrbahn (miteinander verbundene Beton- oder Asphaltplatten). Während in vielen Ländern mit Hochgeschwindigkeitsverkehr sich der Schotteroberbau etabliert hat (Spanien, Frankreich), haben sich in anderen Ländern, insbesondere in solchen, die über ein noch junges Hochgeschwindigkeitsnetz verfügen, die Systeme der Festen Fahrbahn durchgesetzt (China, Taiwan aber auch Japan und Deutschland). Die Feste Fahrbahn wird bei Neubaustrecken im Hochgeschwindigkeitsverkehr trotz, im Vergleich zur Schotterfahrbahn, höherer Investitionskosten mehr und mehr eingesetzt; u.a. wegen der höheren Lagestabilität, der besseren geometrischen Trassierungseigenschaften und des geringeren Instandhaltungsaufwands.

Die kontinuierliche Übertragung der Traktionsenergie für elektrische Triebfahrzeuge erfolgt heute im Hochgeschwindigkeitsverkehr ausschließlich über Oberleitungssysteme und die Stromabnehmer der Fahrzeuge. Bei Vollbahnsystemen haben sich die Wechselstromsysteme gegenüber den Gleichstromsystemen weitgehend durchsetzen können.

Das System Oberleitung/Stromabnehmer bringt durch den direkten Kontakt Schleifleiste-Fahrdraht einige Nachteile mit sich, die sich in elektrischem und mechanischem Verschleiß manifestieren, der im Verbund mit klimatischen bzw. witterungsbedingten Einflüssen verstärkt wird. Zu letzteren zählen z. B. Eisansatz, Salze und Staub.

Weiterhin lassen sich zunehmende Kontaktprobleme bei sehr hohen Geschwindigkeiten beobachten, die zu Lichtbogenbildung und damit sehr starkem Verschleiß führen können (vgl. Abb. 2.2).



Abb. 2.2: Lichtbogenbildung bei sehr hoher Geschwindigkeit [1]

Auf Grund der Zunahme der Betriebsgeschwindigkeiten und der allgemein steigenden an die Energieübertragung gestellten Anforderungen wird von der Industrie deshalb insbesondere hinsichtlich der weiteren Verbesserung der Stromabnehmer viel Entwicklungsarbeit geleistet.

Der Markt für Komponenten der induktiven Energieversorgung nimmt auf Grund der Entwicklung von neuen Anwendungen in der Kommunikations- und Haushaltselektronik, in der Logistik und im Verkehr immer mehr zu. Derzeit kristallisiert sich insbesondere eine Verbreiterung des Anwendungsspektrums heraus hin zu Geräten der Unterhaltungs- und Kommunikationsindustrie (Ladematten für Mobilfunkgeräte) sowie im Bereich des berührungslosen Ladens von Elektroautos.

Mit der Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten einhergehend wird ein stark steigender Absatzmarkt für Komponenten der induktiven Energieübertragung prognostiziert. Dies spiegelt sich auch in der rasant steigenden Anzahl an Publikationen und Patenten (vgl. Abb. 2.3) wider, die seit etwa 2009 zu beobachten ist.

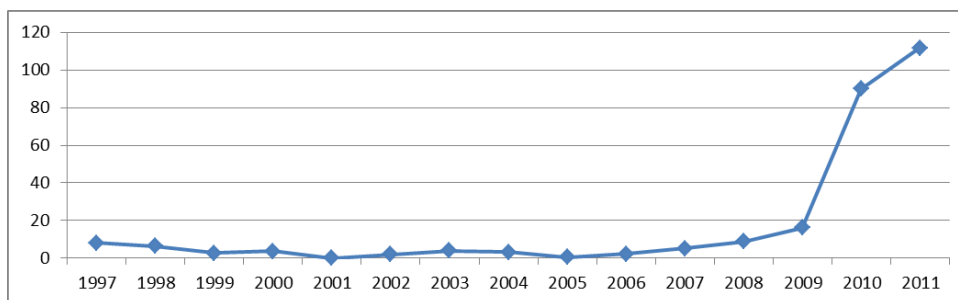


Abb. 2.3: Erfindungen zu induktiver Ladung²

Das starke Wachstum der Anzahl der Veröffentlichungen und Erfindungen lässt, mit einer gewissen Verzögerung, auf eine verstärkte Diffusion von Produkten in den Markt schließen.

Prognosen zum zukünftigen Umsatzpotential von induktiven Ladetechnologien (Unterhaltungselektronik, Logistik und Verkehr) in den nächsten Jahren zeigen zwei Studien von IHS iSupply und Pike Research (vgl. Abb. 2.4).

² Quelle: nach [2] enthalten sind Patente weltweit der EPODOC-Datenbank des Europäischen Patentamtes

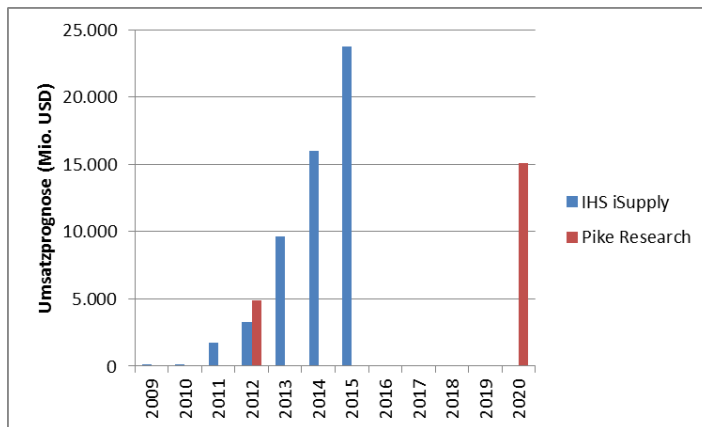


Abb. 2.4: Umsatzprognosen Markt für induktive Energieübertragung [2] [3]

Die berührungslose Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen verlangt eine Erhöhung der übertragbaren spezifischen Leistung bis in den hohen kW/m²-Bereich hinein. Dafür sind stete Weiterentwicklungen im Bereich der Leistungselektronik erforderlich, die die höheren Leistungen schalten können. Es sind derzeit Anwendungen von über 100 kW/m² und bis zum Teil sogar 300 kW/m² spezifischer Übertragungsleistung bekannt. Aus den bisherigen Anwendungen im Straßenbereich und der Weiterentwicklung und -erprobung der Technologie ist davon auszugehen, dass es auch im Bahnbereich weitere Versuchsträger geben wird.

Eine umfassende Marktdurchdringung erfordert jedoch die weitere Normung und Festlegung von herstellerübergreifenden Standardschnittstellen für induktive Energieübertragungssysteme.

Aufbauend auf den systembedingten Vorteilen einer berührungslosen Energieübertragung bzw. den Nachteilen der kontaktbehafteten Stromabnehmer-Oberleitungs-Energieversorgung lassen sich Kriterien erarbeiten, auf denen basierend eine Auswahl von geeigneten Umgebungsbedingungen für die Streckenausrüstung mit induktiver Energieübertragung sich treffen lässt.

Als Bewertungsmaßstab für die Vor- bzw. Nachteile der induktiven Energieübertragung gegenüber dem kontaktbasierten Oberleitungssystem lassen sich die nach DIN EN 50125-2 (Bahnanwendungen - Umweltbedingungen für Betriebsmittel - Teil 2: Ortsfeste elektrische Anlagen) definierten Umweltbedingungen heranziehen. Insbesondere hinsichtlich von Umweltbedingungen wie der Umgebungstemperatur, der Luftfeuchtigkeit, Luftbewegungen, Verschmutzung und Niederschlägen lassen sich systembedingte Vorteile der berührungsfreien induktiven Energieübertragungstechnik ableiten. Die Umweltbedingungen elektromagnetische Verträglichkeit, Brandschutz und Tunnelbedingungen lassen sich

erst in einer vertieften Analyse hinsichtlich ihrer Vorteilhaftigkeit bzw. Nachteiligkeit für ein System der induktiven Energieübertragung bewerten. Basierend auf einer Auswahl von geeigneten klimatischen Umgebungsbedingungen für die Streckenausrüstung mit induktiver Energieübertragung lassen sich Strecken anhand ihrer Zuordnung zu Klimaklassen und den daraus folgenden entsprechenden Eigenschaften als geeignet für eine Ausrüstung mit induktiver Energieübertragung identifizieren (vgl. Abb. 2.5).

Klimaklassifikation		Strecken		
ET	polar; polar tundra			Polar climate
EF	polar; polar frost			
Dwd	snow; winter dry; extremely continental			
Dwc	snow; winter dry; cool summer			
Dwb	snow; winter dry; warm summer	Beijing - Harbin (China)		
Dwa	snow; winter dry; hot summer			
Dsd	snow; summer dry; extremely continental			Snow climate
Dsc	snow; summer dry; cool summer			
Dsb	snow; summer dry; warm summer			
Dsa	snow; summer dry; hot summer			
Dfd	snow; fully humid; extremely continental			
Dfc	snow; fully humid; cool summer			
Dfb	snow; fully humid; warm summer	S. Petersb. - Moskau (Russland)	Malmö - Stockholm (Schweden)	Montreal - Toronto (Kanada)
Dfa	snow; fully humid; hot summer	Chicago - St Louis (USA)	Chicago - Detroit (USA)	
Cwc	warm temperate; winter dry; cool summer			
Cwb	warm temperate; winter dry; warm summer			
Cwa	warm temperate; winter dry; hot summer	Delhi - Patna (Indien)		
Csc	warm temperate; summer dry; cool summer			
Csb	warm temperate; summer dry; warm summer	Eugene - Vancouver (Kanada)		Warm climate
Csa	warm temperate; summer try; hot summer	Tanger - Casablanca (Marokko)		
Cfc	warm temperate; fully humid; cool summer			
Cfb	warm temperate; fully humid; warm summer	London - Manchester / Leeds (UK)	Bordeaux - Toulouse (Frankreich)	Melbourne - Brisbane (Australien)
Cfa	warm temperate; fully humid; hot summer	Osong - Mokpo (Südkorea)	Rio de Janeiro - São Paulo (Brasilien)	
BSh	arid; steppe; hot arid			Arid climate
BSk	arid; steppe; cold arid			
BWh	arid; desert; hot arid	Medina - Mekka (Saudi Arabien)	Teheran - Isfahan	
BWk	arid; desert; cool arid	Lanzhou-Ürümqi (China)	Taschkent - Samarkand	
Aw	equatorial; winter dry	Mumbai - Ahmedabad (Usbekistan)	Bangkok - Nong Khai (Thailand)	Bangkok - Chiang Mai (Thailand)
As	equatorial; summer dry			Equatorial climate
Am	equatorial; monsiinal	Jaunde - Douala (Kamerun)		
Af	equatorial; fully humid	Kuala Lumpur - Singapur (Malaysia)	Jakarta - Soekarno-Hatta (Indonesien)	

Legende	
	Studie, geplant
	im Bau
	In Betrieb

Abb. 2.5: Hochgeschwindigkeitsstrecken (Auswahl) geordnet nach Klimazonen³

³ Klassifikation nach [4], Strecken sind in Betrieb, derzeit im Bau oder geplant.

Dazu zählen in trocken-heißen Klimaten in Asien z. B. die Strecken Medina-Mekka sowie in kalten schneereichen Gegenden in Nordeuropa z. B. Malmö-Stockholm, in Nordamerika Montreal-Toronto und in Asien z. B. Beijing-Harbin.

Ferner sind auch die sich aus dem Betriebskonzept und der Netzcharakteristik ergebenden Bedingungen von Belang im Sinne einer allumfassenden Eignungsbewertung von Strecken für die induktive Energieübertragung.

Es kann festgehalten werden, dass eine Streckenausrüstung mit induktiver Energieübertragung sinnvoller bei solchen Strecken ist, bei denen alle darauf verkehrenden Fahrzeuge ebenfalls mit der Technik für induktive Energieübertragung ausgerüstet sind, also vornehmlich Trassen für den ausschließlichen Personenverkehr.

2.1 Quellen

- [1] Teodor Turcu. (2011, September) ADD systems, a necessity in high-speed transport. Online: <http://www.railwaypro.com/wp/?p=6531>.
- [2] iSuppli Inc. (2011, June) Up Over 600 Percent, Wireless Charging Market to Reach New Heights in 2011. Online: <http://www.isuppli.com/Mobile-and-Wireless-Communications/MarketWatch/Pages/Up-Over-600-Percent-Wireless-Charging-Market-to-Reach-New-Heights-in-2011.aspx>.
- [3] Pike Research. (2012, July) The Market for Wireless Power Systems Will Triple Over the Next 8 Years, Surpassing \$15 Billion by 2020. Online: <http://www.navigantresearch.com/newsroom/the-market-for-wireless-power-systems-will-triple-over-the-next-8-years-surpassing-15-billion-by-2020>.
- [4] M. Hecht et al., Handbuch: Das System Bahn. Hamburg, DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2008.

3 Stand der Technik

von Prof. Dipl.-Ing. Dieter Bögle, Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour, Dipl.-Ing. Philipp Seitz, Dipl.-Ing. Simon Mayer und Dipl.-Ing. (FH) Peter Müller

Unter dem Oberbegriff „Berührungslose Energieübertragung“ versteht man sämtliche Übertragungsarten bei denen elektrische Energie ohne galvanische Kopplung, also ohne direkten elektrischen Kontakt übertragen wird. Zur kontaktlosen Energieübertragung existieren Techniken mit grundsätzlich unterschiedlichen Übertragungsprinzipien. Im Wesentlichen kann eine energetische Kopplung induktiv, kapazitiv oder über elektromagnetische Wellen erfolgen.

Von den genannten Übertragungsmechanismen ermöglicht insbesondere die induktive Kopplung vergleichsweise hohe Leistungsdichten und große Wirkungsgrade. Außerdem ist es grundsätzlich möglich, neben der Energie gleichzeitig auch Daten bidirektional zu übertragen. Die kapazitive Kopplung eignet sich aufgrund der höheren Betriebsfrequenzen und niedrigeren Leistungsdichten prinzipiell eher für kleine Übertragungsleistungen, zur Datenübertragung oder bei Umgebungsbedingungen, die eine induktive Energieübertragung ausschließen. Energieübertragung mittels elektromagnetischer Wellen setzt eine ausreichende Richtcharakteristik zur Fokussierung der Strahlung auf den Empfänger voraus. Daher ist eine genaue Positionsbestimmung bzw. -verfolgung des Leistungsempfängers nötig, wofür insbesondere bei Geschwindigkeits- oder Richtungsänderungen des Empfängers ein hoher Aufwand betrieben werden muss.

Aufgrund der spezifischen Randbedingungen bei einer Anwendung der berührungslosen Energieübertragung für Vollbahnen mit deren typischen Leistungsanforderungen, beschränken sich die Untersuchungen daher ausschließlich auf induktive Energieübertragungssysteme.

Systeme zur induktiven, kontaktlosen Energieübertragung können anhand ihrer Funktionsweise in verschiedene Kategorien eingeordnet werden:

- stationäre Systeme
- dynamische Systeme, eindimensional
- quasistationäre Systeme, zweidimensional

Aufgrund der Spurführung bilden Schienenfahrzeuge in diesem Kontext dynamische eindimensionale Systeme. Für die Auswahl einer geeigneten Technologie zur Übertragung der Energie wurden die zugehörigen Ausführungsvarianten mit Linienleitern sowie die mit Wanderwellen hinsichtlich ihrer prinzipiellen Eignung untersucht.

3.1 Physikalische und technologische Grundlagen der induktiven, kontaktlosen Energieübertragung

Die physikalische Grundlage der induktiven Energieübertragung beruht auf der magnetischen Kopplung zwischen zwei Spulensystemen (Primär- und Sekundärspule). Das zugrunde liegende physikalische Wirkprinzip entspricht dem des Transformators (vgl. Abb. 3.1).

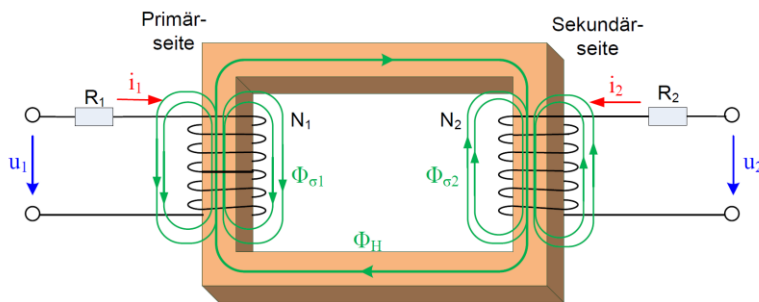


Abb. 3.1: Schematische Darstellung eines realen Transformators

Eine induktive Übertragungsstrecke ergibt sich, wenn der Eisenkern des Transformators geteilt wird und in der Folge der magnetische Fluss über einen Luftspalt geführt werden muss (vgl. Abb. 3.2).

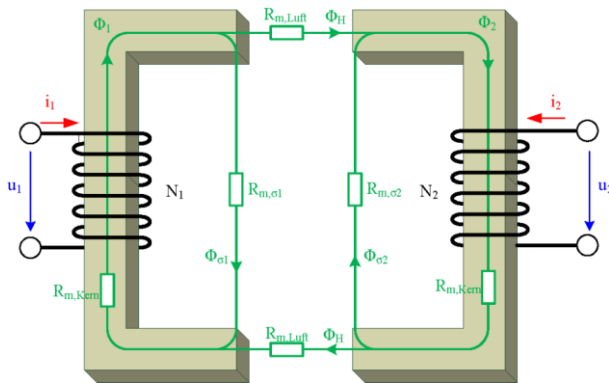


Abb. 3.2: Schematische Darstellung eines realen Transformators mit Luftspalt

Die wesentlichen Unterschiede zwischen einem Transformator und einer kontaktlosen Übertragungsstrecke werden durch den bei der kabellosen Übertragung zwingend vorhandenen, relativ großen Luftspalt verursacht. Das zugehörige elektrische Ersatzschaltbild jedoch bleibt unverändert und ist in Abb. 3.3 dargestellt.

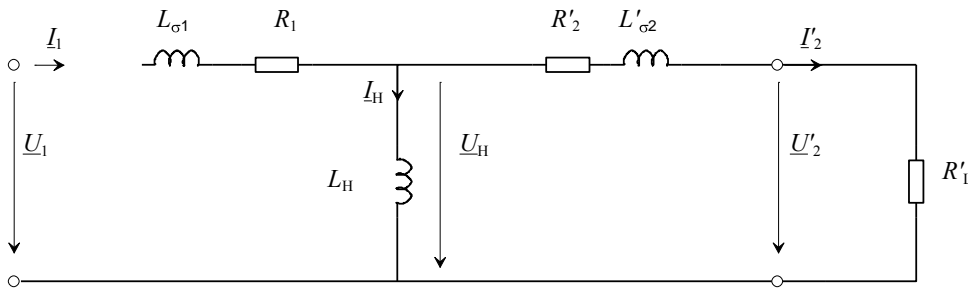


Abb. 3.3: Ersatzschaltbild des Transformators

Für einen Transformator mit Eisenkern ist die Hauptinduktivität L_H viel größer als die Streuinduktivitäten $L_{\sigma 1}$ und $L'_{\sigma 2}$. Damit ist die Impedanz, die sich aus L_H ergibt, ebenfalls sehr groß und der Strom in diesem Zweig sehr klein. Der magnetische Widerstand des durch das Auseinanderziehen entstehenden Luftspalts steigt mit dem Abstand und führt deshalb zu einer Vergrößerung der Streuflüsse. Somit reduziert sich auch der nutzbare Fluss in der Sekundärspule. Kontaktlose Systeme verfügen dementsprechend über sehr hohe Streuinduktivitäten und eine niedrige Hauptinduktivität. Dies führt zu einer Reduzierung der Übertragungsgüte.

Um zu vermeiden, dass bei der kontaktlosen Übertragung der Strom I_H durch die Hauptinduktivität größer wird, muss dafür gesorgt werden, dass die Impedanz dieses Zweiges groß bleibt. Da sich dessen Impedanz aus $\underline{Z} = j\omega L_H$ ergibt und die Hauptinduktivität aufgrund des Aufbaus kleiner geworden ist, muss die Kreisfrequenz ω erhöht werden. Damit vergrößern sich jedoch ebenfalls die Impedanzen der Streuinduktivitäten und daraus folgend die Gesamtimpedanz der Schaltung, was den Eingangsstrom verkleinert und somit die übertragbare Leistung verringert. Um diesen Effekt zu vermeiden werden die Impedanzen der Streuinduktivitäten durch paralleles oder seriellres Zuschalten von Kondensatoren kompensiert.

Da die Frequenz nicht beliebig erhöht werden kann, ist eine gewisse Größe der Hauptinduktivität notwendig. Begrenzende Faktoren für die Erhöhung der Frequenz sind: maximal einstellbare Schaltfrequenz der Leistungshalbleiter, Spannungsfestigkeit der Kondensatoren, Skin- und Proximityeffekt sowie parasitäre Kapazitäten in den Wicklungen, Eisenverluste, maximal zulässige Stromdichte und die elektromagnetischen Grenzwerte zum Schutz von Umwelt und Lebewesen. Die üblichen Betriebsfrequenzen liegen im Bereich 20 – 150 kHz.

3.2 Prinzipieller Systemaufbau und Komponenten

Der Aufbau und die wichtigsten Komponenten eines Systems zur induktiven Energieübertragung sind in Abb. 3.4 am Beispiel einer kabellosen Batterie-Ladeeinrichtung dargestellt.

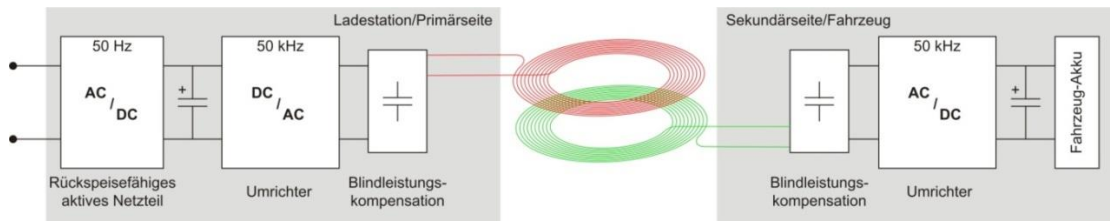


Abb. 3.4: Aufbau und Komponenten einer induktiven Energieübertragungsstrecke

Unabhängig von der konkreten Ausführungsform der Übertragungsstrecke selbst umfasst der Gesamtaufbau vom Netz bis zum Verbraucher prinzipiell folgende Komponenten:

- Gleichrichter, um aus der Netzspannung (in der Regel 50 Hz) eine Gleichspannung zu erzeugen
- Zwischenkreiskondensatoren, um eine möglichst konstante Gleichspannung zu gewährleisten
- Wechselrichter mit hoher Schaltfrequenz, um die Resonanzfrequenz der Übertragungsstrecke einstellen zu können
- Primärseitiges Kompensationsnetzwerk
- Übertragungsstrecke
- Sekundärseitiges Kompensationsnetzwerk
- Gleichrichter, um aus der übertragenen Wechsellspannung eine Gleichspannung zu erzeugen
- Verbraucher

3.2.1 Übertragung mit Linienleitern

Das Prinzip der Übertragung mit Linienleitern beruht auf sehr ausgedehnten Primärwicklungen entlang eines Fahrweges sowie der Möglichkeit, mehrere Abnehmer unabhängig voneinander zu versorgen. In Abb. 3.5 ist das schematische Prinzip solch eines Übertragungssystems dargestellt.

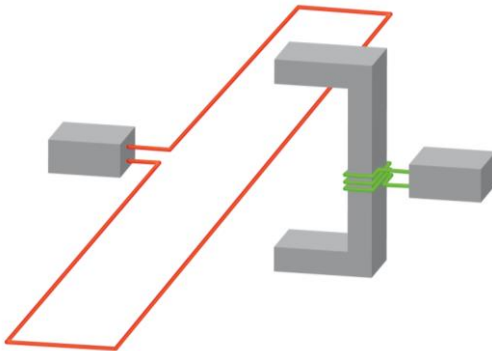


Abb. 3.5: Schematische Darstellung eines Linienleitersystems

Es wird ein Wechselstrom mit konstantem Effektivwert in die Primärwicklung eingepreßt und somit entlang der Strecke ein magnetisches Wechselfeld, also eine „stehende Welle“, erzeugt. Dadurch können beliebig viele Abnehmer entlang der Strecke kontaktlos mit Energie versorgt werden. Wegen der Stromeinprägung im Primärleiter entspricht das elektrische Ersatzschaltbild solch einer Anordnung dem Parallelschalten aller Abnehmer. Da unabhängig von der insgesamt übertragenen Energie immer ein Strom im Primärleiter fließt, sind die ohmschen Verluste im Primärleiter ebenfalls ständig vorhanden - unabhängig davon, ob Energie übertragen wird oder nicht. Da diese Verluste einen großen Anteil an den Gesamtverlusten haben, sinkt der erreichbare Wirkungsgrad dieser Anordnung mit der prozentualen Ausnutzung der maximal möglichen Übertragungsleistung. Soll diese Topologie für einen Zug eingesetzt werden kann man sich jedoch die Länge des Zuges zu Nutzen machen, indem der Zug mit vielen kleinen Einzelabnehmern ausgerüstet wird und die Primärseite in Teilstücke unterteilt wird. Die Länge dieser Teilstücke ist so klein zu wählen, dass sie maximal die Hälfte der Länge des Zuges misst. Damit kann erreicht werden, dass die Energieübertragung nur bei vollständiger Überdeckung eines primärseitigen Teilstückes und somit maximaler Leistung aktiviert wird.

3.2.2 Übertragung mit Wanderwellen

Das Prinzip der Wanderwellen-Übertragung ist hinsichtlich der relevanten Eigenschaften für den im Rahmen der Untersuchungen angestrebten Systemscheid dem der Übertragung mit Linienleitern sehr ähnlich, jedoch wird anstelle einer stehenden Welle eine so genannte Wanderwelle eingesetzt.

Im Gegensatz zum Linienleitersystem, bei der das Magnetfeld positionsunabhängig ist und sich nur zeitlich ändert, ist das Feld der Wanderwelle sowohl zeit-, als auch positionsabhängig. Das Prinzip einer Wanderwelle beruht auf dem Prinzip der elektrischen Drehfeldmaschinen. Üblicherweise sind diese Systeme dreisträngig ausgeführt. Dabei sind

die Wicklungen der einzelnen Stränge räumlich zueinander um die Strecke $\lambda/3$ versetzt, wobei λ der Wellenlänge, also der Länge einer Periode der Wanderwelle entspricht. Die Stränge sind entweder im Stern oder im Dreieck verschaltetet (vgl. Abb. 3.6) und werden von sinusförmigen Strömen, die zeitlich um $2\pi/3$ phasenverschoben sind, gespeist.

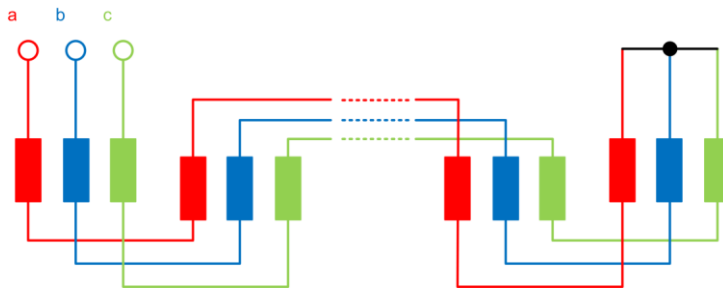


Abb. 3.6: Schema einer dreisträngigen Primärwicklung zur Wanderwellenübertragung

Da in jedem Strang ein sinusförmiger Strom fließt, wird von jedem Strang ein zeitabhängiger Fluss erzeugt. Diese drei Flüsse sind aus Gründen der Geometrie räumlich um $l/3$ zueinander verschoben und erreichen ihr Maximum zeitlich um $2\pi/3$ versetzt.

3.2.3 Vergleich der Übertragungsprinzipien

Die Übertragung mit Linienleitern hat sich in der Industrie bereits am meisten verbreitet. Dort wird sie vorwiegend für fahrerlose Transportsysteme eingesetzt, was jedoch bei ausgedehnten Primärwicklungen zu geringeren Wirkungsgraden führt. Dieses Problem, das für die Wanderwellen-Übertragung ebenfalls bestehen kann, lässt sich durch Segmentierung und selektive Aktivierung weitestgehend vermeiden. Es kristallisieren sich also unabhängig von der Wahl zwischen Linienleiter- und Wanderwellen-System einige Kriterien für einen hohen Wirkungsgrad heraus. Die primärseitigen Segmente sollten möglichst mit maximaler Überdeckung und damit maximaler Leistungsentnahme betrieben werden. Daher ist die Länge der primärseitigen Segmente in Abhängigkeit der Länge des Zuges begrenzt. Es muss ein Optimum zwischen dem Vorteil hinsichtlich des besseren Wirkungsgrades bei sehr kleinen Segmenten und dem Vorteil hinsichtlich der Kosten sowie der Realisierbarkeit bei größeren Segmenten gefunden werden.

Um eine fundierte Entscheidung zwischen der Übertragung mit Linienleitern oder Wanderwellen treffen zu können, werden weitere Daten und Erkenntnisse benötigt, die mit Hilfe von Simulationen und Laboraufbauten gewonnen werden können. Dazu zählt insbesondere der Materialaufwand, der zur Übertragung der geforderten Leistung notwen-

dig ist, die Komplexität des Aufbaus und damit die Kosten der Fertigung, die möglichen Wirkungsgrade, aber auch das Verhalten der Strecke in Bezug auf Sicherheit, Zuverlässigkeit und Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).

3.3 Existierende Anwendungen mit berührungsloser Energieübertragung

Derzeitig existieren eine Reihe von Anwendungen in Verkehr und Industrie. Diese Anwendungen lassen sich im Wesentlichen nach statischer und dynamischer Energieübertragung unterscheiden.

Die nachfolgende Tabelle fasst relevante Kenngrößen von derzeit in Anwendung befindlichen berührungslosen Energieübertragungssystemen (ausschließlich induktiv) zusammen.

Tab. 3.1: Kenndaten aktueller Anwendungen mit induktiver Energieübertragung

Anwendung	IPT®-Charge Conductix	Primove Straßenbahn	J-Lasslop Straßenbahn	IPS® Transrapid	Movitrans® SEW Eurodrive	CPS Vahle	Primove Bus
Stand	2010	2012	2012	2006	2012	2012	2010
Art der Übertragung	statisch	dynamisch	dynamisch	dynamisch	dynamisch	dynamisch	statisch und dynamisch
Übertragungsfrequenz	20 kHz	20 kHz	20 kHz	20 kHz	20 kHz	20 kHz	20 kHz
Übertragungsleistung	60 kW	200 kW (bis 500 kW möglich)	300 kW	5 kW je Einkoppelspule, 2 x 250 kW Fahrwegseitig	1,5 kW	3 kW	80 kW
Übertragungsfläche	k.A.	ca. 2 m ²	0,96 m ²	k.A.	0,12 m ²	0,16 m ²	k.A.
Spezifische Übertragungsleistung	k.A.	100 kW/m²	312,5 kW/m²	k.A.	12,5 kW/m ²	18,75 kW/m ²	k.A.
Wirkungsgrad der Stromübertragung	95 %	95 %	98 %	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Auffallend ist dabei, dass alle Anwendungen auf der gemeinsamen Frequenz von 20 kHz arbeiten. Auf Grund der Tatsache, dass die theoretisch übertragbare Leistung bei höheren Frequenzen größer wird und die Schaltverluste durch stetige Verbesserung der Leistungselektronik reduziert werden können, ist bei den Anwendungen jedoch ein Anstieg der Frequenz zu erwarten. Dabei wird die Grenze aller Voraussicht nach bei unter 150 kHz liegen, da die von der *International Commission on non-ionizing radiation protection* (ICNIRP) vorgeschlagenen Referenz- und Grenzwerte für die magnetische Flussdichte ab 150 kHz nicht mehr konstant sind, sondern antiproportional zur Frequenz ver-

laufen. Außerdem kann es bei noch höheren Frequenzen zu Konflikten mit den Telekommunikationsfrequenzen und insbesondere den Amateurfunkverordnungen kommen.

4 Randbedingungen

von Prof. Dipl.-Ing. Dieter Bögle, Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour, Dipl.-Ing. Philipp Seitz, Dipl.-Ing. Simon Mayer und Dipl.-Ing. (FH) Peter Müller

4.1 Induktiv übertragbare Leistung

Ein wesentliches Kriterium für die Beurteilung der Machbarkeit einer induktiven Energieversorgung von Vollbahnen ist die übertragbare Leistung. Die erforderliche Leistung erstreckt sich dabei anwendungsabhängig (Regionalverkehr, Hochgeschwindigkeitsverkehr) über einen großen Bereich. Die individuell erforderliche Übertragungsleistung hängt im Wesentlichen von den folgenden Parametern ab:

- Fahrzeuggewicht
- Geschwindigkeit
- Beschleunigung
- Fahrwiderstandskräfte (Rollwiderstand, aerodynamischer Widerstand)

Die höchsten Leistungsanforderungen ergeben sich bei einer Vollbahnanwendung im Hochgeschwindigkeitsverkehr. Als Referenz dient hierfür das am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelte Konzept eines Hochgeschwindigkeitstriebzuges „Next Generation Train“ (im Folgenden NGT). Für diesen ergibt sich in der Zugkonfiguration mit zwei End- und acht Mittelwagen bei einer maximalen Betriebsgeschwindigkeit von 400 km/h eine erforderliche Traktionsleistung von 18,3 MW. Zuzüglich des Leistungsbedarfs für Nebenverbraucher wird für die weitere Auslegung von einer maximalen Übertragungsleistung von 25 MW ausgegangen.

Die induktiv übertragbare Leistung ist in erster Linie abhängig von dem zur Verfügung stehenden Bauraum bzw. der Fläche zur Installation des Sekundärspulensystems im Zugunterboden. In Abb. 4.1 ist die unter dem Zug maximal zur Verfügung stehende Fläche dargestellt. Die Maximal zur Verfügung stehende Fläche zur Installation des Sekundärspulensystems beträgt somit rund 118,37 m². Bei einer maximal zu übertragenden Leistung von 25.000 kW (25 MW) entspricht dies einer zu übertragenden Leistung von rund 211 kW/m².

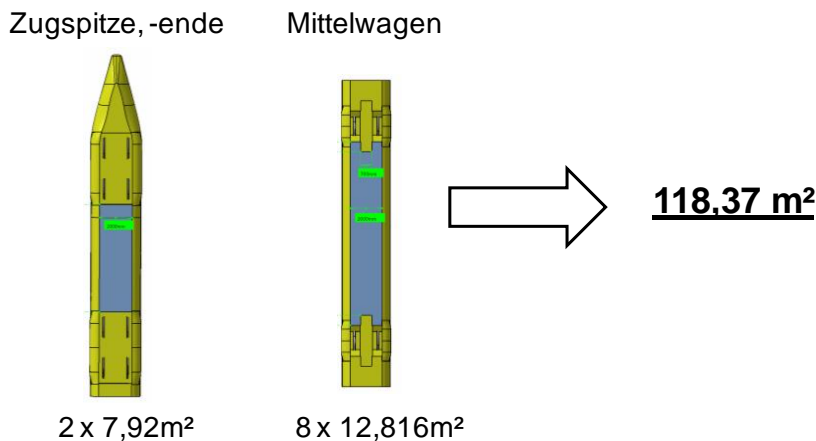


Abb. 4.1: Fläche zur Installation des Sekundärspulensystems

Wie bereits dargestellt erreichen heutige Anwendungen im Bereich von Nahverkehrsbahnen spezifische Übertragungsleistungen zwischen etwa 100 kW/m^2 , und $312,5 \text{ kW/m}^2$ auf (vgl. Tab. 3.1).

Somit lässt sich grundsätzlich festhalten, dass die notwendige, induktiv zu übertragende spezifische Leistung von 211 kW/m^2 technologisch realisierbar ist. Die Energiedichte liegt im Bereich bereits etablierter Systeme.

4.2 Restriktionen durch das vorgegebene Lichtraumprofil

Bei der Integration der Sekundärspulen in das Fahrzeug ist im Unterflurbereich das Lichtraumprofil maßgebend. Dieses beschreibt den für Fahrzeuge freigehaltenen lichten Raum über dem Gleis. Gemäß Regellichraum nach § 9 der EBO und der für Reisezugwagen geltenden unteren Begrenzungslinie G2 nach § 22 der EBO ergibt sich ein Mindestabstand von 80 mm zwischen der Schienenoberkante und der unteren Fahrzeugbegrenzung. Da es aus den vorgenannten Gründen (vgl. Kapitel 3.1) bei einem induktiven Energieübertragungssystem von Vorteil ist, wenn nur kleine Luftspalte überbrückt werden müssen, muss im weiteren Verlauf der Untersuchungen noch geprüft werden inwieweit eine Lademaßüberschreitung im Unterflurbereich zulässig ist. Lademaßüberschreitungen sind in gewissen Grenzen zulässig. Allerdings betreffen heute übliche Lademaßüberschreitungen ausschließlich Verletzungen des Lichtraumprofils im seitlichen oder oberen Fahrzeugbereich.

4.3 Restriktionen hinsichtlich des realisierbaren Luftspalts

Da die Größe des Luftspaltes ein wichtiger Parameter für die Leistungsübertragung ist wurde im Zuge der Analyse des verfügbaren Lichtraumes im Unterflurbereich eine Abschätzung des resultierenden Luftspaltes exemplarisch für eine Integration des Wicklungssystems in den NGT durchgeführt (vgl. Abb. 4.2).

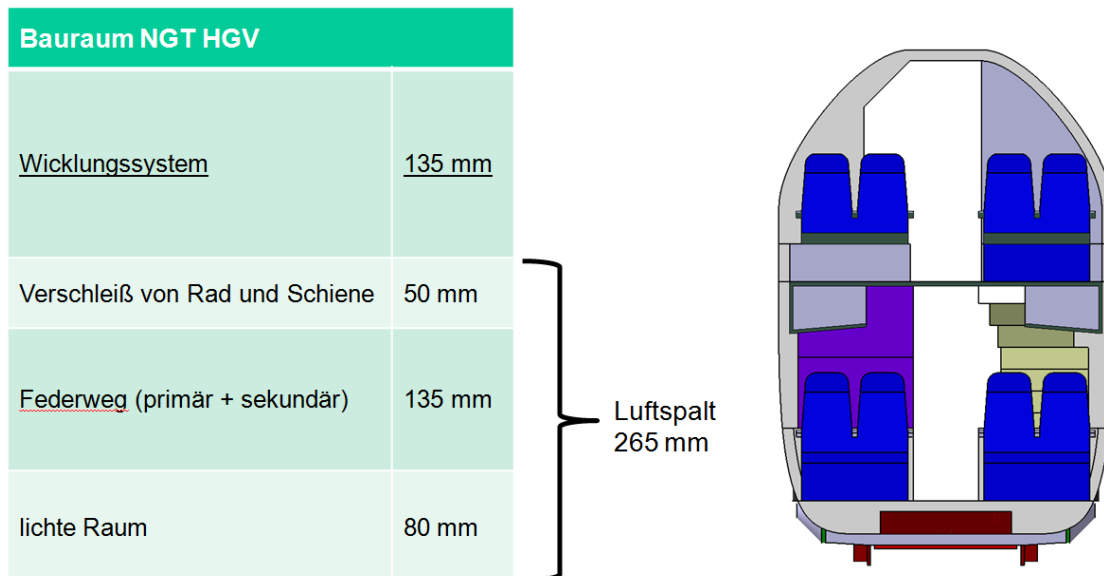


Abb. 4.2: Bauraum im Unterflurbereich des NGT

Bei Einbezug des Federwegs und des maximal zulässigen Radverschleißes ergibt sich unter Beachtung des Lichtraumprofils ein maximaler Luftspalt von 265 mm. Die Auswirkungen der Luftspaltschwankungen durch Radverschleiß und Federweg müssen im Zuge der Systemauslegung beachtet werden.

4.4 Positionstoleranz des Energieübertragungssystem

Auf Grund der Wirkungsgradverluste bei einem nicht vollständig überlappenden Übertragungssystem wurden die geometrischen Gegenebenheiten in der Fahrt im Gleisbogen untersucht. Dazu wird die Höchstgeschwindigkeit bei verschiedenen Gleisbogenhalbmessern berechnet. Diese ist abhängig von der maximal geduldeten Querbeschleunigung sowie der Überhöhung des Gleisbogens.

Der minimale Gleisbogenhalbmesser kann 150 m betragen. Ausgehend von einer maximalen Überhöhung $u = 200$ mm und einem Überhöhungsfehlbetrag $u_f = 150$ mm, was

einer Querbewegung von 1 m/s^2 entspricht, wird eine maximale Geschwindigkeit von $v_{\text{max}} = 66 \text{ km/h}$ errechnet.

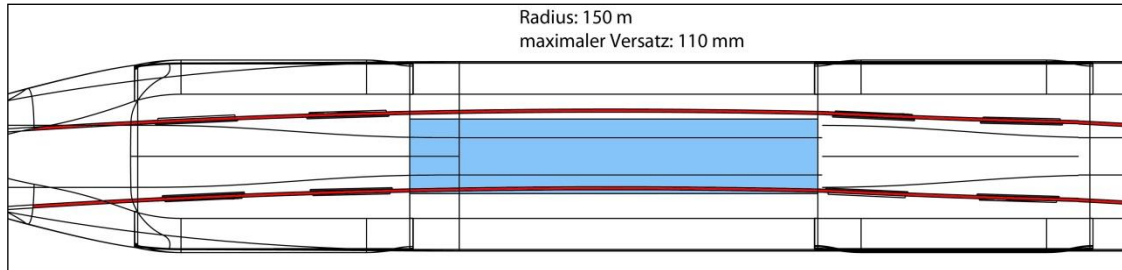


Abb. 4.3: Versatz der Spulen im Gleisbogen bei $R = 150 \text{ m}$

Der Versatz bei der Fahrt im Gleisbogen von $R = 150 \text{ m}$ ist in Abb. 4.3 dargestellt. In diesem Fall beläuft sich der mittlere Versatz des Wicklungspaketes im Steuerkopf auf $92,5 \text{ mm}$, was bei einer Breite des Wicklungssystems von 1200 mm einem Flächenverlust von $7,7 \%$ entspricht. Das positionstolerante Übertragungssystem hat gezeigt, dass eine induktive Übertragung bei geringen Positionsabweichungen problemlos realisiert werden kann.

Bei einem Gleisbogenhalbmesser von $R = 1000 \text{ m}$ beträgt der mittlere Versatz nur noch $1,25 \%$, die Höchstgeschwindigkeit beträgt in diesem Fall 172 km/h , wofür ein Bruchteil der maximal übertragbaren Leistung ausreicht.

Moderne Schnellfahrstrecken haben in der Regel Gleisbogenhalbmesser von mehreren tausend Metern, womit die zu erwartenden Leistungseinbußen extrem klein sind.

4.5 Identifikation zu erwartender Risikobereiche

Potenzielle Risiken im Sinne einer möglichen Beeinträchtigung oder Gefährdung von Personen müssen untersucht und ggf. durch geeignete konstruktive oder organisatorische Maßnahmen vermieden oder auf ein unkritisches Maß verringert werden.

Potenzielle Risiken bei dem Betrieb einer fahrdrahtlosen Energieübertragung für Schienenfahrzeuge können im Wesentlichen vier verschiedenen Risikobereichen zugeordnet werden. Diese vier Risikobereiche sind:

1. Die EMV gegenüber Personen, insbesondere mögliche Beeinträchtigungen von Personen durch magnetische Wechselfelder
2. Der Schutz gegen elektrischen Schlag, insbesondere im Falle von Beschädigungen des Systems

3. Der Brandschutz im Allgemeinen, insbesondere mögliche Risiken durch verwendete brennbare Materialien
4. Mögliche Risiken im Zusammenwirken von Zugsicherungssystemen und der fahrdrahtlosen Energieübertragung, insbesondere EMV gegenüber anderen technischen Einrichtungen

Für die genannten Risikobereiche wurden die bestehenden Risiken abgeschätzt und Lösungsansätze aufgezeigt.

4.6 Risikobereich der EMV gegenüber Personen

Von Einrichtungen für die kontaktlose induktive Energieübertragung können grundsätzlich EMV-Risiken gegenüber Personen im Sinne einer Überschreitung gültiger Grenz- oder Referenzwerte ausgehen. Eine unmittelbare Gefährdung der Gesundheit gesunder Personen im Sinne einer Unfallgefahr besteht jedoch nicht. Relevant sind vor allem die magnetischen Wechselfelder, denn mögliche Beeinträchtigungen durch elektrische Wechselfelder sind nicht zu erwarten. Grundlage für die Grenz- und Referenzwerte für die magnetische Flussdichte von magnetischen Wechselfeldern sind die folgenden Effekte:

1. Nervenreizungen durch in das Gewebe induzierte Wechselströme für niederfrequente magnetische Wechselfelder bis 150 kHz
2. Erwärmungen des Gewebes bei Frequenzen über 150 kHz

Entsprechend sind die Referenzwerte in direkt messbaren physikalischen Größen angegeben. Für die magnetische Flussdichte sind die Referenzwert in Tesla bzw. Vs/m² maßgebend. Den Verlauf der jeweiligen Referenzwerte über der Frequenz zeigt die folgende Abbildung.

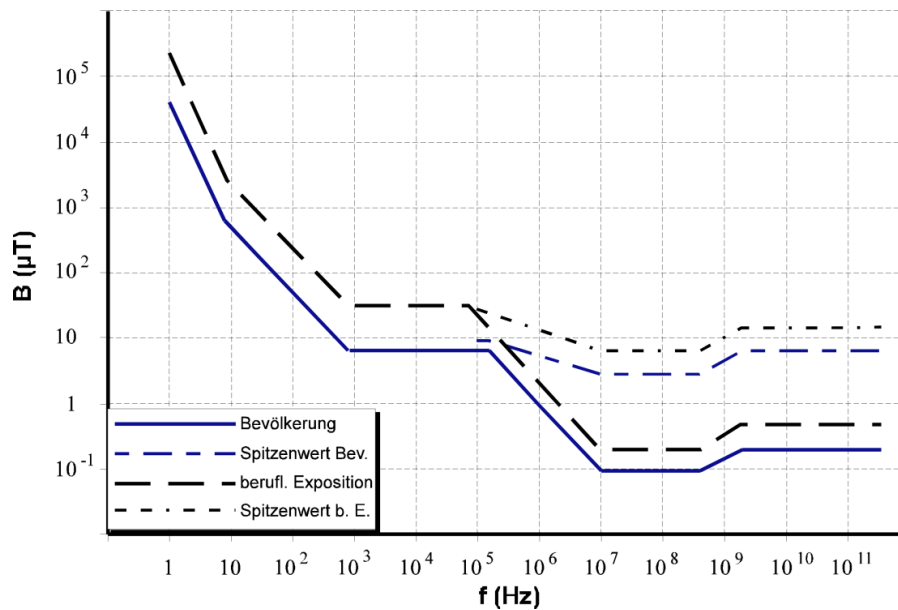


Abb. 4.4: Referenzwerte für Expositionen durch zeitlich veränderliche Magnetfelder [1]

In dem technisch sinnvollen Betriebsbereich von 20 kHz bis 100 kHz sind somit magnetische Flussdichten bis rund 6 µT zulässig.

Elektrische und magnetische Wechselfelder gehen grundsätzlich nur von aktiv betriebenen Teilen der fahrdradtlosen Energieversorgung aus. Allein aus technischen Gründen ist eine starke Segmentierung der fahrdradtlosen Energieversorgung notwendig. Es ist naheliegend, dieses Konstruktionsmerkmal auch zur Reduktion der Belastung der Umgebung mit elektrischen und magnetischen Wechselfeldern zu verwenden. Mit einer entsprechenden Abstimmung von Segmentgrößen und der Betriebsstrategie ist es grundsätzlich möglich, dass nur vollständig vom Schienenfahrzeug überdeckte Segmente für die Energieübertragung angeschaltet werden. Eine solche Auslegung der fahrdradtlosen Energieversorgung hat hinsichtlich möglicher Beeinträchtigungen von Personen durch niederfrequente Wechselfelder wesentliche Vorteile und wird daher in den folgenden Betrachtungen vorausgesetzt.

Die durch die induktive Energieübertragung erzeugten elektrischen Feldstärken liegen in der Größenordnung von weniger als 10 kV/m und damit bereits ohne jegliche Schirmung in 1 m Abstand schlimmstenfalls einer Referenzwertüberschreitung um Faktor 10. Eine Schirmung ist jedoch durch die geerdeten Gleisanlagen und die damit ebenso geerdete tragende Struktur des Schienenfahrzeugs vorhanden. Eine unzureichende Wirkung der Schirmung liegt zwischen Schienenoberkante und Wagenkasten vor. Dieser Bereich ist aber entweder nicht allgemein zugänglich oder er kann leicht abgeschirmt werden, z.B. mit geerdetem Aluminiumblech im Bereich des Bahnsteigs. Die Insassen des Schienen-

fahrzeugs sind durch dessen geschlossenen Aufbau bereits vollständig abgeschirmt. Risiken durch elektrische Wechselfelder bestehen daher nicht oder sie können, z.B. durch die abschirmende Wirkung des Schienenfahrzeugs selbst oder ggf. durch zusätzliche Schirmungen, wie z.B. im Bereich der Bahnsteige, vollständig vermieden werden.

Die Flussdichte der magnetischen Felder fällt mit zunehmender Entfernung stark ab. Ein Beispiel für einen solchen Verlauf zeigt Abb. 4.5. Dem Verlauf der Flussdichte in der Abbildung liegt eine Wicklungsanordnung im Gleisbett zugrunde, welche 1 m breit ist, und am Rand noch eine Flussdichte von etwas über 10 mT aufweist. Eine Flussdichte von 10 mT ist eine Abschätzung mit hoher Sicherheit, denn realistisch sind eher kleinere Werte.

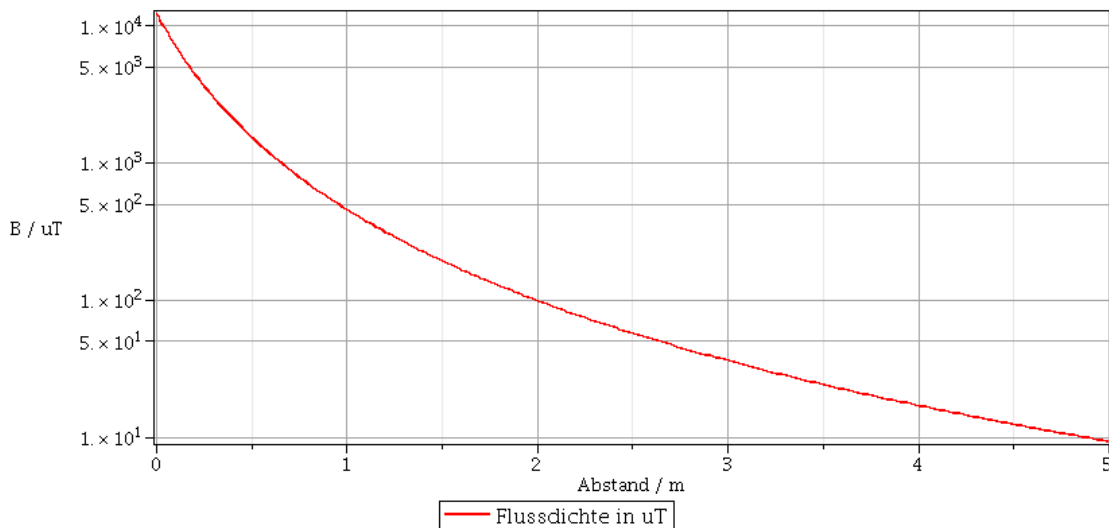


Abb. 4.5: Magnetische Flussdichte in Abhängigkeit vom Abstand zum Rand eines 1 m breiten Wicklungssystems

Die Abb. 4.5 zeigt, dass ohne jede Schirmung bereits ab etwa 2,5 m Abstand zum Wicklungssystem der Referenzwert unterschritten wird. Dies entspricht ca. 3 m von der Gleisbettmitte aus gemessen. Auf freier Strecke können Referenzwertüberschreitungen folglich allein durch den begrenzten Zugang zum Gleisfeld vermieden werden. In Bereichen der Bahnsteige oder Bahnübergänge, in denen Referenzwertüberschreitungen nicht allein durch ausreichenden Abstand vermieden werden können, sind weitere Schirmungen nötig und auch technisch möglich. Eine solche Schirmung kann im Bereich der Bahnsteige angebracht werden und Personen auf dem Bahnsteig zuverlässig gegen die magnetischen Wechselfelder schirmen. Die Insassen des Schienenfahrzeuges können durch Bleche im Unterboden abgeschirmt werden. Risiken durch magnetische Wechselfelder können somit durch zusätzliche Schirmungen vermieden werden.

4.6.1 Schutz gegen den elektrischen Schlag

Den Schutz gegen den elektrischen Schlag betreffend muss zwischen normalem Betrieb und Fehlerfällen unterschieden werden. Grundsätzlich unterscheiden sich die Risiken bei der fahrdrahtlosen Energieversorgung nicht von denen bestehender Bahntechnik, wobei die bestehende 15 kV Oberleitung gefährlicher ist.

Im normalen Betrieb stellt die Umhüllung einen Schutz gegen den elektrischen Schlag her. Hierfür muss die Umhüllung bzw. das Gehäuse isolierend und ausreichend dick sowie beständig ausgeführt werden.

Der Schutz gegen den elektrischen Schlag kann im Falle eines Fehlers bzw. Unfalls immer durch ein Abschalten hergestellt werden. Weder Leistungselektronik noch Wicklungssystem enthalten sehr große Energiespeicher und sind somit keine potenzielle Gefahr mehr, sobald sie stromlos geschaltet werden. Im Fehlerfall bzw. im Falle eines Unfalls ist die Sicherheit von der Widerstandsfähigkeit der Umhüllung und der sicheren Erkennung des Fehlers mit nachfolgender Abschaltung abhängig.

4.6.2 Brandschutz

Von den Komponenten der fahrdrahtlosen Energieversorgung gehen grundsätzlich keine besonderen Brandgefahren aus. Die möglichen Brandgefahren können mit denen bei bestehenden Wechselrichtern und elektrischen Asynchron- oder Synchronmaschinen verglichen werden.

Die in den Komponenten der fahrdrahtlosen Energieversorgung verwendeten Materialien sind vergleichbar brennbar wie andere Komponenten der Leistungselektronik oder andere große Kunststoffteile auch. Es besteht keine Notwendigkeit für die Verwendung besonders brennbarer Bauteile oder Mittel wie z.B. brennbare Trafoöle, Ölkondensatoren oder dergleichen. Besondere Einschränkung für die Auswahl der Kunststoffe oder ihrer Beimengungen ergeben sich durch die Verwendung an und in Komponenten der kontaktlosen Energieübertragung nicht.

4.6.3 Mögliche Risiken im Zusammenwirken von Zugsicherungssystemen und der fahrdrahtlosen Energieübertragung

Es ist davon auszugehen, dass die im Gleisbett untergebrachten Komponenten der bestehenden Zugsicherungssysteme soweit gestört werden, dass ein zeitgleicher Betrieb im selben Streckenabschnitt nicht möglich ist. Die magnetischen Wechselfelder der fahr-

drahtlosen Energieübertragung sind um ein vielfaches höher als Feldstärken, die üblicherweise für den Nachweis der Störfestigkeit herangezogen werden.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass ohne Vorkehrungen einige der bestehenden Komponenten von Zugsicherungssystemen im Gleisbett durch die starken magnetischen Wechselfelder beschädigt werden könnten. Ein sicherer Betrieb und auch eine Kompatibilität zu bestehende Zugsicherungssysteme sind bei den entsprechenden Gegenmaßnahmen dennoch technisch machbar.

Es ist in jedem Fall möglich, die bestehenden Komponenten durch Schirmungen und Schutzschaltungen soweit zu härten, dass sie zumindest nicht durch die magnetischen Wechselfelder beschädigt werden. Ein Streckenabschnitt mit fahrdrahtloser Energieversorgung kann durch solche gehärteten Komponenten zu bestehenden Schienenfahrzeugen kompatibel gehalten werden. Gegebenenfalls ist jedoch der zeitgleiche Betrieb von fahrdrahtlos versorgten Schienenfahrzeugen und Schienenfahrzeugen, die auf die alten bestehenden Zugsicherungssysteme angewiesen sind, innerhalb desselben Streckenabschnitts nicht möglich. Alternativ besteht die Möglichkeit, die Funktion des Zugsicherungssystems als festen Bestandteil der fahrdrahtlosen Energieversorgung zu integrieren. Grundsätzlich hat ein System für die fahrdrahtlose Energieversorgung eine sehr genaue Kenntnis über Position und Geschwindigkeit der fahrdrahtlos versorgten Schienenfahrzeuge.

Die heute verbreiteten Gleisfreimeldeeinrichtungen zur Sicherung von Gleisabschnitten sind bei einem gemeinsamen Betrieb mit der fahrdrahtlosen Energieübertragung in gleicherweise von Störungen durch magnetische Wechselfelder betroffen wie die Komponenten bestehender Zugsicherungssysteme im Gleisbett.

Insbesondere bei den bestehenden Achszählwerken, welche ein Überrollen der Räder anhand der Beeinflussung von magnetischen Wechselfeldern detektieren, ist mit Störungen zu rechnen. Grundsätzlich sind derartige Achszählwerke jedoch vergleichsweise unempfindlich gegen Störungen durch elektrische oder magnetische Wechselfelder [2]. Die Betriebsfrequenzen einer fahrdrahtlosen Energieübertragung liegen jedoch nahe dem Frequenzbereich der magnetischen Wechselfelder üblicher Achszählwerke und zumindest im Gleisbett könnten größere Feldstärken auftreten, als die, die für den Nachweis der Störfestigkeit herangezogen werden. Abhängig vom exakten Funktionsprinzip der betroffenen Achszählwerke ist daher mit einer Störung ihrer Funktion zu rechnen. Daher ist eine zeitgleiche Verwendung der konventionellen Achszählwerke mit der aktiven Nutzung der fahrdrahtlosen Energieübertragung voraussichtlich nicht möglich.

Es ist weiter grundsätzlich möglich, die Komponenten der fahrdrahtlosen Energieübertragung selbst als Sensor für die Gleisfreimeldeeinrichtungen zu nutzen. Eine entsprechende

Ansteuerung und Sensorik vorausgesetzt kann ein Segment der Primärseite mit ungefährlich schwachen Anregungen prüfen, ob sich ein Schienenfahrzeug oder ein einzelner Wagen mit passender Sekundärseite über ihm befindet, da sich die Dämpfung und Resonanzfrequenz ändern.

Eine solche in die fahrdrahtlose Energieübertragung integrierte Funktionalität kann einzelne Wagen erkennen und deren Durchfahrt zählen, auch wenn das betreffende Schienenfahrzeug vollständig abgeschaltet ist und keine Energie aus der fahrdrahtlosen Energieübertragung abnimmt.

Daher ist eine Ausrüstung von Streckenabschnitten mit fahrdrahtloser Energieübertragung und Gleisfreimeldeeinrichtungen möglich. Schienenverkehr, der zeitgleich im selben Streckenabschnitt sowohl auf konventionelle Achszählwerke als auch auf fahrdrahtlose Energieversorgung angewiesen ist, wird voraussichtlich nur eingeschränkt möglich sein.

4.7 Quellen

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation, *ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*, 1998.
- [2] Wolfgang Fenner, Peter Naumann und Jochen Trinckauf, *Bahnsicherungstechnik: Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr*. Erlangen, Publicis Publishing, 2004.

5 Systementwurf

von Prof. Dipl.-Ing. Dieter Bögle, Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour, Dipl.-Ing. Philipp Seitz, Dipl.-Ing. Simon Mayer und Dipl.-Ing. (FH) Peter Müller und cand. fnt Sebastian Skorsetz, cand. fnt. Özkan Özmen

Im Folgenden wird der erarbeitete Systementwurf zusammenfassend dargestellt. Der Systementwurf erfolgt exemplarisch für das am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt konzipierte Zugkonzept „Next Generation Train“.

Die einzelnen Systemkomponenten können in strecken- und fahrzeugseitige Komponenten wie folgt aufgeteilt werden (vgl. Abb. 5.1).









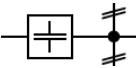





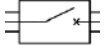
Strecke:	Fahrzeug:
Schirmung (Bahnsteig) 	Zwischenkreis (fahrzeugseitig) 
Wicklungssystem (streckenseitig) 	Absicherung/Trenner 
Umrichter (streckenseitig, Leistungselektronik) 	Umrichter (fahrzeugseitig) 
Absicherung/Trenner 	Ferrit-/Blechschirmung 
DC-Schiene (Zwischenkreis, streckenseitig) 	Wicklungssystem (fahrzeugseitig) 
Absicherung/Trenner 	Bindleistungskompensation 
Umrichter (Einspeisepunkt) 	Sekundärspule 
Leistungsschalter 	

Abb. 5.1: Aufteilung der Systemkomponenten

Die nachfolgende Darstellung liefert einen schematischen Überblick über das auf Basis der bisherigen Ergebnisse erstellte Konzept des induktiven Übertragungssystems für eine Anwendung im Vollbahnverkehr.

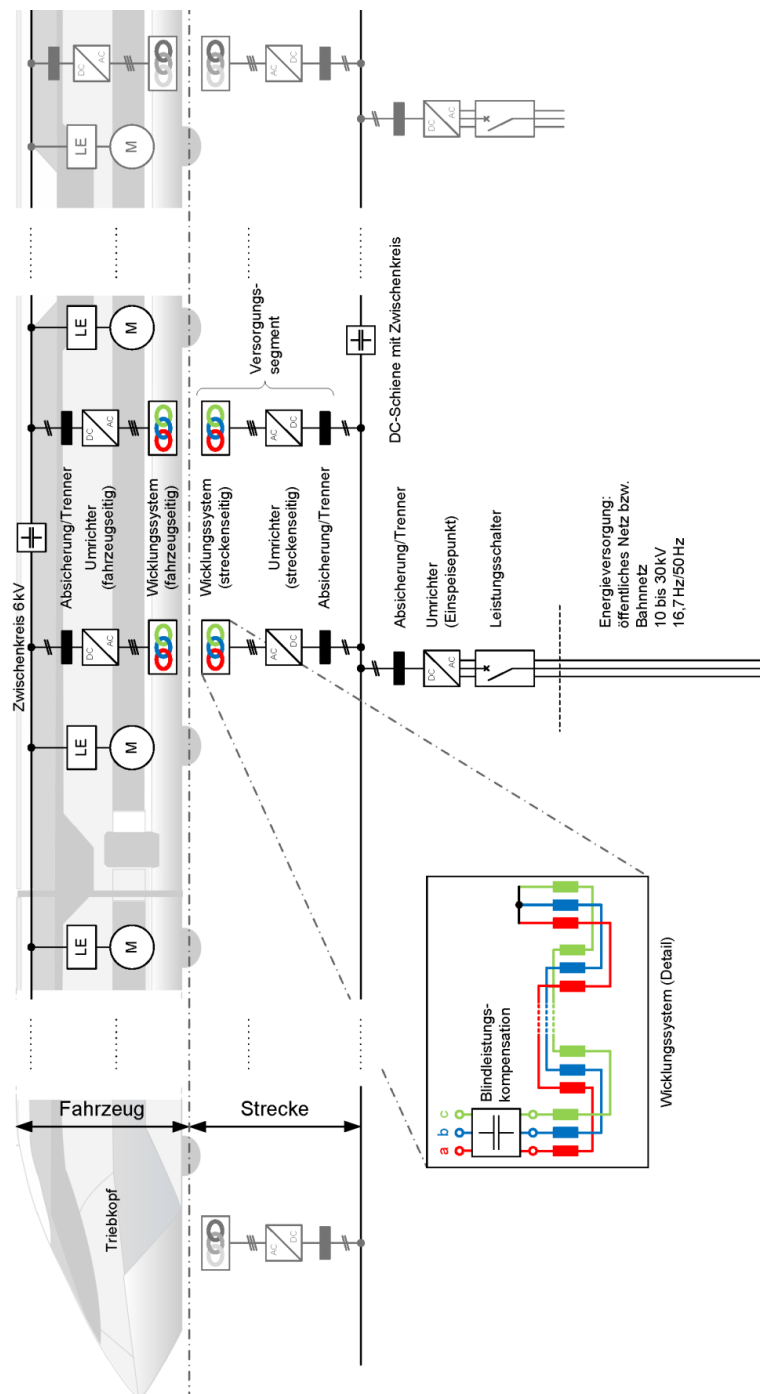


Abb. 5.2: Systementwurf für ein induktives Energieübertragungssystem

Im Folgenden werden die Kernkomponenten des Systems, nach Strecke und Fahrzeug getrennt, aufgelistet und beschrieben. Das bestehende Gesamtkonzept aus den beschriebenen Kernkomponenten wird im Folgenden durch weitere Komponenten, die zur Funktionsdarstellung, der Sicherheit und der Zuverlässigkeit der induktiven Energieübertragung notwendig sind, ergänzt.

5.1 Streckenseitige Komponenten

Die streckenseitigen Kernkomponenten sind:

- Leistungsschalter
- AC/DC Umrichter (Einspeisepunkt)
- Absicherung/Trenner
- DC-Schiene – Strecken-Zwischenkreis
- Absicherung/Trenner
- DC/AC Umrichter (Streckenseitig)
- Wicklungssystem inkl. Blindleistungskompensation (streckenseitig)

Die streckenseitigen Komponenten sind grundsätzlich für die Integration in eine feste Fahrbahn geplant. Beim Einsatz der Komponenten in einer festen Fahrbahn lassen sich montage- bzw. aufbauseitig größere Kostenvorteile darstellen, da die einzelnen Streckensegmente schon in einem hohen Grad vormontiert an die Strecke angeliefert werden können.

Der Leistungsschalter stellt eine Komponente zur aktiven Sicherung der Strecke dar. Mit ihm kann gezielt ein kompletter Versorgungsabschnitt unter Last oder auch im Fehlerfall vom öffentlichen- bzw. dem Bahnnetz getrennt werden. Der Umrichter am Einspeisepunkt der Energieversorgung der Strecke richtet die Wechselspannung des Versorgungsnetzes gleich. Ein induktives Energieübertragungssystem ist dabei flexibel an das Versorgungsnetz anpassbar. Bei einem Anschluss an das öffentliche Energieversorgungssystem wäre eine Anbindung an das dreiphasige Wechselspannungsnetz auf Mittelspannungsebene mit 10 bis 30 kV denkbar. Ebenso kann ein Anschluss an bahneigene Energieverteilungsnetze mit Sonderfrequenz 16,7 Hz erfolgen. Je nach Spannungshöhe des angeschlossenen Versorgungsnetzes muss die Spannung vor der Gleichrichtung zunächst auf eine geringere Spannungshöhe transformiert werden. Die gleichgerichtete Spannung hat

eine Höhe von < 10 kV. Somit wird der streckenseitige Zwischenkreis mit einer Gleichspannung versorgt. Jeder Versorgungsabschnitt hat einen durchgehenden Zwischenkreis mit einigen Kilometern Länge und wird je nach Leistungsbedarf mit mindestens einem Umrichter versehen. Als Schnittstelle zwischen den Umrichtern und dem DC-Zwischenkreis dienen Trenner als zusätzliche Sicherungselemente, die Umrichter und Zwischenkreis selektiv verbinden und trennen können. Der streckenseitige Zwischenkreis wird als Aluminium- oder Kupfervollprofil mit einem entsprechenden Querschnitt ausgeführt und in die feste Fahrbahn integriert verlegt.

Der an den Zwischenkreis angeschlossene streckenseitige Wechselrichter wird voraussichtlich in IGBT-Technik (Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode) ausgeführt. Dazu werden sechs IGBTs zu einem Wechselrichtermodul verschaltet, das jeweils ein Primärspulensegment versorgt. Die momentan verfügbaren IGBT-Module schalten maximal 2 MW, was zu einer maximalen Segmentlänge der Primärspule von ca. 20 m führt. Grundsätzlich sind auf der Strecke auch größere Segmentlängen denkbar, diese bedingen jedoch leistungsfähigere Halbleiter, die technologisch momentan noch nicht verfügbar sind. Die Zwischenkreisspannung wird voraussichtlich nicht größer als 2 kV gewählt, denn Leistungshalbleiter mit einer höheren Spannungsfestigkeit erreichen nur deutlich niedrigere Schaltgeschwindigkeiten. Unter der Voraussetzung einer technologischen Weiterentwicklung der IGBTs sind zukünftig gegebenenfalls höhere Zwischenkreisspannungen möglich. Das primärseitige Wicklungssystem wird als Hochfrequenzlitze dreiphasig ausgeführt, der Leitungsquerschnitt ist hierbei noch offen und bestimmt sich in Abhängigkeit von Design und Windungszahlen des Wicklungssystems. Die Segmentlänge wird wie erwähnt aufgrund der Restriktionen durch die Halbleiter der Leistungselektronik auf rund 20 m limitiert.

Der Bahnsteigbereich auf Bahnhöfen muss bzgl. der Abstrahlung der primärseitigen Wicklungssysteme separat abgeschirmt werden, da hier Personen bei aktiviertem induktivem Energieübertragungssystem direkt in den Abstrahlbereich gelangen können. Dies kann durch den Einsatz eines passiven Elements, zum Beispiel einem Aluminiumblechs (ggf. gelocht) im gesamten Verlauf des Bahnsteigs, erreicht werden.

5.2 Fahrzeugseitige Komponenten

Die fahrzeugseitigen Kernkomponenten sind:

- Wicklungssystem inkl. Blindleistungskompensation (fahrzeugseitig)
- Abschirmung – Ferrit- und Blechabschirmung
- AC/DC Umrichter (fahrzeugseitig)
- Absicherung/Trenner
- DC-Leitung – Fahrzeug-Zwischenkreis

Die fahrzeugseitigen Komponenten werden im Unterflurbereich in die Fahrzeuge integriert. Sämtliche Untersuchungen zur Fahrzeugintegration werden exemplarisch für das Zugkonzept „Next Generation Train“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt durchgeführt.

Das fahrzeugseitige – und damit sekundärseitige – Wicklungssystem wird ebenfalls als dreiphasige Hochfrequenzlitze ausgeführt. Der Leitungsquerschnitt kann derzeit noch nicht definiert werden. Dieser ist abhängig vom Design und insbesondere von den Windungszahlen des Wicklungssystems. Die Segmentlänge wird entsprechend der unter den Wagen befindlichen Fläche angepasst. Teil des Wicklungssystems ist die benötigte Blindleistungskompensation. Das Modul aus Wicklungssystem und Blindleistungskompensation ist über einen Trenner an den fahrzeugseitigen Umrichter angeschlossen. Pro Wicklungssystem wird fahrzeugseitig ein Umrichter eingesetzt. Dieser Umrichter richtet im normalen Fahrbetrieb die Wechselspannung der induktiven Energieübertragung gleich und stellt die Verbindung zum Zwischenkreis im Fahrzeug her. Im Rückspeisebetrieb fungiert der Umrichter als Wechselrichter für das fahrzeugseitige Wicklungssystem.

Der fahrzeugseitige Zwischenkreis wird mit einem entsprechenden Querschnitt ausgeführt, analog zu bestehenden Fahrzeugzwischenkreisen in Zügen mit Oberleitungssystem. Die Spannung des Fahrzeugzwischenkreises beträgt voraussichtlich 6 kV. Der Zwischenkreis erstreckt sich über die gesamte Länge des Zuges. Werden einzelne Wagen getrennt bzw. treten Störungen auf, so können den Wagenzahlen entsprechend beliebig viele autark funktionierende Zwischenkreise gebildet werden, da jeder Wagen für sich über alle notwendigen Systemkomponenten verfügt und somit autark operieren kann.

Die Ferrit- und Blechschirmungen sind passive Elemente, die im Fahrzeugboden oberhalb des Wicklungssystems integriert sind. Die Ferritschirmung dient hierbei zur Flussführung des magnetischen Feldes und wird mit einem geeigneten Abstand über dem Sekun-

därwicklungssystem angebracht. Die Ferritschirmung kann hierbei in eine ggfs. tragende Struktur integriert werden und kann aus einzelnen kleinen Ferritplatten bestehen, die zu einem Schirm zusammengelegt werden. Geringe Spalte zwischen den Platten sind hierbei tolerierbar. Die Blechschirmung wird oberhalb der Ferritschirmung angebracht, ggfs. direkt unter dem Wageninnenraum. Sie dient als Abschirmung des Passagierbereichs vor dem magnetischen Feld.

5.3 Weitere Komponenten

Im Folgenden werden weitere Komponenten aufgeführt, die ebenso an der Funktionserfüllung beteiligt sind. Hierbei handelt es sich weitgehend um Leitungen sowie Kontaktierungen. Da im streckenseitigen System hohe Ströme fließen und auch Spannungen anliegen, sollten diese ebenso berücksichtigt werden um hinsichtlich potentieller Risiken im Betrieb reflektieren zu können. Diese Leitungen und Kontaktierungen müssen besonders ausgeführt werden um den Anforderungen des Bahnbetriebs zu genügen.

5.3.1 Weitere streckenseitige Komponenten

In Abb. 5.3 ist ein Schnitt durch das Gleisbett dargestellt. Die relevanten Anlagen der induktiven Energieversorgung an der Strecke sind hier schematisch eingebracht.

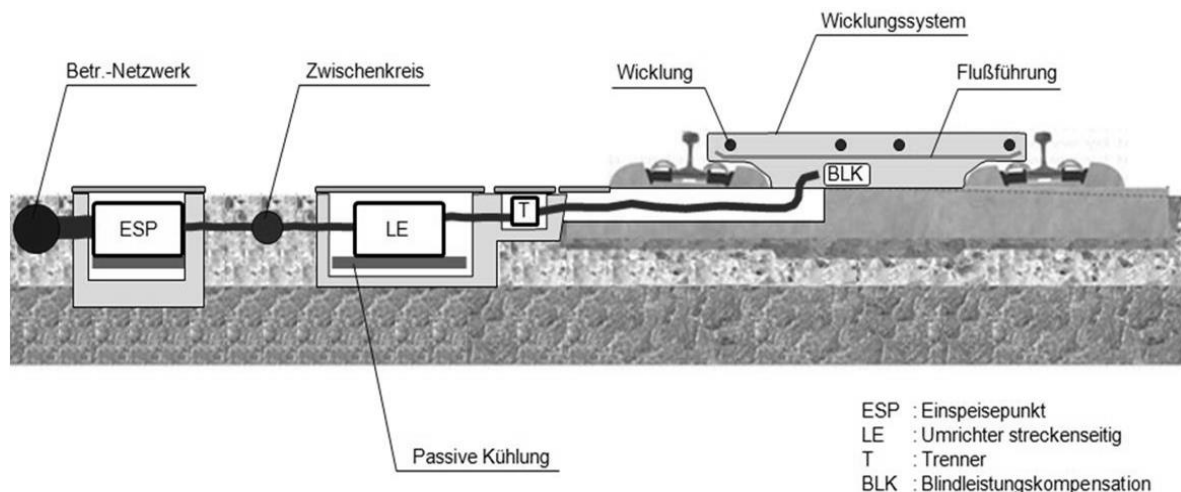


Abb. 5.3: Anlagen der Induktiven Energieversorgung an der Strecke

Die Anordnung stellt ein Konzept dar, Anhand deren die Komponenten an der Strecke aufgebaut werden können. In dieser schematischen Darstellung sind ebenso die energie-führenden Leitungen und ihre Kontaktierungen zwischen den einzelnen Komponenten dargestellt. Unter Kontaktierung werden folgende Verbindungstechniken verstanden: Steck-, Schraub-, Löt- und Schweißverbindungen. Im Folgenden werden diese und die notwendigen Kontaktierungen für das NGT-System aufgeführt. Die Kontaktierungen im Versorgungsmodul sind als Schweißverbindung auszuführen, wohingegen die Kontaktierungen der Wicklungssystemmodule (Strecke und Fahrzeug) als Schraubverbindung auszuführen sind.

1. Energieversorgung der Strecke
2. Versorgungsmodul
 - a. HV-Leitung vom öffentlichen Netzverteiler
 - b. Verschweißung der HV-Leitung an Einspeisepunktmodul (*ESP bestehend aus Leistungsschalter, AC/DC Umrichter und Trenner*)
 - i. Interne Kontaktierung des Leistungsschalters an HV-Leitung zum AC/DC Umrichter
 - ii. HV-Leitung zum AC/DC Umrichter
 - iii. Kontaktierung der HV-Leitung an AC/DC Umrichter
 - iv. Interne Kontaktierung des AC/DC Umrichter an HV-Leitung zum Trenner
 - v. HV-Leitung zum Trenner
 - vi. Kontaktierung der HV-Leitung an Trenner
 - c. Verschweißung des Einspeisepunktmoduls an HV-Leitung zur DC-Schiene (Zwischenkreis)
 - d. HV-Leitung zur DC-Schiene (Zwischenkreis)
 - e. Verschweißung der HV-Leitung an DC-Schiene (Zwischenkreis)
3. Wicklungssystemmodule (Streckenzwischenkreis)
 - a. Verschraubung des Streckenzwischenkreises an HV-Leitung zu Leistungselektronik des Wicklungssystems
 - b. HV-Leitung zur Leistungselektronik
 - c. Verschraubung der HV-Leitung an Leistungselektronik
 - d. Verschraubung der Leistungselektronik an HV-Leitung zum Trenner (vor Wicklungssystem)
 - e. HV-Leitung zum Trenner
 - f. Verschraubung der HV-Leitung an Trenner

- g. Verschraubung des Trenner an HV-Leitung zum Wicklungssystem
- h. HV-Leitung zum Wicklungssystem
- i. Verschraubung der HV-Leitung an Wicklungssystem

Neben der eigentlichen Systemtechnik zur induktiven Energieübertragung liegt hierbei die Herausforderung in folgenden Punkten:

- Herstellen einer sicheren Kontaktierung
Kontaktierungsstandards und Vorgaben für Hochvoltverbindungen müssen eingehalten werden.
- Wenn möglich herstellen einer lösbaren Verbindung
Im Fall der Wartung, Instandhaltung und auch bei Störungen müssen die Systemkomponenten und ggfs. auch Leitungen ersetzbar sein. Somit bieten sich wiederlösbare Verbindungen an.

5.3.2 Weitere fahrzeugseitige Komponenten

Fahrzeugseitig stellt sich prinzipiell eine Spiegelung der streckenseitigen Kernkomponenten bis zum Streckenzwischenkreis dar, siehe Kapitel 5.2. Die Kernkomponenten sind jeweils durch einen Trenner getrennt um diese im Störfall vom restlichen System zu trennen und diese in einen Failsafe-Zustand zu versetzen, um weitere Systemfehler zu vermeiden. Im Folgenden werden die notwendigen Kontaktierungen und Leitungen hierzu aufgeführt.

Wicklungssystemmodul (Fahrzeugzwischenkreis)

- a. Verschraubung der HV-Leitung an Wicklungssystem
- b. HV-Leitung vom Wicklungssystem zum Trenner
- c. Verschraubung der HV-Leitung an Trenner
- d. Verschraubung des Trenners an HV-Leitung zur Leistungselektronik
- e. HV-Leitung vom Trenner zur Leistungselektronik
- f. Verschraubung der HV-Leitung an Leistungselektronik
- g. Verschraubung der Leistungselektronik an HV-Leitung zum Trenner
- h. HV-Leitung zum Trenner
- i. Verschraubung der HV-Leitung an Trenner
- j. Verschraubung des Trenners an HV-Leitung zum Fahrzeugzwischenkreis
- k. HV-Leitung vom Trenner zum Fahrzeugzwischenkreis
- l. Verschraubung der HV-Leitung an Fahrzeugzwischenkreis

Wie bei den Kontaktierungen und Leitungen in der Strecke, sind die Herausforderungen hier dieselben. Zusätzlich müssen die aufgeführten Leitungen und Kontaktierungen auch die Vorgaben zur elektromagnetischen Verträglichkeit einhalten. Zum einen zum Schutz der im Fahrzeug eingesetzten Elektronik und zum anderen zum Personenschutz.

5.4 Konzeption der Wicklungselemente

5.4.1 Anforderungen an die Konstruktion der Wicklungselemente

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen an die Konstruktion der Wicklungselemente behandelt.

Die Hauptanforderung an die Konstruktion ist dabei, die Funktion des Wicklungselements zu ermöglichen, bzw. die Funktion nicht zu beeinträchtigen. Dafür darf an der Unterseite, bzw. zwischen dem Primärwicklungssystem und der Sekundärspule nur magnetisch neutrale Werkstoffe, wie z.B. Kunststoffe, verbaut werden.

Des Weiteren muss die Konstruktion die Abschirmung des magnetischen Feldes ermöglichen. Dabei kann die Abschirmung auch in die Konstruktion des Wicklungselements integriert sein.

Weitere Anforderungen sind

- die ausreichende Stabilität der Elemente auch bei hohen Geschwindigkeiten, welche große Krafteinleitungen auf Grund der Aerodynamik sowie starke Vibrationen zur Folge haben können.
- konsequenter Leichtbau, wie er in allen Bereichen des NGTs betrieben wird.
- eine ausreichende Befestigung um die auftretenden Kräfte zu übertragen und einen Wechsel zu ermöglichen

5.4.2 Komponenten des Wicklungssystems

Kernkomponente des Wicklungssystems ist die Spule, welche aus Kupfer besteht und aus einzeln isolierten Litzen aufgebaut ist. Die Blindleistungskompensation besteht aus üblichen Kondensatoren und ist möglichst im Wicklungssystem untergebracht, da die Spule mehrmals durch die Kondensatoren geleitet werden sollte. Weitere Komponenten sind die Anschlüsse, dabei ist die Zuführung zu den Kondensatoren sowie der Leiter zu den Wechselrichtern zu berücksichtigen.

Auch der Träger dieser Einrichtungen, der gleichzeitig als Gehäuse ausgeführt werden kann, sowie die Befestigungsmöglichkeiten der Wicklungssysteme sind zu berücksichtigende Elemente.

5.4.3 Aufbau

Bei einem funktionsgerechten Aufbau gibt es einige zu beachtende Merkmale. Oberste Priorität hat dabei die Spule. Sie sollte so tief wie möglich im Wicklungssystem eingebaut sein, um den effektiven Abstand zwischen Primär- und Sekundärspule nicht unnötig zu verringern.

Des Weiteren ist beim Aufbau zu beachten, dass zwischen der feldführenden Ferritschicht und der zugseitigen Abschirmung ein Abstand gehalten wird.

Als Konstruktion bietet sich entweder ein Kunststoffgehäuse oder eine Sandwichkonstruktion an.

Ein Gehäuse hat den Vorteil, dass es geöffnet werden kann. Da es sich um Gusskonstruktion handelt, sind auch die Befestigungsmöglichkeiten relativ leicht zu integrieren.

Bei einer Sandwichkonstruktion sind bei geringerem Gewicht bessere Festigkeitswerte zu erzielen. Auch lassen sich Materialien mit verschiedenen Eigenschaften vereinen. Die Befestigung von Sandwichplatten ist unter Umständen jedoch aufwendiger. Auf Grund der leichteren Bauweise soll eine Sandwichkonstruktion erarbeitet werden.

5.4.4 Sandwichbauweise

Sandwichmaterialien sind Verbundmaterialien. Sie werden durch zwei Deckschichten, welche üblicherweise dünn ausgeführt sind und aus einem steifen Material bestehen, und einem Kernmaterial, welches in der Regel eine sehr niedrige Dichte hat, gebildet. Die Verbindung von Deckschichten und Kern erfolgt meist durch Kleben, kann aber auch gegossen werden. Durch den Abstand der stabilen Deckschichten voneinander erhöht sich die Steifigkeit des Verbundes enorm. Beispielhaft sind die Berechnungen in Abb. 5.4 dargestellt. Steifigkeit, Biegefestigkeit und Gewicht sind dabei dimensionslos in Relation zu einem Werkstoff, der nur aus den zwei Deckschichten besteht, angegeben. Die Abbildungen sind exemplarisch und nicht maßstabsgetreu.

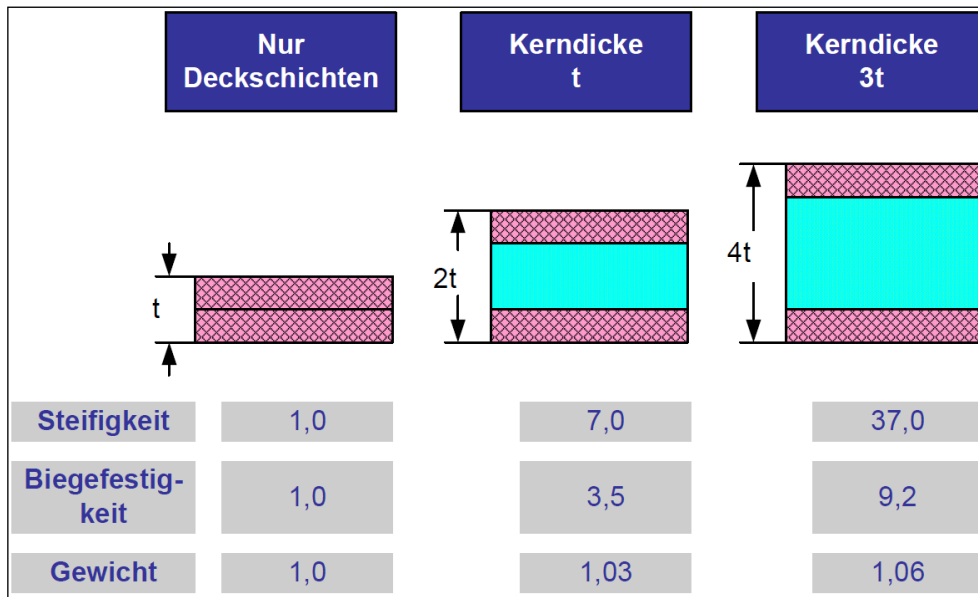


Abb. 5.4: Dimensionslose Steifigkeiten und Gewicht von Sandwichmaterialien [1]

Um die nötige Steifigkeit zu erreichen, kann die Konstruktion der Wicklungssysteme unter Umständen dicker ausfallen als es technisch für die Unterbringung der Spule notwendig ist.

5.4.4.1 Untere Deckschicht

Damit das Magnetfeld möglichst ungestört bis zu den Spulen vordringen kann, muss die untere Deckschicht aus einem magnetisch neutralen Werkstoff gefertigt sein. Es bietet sich glasfaserverstärkter Kunststoff an, da dieser magnetisch neutral ist und bei geringer Dicke eine hohe Steifigkeit besitzt. Als unterste Schicht kann die untere Deckschicht auf der Strecke liegenden Teilen wie Steine oder Stangen ausgesetzt sein. Um gegen aufgewirbelte Gegenstände einen ausreichenden Schutz bieten zu können, muss die Deckschicht geschützt werden. Dies ist mit einer Armierung, z.B. durch viellagige Glasfaser-matten möglich. Auch eine Elastomerschicht, welche auch Stöße spitzer Gegenstände abfedern kann, ist denkbar.

5.4.4.2 Sandwichkern

Der Kern des Sandwichs besteht aus einem relativ weichen und sehr leichten Material. Bei einer flächigen Belastung sind homogene Materialien wie Schaum und Bällchen ebenso gut geeignet wie strukturierte Kerne wie Waben, Stege oder Röhren.

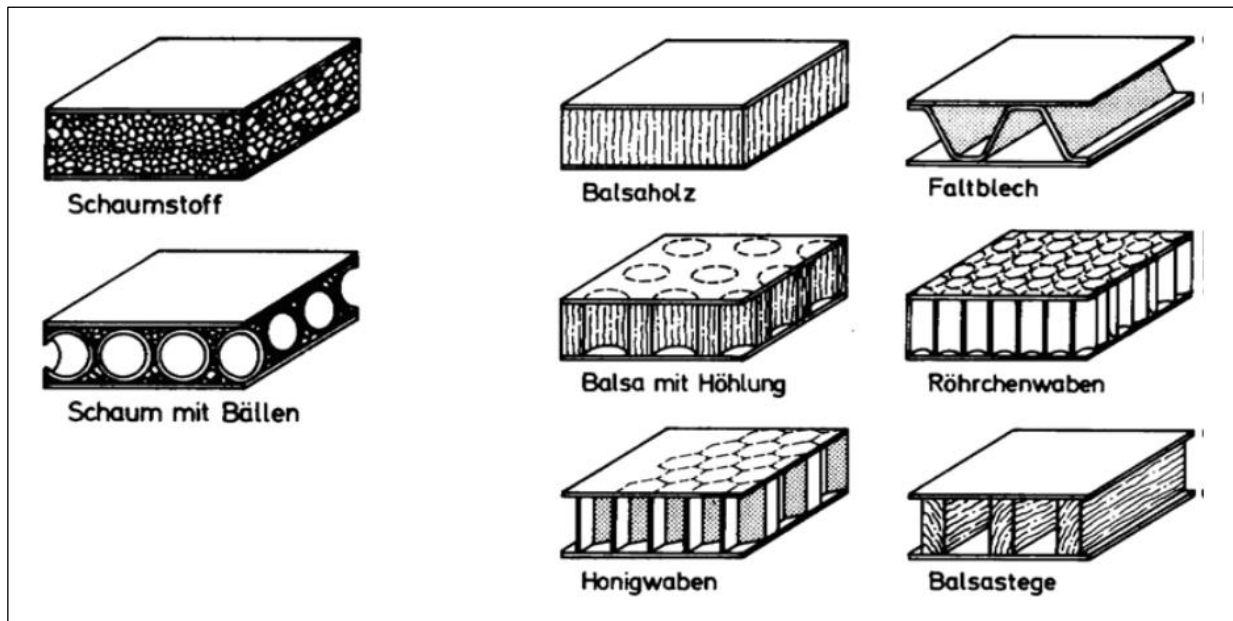


Abb. 5.5: Homogene und strukturierte Kerne [2]

Der Kern muss die Spule umhüllen, wofür zwei Fertigungsverfahren in Frage kommen. Härtere Schäume können leicht gefräst werden, womit die Spule danach einfach an die exakte Position gebracht werden kann. Alternativ dazu kann die Spule im Schaum vergossen werden, womit sie besser umschlossen ist. In beiden Fällen muss die Verbindung zwischen Kern und unterer Deckschicht beachtet werden.

5.4.4.3 Ferritschicht

Für die Führung des magnetischen Feldes ist eine Ferritschicht oberhalb der Sekundärspule nützlich. Diese kann knapp über der Spule im Sandwichkern angebracht werden. Da Ferrit ein spröder und relativ fragiler Werkstoff ist, kann eine durchgehende Ferritschicht nicht realisiert werden. Jedoch lässt sich auch mit einer Schicht aus aneinandergelegten Ferritplättchen eine gute Flussführung erzeugen.

Zu beachten ist jedoch, dass die Stabilität des Sandwichmaterials nur über die Verklebung der einzelnen Schichten ermöglicht wird. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Ferritplättchen nicht hinreichend mit dem Kern verkleben lassen. Aus diesem Grund kann ein Kunststoffgitter, in welches die Ferritplättchen gelegt werden, im Kern vergossen werden.

5.4.4.4 Obere Deckschicht

Die obere Deckschicht muss wie die untere Deckschicht aus einem steifen Material bestehen. Anders als bei dieser muss die obere Deckschicht jedoch nicht aus einem magnetisch neutralen Werkstoff bestehen, sondern wenn möglich das Restfeld hinter der Ferritschicht restlos abschirmen. Für diese Zwecke bietet sich Aluminium an.

5.4.4.5 Befestigung

Die Befestigung des Wicklungssystems in Sandwichbauweise hängt maßgebend von der Art der Integration ab. Eine Verschraubung ist dabei genauso möglich wie ein Einschub der Wicklungssysteme oder eine Integration in die Fahrzeughaut. In fast allen Fällen ist ein Rahmen notwendig.

5.4.5 Ausarbeitung des Wicklungselements

Die folgende Abbildung zeigt die Konstruktion eines Wicklungselements mit den genannten Komponenten aus Kapitel 5.4.4.

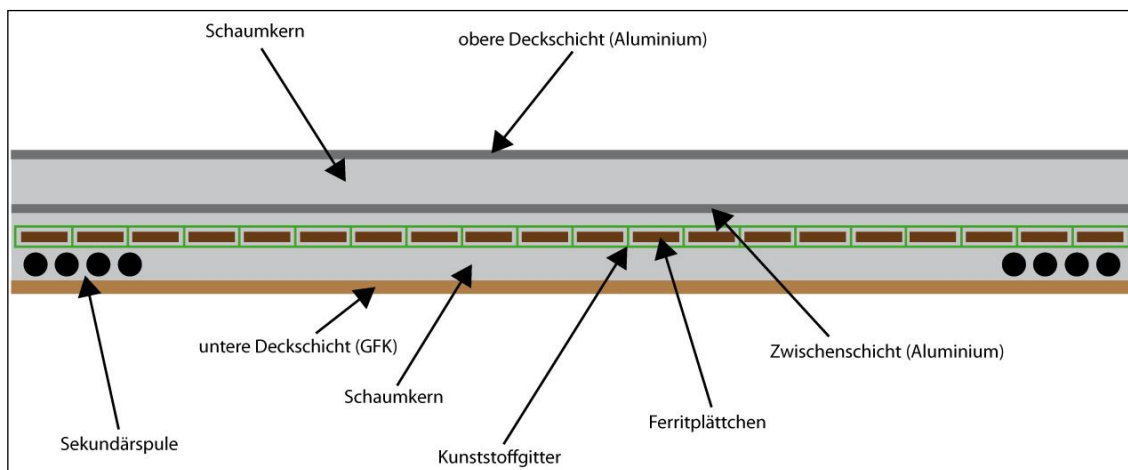


Abb. 5.6: Querschnitt eines Wicklungselements

Da aufgrund der Spule sowie der Ferritplättchen, die im Schaum eingearbeitet werden, ein Festigkeitsverlust zu erwarten ist, wird das Sandwich mit einer weiteren Schicht erweitert. Diese ist an der Oberseite angebracht. Die Standardbauweise sorgt für eine ausreichende und berechenbare Festigkeit der Gesamtkonstruktion. Zusätzlich wird die Abschirmung zu den Fahrgästen erhöht.

Der Rahmen bzw. die Befestigung des Wicklungssystems wird bei der Integration der Wicklungselemente ausgeführt.

5.5 Konzeptvarianten

In diesem Abschnitt werden die Konzeptvarianten für Primär- und Sekundärseite diskutiert.

5.5.1 Variantenfindung Primärseite

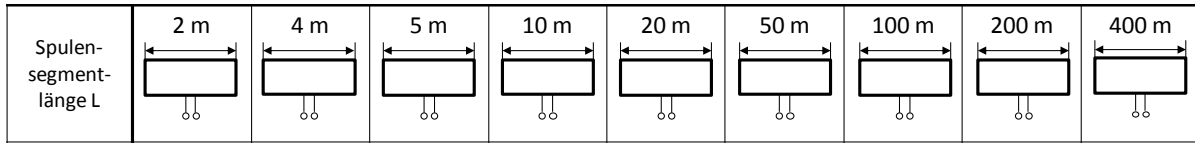
Bei der Variantenfindung auf der Primärseite gibt es sehr viele Freiheitsgrade. Anforderungsbedingt sind dabei die Länge der Wicklungselemente, die Art und Weise der Verschaltung, die Redundanzen sowie die Längen der Speiseabschnitte und DC-Zwischenkreise nicht vorgegeben.

Diese Fülle an Freiheitsgraden macht die Variantenfindung komplex. Hier wurde der in Tab. 5.1 dargestellte Morphologische Kasten zur Hilfe gezogen. Vertikal sind die fünf Stellgrößen Spulensegmentlänge, Verschaltung der Segmente, Redundanz der Leistungselektronik (LE), Zwischenkreislänge und Redundanz der Zwischenkreis-LE aufgetragen. Zu jeder Stellgröße sind pro Zeile einige Möglichkeiten aufgelistet, wobei für die Spulensegmentlänge die meisten Möglichkeiten bestimmt wurden. Die Stellgrößen sollen im Folgenden kurz erklärt werden.

Tab. 5.1: Morphologischer Kasten zur Variantenfindung

Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Stellgröße											
Spulensegmentlänge L	2 m	4 m	5 m	10 m	20 m	50 m	100 m	200 m	400 m	1000 m	2000 m
Verschaltung der Segmente	einzel	parallel	alternierend	seriell	partiell						
Redundanz der Leistungselektronik	keine	einfach	n-fach	parallel 1	parallel 2	seriell	partiell	semi			
Zwischenkreislänge	400 m	0,4...1km	1...10km	10 km	10...30 km	30 km	50 km	> 50 km			
Redundanz der Zwischenkreis-LE	keine	einfach	n-fach	parallel 1	parallel 2	seriell	partiell	semi			

5.5.1.1 Spulensegmentlänge

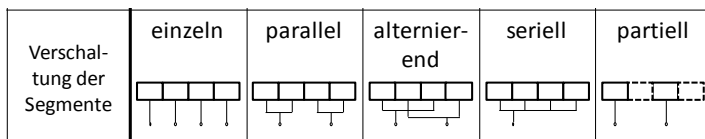


Bei der Bestimmung der Spulensegmentlänge der Primärwicklungselemente spielen mehrere Faktoren eine Rolle.

Für kürzere Segmentlängen spricht die Herstellung und Montage, welche einfach ist und evtl. mit einer festen Fahrbahn einhergehen kann. Auch der Transport ist bei Längen unter 20 m deutlich einfacher als bei längeren Spulen. Ein weiterer Pluspunkt kurzer Segmente ist die Einschaltdauer. Ist diese verkürzt, ist die thermische Belastung geringer, was eine einfachere Kühlung und eine erhöhte Lebensdauer verspricht. Auch bei möglichen Ausfällen sind kürzere Segmente von Vorteil, da ein Ausfall dort weniger ins Gewicht fällt.

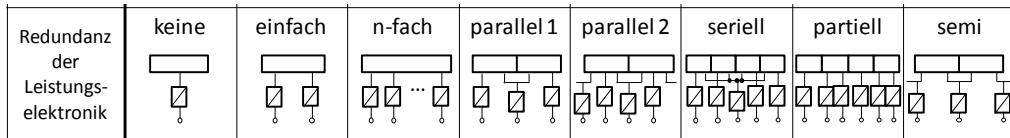
Lange Segmente, definiert durch eine Länge von 100 oder mehr Metern, haben ihre Vorteile hauptsächlich in der Anzahl von Kontaktelementen wie Stecker, Schalter und natürlich von Wechselrichtern, wodurch sich Kostenvorteile gegenüber kürzeren Segmenten ergeben. Jedoch gibt es, je nach Länge, für diese Leistungsbereiche heutzutage keine Wechselrichter auf dem Markt.

5.5.1.2 Verschaltung der Spulensegmente



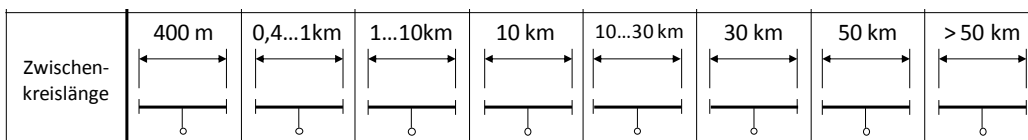
Auch bei der Verschaltung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Die beeinflussbaren Faktoren sind hier die Installationskosten sowie die Verfügbarkeit. Dabei steigt die Verfügbarkeit mit den Installationskosten. Technisch ist die Verschaltung ‚einzel‘ am simpelsten.

5.5.1.3 Redundanz der Leistungselektronik der Spulensegmente



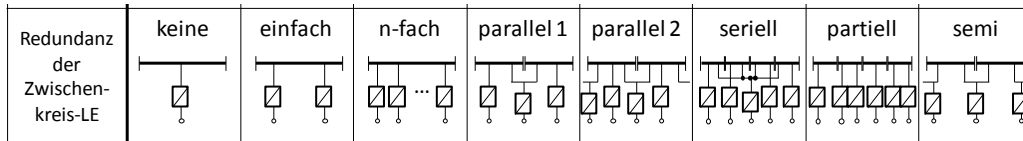
Keine Redundanz bietet den Vorteil, dass dies die kostengünstigste Variante darstellt. Bei kleinen Segmentlängen ist diese Variante gut handhabbar, da bei einem Ausfall nur ein kurzes Stück stromlos wird. Soll eine Redundanz vorhanden sein, ist eine *gruppenweise* Redundanz, abhängig von der Leistungselektronik, kostengünstiger als eine *einfache* oder *mehrfache* Redundanz. *Parallele* oder *serielle* Redundanzen bieten eine hohe Flexibilität, jedoch ist der Kostenfaktor gut zu untersuchen, da lange Zuleitungen und die Anforderungen an die Leistungselektronik teurer als eine *einfache* Redundanz sein können. Bei *semi* werden keine zusätzlichen LE als Rückfallebene benötigt, sondern nur die regulären Wechselrichter. Sie sind so konzipiert, dass sie im Bedarfsfall ein weiteres Spulensegment zuschalten und somit mit Energie versorgen können, woraufhin dann eine Schaltung wie parallel 1 einsteht.

5.5.1.4 Länge eines DC-Zwischenkreisabschnittes



Die optimale Länge eines DC-Zwischenkreisabschnittes wird über die Zuglänge, die Fahrgeschwindigkeit sowie die Abstände aufeinanderfolgender Züge bestimmt. Diese Faktoren bestimmen, ob in einem DC-Zwischenkreisabschnitt ein oder mehrere Züge fahren und bestimmen damit maßgeblich die auf Grund der Leistung benötigten Materialquerschnitte. Mehrere Züge innerhalb eines DC-Zwischenkreisabschnitts mit Energie zu versorgen, ergibt auf Grund der hohen ohmschen Verluste nur dann Sinn, wenn die benötigte Leistung, z.B. bei einem Langsamfahrabschnitt, gering ist.

5.5.1.5 Redundanz der Leistungselektronik der Zwischenkreise



Wie auch bei den Spulensegmenten kann bei den Gleichrichtern, die den DC-Zwischenkreis speisen, eine Redundanz vorgesehen werden. Es ergeben sich dabei dieselben Vor- und Nachteile wie bei der Leistungselektronik der Spulensegmente, allerdings mit dem Unterschied, dass die Auswirkungen von Ausfällen der Zwischenkreise wesentlich größer sind.

5.5.1.6 Konzept Primärseite

Nach aktuellen Vorgaben und Erkenntnissen ergibt sich als beste Lösung die in Abb. 5.7 dargestellte Variante für den NGT HGV und NGT Link.

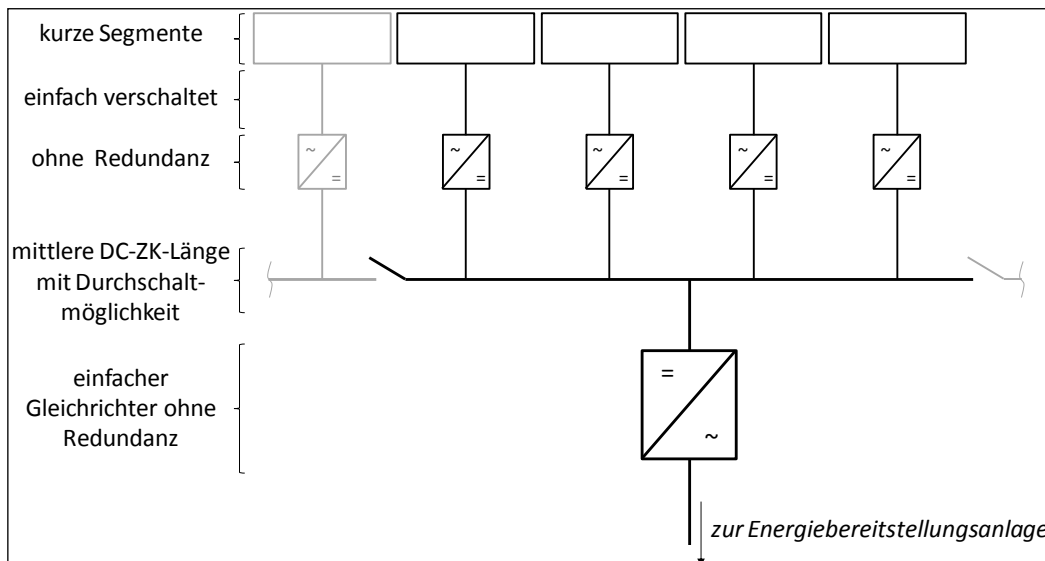


Abb. 5.7: Streckenseitigen Komponenten nach der Analyse

Es werden kurze Streckensegmente mit einer Länge zwischen 4 und 20 m verwendet. Die genaue Länge kann praktischen Gegebenheiten wie der Plattenlänge eines Segments fester Fahrbahn oder erhältlichen Kompensationskondensatoren angepasst werden. Die Wicklungssysteme werden einzeln angesteuert, jede Spule besitzt also einen Wechselrichter. Auf Grund der kurzen Segmente können diese ohne Redundanz ausgeführt werden.

Die Länge der DC-Zwischenkreise kann zwischen 10 und 30 km liegen. Eine Möglichkeit, angrenzende Zwischenkreise durchzuschalten, erhöht die Zuverlässigkeit, auch wenn bei einem Ausfall die Maximalleistung geringer ist. Auf diese Weise ist die Redundanz *semi* sichergestellt. Der Lösungsweg ist in Tab. 5.2 abgebildet.

Tab. 5.2: Morphologischer Kasten mit Lösungspfad

11						
10						
9						
8				semi		semi
7				partiell		partiell
6				seriell		seriell
5		partiell		parallel12		parallel12
4		seriell		parallel1		parallel1
3		alternierend		n-fach		n-fach
2		parallel		einfach		einfach
1		einzel		keine		keine
Variante	Stellgröße	Spulen-segment-länge L	Verschalt-ung der Segmente	Redundanz der Leistungs-elektronik	Zwischen-kreislänge	Redundanz der Zwischen-kreis-LE

5.5.2 Variantenfindung Sekundärseite

Durch die gegebenen Maßvorgaben im Unterflurbereich des Zuges sind die Möglichkeiten, die Sekundärwicklungssysteme zu variieren, gering.

5.5.2.1 Abmessungen des Sekundärwicklungssystems

Die erste Variante ist ein einziges Wicklungssystem pro Wagen, das genau so lang ist, wie der verfügbare Bauraum unter dem Fahrzeugboden. Hierfür ergeben sich die Maße für das Wicklungssystem des NGT HGV und NGT Link, wie sie in Abb. 5.8 bzw. Abb. 5.9 aufgezeigt werden. Konstant bleibt die in den Anforderungen festgelegte Spulenbreite von $b_2 = 1200\text{mm}$.

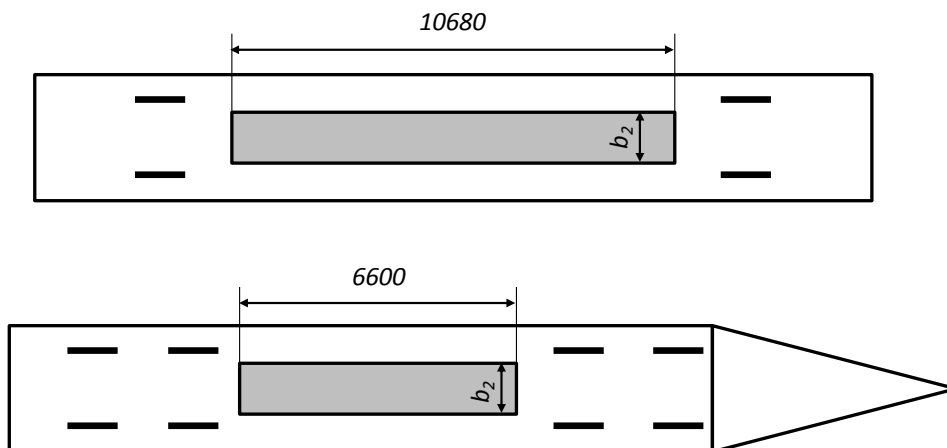


Abb. 5.8: Größe der Wicklungssysteme beim NGT HGV

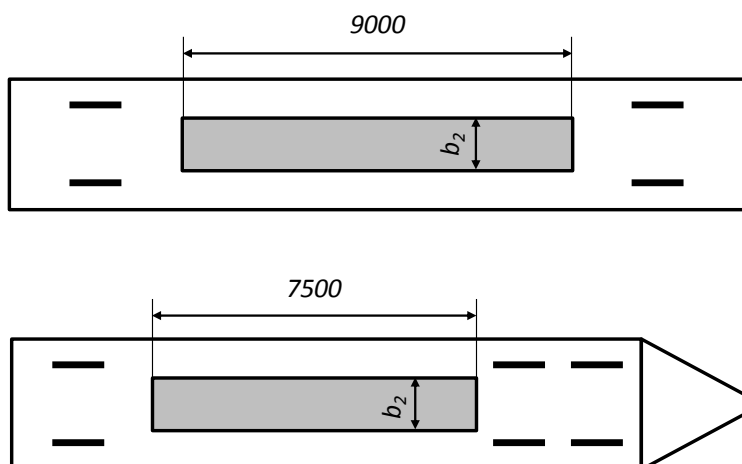


Abb. 5.9: Größe der Wicklungssysteme beim NGT Link

Eine weitere Möglichkeit ist die Aneinanderreihung von kleineren Wicklungssystemen. Aufgrund der entsprechenden Teilmaße sind sinnvolle Längen von 1500 mm, 2100 mm oder 3200 mm denkbar. Für eine erste Auslegung wurde eine Wicklungssystemlänge von 2100 mm gewählt. Diese bietet eine optimale Überdeckung der zur Verfügung stehenden Fläche. Weiter lässt sich die Größe von 2100 mm gut handhaben, was bei Fertigung, Transport, Montage und natürlich beim Austausch, welche unter Umständen nicht in speziellen Werkstätten stattfindet, von Vorteil ist.

5.5.2.2 Redundanz der Leistungselektronik

Die benötigte Leistungselektronik (LE) muss gegen Ausfälle abgesichert sein. Hierfür sind je nach Anwendungsfall Redundanzen vorzuhalten. Varianten für eine Redundanz ohne Betrachtung einer eventuellen Überdimensionierung der LE sind [3]:

- keine Redundanz (keine zusätzliche LE)
- einfache Redundanz (doppelt vorhandene LE) pro Wicklungssystem
- gruppenweise Redundanz (bspw. eine Ersatz-LE für alle Wicklungssysteme pro Wagen oder Zug – hier gibt es mehrere Möglichkeiten)

Diese drei Varianten sind in Abb. 5.10 dargestellt. Die abgebildete Variante der gruppenweisen Redundanz ist eine Möglichkeit der Umsetzung und nur als Beispiel gedacht. Die Verschaltung kann, entsprechend Kapitel 5.5.1, auch anders erfolgen und die Anzahl der redundanten Leistungselektronik kann variieren.

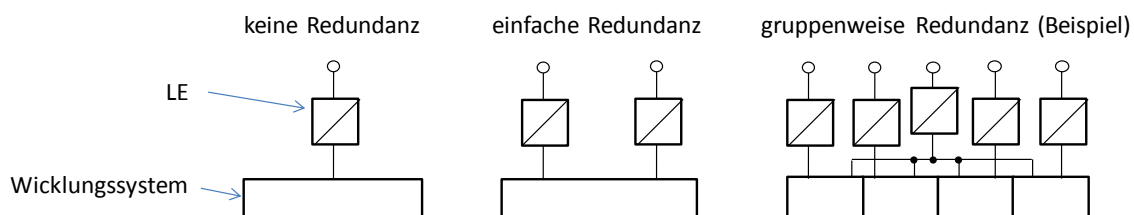


Abb. 5.10: Schematische Darstellung der Redundanzvarianten [3]

5.5.2.3 Konzept Sekundärseite

Für den NGT HGV ergeben 2100 mm lange Wicklungssysteme, welche einzeln, also ohne Redundanz, betrieben werden. Durch die Vielzahl an Segmenten ergibt sich jedoch eine hohe Zuverlässigkeit bzw. bei Ausfällen sehr geringe Leistungseinbußen. Beim NGT Link bietet sich auf Grund der verfügbaren Flächen im Unterflurbereich eine Wicklungssystemlänge von 1500 mm an.

Das Konzept des NGT HGV ist in der untenstehenden Abbildung dargestellt.

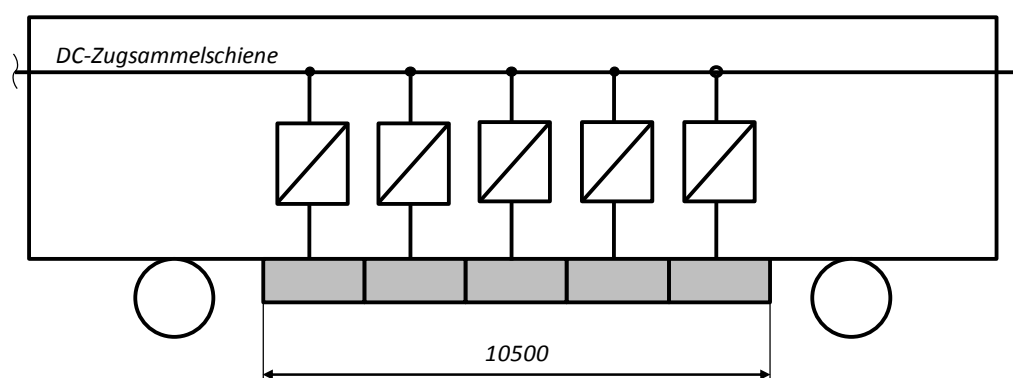


Abb. 5.11: Prinzipieller Aufbau der sekundärseitigen Energieübertragungs-Komponenten [3]

5.6 Technische Auslegung

Die zur technischen Auslegung des Wicklungssystems und die Integration in den Fahrzeugunterboden notwendigen Anforderungen werden im Folgenden nochmals dargestellt bzw. definiert. Die Anforderungen lassen sich in mehrere Gruppen aufteilen.

1. Allgemeine technische Anforderungen
2. Anforderungen, die sich aufgrund der Einbausituation, das heißt dem möglichen Einbauraum ergeben.
3. Anforderungen, die sich auf Grund optimierter Aerodynamik, geringem Eigengewicht und Komponentenschutz ergeben.
4. Anforderungen, die sich aus den technischen und elektrischen Spezifikationen ergeben

5.6.1 Allgemeine technische Anforderungen

Auf Grund den verschiedenen Ausführungen und den Leistungsunterschieden von NGT-HGV und NGT-Link sind die Anforderungen an die beiden Züge unterschiedlich. Nachfolgend sind einige relevante Daten in Tab. 5.3 aufgelistet.

Tab. 5.3: Allgemeine technische Anforderung NGT

Bereich / Benennung	NGT HGV	NGT Link
Umgebungstemperaturbereich	-35°C bis +40°C	
Lichtraumprofil	EBO G2	
Leistungsbedarf	25 MW	4 MW
Betriebsgeschwindigkeit	400 km/h	230 km/h
Maximalgeschwindigkeit	480 km/h	276 km/h
Elektromagnetische Verträglichkeit	EN 50121-3, TSI Fahrzeug 4.2.6.6.3	

5.6.2 Anforderungen aufgrund der Einbausituation

Im Folgenden wird der potentielle Einbauraum dargestellt. Die Fläche, die unter den Wagen des NGT HGV zur Verfügung steht, wird in Abb. 5.12 beispielhaft nochmals dargestellt.

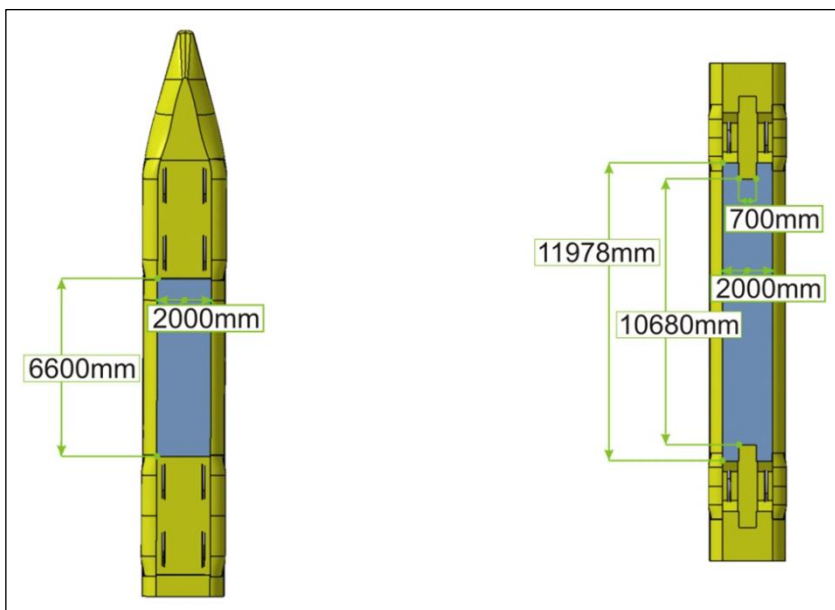


Abb. 5.12: Verfügbare Fläche unter Triebkopf und Mittelwagen des NGT HGV

In Tab. 5.4 wird das Flächenangebot pro Wagen und des ganzen Zuges tabellarisch dargestellt, hierbei wird zwischen dem NGT für den Hochgeschwindigkeitsverkehr und dem NGT-Link unterschieden, der im Regionalverkehr zum Einsatz kommen soll. Die jeweilige notwendige Leistungsdichte, die sich aus dem Leistungsbedarf und der zur Verfügung stehenden Fläche ergibt, wird ebenso dargestellt.

Tab. 5.4: Flächengebot NGT HGV und Link

Bereich / Benennung	NGT HGV	NGT Link
Triebköpfe		2
Mittelwagen	8	5
Nutzbare Länge Triebkopf	6,6 m	7,5 m
Nutzbare Länge Mittelwagen	10,68 m	9 m
Nutzbare Breite (beschränkt durch Gleisbreite)		1,2m
Nutzbare Fläche Triebkopf	7,92 m ²	9 m ²
Nutzbare Fläche Mittelwagen	12,816 m ²	10,8 m ²
Gesamte nutzbare Fläche	118,386 m ²	72 m ²
Leistungsdichte	211,2 kW/m ²	55,6 kW/m ²

Das Flächenangebot für die Wicklungssysteme im Unterboden der Triebköpfe und der Mittelwagen beim NGT-HGV ist geringer als beim NGT-Link. Aufgrund der höheren Anzahl der Mittelwagen bietet der NGT-HGV im Gegensatz zum NGT Link insgesamt aber eine größere nutzbare Gesamtfläche. Hinsichtlich der erheblich höheren Leistung und Leistungsdichte (ca. Faktor 4) des NGT-HGV liegt der Schwerpunkt im Folgenden auf dem Konzept des NGT-HGV.

In Abb. 5.13 ist schematisch der Bauraum in einer Schnittdarstellung durch einen Wagen dargestellt. Das Wicklungssystem ist am Unterboden des Mittelwagens angebracht. Das Raumangebot für die Wicklungssysteme und der zu überbrückende Luftspalt sind schematisch dargestellt. Aufgrund der Nähe zu den Fahrgästen muss die Stärke des entstehenden Magnetfeldes beachtet werden. Ein starkes Magnetfeld kann hierbei den Fahrgastraum beeinflussen. Deshalb ist:

1. eine magnetische Abschirmung zu installieren
2. eine elektromagnetisch verträgliche Auslegung und Anordnung hinsichtlich der Gegenstände und Geräte, die im Mittelwagen genutzt werden, zu realisieren
3. eine einfache Zugänglichkeit für Wartungsarbeiten vorzusehen

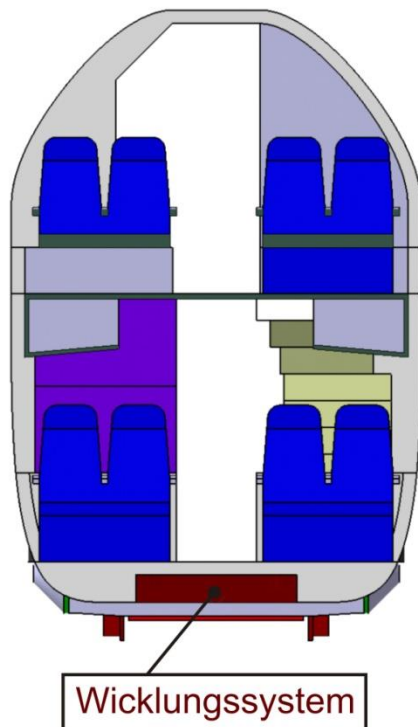


Abb. 5.13: Bauraum Unterflurbereich NGT HGV

Für das Platzangebot der Wicklungssysteme (WS) steht beim NGT HGV eine Höhe von $h_{WS,HGV} = 155\text{mm}$ und beim Link von $h_{WS,Link} = 200\text{mm}$ zur Verfügung. Diese Höhe ergibt sich jeweils aus den konzeptbedingten Konstruktionen. Der im Betrieb auftretende Radverschleiß (RV) $h_{RV} = 30\text{mm}$ ist bei beiden Konzepten gleich. Der Federweg (FW) $h_{FW} = 135\text{mm}$ ist ebenfalls bei beiden Konzepten einheitlich. Die Lichtraumhöhe (LH) $h_{LH} = 80\text{mm}$ ergibt sich aus der freizuhaltenden Distanz zwischen Zug und Gleis. Infolgedessen ergibt sich für die induktive Energieübertragung ein zu überbrückender Luftspalt (LS) von $h_{LS} = 245\text{mm}$. Dieser Luftspalt ist bei beiden Konzepten identisch.

$$h_{LS,gesamt} = h_{RV} + h_{FW} + h_{LH} = 30\text{mm} + 135\text{mm} + 80\text{mm} = 245\text{mm}$$

In Tab. 5.5 sind die zur Verfügung stehende Höhe des Einbauraumes für das Wicklungssystem und die geometrischen Eckdaten nochmals aufgeführt, die die Höhe des möglichen Einbauraumes bestimmen.

Tab. 5.5: Höhe des Einbauraums und geometrische Eckdaten

Bauraum	NGT HGV	NGT Link
Wicklungssystem	155 mm	200 mm
Radverschleiß		30 mm
Federweg (primär + sekundär)		135 mm
lichter Raum		80 mm

5.6.3 Anforderungen hinsichtlich optimierter Aerodynamik, geringer Eigenmasse, Komponentenschutz

Das Konzept des NGT beinhaltet einige spezielle Anforderungen wie z.B. optimierte Aerodynamik, Leichtbau und das Erreichen von sehr hohen Fahrgeschwindigkeiten. Dies führt dazu, dass alle relevanten Systeme und Komponenten hinsichtlich dieser allgemeinen Anforderungen ihren Beitrag leisten müssen. Für das Wicklungssystem hat dies spezielle Anforderungen zur Folge.

Optimierte Aerodynamik

Die optimierte Aerodynamik des NGT führt zu einer nahezu vollständig verkleideten Außenkontur des Zuges, Ziel ist es somit, die Wicklungssysteme vollständig in diese verkleidete Außenkontur zu integrieren.

Geringe Eigenmasse

Der NGT ist in vielen Bereichen durch Leichtbausysteme geprägt. Ziel ist es, dies ebenso für das zugseitige Sekundärwicklungssystem zu realisieren. Es bietet sich hierbei an, das Wicklungssystem und die notwendige Ferrit- und Aluminiumabschirmung in einer Sandwichstruktur zu realisieren. Dies erfüllt die Anforderungen an den Leichtbau und stellt ebenso eine robuste Grundkonstruktion des Systems zur Verfügung.

Komponentenschutz

Da die Fahrgeschwindigkeit des NGT sehr hoch ist, können potentielle Fremdkörper auf der Fahrstrecke beim Überfahren aufgewirbelt werden und somit zu schweren Schäden der im Unterboden montierten Systeme und Komponenten führen. Es ist somit notwendig, dass diese Systeme geschützt werden. Für die Wicklungssystem bedeutet dies einen Zielkonflikt, da das Spulensystem so nah wie möglich an der Außenhaut des Unterbodens platziert werden muss um einen möglichst geringen Spaltabstand zum in der Fahrstrecke

montierten primär Wicklungssystem zu ermöglichen. Ziel muss es somit sein, eine möglichst dünne aber ebenso robuste Schicht als Armierung auf die Unterseite des Wicklungssystems aufzubringen, die die elektrischen Eigenschaften nicht beeinflusst um die Anforderungen des Bauteilschutzes zu gewährleisten.

5.6.4 Anforderungen an mögliche Einsatzwerkstoffe

Für die Sekundärspulen werden zwei Arten von Werkstoffen, bzw. Werkstoffeigenschaften benötigt. Die erste Art sind Werkstoffe mit magnetischen Leitereigenschaften, die zweite mit elektrischen Leitereigenschaften. Aufgrund der kernlosen Ausführung der Sekundärspule werden magnetisch leitende Werkstoffe für die Abschirmung und Richtung des elektromagnetischen Feldes herangezogen. Eine magnetisch leitende Abschirmung führt zu geringen Streuflüssen. Bei den magnetischen Leiterwerkstoffen sind, aufgrund des hohen Preises, die Seltenen Erden als Einsatzwerkstoff ausgeschlossen. Eisen, Eisenlegierungen oder Ferrite kommen deshalb als magnetische Leiter zum Einsatz. Als elektrischer Leiter wird in erster Näherung Kupfer als Leiterwerkstoff in Betracht gezogen. Aluminiumlegierungen mit guten elektrischen Leitereigenschaften können bei einer detaillierteren Auslegung als mögliche Einsatzwerkstoffe in Betracht gezogen werden.

5.6.5 Zusammenfassung der Anforderungen

Im Folgenden werden die Anforderungen an das Sekundärwicklungssystem nochmals zusammengefasst (siehe Tab. 5.6).

Tab. 5.6: Zusammenfassung der Anforderungen

Nr.	Anforderung
1	Leistungsaufnahme 25 MW
2	Einbauhöhe, max. 200 mm
3	Einbaubreite, max. 1200 mm
4	Einbaulänge, segmentiert, mehrere Einheiten pro Wagen, $L > B$
5	Gewicht durch Sandwichkonstruktion reduzieren
6	Armierung des Wicklungssystems zum Schutz vor aufwirbelnden Fremdkörpern in der Strecke
7	Integration in Außenkontur (Unterboden) des Zuges, zur Optimierung der

Aerodynamik

- 8 Integration einer Abschirmung bzw. Flusslenkung bestehend aus Ferrit-
schirm und Aluminiumschirm
 - 9 Integration der Blindleistungskompensation
 - 10 Wirkungsgrad > 90 %
 - 11 Wartung / Tausch durch einfache Zugänglichkeit
 - 12 Wiederverwertbarkeit der Komponenten
 - 13 Elektromagnetisch verträgliche Auslegung und Anordnung der Kompo-
nenten
 - 14 Kostengünstige Werkstoffe
-

5.7 Konstruktion des Sekundärwicklungssystems

Im Folgenden wird das Sekundärwicklungssystem unter Berücksichtigung der festgelegten Anforderungen detailliert.

5.7.1 Einbindung und Aufbau des Wicklungssystems

Ziel ist es, das Wicklungssystem in Sandwichbauweise in die Außenhaut des Zuges zu integrieren. Hierbei wird die Spule in ein faserverstärktes Sandwich eingebettet. Die Aluminiumabschirmung bildet gleichzeitig den oberen Abschluss des Wicklungssystems und eine Faserverstärkte Kunststoffschicht, die auch die Anforderungen der Armierung erfüllt, bildet die untere Begrenzung des Wicklungssystems. Zusätzliche Anbindungselemente wie Träger oder Schrauben entfallen größtenteils. Aufgrund der steiferen Bauweise können die einzelnen Sandwichschichten dünner ausgeführt werden. Die Wicklungssystemeinheit soll über eine Aluminiumblechkonstruktion modular an die beiden Zugträger angepasst werden. Die Abb. 5.14 veranschaulicht den schematischen Aufbau der Konstruktion.

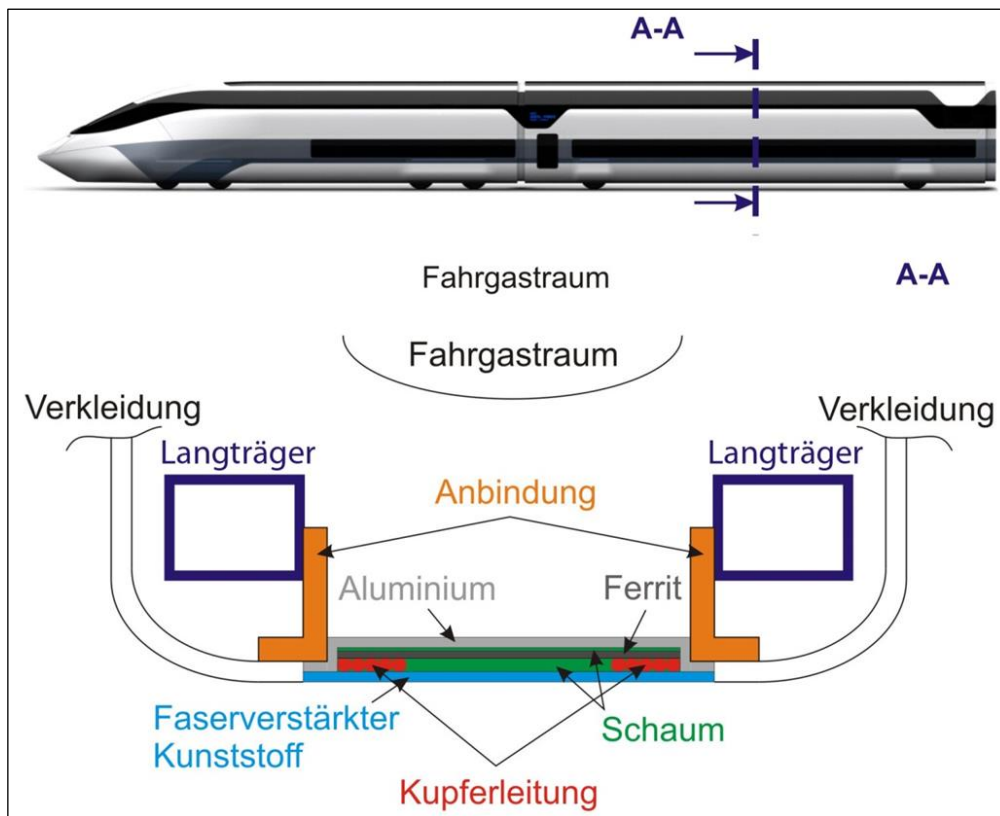


Abb. 5.14: Schematische Darstellung des Sekundärwicklungssystems [4]

5.7.2 Integration der Leistungselektronik

Die Wechselrichter, von denen, wie in Kapitel 5.5.2 bestimmt, pro Wicklungssystem ein Gerät benötigt werden, können im Raum zwischen Fahrgastraumunterboden und Wicklungssystem platziert werden. Wie in Kapitel 5.6.2 ersichtlich, können große Teile des Freiraums für die Wechselrichter freigehalten werden. Es ist jedoch auf eine flache Bauart zu achten, da der Raum zwar fast so groß wie ein Wicklungssystem ist, jedoch nur eine Höhe von einigen Zentimetern aufweist.

5.7.3 Konstruktion Sekundärwicklungssystem

In Abb. 5.15 ist der Aufbau des Wicklungssystems in einer Schnittdarstellung abgebildet. Die Sandwichbauweise, die einzelnen Schichten und die Anordnung der Komponenten in der Sandwichstruktur sind den Anforderungen entsprechend ausgelegt worden.

5.7.3.1 Wicklungssystem in Sandwichbauweise

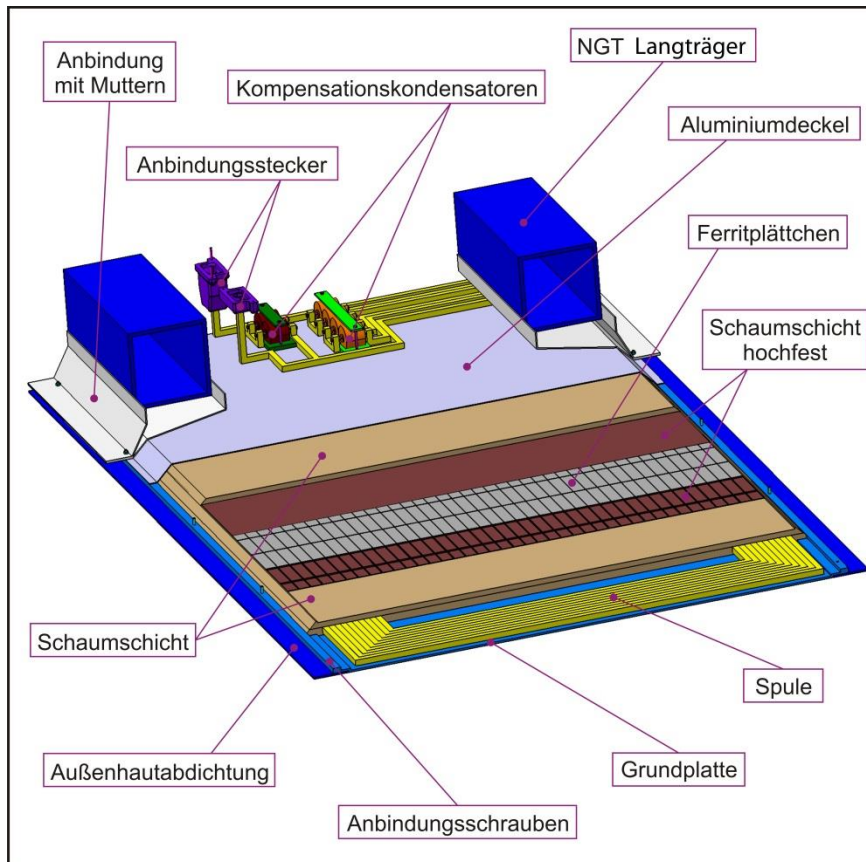


Abb. 5.15: Detaillierung des Wicklungssystems [4]

Der Sandwichboden besteht aus einer 5 mm dicken glasfaserverstärkten Kunststoffschicht. Ein Aluminiumblech mit einer Stärke von 2 mm bildet den Sandwichdeckel. Zur Stabilisierung der Sandwichstruktur ist zwischen den beiden Deckschichten eine 53 mm hohe Schaumschicht angebracht. In die Schaumschicht ist die Hauptinduktivität mit einer Leiterhöhe von 15 mm eingebettet. Der Leiterquerschnitt ist dabei quadratisch ausgeführt und die gesamte Spule deckt eine Fläche von 1200 mm x 2074 mm ab, welche für die induktive kontaktlose Energieübertragung genutzt wird. Ebenfalls in die Schaumschicht sind die Ferritplättchen mit einer Höhe von 3 mm eingebettet. Die einzelnen Ferritplättchen sind 27,6 mm x 103,8 mm groß und decken eine Gesamtfläche von 1222 mm x 2094 mm ab. Um eine bessere Führung der elektromagnetischen Feldlinien zu realisieren ist die Gesamtfläche der Ferritschicht größer als die Gesamtfläche der Spule. Aus Gründen der Stabilität sind die Ferritplättchen in eine hochfeste Schaumschicht eingebunden. Da Ferrit ein spröder Werkstoff ist, reagiert es Biegebelastungen gegenüber

empfindlich. Insgesamt hat das Wicklungssystemsandwich eine Gesamtgröße von 60 mm x 1320 mm x 2100 mm und einen trapezförmigen Querschnitt.

5.7.3.2 Integration Wicklungssystem

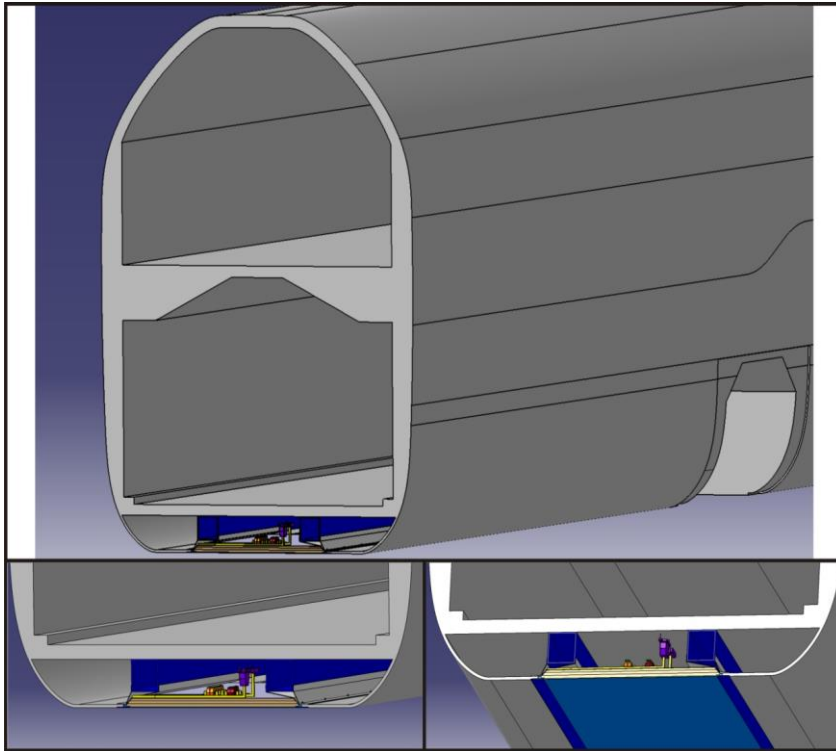


Abb. 5.16: Integration des Wicklungssystems in die Außenhaut des NGT

In Abb. 5.16 ist die Integration des Wicklungssystems in die Außenhaut des NGT dargestellt. Hierbei ist auch die Außenhautabdichtung zu erkennen, die das Wicklungssystem bündig mit der Außenhaut des Zuges verbinden soll. Sie überbrückt ebenso auftretende notwendige Spiele bzw. Spaltmaße zwischen Wicklungssystem und Außenhaut.

5.7.3.3 Außenhaut und Anbindung

Zur Versiegelung und Abdichtung der Verbindungsstellen und Verschraubungen am Wicklungssystem dienen elastische und niederfeste Kunststoffplatten der Größe 5 mm x 90 mm x 2100 mm, die aus Gründen der Montierbarkeit geklebt bzw. durch wieder lösbare Klips-Verbindungen dargestellt werden. Die Abdichtungen an beiden Wicklungssystemseiten sorgen für einen ebenen und geschlossenen Unterboden des NGT.

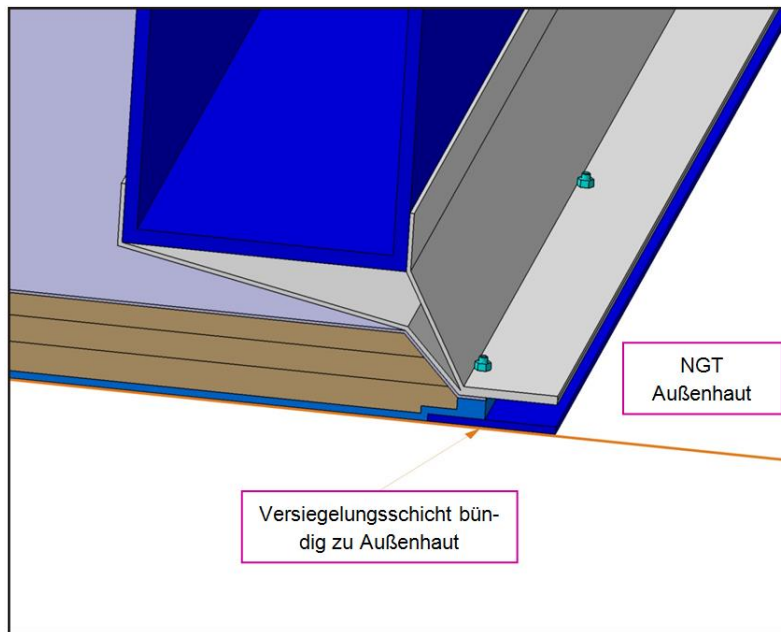


Abb. 5.17: Wicklungssystemversiegelung [4]

Die Anbindung des Wicklungselements an den Unterboden des NGT ist aus Aluminiumblechen mit einer Stärke von 3 mm ausgeführt. Die Anbindungsbleche werden an die Langträger in der NGT Struktur angeschweißt. An der unteren Seite der Anbindung befinden sich Muttern, die in das Anbindungsblech geschweißte sind. Das Wicklungssystem wird dann mit Innensechskantschrauben an der Anbindung befestigt. Durch diese Konstruktion ist eine einseitige Montierbarkeit und Wartung des Wicklungssystems sichergestellt.

5.7.3.4 Masse des Wicklungssystems

In Tab. 5.7 sind die einzelnen Wicklungssystemkomponenten, ihre Werkstoffe und Dichte und die resultierende Masse aufgeführt. Grundlage für die Volumina ist die CATIA-Zeichnung aus den bereits gezeigten Abbildungen. Die Gesamtmasse eines Wicklungssystems mit den Eckmaßen 60 mm x 1320 mm x 2100mm beläuft sich somit auf 223,2 kg.

Tab. 5.7: Dichte und Masse der Wicklungssystemkomponenten

Wicklungssystemkomponente	Werkstoff	Dichte ρ [kg/dm ³]	Masse [kg]
Wicklungssystem Grundplatte	Glasfaserverstärkter Kunststoff	2,6	38,04
Wicklungssystem Deckel	Aluminium	2,7	15,34
Wicklungssystem Schaumschicht	Schaum	0,2	22,46
Hauptinduktivität und Leitungen	Kupfer	8,9	63,95
Schaumschicht	Hochfestschaum	0,4	2,19
Ferritplättchen	Ferrit	7,9	58,18
Wicklungssystem Anbindung	Aluminium	2,7	19,18
Angeschweißte Anbindungsmuttern	Stahl	7,9	0,03
Anbindungsschrauben	Stahl	7,9	0,08
Außenhautabdichtung	Kunststoff PE	0,94	1,78
Kondensator Halterung	Kunststoff PE	0,94	0,32
Kondensatoren und Stecker	-	-	1,47
Elektronikschrauben	Stahl	7,9	0,15
Gesamtwicklungssystem	-	-	<u>223,2</u>

Für einen NGT HGV, welche im Triebkopf mit je 3 Wicklungssystemen und im Mittelwagen mit je 5 Wicklungssystemen ausgestattet ist, ergibt sich eine Gesamtmasse von 10267 kg.

5.8 Zusammenfassung

Das Gesamtkonzept, welches im Zwischenbericht erarbeitet wurde, ist weiter detailliert worden. Für die Primär- und Sekundärseite wurden verschiedene Konzeptvarianten gefunden und untersucht.

Aus dem Grobkonzept, den Vorgaben des Projektes NGT und den in Kapitel 5.5 ermittelten Konzeptvarianten wurden weitere Anforderungen abgeleitet. Mit deren Hilfe konnte ein Sekundärwicklungssystem konzipiert und konstruiert werden. Die Konstruktion wurde in CATIA ausgeführt und berücksichtigt bereits die Werkstoffwahl, mögliche Fertigungsverfahren und die einfache Montage des Wicklungssystems. Es konnte für das Wick-

lungssystem die Masse berechnet werden und die Komponenten in den Unterflurbereich des NGT konstruktiv eingepasst werden.

5.9 Auswirkungen der geänderten Spulenabmessungen

Unmittelbar vor Ablauf des Projektes wurden Ende Januar 2014 im Rahmen der Auslegung des Übertragungssystems (vgl. Kapitel 9) die Abmessungen der Primär- und Sekundärwicklungssysteme neu definiert. Die wichtigsten Unterschiede sind die Länge, die Breite, die Leiterquerschnitte und die daraus resultierende Masse:

- Die Länge wächst bei den Primärwicklungssystemen von 4 bis 10 m auf 20 m an,
- Die Länge der Sekundärwicklungssysteme steigt von 2,1 m auf 5,0 m.
- Die Breite schrumpft von bisher 1,2 m auf nun 1,0 m.
- Im Fahrzeug werden 18 Sekundärwicklungssysteme zu je 5,0 m verbaut.
- Der Gesamtleiterquerschnitt verringert sich von ursprünglich 1129,4 mm² auf 400 mm²

5.9.1 Primärspulen

Durch die Festlegung der Länge der Primärspulen auf 20 m, kann die Fertigung voraussichtlich nicht mit der Implementierung in kompakte Segmente der Festen Fahrbahn stattfinden, da mit den Segmenten der Festen Fahrbahn bei dieser Länge schwer umzugehen ist. Auch der Transport sowie die Montage verursachen einen höheren Aufwand.

Bei einem Ausfall eines Wicklungssystems ist das ausgefallene Teilstück zwar größer, jedoch immer noch in einem Bereich, der kaum Auswirkungen mit sich bringt. Dies liegt zum einen daran, dass das Teilstück verglichen mit der Gesamtlänge des Zuges noch klein ist und zum anderen, weil einzelne Segmente schnell überfahren werden. Auch die Erwärmung durch die längere Einschaltzeit beim Überfahren erhöht sich nur geringfügig. Vorteilhaft ist die Einsparung an Anschlusselementen bei längeren Primärspulen. Dieser Vorteil ist jedoch gegenüber den kleineren Segmenten der festen Fahrbahn nicht signifikant.

5.9.2 Sekundärspulen

Die Länge der Sekundärspulen vergrößert sich von 2,1 m auf nun 5,0 m. Die oben beschriebene Konstruktion ist mit diesen Abmessungen weiterhin möglich, jedoch ist bei der Fertigung und besonders bei der Montage am Zug mit einem erhöhten Aufwand zu rechnen. Entsprechende Vorrichtungen bei der Montage und in den Werkstätten zum Tausch defekter Wicklungssysteme müssen angepasst werden.

Die beschriebene Anbindung an den Langträger des NGT wird auch für die langen Wicklungssysteme angestrebt. Zu untersuchen ist, ob die Stabilität der Wicklungssysteme ausreichend ist, oder ob Versteifungen in Querrichtung notwendig sind. Auch das Schwingungsverhalten der Wicklungssysteme im Betrieb ist mit den angepassten Abmessungen prinzipiell kritischer und muss betrachtet werden.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Wicklungssystems ist bedingt durch den Glasfaserverstärkten Kunststoff recht hoch. Für den gegebenen Temperaturbereich muss die Konstruktion mögliche Kräfte entweder aufnehmen oder die Dehnung zulassen können.

Durch die Verringerung der Breite sowie der etwas schlechteren Ausnutzung der im Unterflurbereich freien Fläche verringert sich die durch Wicklungselemente abgedeckte Fläche von bisher 115,92 m² auf 90,0 m². Dadurch steigt die Leistungsdichte entsprechend an. Die Auswirkungen auf die Konstruktion sind zu prüfen.

Insgesamt werden pro Halbzug nun anstatt 46 nur 18 Wicklungselemente verbaut. Dadurch kommen die Auswirkungen von Ausfällen stärker zum Tragen. Im Hinblick auf die Einhaltung des Fahrplans, die auch bei einem ausgefallenen Segment gewährleistet sein soll, wird die Zuverlässigkeit im Kapitel 10 genauer untersucht.

Aus der Reduktion des Leiterquerschnitts kann aber nicht unmittelbar eine Aussage über die Gesamtmasse der Wicklungen gemacht werden. Bei der Berechnung der Gesamtmasse sind auch Anbindungen, Kompensationskondensatoren und Zuleitungen für eine exakte Neuberechnung zu berücksichtigen.

5.10 Quellen

- [1] Starlinger; A., Development of Efficient Finite Shell Elements for Analysis of Sandwich Structures under Large Instabilities, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991
- [2] Lutz Hoffmann; Erstellen eines Algorithmus für die beanspruchungsgerechte Auswahl von Klebstoffen für die Herstellung von Sandwichkonstruktionen, TU Dresden, 2004

- [3] Sebastian Skorsetz, Analyse von Konzepten zur induktiven Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen im Hochgeschwindigkeitsverkehr, Studienarbeit im Bereich Schienenfahrzeugtechnik, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2013
- [4] Özkan Özmen, Auslegung, Konstruktion und Integration von Sekundärspulen für die induktive Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen, Studienarbeit im Bereich Schienenfahrzeugtechnik, Institut für Maschinenelemente, Universität Stuttgart, 2013

6 Integration der Komponenten in den Oberbau

von Dr.-Ing. Joachim Winter, Dipl.-Ing. Christopher Kalatz, Stefan Kaimer M.Sc. und Dipl.-Ing. Sebastian Streit

In diesem Kapitel sollen Möglichkeiten zur Einführung der fahrdrahtlosen Energieübertragung (FEÜ) für Vollbahnen gegeben werden. Es wird zwischen zwei grundsätzlichen Oberbauformen unterschieden: Schotteroberbau und Feste Fahrbahn-Systeme (FF). Im Folgenden werden diese Oberbauformen zunächst kurz vorgestellt. Daraufhin wird die Integrationsmöglichkeit der FEÜ diskutiert und abschließend eine Einführungsstrategie abgeleitet.

6.1 Oberbauformen

6.1.1 Schotteroberbau

Der Aufbau eines Schottergleises besteht im Wesentlichen aus dem Gleisrost (die Einheit aus Schienen, Schienenbefestigungen und Schwellen) das auf bzw. in ein sogenanntes Schotterbett verlegt wird. Diese Schotterbettung gibt die eingeleiteten Kräfte von den Schwellen an den darunter liegenden Unterbau bzw. den Untergrund weiter [1].

Durch das grob gebrochene Gestein ist die Schotterbettung keine starre Tragschicht, sondern in sich ungebunden. Infolge der Betriebsbelastung kommt es jedoch zu Schotterumlagerungen, -verschleiß und -verschmutzungen, die eine Zustandsveränderung der Schotterbettung hervorrufen. Dem muss mit einer entsprechenden Gleisdurcharbeitung (Reinigen, Austauschen, Auffüllen, Stopfen) entgegen gewirkt werden [2]. Tab. 6.1 fasst die Vor- und Nachteile des Schotteroberbaus zusammen.

Aufgrund der genannten Vorteile und infolge der Bewährtheit dieses Oberbausystems wird der Schotteroberbau immer noch als Standard für alle hochbeanspruchten Gleise im Netz der DB AG, aber auch bei vielen anderen Eisenbahnverkehrsunternehmen weltweit mit teilweise abweichenden Systemkomponenten, eingesetzt [3].

Tab. 6.1: Vor- und Nachteile des Schotteroberbaus [2] [3] [4]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none">• preiswerte Konstruktion• gute Spurhaltung• geringe Schallemissionen• leichte Korrekturmöglichkeit• wirtschaftliche manuelle Behebung von kleinen Mängeln• geringe Baukosten und Bauzeit• kostengünstige automatisierte und mechanisierte Instandhaltung	<ul style="list-style-type: none">• geringe Längs- und Quersteifigkeit• ungünstige Lage bei Stoßgleisen• geringe Lastverteilung auf nur 5 bis 7 Schwellen• bei hohen Geschwindigkeiten zusätzliche Setzungen und Gleislagefehler infolge erhöhter Schotterbeanspruchungen

Wie aus den Nachteilen des Schotteroberbausystems hervorgeht, kommt dieser vor allem in den Bereichen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs (HGV) an seine Belastungsgrenzen. Für den HGV ist der konventionelle Schotteroberbau unter diesen Umständen zunehmend unwirtschaftlich.

6.1.2 Feste Fahrbahn-Systeme

Eine alternative Oberbauform für den Einsatz im HGV stellt das sogenannte Feste-Fahrbahn-System (im Folgenden FF-System) dar. Bei dieser Bauart wird die in sich ungebundene Schotterbettung durch ein lagebeständigeres Material, wie etwa Asphalt oder Beton, ausgetauscht. Elastische Zwischenlagen im Auflagerpunkt der Schiene kompensieren die durch die starre Gleisbettung entstehende hohe Steifigkeit im Oberbausystem und gewähren so eine hohe Lastverteilung auf möglichst viele benachbarte Stützpunkte. Zusätzlich werden dadurch die vor allem bei hohen Fahrgeschwindigkeiten entstehenden dynamischen Kräfte herabgesetzt. Eventuell auftretende Setzungen können bei FF-Systemen nicht wie beim Schotteroberbau durch eine Gleisdurcharbeitung beseitigt werden [1] [5]. Tab. 6.2 fasst Vor- und Nachteile von FF-Systemen zusammen.

Tab. 6.2: Vor- und Nachteile von Feste-Fahrbahn-Systemen [1] [4]

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • überwiegend wartungsfreies System • keine nächtlichen Betriebspausen für Wartungsarbeiten notwendig • längere Liegedauer von bis zu 60 Jahren • höhere Gleisstabilität • Einsatz von verschleißfreier Wirbelstrombremse möglich • kein Schotterflug • kostengünstigere Trassierung aufgrund engerer Bögen, größerer Überhöhungen bzw. Überhöhungsfehlbeträge möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • höhere Investitionskosten • höhere Luftschallemission • hoher Reparatur- und Kostenaufwand bei der Beseitigung von Untergrundsetzungen oder Entgleisungsschäden • Interaktion Fahrzeug – Gleis, Fahrzeugdynamik

6.2 Integrationsmöglichkeiten der FEÜ in den Oberbau

Technisch ist die Integration der Primärspulensegmente in beide Oberbauformen, Schotteroberbau und FF-Systeme, möglich.

Für die Implementierung in den Schotteroberbau müssten die Segmente genügend Freiheitsgrade aufweisen, damit das Oberbausystem auch weiterhin wirtschaftlich gewartet werden kann. Dies impliziert jedoch enorme Entwicklungs- und Herstellungskosten neuer Gleisbaumaschinen. Neben der technischen Realisierung für die mechanisierte Aufnahme der Segmente müssen die Zuleitungen und Verbindungen ausreichend lang und flexibel ausgeführt werden. Gleichzeitig müssen sie aber auch gegen evtl. Beschädigungen durch den Schotter oder Wartungsarbeiten abgesichert sein.

Bei einer Integration in FF-Systeme wäre lediglich eine Anpassung der Segmente auf die bereits eingesetzten Bauformen notwendig. Anhaltspunkte bezüglich der Ausführungsform könnten bereits eingesetzte Oberbaukomponenten, wie z.B. auf FF installierte Schallabsorber oder Entgleisungsschutze, liefern. Dabei wäre es denkbar, die Funktion des Entgleisungsschutzes in das FEÜ-System zu integrieren. In Abb. 6.1 ist die Integration der Primärspulen in den Entgleisungsschutz skizzenhaft dargestellt.

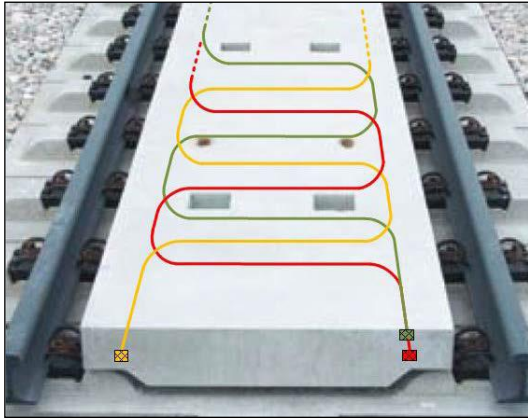


Abb. 6.1: Ergänzung des FF-Systems mit FEÜ-Primärspulen nach [6]

Die FEÜ würde in diesem Fall eine Doppelfunktion erfüllen. Einerseits stellt sie die Energieversorgung des NGT sicher und andererseits gewährleistet sie den bei bestimmten Streckenabschnitten erforderlichen Entgleisungsschutz. Bei neu zu bauenden Strecken kann das Primärspulensegment als mögliche Fertigteillösung direkt in dafür angepasste FF-Systeme integriert werden. Abschließend sind die Anforderungen, die sich bei einer Implementierung ergeben, nochmals tabellarisch zusammengefasst (vgl. Tab. 6.3).

Tab. 6.3: Oberbauspezifische Anforderungen an eine Integration der FEÜ

Anforderung	Schotteroberbau	Feste Fahrbahn
Höhe	abhängig von verwendeter Schwellenform	Abhängig von FF-System
Breite	abhängig vom Abstand der inneren Schienenbefestigungen bzw. Schulterstützen	
Länge	keine Einschränkungen; festgelegt auf 10-20 m, bei Problemstellen evtl. variabel	
Gehäuse / Abdeckung	Auslegung auf Biege- und Scherbeanspruchungen	Befahrbarkeit mit Kraftfahrzeugen
Zuleitungen / Verbindungen	flexibel und lang, Sicherung gegen Beschädigungen (liegen im Schotter)	können je nach Bedarf ausgeführt werden, Sicherung gegen äußere Einflüsse
äußere Einflüsse	Sicherung gegen Witterung, Beschädigungen und Vandalismus	

6.3 Verteilung der Oberbauformen

In Abb. 2.1 ist die Gesamtlänge der weltweit im Betrieb sowie im Bau befindlichen und geplanten Hochgeschwindigkeitsstrecken dargestellt. Den bisher größten Anteil an Hochgeschwindigkeitsstrecken besitzen China und Japan, gefolgt von mehreren europäischen Staaten. Der Anteil der übrigen Länder ist vergleichsweise gering.

Ein vergleichbares Bild spiegelt sich auch im Anteil der Passagierkilometer im Hochgeschwindigkeitsschienenverkehr wieder, der in Abb. 6.2 dargestellt wird. Während die größte Verkehrsleistung durch Japan (JR), Frankreich (SNCF), China (Chinese Railways) sowie Deutschland (DB AG) erbracht wird, spielt der Anteil der übrigen Länder nur eine untergeordnete Rolle. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich um absolute Werte handelt. Das heißt, die Grafik erlaubt keine Aussage dazu, wie hoch der Anteil des Hochgeschwindigkeitsverkehrs in den jeweiligen Staaten ist.

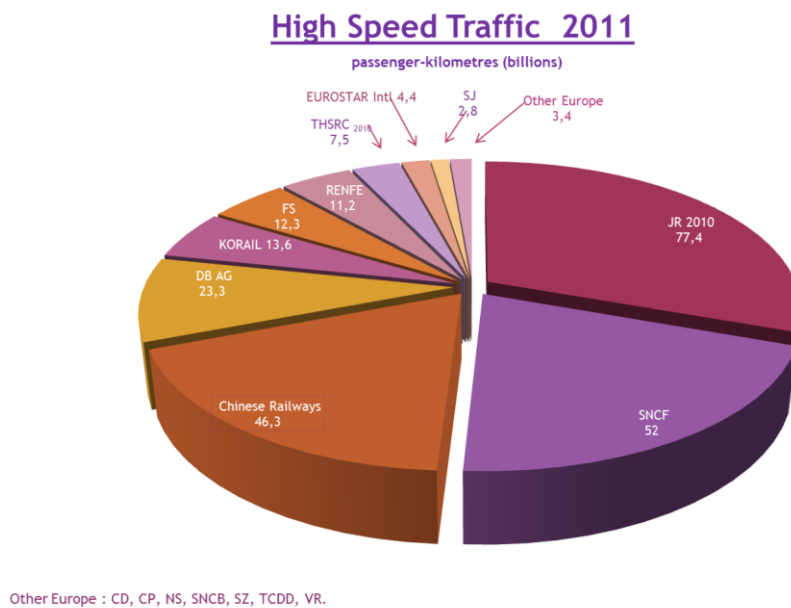


Abb. 6.2: Verteilung der Passagierkilometer im HGV [7]

Wird das Schienengesamtnetz betrachtet, fällt auf, dass sich gegenüber dem Hochgeschwindigkeitsverkehr eine deutlich abweichende Verteilung ergibt. Global verfügen auch Länder/Regionen, die nur über einen geringen Anteil an Hochgeschwindigkeitsstrecken verfügen, über signifikante Anteile am Gesamtnetz (z.B. Amerika).

Im Rahmen einer Herstellerrecherche wurde die Verteilung von FF-Systemen untersucht. Auch wenn dadurch keine ganzheitliche Betrachtung ermöglicht wird, da nicht alle Her-

steller ermittelt werden konnten, erlaubt die Analyse der zur Verfügung gestellten Informationen eine grobe Orientierung und deckt sich mit anderen Quellen[8].

Die in Abb. 6.3 und Abb. 6.4 dargestellte Verteilung der FF-Systeme verdeutlicht, dass der Anteil der FF-Systeme (~12000 km) am weltweiten Gesamtnetz – mit weniger als 2% – verschwindend gering ist. Dies lässt sich durch die, gegenüber dem Schotteroberbau, hohen Investitionskosten erklären. Zudem stellen FF-Systeme eine vergleichsweise „junge“ Technologie dar. Die Recherche bei den Herstellern von FF-Systemen verdeutlichte weiterhin, dass der Anteil dieser Systeme zukünftig stark ansteigen wird. Dabei ist insbesondere in China und Europa mit einer Erhöhung des FF-Anteils zu rechnen.

Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass durch die gewonnenen Daten keine Aussage zum FF-Anteil auf einzelnen Strecken getroffen werden kann. Während eine Integration der FEÜ bei Strecken mit hohem/ausschließlichem FF-Anteil vergleichsweise problemlos möglich ist, gestaltet sich dies bei Trassen mit geringem FF-Anteil (z.B. bei ausschließlicher Verwendung von FF-Systemen bei Brücken, Tunneln, Bahnübergängen) deutlich schwieriger.

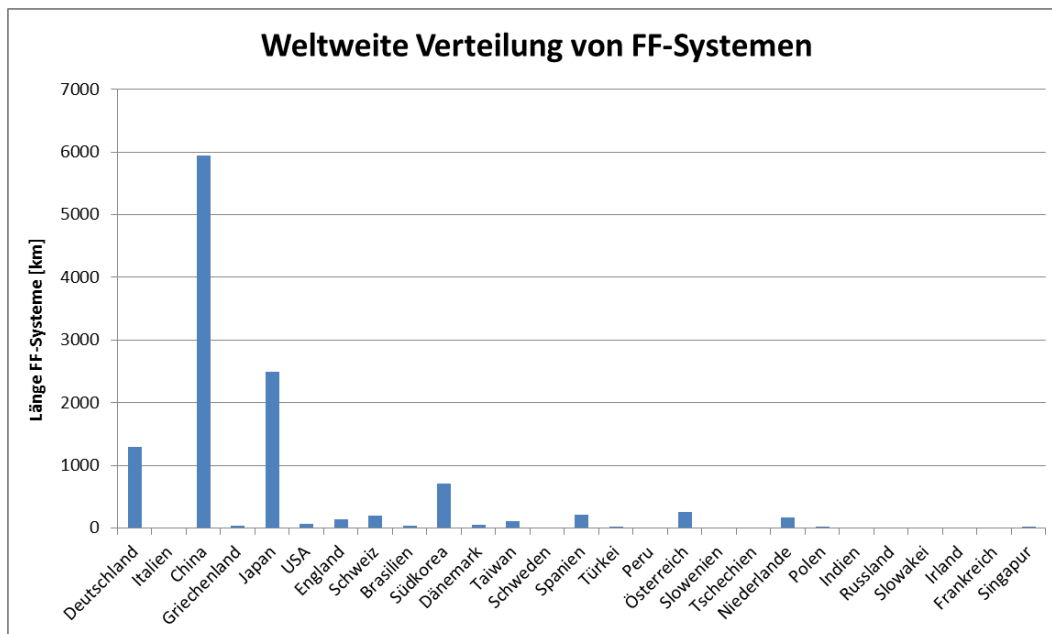


Abb. 6.3: Gesamtlänge der installierten und im Bau befindlichen Festen Fahrbahnssysteme weltweit

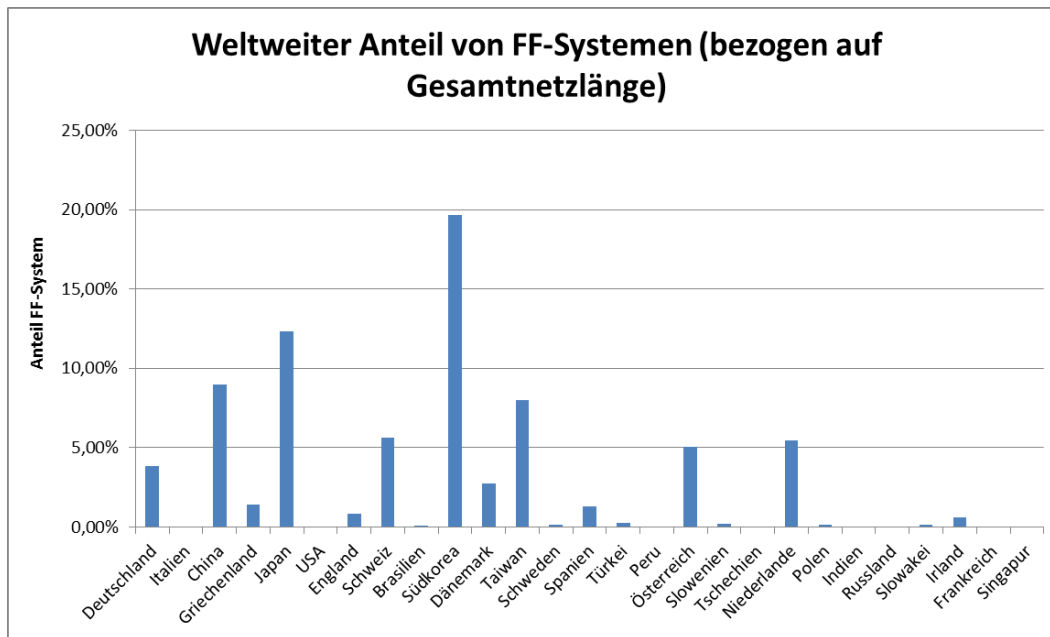


Abb. 6.4: Anteil von FF-Systemen am Schienengesamtnetz weltweit

6.4 Ansätze für die Einführung der fahrdrachtlosen Energieübertragung

Es erscheint sinnvoll, zunächst Regionen die über hohen Bestandsstreckenanteil mit FF-Systemen verfügen, mit der induktiven Energieübertragung auszustatten, da hierbei eine vergleichsweise einfache und kostengünstige Implementierung möglich ist. Dabei eignen sich insbesondere Strecken, die durchgehend mit Fester Fahrbahn ausgestattet sind. Der Anteil am existierenden Schienennetz ist jedoch extrem gering, wodurch zunächst nur ein geringer Streckenanteil mit FEÜ ausgestattet würde.

Bei Neubaustrecken (HGV) bieten insbesondere China und Europa gute Perspektiven für die Integration von induktiver Energieübertragung. Da bei diesen Strecken häufig FF-Systeme eingesetzt werden, wäre auch hier eine vergleichsweise einfache Implementierung der FEÜ möglich.

Die hohe Transportleistung in Amerika könnte bei Umstellung der existierenden Strecken auf FF-Systeme deutliche Vorteile durch die Verwendung der FEÜ erzielen. Dies ist jedoch ein langfristiger Prozess, der voraussichtlich erst mit der Erneuerung der Trassen umsetzbar ist.

Eine Umrüstung von Bestandsstrecken mit Schotteroberbau erscheint nicht sinnvoll, da diese Bauart konstruktionsbedingt Nachteile (z.B. Einfedern) mit sich bringt. Außerdem

müssten die Primärspulen bei den häufig durchzuführenden Wartungsarbeiten entfernt werden. Dies hätte starke Beanspruchungen und einen hohen Verschleiß der FEÜ-Elemente und Zuleitungen zur Folge. Außerdem müsste dafür Sorge getragen werden, dass sich kein Schotter zwischen Primärspule und Schwelle befindet, da dieser zu Lageabweichungen oder Beschädigungen der Spulen führen könnte. Nicht zuletzt lässt der Aufwand für angepasste Wartungsmaschinen (Stopfmaschinen etc.) diese Oberbauform für den Einsatz der FEÜ als nicht geeignet bzw. wirtschaftlich erscheinen. Die grundlegende Einführungsstrategie wird in Abb. 6.5 zusammenfassend dargestellt.

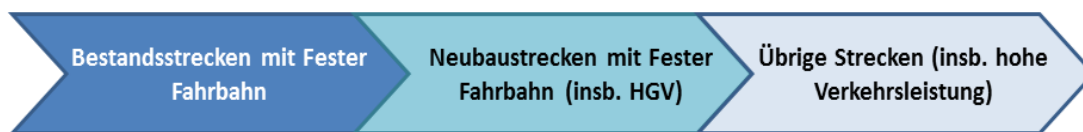


Abb. 6.5: 3 Phasen der Einführung für die FEÜ

6.5 Quellen

- [1] Volker Matthews, *Bahnbau*. Wiesbaden, Teubner Verlag, 2007.
- [2] Bernhard Lichtberger, *Handbuch Gleis*. Hamburg, DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2010.
- [3] M. Hecht et al., *Handbuch: Das System Bahn*. Hamburg, DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2008.
- [4] Günther Leykauf, "Schotteroberbau und Feste Fahrbahn im Vergleich," *ETR, Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 5, 1999.
- [5] Edgar Darr, "Feste Fahrbahn," *ETR, Eisenbahntechnische Rundschau*, no. 3, 2000. Max Bögl, *FFB Feste Fahrbahn Bögl*, 2012.
- [6] UIC. (2010, Juli) *Synopsis 2011 - UIC - International Union of Railways*. [Online]. <http://www.uic.org/spip.php?article1347>
- [7] Georgios Michas, "Slab Track Systems for High-Speed Railways," Stockholm, TSC-MT 12-005, 2012.

7 Alternative Ansätze zur Streckenausrüstung

von Dr.-Ing. Joachim Winter, Dipl.-Ing. Sebastian Streit und Johannes Steinebrei B.Sc.

7.1 Motivation

Bei der Implementierung einer induktiven Energieversorgung von Vollbahnen muss analog zur konventionellen Energieübertragung mit Oberleitung und Stromabnehmer eine unterbrechungsfreie Energieübertragung sichergestellt werden. Um die hohen Leistungsanforderungen von Vollbahnen insbesondere im Hochgeschwindigkeitsverkehr erfüllen zu können, wird – wie bereits beschrieben – die gesamte zur Verfügung stehende Fläche im Unterflurbereich des Schienenfahrzeugs zur berührungslosen Energieübertragung genutzt. Im Rahmen der zu diesem Kapitel zugehörigen Untersuchungen wurde geprüft, inwieweit im Bereich von ausgedehnten Weichenfeldern eine kontinuierliche Verlegung von Primärspulen im Fahrweg überhaupt erforderlich ist oder ob gegebenenfalls im Bereich von Weichen auf die Primärspulen verzichtet werden kann. Die bis dato durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass für ein induktives Übertragungssystem eine Vielzahl an leistungselektronischen Komponenten entlang der Strecke benötigt wird, um lokal die hochfrequenten Weichfelder zu erzeugen. Bei der für derart hohe Übertragungsleistungen (z.B. für den NGT HGV) zu verwendenden Halbleitertechnologie entsteht dabei ein großer Flächenbedarf. Deshalb sollten die hier dargestellten Untersuchungen einen Beitrag dazu leisten, Ansätze für eine Kostensenkung im Gesamtsystem durch den partiellen Wegfall von Primärspulen im Fahrweg aufzuzeigen.

Entscheidend für die Beurteilung der Möglichkeiten für eine partielle Streckenausrüstung mit Primärspulen im Bereich von Gleisvorfeldern wie z.B. von Bahnhöfen ist es, ob durch das Fehlen von Spulen im Fahrweg kritische Betriebsfälle entstehen können, in denen eine ausreichende kontinuierliche Energieversorgung der Fahrzeuge durch die Induktionsspulen nicht gewährleistet ist. Um derartige Betriebsfälle untersuchen zu können, wurde eine Referenzstrecke definiert, mit der diese kritischen Situationen abgebildet werden können.

Die betrachteten Betriebsfälle waren einerseits das Halten eines Fahrzeuges im Gleisvorfeld über mehreren Weichen, beidem das Fahrzeug selbsttätig wieder anfahren soll, und andererseits das Überfahren der Referenzstrecke mit der dafür zulässigen Höchstgeschwindigkeit. In beiden Szenarios wurde untersucht, inwieweit der Versatz der Spulen zueinander bzw. ein partielles Fehlen oder ein Ausfallen von Primärspulen im Fahrweg Auswirkungen auf ein adäquates Betriebsverhalten hat.

Dabei wurde zunächst der zu erwartende Energie- bzw. Leistungsbedarf des Zuges in den jeweiligen Betriebsfällen berechnet. Anschließend wurden mögliche Anordnungen von Primär- und Sekundärspulen der induktiven Energieübertragung in Fahrweg und Fahrzeug betrachtet, um eine abschließende Beurteilung der Machbarkeit einer nicht kontinuierlichen Verlegung der Spulen in der Strecke zu erhalten.

7.2 Referenzstrecke

Um die Relevanz der Untersuchung nachzuweisen und die vergleichsweise hohe Komplexität der Streckenführung in Gleisvorfeldern von Bahnhöfen zu veranschaulichen, wurde der in Abb. 7.1 dargestellte Gleisplan des Hauptbahnhofes Frankfurt/Main herangezogen. Wie an dem hervorgehobenen Verlauf (rote Linie) zu erkennen ist, werden Züge, die aus Richtung Norden (z.B. von Marburg oder Kassel kommend) auf die Main-Neckar Bahn in Richtung Heidelberg/Stuttgart weiterfahren sollen, üblicherweise über die Bahnsteige 12 oder 13 des Frankfurter Hauptbahnhofes geführt. Dieser Streckenverlauf entspricht den heutigen IC-Linie 26 und 62 und wäre beispielsweise als Zubringerstrecke für NGT-Link prädestiniert. [1]

Wie in Abb. 7.1 gezeigt ist, müssen dabei im Bereich unmittelbar vor den Bahnsteigen aufeinanderfolgend acht Gleiswechsel vorgenommen werden, davon drei über Doppelkreuzungsweichen. An dieser Stelle, die exemplarisch für eine Vielzahl weiterer derartiger Haltepunkte steht, würde es bei einer nicht-kontinuierlichen Verlegung von Primärspulen im Fahrweg zu einer deutlichen Reduzierung der Überdeckungsfläche zwischen Primär- und Sekundärspulen kommen. Entsprechend wurde der Fragestellung nachgegangen, ob ein Fahrzeug bei einem Stillstand in einem vergleichbaren Bereich mit mehreren aufeinander folgenden Gleiswechselstellen wie am Hauptbahnhof Frankfurt/Main in der Lage ist, selbsttätig anzufahren und den Bereich der reduzierten Übertragungsfläche zu verlassen. Darüber hinaus wurde überprüft, ob mit der verringerten Übertragungsfläche die bei einer Überfahrt mit der zulässigen Maximalgeschwindigkeit erforderliche Leistung übertragen werden kann. Bei der Betrachtung des Fahrverhaltens wurde daher sowohl der Leistungsbedarf der Fahrzeuge beim Anfahren und gleichzeitiger Stellung auf mehreren Weichenbögen betrachtet als auch der Einfluss einer schwankenden Überdeckung der Spulen beim Durchfahren des Gleisvorfeldes.

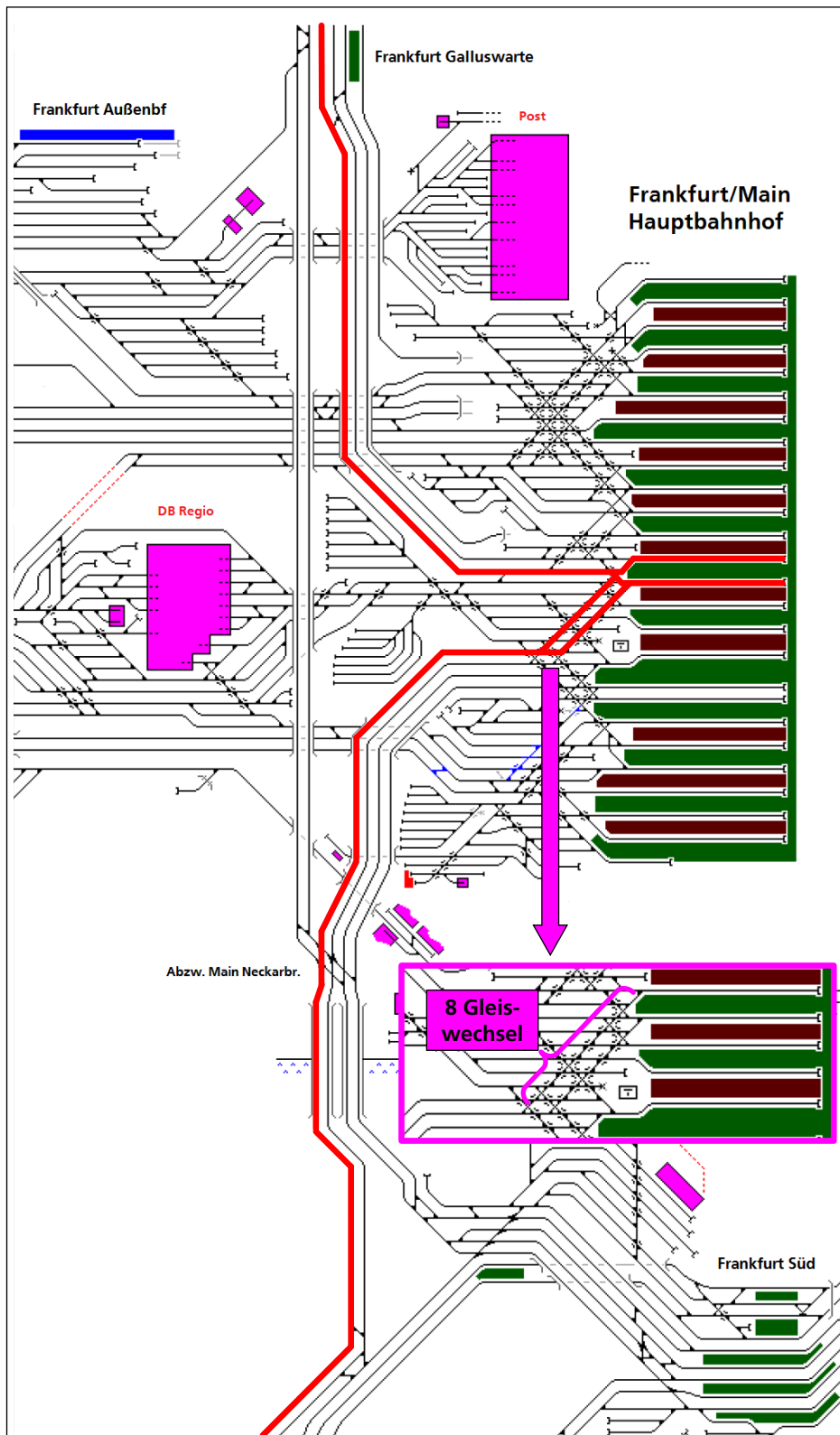


Abb. 7.1: Gleisplanausschnitt Hauptbahnhof Frankfurt/Main [2]

Zur Beschreibung des Fahrweges werden exemplarisch die Vorgaben der Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO) herangezogen. Die wichtigsten Grenzwerte sind in der folgenden Tabelle aufgelistet.

Tab. 7.1: Grenzwerte für Gleiswechsel nach EBO

Grenzwert		Wert
Höchstgeschwindigkeit	v_{\max}	40 km/h
max. Streckensteigung	s	2,5 ‰
min. Gleisabstand	x_{\min}	4 m
min. Bogenradius	$r_{z,\min}$	180 m
Weichenwinkel	c	14,04 °
Weichenneigung	1: n	1:4
Tangentenlänge	l_t	22,15 m
Weichenherzgrade	d	6 m
Abstand Weichenmitte	b	26,83 m
Weichenlänge	l_w	38,80 m

Die Gleiswechselstelle der Referenzstrecke ist symmetrisch aufgebaut, das heißt die beiden gegensinnig gekrümmten Kurvenradien besitzen den gleichen Bogenradius $r_{z,\min} = r_1 = r_2$ aufweisen. Gemäß [3] dürfen gegensinnig gekrümmte Schienen nicht direkt ineinander übergehen, sondern benötigen eine Zwischengerade mit der geschwindigkeitsabhängigen Länge l_d oder mindestens 6 m. [3] Für l_d gilt:

$$l_d = \frac{v_{\max}}{10} \quad (\text{in m})$$

Gemäß der Entwurfsrichtlinie der DB AG dürfen entgegengesetzt gekrümmte Gleisbögen direkt ineinander übergehen, sofern die folgende Bedingung erfüllt ist [4]:

$$\frac{1000}{r_1} + \frac{1000}{r_2} \leq \frac{9000}{v^2} \leq 10$$

Für eine Gleiswechselstelle mit den in Tab. 7.1 festgelegten Grenzwerten ergibt sich jedoch folgender Wert:

$$2 \cdot \frac{1000}{180} \stackrel{!}{\leq} \frac{9000}{40^2} \stackrel{!}{\leq} 10 \quad \Rightarrow 11,11 > 5,63$$

Wie zu erkennen ist, wird die Bedingungen nicht erfüllt. Daraus folgt, dass für die Gleiswechselstelle der Referenzstrecke eine Zwischengerade mit einer Länge von 6 m vorgesehen wird.

Es ist festzuhalten, dass bezüglich Gleiswechselstellen keine expliziten Vorgaben existieren, da in der Regel lokale Gegebenheiten berücksichtigt werden müssen. Als Orientierungshilfe bei der Konzeption der Referenzstrecke wurde deshalb u.a. [5] herangezogen. Darin wird die größtmögliche Weichenneigung für Regelspurbahnen mit 1:4 genannt. Dies führt zu einem Weichenwinkel von $c = 14,04^\circ$. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei einem solch steilen Winkel, keine Gleisverbindungsweichen mit dem geforderten Bogenradius realisierbar sind. Würde das Zweiggleis mit der Weichenneigung von 1:4 abzweigen und gleichzeitig eine gerade Weichenherzgrade von 6 m Länge verbaut, müssten die Gleismittellinien mindestens 12,6 m voneinander entfernt sein. Im Bereich des Gleisvorfeldes kann dieser Abstand jedoch auf bis zu 4 m sinken. Um den Bogenradius und die Mindestlänge der Weichenherzgrade einzuhalten, wurde ein Winkel von $7,61^\circ$ errechnet. Dies entspricht einer Weichenneigung von 1:7,5.

Mit den Abhängigkeiten $\tan(c) = \frac{1}{n}$ und $x_{\min} = 2 \cdot \left(l_t + \frac{l_d}{2} \right) \cdot \tan(c)$ folgt für den Gleisabstand x_{\min} :

$$x_{\min} = 2 \cdot \left(\left(l_t + \frac{l_d}{2} \right) \cdot \frac{1}{n} \right) = \left(\left(r_{z,\min} \cdot \tan\left(\frac{c}{2}\right) + \frac{l_d}{2} \right) \cdot \tan(c) \right)$$

Mit $x_{\min} = 4 \text{ m}$, $d = 6 \text{ m}$ und $r_{z,\min} = 180 \text{ m}$ resultiert ein benötigter Winkel von $c = 7,61^\circ$.

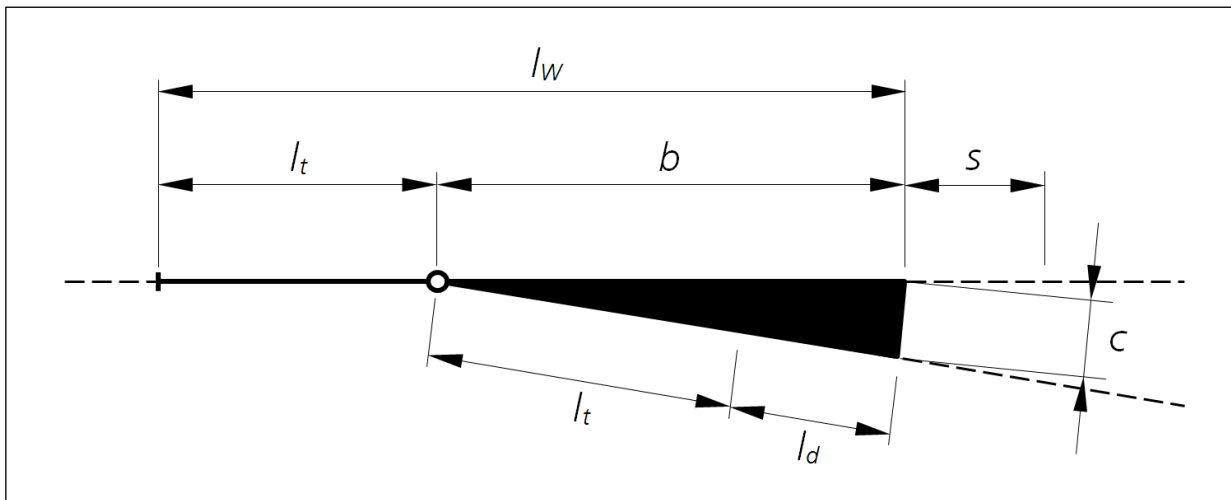


Abb. 7.2: Weichengeometrie, eigen Darstellung nach [6]

Zur weiteren Bestimmung der Geometrie der Weiche, wird zunächst die Tangentenlänge l_t bestimmt. Die Tangentenlänge bezeichnet die Strecke innerhalb der Weiche vom Weichanfang bis zur Weichenmitte und von der Weichenmitte bis zum Bogenende. Innerhalb dieser Strecke verläuft die Schiene gekrümmt.

$$l_t = r_{z,\min} \cdot \tan\left(\frac{c}{2}\right) = 180 \text{ m} \cdot \tan\left(\frac{7,61^\circ}{2}\right) = 11,97 \text{ m}$$

Wie bereits erwähnt, ist die Gleiswechselstelle symmetrisch aufgebaut. Dies bedeutet, dass l_t auf beiden Seiten der Gleiswechselstelle gleich ist. Die minimale Länge l_{GWS} der gesamten Gleiswechselstelle ist somit:

$$l_{GWS} = 2 \cdot l_W = 2 \cdot l_t + 2 \cdot \cos(c) \cdot \left(l_t + \frac{d}{2}\right) = 77,6 \text{ m}$$

Ein Zug wie beispielsweise der NGT HGV kann bei einer Gesamtlänge von 202 m somit gleichzeitig auf zwei Gleiswechselstellen komplett und einer weiteren zumindest teilweise zum Halten kommen. Im Bereich des Weichenherzens sollen zunächst keine Energieübertragungselemente installiert werden. Zum einen da die beweglichen Zungenenden das HF-Feld negativ beeinflussen bzw. den Wirkungsgrad der Energieübertragung verschlechtern und zum anderen, um eine mögliche Störung der Weichenstellmotoren, welche die Zungen positionieren, im Vorfeld auszuräumen. Das Bogenstück, welches sich aus den

beiden Tangenten l_t zusammensetzt, ist somit 23,91 m lang. Über dieser Strecke kann keine Energieversorgung stattfinden. Kommt das Fahrzeug auf zweieinhalb Gleiswechselstellen zum Halten, fehlen insgesamt 59,78 m Strecke, auf welcher keine Energieübertragung stattfinden kann.

Die Referenzstrecke, die für die beiden NGT Typen aussagekräftige Ergebnisse für die Beurteilung der Umsetzbarkeit einer nicht durchgehenden Ausrüstung mit fahrwegseitigen Spulen liefern soll, beschränkt sich im Folgenden auf eine Aneinanderreihung von mehreren Gleiswechseln. Das heißt, es wird ein Gleisvorfeld betrachtet, in dem das Anfahren und das Überfahren mehrerer Gleiswechselstellen bei kleinstmöglichem Kurvenradius untersucht werden. Die Parameter der Referenzstrecke sind in Tab. 7.2 zusammengefasst.

Tab. 7.2: Eckdaten der Referenzstrecke

Bogenradius	v_{\max}	Beschreibung
9500 m	440 km/h	v_{\max} des NGT-HGV
2500 m	250 km/h	v_{\max} des NGT-Link
190 m	40 km/h	min. Bogenradius im Betrieb
180 m	30 km/h	min. Bogenradius beim Rangieren

Die auf der Referenzstrecke im Fahrweg integrierten Primärspulen weichen hinsichtlich ihrer Länge entsprechende von den im Kapitel 9 definierten Spulen ab. Auf der freien Strecke beträgt die Spulenlänge der Primärspulen 20 m. Bei der Referenzstrecke wird jedoch lediglich die 6 m lange Zwischengerade mit Spulen ausgerüstet.

7.3 Einfluss der fahrzeugseitigen Ausrüstung auf die Spulenüberdeckung

Die Auslegung der induktiven Energieversorgung mittels Primär- und Sekundärspulen orientiert sich an dem maximalen Leistungsbedarf des NGT-HGV (vgl. Tab. 7.3), da dieser die Höchstanforderung an das Übertragungssystem widerspiegelt. Die Eckdaten des Übertragungssystems einschließlich der relevanten Parameter von Primär- und Sekundärspulen in Strecke und Fahrzeug werden im nachfolgenden Kapitel 9 angegeben. Die Ausgestaltung des Übertragungssystems hinsichtlich des Aufbaus und der vorgesehenen Komponenten wurde bereits im Kapitel 5 dargelegt.

Aufgrund der hohen Leistungsanforderungen des NGT HGV kann davon ausgegangen werden, dass bei diesem Fahrzeugtyp die im Unterflurbereich verfügbare Fläche größtmöglich ausgenutzt wird. Das heißt unabhängig von der letztendlichen Ausführung des Sekundärspulensystems kann angenommen werden, dass die maximale Anzahl an Übertragungsmodulen im NGT HGV integriert sein wird. Der NGT-HGV wird bei einer Länge der sekundärseitigen Spulen von 5 m folglich mit insgesamt 18 Sekundärspulen ausgerüstet. Aufgrund der in Kapitel 9 festgelegten geometrischen Abmessungen der Sekundärspulen, können in den Mittelwagen zwei, in den Triebköpfen ein Sekundärspulensegment untergebracht werden.

Für die Beurteilung, inwieweit bei einer partiellen Ausrüstung des Fahrweges mit Primärspulen ein unterbrechungsfreier Betrieb möglich ist, wird primär der NGT LINK als Referenzfahrzeug herangezogen. Der grundsätzliche Aufbau der sekundärseitig vorgesehenen Übertragungsmodule (Spulen, Kompensation, Schirmung etc., vgl. Kapitel 5.7.3) ist sowohl beim NGT-HGV als auch beim NGT-Link identisch. Über eine Zugsammelschiene (Zwischenkreis) wird die, in die Spulensegmenten induzierte Spannung gleichmäßig über mehrere Wagen verteilt. Der NGT LINK hat jedoch aufgrund seiner Konzeption als Zubringerzug mit einer maximalen Betriebsgeschwindigkeit von 230 km/h einen deutlich geringeren Leistungsbedarf als der NGT HGV (vgl. Tab. 7.3).

Tab. 7.3: Traktions-, Hilfsbetriebe- und Gesamtleistungsbedarf von NGT HGV und NGT LINK (Auslegungsgrößen)

	NGT HGV	NGT LINK
Traktionsleistungsbedarf	18.200 kW	2.500 kW
Leistungsbedarf für Hilfs- und Komfortbetriebe	≈ 2.000 kW	≈ 625 kW
Gesamtleistungsbedarf ($\eta_{FZG} = 0,8$)	≈ 25.000 kW	≈ 4.000 kW

Unter der Prämisse, dass in beiden Fahrzeugtypen identische Übertragungsmodule eingesetzt werden, folgt, dass bei einer Übertragungsnennleistung von 1,4 MW pro Modul im NGT LINK minimal drei Module fahrzeugseitig eingesetzt werden müssen (ohne Redundanz). Dadurch, dass der NGT LINK folglich über eine deutlich geringere Anzahl an Übertragungsmodulen verfügt, ist die Variabilität für die Anordnung der Übertragungsmodule im Unterflurbereich des NGT LINK sehr groß. Daher stellt sich die Frage, wo im Fahrzeug die Sekundärsegmente positioniert werden und welche Konsequenzen bzw. welche Vor- und Nachteile durch die Wahl der Position entstehen. Bei der Positionierung der Sekundärspulen im NGT LINK wird dabei stets der Grundsatz beibehalten, dass die Anordnung der Spulen symmetrisch ist. Dadurch wird sichergestellt, dass die Aussagen zur Übertragungsleistung für beide möglichen Fahrtrichtungen gelten. Um eine unterbrechungsfreie Energieversorgung des Fahrzeuges sicherzustellen, muss gewährleistet sein, dass sich stets mindestens ein Sekundärspulensegment teilweise im Überdeckungsbereich mit einer Primärspule befindet.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Verläufe der Überdeckungsflächen von Primär- und Sekundärspulen bei einer Überfahrt mehrerer Gleiswechselstellen miteinander verglichen. Damit sollte herausgefunden werden, ob es bei einer Überfahrt der Referenzstrecke im Bereich der Gleiswechsel dazu kommen kann, dass bei einem Halt des Fahrzeuges im Weichenbereich eine Stellung erreicht wird, bei der keine Überdeckung von Primär- und Sekundärspule vorliegt. Die Gleiswechselstellen sind hierbei entscheidend, da das optionale Freilassen des Fahrwegs mit Primärspulen im Vergleich zur freien Strecke von großer Bedeutung ist. Dazu wird die Position der Spulen zueinander betrachtet, beginnend mit dem vollständigen Einfahren des Fahrzeuges in den Bereich der ersten Gleiswechselstelle. Die Position wird dabei mit TK 1,2 für Triebkopf eins und zwei, sowie MW 1,2,3,4,5 für die jeweiligen Mittelwagen des NGT LINK bezeichnet. Beim NGT HGV ist eine Betrachtung einzelner Wagen obsolet, da aufgrund der hohen Leistungsanforderungen davon ausgegangen werden kann, dass stets die maximal mögliche Anzahl an Sekundärspulen im Fahrzeug integriert werden müssen.

7.3.1 Überfahrt der Gleiswechselstelle mit dem NGT HGV

7.3.1.1 Überdeckung bei einer Sekundärspulenlänge von 5 m

Zunächst wurde die Überfahrt der Gleiswechselstellen mit dem NGT HGV bei im Kapitel 9 entworfenen Standardsekundärspulenlänge von 5 m untersucht. Bei dieser Spulenlänge ist jeweils eine Spule für eine Integration in den Endwagen vorgesehen, während in den Mittelwagen des NGT HGV jeweils zwei Sekundärspulen integriert werden.

Bei der Standard-Spulenlänge von 5 m werden in den NGT HGV insgesamt 18 Sekundärspulen integriert – je eine in den Triebköpfen und je zwei in den acht Mittelwagen. Wie in Abb. 7.3 zu sehen ist, stoßen die beiden Spulen der Mittelwagen bündig aneinander, sodass kein Zwischenraum zwischen ihnen entsteht.

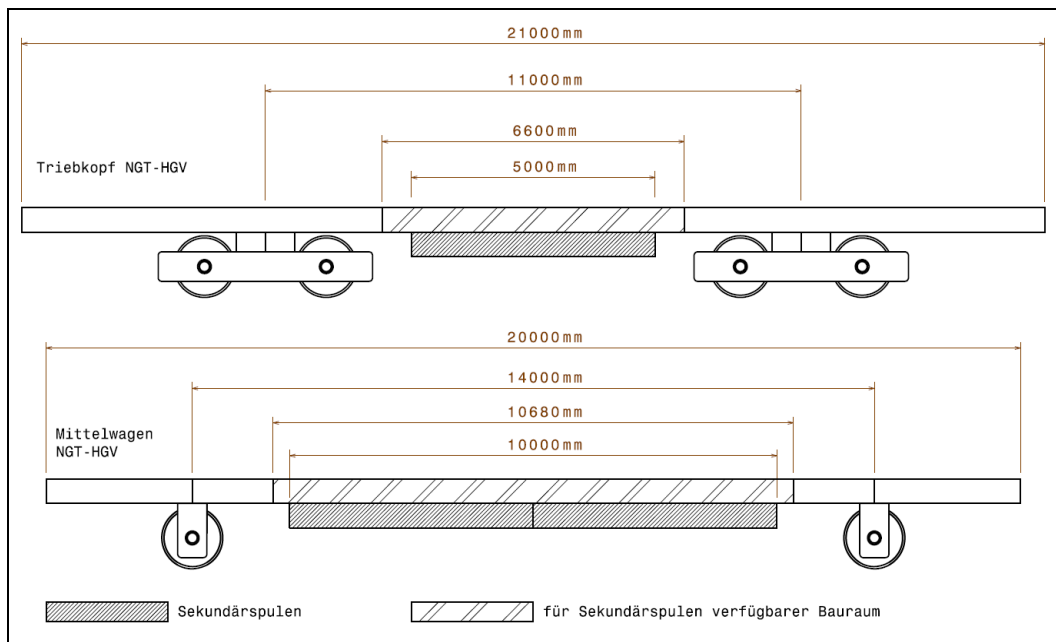


Abb. 7.3: Integration von 5 m-Spulen in den NGT HGV

Zusätzlich wurde noch betrachtet, welche Auswirkungen sich prinzipiell ergeben, wenn die Länge der mit Spulen versehenen Zwischengeraden zwischen den Weichen (ohne Primärspulen, vgl. Kapitel 7.2) von 6 m auf 12 m verdoppelt wird.

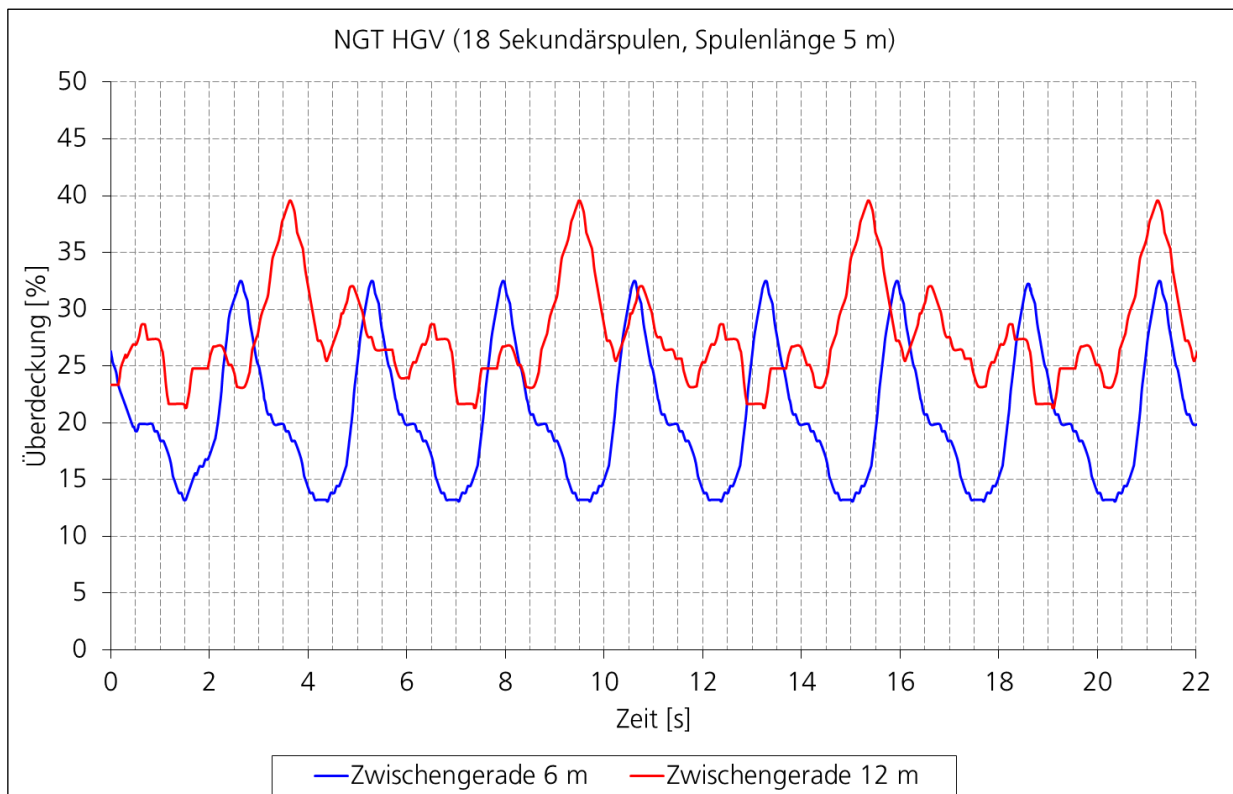


Abb. 7.4: Überdeckungsverlauf NGT HGV (18 Spulen, Spulenlänge 5 m) bei unterschiedlichen Längen der Zwischengerade

Den Verlauf der Überdeckung bei 5 m Sekundärspulenlänge für beide Varianten der Zwischengerade zeigt die obenstehende Abbildung. Da davon ausgegangen werden kann, dass stets die größtmögliche Anzahl an Sekundärspulen integriert wird, stellt NGT HGV folglich die günstigste Variante für einen Betrieb mit partieller Streckenausrüstung dar. Wie Abb. 7.4 zeigt, kommt es im Betrieb auf der betrachteten Referenzstrecke nicht dazu, dass sich keine Sekundärspulen im Überdeckungsbereich mit den Primärspulen befinden. Dennoch kommt es zum Teil zu beträchtlichen lokalen Schwankungen der Überdeckungsfläche, die auch Auswirkungen auf die Energieübertragung haben. Es wird deutlich, dass durch eine Verlängerung der Zwischengerade erwartungsgemäß eine Erhöhung der Überdeckung erreicht werden kann. Die tatsächliche Möglichkeit einer Umgestaltung von Gleiswechselstellen auf Bestandsstrecken muss jedoch im Einzelfall geprüft werden. Es ist darüber hinaus festzuhalten, dass die gesamte Fahrweggestaltung für die induktive Energieübertragung im Grundsatz in weiteren Untersuchungen präzisiert werden muss. Die Verlängerung von elektrifizierten Zwischensegmenten wie z.B. der Zwischengerade

bei Gleiswechseln kann dabei jedoch ein Ansatz sein, um bei einer partiellen Elektrifizierung des Fahrweges einen unterbrechungsfreien Betrieb sicherzustellen.

7.3.1.2 Überdeckung bei einer Sekundärspulenlänge von 2 m

Zusätzlich zu der Untersuchung des Überdeckungsverlaufs bei der vom Institut für elektrische Energiewandlung vorgeschlagenen fahrzeugseitigen Spulenlänge von 5 m wurde untersucht, welche Überdeckung resultiert, wenn die Spulenlänge sekundärseitig reduziert wird. Durch die Wahl einer kürzeren Spulenlänge kann der im Unterflurbereich zur Verfügung stehende Raum prinzipiell besser ausgenutzt werden und bietet somit grundsätzlich flexiblere Integrationsmöglichkeiten in andere Fahrzeuge als den NGT.

Durch die Reduzierung der Sekundärspulen-Module auf 2 m steigt die Gesamtanzahl der integrierten Spulen auf 46. Davon befinden sich jeweils drei Module in den Endwagen und jeweils fünf Spulen in den Mittelwagen (vgl. Abb. 7.5).

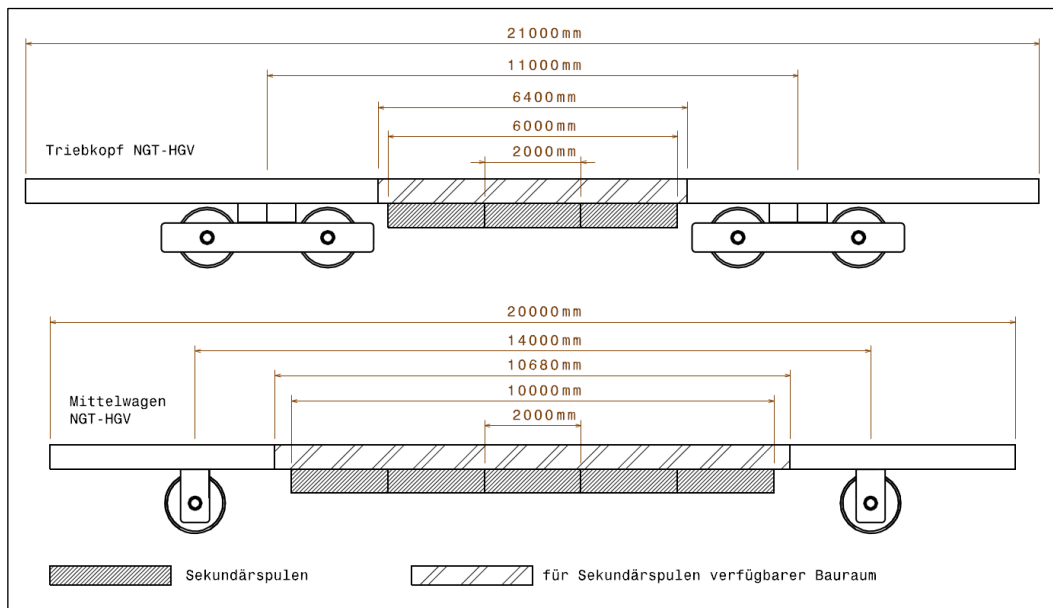


Abb. 7.5: Integration von 2 m-Spulen in den NGT HGV

Im Fall des NGT HGV führt die reduzierte Spulenlänge zunächst lediglich zu einer höheren Flächenausnutzung in den Endwagen.

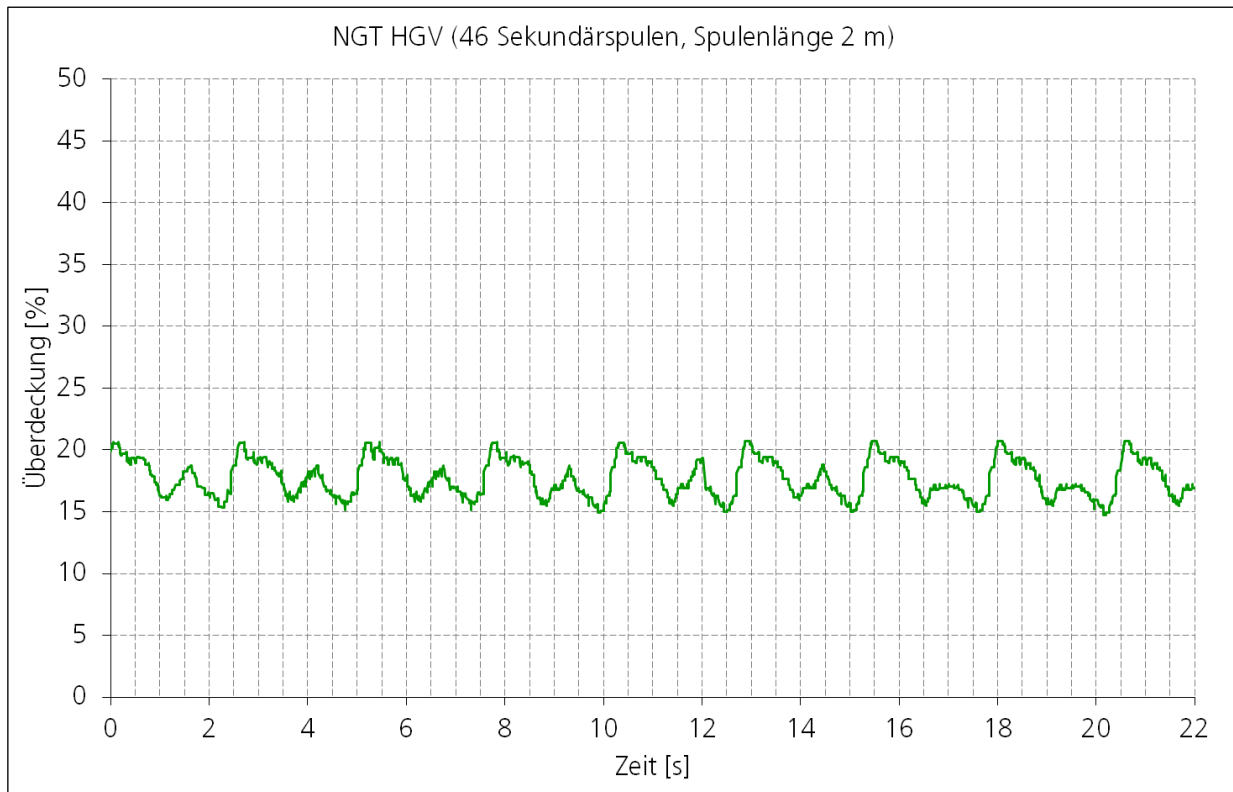


Abb. 7.6: Überdeckungsverlauf NGT HGV (46 Spulen, Spulenlänge 2 m)

Beim Vergleich des Verlaufes für 5 m-Spulen in Abb. 7.4 mit dem für 2 m-Spulen in Abb. 7.6 zeigte sich, dass die Überdeckung bei der Überfahrt der Referenzstrecke im Bereich der Gleiswechsel mit den 5 m-Spulen höhere Spitzenwerte annimmt und trotz der etwas geringeren Ausnutzung auch der Mittelwert höher liegt als der Verlauf mit 2 m-Spulen. Jedoch sind die Schwankungen bei dem Verlauf der 2 m-Spulen nicht so stark ausgeprägt. So reduziert sich die Übertragungsfläche der 5 m-Variante um ca. 20 % innerhalb von zwei Sekunden, bei der Variante mit 2 m sind dies nur 5%.

7.3.2 Überfahrt der Gleiswechselstelle mit dem NGT LINK

Abb. 7.7 veranschaulicht die Einbauverhältnisse bei der Integration von 5 m-Spulen in den NGT LINK. Aufgrund des geringeren Leistungsbedarfes des NGT LINK im Vergleich zum NGT HGV ist die erforderliche Anzahl zu integrierender Sekundärspulen im Fahrzeug bei einer gleichbleibenden Nennleistung von 1,4 MW pro fahrzeugseitigem Spulensegment (gemäß Tab. 9.19) deutlich geringer.

Abb. 7.8 zeigt den zeitlichen Überdeckungsverlauf bei der Überfahrt mehrerer Gleiswechselstellen bei 3 fahrzeugseitig installierten Spulen.

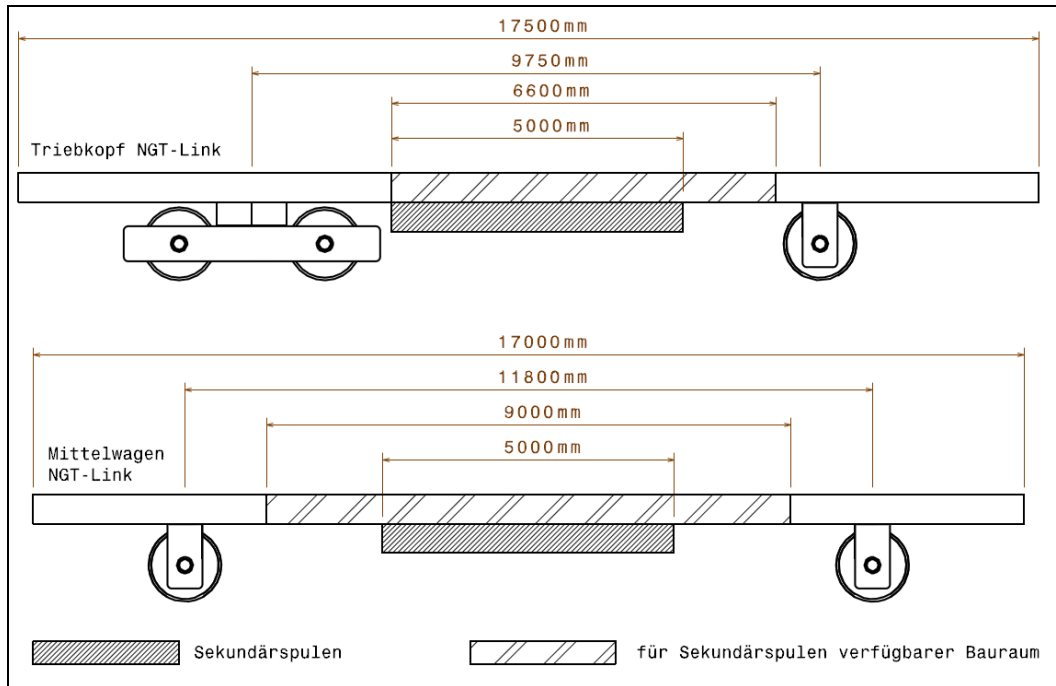


Abb. 7.7: Integration von 5 m-Spulen in den NGT LINK

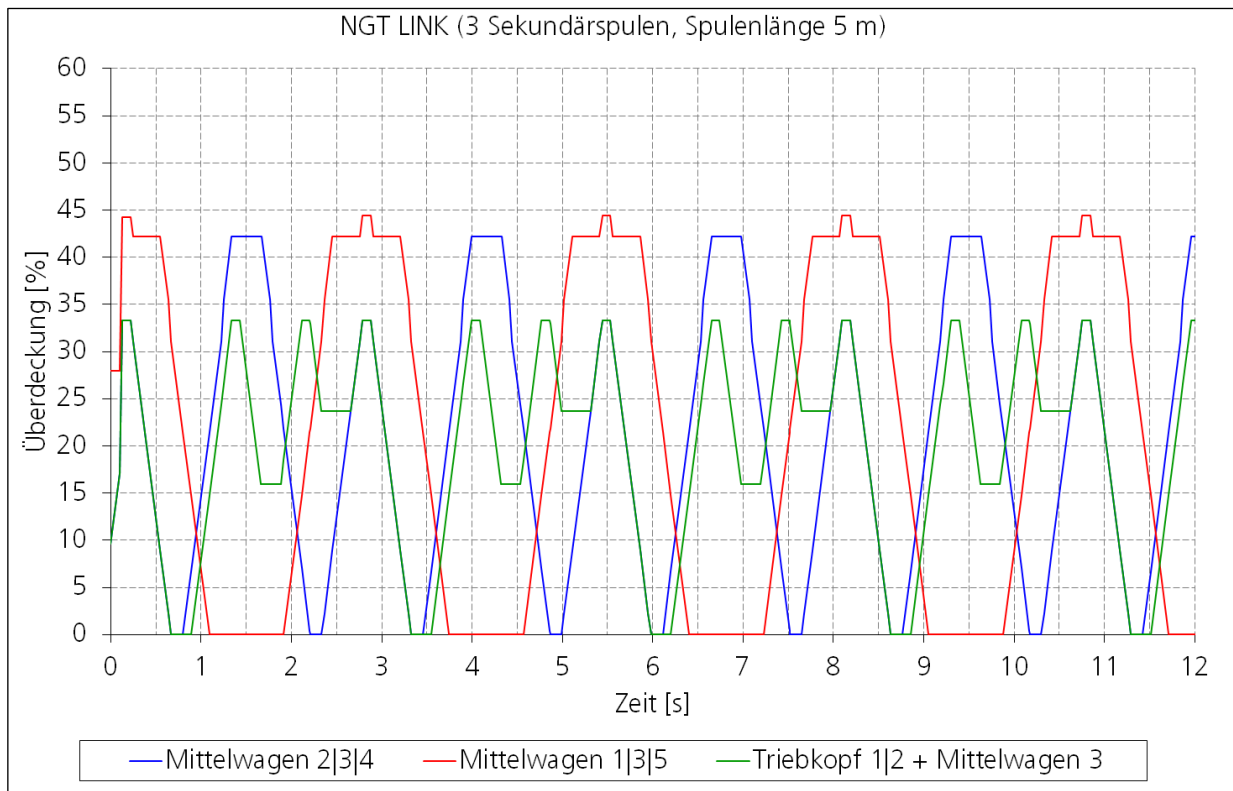


Abb. 7.8: Überdeckungsverlauf NGT LINK (3 Spulen, Spulenlänge 5 m)

Wie zu erkennen ist, geht bei jeder der drei untersuchten Varianten die Überdeckungsfläche für einen bestimmten Zeitraum auf 0 % zurück. Bei einer Nennleistung pro 5 m-Spule von 1,4 MW und einem Gesamtleistungsbedarf des NGT LINK von etwa 4 MW wären drei sekundärseitige Spulen prinzipiell ausreichend. Der Überdeckungsverlauf zeigt allerdings, dass bei einem partiellen Wegfall von fahrwegseitigen Spulen z.B. im Bereich von Gleiswechseln die Energieversorgung des Fahrzeuges kritisch ist – insbesondere beim Halten in einer ungünstigen Position.

Aus diesem Grund wurde die Spulenzahl sekundärseitig erhöht. Dadurch wird das System einerseits überdimensioniert, andererseits ergibt sich durch die Erhöhung der Spulenzahl jedoch eine Redundanz im Energie aufnehmenden fahrzeugseitigen Spulensystem, was insbesondere im Störfall die Verfügbarkeit des Fahrzeuges erhöht. Abb. 7.9 und Abb. 7.10 zeigt den Überdeckungsverlauf mit einer bzw. zwei zusätzlichen Sekundärspulen.

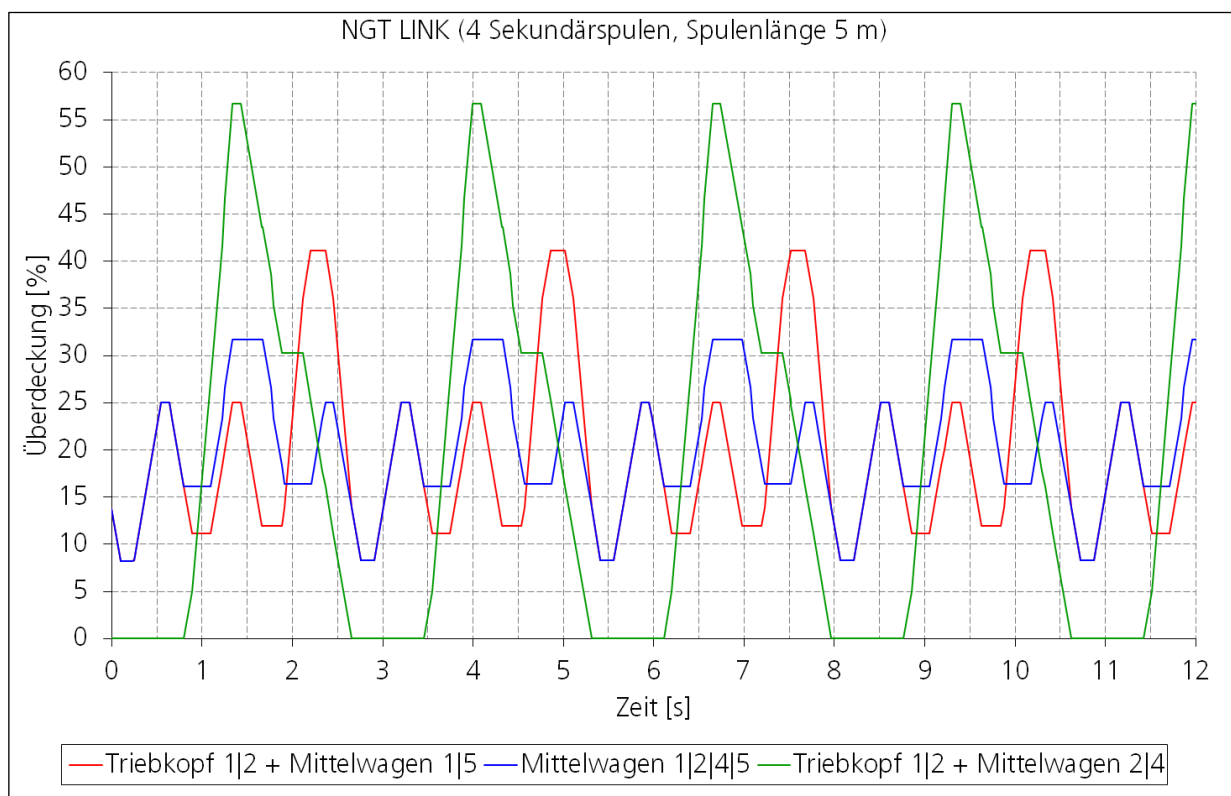


Abb. 7.9: Überdeckungsverlauf NGT LINK (4 Spulen, Spulenlänge 5 m)

Die beiden Darstellungen verdeutlichen, dass die Anordnung der Spulen im Fahrzeug bei gegebener Verteilung der Primärspulen im Fahrweg entscheidend ist, ob eine kontinuierliche Überdeckung im betrachteten Referenzfall erreicht werden kann. Gleichzeitig wird

verdeutlicht, dass selbst eine Erhöhung der Spulenzahl auf ein vertretbares Maß keine unterbrechungsfreie Energieversorgung nicht sicherstellt, da selbst bei fünf Spulen kurzzeitig die Überdeckung auf null zurückgeht.

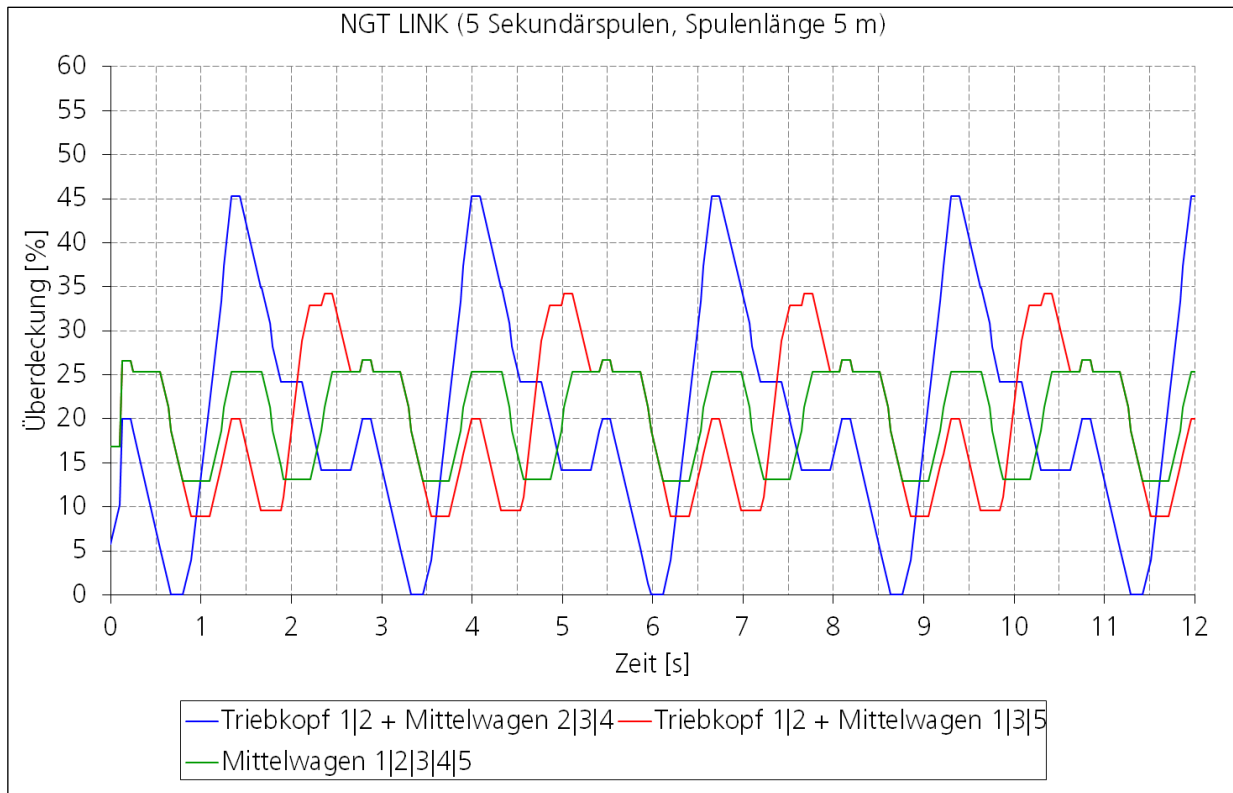


Abb. 7.10: Überdeckungsverlauf NGT LINK (5 Spulen, Spulenlänge 5 m)

Dabei wurde stets (wie oben vorgegeben) eine symmetrische Anordnung der Spulen im Fahrzeug zugrunde gelegt, um in beiden Fahrtrichtungen gleiche Betriebsbedingungen zu erhalten.

7.3.3 Leistungsbedarf beim Überfahren einer Gleiswechselstelle

Im vorigen Kapitel konnte gezeigt werden, dass die Gesamtüberdeckung beim Überfahren der Gleiswechsel (Referenzstrecke) in den anwendbaren Fällen im Bereich von ca. 20...30 % der von den Spulen umfassten Gesamtfläche liegt. Bei vier bzw. fünf im NGT LINK integrierten Spulen sinkt die Gesamtüberdeckung dabei kurzzeitig auf Werte um 10 % der Gesamtüberdeckungsfläche. Die nachfolgende Darstellung zeigt exemplarisch den Überdeckungsverlauf für vier integrierte Spulen bei Überfahrt mehrerer Gleiswechsel (vgl. Abb. 7.11).

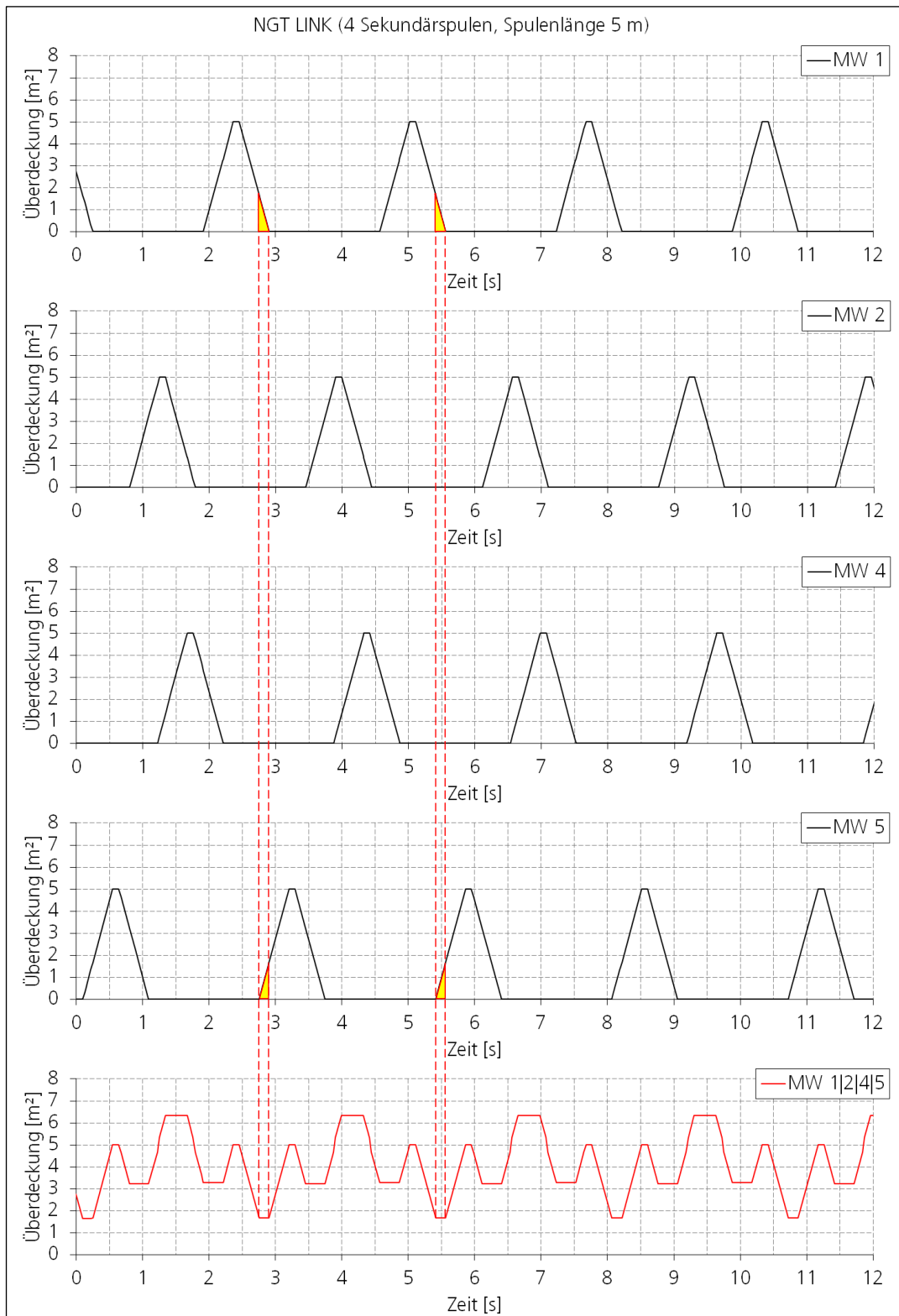


Abb. 7.11: absolute Überdeckung NGT LINK (4 Spulen, Spulenlänge 5 m)

Wie die obige Abbildung verdeutlicht, befinden sich zum Zeitpunkt der geringsten Überdeckung lediglich die Spulen in den äußeren Mittelwagen 1 und 5 in teilweiser Überdeckung mit den primärseitigen Spulen. Gleichwohl das Zeitfenster extrem kurz ist, sinkt die absolute Überdeckung hierbei stark ab. Die Überdeckungsfläche der Sekundärspule im Mittelwagen 1 mit der fahrwegseitigen Primärspule sinkt innerhalb von etwa 200 ms von ca. 1,67 m² auf ca. 0,33 m². Im gleichen Zeitfenster steigt die entsprechende Überdeckung der Spule im Mittelwagen 5 von null auf ca. 1,33 m².

Der geringen für eine Leistungsübertragung zur Verfügung stehenden Spulenüberdeckung steht allerdings auch ein geringer Leistungsbedarf der Fahrzeuge beim Durchfahren der oben skizzierten Gleiswechselstellen gegenüber. Die Gleiswechsel werden mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 40 km/h durchfahren. Unter Einbeziehung der maximal zulässigen Gleisneigung in Bahnhöfen von 2,5 ‰ entsteht sowohl für den NGT HGV als auch für den NGT LINK der in der nachfolgenden Tabelle zusammenfassend dargestellte Leistungsbedarf.

Tab. 7.4: Traktions-, Hilfsbetriebe- und Gesamtleistungsbedarf von NGT HGV und NGT LINK im Gleiswechsel ($v_{\max}=40$ km/h)

	NGT HGV	NGT LINK
Traktionsleistungsbedarf	≈ 400 kW	≈ 270 kW
Leistungsbedarf für Hilfs- und Komfortbetriebe ⁴	≈ 2.000 kW	≈ 625 kW
Gesamtleistungsbedarf ($\eta_{FZG} = 0,8$) ⁵	≈ 3.000 kW	≈ 1.120 kW

Die in Tab. 7.4 ausgewiesenen Werte zeigen einen geringen Traktionsleistungsbedarf von NGT HGV und NGT LINK bedingt durch die stark reduzierte Geschwindigkeit beim Gleiswechsel. Der Leistungsbedarf für Hilfs- und Komfortbetriebe kann dabei in Abhängigkeit von den betrieblichen Randbedingungen den Traktionsleistungsbedarf deutlich übersteigen. Allerdings kann je nach Ausgestaltung des betrieblichen Konzeptes mit induktiver Energieübertragung der Leistungsbedarf für Hilfs- und insbesondere Komforteinrichtungen durch ein adäquates Energiemanagement im temporär deutlich reduziert werden. Bezogen auf die von einer Sekundärspule umfasste Fläche von 5 m² beträgt die Leistungsdichte der Übertragung mit den Werten aus Tab. 9.19 ca. 280 kW/m². Es muss in

⁴ Die angegebenen Werte stellen den maximalen Leistungsbedarf für Hilfs- und Komfortbetriebe dar. Der tatsächliche Leistungsbedarf ist abhängig von den betrieblichen Randbedingungen.

⁵ s.o.

weiterführenden Untersuchungen zwingend geprüft werden, ob tatsächlich bei einer teilweisen Überdeckung von Primär- und Sekundärspule (wie beispielsweise im Fall der geringstmöglichen Überdeckung gemäß Abb. 7.11) eine hinreichende Leistungsübertragung sichergestellt werden kann.

7.3.4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein partielles Weglassen von Primärspulen im Fahrweg unter gewissen Randbedingungen möglich ist. Das Freilassen von Weichen und Bögen im Bereich von Gleisvorfeldern von Bahnhöfen würde mehrere Vorteile mit sich bringen. Besonders hervorzuheben ist dabei das Einsparen von leistungselektronischen Bauelementen. Analog zur freien Strecke wäre nach derzeitigem Entwurf etwa im Abstand von 20 m eine entsprechende Versorgungselektronik für die Primärspulensegmente vorzusehen. Es ist in weiteren Untersuchungen zu prüfen, ob bei der Nachrüstung von Bestandsstrecken die zur Verfügung stehende Fläche für den Umfang der unterzubringenden Leistungselektronik im Einzelfall ausreichend sein kann. Darüber hinaus kann durch das Weglassen von Primärspulen in definierten Bereichen die Streckenausrüstung vereinfacht werden, da für die Vielfalt an Weichengeometrien und Bögen mit unterschiedlichen Radien keine individuellen Ausführungsvarianten bei der Integration der Spulen in den Fahrweg erforderlich sind. Allerdings muss untersucht werden, inwieweit der oben betrachtete Referenzfall tatsächlich verallgemeinert werden kann, sodass die Anordnung der Spulen im Fahrzeug eine unterbrechungsfreie Energieübertragung in jedem möglichen Fall sicherstellt. Das Antriebskonzept des NGT LINK sieht bordnetzseitige Energiespeicher vor, sodass bei einer Umsetzung eines Versorgungskonzeptes mit nicht durchgehend verlegten Spulen in Betriebsfällen mit kritischer Energieversorgung gespeicherte Energie zu Kompensation verwendet werden kann. Nichtsdestotrotz kann bei einer Einführung eines induktiven Energieübertragungssystems nicht davon ausgegangen werden, dass jedes Fahrzeug mit Energiespeichern ausgerüstet wird, sodass es zwingend erforderlich ist, das System so zu gestalten, dass ein unterbrechungsfreier Betrieb auch ohne Energiespeicher möglich ist.

Die dargestellten Untersuchungsergebnisse gehen derzeit im Wesentlichen von einer Spulenlänge von 5 m aus. Auf Basis weiterer Untersuchungen zum Übertragungssystem kann weiterführend geprüft werden, welche alternativen Spulengeometrien sinnvoll sind und inwieweit eine möglicherweise homogenere Verteilung zu besseren Ergebnissen führt. Hinsichtlich des im Rahmen dieses Kapitels untersuchten Konzeptes ist für die weiteren Betrachtungen von besonderem Interesse, welche elektrische Leistung bei einer

teilweisen Überdeckung von Primär- und Sekundärspulen übertragen werden kann. Durch die Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Leistungsübertragung kann beurteilt werden, wie die Fahrzeuge bei nicht durchgehend verlegten, fahrwegseitigen Spulen konzipiert werden müssen und welche Anforderung an das bordnetzseitige Energiemanagement gestellt werden, um die schwankende Leistungsübertragung zu beherrschen.

7.4 Quellen

- [1] DB Netz AG, „EC-/IC-Netz 2013,“ 2013. [Online]. Available: http://www.bahn.de/p/view/mdb/bahnintern/services/mobilitaet_service/pdf_div.content/zug/streckenkarten_fernverkehr/mdb_100137_ecic_2013_kb.pdf. [Zugriff am 22 01 2014].
- [2] SporenplanOnline, „Sporplaner,“ 17 05 2009. [Online]. Available: http://www.sporplan.nl/html_de/index.html. [Zugriff am 22 01 2014].
- [3] W. Schiemann, „Schieneverkehrstechnik, Grundlagen der Gleistrassierung,“ Teubner Verlag, 2002.
- [4] Deutsche Bahn AG, *Trassierungsrichtlinie RiL 800.0110*, Karlsruhe: DB Services Technische Dienste GmbH, 1999.
- [5] Thyssen-Krupp GfT Gleisbau GmbH, *Oberbauhandbuch*, Essen: Thyssen-Krupp, 2013.
- [6] P. Fengler, „Weichen: Grundlagen und Geometrie G 09 Version 02-22,“ [Online]. Available: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/vkw/ibv/gvb/download_gvb/lehrmaterialien/Grundl_G/G%2009.pdf. [Zugriff am 23 01 2014].

8 Versorgungselektronik

von Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour und Dipl.-Ing. Mike Böttigheimer

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt die Konzipierung der Energieversorgung des FEÜ-Führungssystems. Ausgehend von den in Kapitel 0 dargestellten Randbedingungen wird für den Einspeisewechselrichter ein Grobkonzept entworfen. Die Freiheitsgrade Spannungsebenen, der Gleichspannungszwischenkreis und die Betriebsfrequenz werden anhand verschiedener Betriebsarten festgelegt und anhand des Detailentwurfs validiert.

Für den Aufbau einer Versorgungselektronik wird ein bestehendes System betrachtet. Am Beispiel des Schienennetzes in der Bundesrepublik Deutschland wird erläutert, wie eine Bahnenergieversorgung aufgebaut ist. Zunächst werden die zu übertragenden Leistungen der Züge verglichen. Anschließend wird die Übertragung vom 110kV Netz bis zum Zwischenkreis im Zug betrachtet.

8.1 Vergleich der Fahrzeugdaten

In Tab. 8.1 ist ein Vergleich der wichtigsten Fahrzeugdaten des ICE 3 [1] mit dem NGT HGV [2] und dem NGT Link [2] dargestellt.

Tab. 8.1: Übersicht Fahrzeugdaten

	ICE3	NGT HGV (Halbzug)	NGT Link
Antriebsleistung	8 MVA	18,3 MVA	2,5 MVA
Länge	200 m	202 m	120 m
Betriebsgeschwindigkeit	300 km/h	400 km/h	230 km/h
Max. Geschwindigkeit	330 km/h	480 km/h	276 km/h

8.2 Einspeisung in Deutschland

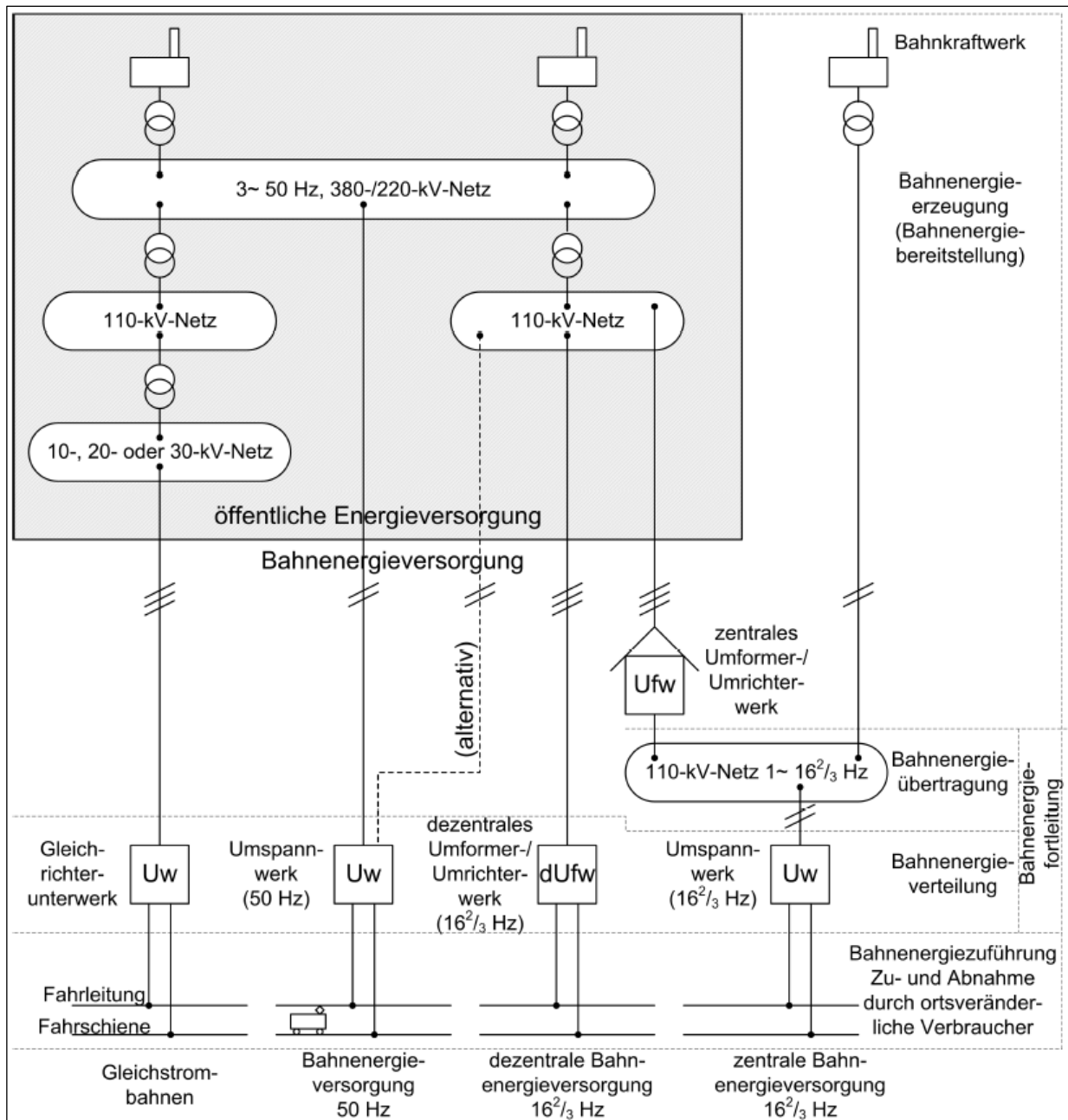


Abb. 8.1: Bahnenergieversorgung [3]

In Abb. 8.1 ist das Übertragungssystem der Deutschen Bahn dargestellt. Die Einspeisung der Bahnenergie wird unterteilt in Bahnenergieerzeugung (Kraftwerk), Bahnenergieübertragung (110 kV-Netz), Bahnenergieverteilung (Unterwerke) und Bahnenergiezuführung (Speiseleitung). Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Bahnenergieversorgung sind ele-

mentare Faktoren für die Zuverlässigkeit des Betriebes einer elektrischen Bahn. Alle Betriebsmittel bis auf die Fahrleitung sind redundant gestaltet.

8.2.1 Gesamtsystemübersicht

Die standardisierte Form der Energieübertragung für Fernbahnen in Deutschland erfolgt aus dem Umspannwerk (Unterwerk) mit 16,7 Hz. Die Energie kann sowohl aus dem Bahnnetz als auch aus dem öffentlichen Versorgungsnetz (Umformer-/Umrichterwerk) bezogen werden.

In diesem AP wird die Betrachtung ab dem Unterwerk vorgenommen. Die übergeordnete Ebene (Bahnenergieübertragung 110kV-Netz) bleibt unverändert. Wird ein höherer Leistungsbedarf auf der Strecke gefordert, als durch derzeitige Unterwerke bereitgestellt werden kann, so ist es notwendig neue Unterwerke zu errichten.

8.2.2 Unterwerke

Im Netz der DB Energie befinden sich 176 Unterwerke mit Stand von 2004. Diese sind jeweils mindestens mit zwei bis drei Umspannern à 10 oder 15 MVA bestückt [4]. Diese Leistungsklasse gilt für das gesamte Bahnnetz und beinhaltet sowohl Schnellfahrtstrecken als auch Strecken von Regionalbahnen. Bei reinen Hochgeschwindigkeitsstrecken kann davon ausgegangen werden, dass die Leistungen höher sind. Bei Neubaustrecken mit Geschwindigkeiten bis 300km/h beträgt der Unterwerksabstand 20 bis 40km [4].

8.2.3 Leitungen

Bei einem ICE3 mit einer Nennleistung von 8 MVA, fließen bei 15 kV Einspeisespannung ca. 530 A. Beim NGT HGV würden bei derselben Spannung 1.670 A fließen. Die Leitungen müssen für die Leistungen der Unterwerke ausgelegt sein [5].

8.2.4 Verwendbare Synergien aus vorhandener Technik für die Systemintegration

Die Versorgungselektronik soll so ausgelegt werden, dass sowohl der Bau neuer Strecken als auch die Integration in ein vorhandenes System mit ressourcen- und kostenschonenden Mitteln erreichbar sind.

Die Systemintegration beinhaltet die Wiederverwendung bestehender Ressourcen. Eine weitere wichtige Anforderung ist der parallele Betrieb einer induktiven Energieübertragung mit dem NGT und der Betrieb von Bahnen mit Oberleitungen. Im neu entwickelten Konzept wird erläutert, dass es möglich ist die Speiseleitungen als Übertragungsleitung zu erhalten. Damit ist es möglich eine Strecke sowohl mit Oberleitungen als auch mit induktiver Energieübertragung zu betreiben.

Ein sinnvoller Aufbau des Versorgungsnetzes kann darin bestehen, dass Komponenten wieder eingesetzt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass es sich um Komponenten handelt, die standardisiert auch in großen Stückzahlen hergestellt werden.

Die Speiseleitungen des Systems mit Stromabnehmern können zur Übertragung erhalten bleiben. Durch die Einführung eines Zuführsegmentes kann die Übertragung aus dem Unterwerk wie bei bestehenden Systemen mit 15...25 kV über die vorhandenen Speiseleitungen (wie z.B. Verstärkungsleitungen) erfolgen.

8.3 Systemkomponenten

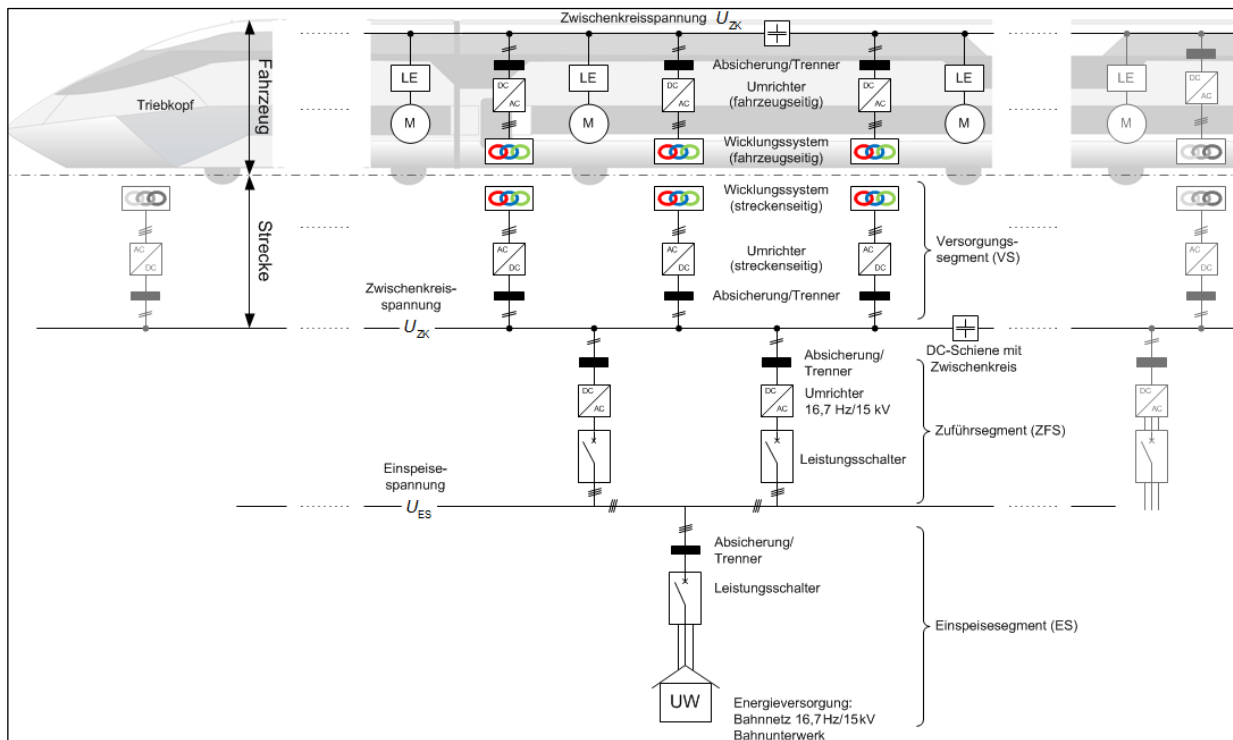


Abb. 8.2: Systemskizze

Die Versorgungselektronik wird in mehrere Abschnitte unterteilt. Alle elektrischen Komponenten im Fahrzeug werden als fahrzeugseitige Komponenten bezeichnet. Das Versorgungssegment beinhaltet die Spulen in der Strecke und deren Umrichter. Das Zuführungssegment enthält eine beliebige Anzahl Wechselrichter welche die Spannung zwischen der Einspeisespannung U_{ES} und der Zwischenkreisspannung U_{ZK} transformieren. Das Einspeiseselement bezeichnet die Ebene der Unterwerke.

8.3.1 Einspeiseselement (ES)

Die Abstände der Einspeisepunkte sind festzulegen. Die Länge eines Einspeiseselementes ist maßgeblich abhängig vom maximalen Leistungsbedarf eines Zuges. Dieser ist mit 25 MVA festgelegt. In der Folge sind bedeutende Parameter der Abstand von zwei Zügen, sowie bei einer Systemintegration der Abstand vorhandener Unterwerke und deren Leistungen.

8.3.2 Zuführsegment (ZFS)

Das Zuführsegment ist eine Zwischenebene. Die Einführung dieses Segments resultiert aus wirtschaftlich-technischen Überlegungen. Mit mehreren Zuführsegmenten ist es möglich die technisch bedingte Wahl der niedrigen Zwischenkreisspannung von 1,4 kV zu kompensieren. Die Auslegung des Zuführsegments ist eng mit der Zwischenkreisspannungsauslegung verzahnt.

8.3.3 Versorgungssegment (VS)

Festzulegen ist die Länge eines Versorgungssegmentes. Die Spule des Versorgungssegmentes wird mit dem zugehörigen Wechselrichter in ein Feste-Fahrbahn-Segment (FF-Segment) integriert. Die Fertigbarkeit ist ein entscheidender und limitierender Faktor. Idealerweise ist die Topologie aus Spulen und Wechselrichtern dieselbe wie auf der Fahrzeugseite. Dies ist technisch nicht zu 100% möglich, da in jedem Wagon nicht nutzbare Flächen für Räder und Radkästen vorhanden sind. Konkrete Daten können Kapitel 9 entnommen werden, in welchem das Übertragungssystem ausgelegt wird.

8.3.4 Fahrzeugseitige Komponenten (FZS)

Der Bauraum für die Spulen im Triebkopf und in den Mittelwagen Wagon ist mit 6,6 m beziehungsweise 10,68 m vorgegeben. Die Spulenauslegung wird in Kapitel 9 bestimmt. Die Länge der Spule sollte auf der Fahrzeugseite 5m betragen, während auf der Streckenseite 20 m geeignet sind. Festzulegen ist die Anzahl und der Leistungsbedarf der Wechselrichter.

8.4 Auslegung

In diesem Kapitel wird die Versorgungselektronik ausgelegt. Zunächst erfolgt die Auslegung des Einspeisesegments. Die Auslegung des Zwischenkreises ist eng mit der Auslegung des Zuführsegments verbunden. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Auslegung der Versorgungssegmente.

8.4.1 Auslegung des Einspeisesegments

Für die Auslegung des Einspeisesegmentes werden in einem ersten Schritt Zugabstände abhängig von Einspeisesegmenten, sowie mehrere Züge in einem Segment untersucht. Die Möglichkeit des Schließens von Kuppelstellen an Segmentübergängen wird betrachtet. Im dritten Teil dieses Kapitels werden die Unterwerke ausgelegt. Die Betrachtung des Einspeisesegments erfolgt ab der Ebene der Unterwerke, also der Spannungsebene ab 15-25 kV. Hierarchisch höhere Infrastruktur der Energieübertragung wird nicht betrachtet.

8.4.1.1 Zugabstände

Für die Betrachtung der Zugabstände wird Abb. 8.3 herangezogen. Es sind drei Einspeisesegmente (A, B und C) dargestellt. Die Segmente haben jeweils Doppelleitungen für beide Fahrrichtungen. Zwischen den Einspeisesegmenten sind Kuppelstellen vorhanden. Kuppelstellen können sowohl Segmente zusammenschalten, als auch Doppelleitungen. Es sind außerdem drei NGTs eingezeichnet, die für die folgenden Betrachtungen notwendig sind. Zwischen den drei NGTs und dem Zwischenkreis befindet sich das Versorgungssegment, welches aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht eingezeichnet ist.

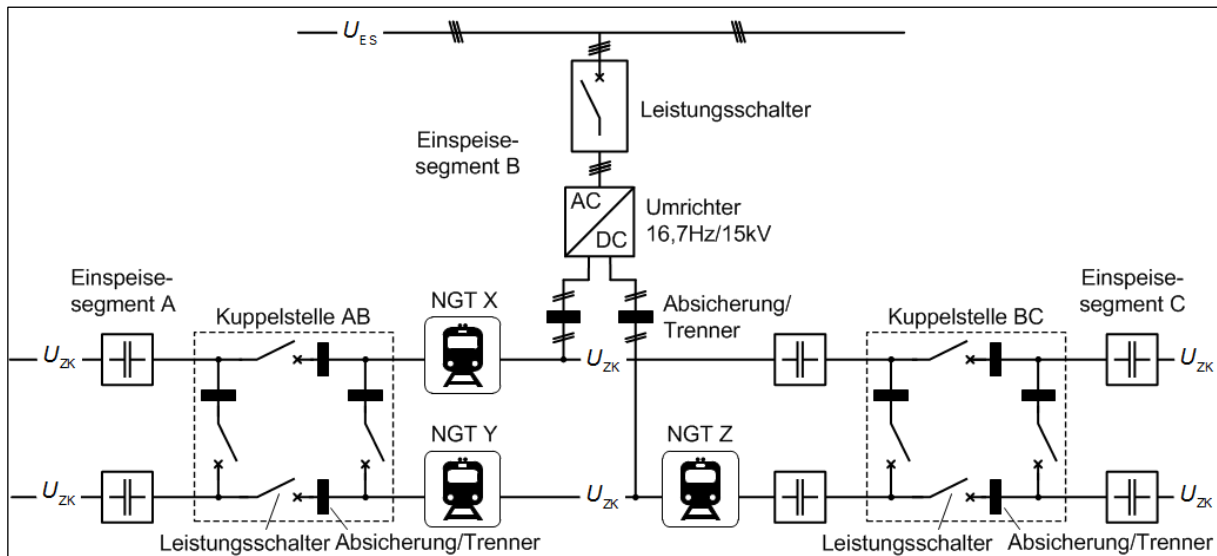


Abb. 8.3: Zugabstände und Kuppelstellen

Zwei Züge in einem Segment bei verschiedenen Fahrrichtungen

Befinden sich zwei NGTs (NGT X und NGT Y in Abb. 8.3 im Segment B in verschiedenen Fahrrichtungen, so muss das Unterwerk B folgende Leistung bereitstellen:

$$P_{UWB} = 2 \cdot P_{NGT,HGV} = 2 \cdot 25 \text{ MVA} = 50 \text{ MVA}$$

Zwei Züge in einem Segment in derselben Fahrrichtung

Befinden sich zwei NGTs (NGT Y und NGT Z in Abb. 8.3 im Segment B in derselben Fahrrichtung, so muss vom Unterwerk B die Leistung für beide NGTs bereitgestellt werden.

$$P_{UWB} = 2 \cdot P_{NGT,HGV} = 2 \cdot 25 \text{ MVA} = 50 \text{ MVA}$$

Lässt man zwei NGTs in einer Fahrrichtung zu, so ist es möglich, dass sich in der anderen Fahrtrichtung ebenfalls zwei NGTs befinden. Das Unterwerk B müsste dazu die Leistung für alle vier Züge bereitstellen.

$$P_{UWB} = 4 \cdot P_{NGT,HGV} = 4 \cdot 25 \text{ MVA} = 100 \text{ MVA}$$

8.4.1.2 Schließen von Kuppelstellen

Zur Versorgung mehrerer Züge in einem Segment können Kuppelstellen zum Nachbarsegment geschlossen werden. Somit kann der Leistungsbedarf eines Unterwerkes verringert werden. Allerdings müssen die entsprechenden Ströme über große Entfernungen transportiert werden. Das Schließen von Kuppelstellen im Nennbetrieb ist nur bei einer niedrigen Taktfrequenz der Züge sinnvoll. Die Zugabstände $s_{NGT,HGV}$ sollten mindestens so groß sein wie zwei Einspeisesegmentlängen s_{ES} .

$$s_{NGT,HGV} = 2 \cdot s_{ES}$$

Sobald sich im Nachbarsegment ein weiterer Zug befindet, ist eine Überbrückung der Energie aus dem Nachbarsegment nicht gewinnbringend. Für einen Nennbetrieb mit möglichst kurzen Taktzeiten wird das Schließen von Kuppelstellen vernachlässigt. Werden die Taktzeiten größer als das Minimum gewählt, kann die Speisung aus dem Nachbarsegment sinnvoll sein.

8.4.2 Unterwerksauslegung

Im Folgenden werden drei Varianten für die Unterwerksabstände und die Unterwerksleistungen vorgestellt. Hierbei sollen exemplarisch die Abhängigkeiten der Taktzeiten und der Leistungen auf die Unterwerksabstände dargestellt werden. Es werden Mindesttaktzeiten, Mindestleistungen und Maximalabstände der Unterwerke vorgeschlagen.

8.4.2.1 Variante 1 (ein- und zweigleisig)

Für einen NGT HGV voller Leistung ($P_{NGT,HGV} = 25 \text{ MVA}$) sollen die Unterwerksabstände bestimmt werden. Es wird von einer durchschnittlichen Unterwerksleistung $P_{Uw,Var1} = 25 \text{ MVA}$ ausgegangen.

Definiert man für eine eingleisige Strecke $t_{Takt,Ein} = 6 \text{ min}$ als Taktabstand, so ergibt sich bei voller Geschwindigkeit $v_{NGT,HGV} = 480 \text{ km/h}$ folgender Unterwerksabstand s_{Uw} .

$$s_{Uw} = v_{NGT,HGV} \cdot t_{Takt,Ein} = 480 \text{ km/h} \cdot 10^{-1} \text{ h} = 48 \text{ km}$$

Für eine zweigleisige Strecke muss davon ausgegangen werden, dass sich zwei Züge in einem Segment befinden. Deshalb muss bei derselben Leistung und denselben Unterwerksabständen das Nachbarsegment frei sein und in der Folge der Takt doppelt so groß sein.

$$t_{Takt,Zwei} = 2 \cdot t_{Takt,Ein} = 12 \text{ min}$$

Es gilt hierbei die durchschnittliche Unterwerksleistung von $P_{Uw,Var1} = 25 \text{ MVA}$. Befindet sich im Nachbarsegment kein Zug so kann die Kuppelstelle zum Nachbarsegment geschlossen werden und die Leistung des Nachbarunterwerkes zur Einspeisung mitverwendet werden.

8.4.2.2 Variante 2 (zweigleisig)

Eine bessere Variante für die Auslegung der Unterwerksabstände ist, von doppelter Leistung der Unterwerke auszugehen. Ein Unterwerk mit $P_{Uw,Var2} = 50 \text{ MVA}$ kann eine zweigleisige Strecke, in der sich antiparallel jeweils ein Zug befindet, versorgen, ohne dass ein Nachbarsegment zugeschaltet werden muss. Hier kann als sinnvoller Takt der Abstand zwischen 2 Unterwerken gewählt werden. Es ergibt sich

$$t_{Takt,Zwei} = \frac{s_{Uw,Var2}}{v_{NGT,HGV}} = \frac{48 \text{ km}}{480 \text{ km/h}} = 16 \text{ min}$$

8.4.2.3 Variante 3 (zweigleisig)

Soll der Takt der Variante 2 für die zweigleisige Strecke halbiert werden müssen die Unterwerksabstände halbiert werden:

$$s_{Uw,Var3} = \frac{s_{Uw,Var2}}{2} = \frac{48 \text{ km}}{2} = 24 \text{ km}$$

8.4.2.4 Zusammenfassung der drei Varianten

In der nachfolgenden Tabelle sind für die drei vorgestellten Varianten jeweils die Mindesttaktzeit t_{Takt} , der maximale Abstand der Unterwerke s_{Uw} sowie die minimale Unterwerksleistung P_{Uw} dargestellt.

Tab. 8.2: Unterwerksabstände und Taktzeiten für zweigleisige Strecken

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Taktzeit t_{Takt}	12 min	6 min	3 min
Unterwerksabstand s_{Uw}	48 km	48 km	48 km
Unterwerksleistung P_{Uw}	25 MVA	50 MVA	50 MVA
Stromfluss $I_{ES}(U_{ES} = 15\text{kV})$	1,67 kA	3,3 kA	3,3 kA
Stromfluss $I_{ES}(U_{ES} = 25\text{kV})$	1 kA	2 kA	2 kA

Welche Variante für eine konkrete Auslegung gewählt wird kann pauschal nicht beantwortet werden. Dazu muss bei einer Systemintegration die vorhandene Streckentopologie eingehend untersucht werden. Bei Bedarf müssen für hohe Taktzeiten neue Unterwerke errichtet werden. Für einen Streckenneubau sind aus technischen Gründen alle drei Varianten für zweigleisige Strecken denkbar. Wirtschaftliche Überlegungen [6] werden den Ausschlag für eine dieser Varianten geben.

8.4.3 Stromtragfähigkeit von Freileitungen

Um die Energie entlang des Einspeisesegments zu übertragen, können Kabel oder wie im bestehenden System Freileitungen, genutzt werden. Bei einer Neubaustrecke können Freileitungen als Standardbauteil bezogen werden, während bei einer Systemintegration die Oberleitungen weiterhin genutzt werden können.

Beim NGT HGV fließen unter Vollast 1,67 kA. Um einen Strom von 1,67 kA übertragen zu können ist laut DIN 48 201 [7] ein Bündelleiter bestehend aus zwei Leitungen mit jeweils 400 mm² notwendig. Werden zwei NGT HGV Züge in einem Segment versorgt so beträgt der Übertragungsstrom 3,3 kA. Hierfür muss ein Bündelleiter mit 3 Seilen mit einem jeweiligen Querschnitt von 500 mm² installiert werden.

Für einen hypothetischen Strom von 17,86 kA, wie er bei einer Spannung von 1,4 kV angenommen wird, wären 17 Leiter mit einem Querschnitt von 500 mm² notwendig. Sinnvoll ist es die Übertragungsströme maximal auf 4,4 kA auszulegen, da dieser Strom mit einem Bündelleiter beherrschbar ist. Der Bündelleiter hätte 4 Leitungen mit jeweils einem Querschnitt von 500 mm².

In der nachfolgenden Tabelle ist eine Übersicht über die Freileitungsvarianten dargestellt.

Tab. 8.3: Freileitungsauslegung

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Leistung	25 MVA (eingleisig)	50 MVA (zweigleisig)	50 MVA (zweigleisig)
Spannung	15 kV	15 kV	25 kV
Strom	1,67 kA	3,3 kA	2 kA
Querschnitt	400 mm ²	500 mm ²	500 mm ²
Anzahl Leiter	2	3	2

8.4.4 Auslegung der Zwischenkreisspannungsebene

In diesem Kapitel werden die Übertragungsverluste abhängig von verschiedenen Zwischenkreisspannungen untersucht. Des Weiteren wird auf die Halbleitertechnologie eingegangen und damit die Möglichkeit die Zwischenkreisspannung groß zu wählen. Am Ende des Kapitels werden 2 Vorschläge für sinnvolle Zwischenkreisspannungen gemacht.

8.4.4.1 Ströme auf der Zwischenkreisschiene

Der Zwischenkreis soll in einem festen Fahrbahnsegment als Kupferschiene verbaut werden [8]. Je höher die Zwischenkreisspannung gewählt wird, desto geringer sind die Ströme und damit die Übertragungsverluste. Bei 1,4 kV ergibt sich für eine Last von 25 MVA folgender Strom auf der Zwischenkreisschiene:

$$I_V = \frac{S_{\bar{U}}}{U_{\bar{U}}} = \frac{25 \text{ MVA}}{1,4 \text{ kV}} = 17,86 \text{ kA}$$

Wird die Zwischenkreisspannung höher gewählt, zum Beispiel 3 kV, ergeben sich entsprechend kleinere Übertragungsströme:

$$I_V = \frac{S_{\bar{U}}}{U_{\bar{U}}} = \frac{25 \text{ MVA}}{3 \text{ kV}} = 8,3 \text{ kA}$$

In Tab. 8.4 ist eine Übersicht über die berechneten Ströme dargestellt. Darin lässt sich erkennen, dass es für die Übertragung mit niedrigen Strömen erforderlich ist die Zwischenkreisspannung hoch zu wählen. Die technische Machbarkeit von hohen Zwischenkreisspannungen wird nachfolgend erläutert.

Tab. 8.4: Ströme bei verschiedenen Zwischenkreisspannungen und Stromdichten

Zwischenkreisspannung	1,4 kV	3 kV	6 kV
Leistung	25 MVA	25 MVA	25 MVA
Strom	17,86 kA	8,3 kA	4,17 kA

8.4.4.2 Stromtragfähigkeit und Querschnitte der Kupferschiene

Nach [9] kann für die Stromtragfähigkeit von Kupfer ein Wert von 1...6 A/mm² angenommen werden. Der Zwischenkreis befindet sich als Kupferschiene in einem Betonsegment. Für die Abführung der Wärme ist diese Verlegart ungünstig. Deshalb wird für die Auslegung der kleinste Wert für die Stromdichte mit 1 A/mm² angenommen. Für die berechneten Ströme ergeben sich folgende Querschnitte:

$$A = \frac{I_V}{J} = \frac{8,3 \text{ kA}}{1 \text{ A/mm}^2} = 8300 \text{ mm}^2$$

$$A = \frac{I_V}{J} = \frac{17,86 \text{ kA}}{1 \text{ A/mm}^2} = 17860 \text{ mm}^2$$

Ein mittlerer Wert des Stromdichte Intervalls kann ebenfalls sinnvoll sein. Für 2 A/mm² ergeben sich folgende Querschnitte:

$$A = \frac{I_V}{J} = \frac{8,3 \text{ kA}}{2 \text{ A/mm}^2} = 4150 \text{ mm}^2$$

$$A = \frac{I_V}{J} = \frac{17,86 \text{ kA}}{2 \text{ A/mm}^2} = 8930 \text{ mm}^2$$

In Tab. 8.5 ist eine Übersicht über mögliche Querschnitte in Abhängigkeit von der Stromdichte dargestellt. Die untere Spalte mit der Stromstärke von 17,86 kA ist für die Auslegung in diesen Projektbericht die Entscheidende, da es sich um den Strom bei einer Zwischenkreisspannung von 1,4 kV handelt.

Tab. 8.5: Querschnitte in Abhängigkeit der Stromdichte

	1 A/mm ²	2 A/mm ²	3 A/mm ²
4,17 kA	4150 mm ²	2075 mm ²	1383 mm ²
8,3 kA	8300 mm ²	4150 mm ²	2767 mm ²
17,86 kA	17860 mm ²	8930 mm ²	5950 mm ²

Welcher Querschnitt gewählt wird, hängt stark von den Umgebungsbedingungen ab. Bei einer Einspeisesegmentlänge von $s_{ES} = 48\text{ km}$ und der vollen Geschwindigkeit von 480 km/h wird die Stelle an der eingespeist wird für folgende Zeit belastet:

$$t_{Bel} = \frac{0,5 \cdot s_{ES}}{v_{NGT,HGV,max}} = \frac{24\text{ km}}{480\text{ km/h}} = 3\text{ min}$$

Wenn sich der Einspeisepunkt genau in der Mitte eines Einspeisesegmentes befindet wird nur die halbe Strecke betrachtet. Bei einer größeren Anzahl an Zuführsegmenten beträgt die Belastungszeit:

$$t_{Bel} = \frac{0,5 \cdot s_{ES}}{v_{NGT,HGV,max}} \cdot \left(1 + \frac{n-1}{2}\right) = \frac{24\text{ km}}{480\text{ km/h}} \cdot 5 = 1\text{ min}$$

Dabei ist n ungerade und die Zuführsegmente sind gleichmäßig verteilt. Die Zahl der Zuführsegmente n wird durch wirtschaftliche Überlegungen bestimmt. Es wird $n = 5$ angenommen.

Wenn außerdem große Leerzeiten zwischen den Zügen vorkommen, kann es unter Umständen sinnvoll sein, den Querschnitt nicht auf Nennbetrieb auszulegen, sondern auf eine kurze Spitzenleistung. Mit einer massiven Verkleinerung des Querschnitts können große Kosten an der Strecke gespart werden. Dieser Aspekt muss weiter untersucht werden.

Es wurde maximal eine Leistung von 25 MVA betrachtet. Hierbei handelt es sich um eine eingleisige Strecke. Die Betrachtung einer zweigleisigen Strecke ist nicht vonnöten, da das zweite Gleis einen eigenen Zwischenkreis in einem eigenen festen Fahrbahnsegment besitzen würde.

8.4.4.3 Halbleitertechnologie

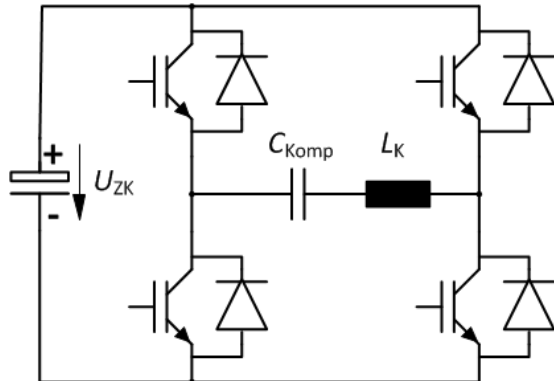


Abb. 8.4: Wechselrichter (H-Brücke)

Für die Ansteuerung einer Spule L_K wird ein H-Brücke (Abb. 8.4) aus jeweils zwei in Reihe geschalteten IGBTs und jeweils zwei Freilaufdioden benötigt. Die Spule L_K wird an den Mittelabgriff mit einem seriellen Kompensationskondensator C_{komp} geschaltet. Die IGBTs werden blockförmig angesteuert. Es wird im Stromnulldurchgang geschaltet. Eine Pulsweitenmodulation ist nicht vonnöten, da durch den Schwingkreis aus Spule und Kompensationskondensator bei rechteckförmiger Ansteuerung ein nahezu sinusförmiger Strom erzeugt wird.

Um viel Strom leiten zu können, werden mehrere B2-Brücken parallel geschaltet. Die B2-Brücken müssen exakt gleichzeitig schalten. Sie werden als Modul aufgebaut, so dass die Ansteuerung bereits intern abgestimmt ist.

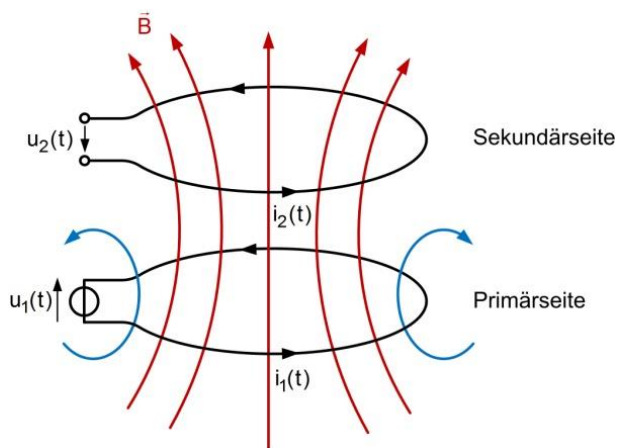


Abb. 8.5: Leiterschleifen

Bei der induktiven Energieübertragung (Abb. 8.5) ist im Luftspalt keine Flussführung durch Weichmagnete vorgesehen. Deshalb ist das Verhältnis des Hauptflusses zum Streufluss relativ klein. Eine Abhilfe um trotz des niedrigen Hauptflusses eine hohe induzierte Spannung auf der Sekundärseite zu erhalten bietet der Einsatz von hohen Frequenzen. Im Kapitel 9 wird insbesondere mit Schaltfrequenzen zwischen 20 kHz und 30 kHz gerechnet.

Das Modul SKiiP 2414 GB17E4 4 der Marke Semikron kann laut Datenblatt mit 10 kHz geschaltet werden. Angaben im Datenblatt beziehen sich generell auf hartes Schalten. Bei hartem Schalten liegt Spannung am Bauteil an, was einen elektrischen Stromfluss zur Folge hat. Bei resonantem (Schalten im Strom- oder Spannungsnulldurchgang) oder quasi-resonantem Schalten sind die Schaltverluste geringer und die Schaltfrequenz kann deutlich höher sein. Wie hoch die Schaltfrequenz gewählt werden kann, ist nur durch Laboruntersuchungen nachprüfbar.

Auf dem Markt sind aktuell Module mit 1,4 kV und einer Schaltfrequenz von 10 kHz bis 20 kHz erhältlich. Höhere Spannungen in Kombination mit Schaltfrequenzen > 20 kHz sind mit der heutigen Si-Technologie nicht möglich. Die Entwicklung von SiC-Modulen kann diese Problematik lösen. Unter Umständen ist es in naher Zukunft möglich MOSFET oder IGBT-Module mit den gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Dies ist abhängig von der Entwicklung in der SiC-Technologie und kann aktuell nicht abgeschätzt werden. Für die Auslegung in diesem Abschlussbericht wird von 1,4 kV als aktuell möglicher Zwischenkreisspannung ausgegangen.

8.4.4.4 Festlegung der Zwischenkreisspannung

In den Kapiteln 8.4.4.1 und 8.4.4.2 wurde ausführlich erläutert, dass es sinnvoll ist die Zwischenkreisspannung möglichst hoch zu wählen. Bei einer höheren Zwischenkreisspannung fließen geringere Ströme und es muss weniger Kupfer für die Zwischenkreisschiene verlegt werden. Dem entgegen stehen die Aussagen aus Kapitel 8.4.4.3. Dort wird erläutert, dass die Si-Halbleitertechnik mit den aktuellen Sperrspannungen von 1,4...1,7 kV und hohen Schaltfrequenzen von 20...40 kHz an ihre Grenzen stößt.

Für die aktuellen Betrachtungen wurde 1,4 kV als Zwischenkreisspannung festgelegt. Dies ist die höchste technisch aktuell machbare Zwischenkreisspannung. Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten 10-15 Jahren [10] in der SiC-Halbleitertechnik Module mit höheren Sperrspannungen bei Schaltfrequenzen von 20...40 kHz bereitgestellt werden können.

Theoretisch kann auch mit 3 kV Zwischenkreisspannung gerechnet werden. Diese kann als Wunsch an die Halbleitertechnik verstanden werden. Es ist durchaus möglich, dass bis zu einer möglichen Realisierung der FEÜ dieser Wert von der Halbleiterindustrie erreicht wird. Der Wert von 3 kV ist eine geringfügige Überlastung der Nenn-Zwischenkreisspannung des ICE3 von 2,1...2,6 kV [1]. Somit können Standardbauteile auf der Fahrzeugseite verwendet werden.

8.4.5 Auslegung des Zuführsegments

Um die induktive Energieübertragung für den NGT bei aktuellem Stand der Halbleitertechnik überhaupt entwickeln zu können, war es notwendig die Zwischenkreisspannung auf 1,4 kV festzulegen. Dadurch steigen die Ströme auf der Zwischenkreisschiene auf bis zu 17,86 kA.

Die Problematik der hohen Ströme auf der Zwischenkreisschiene kann durch die Einführung des Zuführsegments gelöst werden.

In Abb. 8.6 sind für ein Versorgungssegment, das sich 17 km von der Einspeisestelle entfernt befindet, zwei mögliche Strompfade aufgezeichnet. Im ersten Fall ist genau ein Zuführsegment pro Einspeiseselement vorhanden. Speist man mit 25 MVA bei einer Zwischenkreisspannung von 1,4 kV, so fließt folgender Strom auf der Zwischenkreisschiene:

$$I_{ZFS} = \frac{S_{\ddot{U}}}{U_{\ddot{U}}} = \frac{25 \text{ MVA}}{1,4 \text{ kV}} = 17,86 \text{ kA}$$

Der Strom I_{ZFS} fließt 17 km bis zur Senke. Im Vergleichsfall mit 5 Zuführsegmenten fließt der Strom I_{ZFS} vom Umrichter 2 km entlang bis zur Senke. Der Strom im Einspeiseselement beträgt:

$$I_{ES} = \frac{S_{\ddot{U}}}{U_{\ddot{U}}} = \frac{25 \text{ MVA}}{15 \text{ kV}} = 1,67 \text{ kA}$$

Je höher die Anzahl der Zuführsegmente ist, desto größer ist der Wirkungsgrad der Übertragung. Um mit weniger Zuführsegmenten denselben Wirkungsgrad erreichen zu können, müssen größere Querschnitte auf der Zwischenkreisschiene gewählt werden. Ein weiterer Vorteil ist die Wärmeabfuhr auf der Zwischenkreisschiene. Je kürzer die Strecke des Stroms auf der Zwischenkreisschiene, desto geringer ist die notwendige Kühlleistung,

welche vonnöten ist. Dieser Aspekt sollte in einer weitergehenden Untersuchung simuliert werden. Limitierender Faktor für die Anzahl der Zuführsegmente sind die Kosten für die Umrichter samt Montage. Eine genaue Zahl kann nur in Zusammenhang mit der Betrachtung der Kosten getroffen werden.

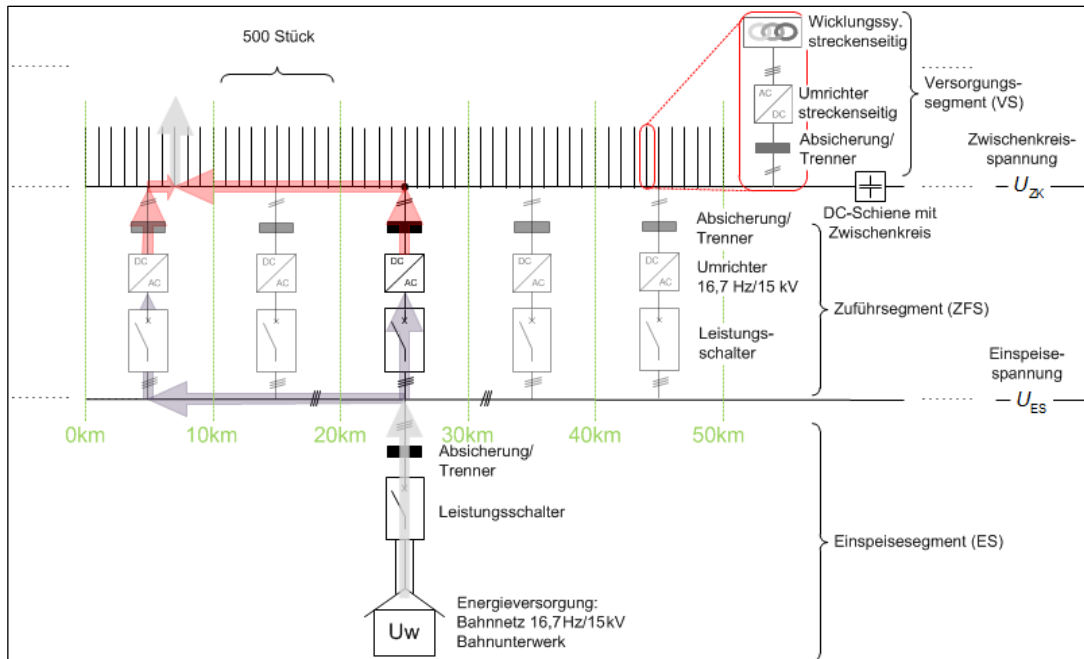


Abb. 8.6: Optimierte Strecke für hohe Ströme

8.4.6 Auslegung des Versorgungssegments

In einem idealen System werden die Wicklungssysteme der Primär- und Sekundärseite identisch ausgelegt. Daraus resultiert auch dieselbe Zwischenkreisspannung im Fahrzeug und im Versorgungssegment. Es wird die Installation in einem festen Fahrbahnsegment betrachtet. Außerdem werden der Leistungsbedarf eines Versorgungssegmentes sowie die Anzahl der Wechselrichter definiert.

8.4.6.1 Grundsätzliche Überlegungen

Ein exakt identischer Aufbau der Spulengeometrien ist aufgrund der Platzverhältnisse im NGT nicht möglich. Im NGT sind im Endwagen 6,6 m und im Mittelwagen 10,68 m der Länge für Spulen vorgesehen. Der weitere Platz wird von Radkasten und Rädern bedeckt, also Komponenten, die für die Übertragung nicht nutzbar sind.

8.4.6.2 Festes Fahrbahnsegment (FF-Segment)

Die Spulen inklusive der Wechselrichter werden in einem festen Fahrbahnsegment verbaut. Um parasitäre Effekte zu vermeiden, werden die Spulen direkt am Wechselrichter angeschlossen. Die elektrisch sinnvolle Länge muss mechanisch fertigbar sein.

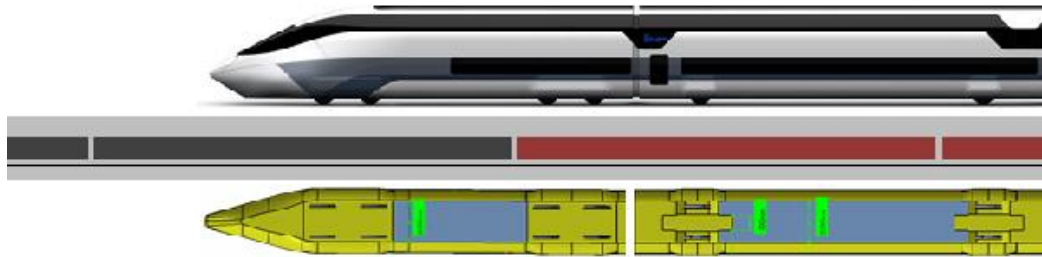


Abb. 8.7: NGT überdeckt FF-Segment noch nicht vollständig



Abb. 8.8: NGT überdeckt FF-Segment vollständig

Ein Segment wird nur dann eingeschaltet, wenn es vollständig vom NGT überdeckt ist (Abb. 8.7 und Abb. 8.8). Bewegt sich der NGT um ein infinitesimal kleines Stück vorwärts, so bewegt sich der Wagen um die Länge am FF-Segment vorbei. Aufgrund baugleicher Wagen wird der freiwerdende Teil des Segmentes vom nächsten Wagen überdeckt. Die Längen δ sind dabei immer baugleich (Abb. 8.9).

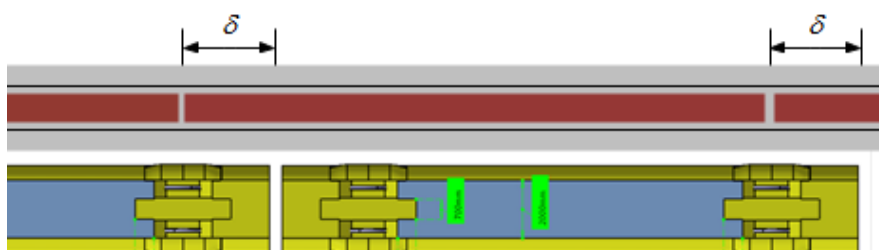


Abb. 8.9: Überdeckung eines Wagens

Die H-Brücke wird mit einer festen Frequenz angesteuert. Diese entspricht möglichst der Eigenfrequenz des Systems. Ist die Überdeckung inhomogen, verändert sich die Eigenfrequenz des Systems.

Eine sinnvolle Länge aus elektrischer Sicht eines FF-Segmentes ist die Länge eines Wagens, also 20 m. Eine Segmentlänge von 20 m ist nur mit Spezialfahrzeugen fertig- und aufbaubar. In Kapitel 9 wird von 20 m als ideale Länge ausgegangen. Sollte eine Länge von 20 m nicht fertigbar sein, gibt es die Möglichkeit mechanische und elektrische Komponenten getrennt bereitzustellen und vor Ort zu verbauen. Ein festes Fahrbahnsegment bestünde dann aus der halben beziehungsweise dem Viertel einer Spulenlänge. Bei der Installation an der Strecke werden zwei oder vier Segmente zusammengesetzt. Wichtig hierbei ist, dass sich elektrisch eine Spule mit der Länge von 20 m ergibt. Diese hat genau einen Wechselrichter. Bei einer Installation aus mehreren Segmenten muss dies berücksichtigt werden.

8.4.6.3 Anzahl Wechselrichter und Leistungsbedarf

In diesem Unterkapitel werden die Wechselrichter für die streckenseitigen und fahrzeugseitigen Spulen ausgelegt.

Streckenseitige Auslegung

Die Länge der Spule sollte möglichst identisch mit der des FF-Segments sein, so dass wenige Randbereiche existieren. Daten zur Spulengeometrie sind in Kapitel 9 zu finden. Wichtig ist die Festlegung, dass zu jeder Spule genau ein Wechselrichter installiert werden sollte.

Bei einer Segmentlänge von 20 m und einer Länge eines NGT Halbzuges von ca. 200 m müssen 25 MVA gleichmäßig auf die Segmente verteilt werden. Einer 20 m langen Spule wird ein Wechselrichter mit folgender Leistung zugeordnet:

$$P_{VS} = \frac{25 \text{ MVA}}{9 \text{ Segmente}} = 2,78 \text{ MVA}$$

Bei einer Zwischenkreisspannung von $U_{ZK} = 1,4 \text{ kV}$ und einem Formfaktor für eine H-Brücke von $k_{HB} = 1,11$ ergibt sich für den Strom des Wechselrichters:

$$I_{WR} = \frac{P_{VS}}{U_{ZK}} \cdot k_{HB} = \frac{2,78 \text{ MVA}}{1,4 \text{ kV}} \cdot 1,11 = 2,2 \text{ kA}$$

Für einen Wechselrichter mit obiger Auslegung werden zwei IGBT-Module des Typs SKiiP 2414 GB17E4-4 der Firma Semikron pro streckenseitigem Segment benötigt.

Um die Leistung in den Triebköpfen nutzen zu können bedarf es einer intelligenten Regelung. Eventuell ist es notwendig, die Segmente bereits einzuschalten bevor sie komplett überdeckt sind. Mit einer intelligenten Regelung können eventuell zehn Segmente genutzt werden. Die passende Regelstrategie muss noch untersucht werden.

Fahrzeugseitige Auslegung

Auf der Fahrzeugseite wird die Spulenlänge dem verfügbaren Platz in Triebwagen und Wagen angepasst. Im Triebwagen stehen 6,6 m zur Verfügung, während im Wagen 10,68 m zur Verfügung stehen. Die Antriebe in den Wagen befinden sich jeweils an den Achsen, also vorne und hinten. Für den Energietransport zu den Achsen ist es ideal, wenn diese Wege in der Mitte geteilt werden. Eine Spule auf der Fahrzeugseite wird auf 5 m festgelegt. Es ist hiermit möglich pro Wagen zwei Spulen zu verbauen. Aufgrund der Standardisierung wird der Platz im Triebwagen nicht vollständig ausgenutzt und dort nur eine Spule verbaut. Damit steht folgende Anzahl an Spulen zur Verfügung:

$$2 \text{ Triebköpfe} \cdot 1 \text{ Spule} + 8 \text{ Mittelwagen} \cdot 2 \text{ Spulen} = 18 \text{ Spulen}$$

Zu jeder Spule wird ein Wechselrichter installiert. Es kann sein, dass die Spulen im Triebwagen nicht die volle Leistung ziehen können. Die Übertragung wird für 17 Segmente ausgelegt. Die durchschnittliche Leistung beträgt:

$$P_{VS} = \frac{25 \text{ MVA}}{17 \text{ Segmente}} = 1,47 \text{ MVA}$$

Bei einer Zwischenkreisspannung von $U_{ZK} = 1,4 \text{ kV}$ und einem Formfaktor für eine H-Brücke von $k_{HB} = 1,11$ ergibt sich für den Strom des Wechselrichters:

$$I_{WR} = \frac{P_{VS}}{U_{ZK}} \cdot k_{HB} = \frac{1,47 \text{ MVA}}{1,4 \text{ kV}} \cdot 1,11 = 1,17 \text{ kA}$$

Für einen Wechselrichter mit obiger Auslegung werden zwei IGBT-Module des Typs SKiiP 1203 GB172-2D der Firma Semikron pro streckenseitigem Segment benötigt.

8.5 Zusammenfassung und Fazit

Die Auslegung der Versorgungselektronik wurde in 4 Abschnitte unterteilt. Für alle Teilabschnitte wurden Lösungskonzepte erarbeitet. Es wurden Varianten für die Auslegung definiert. Es wurde sowohl eine Systemintegration in ein bestehendes System untersucht als auch eine Neubaustrecke.

Das System für den NGT HGV wurde für eine Zwischenkreisspannung von 1,4 kV ausgelegt. Die Betriebsfrequenz beträgt 28 kHz. Die Spulenlänge wurde streckenseitig auf 20 m und fahrzeugseitig auf 5m festgelegt. Zu jeder Spule ist ein Wechselrichter vorgesehen, welcher aus einer H-Brücke besteht.

Die größten Schwierigkeiten bestehen in zwei Punkten. Zum einen ist die einfache Fertigbarkeit eines FF-Segmentes mit einer Spule der Länge 20 m fraglich. Bei Bedarf müssen der mechanische und der elektrische Teil getrennt installiert werden. Geplant war ursprünglich die Verlegung einer Spule in einem festen Fahrbahnsegment.

Zum anderen ist die Höhe der Zwischenkreisspannung durch den Stand der Technik in der Halbleitertechnik limitiert. Höhere Zwischenkreisspannungen mit Schaltfrequenzen im Bereich von 20...40 kHz sind wünschenswert. Dies ist unter Berücksichtigung des momentanen Entwicklungsstands in der Si-Halbleitertechnik nicht möglich. Möglicherweise kann die Entwicklung von SiC-Modulen in naher Zukunft diese Problematik lösen. Aufgrund dieser Problematik wird die Zwischenkreisspannung mit 1,4 kV sehr tief gewählt. Es treten sehr hohe Ströme auf der Zwischenkreisschiene auf. Diese Ströme sind schwer beherrschbar. Durch die Einführung von Zwischensegmenten (Zuführsegmente), also mehreren parallelen Umrichtern ist es möglich, den Weg, auf dem die Ströme fließen, zu verkürzen. Eine höhere Zwischenkreisspannung, beispielsweise von 6 kV, könnte die maximalen Ströme auf 4,15 kA senken.

Folgende Punkte, die weiteren Entwicklungsbedarf haben, sind bei der Bearbeitung des Arbeitspaketes festgestellt worden:

- Die Auslegung der Bauteile und Leitungen (Zwischenkreisschiene, Spulen, Wechselrichter streckenseitig), welche nur kurze Zeit belastet werden, können optimiert werden. Die Querschnitte wurden auf Dauerbetrieb ausgelegt. Die Umgebungsbedingungen wurden als Worst-Case abgeschätzt. Mit Hilfe thermischer Simulationen ist es möglich zu ermitteln, ob die genannten Bauteile für die kurze Betriebs-

zeit bewusst überlastet und damit auf weniger Leistung ausgelegt werden können.

- Für die Auslegung der Versorgungselektronik wäre es wünschenswert, die Auslegung auf den Bau einer konkreten Strecke zu fokussieren. Die Auslegung der Einspeisesegmente könnte dadurch stark vereinfacht werden.
- Die Ein- und Ausschaltung der Segmente wurde noch nicht in einem Maßstab der geforderten Leistungsklasse erprobt. Eventuell können hierbei weitere Probleme auftreten, welche noch nicht abschätzbar sind.

Insgesamt kann man festhalten, dass eine induktive Energieübertragung für den Hochgeschwindigkeitszug NGT HGV trotz einiger Probleme technisch machbar ist. Der Realisierung stehen wirtschaftliche Überlegungen entgegen.

8.6 Quellen

- [1] Klaus-Ulrich Rötz. *ICE3 - Beschreibung der Triebzüge BR 403/406*. Frankfurt am Main: Hauptvorstand der Gewerkschaft Deutscher Lokomotivführer, 2000.
- [2] Stefan Kaimer, *Übersicht der technischen Daten NGT HGV und NGT Link*. Berlin: Institut für Fahrzeugkonzepte, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012.
- [3] Hartmut Biesenack et al., *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2006.
- [4] Stefan Ebbart, Marcus Ruch und Wolfgang Hunger, *Elektrische Bahnen*. 102, Frankfurt, Dresden: s.n., 2004 Heft 4.
- [5] Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umweltschutz. *Lärmbekämpfung - Ruheschutz, Analysen, Tendenzen, Projekte in Baden-Württemberg*. s.l. : LfU-Berichte, Karlsruhe, 1995.
- [6] Johannes Pagenkopf und Christopher Kalatz. *Fahrdrahtlose Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen des Vollbahnverkehrs (FEÜ) - Abschlussbericht Lebenszykluskostenrechnung*. Berlin: Institut für Fahrzeugkonzepte, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2013.
- [7] *DIN 48 201*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., 1981.

- [8] Jörg Heinrich, Simon Mayer, Peter Müller und Philipp Seitz. *Fahrdrahtlose Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen des Vollbahnverkehrs (FEÜ) - Abschlussbericht Machbarkeitsstudie*. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2013.
- [9] *DIN 41 300*. Berlin : Deutsches Institut für Normung e.V., 1979.
- [10] Uwe Scheuermann, *Cluster Leistungselektronik*. Nürnberg: Infineon.

9 Übertragungssystem

von Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour und Dipl.-Ing. Philipp Seitz

Ein wesentlicher Aspekt bei der Beurteilung der Machbarkeit einer berührungslosen, induktiven Energieübertragung ist das Übertragungssystem aus fahrwegseitiger Primär- und fahrzeugseitiger Sekundärspule. Aufbauend auf dem im Rahmen von Kapitel 5 vorgestellten Konzept für die fahrdrahtlose Energieübertragung (FEÜ) werden nachfolgend die wesentlichen Punkte zur Auslegung des Übertragungssystems dargestellt. Dazu werden zunächst mit analytischen und numerischen Feldberechnungen die charakteristischen Größen von Spulenanordnungen bestimmt, dann die Primär- und Sekundärseite des Übertragungssystems ausgelegt und schließlich deren Eckdaten tabellarisch dargestellt.

9.1 Feldberechnungen

In den folgenden Abschnitten werden die zur Auslegung der Wicklungssysteme durchgeführten numerischen und analytischen Feldberechnungen und die ermittelten, charakteristischen Größen von Spulenanordnungen sowie die daraus gezogenen Schlüsse vorgestellt.

9.1.1 Numerische Feldberechnungen

Numerische Simulationen werden meistens dann eingesetzt, wenn Feldberechnungen nicht mehr analytisch durchgeführt werden können. Dies kann einerseits daran liegen, dass das Gleichungssystem prinzipiell nicht analytisch lösbar ist, oder andererseits daran, dass die zu berechnende Geometrie zu komplex aufgebaut ist. Zu beachten ist, dass auch unter Verwendung leistungsstarker Computer bei ungeeigneter Modellierung des Feldgebietes die Grenzen erträglicher Rechenzeiten äußerst schnell erreicht sind und daher Symmetrien zur Verkleinerung des zu simulierenden Gebiets immer ausgenutzt werden sollten.

Die Simulationssoftware unterscheidet sich grundsätzlich, je nachdem, welches numerische Verfahren zur Berechnung implementiert wurde. So verwendet man bei der Randelement-Methode (engl. Boundary Element Method, BEM) Integralgleichungen, während bei der FDM (Finite-Differenzen-Methode) und FEM (Finite-Elemente-Methode) mit partiellen Differentialgleichungen gearbeitet wird. Für elektromagnetische Feldprobleme werden diese Integral- bzw. Differentialgleichungen aus den Maxwell'schen Gleichungen abgeleitet und dann bei gegebenen Rand- und/oder Anfangsbedingungen vom Computer numerisch gelöst. Dazu werden zunächst die Ausgangsgleichungen durch Diskretisie-

zung des Problemgebiets in ein System linearer, algebraischer Gleichungen überführt und die Lösung dieses linearen Gleichungssystems liefert dann die gesuchten Größen (z.B. das elektrische Potential) in diskreten Raumpunkten, welche bei der BEM nur auf dem Gebietsrand, bei der FEM hingegen sowohl im Gebiet als auch auf dessen Rand liegen. Durch Interpolation werden die gesuchten Größen dann auch zwischen diesen diskreten Raumpunkten berechnet. Der Ablauf einer numerischen Simulation gliedert sich generell folgendermaßen:

1. Charakterisierung des gestellten Feldproblems (z.B. Elektrostatik oder -dynamik in 2D oder 3D)
2. Wahl des numerischen Verfahrens und der Software-Tools
3. Modellierung des Feldproblems (CAD): Eingabe von Geometrie und ggf. Symmetrieachsen, Materialeigenschaften, Anfangs- und Randbedingungen
4. Diskretisierung des Feldgebietes, z.B. FEM-Vernetzung (Mesh)
5. Erstellung der sogenannten Systemmatrix des Gleichungssystems
6. Lösung (direkt oder iterativ) des linearen Gleichungssystems
7. Auswertung der Lösung (Postprocessing)

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse für parallel verlaufende Linienleiter vorgestellt (vgl. Abb. 9.1). Da aufgrund der Abmessungen eines Zuges die Spulensegmente sinnvollerweise länger als breit sein sollten, wurde zur Feldberechnung nur die zur Fahrtrichtung querverlaufende x-z-Ebene modelliert und die endliche Länge der Leiter nicht berücksichtigt.

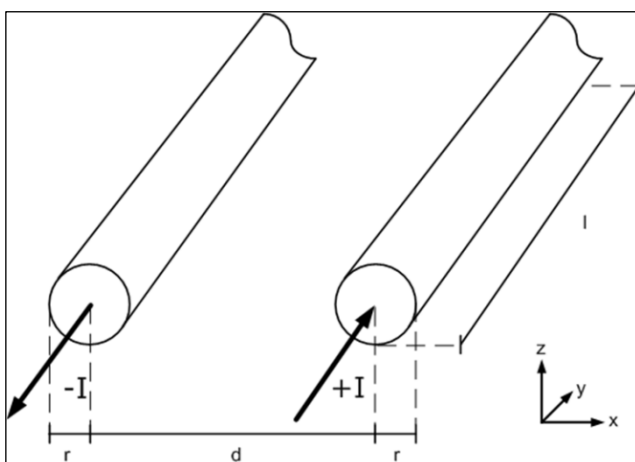


Abb. 9.1: Schematischer Aufbau eines Linienleitersystems

Abb. 9.2 zeigt beispielhaft den Betrag der magnetischen Flussdichte \vec{B} und den Verlauf der Feldlinien für eine Spule mit der Windungszahl $N_1 = 1$ und der Stromstärke $I = 2 \text{ kA}$. Der Abstand der Leitermittelpunkte beträgt dabei einen Meter.

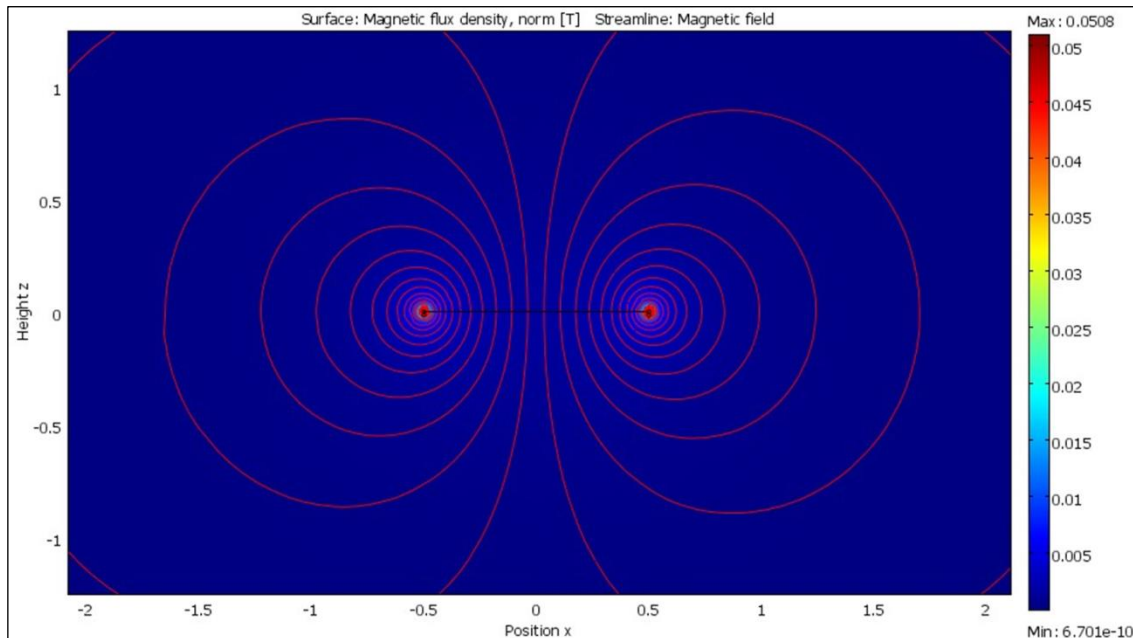


Abb. 9.2: Flussdichte und Feldlinien für Spule mit $N_1=1$ und $I_1=2 \text{ kA}$

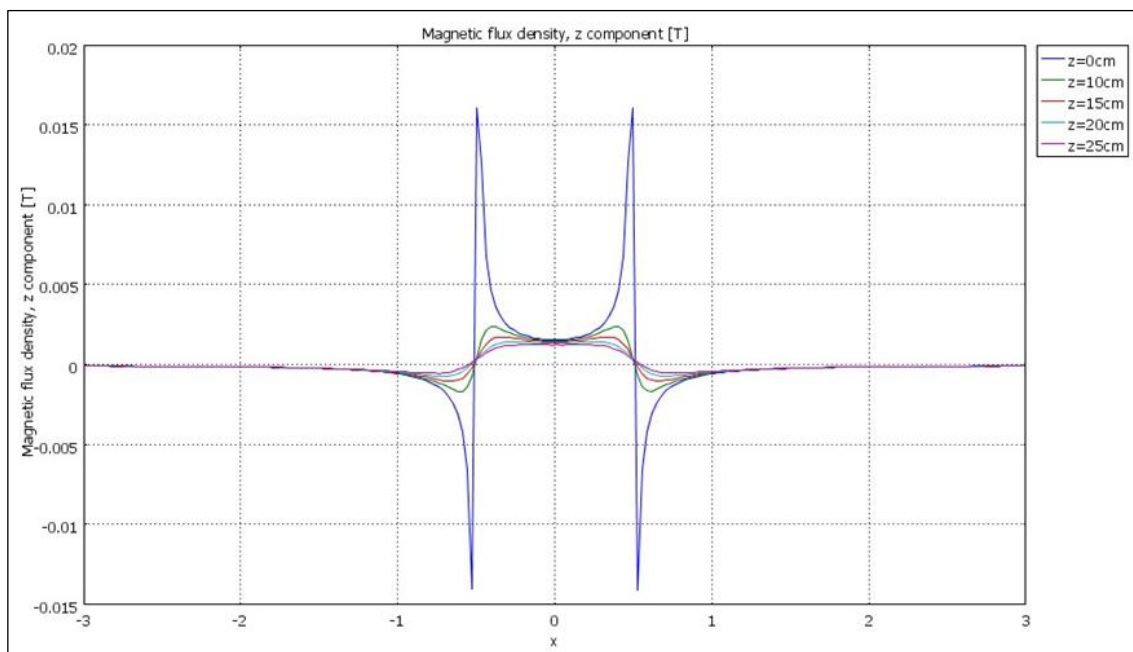


Abb. 9.3: Flussdichte (Anteil in z-Richtung) für Spule mit $N_1=1$ und $I=2 \text{ kA}$

In Abb. 9.3 wird der Anteil der Flussdichte in z-Richtung über der x-Achse, also quer zur Fahrtrichtung, für verschiedene, relevante Luftspalthöhen dargestellt. Dies ist von Interesse, weil sich aus der magnetischen Flussdichte, durch Integration über die von der Spule aufgespannten Fläche, der Fluss durch diese Spule berechnen lässt.

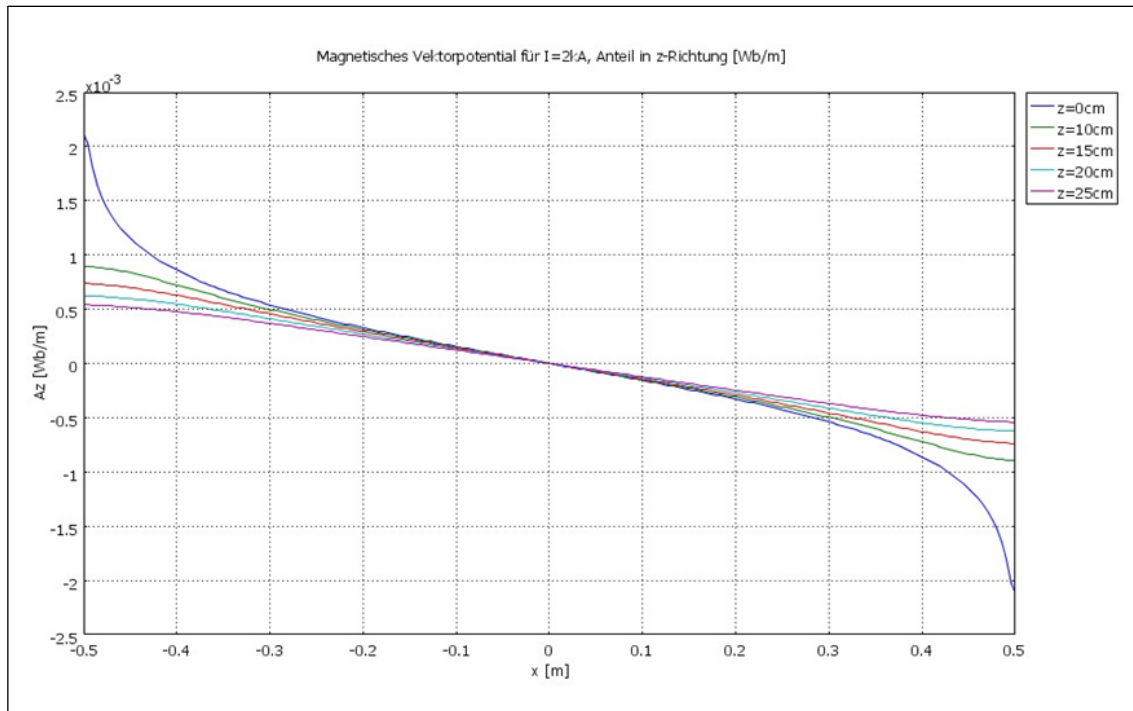


Abb. 9.4: Vektorpotential über x für Spule mit $N_1=1$ und $I=2\text{kA}$

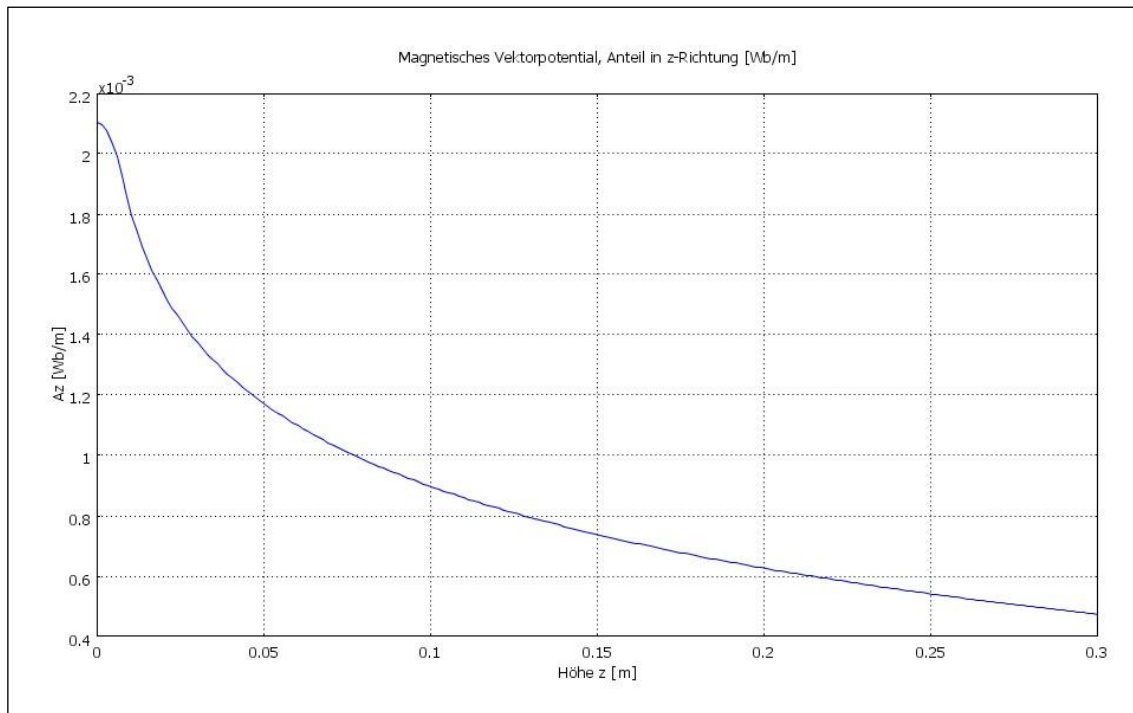


Abb. 9.5: Vektorpotential über z für Spule mit $N_1=1$ und $I=2$ kA

Das magnetische Vektorpotential \vec{A} bietet eine weitere und im konkreten Fall besonders effiziente Möglichkeit, den magnetischen Fluss durch eine horizontale Spule in der Höhe z zu bestimmen. [1] Daher ist der relevante Anteil des magnetischen Vektorpotentials in Abb. 9.4 über der x-Achse für verschiedene Luftspalthöhen dargestellt. Es zeigt sich ein punktsymmetrischer Verlauf zur Mitte an der Position $x=0$.

Für eine horizontale Leiterschleife mit einer Länge und Breite von jeweils einem Meter, also einer aufgespannten Querschnittsfläche von einem Quadratmeter, kann nun der magnetische Fluss in Abhängigkeit der Luftspalthöhe z berechnet und dargestellt werden (vgl. Abb. 9.6).

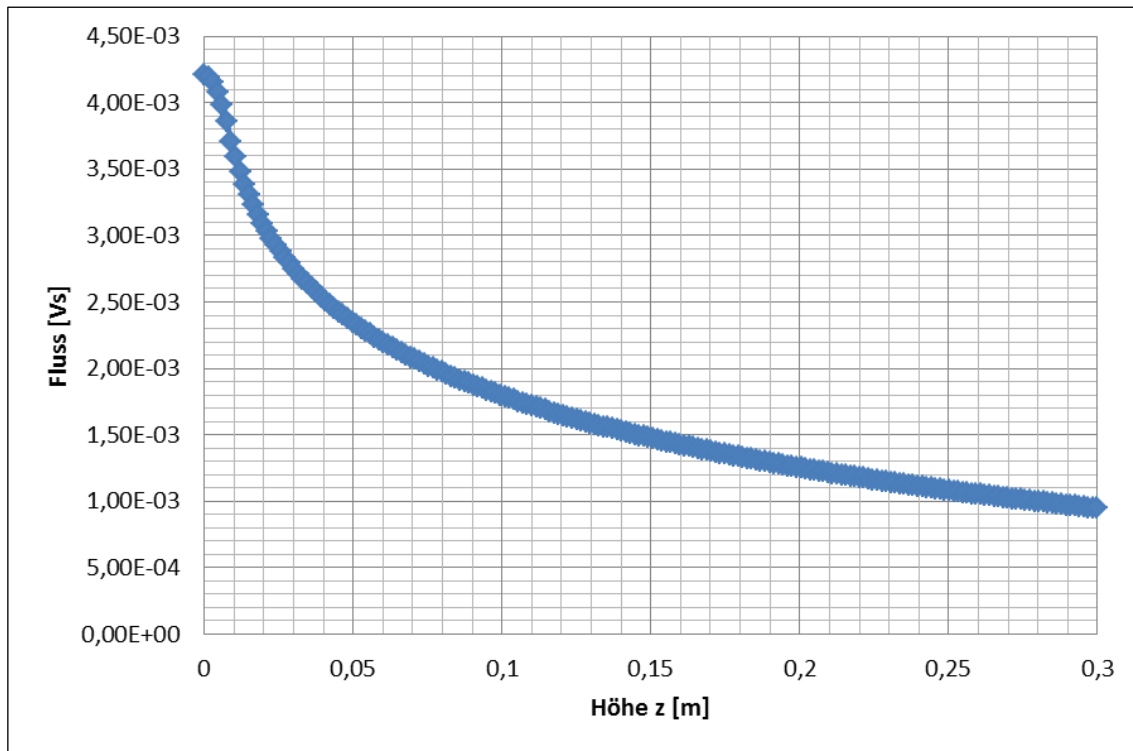


Abb. 9.6: Fluss durch Leiterschleife (1 m²) für Primärspule mit $N_1=1$ und $I=2$ kA

Durch Normierung auf den von der Primärseite erzeugten Fluss erhält man den Koppelfaktor k_1 :

$$k_1 = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_1} \quad \text{für } i_2(t) = 0 \quad \forall t$$

Analog gilt für den Koppelfaktor k_2 von Sekundärspule zu Primärspule:

$$k_2 = \frac{\Phi_{12}}{\Phi_2} \quad \text{für } i_1(t) = 0 \quad \forall t$$

Der Koppelfaktor k ist als geometrisches Mittel definiert:

$$k = \sqrt{k_1 \cdot k_2}$$

Bei einem symmetrischen Aufbau gilt folglich $k_1=k_2=k$. Ist der Aufbau unsymmetrisch, so müssen die Koppelfaktoren separat berechnet werden.

In Abb. 9.7 ist der numerisch bestimmte Koppelfaktor k über der Luftspalthöhe z dargestellt. Für die bei einem Schienenfahrzeug zu erwartenden Luftspalte von 15 bis 25 cm kann ein Koppelfaktor im Bereich von 0,35 bis 0,25 abgelesen werden.

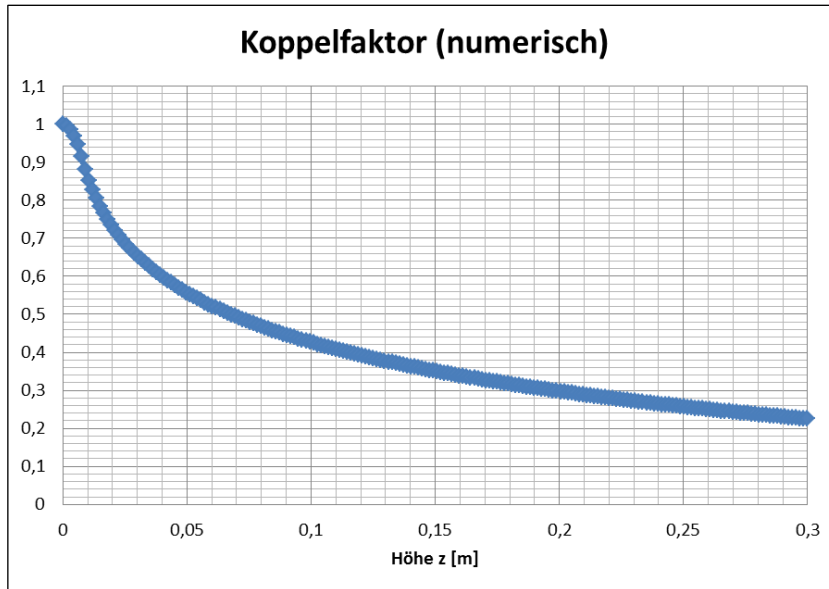


Abb. 9.7: Koppelfaktor über z für Primärspule (Breite 1 m) mit $N_1=1$ und $I=2$ kA

9.1.2 Analytische Feldberechnungen

Durch analytische Feldberechnungen können die Auswirkungen von Parameterveränderungen schnell und effizient untersucht werden. Allerdings können Berechnungsformeln üblicherweise nur für idealisierte Geometrien wie Geraden und Kreise oder einfache geometrische Körper wie Tori oder Kugeln mit homogenen Materialien aufgestellt werden. Komplexere Formen können nach Möglichkeit durch Segmentierung und abschnittsweise Kombination von Basisgeometrien angenähert werden.

Für einen in y -Richtung verlaufenden, unendlich langen Leiter mit dem Radius r an der Position $x = a$ lässt sich die vertikale Komponente der magnetischen Flussdichte außerhalb des Leiters, also für $x^2 + z^2 \geq r^2$, durch Koordinatentransformation aus dem Durchflutungsgesetz bestimmen und berechnet sich gemäß der nachfolgend aufgeführten Gleichung.

$$B_z(x, z) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi} \cdot \frac{x - a}{(x - a)^2 + z^2}$$

Hierbei ist $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$ die magnetische Permeabilität im Vakuum bzw. in Luft und I die elektrische Stromstärke im Leiter.

Befindet sich der Rückleiter mit identischer Stromstärke parallel dazu an der Position $x = b$, so überlagern sich die Magnetfelder und für die z-Komponente der magnetischen Flussdichte folgt:

$$B_z(x, z) = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi} \cdot \left(\frac{x - a}{(x - a)^2 + z^2} - \frac{x - b}{(x - b)^2 + z^2} \right)$$

In Abb. 9.8 ist der analytisch berechnete Anteil der Flussdichte in z-Richtung über der x-Achse für verschiedene Luftspalthöhen z von 10 cm bis 30 cm dargestellt. Der Abstand der Leitermittelpunkte beträgt dabei einen Meter ($a = -b = 0,5\text{m}$) und die Stromstärke $I = 2 \text{ kA}$.

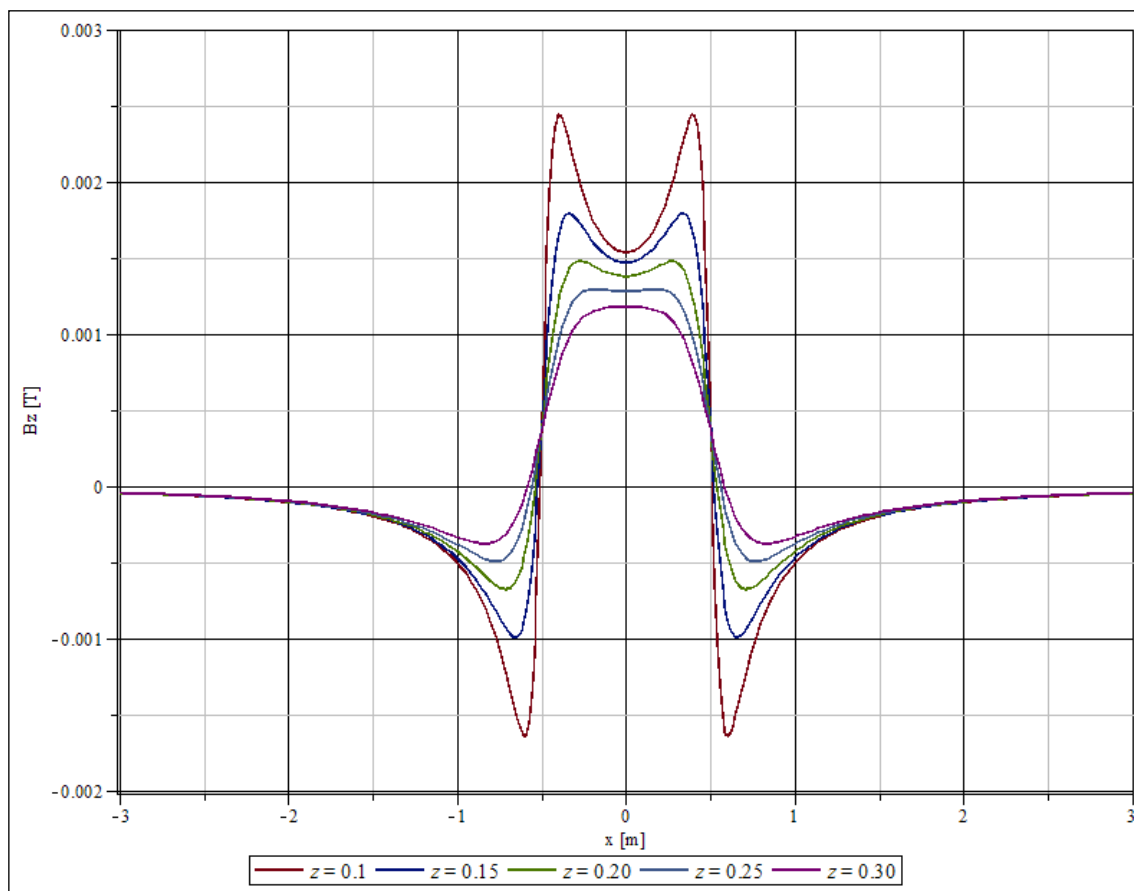


Abb. 9.8: Flussdichte (Anteil in z-Richtung) für parallele Leiter

Um die Induktivität von zwei parallelen Leitern zu bestimmen, muss zunächst der magnetische Fluss zwischen diesen Leitern durch Integration über die Flussdichte berechnet werden. Durch Berücksichtigung der Windungszahl, Stromstärke sowie Leiterlänge ergibt sich für die Leiteranordnung aus Abb. 9.1 schließlich folgende Gleichung zur Berechnung der Induktivität pro Längeneinheit (LE):

$$L' = \frac{L}{\ell} = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{d}{r}\right) \right)$$

Hierbei ist r der Leiterradius und d der Abstand der Mittelpunkte der Leiter (vgl. Abb. 9.1). Somit können die in den folgenden Tabellen dargestellten Werte für typische Leiterquerschnitte und mögliche Abstände berechnet werden. Die sekundärseitige Induktivität L_2 gilt dabei für eine Segmentlänge von fünf Metern.

Tab. 9.1: Doppelleitung mit Abstand $d = 0,8$

Leiterquerschnitt [mm ²]	10	20	200	500	1000
Leiterradius [mm]	1,784	2,523	7,979	12,616	17,841
Leiterdurchmesser [mm]	3,568	5,046	15,958	25,231	35,682
Induktivität pro LE [μ H/m]	2,542	2,404	1,943	1,760	1,621
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=1$	12,711	12,018	9,716	8,799	8,106
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=2$	50,845	48,073	38,863	35,197	32,425
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=3$	114,402	108,164	87,441	79,194	72,956
Widerstand pro LE [Ω /km]	2	1	0,1	0,04	0,02
Widerstand R_2 [m Ω]	23,2	11,6	1,16	0,464	0,232
R_2 [m Ω] für $N_2=2$	46,4	23,2	2,32	0,928	0,464
R_2 [m Ω] für $N_2=3$	69,6	34,8	3,48	1,392	0,696

Tab. 9.2: Doppelleitung mit Abstand $d = 0,9$

Leiterquerschnitt [mm ²]	10	20	200	500	1000
Leiterradius [mm]	1,784	2,523	7,979	12,616	17,841
Leiterdurchmesser [mm]	3,568	5,046	15,958	25,231	35,682
Induktivität pro LE [μ H/m]	2,589	2,451	1,990	1,807	1,668
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=1$	12,947	12,254	9,951	9,035	8,342
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=2$	51,788	49,015	39,805	36,140	33,367
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=3$	116,522	110,284	89,561	81,314	75,076
Widerstand pro LE [Ω /km]	2	1	0,1	0,04	0,02
Widerstand R_2 [m Ω]	23,6	11,8	1,18	0,472	0,236
R_2 [m Ω] für $N_2=2$	47,2	23,6	2,36	0,944	0,472
R_2 [m Ω] für $N_2=3$	70,8	35,4	3,54	1,416	0,708

Tab. 9.3: Doppelleitung mit Abstand $d = 1,0$

Leiterquerschnitt [mm ²]	10	20	200	500	1000
Leiterradius [mm]	1,784	2,523	7,979	12,616	17,841
Leiterdurchmesser [mm]	3,568	5,046	15,958	25,231	35,682
Induktivität pro LE [μ H/m]	2,632	2,493	2,032	1,849	1,710
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=1$	13,158	12,465	10,162	9,246	8,552
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=2$	52,631	49,858	40,648	36,983	34,210
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=3$	118,419	112,181	91,457	83,211	76,972
Widerstand pro LE [Ω /km]	2	1	0,1	0,04	0,02
Widerstand R_2 [m Ω]	24	12	1,2	0,48	0,24
R_2 [m Ω] für $N_2=2$	48	24	2,4	0,96	0,48
R_2 [m Ω] für $N_2=3$	72	36	3,6	1,44	0,72

Tab. 9.4: Doppelleitung mit Abstand $d = 1,1$

Leiterquerschnitt [mm ²]	10	20	200	500	1000
Leiterradius [mm]	1,784	2,523	7,979	12,616	17,841
Leiterdurchmesser [mm]	3,568	5,046	15,958	25,231	35,682
Induktivität pro LE [μ H/m]	2,670	2,531	2,071	1,887	1,749
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=1$	13,348	12,655	10,353	9,436	8,743
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=2$	53,393	50,621	41,410	37,745	34,972
Induktivität L_2 [μ H] für $N_2=3$	120,134	113,896	93,173	84,926	78,688
Widerstand pro LE [Ω /km]	2	1	0,1	0,04	0,02
Widerstand R_2 [m Ω]	24,4	12,2	1,22	0,488	0,244
R_2 [m Ω] für $N_2=2$	48,8	24,4	2,44	0,976	0,488
R_2 [m Ω] für $N_2=3$	73,2	36,6	3,66	1,464	0,732

Zur Berechnung des Ohmschen Widerstandes wurde dabei wie auch in im nachfolgenden Kapitel eine elektrische Leitfähigkeit von $50 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ zugrunde gelegt (vgl. [2]).

Durch Integration über die Flussdichte lässt sich durch entsprechende Wahl der Integrationsgrenzen der magnetische Fluss Φ_{21} durch die von einer Spule 2 in der Höhe z aufgespannte Fläche berechnen. Damit kann der Koppelfaktor k_1 von Primärspule zu Sekundärspule bestimmt werden.

In Abb. 9.9 ist der analytisch berechnete Koppelfaktor k von Linienleitern mit einem Leiterabstand $d = 1 \text{ m}$ über die Höhe z der zweiten Spule dargestellt und zur Verdeutlichung in Tab. 9.5 für verschiedene Luftspalte von 10 cm bis 30 cm aufgelistet. Der Vergleich mit Abb. 9.7 zeigt, dass die analytisch und numerisch bestimmten Werte sehr nahe bei einander liegen, wobei die analytischen geringfügig größer sind.

Um unterschiedliche Segmentlängen von Primär- und Sekundärseite zu berücksichtigen, müsste die Spulenanordnung in einem weiteren Arbeitspaket dreidimensional modelliert werden. Außerdem könnten die Koppelfaktoren durch Experimente im Labor messtechnisch erfasst und überprüft werden.

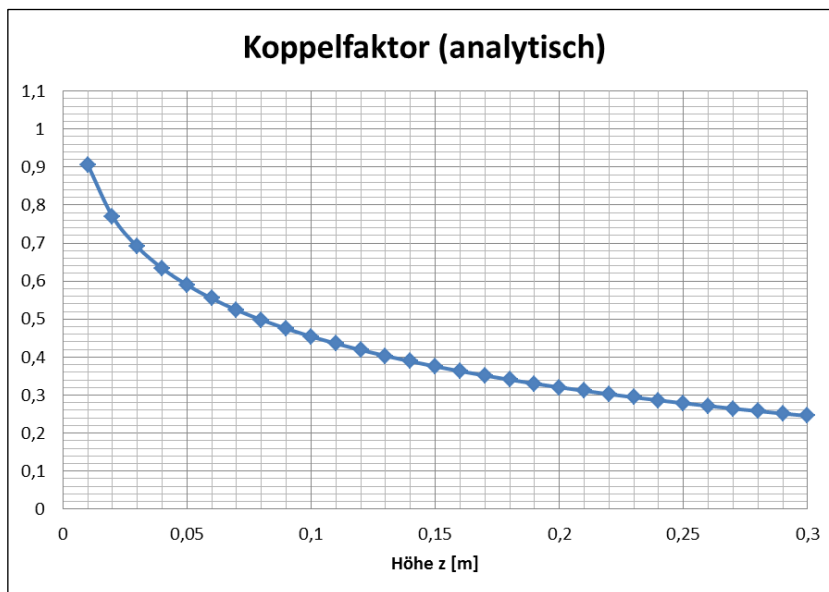


Abb. 9.9: Koppelfaktor über z für Linienleiter mit $d = 1 \text{ m}$ und $r = 8 \text{ mm}$

Tab. 9.5: Koppelfaktor von Linienleitern mit $d = 1$ m und $r = 8$ mm

Luftspalt	Koppelfaktor
10 cm	0,454
15 cm	0,376
20 cm	0,321
25 cm	0,279
30 cm	0,246

9.2 Auslegung der Wicklungssysteme

In diesem Kapitel werden die zur Auslegung der Wicklungssysteme durchgeführten Berechnungsschritte und deren Ergebnisse sowie die daraus gezogenen Schlüsse vorgestellt. Ausgehend vom zugseitigen Leistungsbedarf und Vorgaben bezüglich der Geometrie werden zunächst die Eckdaten der Sekundärseite und dann die der Primärseite bestimmt. Globale Parameter sind dabei in Tab. 9.6 aufgeführt.

Tab. 9.6: Globale Parametervorgaben

Magnetische Permeabilität (Vakuum) μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m $\approx 1,25664 \cdot 10^{-6}$ H/m
Elektrische Leitfähigkeit eines Kabels	$50 \cdot 10^6$ S/m
Sekundärseitiger Leistungsbedarf $P_{2,ges}$	25 MW
Wirkungsgrad der Übertragung	≥ 90 %

9.2.1 Auslegung der Sekundärseite

Aufgrund des im NGT zur Verfügung stehenden Bauraumes und der Spurbreite liegt für die Wicklungssysteme ein Leiterabstand von einem Meter nahe. Auf der Sekundärseite bietet sich eine Segmentlänge von 5 m an, da im NGT-Triebkopf rund 6,6 m und in den Mittelwagen rund 10,68 m zur Verfügung stehen. Somit können pro Mittelwagen zwei Sekundärspulen untergebracht werden und es ergibt sich bei 8 Mittelwagen plus 2 Triebköpfe insgesamt eine Anzahl von 18 Segmenten pro Zug. Daraus berechnet sich eine Leistung pro Segment von rund 1,4 MW. Um den Ausfall eines Segments ausgleichen zu können, wird die Nennleistung pro Segment auf 1,5 MW festgelegt. Dafür können beispielsweise Umrichter mit einer Zwischenkreisspannung von 1,4 kV und einem gleichgerichteten Strom von rund 1,07 kA eingesetzt werden. Dies entspricht wiederum einer Gesamtleistung pro Zug von 25,5 MW bei 17 aktiven Segmenten oder entsprechend 27 MW bei 18 aktiven Segmenten. Diese Daten sind in Tab. 9.7 als Übersicht aufgelistet.

Tab. 9.7: Parametervorgaben der Sekundärseite

Segmentlänge [m]	5
Segmentbreite [m]	1
Segmentanzahl pro Zug	18
Aktive Segmente pro Zug	17
Wunschleistung [MW]	25
Segmentnennleistung [MW]	1,5
Gesamtleistung [MW]	25,5
$I_{2,eff}$ [A] für $U_{ZK}=1400V$	1190,058
$U_{2,eff}$ [V]	1260,443

Im vorherigen Kapitel wurden mögliche Koppelfaktoren und Induktivitäten der Spulen für zugtypische Größenverhältnisse unter beschriebenen Annahmen berechnet. Für einen Leiterabstand von einem Meter ergibt sich bei einem Leiterquerschnitt von 200 mm² eine Induktivität von rund 2 µH pro Meter. Bei einer Segmentlänge von 5 m und der Windungszahl $N_2=2$ resultiert dies in einer sekundärseitigen Induktivität L_2 von rund 40 µH. Durch Netzwerkanalyse und Berechnung der Eingangsimpedanz sowie der Spannungsübertragungsfunktion von CET-Systemen lässt sich ein optimaler Lastwiderstand, den der sekundärseitige Umrichter simulieren sollte, bestimmen. Für beidseitig seriell kompensierte Übertragungsstrecken berechnet sich dieser Lastwiderstand durch die folgende Gleichung:

$$R_{L,opt} = \omega_0 L_2 \cdot \sqrt{2 - 2\sqrt{1 - k^2}}$$

Für $k < 0,5$ ergibt sich mit einem Fehler kleiner als 4% annähernd:

$$R_{L,opt} \approx k \cdot \omega_0 L_2$$

Daraus lassen sich nun mit der gewünschten sekundärseitigen Leistung die passenden Werte für die Spannung und Stromstärke berechnen. Die Ergebnisse für eine Nennleistung von 1,5 MW pro Segment sind in den folgenden Tabellen für verschiedene Koppel­faktoren und Betriebsfrequenzen dargestellt. Dabei wurde für die Umrechnung zwischen Effektivwerten und Gleichgrößen ein idealer Umrichter mit vollständiger Glättung ange­nommen:

$$I_{2,DC} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{2,eff} \approx 0,9 \cdot I_{2,eff}$$

Tab. 9.8: Lastwiderstand, Strom und Spannung für $k=0,3$

Betriebsfrequenz [kHz]	10	20	30	40	50	100
Lastwiderstand $R_{L,opt}$ [Ω]	0,754	1,508	2,262	3,016	3,770	7,540
$I_{2,eff}$ [A]	1410,474	997,356	814,338	705,237	630,783	446,031
$U_{2,eff}$ [V]	1063,472	1503,977	1841,988	2126,945	2377,996	3362,995
$I_{2,DC}$ [A]	1269,873	897,936	733,161	634,936	567,904	401,569
$U_{2,DC}$ [V]	1181,221	1670,498	2045,934	2362,441	2641,290	3735,348

Tab. 9.9: Lastwiderstand, Strom und Spannung für $k=0,2$

Betriebsfrequenz [kHz]	10	20	30	40	50	100
Lastwiderstand $R_{L,opt}$ [Ω]	0,503	1,005	1,508	2,011	2,513	5,027
$I_{2,eff}$ [A]	1727,471	1221,506	997,356	863,735	772,548	546,274
$U_{2,eff}$ [V]	868,322	1227,992	1503,977	1736,643	1941,626	2745,874
$I_{2,DC}$ [A]	1555,270	1099,742	897,936	777,635	695,538	491,820
$U_{2,DC}$ [V]	964,463	1363,956	1670,498	1928,925	2156,604	3049,899

Tab. 9.10: Lastwiderstand, Strom und Spannung für $k=0,15$

Betriebsfrequenz [kHz]	10	20	30	40	50	100
Lastwiderstand $R_{L,opt}$ [Ω]	0,377	0,754	1,131	1,508	1,885	3,770
$I_{2,eff}$ [A]	1994,711	1410,474	1151,647	997,356	892,062	630,783
$U_{2,eff}$ [V]	751,988	1063,472	1302,482	1503,977	1681,497	2377,996
$I_{2,DC}$ [A]	1795,871	1269,873	1036,847	897,936	803,138	567,904
$U_{2,DC}$ [V]	835,249	1181,221	1446,694	1670,498	1867,674	2641,290

Tab. 9.11: Lastwiderstand, Strom und Spannung für $k=0,1$

Betriebsfrequenz [kHz]	10	20	30	40	50	100
Lastwiderstand $R_{L,opt}$ [Ω]	0,251	0,503	0,754	1,005	1,257	2,513
$I_{2,eff}$ [A]	2443,013	1727,471	1410,474	1221,506	1092,548	772,548
$U_{2,eff}$ [V]	613,996	868,322	1063,472	1227,992	1372,937	1941,626
$I_{2,DC}$ [A]	2199,484	1555,270	1269,873	1099,742	983,639	695,538
$U_{2,DC}$ [V]	681,978	964,463	1181,221	1363,956	1524,949	2156,604

Aus den formalen Zusammenhängen sowie den oben aufgeführten Tabellen lässt sich erkennen, dass ein sinkender Koppelfaktor durch eine Erhöhung der Betriebsfrequenz ausgeglichen werden kann. Jedoch bedeutet dies auch, dass die Kondensatoren der Blindleistungskompensation daran angepasst werden müssen. Für den aktuell erhältlichen Umrichter SKiiP 1203 GB172-2D der Firma Semikron ist ein Nennstrom von 1200 A zulässig und eine Zwischenkreisspannung von 1,4 kV (vgl. Kapitel 8) möglich. Je nachdem welcher Koppelfaktor bei einem Prototyp im Labor bzw. bei einem realen Zug tatsächlich erreicht wird, kann die passende Betriebsfrequenz zwischen 10 kHz und 50 kHz liegen.

Die aufgrund des zur Verfügung stehenden Bauraumes unterschiedlichen Segmentlängen von Primär- und Sekundärseite konnten bei nur zweidimensional durchgeführten Feldberechnungen nicht berücksichtigt werden. Allerdings kann der Einfluss auf die Koppelfaktoren anhand der aufgespannten Flächen abgeschätzt werden.

Bei Segmentlängen von fünf bzw. zwanzig Metern (vgl. Tab. 9.7 und Tab. 9.14) spannt die Primärspule die vierfache Fläche auf. Daher wird der Koppelfaktor k_1 ohne Flussführung nur ein Viertel der im vorigen Kapitel berechneten Werte erreichen. Das bedeutet, dass sich der resultierende Koppelfaktor k halbiert. Somit ist ein Koppelfaktor im Bereich von 0,12 bis 0,18 zu erwarten.

Bei der Annahme eines Koppelfaktors von 0,15 ergibt sich eine Auslegungsfrequenz von rund 28 kHz (siehe Tab. 9.12). Wird beim realen Aufbau z.B. durch einen kleineren Luft-

spalt oder größeren magnetischen Leitwert aufgrund von Ferriten ein höherer Koppelfaktor erzielt, so kann die Betriebsfrequenz entsprechend abgesenkt werden.

Tab. 9.12: Parameter der Betriebsfrequenz

Windungszahl N_2	2
Leiterlänge [m] für $N_2=2$	24
Induktivität L_2 [μH]	40
Koppelfaktor	0,15
Auslegungsfrequenz [kHz]	28,095

Aus den Abmessungen der Spule, der Windungszahl, dem Leiterquerschnitt und der elektrischen Leitfähigkeit von Kupfer lässt sich der Ohmsche Widerstand des Leiters berechnen. Bei Kabeln reduziert sich die Leitfähigkeit etwas im Vergleich zu reinem Kupfer und wurde für die vorliegenden Berechnungen auf $50 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ abgerundet (vgl. [2]). Damit ergibt sich bei einem Leiterquerschnitt von 200 mm^2 für die Sekundärseite je Spulensegment ein Widerstand von etwa $2,4 \text{ m}\Omega$ und damit Verluste von rund $3,456 \text{ kW}$. Bei 17 aktiven Segmenten summieren sich die sekundärseitigen Verluste somit auf $58,752 \text{ kW}$ und betragen bezogen auf die Gesamtleistung nur rund zwei Promille unter Volllast. Da der Strom quadratisch in die Verluste eingeht, fallen bei halber Übertragungsleistung und konstanter Spannung nur ein Viertel der Verluste bei gleichem Leiterquerschnitt an. Falls weitere Fortschritte in der Halbleitertechnologie eine Erhöhung der Zwischenkreisspannung ermöglichen, könnte der Leiterstrom für Volllast und folglich auch die Verluste entsprechend reduziert werden. Alternativ könnte auch der Leiterquerschnitt verkleinert und somit Material eingespart werden, sofern der Wirkungsgrad nicht gesteigert werden soll.

Tab. 9.13 zeigt die resultierenden Eckdaten der Sekundärseite im Überblick. Die Stromdichte erreicht mit 6 A/mm^2 bei Volllast einen zwar nicht unüblichen, aber dennoch so hohen Wert, dass eine Kühlung nötig sein könnte (vgl. [3]). Mit thermischen Berechnungen und Strömungssimulationen könnte untersucht werden, ob der Fahrtwind bereits für eine ausreichende Kühlung sorgt oder ob Lufteinlässe bzw. Kühlkanäle hilfreich wären.

Tab. 9.13: Eckdaten der Sekundärseite

Segmentlänge [m]	5
Segmentbreite [m]	1
Segmentanzahl pro Zug	18
Aktive Segmente pro Zug	17
Segmentnennleistung [MW]	1,5
Gesamtleistung [MW]	25,5
Windungszahl N_2	2
Leiterlänge [m] für $N_2=2$	24
Induktivität L_2 [μH]	40
Koppelfaktor	0,15
Auslegungsfrequenz [kHz]	28,095
$I_{2,\text{Nenn}}$ [A]	1200
$U_{2,\text{zk}}$ [V]	1400
Leiterquerschnitt [mm^2]	200
Stromdichte [A/mm^2]	6
R_2 [$\text{m}\Omega$] für $N_2=2$	2,4
Verluste pro Segment $P_{V2,\text{seg}}$ [kW]	3,5
Verluste $P_{V2,\text{zug}}$ [kW]	58,8
Relative Verluste [%]	2,3

9.2.2 Auslegung der Primärseite

Aus Übertragungs- und Symmetriegründen sollten auf der Primärseite die Segmentlänge der Länge eines Wagens und die Segmentbreite der der Sekundärseite entsprechen. Eine Zuglänge von 200 m ergibt also eine Anzahl von zehn Segmenten. Um auch hier den Ausfall eines Segments ausgleichen zu können, wird die Nennleistung pro Segment auf 3 MW aufgerundet. Dies entspricht wiederum einer Gesamteingangsleistung pro Zug von 27 MW bei neun aktiven Segmenten oder gar 30 MW bei zehn aktiven Segmenten. Diese Daten sind in Tab. 9.14 als Übersicht aufgelistet.

Tab. 9.14: Parametervorgaben der Primärseite

Segmentlänge [m]	20
Segmentbreite [m]	1
Segmentanzahl pro Zug	10
Aktive Segmente pro Zug	9
Mindestleistung [MW]	25
Segmentnennleistung [MW]	3
Gesamtnennleistung [MW]	27
$I_{1,eff}$ [A] für $U_{ZK}=1400V$	2380,116

Da sich über einem primärseitigen Segment bis zu zwei Pickups befinden können, muss die doppelte Ausgangsleistung eines sekundärseitigen Segments bereitgestellt werden können. Da die Zwischenkreisspannung für bidirektionalen Energietransfer auf beiden Seiten den gleichen Nennwert haben soll, folgt daraus, dass der primärseitige Nennstrom den doppelten und die Windungszahl N_1 den halben Wert haben muss. Aufgrund der vierfachen Segmentlänge ergibt sich dennoch die gleiche Induktivität, was sich vorteilhaft auf das Schaltungsverhalten auswirkt.

Tab. 9.15: Parameter der Primärspulen

Windungszahl N_1	1
Leiterlänge [m] für $N_1=1$	42
Induktivität L_1 [μH]	40

Somit ergeben sich für einen idealen Wechselrichter auf der Primärseite die in Tab. 9.16 aufgelisteten Werte.

Tab. 9.16: Parameter der primärseitigen Wechselrichter

$I_{1,Nenn}$ [A]	2400
$I_{1,DC}$ [A]	2160,759
$U_{1,ZK}$ [V]	1400
$U_{1,eff}$ [V]	1260,443
Leistung pro Segment [MW]	3,025

Analog zum Vorgehen auf der Sekundärseite können die Ohmschen Widerstände der Primärspulen und die anfallenden Verluste berechnet werden. Bei einem identischen Leiterquerschnitt von 200 mm^2 für die Primärseite ergibt sich je Spulensegment ein Widerstand von etwa $4,2 \text{ m}\Omega$ und damit Verluste von rund $24,192 \text{ kW}$. Bei 9 aktiven Segmenten summieren sich die primärseitigen Verluste somit auf $217,728 \text{ kW}$ und betragen bezogen auf die Gesamtleistung rund acht Promille unter Vollast.

Tab. 9.17 zeigt die resultierenden Eckdaten der Primärseite im Überblick. Die Stromdichte erreicht mit 12 A/mm^2 bei Vollast einen sehr hohen Wert. Dabei gilt jedoch zu beachten, dass der NGT bei einer Geschwindigkeit von 400 km/h rund $111,11$ Meter pro Sekunde und bei 480 km/h rund $133,33$ Meter pro Sekunde zurücklegt. Somit ist jedes primärseitige Segment weniger als zwei Sekunden in Betrieb und es kann mitnichten von Dauerbetrieb gesprochen werden. Da die relativen Verluste auf der Primärseite mit rund acht Promille immer noch unter einem Prozent liegen, könnte der Leiterquerschnitt für einen Wirkungsgrad über 90 Prozent sogar noch etwas reduziert und folglich Material eingespart werden.

Tab. 9.17: Eckdaten der Primärseite

Segmentlänge [m]	20
Segmentbreite [m]	1
Segmentanzahl pro Zug	10
Aktive Segmente pro Zug	9
Segmentleistung [MW]	3
Gesamtleistung [MW]	27
Windungszahl N_1	1
Leiterlänge [m] für $N_1=1$	42
Induktivität L_1 [μH]	40
Auslegungsfrequenz [kHz]	28,095
$I_{1,\text{Nenn}}$ [A]	2400
$U_{1,\text{ZK}}$ [V]	1400
Leistung pro Segment [MW]	3,025
Gesamtleistung [MW]	27,226
Leiterquerschnitt [mm^2]	200
Stromdichte [A/mm^2]	12
R_1 [mm] für $N_1=1$	4,2
Verluste pro Segment $P_{V1,\text{seg}}$ [kW]	24,192
Verluste $P_{V1,\text{Zug}}$ [kW]	217,728
Relative Verluste [‰]	8,064

Mit thermischen Berechnungen könnte untersucht werden, wie sehr sich Wechselrichter und Primärspulen in dieser kurzen Belastungszeit in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur und der verwendeten Vergussmassen erwärmen. Daraus kann dann abgeleitet werden, welche Verlustleistungen thermisch akzeptabel wären und wie viel Kupfer noch eingespart werden könnte.

9.2.3 Wirkungsgrad

Für die in den vorherigen Abschnitten vorgestellte Auslegung der Primär- und Sekundärspulen können nun die Gesamtverluste und der theoretische Wirkungsgrad der Anordnung berechnet werden. Tab. 9.18 zeigt die Ohmschen Verluste in den Spulen und den Wirkungsgrad im Überblick. Dabei gilt jedoch zu beachten, dass die Verluste für die aufgerundeten Nennströme berechnet wurden und im realen Betrieb meist kleinere Ströme fließen, wodurch sich auch die Verluste reduzieren. Andererseits treten in der Realität, z.B. durch Wirbelströme in der Schirmung und Flussführung, noch zusätzliche Verluste auf, welche den Wirkungsgrad verringern. Beim Gesamtsystem einer induktiven Energieübertragung kommen außerdem noch die Schaltverluste in den Wechsel- und Gleichrichtern hinzu.

Tab. 9.18: Ohmsche Verluste in den Spulen

Eingangsleistung [MW]	27,226
Verluste Primärseite [kW]	217,728
Verluste Sekundärseite [kW]	58,752
Gesamtverluste [kW]	276,480
Relative Verluste [%]	1,016
Wirkungsgrad [%]	98,984

9.3 Zusammenfassung

Gegenstand dieses Berichtes ist die Auslegung des Übertragungssystems zur fahrdrahtlosen Energieversorgung von Schienenfahrzeugen mittels kontaktloser induktiver Energieübertragung für den Einsatz im Vollbahnverkehr. Dazu wurden in Kapitel 9.1 mit numerischen und analytischen Feldberechnungen charakteristische Größen wie Induktivitäten und Koppelfaktoren von Spulenanordnungen berechnet, wobei für die auf unterschiedliche Weise berechneten Werte eine gute Übereinstimmung erzielt werden konnte. Ausgehend von diesen Ergebnisse und den gegebenen Randbedingungen wurden die Wicklungssysteme in Kapitel 9.2 ausgelegt und die Eckdaten vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass auch für die im Hochgeschwindigkeitsverkehr benötigten Übertragungsleistungen im Megawattbereich ein Wirkungsgrad von rund 99% hinsichtlich der Ohmschen Verluste in den Spulen erreicht werden kann. Somit ist auch bei Berücksichtigung der Schaltverluste in den Wechsel- und Gleichrichtern ein Gesamtwirkungsgrad von deutlich über 90% möglich.

9.4 Quellen

- [1] Ekkehard Bolte: Elektrische Maschinen, Springer, 2012
- [2] Pack Feindrähte: Technische Daten RUPALIT® Hochfrequenzlitzen,
http://www.pack-feindraehte.de/de/technische_daten/litzentabelle.html
- [3] DIN 41300-1:1979 Kleintransformatoren

Die nachfolgende Tabelle liefert – exemplarisch für den NGT HGV – die Eckdaten des Übertragungssystems.

Tab. 9.19: Eckdaten des Übertragungssystems (NGT HGV)

	infrastrukturseitig (Primärseite)	fahrzeugseitig (Sekundärseite)
Frequenz		20 ... 40 kHz
Spulengeometrie	20 m x 1 m (Windungszahl: 1)	5 m x 1 m (Windungszahl: 2)
Spulenanzahl	10 Segmente pro Zug	max. 18 Segmente (@NGT HGV) min. 3 Segmente (@NGT LINK)
Nennquerschnitt	200 mm ²	200 mm ²
Nennleistung	2,8 MW	1,4 MW
Nennspannung		1,4 kV
Nennstrom	2.000 A	1.000 A
Induktivität	40 µH	40 µH

10 Abschätzungen zu Zuverlässigkeit und Instandhaltung

Von Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche, Prof. Dipl.-Ing. Dieter Bögle und Dipl.-Ing. (FH) Peter Müller

Ziel der im Rahmen dieses Kapitels dargestellten Untersuchungen war es, herauszuarbeiten, welche betrieblichen Vorteile sich durch einen Übergang von der konventionellen Energieübertragung mit Oberleitung zur induktiven Energieübertragung im Hinblick auf die Systemzuverlässigkeit und -verfügbarkeit ergeben. In konventionellen Bahnnetzen ist zum Beispiel die Kurzschlusshäufigkeit ein Kriterium das Aussagen über die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit ermöglicht, sie beträgt in etwa das Acht- bis Zehnfache gegenüber der Landesenergieversorgung. Infolgedessen ergibt sich eine Häufigkeit an Betriebsstörungen bis hin zum dauerhaften Ausfall der betroffenen Speiseabschnitte. Dadurch ist die Verfügbarkeit des Netzes zum Teil erheblich eingeschränkt. Hinzu kommt die Anfälligkeit von Oberleitungsanlagen gegenüber äußeren, nicht vorhersehbaren Einflüssen (z.B. Umwelteinflüsse) die lokal zum dauerhaften Ausfall des Systems führen können. Vor diesem Hintergrund soll die Systemzuverlässigkeit des konventionellen Bahnsystems analysiert werden. Auf Grundlage dieser Referenz soll dann die Zuverlässigkeit bzw. das Ausfallverhalten einer Energieversorgung mit induktiver Energieübertragung abgeschätzt werden, um so die geplanten Vorteile des neuen Systems hervorzuheben. Zusätzlich zu den Betrachtungen zur Systemzuverlässigkeit soll sowohl für das konventionelle als auch für das induktive Bahnenergieversorgungssystem ein Vergleich zum Instandhaltungsaufwand und den damit verbundenen Instandhaltungskosten durchgeführt werden. Dazu muss der Instandhaltungsaufwand von bestehenden Systemen mit Oberleitung analysiert und für die induktive Energieübertragung ein entsprechendes Wartungskonzept erstellt werden.

Das Ziel ist der Vergleich der Systemzuverlässigkeit und dem Instandhaltungsaufwand zwischen konventioneller und induktiver Energieübertragung.

10.1 Definition der Analysegegenstände

Gegenstand der Untersuchungen zur Zuverlässigkeit und zur Verfügbarkeit sind die strecken- und fahrzeugseitigen Energieübertragungssysteme für einen konventionellen Hochgeschwindigkeitszug mit Oberleitungsenergieversorgung und das Energieübertragungssystem des Next Generation Train (NGT), das auf der induktiven Energieübertragung basiert. Für den direkten Vergleich eines konventionellen Hochgeschwindigkeitszuges wird für die weitere Analyse das Energieübertragungssystem des ICE 3 der Deutschen

Bahn AG als Referenzsystem gewählt. Der ICE 3 ist, anders als seine Vorgänger mit Triebkopfkonzept, als Triebzug mit verteiltem Antrieb konzipiert und realisiert worden. Dies prädestiniert ihn zum Vergleich mit dem NGT, der ebenfalls als Triebzug konzipiert ist. Im Folgenden werden die für die weiteren Analysen relevanten Systemkomponenten für den ICE 3 und den NGT aufgeführt und abgegrenzt. Generell wird die streckenseitige Betrachtungsgrenze bei der Stromversorgung der Oberleitung und den streckenseitigen Spulensystemen gezogen. Die vorgelagerten Energieversorgungssysteme sind in der Regel identisch, sie variieren je nach strecken- und länderspezifischen Voraussetzungen und Gegebenheiten.

10.1.1 Systemkomponenten und Systemabgrenzung ICE 3

Die relevanten Komponenten zur Energieübertragung des ICE 3 werden in streckenseitige und fahrzeugseitige Komponenten aufgeteilt. Um die späteren Untersuchungen für Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit anzustellen, muss ein Verständnis für Aufgaben und Funktionen der Komponenten erzeugt werden. Im Folgenden werden die relevanten Komponenten und die Aufgaben und Funktionen, die zur Energieübertragung beitragen, genauer beschrieben. Damit können die funktionalen und fehlfunktionalen Abläufe, die die Grundlage für die Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsanalyse darstellen, besser verstanden werden.

10.1.1.1 Streckenseitige Systemkomponenten und Systemabgrenzung ICE 3

Im Versorgungsnetz der Deutschen Bahn AG wird der Bahnstrom auf einer Spannungsebene von 110 kV, mit einer Frequenz von 16,7 Hz transportiert und verteilt. Vor der Einspeisung in die Fahrleitungen der Strecken, wird der Bahnstrom in Unterwerken auf die Fahrleitungsspannung von 15 kV transformiert. Zur Bereitstellung der elektrischen Energie für Schienenfahrzeuge existieren prinzipiell zwei unterschiedliche Möglichkeiten: Bahneigene Kraftwerke und der Energiebezug aus dem öffentlichen Netz der Energieversorgungsunternehmen (EVU). Das 110-kV-Bahnstromnetz speist mittels Fernleitungen die Unterwerke an den Bahnstrecken. Unterwerke wandeln die Spannung von 110 kV auf die Fahrleitungsspannung von 15 kV und versorgen so direkt die jeweiligen Streckenabschnitte. Ist kein Bahnstromnetz vorhanden, wird über dezentrale Umformer-/Umrichterwerke aus dem öffentlichen Netz die Fahrleitung des Streckenabschnitts gespeist. In Abb. 10.1 wird eine schematische Übersicht der Bahnenergieversorgung und -

umwandlung vom EVU-Netz, den bahneigenen Wärmekraft-, Umformer- und Umrichterwerken bis hin zur Fahrleitung dargestellt.

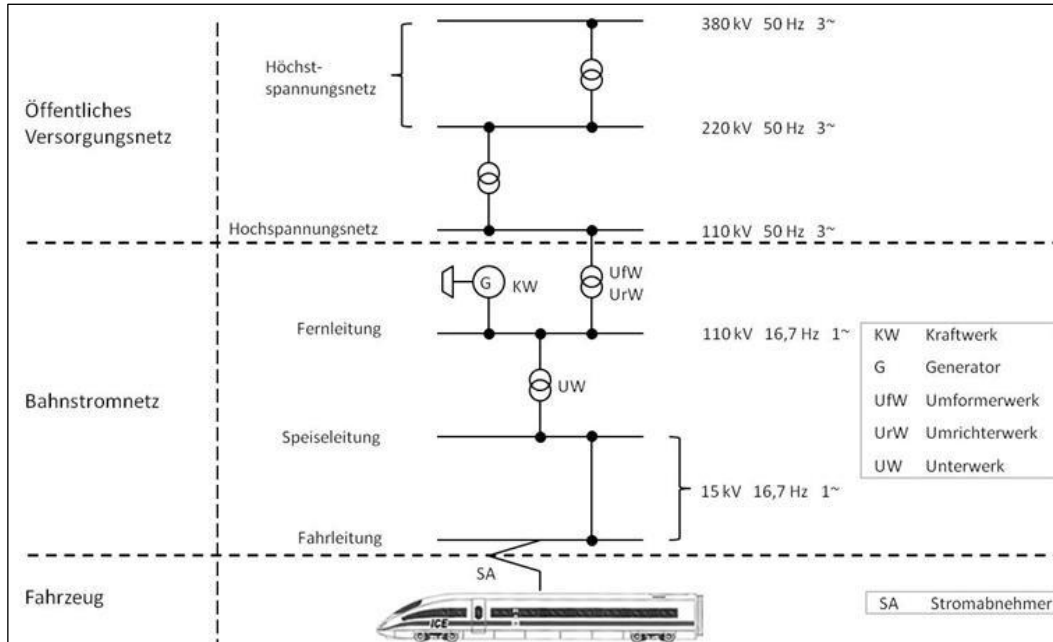


Abb. 10.1: Schematische Übersicht der Bahnenergieversorgung zur Fahrleitung [4]

Wie oben beschrieben, ist die Betrachtungsgrenze die Versorgung der Oberleitung und somit das Unterwerk.

10.1.1.2 Fahrzeugseitige Systemkomponenten und Systemabgrenzung ICE 3

Von der ICE-Familie, ist der ICE 3 als Triebzug konzipiert worden. Ein Halbzug besteht aus 8 Wagen und bildet ein für sich geschlossenes Modul. Ein Halbzug lässt sich in jeweils zwei gleiche, autarke Basismodule unterteilen, sie bestehen aus:

- einem angetriebenen Motoren- und Stromrichterwagen (EW1 bzw. EW8)
- einem antriebslosen Transformatorwagen (TW2 bzw. TW7)
- einem angetriebenen Motoren- und Stromrichterwagen (SW3 bzw. SW6)
- einem antriebslosen Mittelwagen Ladegerät und Batterie (MW4 bzw. MW5)

Zur Übersicht wird in Abb. 10.2 dieser grundlegende Aufbau und die Verteilung der Systeme der fahrzeugseitigen Energieübertragung des ICE 3 dargestellt [1].

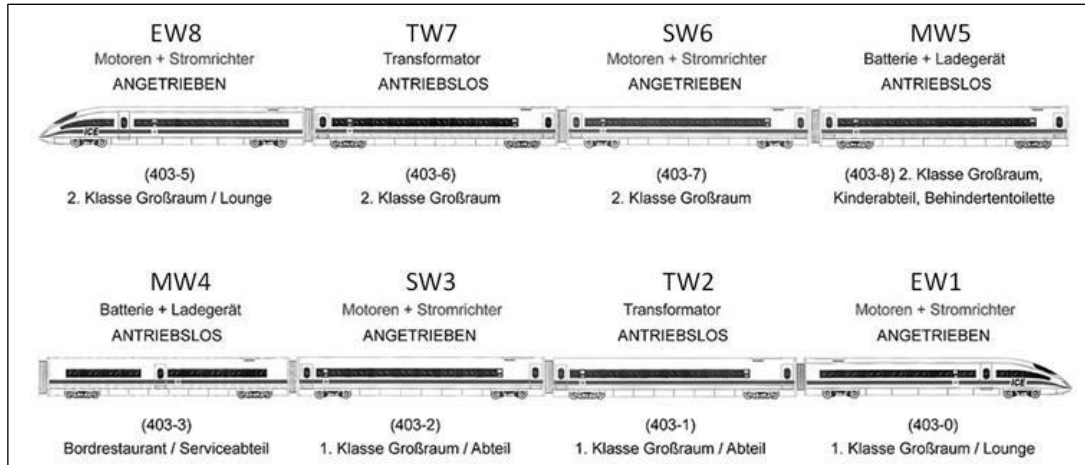


Abb. 10.2: Fahrzeugseitige Energieübertragung des ICE 3 Triebzuges [1]

Der Bahnstrom wird über Stromabnehmer in das Schienenfahrzeug geleitet. Das Fahrzeug wird hier in die Komponenten der Dachanlage und die fahrzeuginternen Komponenten unterteilt.

Nach [2] sind die einzelnen Komponenten der Dachanlage und der fahrzeuginternen Komponenten wie folgt detailliert. Die Dachanlage umfasst den Überspannungsableiter zum Schutz für atmosphärische Überspannungen, den Oberspannungswandler, den Oberstromwandler, den Haupt- und Erdungsschalter sowie die Dachleitung und deren Trennschalter. Die Dachleitung verbindet die beiden Transformatorwagen TW2 und TW7 des Triebzuges. Dadurch kann der gesamte Triebzug mit einem Stromabnehmer eines Basismodules betrieben werden. Durch die Dachleitungs-Trennschalter bleibt beim Ausfall eines Basismodules die andere voll betriebsfähig. Bei einer Störung der Dachleitung zwischen den Trennschaltern, können beide Basismodule über ihre eigenen Stromabnehmer weiter betrieben werden. Der pneumatisch betätigte Vakuum-Hauptschalter trennt im Falle einer Störung innerhalb von Millisekunden den Haupttransformator und somit die Basismodule und die Bordnetzversorgung der jeweiligen Basismodule von der Energieversorgung.

Die fahrzeuginternen Komponenten sind wie folgt aufgeteilt. Jeder Haupttransformator eines Basismodules verfügt über sechs Sekundärwicklungen, davon jeweils

- zwei für den Traktionsstromrichter des End-Stromrichterwagens (EW1 bzw. EW8),
- zwei für den Traktionsstromrichter des Stromrichterwagens (SW3 bzw. SW6) und

- zwei für den Zugsammelschienen-Umrichter des Transformatorwagens (TW2 bzw. TW7).

Die vier Traktionsstromrichter in den End-Stromrichterwagen (EW1 und EW8) und den Stromrichterwagen (SW3 und SW6) versorgen jeweils vier Fahrmotoren. Jedes Basismodul verfügt im Transformatorwagen (TW2 und TW7) über einen Zugsammelschienen-Umrichter, welcher die Zugsammelschiene mit 670 V Gleichstrom speist. Die Zugsammelschienen der beiden Basismodule können über den Koppelschütz verbunden und getrennt werden. Die Zugsammelschiene versorgt in jedem einzelnen Wagen separat sowohl den Ausgangsstromrichter für Lüfter, Kompressoren und Nebenverbraucher als auch die Hauptheizung. Die Mittelwagen (MW4 und MW5) verfügen über ein Batterieladegerät, welches die mittelwagen-übergreifende Batteriesammelschiene mit 110 V Gleichstrom speist und ihrerseits sonstige Verbraucher wie die Wagenbeleuchtung, die Tür- und Bremssteuerung und die Fahrgastinformationssysteme versorgt.

In Abb. 10.3 ist die schematische Darstellung der Komponenten der Dacheinheit und der fahrzeuginternen Komponenten für ein Basismodul nach [2] aufgeführt.

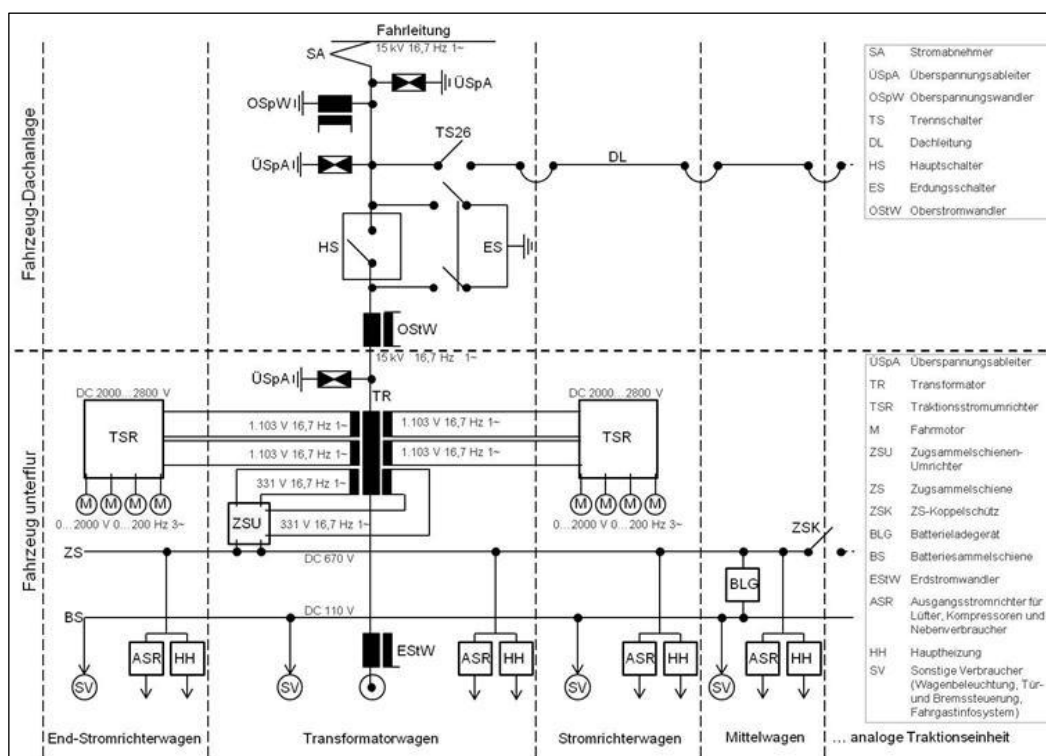


Abb. 10.3: ICE 3 Ein-System-Basismodul [1]

10.1.1.3 Zusammenfassung Systemkomponenten ICE 3

Die für die weitere Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsuntersuchungen verwendeten Komponenten werden wie folgt zusammengefasst. Es handelt sich hierbei um die Hauptkomponenten des Systems.

Für die Strecke:

- Unterwerk
- Oberleitungssystem / Fahrleitung

Für das Fahrzeug:

- Stromabnehmer 1 und 2
- Hochspannungsdachleitung inkl. Dachtrennschalter 1 und 2
- Hauptschalter 1 und 2
- Transformator 1 und 2

Nichtenthaltene Komponenten haben bezüglich der Energieübertragung keine beziehungsweise nur eine nachgelagerte Rolle und verursachen keine Hauptausfälle des Antriebssystems. Batterien und Ladegerät sind ebenso zu vernachlässigen, da diese im geplanten System des NGT in ähnlicher Funktion integriert werden können und somit keine Differenzierung bzgl. des Ausfallverhaltens zu erwarten ist.

10.1.2 Systemkomponenten und Systemabgrenzung NGT

Die für die Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsbetrachtungen relevanten Komponenten werden im Folgenden kurz dargestellt und die Betrachtungs- bzw. Systemgrenzen definiert.

10.1.2.1 Streckenseitige Systemkomponenten und Systemabgrenzung NGT

Die relevanten streckenseitigen Komponenten des NGT sind ab dem Betreibernetzwerk zu betrachten, ab diesem differenziert sich das System von dem hier als Referenzsystem festgelegten ICE 3. Es umfasst den Einspeisepunkt inklusive Leistungsschalter, den Zwischenkreis, die daran angebundene Leistungselektronik zur Versorgung der Primärwicklungssysteme und die Primärwicklungssysteme inklusive Blindleistungskompensation. In Abb. 10.4 ist der schematische Aufbau als Schnitt durch das Gleis und den Unterbau dargestellt.

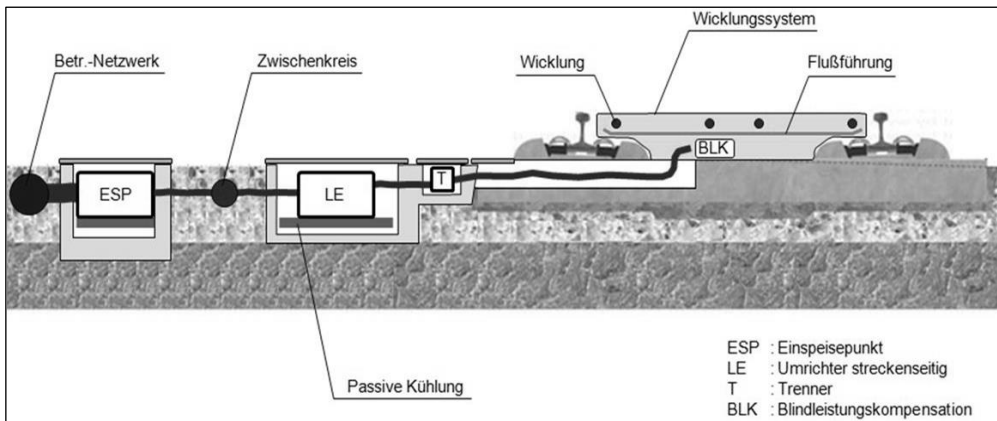


Abb. 10.4: Schematischer Aufbau durch Gleis und Unterbau

In Abb. 10.5 ist der elektrische Aufbau der Strecke als Systembild detailliert (vgl. auch Abb. 5.2).

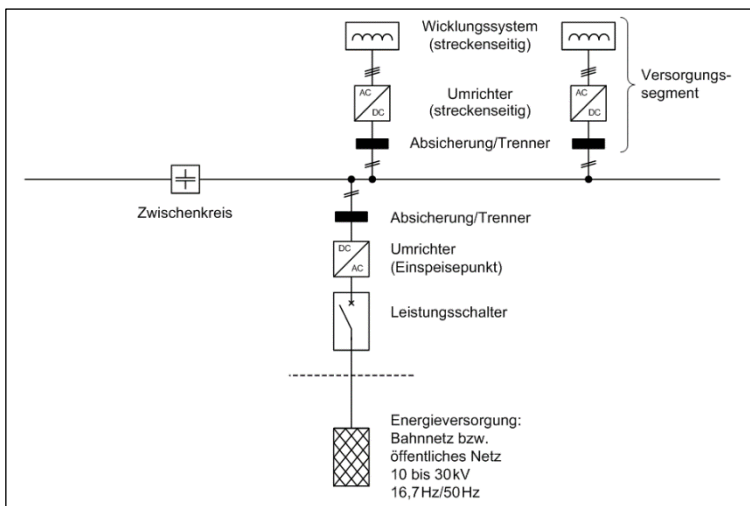


Abb. 10.5: Systembild des streckenseitigen Aufbaus [5]

Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.5.1 wird die Strecke entsprechend Tab. 10.1 folgendermaßen aufgebaut.

Tab. 10.1: Systemkonzept der streckenseitigen Komponentenverteilung

Spulen-segment-länge L	Verschaltung der Elemente	Redundanz der Leistungs-elektronik	Zwischen-kreislänge	Redundanz der Zwischen-kreislänge
10	ein-	kei-	10...30	se

Dies bedeutet, jedes Spulensegment (Wicklungssystem inkl. Blindleistungskompensation) ist direkt durch eine eigene Leistungselektronik versorgt. Ein Zwischenkreisabschnitt von 10 bis maximal 30 Kilometer versorgt somit 1000 bis maximal 3000 Spulensegmente. Die Zwischenkreisversorgung durch die Einspeisepunkte ist semi-redundant ausgeführt.

10.1.2.2 Fahrzeugseitige Systemkomponenten und Systemabgrenzung NGT

Fahrzeugseitig sind die in Abb. 10.6 enthaltenen Komponenten für die weiteren Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsbetrachtungen relevant (vgl. auch Abb. 5.2).

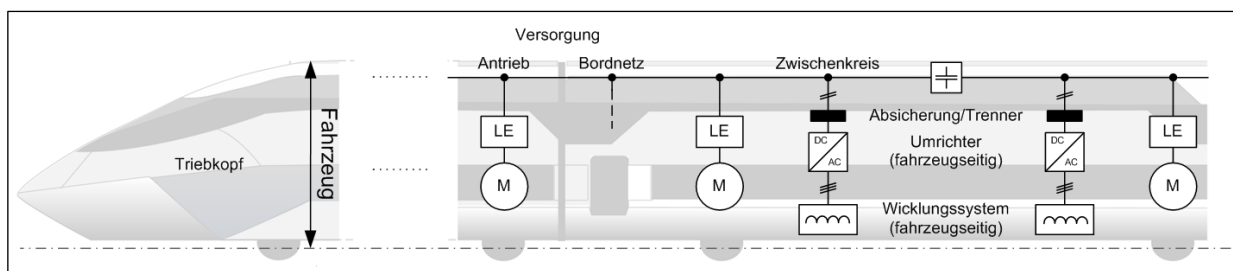


Abb. 10.6: Systembild des fahrzeugseitigen Aufbaus [5]

Hierbei handelt es sich um das sekundärseitige Wicklungssystem inklusive Blindleistungskompensation, den zugehörigen Umrichter (Leistungselektronik), sowie den fahrzeugseitigen Zwischenkreis. Entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.5.2 wird das Fahrzeug folgendermaßen aufgebaut.

Tab. 10.2: Systemkonzept der fahrzeugseitigen Komponentenverteilung

Spulensegmentlänge L	Verschaltung der Elemente	Redundanz der Leistungselektronik	Aufbau/Redundanz Zwischenkreis
2,1 m 	einzeln 	keine 	segmentierbar

Somit ergeben sich pro Steuerwagen drei Spulensegmente (Wicklungssystem inklusive Blindleistungskompensation) zu jeweils 2,1 m Länge, die sechs Fahrwagen enthalten jeweils 5 Spulensegmente zu ebenso jeweils 2,1 m Länge. Für einen zehnteiligen Triebwagen ergeben sich somit 46 baugleiche Spulensegmente. Über den Zwischenkreis speisen

über die gesamte Zuglänge verteilt alle Spulensegmente die Energie ein, die von den Verbrauchern abgenommen werden kann. Im Bedarfsfall kann dieser an den Wagengrenzen aufgetrennt werden, soweit bis jeder Wagen für sich eine autarke Einheit mit eigenem Zwischenkreis darstellt.

10.1.3 Zusammenfassung der Systemkomponenten für die Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsbetrachtungen

Im Folgenden werden die für die weiteren Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsbetrachtungen relevanten Systemkomponenten des Referenzsystems ICE 3 und des NGT in Tab. 10.3 zusammengefasst und gegenübergestellt.

Tab. 10.3: Systemkomponenten des ICE 3 und NGT für Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitsbetrachtungen

ICE 3	NGT
streckenseitig	
<ul style="list-style-type: none"> • Unterwerk • Oberleitungssystem / Fahrleitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Leistungsschalter inkl. Umrichter (Einspeisepunkt) • Streckenzwischenkreis • Leistungselektronik • Wicklungssystem inkl. Blindleistungskompensation
fahrzeugseitig	
<ul style="list-style-type: none"> • Stromabnehmer • Hochspannungsdachleitung inkl. Dachtrennschalter • Hauptschalter • Transformator 	<ul style="list-style-type: none"> • Wicklungssystem inkl. Blindleistungskompensation • Umrichter • Zwischenkreis

Nichtenthaltene Komponenten wie zum Beispiel Trenner, Leitungen und Kontaktierungsverbindungen haben bezüglich der Energieübertragung keine beziehungsweise nur eine nachgelagerte Rolle und verursachen keine Hauptausfälle des Antriebssystems. Batterien und Ladegerät sind ebenso zu vernachlässigen, da diese im ICE 3 und im geplanten System des NGT in ähnlicher Funktion integriert werden und somit keine Differenzierung bzgl. des Ausfallverhaltens zu erwarten ist.

10.2 Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit

Im folgenden Kapitel werden Schwerpunktmäßig die Themen der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit für konventionelle Energieübertragung und für fahrdrahtlose Energieübertragung betrachtet. Für die konventionelle Energieübertragung über Oberleitungssysteme wird wie bereits festgelegt das System des ICE 3 betrachtet. Daten über potentielle Ausfallhäufigkeiten der Teilsysteme stammen zum großen Teil aus Literaturangaben und Abschätzungen, da die Hersteller und Betreiber diese Daten nicht in allgemeiner Form zur Verfügung stellen. Die Datengrundlage für das fahrdrahtlose Energieübertragungssystem des NGT bilden hierbei ebenso Abschätzungen. Grundsätzlich wird jedoch versucht, die Unterschiede in der Zuverlässigkeit der Systeme auch durch den direkten Vergleich der zugrundeliegenden Zuverlässigkeitsmodelle darzustellen.

10.2.1 Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Energieübertragung des ICE 3

Das Zuverlässigkeitsziel ist die Aufrechterhaltung des Fahrplanes, potentielle Komponentenausfälle, die das Aufrechterhalten des Fahrplanes verhindern, werden somit als „Ausfall“ definiert. Die Zuverlässigkeitsanalyse erfolgt in folgenden Schritten:

1. In einem ersten Schritt wird ein Energieflussdiagramm erstellt.
2. Anhand des Energieflussdiagramms wird ein Zuverlässigkeitsblockdiagramm abgeleitet.
3. Das Zuverlässigkeitsmodell wird unter Berücksichtigung des Zuverlässigkeitsblockdiagramms erstellt.
4. Für die relevanten Komponenten werden Ausfalldaten bzw. Zuverlässigkeit wenn möglich ermittelt oder abgeschätzt.
5. Die Systemzuverlässigkeit wird ermittelt.

10.2.1.1 Energieflussdiagramm des ICE 3

Das Energieflussdiagramm für den ICE 3 ergibt sich nach den Darstellungen aus dem vorigen Kapitel somit wie folgt:

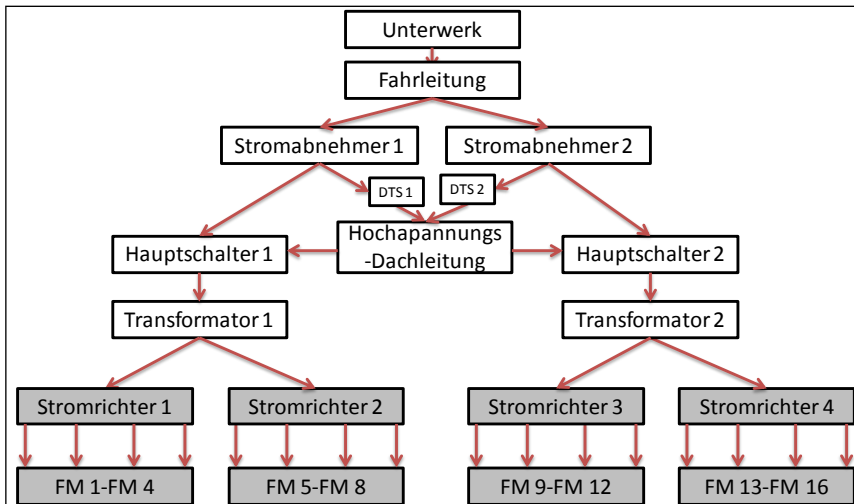


Abb. 10.7: Energieflussdiagramm der Energieversorgung des ICE 3 [6]

Die grau hinterlegten Komponenten (Stromrichter und Fahrmotoren) sind nur der Vollständigkeit wegen enthalten und gehören nicht zum Betrachtungsumfang der Zuverlässigkeitsanalyse.

10.2.1.2 Zuverlässigkeitsblockdiagramm des ICE 3

Anhand des Energieflussdiagramms wird folgendes Zuverlässigkeitsblockdiagramm erstellt:

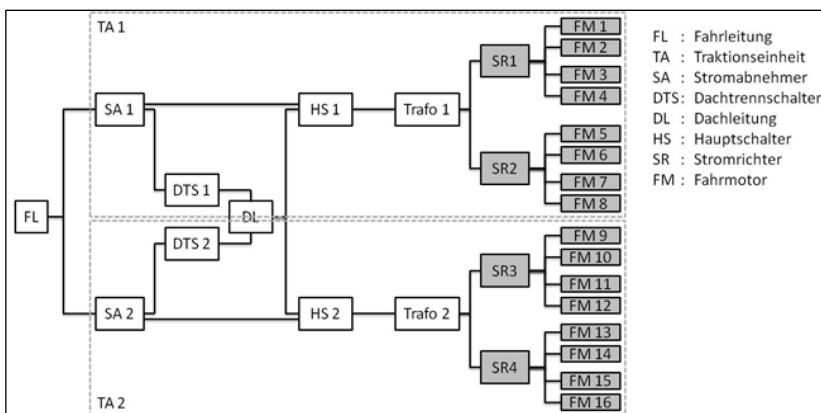


Abb. 10.8: Zuverlässigkeitsblockdiagramm der Energieversorgung des ICE 3

Das Zuverlässigkeitsblockdiagramm ist hierbei in die beiden unabhängig betreibbaren Basismodule TA1 und TA2 strukturiert. Die Dachleitung und die Dachtrennschalter bilden funktional eine Einheit und können daher in den weiteren Betrachtungen funktional als eine Einheit betrachtet werden. Folgende Ausfallszenarien müssen für die Modellierung berücksichtigt werden.

1. Ein Ausfall eines Unterwerks führt nicht zum Ausfall der Energieversorgung, da mehrere Unterwerke in das Fahrleitungssystem einspeisen, somit wird das Unterwerk nicht weiter in den Zuverlässigkeitsanalysen betrachtet, da es ähnlich wie der Einspeisepunkt des NGT-Systems dann als semi-redundant angesehen werden kann.
2. Ein Ausfall der Fahrleitung führt zum sofortigen Liegenbleiben.
3. Fällt ein Stromabnehmer aus, so kann über den zweiten Stromabnehmer und die Dachleitung die Energie weiterhin an beide Basismodule verteilt werden.
4. Fällt ein Hauptschalter aus, so dass keine Versorgung des Transformators mehr möglich ist, ist das betreffende Basismodul außer Funktion.
5. Fällt ein Transformator aus, ist das entsprechende Basismodul ohne Funktion.

Fällt ein Basismodul aus, besitzt der ICE 3 noch 50% Leistung. Hiermit kann der ICE 3 die Geschwindigkeit bei 40‰ Steigung zwar halten, jedoch nach Stillstand in dieser Steigung nicht mehr an der Steigung anfahren. Es müssen mindestens 75% (Einfachtraktion) bzw. 62,5% (Doppeltraktion) der Leistung vorhanden sein um seine Geschwindigkeit zur Aufrechterhaltung des Fahrplanes einzuhalten. Dies ist in [7] und [8] beschrieben. Für einen Halbzug gilt somit:

- Der Ausfall eines Basismodules führt zum Nichteinhalten des Fahrplanes, die Strecke kann jedoch bis zu einer Steigung von 40‰ geräumt werden.
- Der Ausfall der Fahrleitung führt direkt zum Liegenbleiben auf der Strecke und letztendlich ebenso zum Nichteinhalten des Fahrplanes.

Die Zuverlässigkeit, einen vorgegebenen Fahrplan einhalten zu können, ist in beiden Fällen nicht gegeben.

10.2.1.3 Zuverlässigkeitsmodell des ICE 3

Nach [3] wird das Zuverlässigkeitsmodell für das Energieübertragungssystem des ICE 3 als Seriensystem aus:

- Fahrleitung (*FL*),
- Dachleitungssystem (*DLS*) bestehend aus
 - Stromabnehmer (*SA*),
 - Dachtrennschalter (*DTS*),
 - Dachleitung (*DL*),
- Basismodul 1 (*TA1*)
- Basismodul 2 (*TA2*)

aufgestellt. Somit wird die Zuverlässigkeit R hinsichtlich der Funktionsfähigkeit zur Einhaltung des Fahrplanes ermittelt. *TA1* und *TA2* müssen in Serie geschaltet betrachtet werden, weil nur dann die Anforderungen erfüllt werden können.

Das Modell des Zuverlässigkeitsseriensystems für die Zuverlässigkeit der Energieübertragung des ICE 3 R_{ICE3} ergibt sich nach

$$R_S(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad [3]$$

zu

$$R_{ICE3}(t) = R_{FL}(t) \cdot R_{DLS}(t) \cdot R_{TA1}(t) \cdot R_{TA2}(t)$$

Die Fahrleitung wird als Einzelsystem betrachtet, hierbei handelt es sich um das ausfallkritischste System, Masten, Längskettenwerke, Spannwerke, etc. werden nicht separat berücksichtigt, da sie eine untergeordnete Rolle spielen.

Das Dachleitungssystem besitzt eine einfache Redundanz und wird somit als Parallelsystem aufgebaut, da die beiden Basismodule bei Ausfall eines Stromabnehmers oder zugehörigen Dachtrennschalters (inkl. Dachleitung) vom jeweiligen anderen System ohne funktionale Einbußen versorgt werden können. Folgende Grundgleichung beschreibt das Parallelsystem:

$$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad [3]$$

Für das vorliegende System des ICE 3 ergibt sich:

$$R_{DLS}(t) = 1 - [(1 - R_{SA1}(t) \cdot R_{DTS1}(t)) \cdot (1 - R_{SA2}(t) \cdot R_{DTS2}(t))]$$

Die Basismodule TA1 und TA2 entsprechen wiederum Seriensystemen nach oben aufgeführter Gleichung und werden wie folgt aufgestellt:

$$R_{TA1}(t) = R_{HS1}(t) \cdot R_{TF1}(t)$$

$$R_{TA2}(t) = R_{HS2}(t) \cdot R_{TF2}(t)$$

Somit ergibt sich folgende Systemgleichung für einen Halbzug mit zwei Basismodulen (Traktionseinheiten) die Systemzuverlässigkeit R_{ICE3} :

$$R_{ICE3}(t) = R_{FL}(t) \cdot [1 - [(1 - R_{SA1}(t) \cdot R_{DTS1}(t)) \cdot (1 - R_{SA2}(t) \cdot R_{DTS2}(t))]] \cdot R_{HS1}(t) \cdot R_{TF1}(t) \cdot R_{HS2}(t) \cdot R_{TF2}(t)$$

Ebenso ist der ICE 3 als Vollzug bestehend aus vier Basismodulen (Traktionseinheiten) im Einsatz. Der Einsatz eines Vollzuges entspricht bzgl. der Sitzplatzanzahl mit zwei mal 441 Sitzplätzen gleich 882 Sitzplätzen auch in etwa der Sitzplatzanzahl des NGT. Über das Scharfenberg-Kupplungssystem werden so zwei Halbzüge zu einer Einheit verbunden. Dieser Zustand wird im Zuverlässigkeitsmodell als Parallelsystem dargestellt, da sich nun beide Züge gegenseitig unterstützen können. Der Ausfall einer Traktionseinheit führt hierbei nicht mehr zum Nichteinhalten des Fahrplanes. 75% der Antriebsleistung stehen noch zur Verfügung und sind ausreichend, die Anforderungen abzudecken.

Die nachfolgende Gleichung stellt diesen Zusammenhang dar:

$$R_{ICE3-VZ}(t) = 1 - (1 - R_{ICE3}(t)) \cdot (1 - R_{ICE3}(t))$$

10.2.1.4 Ausfalldaten / Zuverlässigkeit der Komponenten des ICE 3

Folgende Werte für die Zuverlässigkeit R der einzelnen Komponenten werden für die Berechnung der Systemzuverlässigkeit zugrunde gelegt. Diese Werte basieren auf Erfahrungswerten vergleichbarer Systeme und Gesprächen mit Herstellern und sind bzgl. der höheren Belastungen zum Teil angepasst.

- **Fahrleitung** $\rightarrow R_{FL} = 0,970$
wird vorwiegend durch den mechanischen Verschleiß, sowie Stromüberschläge zwischen Stromabnehmer und Fahrdrabt geschädigt. Neben den Betriebsbelastungen muss hierbei jedoch auch der Ausfall aufgrund Witterung und Störfällen durch z.B. Beschädigung von außen (Bäume, etc.) berücksichtigt werden.
- **Stromabnehmer** $\rightarrow R_{SA} = 0,990$
wird zu ca. 80% durch die elektrisch zu übertragende Leistung und zu ca. 20% aufgrund mechanischen Verschleißes geschädigt.
- **Dachleitungssystem** $\rightarrow R_{DTS} = 0,995$
Besteht aus Dachleitung und Dachtrennschaltern, die hierbei die Hauptausfallrolle tragen.
- **Hauptschalter** $\rightarrow R_{HS} = 0,990$
Im Hauptschalter entstehen bei den Schaltvorgängen Lichtbögen, die beim Nulldurchgang erlöschen. Der kurzzeitig auftretende Lichtbogen sorgt durch die hohen Temperaturen für Schmelzen und damit Materialabtrag an den Schaltstellen.
- **Transformator** $\rightarrow R_{TF} = 0,995$
Bei Transformatoren können Spannungsüberschläge durch schadhafte Isolationen auftreten. Ein nicht genügend isolierendes Transformatoröl kann ebenso Schäden verursachen. Eine defekte Kühlung des Transformatoröls führt bei nicht erfolgter Leistungsreduzierung für Überhitzungsschäden am Transformator.

10.2.1.5 Ermittlung der Systemzuverlässigkeit des Energieübertragungssystems des ICE 3

Gemäß der Gleichung Systemgleichung für einen Halbzug (s.o.) und der Zuverlässigkeit R der relevanten Komponenten des ICE 3 für einen Halbzug bestehend aus zwei Basismodulen (Traktionseinheiten) ergibt sich folgende Systemzuverlässigkeit bezüglich des Einhaltens eines vorgegebenen Fahrplanes:

$$R_{ICE3} = 0,9410 \Rightarrow 94,1\%$$

Für den Vollzug bestehend aus zwei gekoppelten Halbzügen ergibt sich folgende Systemzuverlässigkeit:

$$R_{ICE3-VZ} = 0,9965 \Rightarrow 99,7\%$$

Als Fazit kann festgehalten werden: wird der ICE 3 als Vollzug betrieben, steigt die Systemzuverlässigkeit des Energieübertragungssystems stark an.

10.2.2 Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Energieübertragung des NGT

Das Zuverlässigkeitsziel ist für den NGT genauso die Aufrechterhaltung des Fahrplanes. Potentielle Komponentenausfälle, die das Aufrechterhalten des Fahrplanes verhindern, werden somit als „Ausfall“ definiert.

Die Abfolge der Zuverlässigkeitsanalyse erfolgt in abgeänderter Form, nicht analog der Analyse des ICE 3. Dies soll dem geplanten fahrdrahtlosen Energieübertragungssystem und seinen Möglichkeiten besser Rechnung tragen.

1. In einem ersten Schritt werden anhand des Leistungsbedarfs bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten acht Fälle gebildet. Es wird festgelegt wie viele der strecken- und fahrzeugseitigen Spulensegmente zur Energieübertragung notwendig sind.
2. Anhand dieser acht Fälle werden die Zuverlässigkeitsmodelle entsprechend den potentiellen Ausfallszenarien gebildet.
3. Für die relevanten Komponenten werden Ausfalldaten bzw. die Zuverlässigkeit ermittelt bzw. abgeschätzt.
4. Die Systemzuverlässigkeit wird für jeden der acht Fälle ermittelt. Somit ist es möglich eine Veränderung der Systemzuverlässigkeit über den Leistungsbedarf darzustellen.

10.2.2.1 Bildung der Analysefälle für Zuverlässigkeitsmodellbildung des NGT

Der Leistungsbedarf des NGT steigt entsprechend seiner Fahrgeschwindigkeit. Näherungsweise erfolgt dies nach Abb. 10.9. Die Funktion der Leistung über der Fahrzeuggeschwindigkeit wurde aus Arbeiten einer Fahrtsimulation vorangegangener Fahrzeuggeschwindigkeit wurde auf Basis einer Simulation gewonnen. Eine gewisse Toleranz bzw. Unschärfe ist mit dem oberen und unteren Band der Leistung über der Fahrzeuggeschwindigkeit angedeutet.

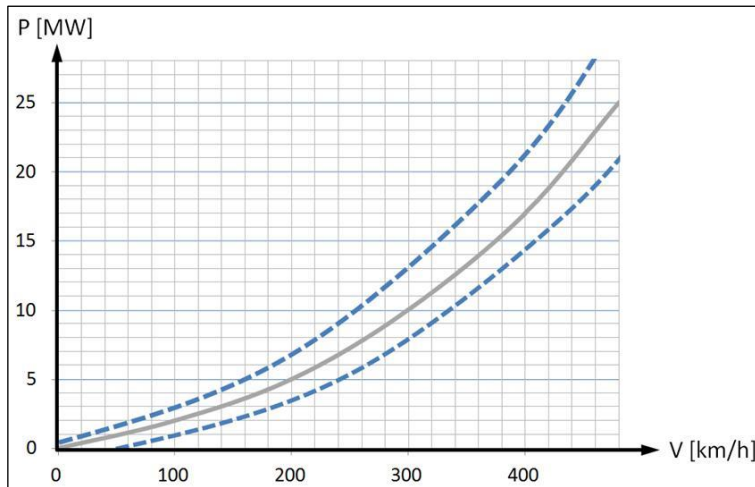


Abb. 10.9: NGT Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit (Näherung)

Tab. 10.4: Spulenzahl, Leistung und Leistung pro Spule

Fahrzeug ⁶		Strecke	
Spulenzahl	46	Spulenzahl	20
Leistung P in MW	25	Leistung P in MW	25
P pro Spule	0,54	P pro Spule	1,25

Unter Berücksichtigung der Werte aus Tab. 10.4 und festgelegten Geschwindigkeitsbereichen lässt sich mit Abb. 10.9 der jeweilige Leistungsbedarf ermitteln. Dies geschieht für folgende Geschwindigkeiten:

1. Fall 1: 200 Km/h, frei gewählt
2. Fall 2: 300 Km/h, frei gewählt
3. Fall 3: 400 Km/h, dies entspricht der maximalen Reise- bzw. Betriebsgeschwindigkeit
4. Fall 4: 430 Km/h, zur Steigerung der Auflösung nahe der maximalen Geschwindigkeit

⁶ Die Anzahl bezieht sich sowohl in dieser Tabelle als auch in den weiteren Ausführungen dieses Kapitels auf eine fahrzeugseitige Spulenlänge von 2 m.

5. Fall 5: 450 Km/h, zur Steigerung der Auflösung nahe der maximalen Geschwindigkeit
6. Fall 6: 460 Km/h, zur Steigerung der Auflösung nahe der maximalen Geschwindigkeit
7. Fall 7: 470 Km/h, zur Steigerung der Auflösung nahe der maximalen Geschwindigkeit
8. Fall 8: 480 Km/h, dies entspricht der maximalen Geschwindigkeit

Im Geschwindigkeitsbereich ab 400 Km/h wird das Intervall verfeinert, um hier ggfs. genauere Ergebnisse bzgl. des Einflusses der abnehmenden Redundanzen zu erhalten. Der jeweilige Leistungsbedarf und dazu notwendige Anzahl an Spulen zur Energieübertragung können der Tab. 10.5 entnommen werden.

Tab. 10.5: Leistungsbedarf und Spulenanzahl

Fall	V [km/h]	P [MW]	Notwendige Spulenanzahl der Strecke	Notwendige Spulenanzahl im Fahrzeug
1	200	5	4	10
2	300	10	8	19
3	400	17	14	32
4	430	20	16	37
5	450	22	18	41
6	460	23	19	43
7	470	24	20	45
8	480	25	20	46

10.2.2.2 Bildung der Zuverlässigkeitsmodelle entsprechend dem Leistungsbedarf des NGT

Folgende Ausfallszenarien müssen für die Modellierung der Strecke berücksichtigt werden:

1. Der Ausfall eines Einspeisepunktes (Leistungsschalter und Umrichter) führt nicht zum Ausfall der streckenseitigen Energieversorgung, da hier wie in Kapitel 2 dargestellt eine semi-redundanz vorliegt. Es decken immer zwei Einspeisepunkte einen streckenseitigen Zwischenkreis ab.
2. Der streckenseitige Zwischenkreis kann als nicht auszufallende Einheit betrachtet werden. Er ist keinen gravierenden äußeren Belastungen ausgesetzt und in der Regel von sehr hoher Zuverlässigkeit.
3. Fällt der Umrichter eines streckenseitigen Wicklungssystems aus, so ist auch dieses außer Funktion.
4. Das streckenseitige Spulensystem besteht aus dem Wicklungssystem und der zugehörigen Blindleistungskompensation. Das Wicklungssystem selbst kann als sehr zuverlässig betrachtet werden, fällt jedoch die Blindleistungskompensation aus wird dieses deaktiviert.

Für das Fahrzeug sind die folgenden Ausfallszenarien relevant:

1. Grundsätzlich sind Strecke und Fahrzeug durch den Luftspalt zwischen den Wicklungssystemen als Seriensystem zu behandeln.
2. Fällt der Umrichter eines fahrzeugseitigen Wicklungssystems aus, so ist auch dieses außer Funktion.
3. Das fahrzeugseitige Spulensystem besteht aus dem Wicklungssystem und der zugehörigen Blindleistungskompensation. Das Wicklungssystem selbst kann als sehr Zuverlässig betrachtet werden. Fällt jedoch die Blindleistungskompensation aus, wird dieses deaktiviert.
4. Der Fahrzeugzwischenkreis weist ebenso wie der Streckenzwischenkreis eine hohe Zuverlässigkeit auf und kann in erster Näherung vernachlässigt werden. Über den Fahrzeugzwischenkreis ist ein Energietransfer von Wagen zu Wagen möglich.

Im Folgenden werden die Zuverlässigkeitsmodelle exemplarisch für die Fälle 7 und 8 der im vorhergehenden Kapitel definierten Geschwindigkeitsfälle abgeleitet, beginnend mit dem Sonderfall 8.

Fall 8: 480 Km/h; 25 MW

Alle Spulensysteme der Strecke und im Fahrzeug sind notwendig um die maximale Leistung zu übertragen.

- Strecke:
Seriensystem aus zwei Einspeisepunkten R_{ESP_i} (Parallelsystem) und allen 20 Spulensystemen R_{SpSi} inkl. Umrichter R_{USSi} die sich unter einem NGT befinden.
- Fahrzeug:
Seriensystem aus allen 46 Spulensystemen R_{SpFi} inkl. Umrichter R_{USFi} .
- Gesamt:
Seriensystem aus Strecke und Fahrzeug.

Das Zuverlässigkeitsmodell für die Strecke ergibt sich gemäß den in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Berechnungsvorschriften wie folgt:

$$R_{NGT,S,F1} = [1 - (1 - R_{ESP1}) \cdot (1 - R_{ESP2})] \cdot (R_{SpS1} \cdot R_{USS1}) \cdot (R_{SpS2} \cdot R_{USS2}) \cdot \dots \cdot (R_{SpS20} \cdot R_{USS20})$$

Für das Fahrzeug gestaltet sich das Zuverlässigkeitsmodell folgendermaßen:

$$R_{NGT,F,F1} = (R_{SpF1} \cdot R_{USF1}) \cdot (R_{SpF2} \cdot R_{USF2}) \cdot \dots \cdot (R_{SpF46} \cdot R_{USF46})$$

Fall 7: 470 Km/h; 24 MW⁷

In der Strecke sind 20 Spulensysteme und im Fahrzeug 45 notwendig um die Leistung von 24 MW zu übertragen.

- Strecke:
Die Strecke wird durch ein Seriensystem aus zwei Einspeisepunkten R_{ESP_i} (Parallelsystem) und 20 Spulensystemen R_{SpSi} inkl. Umrichter R_{USSi} beschrieben. Zu den 20 in Serie geschalteten Spulensystemen inkl. Umrichter können in diesem Sonderfall keine weiteren Spulensysteme parallel geschaltet werden, da bereits alle Elemente

⁷ Die hier nicht näher beschriebenen Fälle 1-6 gemäß Kapitel 10.2.2.1 sind formal mit Fall 7 identisch.

in Serie geschaltet sind. Für die Strecke lässt sich folgendes Zuverlässigkeitsblockdiagramm ableiten, siehe Abb. 10.10. Dieses entspricht formal ebenso den Fällen 1 bis 6 (vgl. Kapitel 10.2.2.1). Für die unterschiedlichen Fälle können die Anzahl an streckenseitigen Spulen Tab. 10.5 entnommen werden.

- Fahrzeug: Das Fahrzeug wird durch ein Seriensystem aus 45 Spulensystemen R_{SpFi} inkl. Umrichter R_{USFi} beschrieben. Zu den 45 in Serie geschalteten Spulensystemen inkl. Umrichter wird die übrige Spule parallel geschaltet. Für das Fahrzeug lässt sich folgendes Zuverlässigkeitsblockdiagramm ableiten, siehe Abb. 10.11. Dieses entspricht formal ebenso den Fällen 1 bis 6. Hierbei kann für die unterschiedlichen Fälle ebenso die Anzahl an fahrzeugseitigen Spulen Tab. 10.5 entnommen werden.
- Gesamt:
Seriensystem aus Strecke und Fahrzeug

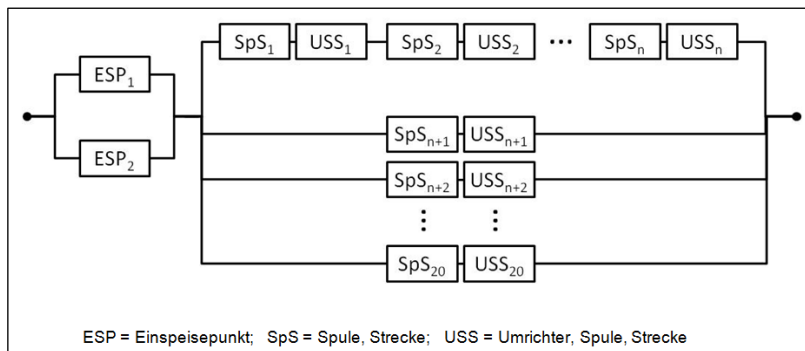


Abb. 10.10: Zuverlässigkeitsblockdiagramm NGT, Strecke, Fall 2 bis Fall 8

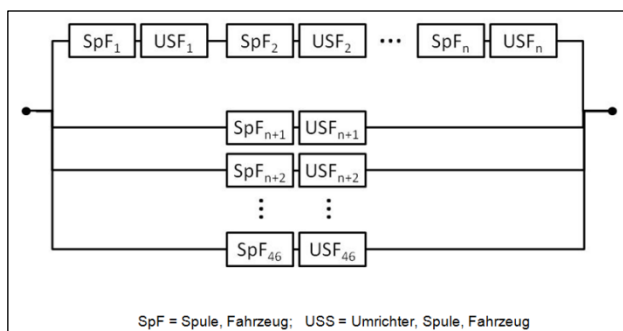


Abb. 10.11: Zuverlässigkeitsblockdiagramm NGT, Fahrzeug, Fall 1 bis Fall 7

Das Zuverlässigkeitsmodell für die Strecke wird wie folgt dargestellt:

$$\begin{aligned}
 R_{NGT,S,F2} = & [1 - (1 - R_{ESP1}) \cdot (1 - R_{ESP2})] \\
 & \cdot [1 - [1 - (R_{SpS1} \cdot R_{USS1}) \cdot (R_{SpS2} \cdot R_{USS2}) \cdot \dots \cdot (R_{SpSn} \cdot R_{USSn})] \\
 & \cdot [1 - R_{SpSn+1} \cdot R_{USSn+1}] \cdot [1 - R_{SpSn+2} \cdot R_{USSn+2}] \cdot \dots \cdot [1 - R_{SpS20} \cdot R_{USS20}]] (R_{SpS1} \\
 & \cdot R_{USS1}) \cdot (R_{SpS2} \cdot R_{USS2}) \cdot \dots \cdot (R_{SpS20} \cdot R_{USS20}) \cdot
 \end{aligned}$$

Für das Fahrzeug gestaltet sich das Zuverlässigkeitsmodell folgendermaßen:

$$\begin{aligned}
 R_{NGT,F,F2} = & [1 - [1 - (R_{SpS1} \cdot R_{USS1}) \cdot (R_{SpS2} \cdot R_{USS2}) \cdot \dots \cdot (R_{SpSn} \cdot R_{USSn})] \\
 & \cdot [1 - R_{SpSn+1} \cdot R_{USSn+1}] \cdot [1 - R_{SpSn+2} \cdot R_{USSn+2}] \cdot \dots \cdot [1 - R_{SpS20} \cdot R_{USS20}]] (R_{SpS1} \\
 & \cdot R_{USS1}) \cdot (R_{SpS2} \cdot R_{USS2}) \cdot \dots \cdot (R_{SpS20} \cdot R_{USS20}) \cdot
 \end{aligned}$$

Das Modell für die Systemzuverlässigkeit sich vereinfacht wie folgt aufstellen:

$$R_{NGT,F2} = R_{NGT,S,F2} \cdot R_{NGT,F,F2}$$

10.2.2.3 Ausfalldaten / Zuverlässigkeit der Komponenten des NGT

Folgende Werte für die Zuverlässigkeit R_i der einzelnen Komponenten werden für die Berechnung der Systemzuverlässigkeit zugrunde gelegt. Die Werte basieren auf Erfahrungswerten vergleichbarer Systeme und Gesprächen mit Herstellern und sind bzgl. der höheren Belastungen zum Teil angepasst.

- Einspeisepunkt** $\rightarrow R_{ESP} = 0,990$
 Bestehend aus Leistungsschalter und Umrichter (Leistungselektronik). Umrichter fallen in der Regel aus mechanischen Gründen aus. Lastschwankungen bedingen eine Änderung der Verlustleistung und damit des Wärmeeintrags, so dass durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten Spannungen entstehen. Dies führt zu einem mechanischen Versagen eines Bauteils, beispielsweise das Reißen eines Drahtes im IGBT-Transistor.
- Spulensystem** $\rightarrow R_{SpS} = R_{SpF} = 0,990$
 Das Spulensystem besteht aus dem eigentlichen Wicklungssystem und der Blindleistungskompensation (u.a. Kondensatoren), diese sind im System ggfs. die Hauptausfallursache. Zum aktuellen Konzeptstand wird bzgl. der Zuverlässigkeit nicht zwischen Fahrzeug und Strecke differenziert.

- **Umrichter** $\rightarrow R_{USS} = R_{USF} = 0,990$

Die Ausfallcharakteristik der Umrichter (Leistungselektronik) der Spulensysteme entspricht der des Einspeisepunktes. Zum aktuellen Konzeptstand wird bzgl. der Zuverlässigkeit nicht zwischen Fahrzeug und Strecke differenziert.

10.2.2.4 Ermittlung der Systemzuverlässigkeit des Energieübertragungssystems des NGT

Mit den Gleichungen der Zuverlässigkeitsmodelle ergibt sich die Zuverlässigkeit für die Strecke $R_{NGT,S}$, das Fahrzeug $R_{NGT,F}$ und die Systemzuverlässigkeit R_{NGT} für die einzelnen zu analysierenden Fälle wie folgt:

Tab. 10.6: Ergebnisdarstellung Systemzuverlässigkeit NGT

Fall	V [km/h]	P [MW]	n Spulen Strecke	n Spulen Fahrzeug	$R_{NGT,S}$	$R_{NGT,F}$	R_{NGT}
1	200	5	4	10	0,9999	1,0000	0,9999
2	300	10	8	19	0,9999	1,0000	0,9999
3	400	17	14	32	0,9999	1,0000	0,9999
4	430	20	16	37	0,9999	1,0000	0,9999
5	450	22	18	41	0,9998	1,0000	0,9998
6	460	23	19	43	0,9936	0,9999	0,9936
7	470	24	20	45	0,6689	0,9882	0,6610
8	480	25	20	46	0,6689	0,3967	0,2653

Als Fazit kann festgehalten werden, dass der NGT bei hohen Leistungsbedarfen eine relativ hohe Ausfallwahrscheinlichkeit aufweist. Im Leistungsbereich größer 22 MW nimmt die Zuverlässigkeit stark ab. Dies ist in der zurückgehenden Redundanz der Spulensysteme in Strecke und Fahrzeug begründet. Bei einem Leistungsbedarf von kleiner 22 MW erzielt er hingegen herausragende Werte in der Systemzuverlässigkeit. Die Reisegeschwindigkeit liegt bei 400 Km/h mit einem Leistungsbedarf von rund 17 MW. Folgende Systemzuverlässigkeit wird hierbei prognostiziert:

$$R_{NGT} = 0,9999 \rightarrow 99,99\% \quad (\text{demgegenüber } R_{ICE3-VZ} = 0,9965 \rightarrow 99,65\%)$$

Dies bedeutet, dass das NGT-System, im normalen Betrieb, gegenüber dem konventionellen Hochgeschwindigkeitszugsystemen mit Oberleitungssystem überlegen ist. Die Ergebnisse der einzelnen Systemzuverlässigkeiten geben hierbei eine schwierig zu interpretie-

rende Größe ab, da beide Systeme sehr gut abschneiden. Die Datengrundlage der einzelnen Komponentenzuverlässigkeiten beider Systeme weist eine gewisse Unschärfe auf. Diese liegt jedoch in ähnlichen Größenordnungen vor. Als ein Hauptmerkmal bzw. Kriterium zur Bewertung und zum Vergleich der Systemzuverlässigkeit ist ebenso das jeweilige Zuverlässigkeitsmodell zu nennen. Das Zuverlässigkeitsmodell des NGT-System ist hierbei dem des ICE 3 weit überlegen.

10.3 Instandhaltungsaufwand für das NGT-System im Vergleich zu oberleitungsgebundenen Systemen

Angaben zum Instandhaltungsaufwand und den daraus erwachsenden Kosten der Komponenten der fahrdrahtlosen Energieübertragung im Vergleich zum Referenzsystem ICE 3 können nur qualitativ getätigt werden. Im Folgenden wird dies für die Strecke und das Fahrzeug ausgeführt.

10.3.1 Vergleich des streckenseitigen Instandhaltungsaufwands beim NGT zu oberleitungsgebundenen Systemen

Die in der Strecke verbauten Komponenten des NGT-Systems müssen regelmäßig auf Ihre Funktion und Funktionsfähigkeit geprüft werden. Die Intervalle hierzu können bei weiterer Detaillierung des NGT-Systems festgelegt werden. Durch das geplante NGT-System ist ggfs. auch eine Ferndiagnose der einzelnen Komponenten möglich, insofern diese über eigene Überwachungsroutinen verfügen. Standardmäßig müssen jedoch ebenfalls reguläre Kontrollen der Komponenten vor Ort durchgeführt werden. Auch hierzu können die Intervalle erst bei weiterer Detaillierung der Komponenten festgelegt werden. Zieht man jedoch die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen des NGT-Systems heran, so kann man ableiten, dass bestehende Intervalle von vergleichbaren Oberleitungsgebundenen Systemen vergrößert werden können.

Streckenseitig gibt es bei der FEÜ keine mechanisch hoch belasteten Komponenten. Die Komponenten sind nicht in exponierter Position montiert und bieten somit auch Umwelteinflüssen keine großen Angriffsflächen, wie zum Beispiel ein Oberleitungssystem.

Die Komponenten sind folgenden Belastungen ausgesetzt:

- Umweltbelastungen
 - Kontrolle auf Schäden im Zuge der regulären Inspektionen
→ *Tendenziell geringere Auswirkungen aufgrund Umweltbelastungen*
- Betriebsbelastungen
 - Kontrolle auf Schäden im Zuge der regulären Inspektionen
 - Ferndiagnose der Funktionsfähigkeit intelligenter Komponenten
→ *Tendenziell geringere Auswirkungen aufgrund keiner direkten mechanischen Belastung*
- Mechanische Belastungen im Gleisbett und daneben (Schock, Vibration)
 - Kontrolle auf Schäden im Zuge der regulären Inspektionen
 - Ferndiagnose der Funktionsfähigkeit intelligenter Komponenten
→ *ggfs. erhöhtes Potential für Beschädigungen, welches durch geeignetes Design der Komponenten jedoch beherrschbar ist*
- Einschläge durch im Gleis befindliche aufgewirbelte Gegenstände
 - Kontrolle auf Schäden im Zuge der regulären Inspektionen Ferndiagnose intelligenter Komponenten
→ *ggfs. erhöhtes Potential für Beschädigungen, welches durch geeignetes Design der Komponenten jedoch beherrschbar ist*

10.3.2 Vergleich des fahrzeugseitigen Instandhaltungsaufwands zu oberleitungsgebundenen Systemen

Die im Fahrzeug verbauten Komponenten müssen ebenso wie die Komponenten der Strecke regelmäßig auf Ihre Funktion und Funktionsfähigkeit geprüft werden. Die genauen Intervalle sind hierzu genauso wie für die streckenseitige Technik nach hinreichender Detaillierung des Gesamtsystems festzulegen. Es ist ebenso eine Ferndiagnose durch Betriebswerke bzw. eine Onlinediagnose der einzelnen Komponenten möglich. Die regulären Kontrollen der Komponenten am Fahrzeug sind ebenso durchzuführen. Dabei können die Intervalle erst bei weiterer Detaillierung der Komponenten festgelegt werden. Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsuntersuchungen des Systems zeigen jedoch, genauso wie für die Strecke, das Potential auf, dass bestehende Intervalle von vergleichbaren oberleitungsgebundenen Systemen vergrößert werden können.

Auch fahrzeugseitig gibt es keine mechanisch hoch belasteten Komponenten. Die Komponenten sind alle im Fahrzeugunterboden in nicht exponierter Position montiert und

bieten somit Umwelteinflüssen ebenfalls keine großen Angriffsflächen. Die Komponenten sind folgenden Belastungen ausgesetzt:

- Umweltbelastungen
 - Kontrolle auf Schäden im Rahmen der regulären Inspektionen
→ *Tendenziell geringere Auswirkungen aufgrund Umweltbelastungen, da alle Komponenten in verkleideten, geschützten Bereichen montiert sind.*
- Betriebsbelastungen
 - Kontrolle auf Schäden im Rahmen der regulären Inspektionen
 - Ferndiagnose der Funktionsfähigkeit intelligenter Komponenten
→ *Tendenziell geringere Auswirkungen aufgrund keiner direkten mechanischen Belastung*
- Mechanische Belastungen im Fahrzeugunterboden (Schock, Vibration)
 - Kontrolle auf Schäden im Rahmen der regulären Inspektionen
 - Ferndiagnose der Funktionsfähigkeit intelligenter Komponenten
→ *ggfs. erhöhtes Potential für Beschädigungen, welches durch eine geeignete Konstruktion der Komponenten jedoch beherrschbar ist*
- Einschläge durch im Gleis befindliche aufgewirbelte Gegenstände
 - Kontrolle auf Schäden im Rahmen der regulären Inspektionen Ferndiagnose intelligenter Komponenten
→ *ggfs. erhöhtes Potential für Beschädigungen, welches durch eine geeignete Konstruktion der Komponenten jedoch beherrschbar ist*

10.3.3 Zusammenfassung des Instandhaltungsaufwands im Vergleich zu oberleitungsgebundenen Systemen

Potentielle Ausfälle einzelner Komponenten bei der FEÜ führen nicht zum sofortigen Ausfall, wie es beim oberleitungsgebundenen Energieübertragungssystem der Fall ist. Die hochgradig parallele Anordnung der Systeme in Strecke und Fahrzeug ermöglicht eine sehr hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems und ist auch beim partiellen Ausfall einzelner Systeme noch voll funktionsfähig. Dies ermöglicht auch völlig neue Instandhaltungs- und Wartungsprozesse mit größeren Intervallen. Die streckenseitigen und fahrzeugseitigen Komponenten der fahrdrahtlosen Energieübertragung sind qualitativ somit hinsichtlich Instandhaltungsaufwand und den daraus folgenden Kosten günstiger als bei einem oberleitungsgebundenen Energieübertragungssystem anzusehen.

10.4 Einfluss der geänderten Spulenabmessungen

Unmittelbar vor Ablauf des Projektes wurden die Abmessungen der Primär- und Sekundärwicklungssysteme neu definiert (vgl. Kapitel 9). Als wichtigste Unterschiede sind die Länge, die Breite, die Leiterquerschnitte und die daraus resultierende Masse zu nennen.

- Die Länge wächst bei den Primärwicklungssystemen von 4 bis 10 m auf 20 m an,
- Die Länge der Sekundärwicklungssysteme steigt von 2,1 m auf 5,0 m.
- Die Breite schrumpft von bisher 1,2 m auf nun 1,0 m.
- Im Fahrzeug werden statt 46, jetzt 18 Sekundärwicklungssysteme zu je 5,0 m verbaut.

Dies führt zu einer Erhöhung der spezifischen Übertragungsleistung um ca. 30%. Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems werden im Folgenden erläutert.

10.4.1 Höhere spezifische Übertragungsleistung

Die Gesamtfläche der Primärspulen unter dem Fahrzeug wird verringert. Dies führt zu einer höheren spezifischen Leistungsdichte der notwendigen Komponenten. Die Anpassung der Komponenten an die höheren elektrischen Belastungen ist jedoch möglich. Somit führt die um ca. 30% höhere spezifische Übertragungsleistung zu keiner Reduzierung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems.

10.4.2 Geringere Anzahl an Spulen in Fahrzeug und Strecke

Die geringere Anzahl an Spulen im Fahrzeug und in der Strecke beeinflusst den Aufbau der generierten Zuverlässigkeitsmodelle und die Ergebnisse, da weniger Redundanzen vorhanden sind. Dies wirkt sich negativ auf die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems aus.

10.4.3 Zusammenfassung Veränderung Spulenabmessung

Das Diagramm in Abb. 10.12 verdeutlicht die Auswirkung der Änderung nochmals qualitativ. Es wird die Veränderung der Systemzuverlässigkeit über der Leistungsanforderung für Strecke und Fahrzeug dargestellt.

Die verringerte Anzahl an Spulen führt zu einer Reduzierung der Redundanzen im NGT-System. Dies hat zur Folge, dass sich bei hohen Leistungsanforderungen die Zuverlässigkeit reduziert.

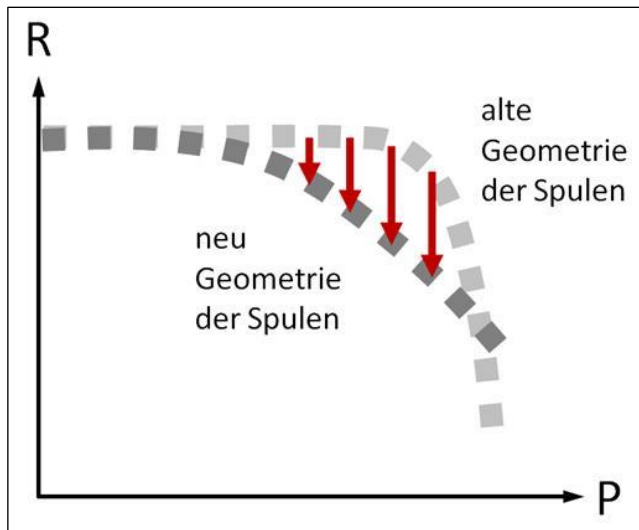


Abb. 10.12: Qualitative Veränderung der Systemzuverlässigkeit

Die Reduzierung der Redundanzen im NGT-System (Strecke und Fahrzeug) führt zu einem Einbruch der Zuverlässigkeit bei höheren Leistungsanforderungen.

10.5 Zusammenfassung

Das vorliegende Konzept zur fahrdrahtlosen Energieübertragung zeichnet sich durch eine sehr hohe Zuverlässigkeit und somit auch sehr hohe Verfügbarkeit aus.

Dies ist im grundsätzlichen Aufbau des Systems begründet. Das NGT-System ist, wie auch ein oberleitungsgebundenes Energieübertragungssystem auf seine maximalen Anforderungen ausgelegt. In Bereichen kleiner dem maximalen Leistungsbereich werden beim NGT-System nicht alle Spulensysteme benötigt werden. Diese wirken somit als Redundanzen im System. Hier differenziert sich dieses System von oberleitungsgebundenen Systemen.

Wird beim oberleitungsgebundenen System nicht die maximale Leistung übertragen, kann ebenso von einer Erhöhung der Zuverlässigkeit ausgegangen werden, da die Belastung der Komponenten nicht so hoch ist. Beim induktiven System kommt jedoch noch die Komponente der Redundanz hinzu. Diese beiden Effekte führen im regulären Bahnbetrieb zu einer überlegenen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit dieses Systems.

Einzig bei der maximalen Leistungsanforderung von 25 MW, die jedoch nicht im normalen Bahnbetrieb vorliegt, unterliegt das NGT-System dem hier betrachteten Referenzsystem des ICE 3, da hier keinerlei Redundanzen im NGT-System vorhanden sind.

Im direkten Vergleich bei ähnlichen Personentransportkapazitäten übertrifft das induktive Energieübertragungssystem jedoch immer noch das Referenzsystem des ICE 3 als Vollzug. Dies liegt daran, dass sich die Zuverlässigkeit erst jenseits von Leistungsanforderungen von 20 MW, also Fahrgeschwindigkeiten jenseits von 430 Stundenkilometern, die dem Referenzsystem nicht möglich sind, verschlechtert.

Das vorliegende Konzept bietet eine Reihe Potentiale hinsichtlich Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstätigkeiten. Schon das Konzept zeigt seine Überlegenheit auf.

- So können zum Beispiel neue Betriebsmodi integriert werden, die das direkte Ausfallverhalten der Komponenten noch weiter verbessern. Werden nicht alle Spulensysteme benötigt, können diese „gesamten Zweige“ inaktiv geschaltet werden. Somit kann das Belastungskollektiv über der Lebenszeit reduziert werden. Die „inaktiven Zweige“ aus Umrichter und Spulensystem können entsprechend einem vorgegebenen Zyklus alternierend gewechselt werden, somit kann dieser Effekt auf alle Elemente verteilt werden. Dies gilt für die Strecke sowie das Fahrzeug.
- Wartungs- Instandhaltungszyklen können komplett neu erstellt werden, da das System auch über längere Zeiträume mit defekten Teilsystemen noch voll funktionsfähig ist. Es werden zuerst die Redundanzen im System aufgezehrt, bevor sich funktionale Einschränkungen aufzeigen. Entsprechend den maximalen Leistungsanforderungen spezieller Strecken lassen sich somit die Instandhaltungs- oder Wartungspläne optimieren.
- Im Spannungsfeld Anschaffungskosten und Betriebskosten kann das System sehr genau optimiert werden. Durch die Beschreibung des Systems in Zuverlässigkeitsmodellen können Veränderungen direkt geplant bzw. Auswirkungen von Veränderungen erkannt werden. Mögliche Änderungen sind zum Beispiel:
 - Anzahl an Spulen,
 - Spezifischen Übertragungsleistung,
 - Güte der Komponenten (Ausfallverhalten, Zuverlässigkeit)

Vorteile bieten sich zum Beispiel in folgenden Bereichen an:

- Genauere Entwicklung der Komponenten ist möglich, Vermeidung von Überdimensionierungen, sozusagen „Entwicklung auf den Punkt“,
- Kritische (Funktion und Ausfall) Systemkomponenten werden früh erkannt,
- Wartungs- Instandhaltungszyklen können vergrößert werden,

- Bevorratungsstrategie von Ersatzteilen kann optimiert werden,
- Größe der Instandhaltungsmannschaften kann reduziert werden,
- Anzahl an Wartungs- und Instandhaltungseinrichtungen kann reduziert werden.

10.6 Quellen

- [1] www.hochgeschwindigkeitszuege.com, Stand 13.03.14
- [2] Riechers, D.: ICE - Neue Züge für Deutschlands Schnellverkehr, transpress Verlag Stuttgart, 2001
- [3] Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau – Ermittlung von Bauteil und Systemzuverlässigkeiten, 3. Auflage, Berlin, Springer 2004
- [4] Greiner, Jochen; Darstellung der Energieversorgung des ICE3, 2013
- [5] Mayer, Simon; Müller, Peter; Fahrdradtlose Energieübertragung – AP1200 Machbarkeitsstudie, 2013
- [6] Noller, Maximilian.; Vergleichende Recherche zur Zuverlässigkeit der ICE-Familie, 2013
- [7] <http://www.drehscheibe-foren.de/foren/read.php?3,5660207,5662806>, Stand: 13.03.2014
- [8] <http://www.ice-treff.de/index.php?id=191692>, Stand: 13.03.2014

11 Kostenabschätzung

von Dr.-Ing. Joachim Winter, Johannes Pagenkopf M.Sc. und Dipl.-Ing. Christopher Kalatz

Die bisherigen Arbeiten im Rahmen des Projekts bezogen sich auf die Ausarbeitung eines fahrdrahtlosen Energieübertragungssystems (FEÜ) für Vollbahnen im Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV). Ziel ist, ein Konzept für ein alternatives Energieübertragungssystem für die Ultra-Hochgeschwindigkeitsvariante des „Next Generation Train“ (NGT) zu erarbeiten. Der untersuchte HGV ist gekennzeichnet durch sehr hohe Leistungs- und Energiebedarfe (P von 25 bis 30 MW). Im gegenwärtigen HGV werden heute in der Regel Leistungen von etwa 10 - 15 MW von der Streckenenergieinfrastruktur auf das Fahrzeug übertragen, dies geschieht ausschließlich vermittelt eines Schleifkontaktes zwischen Oberleitung und Stromabnehmer. Das konventionelle Oberleitungssystem (OL-System) ist technisch weitgehend ausgereift und auch für Fahrgeschwindigkeiten von über 300 km/h am Markt verfügbar. Gleichwohl nehmen die Probleme in diesen Geschwindigkeitsbereichen bei dieser Art der Leistungsübertragung zu (Kontaktverhalten Stromabnehmer/Fahrdraht, aerodynamische Effekte). Die Möglichkeit, die Leistung induktiv, d. h. kontaktfrei zu übertragen, könnte helfen, die im HGV auftretenden Probleme, zu reduzieren. Die hohe geforderte Leistung stellt dabei jedoch entsprechend hohe Anforderungen an die erforderlichen fahrzeug- und streckenseitigen Energieübertragungsanlagen. In diesem Kapitel sollen daher die bisher erarbeiteten technischen Konzepte der fahrdrahtlosen Energieübertragung (FEÜ) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Kosten beleuchtet werden. Das Augenmerk wird dabei sowohl auf die Ausrüstungskosten/Investitionskosten als auch auf die Kosten des laufenden Betriebs und der Instandhaltung gerichtet. Um das FEÜ-System hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit einschätzen zu können, wird es dem konventionellen OL-System gegenübergestellt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist es jedoch nicht möglich, die Kostenbestandteile einer FEÜ in allen Einzelheiten aufzuschlüsseln. Der Ansatz besteht deshalb eher darin, die kostenseitigen Abhängigkeiten, Wechselwirkungen und generellen Problemstellungen des FEÜ-Systems aufzuzeigen.

11.1 Motivation für Fahrdradtlose Energieübertragung aus Kostensicht

Neben dem Nachweis der technischen Machbarkeit und der betrieblich-technischen Vorteilhaftigkeit gegenüber dem Oberleitungssystem ist eines der entscheidenden Beurteilungskriterien für den Erfolg der oberleitungsfreien Energieübertragung die Höhe der Kosten für ein solches System gegenüber einem herkömmlichen OL-System.

Solange es keine grundsätzlichen technischen und / oder betrieblichen Vorteile bei der Verwendung der induktiven Energieübertragung im Vergleich mit den etablierten Oberleitungs-/Stromabnehmer-Systemen gibt, entscheiden letztlich die Kosten über den Erfolg oder Misserfolg eines solchen Systems.

Im Bahnverkehr müssen neben den Kosten für die Fahrzeugausrüstung auch stets die Kosten der Infrastruktur betrachtet werden. Dies ist insbesondere in Hinblick auf die Integrierbarkeit innovativer Technologien in bestehende Systeme zu berücksichtigen. Zumal durch das FEÜ-System ein zusätzliches Übertragungssystem geschaffen wird, wodurch zusätzliche Infrastrukturkosten für die Ausrüstung/Umrüstung bestehender Strecken entstehen. Da ein induktives Energieübertragungssystem im Vollbahnbereich bisher keine Anwendung gefunden hat und sich auch sonstige Anwendungen dieser Technologie im Verkehrsbereich weitgehend noch im Versuchsstadium befinden, ist von hohen anfänglichen Kosten und Risiken auszugehen. Zu nennen sind zum einen die Kosten für die Entwicklung, Prüfung, Standardisierung und Zulassung der Komponenten und Systeme. Und zum anderen könnten wohl erst mit dem zunehmenden Einsatz von induktiven Energieübertragungssystemen die üblicherweise aus Mengen- und Erfahrungseffekten (Skaleneffekte) resultierenden Kostensenkungen realisiert werden.

Aus wirtschaftlicher Perspektive ist die Frage relevant, ob ein induktives Energieübertragungssystem mit den gleichen bzw. niedrigeren Lebenszykluskosten (LCC - Life Cycle Costs) als ein konventionelles OL-System realisiert werden kann. Das Ergebnis einer solchen LCC-Analyse ist von einer Reihe von Faktoren abhängig. Abb. 11.1 zeigt schematisch für Neubaustrecken eine Amortisationsrechnung mit den Determinanten Transportleistung, Einsatzzeit und Art der Energieübertragung. Eine nichtelektrifizierte Strecke wartet mit den geringsten initialen Investitionskosten auf, hat aber einen steileren transportleistungsabhängigen Kostengradienten (höhere Grenzkosten) als die Systeme der induktiven Energieübertragung oder die mit Oberleitung. Bei induktiven Energieübertragungssystemen ist mit höheren initialen Errichtungskosten als bei konventionellen Systemen zu rechnen, aber auf Grund der berührungslosen und damit verschleißlosen Art der Energieübertragung ist auch von geringeren betrieblichen Kosten auszugehen als bei OL-

Systemen. Entsprechend ergibt sich theoretisch ab einer bestimmten Transportleistung und Einsatzzeit ein Amortisationszeitpunkt, ab dem die induktive Energieübertragung geringere Gesamtkosten (LCC) aufweist als eine konventionelle Bahnstrecke mit Oberleitungs-Elektrifizierung und auch eine nicht elektrifizierte Strecke.

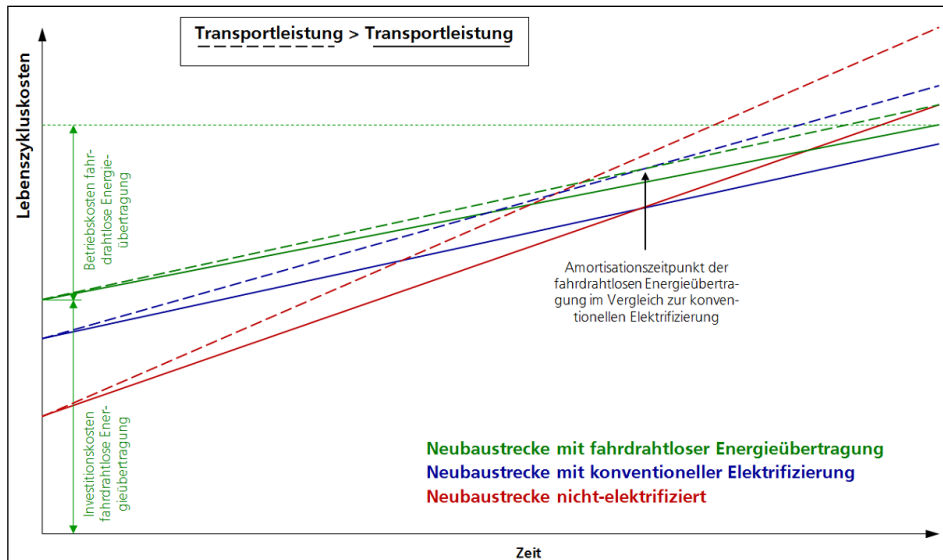


Abb. 11.1: Amortisierung der induktiven Energieübertragung (schematisch)

Das Ziel der berührungsfreien Energieübertragung ist die Vermeidung der typischen Probleme des Oberleitungs-Stromabnehmer-Kontaktes, die vor allem bei sehr hohen Fahrgeschwindigkeiten auftreten. Dazu gehören u. a. Kontaktprobleme zwischen Stromabnehmer und Oberleitung, die zu einem erhöhten Verschleiß beider Kontaktpartner führen. Neben dem verschleißbehafteten Kontakt, der einen regelmäßigen Wechsel der Stromabnehmerschleifleisten und, in längeren Intervallen, der Oberleitung erforderlich machen, treten beim OL-System mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit vor allem negative aerodynamische Effekte auf. Hierbei sind vor allem der durch den Stromabnehmer verursachte Luftwiderstand⁸ und dessen Lärmemissionen zu nennen. Ferner führen Witterungseinflüsse (u. a. Stürme, Eis- und Schneebefall, Sonne und UV-Einstrahlungen etc.) zu einer beschleunigten Alterung der Fahrleitung und zu Betriebseinschränkungen durch entstandene Oberleitungsschäden, wodurch zusätzliche Betriebserschwerungskosten entstehen.

⁸ Der Anteil des vom Stromabnehmer verursachten Luftwiderstand am Gesamtluftwiderstand eines Schienenfahrzeug im HGV beträgt etwa 10 %[11].

Wesentliche Vorteile eines FEÜ-Systems gegenüber dem konventionellen OL-System sind:

- Vermeidung des instandhaltungsintensiven Kontaktverschleißes der Paarung Fahrdraht/Schleifleiste,
- Umgehung der insbesondere bei extrem hohen Geschwindigkeiten auftretenden Kontaktprobleme Fahrdraht/Schleifleiste
- witterungsgeschütztes System (Primärspulen fest im Fahrweg und Sekundärspulen im Fahrzeugunterboden verbaut).

Da bisher kein berührungsloses Energieübertragungssystem in der Auslegung für Vollbahnen mit dem entsprechenden Leistungsbedarf existiert und auch die besonders kritischen Komponenten der Leistungsübertragung (Halbleiterbauelemente im MW-Bereich und Frequenzen im Kilohertzbereich) sich in einem stetigen Weiterentwicklungsprozess befinden, ist eine verlässliche Kostenprognose für ein solches System zum jetzigen Zeitpunkt sehr schwierig.

Aus Kostensicht ist das OL-System der Stand der Technik und damit der Maßstab, an dem sich das FEÜ-System orientieren muss. Im Folgenden wird daher zunächst überschlagsmäßig das konventionelle OL-System im Vollbahnverkehr, fahrzeug- sowie streckenseitig, hinsichtlich der Errichtungs- und Instandhaltungskosten umrissen. Unter der Annahme, dass die Bahnenergieversorgung bis zum Unterwerk (Uw) gleich oder zumindest ähnlich sein wird, wird nur die Bahnenergiezuführung vom Uw bis zum Fahrzeug betrachtet. Dabei werden die wesentlichen Kostenbestandteile aus dem gesamten Lebenszyklus beschrieben und ermittelt. Danach werden die relevanten Kostenbestandteile des FEÜ-Systems umrissen, sowie hinsichtlich ihrer Relevanz und Ausprägung skizziert.

11.2 Kostencharakteristik des Oberleitungssystems

11.2.1 Investitionskosten Strecke und Fahrzeug

Im Kostenermittlungsbuch (KEB) der Deutschen Bahn AG (DB AG) werden für das Hochgeschwindigkeitsoberleitungssystem Re330 hinsichtlich der Herstellungs- und Errichtungskosten ca. 419.000 € je überspanntem Gleis (also 838.000 €/Doppelkilometer (dkm) Strecke) als Planungsrichtwert auf freier Strecke angegeben [4]. Dieser Wert enthält die Kosten für Masten, Kettenwerk, Spanneinrichtungen, etc. Hinzu kommen zusätzliche Kosten bei betrieblichen Schwierigkeiten, wie in Bahnhofsbereichen, Tunnelabschnitten oder Weichenbereichen (im KEB werden 50.000 € je Weichenüberspannung bei einem Re200-System angegeben). Die Kosten für die Bahnenergieversorgung, d.h. Uw, Zulei-

tungen, etc. einschließlich der erforderlichen Schutzeinrichtungen, sind in diesen Angaben nicht enthalten.

Bei spezifischen Anwendungsfällen in der Strecke werden die tatsächlichen Kosten deutlich über den angegebenen liegen. Als Richtwert können die Aufwände für konkrete Anwendungsfälle von Streckenelektrifizierungen herangezogen werden. Tab. 11.1 zeigt die tatsächlichen Elektrifizierungskosten von zwei Streckenabschnitten der DB AG. Zu beachten ist dabei, dass diese Kostenangaben nur für Strecken im Regionalverkehr gelten, die an die Komplexität der Oberleitungsanlagen geringere Anforderungen als im Hochgeschwindigkeitsverkehr stellen. Ferner beinhalten diese Angaben auch die Kosten für die Uw.

Tab. 11.1: Projektkosten von Streckenelektrifizierungen⁹

Strecke	Elektrifizierungskosten	Quelle
Hamburg-Lübeck-Travemünde (bis 2008)	1,02 Mio. € / Strecken-km	[2]
Reichenbach-Hof (bis 2013)	1,64 Mio. € / Strecken-km	[5]

Auf Seiten der Fahrzeuge sind die Kosten für den oder die Stromabnehmer, Trenn- und Hauptschalter sowie die zur Transformation der Fahrdrabtspannung auf die Zwischenkreisspannung, notwendigen Transformatoren als Vergleichsgröße heran zu ziehen. Einen großen Teil der Investitionskosten tragen die Transformatoren bei, die gemäß der Fa. ABB [1] mit etwa 30 €/kW angesetzt werden können. Mit zwei Transformatoren pro Fahrzeug ergeben sich bei einer kombinierten Transformatorleistung von 15 MW insgesamt 900.000 €.

11.2.2 Instandhaltungskosten Strecke und Fahrzeug

Die Anlagen der Energiezuführung müssen fahrzeug- sowie streckenseitig instandgehalten werden, aus Gründen der natürlichen Anlagenalterung auch durch den Verschleiß der Kontaktpartner Fahrdrabt – Stromabnehmer bzw. Schleifleiste. Nach [8] betragen die durchschnittlichen Instandhaltungskosten eines OL-Systems in einem Bahnnetz etwa 2.000 €/km, mithin 4.000 €/dkm. Bei Hochleistungs- und Hochgeschwindigkeitsstrecken

⁹ Oberleitung inkl. Unterwerke (Projektierung, Material und Errichtung)

ist von einem höheren Wert auszugehen. Nach [9] machen die Instandhaltungskosten der Oberleitung und Bahnenergieversorgung mit 18.000 € (Preisstand 2007) pro Referenz-dkm etwa 23 % der gesamten Instandhaltungskosten einer typischen artreinen Hochgeschwindigkeitsstrecke aus.

Für den Austausch von Fahrleitungen und Schleifleisten gibt Puschmann für Wechselstrom-Bahnen (AC-Bahnen) folgende Intervalle an [7]:

- Schleifleistenersatz nach je 40.000 - 80.000 km Laufleistung und
- Austausch Fahrdraht nach jeweils 2.000.000 Stromabnehmerdurchgängen.

Schmidt und Schmieder [14] berichten dagegen von einem Schleifleistenersatz erst nach jeweils 120.000 gefahrenen Streckenkilometern. Das konkrete Wechselintervall wird dabei von der jeweiligen Charakteristik des Abschnitts in Bezug auf Material, Stromübergang, Fahrgeschwindigkeit, etc. abhängig sein. An den aufgeführten Instandhaltungsintervallen ist zu erkennen, dass das Schleifstück als vorrangiges Verschleißelement der beiden Kontaktpartner vorgesehen ist. Der Grund hierfür liegt in dem wirtschaftlicheren Austausch der Schleifleisten, der bei jeder Fahrzeuginspektion erfolgen kann, wohingegen ein Fahrdrahtwechsel deutlich aufwendiger ist. Ein Austausch der Fahrdrahlleitung ist auch bei lokalen Verschleißstellen nur in 1.400 m langen Abschnitten möglich. [14] Bei einer hohen Austauschrate der Fahrleitungen würden sich daher zusätzliche Betriebsschwerniskosten durch instandhaltungsbedingte Streckensperrungen ergeben. Der Anteil der beiden Stromabnehmer an den Gesamtfahrzeugkosten eines 200 m langen Ein-System-Hochgeschwindigkeitszugs beträgt nach interner Schätzung lediglich etwa 0,1...0,2 %. Neben den Instandhaltungskosten des OL-Systems und der fahrzeugseitigen Komponenten entstehen zusätzliche Aufwandskosten für die Inspektion sämtlicher elektrotechnischen Energieversorgungsanlagen.

11.2.3 Zwischenfazit zum Oberleitungssystem

Vor dem Hintergrund, dass die Investitions- und Instandhaltungskosten eines OL-Systems je nach Anwendungsfall und in Abhängigkeit der Randbedingungen durchaus stark variieren können, kann lediglich eine Spannbreite als Richtwert für die Kosten angegeben werden. Die reinen Investitionskosten eines OL-System für Hochgeschwindigkeitsstrecken betragen dabei näherungsweise 1...1,5 Mio. €/dkm. Zusätzlich entstehen je Doppelkilometer pro Jahr Instandhaltungskosten von ca. 20.000 €/a. Darüber hinaus ergeben sich weitere Kosten für die fahrzeugtechnische Ausrüstung. Neben den Stromabnehmern, die lediglich ein Bruchteil der Gesamtfahrzeugkosten betragen, sind hier vor allem die Kosten

der Transformatoren (ca. 900.000 €/Fahrzeug) ausschlaggebend. Darüber hinaus sind auch hinsichtlich der Fahrzeuge weitere Kosten für die Inspektion und Instandhaltung der Anlagen zu beachten, die jedoch stark abhängig von der Antriebs- bzw. Ausrüstungstopologie sind.

Obwohl die Energieübertragung hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Oberleitung und Stromabnehmer im HGV wie beschrieben einige Nachteile aufweist, ist das konventionelle OL-System aufgrund der fehlenden Alternativen im HGV derzeit technischer Standard. Gleichzeitig gibt es vermehrt auch Versuche, das System für immer höhere Betriebsgeschwindigkeiten zu optimieren. So werden von der Industrie aktiv geregelte Stromabnehmer, zur Vermeidung von Schwankungen in der Kontaktkraft und zur Verminderung von Lärmemissionen, für Geschwindigkeiten bis 400 km/h entwickelt. [15] Durch die Erhöhung der Betriebsgeschwindigkeiten auf bis zu 350 km/h steigen bei konstanter Fahrleitungsspannung auch die Ströme auf bis zu 2000 A, wodurch ebenfalls die Belastung der Oberleitungsanlage erhöht wird. [14] Prinzipiell kann somit davon ausgegangen werden, dass sich mit höheren Fahrgeschwindigkeiten und damit steigenden Anforderungen an das konventionelle Energieübertragungssystem, gleichzeitig auch die Kosten für Material und Instandhaltung erhöhen.

11.3 Kostencharakteristik der fahrdrahtlosen Energieübertragung

Der hohe Leistungsbedarf des NGT HGV von mehr als 25 MW stellt besondere Anforderungen an die fahrzeug- sowie streckenseitigen Komponenten, insbesondere hinsichtlich der erforderlichen Leistungselektronik eines induktiven Energieübertragungssystems. Frequenzen im zweistelligen kHz-Bereich sowie hohe Leistungsanforderungen resultieren in sehr kurzen Schaltzeiten sowie sehr hohen Strömen und Spannungen, die durch die einzelnen (Wandler-)Module geschaltet werden müssen. Im Folgenden wird zunächst zum besseren Verständnis der Aufbau des erarbeiteten FEÜ-Systems erneut kurz erläutert. Auf Grundlage dessen erfolgt eine Einschätzung der Investitions- und Instandhaltungskosten eines solchen Systems. Eine ausführliche Systembeschreibung erfolgt in den Kapiteln 5 und 9.

11.3.1 Aufbau des FEÜ-Systems

Die Erarbeitung des prinzipiellen Aufbaus sowie die Auslegung eines induktiven Energieübertragungssystems für Vollbahnanwendungen erfolgten durch das Institut für elektrische Energiewandlung (IEW) sowie durch das Institut für Maschinenelemente (IMA) der

Universität Stuttgart. In Abb. 11.2 ist schematisch der allgemeine Aufbau der fahrzeug- und streckenseitigen Systemkomponenten des FEÜ-Systems dargestellt.

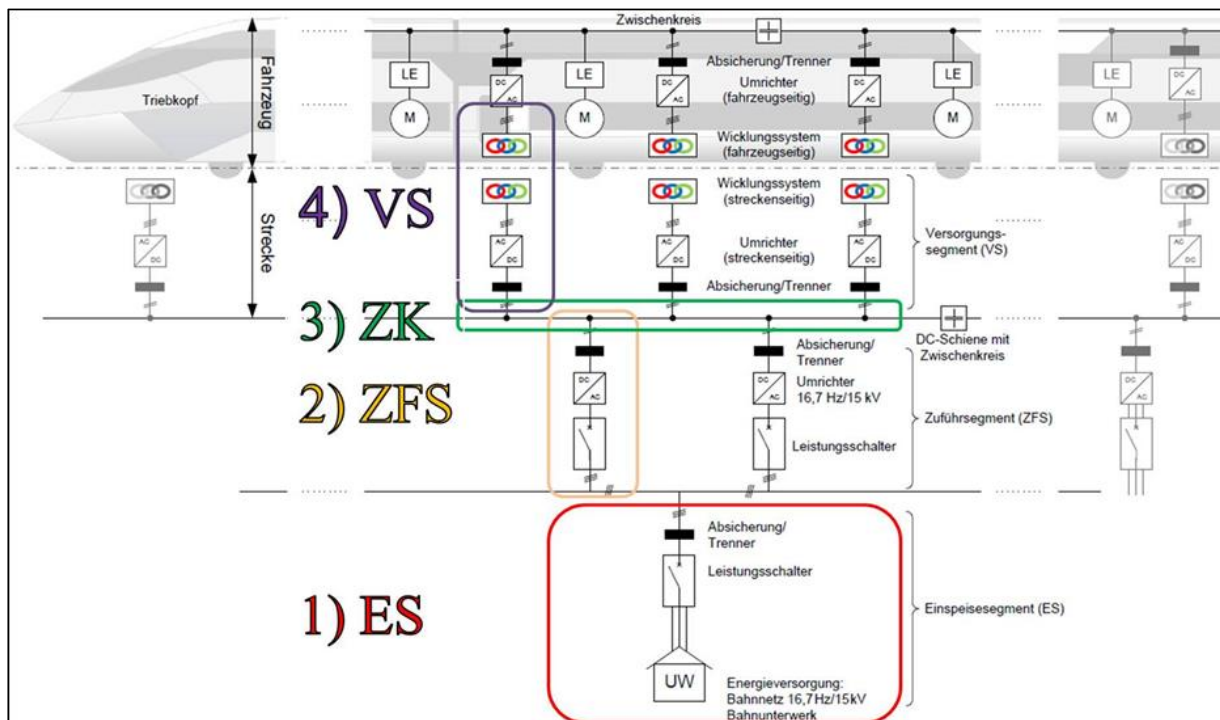


Abb. 11.2: Schematischer Aufbau eines induktiven Energieübertragungssystems (ES...Einspeisesegment, ZFS...Zuführsegment, ZK...Zwischenkreis, VS...Versorgungssegment)

Die fahrzeugseitigen FEÜ-Komponenten unterteilen sich dabei in folgende Baugruppen:

- sekundäre Pick-Up-Spulensegmente (Kupfer) inkl. Befestigung und Integration in den Fahrzeugunterboden,
- leistungselektronische Bauelemente (AC/DC-Umrichter), zur Gleichrichtung der Wechselfspannung der Sekundärspulen für den Gleichstromzwischenkreis (DC-ZK) des Fahrzeugs
- Schutz-, Überwachungs- und Kontrolleinrichtung (z.B. Trenn- und Hauptschalter etc.) sowie
- Gleichspannungszwischenkreis (DC-ZK)

Die elektronischen Baugruppen, die im Fahrzeug dem Gleichspannungszwischenkreis nachgeschaltet sind (Pulswechselrichter, Fahrmotoren), sind prinzipiell die Gleichen wie in einem Oberleitungsfahrzeug und werden deshalb hier nicht näher betrachtet.

Die grundlegenden streckenseitigen Komponenten des induktiven Energieübertragungssystems sind:

- primäre Pick-Up-Spulensegmente (Kupfer) inkl. Befestigung und Integration in der Fahrbahn,
- leistungselektronische Schaltelemente (DC/AC-Umrichter), zur Wechselrichtung der streckenseitigen DC-ZK-Spannung auf die Wechselfspannung der Primärspulen,
- weiterer Umrichter (AC/DC) für die Gleichrichtung der Wechselfspannung von der Uw-Ebene auf die DC-ZK-Spannung,
- zusätzliche 15 kV-AC-Ebene (nicht als Fahrleitung ausgeführt) sowie ebenfalls
- Schutz-, Überwachungs- und Kontrolleinrichtungen

Das Konzept des FEÜ-Systems kann ferner, wie in Abb. 11.2 zu erkennen ist, in mehrere Teilsysteme unterteilt werden, die sich wie folgt beschreiben lassen (siehe auch Kapitel 7). Die Uw werden als Einspeisesegmente (ES) betrachtet, deren Abstände voneinander in Abhängigkeit der Anzahl vorhandener Uw (bei bereits bestehenden Strecken) und der erforderlichen Leistung sowie von den Zugfolgezeiten steht. Das in Deutschland, Österreich und der Schweiz derzeit bestehende OL-System mit seiner 15 kV-AC Versorgungsspannung und seinen ca. 20...60 km langen Einspeiseabschnitten (Uw) kann in abgewandelter Form weiter genutzt werden. Dabei wird die Oberleitung bei dem FEÜ-System als gesichertes Kabel seitlich entlang der Strecke verlegt. Inwiefern dies aus elektrotechnischen und bautechnischen Gesichtspunkten möglich und sinnvoll ist, muss in gesonderten Untersuchungen näher analysiert werden. Es sind jedoch für die Gleichrichtung der 15 kV-AC, die von der Oberleitung/dem Streckenkabel bzw. den Uw bereitgestellt wird, auf die im Kapitel 8 vorgeschlagene 1,4 kV-DC Versorgungsspannung des Zwischenkreises (DC-ZK) im regelmäßigen Abstand zusätzliche Umrichter in Verbindung mit entsprechenden Transformatoren, zusammengefasst in einzelne Zuführsegmente (ZFS), notwendig. Diese Segmente müssen rückspeisefähig ausgeführt sein, wenn die zurück gewonnene Bremsenergie wieder ins Netz gespeist werden soll. Als letztes Element ist das Versorgungssegment (VS) zu erwähnen, dass sowohl die infrastrukturseitigen Primärspulensegmente als auch die fahrzeugseitigen Sekundärspulensysteme inklusive der erforderli-

chen leistungselektronischen Komponenten, wie z.B. weitere Umrichter, Trennschalter und Schutzeinrichtungen etc. beinhaltet (vgl. Kapitel 8).

11.3.2 Investitionskosten Strecke und Fahrzeug

In Abhängigkeit des grundlegenden Aufbaus des induktiven Energieübertragungssystems lassen sich einige kostenbestimmende Merkmale herausarbeiten. Dabei gilt die gleiche Annahme wie beim OL-System, dass nur die Bahnenergieversorgung zwischen U_w und Fahrzeug betrachtet wird. Eine explizite Ermittlung aller sich ergebenden Kosten (ausführliche LCC-Betrachtung) ist aufgrund der fehlenden Marktreife (hoher Neuheitswert des FEÜ-Systems) der erforderlichen Komponenten derzeit nicht möglich. So können lediglich die wesentlichen Kostentreiber für eine bestimmte Ausführungsvariante des FEÜ-Systems ermittelt und die sich ergebenden Herausforderungen bei einer möglichen Umsetzung des Systems dargestellt sowie die damit verbundenen Kosten grob abgeschätzt werden.

Damit die Investitionskosten eines FEÜ-Systems für Vollbahnen, die eines konventionellen OL-Systems nicht deutlich übertreffen, ist es sinnvoll auf möglichst standardisierte und bewährte Komponenten und Module zurück zu greifen. Für eine erste Kosteneinschätzung eignet sich dazu eine Orientierung am Stand der Technik der im Bahnbereich bereits eingesetzten elektronischen Komponenten. Ferner bietet sich im Sinne einer Komplexitätsreduktion und einer Reduzierung der Variantenvielfalt fahrzeug- und streckenseitig die Verwendung der gleichen Halbleiterelemente an.

Im Hochgeschwindigkeitstriebzug ICE 3 (BR 403/406) der DB AG beträgt z. B. die DC-Zwischenkreisspannung lastabhängig zwischen 2,1 und 2,6 kV. [12] Die Spannung wird bei den mehrsystemfähigen DC-Fahrzeugen (1,5 und 3 kV DC-Oberleitungs-Versorgungsspannung) durch Zweiquadrantensteller (Hoch- und Tiefsetzsteller) geschaltet. Bei den AC-Fahrzeugen der BR 403 (15 oder 25 kV AC-Oberleitung-Versorgungsspannung) erfolgt die Gleichrichtung der Spannung über zwei 4-Quadrantensteller. Für die FEÜ könnte man ggf. auf ähnlich dimensionierte Halbleiterelemente wie die des ICE 3 zurückgreifen, dies ist jedoch bei der Auslegung der Halbleiterelemente bzw. bei der Festlegung der Zwischenkreisspannung im Fahrzeug zu prüfen.

Von entscheidender Bedeutung für die Gesamtkosten sind, aufgrund ihrer notwendigen hohen Anzahl, die Material- und Installationskosten der streckenseitigen Energieübertragungsanlagen, insbesondere die der leistungselektronischen Schaltelemente. Daher ist es sinnvoll, diese möglichst in geringer Variantenvielfalt und in mehreren einzelnen Modulen auszuführen. Die Kostenhöhe ist dabei abhängig von der ausgeführten infrastrukturellen Antriebstopologie. In Hinblick darauf gibt es jedoch einen fundamentalen Zielkonflikt:

- bei kurzen Segmentlängen, d. h. geringes Leistungs- und Stromlevel, sind weniger aufwändige Schaltelemente und Peripheriegeräte (z. B. Treiber, Kühlung etc.) erforderlich,
- bei langen Segmentlängen hingegen steigen die Anforderungen an die Leistungshalbleiter, da jedes einzelne Segment mehr Leistung übertragen muss, andererseits ist mit geringeren Installations- bzw. Integrationskosten zu rechnen.

Bei Neubau-Hochgeschwindigkeitsbahnsystemen kommen heute ausschließlich AC-Oberleitungssysteme mit einer Wechselspannung von 15 oder 25 kV¹⁰ zum Einsatz. Durch die hohen Spannungen und damit niedrigen Ströme lassen sich kleine Verlustleistungen umsetzen und folglich große Unterwerksabstände realisieren. Diese liegen je nach Leistungserfordernis und Energieversorgungsart der Strecke zwischen 20 und 60 km. Nach Kapitel 8 ist bei einer Zugfolgezeit des NGT-HGV von ca. 6 Minuten für eine doppelgleisige Strecke ein Uw-Abstand von 48 km nötig. Somit können die Abstände der Uw auf den Bestandsstrecken größtenteils beibehalten werden. In Abhängigkeit der Zugfrequenz¹¹ sind unter Umständen zusätzliche Uw vorzuhalten, wodurch entsprechend die Investitionskosten ansteigen. Die Kosten für ein zusätzliches Uw schwanken je nach erforderlichem Leistungsbereich zwischen 5 und 15 Mio. €¹². [8] [6] [13]

Unabhängig davon gilt es ferner zu überprüfen, ob die derzeitigen Uw die erforderliche Leistung zweier NGT-HGV-Züge (50 MW) in einem Einspeiseabschnitt bereitstellen können.

Zur Vermeidung einer komplexen Kaskadierung der Umrichter ist jedoch eine Versorgungsspannung im niedrigen einstelligen Gleichspannungsbereich sinnvoll, die ein einziger Umrichter noch schalten kann, was jedoch dem Ziel einer möglichst hohen Versorgungsspannung mit geringen Übertragungsverlusten entgegenläuft. Durch den streckenseitigen DC-ZK mit einer niedrigen Versorgungsspannung von 1,4 kV bei der induktiven Energieübertragung sind somit die Übertragungsverluste durch die entsprechend höheren Ströme größer. Daher sind innerhalb eines Einspeiseabschnitts zusätzliche Umrichter in Verbindung mit Transformatoren (Zuführsegmente) notwendig. Zur Erreichung eines möglichst hohen Wirkungsgrads ist der Abstand zwischen den Zuführsegmenten inner-

¹⁰ Zum Teil auch Autotransformatorsysteme (Mehrspannungssysteme) mit Wechselspannungen von 2-AC 50/25 kV oder 2-AC 40/15 kV.

¹¹ Bei einer Zugfolgezeit des NGT-HGV von 3 Min. halbiert sich der erforderliche Uw-Abstand auf 24 km.

¹² Kosten eines Blockunterwerks für einfache Strecken 5 Mio. € und eines Vollunterwerks für Hochleistungs- bzw. HGV-Strecken ca. 10 – 15 Mio. € und teilweise mehr.

halb eines Einspeiseabschnitts möglichst klein zu wählen. Nach Aussage des IEW wären pro Einspeiseabschnitt insgesamt 5 Zuführsegmente erforderlich. Die Kosten für derartige Umrichter können zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer abgeschätzt werden. Als Richtwert können hier die Kosten der Gleichrichter-Uw aus dem Straßenbahn- bzw. Busverkehr heran gezogen werden. Speziell im Nahverkehr werden gegenwärtig eine Vielzahl an Pilotprojekten von innovativen induktiven Energieübertragungssystemen erprobt und erforscht, wie z.B. das System von der Fa. Bombardier PRIMOVE. Die Neubaukosten für solche Gleichrichter-Uw im Nahverkehrsbereich liegen je nach Anwendung zwischen 1 und 1,5 Mio. €. [10] [3]

Bei den Kostenangaben ist jedoch zu beachten, dass die Spannungsebenen dieser Gleichrichter-Uw für Stadtbahn- bzw. Trolleybussysteme sich in einem Spannungsbereich von etwa 600 - 1000 V bewegen und damit über ein geringeres Spannungsniveau als die DC-ZK-Spannung von 1,4 kV des hier betrachteten FEÜ-Systems verfügen. Gleichzeitig müssen die Umrichter für das FEÜ-System rückspeisefähig sein, wodurch sich die Kosten je nach Ausführung erhöhen könnten.

Ferner müssen für die Umrichter in den Zuführsegmenten entlang der Strecke entsprechende Fundamente sowie witterungsgeschützte Schaltkästen bzw. Gebäude vorgesehen werden. Dabei sind auch weitere Zusatzkomponenten für die Leistungselektronik zu berücksichtigen, wie beispielsweise Kühl- und Schutzeinrichtungen. Der dafür notwendige Bauraum für diese Komponenten kann zu diesem Zeitpunkt ebenfalls schwer abgeschätzt werden. Aus dem für die Umrichter u. U. erforderlichen zusätzlichen Platzbedarf neben der Strecke kann ferner ein Anstieg der mit Wegerechten und Landerwerb verbundenen Kosten resultieren.

Der DC-ZK kann, ähnlich wie das OL-Strecken-kabel, in einfache Kabelkanäle neben der Strecke verlegt werden. Nach der Auslegung können jedoch lediglich die reinen Materialkosten für Kupfer in Abhängigkeit der gewählten DC-ZK-Spannung ermittelt werden. Unter der Annahme einer Stromtragfähigkeit des Kupfers von 2 A/mm² (nach AP 2200) ergeben sich mit dem aktuellen Kupferpreis¹³, die in Tab. 11.2 aufgeführten Kosten pro Meter. Hinzu kämen zusätzliche Kosten für Abschirmung, Sicherung und Einbau des DC-ZK, die jedoch momentan nicht bestimmt werden können.

¹³ Der aktuelle Kupferpreis beträgt 5,39 €/kg (Quelle: <http://www.boerse-online.de/rohstoffe/kupferpreis/EURO> Internet-Abfrage vom 15.01.2014)

Tab. 11.2: Materialkosten für Kupfer in Abhängigkeit der DC-ZK-Spannung

Spannung [kV]	Fläche [mm ²]	Metergewicht [kg/m]	Meterpreis [€/m]
6	2075	18,51	99,76
3	4150	37,02	199,53
1,4	8390	74,84	403,38

Da innerhalb der Primärspulensegmente, deren Länge idealerweise ca. 20 m betragen soll, ein Einphasenwechselstrom für die induktive Energieübertragung notwendig ist, sind zwischen den DC-ZK und den Primärspulensegmenten zusätzliche Wechselrichter (DC/AC-Umrichter) erforderlich. Die aktuelle Halbleitertechnik stößt dabei mit aktuellen Sperrspannungen von 1,4-1,7 kV an ihre Grenzen, sodass gegenwärtig nur eine Zwischenkreisspannung von 1,4 kV realisiert werden könnte, die jedoch mit sehr hohen Materialkosten für Kupfer verbunden wäre. Ist es seitens der Halbleitertechnik möglich höhere Sperrspannungen zu schalten, können die Zwischenkreisspannung erhöht und damit Materialkosten reduziert werden (vgl. Tab. 11.2). Als Umrichter für die Primärspulensegmente käme die Verwendung aktueller IGBT-Module in Betracht, deren Preise sich etwa im Bereich um 1.500 €/Modul bewegen. Für ein Primärspulensegment mit einer Länge von 20 m ist je ein Umrichter mit 2 Modulen notwendig. Die Kosten beziehen sich dabei lediglich auf die IGBT-Module und enthalten nicht die Kosten für etwaige zusätzliche Komponenten wie beispielsweise Schalt- und Schutzeinrichtungen oder evtl. erforderliche Schaltkästen sowie deren Integration in den Fahrweg/Spulensystemen. Innerhalb des Fahrzeugs können für die Gleichrichtung der Wechselspannung der Sekundärspulen auf den DC-Fahrzeugzwischenkreis ähnliche Umrichter wie die der Primärspulen, allerdings mit geringerem Leistungsniveau, aufgrund der kürzeren Spulenlänge von 5 m, eingesetzt werden. Dabei ist für jede Sekundärspule ein Wechselrichter¹⁴ mit ebenfalls 2 Modulen notwendig, wobei ein Modul derzeit am Markt ca. 900 € kostet.

Zusammenfassend sind in Tab. 11.3 die Investitionskosten des erarbeiteten FEÜ-Systems, die derzeit ermittelt werden konnten, aufgeführt. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich hierbei lediglich um eine erste Kostenschätzung einzelner Komponenten des FEÜ-Systems handelt. Eine ganzheitliche Erfassung aller Kostenbestandteile konnte, aufgrund des hohen Neuheitswerts der erforderlichen Technologien und Komponenten dieser Energieübertragungsart, nicht durchgeführt werden.

¹⁴ Für einen NGT-HGV Halbzug (2 End- und 8 Mittelwagen) sind beispielsweise insgesamt 18 Spulensegmente und damit 18 Umrichter mit je 2 IGBT-Modulen erforderlich.

Tab. 11.3: Übersicht der Investitionskosten des FEÜ-Systems

Teilsystem	Komponenten	Investitionskosten	Bemerkungen
ES	Unterwerk	5 - 15 Mio. €/Stk.	falls zusätzliche Uw nötig sind
	OL-Strecken-kabel	1-1,5 Mio. €/dkm	bei Neubau einer Strecke
ZFS	AC/DC-Umrichter mit Transformatoren	1-1,3 Mio. €/Stk.	bei Uw-Abstand 48 km sind 5 Umrichter erforderlich
ZK	DC-Schiene	400 €/m	Materialkosten für Kupfer
VS	Umrichter Primärspule	3000 €	Kostenangaben ausschließlich für IGBT-Module/Segment
	Umrichter Sekundärspule	1.800 €	

Werden die Komponentenkosten (ohne Neubau etwaiger zusätzlicher Unterwerke sowie ohne OL-Strecken-kabel) für die Zuführsegmente, die Umrichter der Primär- und Sekundärspulensegmente (Ausrüstung eines Schienenfahrzeugs) sowie die Materialkosten des DC-ZK zusammen gerechnet und auf 1 km doppelgleisige Strecke bezogen, ergibt sich ein mittlerer Teilinvestitionsaufwand von ca. 1,25 Mio. €/dkm. Darin sind jedoch weder die Aufwände für die Integration der Spulensegmente in Strecke und Fahrzeug enthalten, noch sind die Kosten für die Wicklungssysteme selbst und deren Verbindungen zum DC-ZK (infrastruktur- und fahrzeugseitig) sowie sämtlicher Schutz-, Überwachungs- oder Kontrollsysteme berücksichtigt.

Um bei innovativen Systemen auch die Fertigungskosten zu reduzieren, wäre es denkbar, die Primärspulensegmente im Herstellungsprozess von Feste-Fahrbahn-Systemen, wie beispielweise von der Fa. Max Bögl, zu integrieren. Für die Integration müssen lediglich die notwendigen Freiräume für die einzelnen Spulen beim Gießen der Fahrbahnplatten vorgesehen werden. Nach dem Verlegen der Spulen in die Feste-Fahrbahn könnten diese fest mit Beton vergossen werden. So wäre es möglich, einzelne fertige Module (vormontierte Feste-Fahrbahnplatten mit integrierten Primärspulensegmenten) in großer Stückzahl bereits im Werk zu fertigen und diese mit den gegenwärtigen maschinellen Herstellprozessen innerhalb des Gleisbaus zu einem durchgehenden Streckenabschnitt im Baufeld zu montieren. Dadurch entfielen die aufwendigen und kostenintensiven Arbeiten (verlegen der Primärspulen und vergießen mit Beton) auf der freien Strecke. Nachteilig bei dieser Fertigungsvariante ist jedoch die Länge eines solchen Moduls von 20 m, das nur mit Spezialfahrzeugen gefertigt und verbaut werden könnten.

Als Alternative kämen kürzere Primärspulensegmente mit 5 oder 10 m Länge) in Betracht. Nach der Fertigstellung der Festen Fahrbahn würden die einzelnen Spulensegmente in Gleismitte zwischen beiden Schienen aufgelegt und anschließend mit der Fahrbahn ver-

ankert. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass sich die Herstellungskosten bei dieser Variante durchaus erhöhen könnten. Einerseits sind aufgrund der kürzeren Spulenlängen mehr Umrichter für die Energieübertragung notwendig. Andererseits ergeben sich durch den deutlich aufwendigeren Herstellprozess (Bau der Festen Fahrbahn, Verlegen und Sicherung der Primärspulen etc.) zusätzliche Kosten im Vergleich zur vorgenannten Variante. Ferner müssen bei beiden Varianten die Verbindungen der einzelnen Segmente untereinander sowie zum DC-ZK sichergestellt werden. Diese müssten vor allem witterungsgeschützt ausgeführt sein, jedoch gleichzeitig für Wartungs- und Instandhaltungszwecke eine einfache Zugänglichkeit aufweisen.

Wie den Ausführungen zu entnehmen ist, ergibt sich, im Vergleich zum konventionellen Oberleitungs-/Stromabnehmersystem, bei der FEÜ für Vollbahnsysteme in Hinblick auf die Infrastruktur ein durchaus komplexeres System. Neben dem innovativen Spulensystem sind weitaus mehr elektronische Komponenten/Bauteile für die berührungslose Energieübertragung notwendig. In Bezug auf das Fahrzeug müssen die Differenzkosten für die elektronische Antriebsausrüstung eines Stromabnehmer- und eines FEÜ-Fahrzeugs beachtet werden. Gegenüber einem Oberleitungsfahrzeug entfallen bei einem induktiv versorgten Fahrzeug die Stromabnehmer nebst Trennschalter, Isolatoren etc. sowie der Traktionstransformator. Stattdessen sind Pick-Up-Spulen, Gleichrichter und Hoch- bzw. Tiefsetzsteller sowie weitere Steuerungs-, Kontroll- und Schutzeinrichtungen notwendig. Gegebenenfalls sind zusätzlich fahrzeugseitige Energiespeicher zur Zwischenpufferung notwendig. Die Energieversorgung und Ansteuerung der Fahrmotoren mit Pulswechselrichtern ist prinzipiell gleich wie bei einem Oberleitungsfahrzeug. Es ergeben sich die folgenden fahrzeug- und streckenseitigen, kostenrelevanten Stellparameter:

- Segmentlängen und Ausführung der Sekundär- und Primärwicklungssysteme,
- Anzahl der erforderlichen Wechselrichter (Fahrzeug & Strecke),
- Länge und Querschnitt des Gleichstromzwischenkreises,
- Ausführung der Gleichrichtersegmente (Gleichrichter, Transformatoren, Kühl- und Schutzeinrichtungen),
- Anzahl der evtl. zusätzlichen Einspeisepunkte bei einer abweichenden Zugfolgezeit,
- Spannungs-, Frequenz- und Leistungsbereich der elektronischen Komponenten,
- Anforderungen an mechanische und elektrische Festigkeit sowie
- i.A. Komplexität des Aufbaus in vormontierte bzw. vorkonfektionierte Baugruppen.

11.3.3 Instandhaltungskosten Strecke und Fahrzeug

Die auf Grund der Komplexität der induktiven Energieübertragungsanlagen zu erwartenden höheren Erstausrüstungskosten gegenüber einem OL-System sollten soweit möglich durch niedrigere Kosten im Betrieb und in der Instandhaltung ausgeglichen werden. Hier ist insbesondere auf die verschleißlose Energieübertragung zwischen Fahrzeug und Infrastruktur hinzuweisen.

Der Anlagenverschleiß eines FEÜ-Systems entsteht schwerpunktmäßig durch die Stoß- und Vibrationsbelastungen innerhalb des Fahrwegs sowie durch die normalen Alterungsprozesse der Leistungselektronik, Peripheriegeräte, Kabel und sonstiger für die FEÜ notwendiger Anlagen. Der Aspekt der Obsoleszenz (also die durch immer kürzere Innovationszyklen bedingte Abkündigung von elektronischen Bauteilen) betreffe ebenso das System der FEÜ wie das Oberleitungssystem, gegebenenfalls sogar stärker.

Aussagekräftige Prognosen hinsichtlich der Instandhaltungs- und Reparaturfreundlichkeit sowie der Verfügbarkeits- und Ausfallraten sind vor einer detaillierten Systemauslegung kaum zu treffen und lassen sich letztlich auch erst während des Betriebs ermitteln. Weitere Vorteile eines oberleitungsfreien Energieübertragungssystems können aus den potentiell geringeren Betriebserschwerungskosten resultieren. Also den Kosten, die sich aus Betriebsbeschränkungen infolge von Schäden oder Ausfällen der Fahrdrähtanlagen ergeben. In diesem Themenfeld sind folgende Argumente für ein induktives Energieübertragungssystem anzuführen:

- Ein komplett in der Strecke verbautes induktives Energieübertragungssystem ist beständiger gegen Witterungseinflüsse, insbesondere gegen die Folgen aus Stürmen (Baumsturz) und Vereisung ,
- Vorhandensein einer systembedingten Redundanz der FEÜ durch die einzelnen aufeinanderfolgenden Segmente, die wiederum in einzelne Versorgungsabschnitte geschaltet sind.

Neben den genannten Vorteilen ergeben sich auch einige potentielle Nachteile bzw. Problematiken, die sich durchaus nachteilig auf das FEÜ-System auswirken können. Diese müssen jedoch individuell und in größerer Tiefe, z. B. in Form einer Risikoanalyse, näher betrachtet werden. Darunter zählen beispielsweise auftretendes Niederschlags- bzw. Hochwasser, in das System eingebrachte Schwingungen durch den Bahnbetrieb oder der Schutz gegen Vandalismus. Ferner birgt die zusätzlich eingebrachte infrastrukturelle Ebe-

ne durch den DC-ZK aus elektrotechnischer Sicht weitere Risiken¹⁵, die jedoch in weiteren Untersuchungen genauer analysiert werden müssen.

Quantitative Aussagen zu den Instandhaltungskosten des induktiven Energieübertragungssystems lassen sich zum gegenwärtigen Kenntnisstand nicht treffen. Es ist aber auf Grund der fehlenden verschleißbehafteten Kontaktverbindung insgesamt von geringeren Kosten im Vergleich zum OL-System auszugehen. Ob die Gesamtwartungskosten des FEÜ-Systems (nach Beseitigung von „Kinderkrankheiten“) tatsächlich niedriger als die eines OL-Systems sind, lässt sich jedoch nach derzeitigem Stand nicht feststellen.

11.4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Kapitels sollten die bisher erarbeiteten technischen Konzepte der fahrdrahtlosen Energieübertragung (FEÜ) für Vollbahnsysteme hinsichtlich der zu erwartenden Investitions- und Instandhaltungskosten beleuchtet werden. Nach dem aktuellen Forschungsstand ist es jedoch nicht möglich sämtliche Kostenbestandteile eines FEÜ-Systems explizit zu ermitteln, da einerseits die erforderliche Halbleitertechnik in der notwendigen Ausführung gegenwärtig nicht existiert und andererseits die derzeitige Auslegung der nötigen Komponenten, aufgrund des hohen Neuheitswerts des Gesamtsystems, eine ganzheitliche Betrachtung der LCC-Kosten nicht zulässt. Somit wurde der Fokus eher auf die Darstellung der kostenseitigen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sowie den generellen Problemstellungen des FEÜ-Systems gelegt.

Für eine wirtschaftliche Einschätzung des FEÜ-Systems wurden zunächst die Kosten des herkömmlichen kontaktbehafteten Stromabnehmer-Oberleitungssystem überschlägig erfasst. Anhand der Systembeschreibung und Auslegung der FEÜ-Komponenten (AP 2200) erfolgte danach die Ermittlung der voraussichtlichen Kosten für eine Variante des Systems. Dabei stellt die FEÜ-Variante lediglich ein erstes Konzept der berührungslosen Energieübertragung für Vollbahnsysteme dar. Viele Aspekte dieses Systems, insbesondere die der infrastrukturellen Antriebstopologie, konnten innerhalb dieses Forschungsvorhabens nur ansatzweise untersucht werden, sodass für eine aussagekräftige Kostendarstellung die erforderliche Auslegung der jeweiligen Teilkomponenten des FEÜ-Systems nicht ausreichend ist. Daher wurde hier zunächst nur eine erste Kostenschätzung der bisher bekannten Teilsysteme des FEÜ-Systems durchgeführt. Aus diesem Grund ist ein Kosten-

¹⁵ Wie z.B. Ausfall des DC-ZK führt zum Versagen des Gesamtsystems o.ä.

vergleich beider Energieübertragungssysteme nur bedingt möglich, da die Kosten vieler Komponenten nicht ermittelt werden konnten.

Die reinen Anlagenkosten eines konventionellen OL-Systems, ohne die Errichtung neuer Unterwerke, liegen im Bereich von ca. 1 - 1,5 Mio. €/dkm. Hinzu kommen jährliche Instandhaltungskosten für die Anlagen von ca. 20.000 €/a*dkm. Im Vergleich dazu belaufen sich die Erstausrüstungskosten der bisher bekannten Teilsysteme der FEÜ auf ca. 1,25 Mio. €/dkm. Hierbei handelt es sich jedoch lediglich um die Kosten der notwendigen Umrichter in den Zuführsegmenten, des Kupfers für den DC-ZK und der erforderlichen Umrichter für die Primär- und Sekundärspulensysteme. Die Kosten für etwaige Schutz-, Kühl-, Überwachungs- und Kontrolleinrichtungen sowie für die Verbindungen der jeweiligen Teilsysteme untereinander, der Primär- und Sekundärspulen und deren Integration in den Fahrweg/ ins Fahrzeug sind dabei nicht enthalten. Ferner kann derzeit keine quantitative Aussage über die entstehenden Instandhaltungskosten des FEÜ-Systems getroffen werden.

Für einen belastbaren Vergleich muss das FEÜ-System für Vollbahnanwendungen in weiteren Untersuchungen genauer spezifiziert und ausgelegt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn entsprechende Halbleiterelemente in dem geforderten Leistungsbereich (Leistungen und Frequenzen im MW- bzw. kHz-Bereich) vorhanden sind.

Eines der zentralen Ziele der fahrdrahtlosen Energieübertragung ist die Reduzierung der Instandhaltungskosten durch ein kontaktfreies alternatives Übertragungssystem. Nur so können die sich ergebenden Nachteile des konventionellen OL-Systems und die damit verbundenen Kosten vermieden werden. Darunter zählen beispielsweise die Wartungs- und Instandhaltungskosten von Fahrdraht und Schleifleisten, externe Kosteneffekte (Lärmquelle Stromabnehmer) oder auch auftretende Betriebserschwerungskosten aufgrund der fehlenden Redundanz des OL-Systems.

Die Kosten über den gesamten Lebenszyklus sind für die Umsetzung eines solchen alternativen Energieübertragungssystems ein wichtiger Faktor im weitergehenden Entscheidungsprozess. Gegenwärtig kann jedoch noch keine Aussage darüber getroffen werden, ob ein FEÜ-System ganzheitlich aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten günstiger ist bzw. wird als das konventionelle OL-System. Nach der Einschätzung der Kosten in diesem Bericht zu Folge, werden die Investitionskosten eines FEÜ-Systems deutlich über den eines OL-Systems liegen zumal die Kosten der Teilsysteme, die bisher ermittelt werden konnten, bereits im Bereich der Aufwandskosten für ein OL-System liegen. Ob die höheren Erstausrüstungskosten durch niedrigere Instandhaltungskosten kompensiert werden können, lässt sich zu diesem Zeitpunkt nicht feststellen. Erst mit der Entwicklung von leistungsstärkeren Halbleiterelementen und der genaueren Auslegung der Systemkompo-

nenen sowie nach einer ersten Betriebsversuchserfahrung mit diesem System könnten belastbare Aussagen zu den LCC-Kosten getroffen werden.

11.5 Quellen

- [1] ABB (2011). ABB erhält Auftrag über 17 Millionen Franken von Bombardier Transportation. Pressemeldung vom 18.04.2011.
- [2] Balfour Beatty Rail (2008). Die Elektrifizierung der Bahnstrecke Hamburg-Lübeck-Travemünde (product brochure).
- [3] BUND Kreisgruppe Braunschweig und braunschweiger forum e.V. (2013). Anregungen zur Planung einer Stadtbahnstrecke zwischen Wendeburg und der Braunschweiger Innenstadt. Braunschweig.
- [4] DB AG (2012). Bautechnik, Leit- und Signal- u. Telekommunikationstechnik, Kostenermittlungsbuch KEB, Richtlinie 808.0210. DB ProjektBau GmbH. Köln.
- [5] Deutsche Bahn AG (2013). "Elektrifizierter Streckenabschnitt Reichenbach-Hof pünktlich zum Fahrplanwechsel 2013/2014 fertig gestellt." Retrieved 13.12.2013, http://www.deutschebahn.com/de/presse/pi_regional/5249818/ssat20131205.html.
- [6] HS2 Ltd. (2009). High Speed Rail - London to the West Midlands and Beyond, HS2 Cost and Risk Model, High Speed Two Limited.
- [7] Kießling, F., R. Puschmann, et al. (1998). Fahrleitungen elektrischer Bahnen: Planung - Berechnung - Ausführung. Stuttgart, Teubner.
- [8] Lienau, C. (2007). Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation. Hamburg, Eurailpress.
- [9] López-Pita, A., P. Teixeira, et al. (2008). "Maintenance Costs of High-Speed Lines in Europe: State of the Art." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2043(-1): 13-19.
- [10] Nickel, E. (2012). Synergien zwischen Straßenbahn und elektrischem Stadtbus. LVB GmbH.
- [11] Orellano, A. und S. Sperling (2009). Aerodynamic Improvements and Associated Energy Demand Reduction of Trains. The Aerodynamics of Heavy Vehicles II: Trucks, Buses and Trains. F. Browand, R. McCallen and J. Rose. Berlin, Springer: 219-231.
- [12] Rötz, K.-U. (2000). ICE 3 Beschreibung der Triebzüge BR 403/406. GDL - Gewerkschaft Deutscher Lokomotivführer.

- [13] SBB (2013). Neues Unterwerk Hürlistein. Broschüre. SBB AG.
- [14] Schmidt, H. und A. Schmieder (2005). "Stromabnahme im Hochgeschwindigkeitsverkehr." Elektrische Bahnen 103(4-5): 231-236.
- [15] Streit, S. (2008). "Kontaktkraftgeregelter Hochleistungs-Stromabnehmer." Elektrische Bahnen 106(8-9): 365-370.

12 Zusammenfassung und Ausblick

von Dr.-Ing. Joachim Winter und Dipl.-Ing. Sebastian Streit

Das konventionelle Energieübertragungssystem heutiger Hochleistungs-Bahnsysteme bestehend aus Oberleitung und Stromabnehmer hat einige Nachteile, die durch ein innovatives System zur fahrdrahtlosen Stromübertragung behoben werden können. Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass eine fahrdrahtlose Energieübertragung technisch die Anforderungen eines Ultrahochgeschwindigkeitszuges erfüllen kann. Hinsichtlich der Instandhaltungs- und insbesondere der Betriebserschwerungskosten werden Vorteile des Systems mit induktiver Energieübertragung gegenüber dem konventionellen Oberleitungssystem erwartet. Jedoch könnten die einmaligen Installationskosten ein Problem darstellen, das weiter untersucht werden muss.

In den weiterführenden Untersuchungen müssen dabei vor allem die Teilsysteme des Energieübertragungssystems weiter optimiert werden. Systemkomponenten, wie z.B. die erforderlichen leistungselektronischen Komponenten, die nach aktuellem Stand der Technik restriktiv auf die Optimierung des Gesamtsystems wirken, müssen weiter spezifiziert werden, um den zukünftigen Forschungsbedarf und das tatsächliche Potential der fahrdrahtlosen Energieübertragung zu identifizieren.

Eine abschließende Beurteilung der Machbarkeit für das hier beschriebene System ist eng verknüpft mit einer hinreichend genauen Bestimmung der zu erwartenden Lebenszykluskosten. Nach dem aktuellen Forschungsstand ist es jedoch nicht möglich, sämtliche Kostenbestandteile eines zukünftigen fahrdrahtlosen Energieübertragungssystems zu ermitteln, da einerseits die für eine adäquate Optimierung des Gesamtsystems erforderliche Halbleitertechnik in der notwendigen Ausführung gegenwärtig noch nicht existiert und andererseits die derzeitige Auslegung der notwendigen Komponenten aufgrund des hohen Neuheitswerts des Gesamtsystems eine ganzheitliche Betrachtung der Lebenszykluskosten nicht zulässt.

Das Projekt wurde dankenswerterweise durch das Ministerium für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg finanziert.