



Gutachten über Resonanzproblematik im Übertragungsnetz der SBB

Im Auftrag des **Bundesamtes für Verkehr (BAV)**

Projekt Nr.: 2013-03
Dezember 2013



Institut für
Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz



TU Graz
Institut für Elektrische Anlagen
Inffeldgasse 18
A-8010 Graz

Institutsvorstand:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Lothar Fickert

Wissenschaftliche Ausarbeitung:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Lothar Fickert

Dr. Herwig Renner

Dezember 2013

INHALTSVERZEICHNIS

1	Veranlassung und Umfang der Untersuchungen	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Zusammenstellung der verwendeten Unterlagen	5
2	Methodik der Analyse und Befundung	7
3	Fragenkatalog des BAV	8
3.1	Fragenblock 1 - Vorgehen zur Erhebung des aktuellen Zustandes der SBB-Energie	8
3.2	Fragenblock 2 - Auswertung und Methodik	10
3.3	Fragenblock 3 - Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse durch die SBB	14
3.4	Fragenblock 4 - Zusatzfragen	15
4	Befund	18

1 Veranlassung und Umfang der Untersuchungen

1.1 Aufgabenstellung

Im Auftrag des Bundesamtes für Verkehr (BAV) im Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation wird durch das Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz ein Gutachten über die seitens der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) vorgelegte Studie „Resonanzprobleme im SBB Energienetz“ [1] ausgeführt.

In der Studie werden das Auftreten von Netzresonanzen im 132-kV-Netz der SBB und die daraus resultierenden Konsequenzen im Detail analysiert. Eine wesentliche Erkenntnis dieser Arbeiten ist, dass die Netzresonanzfrequenz mit Zunahme der Netzkapazität¹ und damit insbesondere mit zunehmender Länge der verkabelten Abschnitte abnimmt. Um Netzinstabilitäten zu vermeiden, müssen sich Triebfahrzeuge im Frequenzbereich der Resonanzstelle passiv verhalten. Die heute gültige 103-Hz-Grenze, deren Herleitung in [1, Kapitel 7] erfolgt, kann zwar langfristig auf 87 Hz gesenkt werden, jedoch ist dies ein aufwendiger, kostspieliger Prozess, welcher zudem europaweit durchgeführt werden muss. Kurz- und mittelfristig sehen sich die SBB als Projektant, Ersteller und Betreiber ihres Netzes und das Bundesamt für Verkehr BAV als Eisenbahnaufsichtsbehörde (wie auch das Bundesamt für Energie und das Eidg. Starkstrominspektorat ESTI, sofern diese Gemeinschaftsprojekte 50 Hz / 16,7 Hz behandeln) jedoch zunehmend mit Verkabelungsforderungen in Bewilligungsverfahren konfrontiert.

Die erwähnte Studie "Resonanzproblematik in SBB Energienetz" in der letzten Fassung vom 24.9.2012 der SBB stellt im vorliegenden Zusammenhang ein Parteigutachten dar. Das BAV hat – auch im Interesse seiner eigenen Unabhängigkeit als Bewilligungs- und Aufsichtsbehörde – entschieden, den Bericht extern durch das Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz begutachten zu lassen. Es wurde seitens BAV ein Fragenkatalog ausgearbeitet, zu dem von den Gutachtern Stellung zu nehmen ist.

Im Rahmen der Begutachtung wurde ein Lokaltermin am 4./5.7.2013 bei den Schweizerischen Bundesbahnen SBB, Abteilung „Infrastruktur, Energie“ durchgeführt.

¹ Netzkapazität = kapazitatives Verhalten des Netzes (nicht gleichzusetzen mit Leistungsfähigkeit des Netzes)

1.2 Zusammenstellung der verwendeten Unterlagen

Folgende Unterlagen wurden dem Institut für Elektrische Anlagen von BAV und SBB übergeben:

- [1] Studie: *Resonanzproblematik im SBB Energienetz*, Aeberhard, Vollenwyder, Haag, Aeberhardt, 24.9.2012
- [2] R-I-20005, Anforderungen an die Eingangs-Admittanz von Umrichtertriebfahrzeugen, 01.05.2009
- [3] Kompatibilitätsuntersuchung am schweizerischen 16.7Hz Bahnstromnetz, M. Lörtscher, M. Meyer, A. Schneeberger, B. Hemmer, eb Elektrische Bahnen, 6-7/2001, Seite 292
- [4] Untersuchungen zu Überspannungen im Oberleitungsnetz bei den ÖBB, G. Wallnberger, G. Punz, H. Pechlaner, M. Meyer, eb Elektrische Bahnen, 11/2006, Seite 536
- [5] Netzkompatibilitätsstudie und –messungen für die Umrichteranlage Wimmis, M. Meyer, M. Thoma, eb Elektrische Bahnen, 12/2006, Seite 567
- [6] Messung des Frequenzgangs von Triebfahrzeugen, M. Meyer, M. Aeberhard, K. Germann, R. Suter, P. Dähler, eb Elektrische Bahnen, 10/2007, Seite 521
- [7] Auswirkung der Netzresonanzen im Lötschberg Basistunnel, M. Meyer, M. Staldemann, R. Kernen, eb Elektrische Bahnen, 11/2007, Seite 570
- [8] Stabilitätsuntersuchungen im 132kV Netz der SBB, M. Aeberhard, J. Duron, M. Lörtscher, M. Meyer, eb Elektrische Bahnen, 6/2009, Seite 267
- [9] DB Richtlinie 810.0241, Kompatibilität mit den Anforderungen des Netzes - Elektrotechnische Kriterien
- [10] Netzresonanzmessungen auf HSL Zuid und Betwueroute, M. Meyer, G. van Alphen, Schweizer Eisenbahnrevue, Eisenbahn-Revue International, 12/2006, S. 610
- [11] Schlussbericht der Arbeitsgruppe Leitungen und Versorgungssicherheit (AG LVS), 28.02.2007
- [12] Teilverkabelung von Freileitungen im 132-kV- Hochspannungsübertragungsnetz und bei 15-kV-Speiseleitungen für das Fahrleitungsnetz. Übersicht über die elektrotechnischen Konsequenzen, Fachkommission für Hochspannungsfragen, A11/073, 2. Mai. 2011
- [13] Netzstabilität in grossen Bahnstromnetzen, Schweizer Eisenbahn-Revue, 7-8/1999
- [14] Elektrische Zugförderung im Lötschberg-Basistunnel: Vom Pflichtenheft zur Betriebswilligung für Fahren mit 250 km/h durch die erste europäische Alpentransversale, Hrsg. M. Lörtscher, 2010

Weitere Quellen:

- [15] ÖBB-Netzstabilitätsstudie:Schlussbericht, M. Mayer, Version 2 vom 11.4.2006
- [16] http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_201645317.pdf, Netzdaten
- [17] <http://www.sbb.ch/sbb-konzern/sbb-als-geschaeftpartnerin/angebote-fuer-evus/energie/erzeugung/wasserkraftwerke.html>, Wasserkraftwerke der SBB

2 Methodik der Analyse und Befundung

Mit e-mail vom 13.12.2012 wurde das Institut für elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz angefragt, basierend auf dem SBB-Schlussbericht „*Resonanzproblematik im SBB Energienetz*“, (Dokumentes *Resonanzproblematik_Bericht_AV_V10.pdf*) die Annahmen, die technischen und wissenschaftlichen Grundlagen, die Berechnungs- und Auswertungsmethodik, die Resultate sowie die daraus gezogenen Schlüsse der SBB im Rahmen einer Second Opinion zu beurteilen.

Seitens des Institutes für elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz wurde nach eingehendem Studium des Berichts und der in Abschnitt 1.1 angeführten Unterlagen sowie nach einer grundsatzorientierten Vorab-Berechnung seitens des Institutes am 4./5.7.2013 ein Lokaltermin mit den Schweizerischen Bundesbahnen (Frau Dr.sc.tech. ETH, lic.oec. Christine Haag, Herr El.-Eng. MSC René Vollenwyder, Herr Dipl. EL-Ing. ETH Martin Aeberhard) und der Firma emkamatik GmbH, CH-5430 Wettingen, Schweiz (Herr. Dr. sc. Techn. ETHZ Markus Meyer) in Anwesenheit von Herrn Rechtsanwalt Peter Mayer, Stv. Sektionschef Bewilligungen I, Abteilung Infrastruktur des Bundesamts für Verkehr BAV durchgeführt. Bei diesem Lokaltermin wurde das dem oben angeführten Bericht zu Grunde liegende Programm der Firma emkamatik GmbH hinsichtlich seiner Struktur, Parametrisierung sowohl in Hinsicht auf die Quantität als auch die Qualität der eingegebenen Daten, ferner hinsichtlich der Abläufe und Darstellung der Ergebnisse geprüft.

Besonderes Augenmerk wurde auf die funktionellen Zusammenhänge gelegt, welche mit folgender Methodik verifiziert wurden: sensible Parameter wurden durch Vorgabe konkreter Werte seitens der Gutachter nach Approbation seitens der Schweizerischen Bundesbahnen kontrolliert geändert, um die Sensitivität der Ergebnisse nach Qualität und Quantität zu prüfen.

Als Leitfaden für die vollständige Abarbeitung und Aufklärung der offenen Punkte, die im Gutachtensauftrag seitens des Bundesamtes für Verkehr BAV angefordert worden sind, diente der mit dem Auftragsschreiben übermittelte Fragenkatalog, der sich in vier Fragenblöcke gliedert.

Fragenblock 1 - Vorgehen zur Erhebung des aktuellen Zustandes der SBB-Energie

Fragenblock 3 - Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse durch die SBB

Fragenblock 2 - Auswertung und Methodik

Fragenblock 4 - Zusatzfragen

Anschließend an diesen Lokaltermin wurden seitens des Institutes die erhobenen Ergebnisse zu den einzelnen Fragenblöcken bzw. den Unterpunkten ausgearbeitet und in Kapitel 3 dieses Gutachtens beantwortet.

Die Befundung (Kapitel 4) schließt das vorliegende Gutachten ab.

3 Fragenkatalog des BAV

3.1 Fragenblock 1 - Vorgehen zur Erhebung des aktuellen Zustandes der SBB-Energie

a. Wurden die korrekten technischen und wissenschaftlichen Überlegungen angestellt?

Ausgehend von großflächigen Störungen im Bahnnetz mit gleichzeitiger Abschaltung von Loks der Baureihen Re 450 und Re 460 wurde u. a. durch Messaufzeichnungen der Spannung während der Störungen der Effekt von

- Netzresonanz und
- aktivem Regelverhalten der Traktionsumrichter

richtig erkannt. Begleitende Simulationsrechnungen seitens der Gutachter konnten die messtechnisch erfassten Phänomene einwandfrei bestätigen. Das gleiche Phänomen wurde 2005 in Österreich beobachtet [15]. Auch hier wird als Maßnahme verlangt, dass die tiefste Resonanzfrequenz im 110- und 55-kV-Netz nicht unter 120 Hz fallen darf. Damit wird - neben anderen technischen Gründen wie z.B. der Erdschlusslöschung – der Kabelausbau im österreichischen 110-kV-Netz beschränkt.

Es wurden die korrekten technischen und wissenschaftlichen Überlegungen angestellt.

b. Wurden die richtigen Daten in genügendem Umfang erhoben?

Für die Simulation des Netzes wurden seitens der Firma emkamatik die erforderlichen Daten des 132-kV-Netzes (Leistungsdaten, Transformator-, Generator-, Umrichterdaten) erhoben. Im Falle der Leitungen erfolgt die elektrische, frequenzabhängige Modellierung auf Basis der gut dokumentierten Mastkopfbilder und Leitungslängen unter Anwendung der bekannten Formeln von Carson und Pollacsek.

Die Kuppelstellen zu ÖBB und DB wurden nicht nachgebildet, deren Effekt ist aber aufgrund der begrenzten Kurzschlussleistung nicht maßgeblich.

Das anregende Verhalten der Triebfahrzeugumrichter konnte durch entsprechende Typenmessungen [6] nachgewiesen und modelltechnisch umgesetzt werden.

Die zur Nachbildung der beobachteten Netzinstabilitäten erforderlichen Daten wurden in ausreichendem Umfang erhoben und in den Simulationsmodellen korrekt implementiert.

c. Sind die Datenerhebungen mit der notwendigen Unabhängigkeit durchgeführt worden?

Es stellt sich aus Sicht der Gutachter weniger die Frage nach der Unabhängigkeit der Datenerhebungen, sondern vielmehr nach deren Vollständigkeit, Richtigkeit und Effizienz und Einbußen durch allfällige Vernachlässigungen (siehe Fragenbl. 3.1.b).

Es wurde seitens der Gutachter keine Anhaltspunkte gefunden, wonach Daten selektiv ausgewählt oder unterdrückt worden wären und damit auf das Ergebnis des Gutachtens Einfluss genommen worden wäre.

d. Ist die Genauigkeit der Daten aus wissenschaftlicher Sicht plausibel und genügend?

Die aus den Mastkopfbildern ermittelten Leitungsdaten sind mit ausreichender Genauigkeit berechnet worden. Die Generatorimpedanzen konnten durch Versuche verifiziert werden. Das Verhalten der statischen Umrichter wurde auf Grund von Trafotypentestmessungen und der Filterstruktur als Spannungsquelle modelliert. Durch Messungen wurde die Passivität dieser Spannungsquelle verifiziert. Das anregende Verhalten der Triebfahrzeugumrichter konnte durch entsprechende Typenmessungen [6] nachgewiesen und modelltechnisch umgesetzt werden. Prinzipiell sind gewisse Ungenauigkeiten (durch fehlende bzw. aus Erfahrung geschätzte Daten oder Vernachlässigungen) nicht zu vermeiden. In der Praxis aber ist die Auswirkung derartiger Ungenauigkeiten z.B. bei der Berechnung der Netzresonanzfrequenz nach der langjährigen Berufserfahrung der Gutachter marginal. Unabhängig davon gibt es bei den Ergebnissen alleine durch den aktuellen Netzschaltzustand oder den aktuellen Triebfahrzeugeinsatz eine gewisse Streuung der Ergebnisse. Richtigerweise wurde z.B. die Resonanzfrequenz als Funktion der Kabellänge in [1, Abb. 4] als Band (zur Charakterisierung des Streubereichs) und nicht als scharfe Kurve dargestellt.

Zur Plausibilisierung der Daten wurden seitens der Gutachter Kontrollrechnungen mit eigenständig erhobenen, öffentlich verfügbaren Daten [16, 17] durchgeführt. Die Ergebnisse liegen innerhalb des in [1, Abb. 4] angeführten Bandes.

Die Genauigkeit der Daten ist aus wissenschaftlicher Sicht ausreichend und plausibel.

3.2 Fragenblock 2 - Auswertung und Methodik

- a. **Ist die gewählte Methodik zielführend und geeignet, damit die Frage, ob ein Kabelausbau nach dem heutigen Stand von Netz und Triebfahrzeugpark möglich ist, beantwortet werden kann?**

Bei der ausgewählten Methodik wird klar das (allgemeine) technische Kriterium der elektro-magnetischen Kompatibilität herausgearbeitet. Um eine Beeinträchtigung der Funktionalität der Bahnstromversorgung sicher zu vermeiden, müssen sich Triebfahrzeuge im Frequenzbereich der Resonanzstelle passiv verhalten. Es gelten derzeit folgende Regelungen:

- Aufgrund der derzeit im Rahmen der Sicherungsanlagentechnik (Melde- und Signaltechnik) verwendeten 100-Hz-Gleisstromkreise müssen Triebfahrzeuge bei dieser Frequenz mit einer aktiven 100-Hz-Unterdrückung (Antiregelung) ausgestattet sein. Bei dem derzeitigen Stand der Technik kann also ein passives Verhalten nur im Frequenzbereich über 100 Hz gefordert werden [2].
- Damit muss gleichzeitig Sorge getragen werden, dass die Netzresonanzfrequenz, die durch Netzkapazität (insbesondere durch Gesamtlänge der 132-kV-Kabelstrecken), Kraftwerkseinsatz und Schaltzustand bestimmt werden, jedenfalls über 103 Hz (100 Hz + Sicherheitsabstand) liegt.

Die gewählte Methode ist geeignet, um die Frage der Grenzen des Kabelausbaus nach dem heutigen Stand von Netz, Triebfahrzeugpark und Sicherungstechnik zu beantworten.

- b. **Sind Netzausbau und Erneuerung durch SBB Infrastruktur Energie auf eine klare schweizweite Begrenzung des Kabelanteils angewiesen?**

Zur Aufrechterhaltung der Funktionalität der Bahnstromversorgung bei dem derzeitigen Triebfahrzeugpark und der derzeitigen Sicherungstechnik (Einsatz von 100-Hz-Gleisstromkreisen) ist eine Netzstruktur erforderlich, die keine Resonanzstellen unterhalb 103 Hz aufweist. Damit ergibt sich unter Berücksichtigung des realen Kraftwerkseinsatzes und realer Netzschtzustände eine eindeutige Begrenzung der Netzkapazität und damit indirekt der zulässigen 132-kV-Kabellänge.

Der sichere Netzbetrieb ist auf eine klare, schweizweite Begrenzung des Kabelanteils angewiesen.

c. Ist das Tool der SBB zur Bestimmung der Resonanzfrequenz bei gegebenen Triebfahrzeugen-Bedingungen und gegebenem Ausbaugrad geeignet?

Im Rahmen eines Lokaltermins bei den Schweizerischen Bundesbahnen SBB, Abteilung „Infrastruktur, Energie“, welcher am 4./5.7.2013 durchgeführt wurde, wurden das verwendete Programm den Gutachtern vorgeführt und die Berechnungsalgorithmen erläutert. Im Rahmen dieses Gesprächs wurden auch stichprobenartige Testrechnungen mit Vorgaben der Gutachter (z.B. Variation des Kraftwerkseinsatzes) durchgeführt und die Ergebnisse auf Plausibilität kontrolliert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die funktionellen Zusammenhänge gelegt, welche mit der bewährten Methodik verifiziert wurden, sensible Parameter gezielt zu ändern und dann die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich Qualität und Quantität der Auswirkung dieser Änderungen zu prüfen.

Das Tool bzw. die Berechnungsergebnisse wurden durch die Gutachter auf Plausibilität kontrolliert und als geeignet für Bestimmung der Resonanzfrequenz bei gegebenen Triebfahrzeugen-Bedingungen und gegebenem Ausbaugrad befunden.

d. Entspricht die Methodik dem Stand von Wissenschaft und Technik?

Hinsichtlich der Definitionen zum Begriff „Stand der Technik“ wird auf die folgende Definition verwiesen, die in der Norm EN 45 020 von 2006 Pkt. 1.4 gegeben wird:

„Entwickeltes Stadium der technischen Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, soweit Produkte, Prozesse und Dienstleistungen betroffen sind, basierend auf entsprechenden gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft, Technik und Erfahrung“.

Wenn man diese Kriterien an die seitens der Firma emkamatik angewendete Methodik anlegt, so sind die ausgeführten Berechnungen gemäß dem Stand der Technik erfolgt.

Die Methodik entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik.

e. Ist die Projektabgrenzung (SBB-Energienetz, umliegende/übrige Energienetze) korrekt?

Die Festlegung der Grenzen des zu modellierenden Netzes ist ein wesentlicher Faktor. Im vorliegenden Fall wurden richtigerweise die 66-kV-Netze der RhB mit ihren Netzkapazitäten an den Verknüpfungsstellen zu dem 132-kV-Netz der SBB berücksichtigt. Die 15-kV-Ebene der Bahnstromversorgung wurde aufgrund des vernachlässigbaren Beitrages zur Netzkapazität berechtigterweise weggelassen. Die drei Kuppelstellen zu dem österreichischen und deutschen Bahnstromnetz wurden bei den Untersuchungen aufgrund mangelnder bzw. nicht gesicherter Netzdaten in der Simulation in dem Zustand „geöffnet“ berücksichtigt. Dies entspricht wegen des damit wegfallenden Kurzschlussleistungsanteils einer betrieblich auftretenden Worst-Case-Annahme und ist im Sinne einer vorsichtigen Betrachtungsweise (schwaches Netz) gerechtfertigt. Die dabei ermittelte Resonanzfrequenz liegt damit tendenziell etwas niedriger als bei gekuppeltem Betrieb. Da die Ankupplung an die Nachbarnetze in allen drei Fällen über Kuppeltransformatoren erfolgt, kann nach Erfahrung der Gutachter davon ausgegangen werden, dass durch die verhältnismäßig hohe Transformatorimpedanz der Einfluss auf die Resonanzfrequenz bzw. die Kernaussagen der Studie nicht relevant ist. Umgekehrt wirken sich auch die Kabellängenveränderung im 110-kV-Netz der DB oder ÖBB nur marginal auf die Resonanzfrequenz im 132-kV-Netz der SBB aus.

Die Projektabgrenzung ist grundsätzlich korrekt, und die Vernachlässigung der Kuppelstellen nach Deutschland und Österreich ist im Sinne der technischen Genauigkeit vertretbar.

f. Wovon hängt die maximale Verkabelung zu einem bestimmten Zeitpunkt ab?

Die Netzresonanzfrequenz hängt von der Netzkapazität - insbesondere von der Gesamtlänge der 132-kV-Kabelstrecken, dem Kraftwerkseinsatz und dem Schaltzustand ab. Die aus dem realen Betrieb resultierenden Mindestkraftwerkseinsätze (Schwachlast) sowie die typischen Kraftwerkseinsätze werden sich vermutlich in den nächsten Jahren nicht wesentlich verändern. Damit bleibt als wesentlicher Einflussfaktor die zulässige Resonanzfrequenz.

- Istzustand: Der Einsatz von 100-Hz-Gleisstromkreisen bedingt eine aktive Antiregelung bei 100 Hz bei Triebfahrzeugen, womit sich die Forderung nach einer Mindest-Netzresonanzfrequenz von 103 Hz ergibt. Entsprechend

Abbildung 4 in [1] gibt es damit derzeit keinen Spielraum für Verkabelungen auf der 132-kV-Spannungsebene.

- Vorschau: Die Umrüstung auf 106,7-Hz-Gleisstromkreise ist geplant und teilweise im Gange. Da bei 106,7 Hz keine nennenswerte Emission von den Triebfahrzeugumrichtern zu erwarten ist, fällt die aktive Antiregelung langfristig weg. Eine neue Grenze ergibt sich dann bei 87 Hz (5. Oberschwingung + Sicherheitsabstand). Sobald alle Triebfahrzeuge umgerüstet sind (passives Verhalten über 87 Hz), wobei hier neben den Schweizer Triebfahrzeugen im Sinne der (internationalen) Interoperabilitätsbedingungen auch ausländische Triebfahrzeuge zu beachten sind, ist eine Absenkung der für einen stabilen Netzbetrieb zulässigen Netzresonanzfrequenz auf 87 Hz möglich. Damit wird ein Spielraum von ca. 100 km Kabel ermöglicht. Hier empfiehlt sich eine schweizweite Betrachtung zur Handhabung möglicher Kabelabschnitte, welche die Dringlichkeit der Übertragungsleitungsprojekte sowie die Entwicklung der Fahrzeuganpassungen berücksichtigt.

Die maximale Verkabelung hängt bei betrieblich vorgegebenem Kraftwerkseinsatz und Schaltzustand von der für stabilen Netzbetrieb geforderten Mindestresonanzfrequenz bzw. der Interoperabilität aller in diesem Netz fahrenden Schienenfahrzeuge ab.

g. Ist die angewendete Auswertungsmethodik geeignet, um Aussagen zur technischen Richtigkeit zu machen?

Zur Bewertung der technischen Richtigkeit sind die Fragen der Fragenblöcke 1-4 in ihrer Gesamtheit genügend.

Die vorgenannten Punkte gestatten eine Aussage hinsichtlich der technischen Richtigkeit.

h. Sind die Sensitivitäten/Einflussgrößen/technischen Handlungsspielräume richtig erkannt und berücksichtigt worden?

Wie bereits erwähnt, hängt die Netzresonanzfrequenz von der Netzkapazität - insbesondere von der Gesamtlänge der 132-kV-Kabelstrecken, dem Kraftwerkseinsatz und dem Schaltzustand ab.

Im Rahmen der Untersuchungen in [1] wurde der Kraftwerkseinsatz variiert und verschiedenen Schaltzustände, auch mit Netztrennungen, untersucht. Der Einfluss dieser Variationen spiegelt sich unter anderem in der breiten, diffusen Resonanzfrequenzkennlinie in [1, Abb.4] wider. Stichprobenartige Kontrollrechnungen mit Extrem-Eingangsparametern, die auf Betreiben der Gutachter im Rahmen eines Lokaltermins bei den Schweizerischen Bundesbahnen SBB, Abteilung „Infrastruktur, Energie“ durchgeführt wurden, liefern richtigerweise Ergebnisse in den Randbereichen der erwähnten Resonanzfrequenzkennlinie.

Was den Handlungsspielraum betrifft, kann auf die in Abschnitt 2.2.f beschriebene langfristige Umrüstung der Triebfahrzeuge nach erfolgter Adaptierung der Gleisstromkreise verwiesen werden. Zusätzlich kann (temporär), aber nur lokal und für einen eingeschränkten Frequenzbereich wirksam, über passive Dämpfungsglieder Abhilfe geschaffen werden. Dies führt jedoch zu zusätzlichen Netzverlusten und bei großflächigem Einsatz zu einer kontraproduktiven Absenkung der Resonanzfrequenz und damit zu einer Destabilisierung des Netzes.

Die Sensitivitäten und Einflussgrößen sowie die technischen Handlungsspielräume sind richtig erkannt und bei der Analyse berücksichtigt worden.

3.3 Fragenblock 3 - Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse durch die SBB

a. Ist der SBB-Bericht „Resonanzproblematik_Bericht_BAV_V10“ technisch korrekt und nachvollziehbar?

Der SBB-Bericht „Resonanzproblematik_Bericht_BAV_V10“ ist technisch korrekt und für den versierten Leser nachvollziehbar.

b. Stellt die im Bericht als Grenze dargestellte Frequenz von 87 Hz eine nach heutigem Stand der Technik absolute untere Grenze dar, für ein stabil zu betreibendes Bahnstromversorgungsnetz in der Schweiz?

Die Grenze von 87 Hz ergibt sich aus der in Netzen immer wieder auftretenden 5. Oberschwingung (entspricht 83,5 Hz). Hier existiert durch

- thyristorgesteuerte Triebfahrzeuge und
- Sättigungseffekte bei Transformatoren (Unterwerk, Triebfahrzeug)

eine permanente Anregung. Eine Änderung dieser Situation in Zukunft – insbesondere bei den Lebensdauern der eingesetzten Triebfahrzeuge - ist nicht zu erwarten. Damit sind Netzresonanzfrequenzen in diesem Bereich jedenfalls zu vermeiden. Speziell bei Schaltungen im Zuge von Netzwiederaufbau kann es (fallweise) durch Sättigung der UW-Transformatoren und gleichzeitiger Netzresonanz bei der 5. Oberschwingung (Inselbildung, s.o.) zu Instabilitäten kommen und wurden bei Versuchen mit dem Löttschbergkabel auch real beobachtet.

Die Grenze von 87 Hz, abgeleitet aus der oft dominant auftretenden 5. Oberschwingung, ist aus heutiger Sicht plausibel.

c. Mit welchen Massnahmen und welcher Wahrscheinlichkeit / in welchem Zeitraum kann diese Grenze (87 Hz) in Zukunft weiter nach unten verschoben werden?

Unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Fuhrparks, der Lebensdauer von Triebfahrzeugen und der laufenden Entwicklungen ist in den nächsten Jahrzehnten nicht mit einer Verschiebung der Grenze nach unten zu rechnen.

3.4 Fragenblock 4 - Zusatzfragen

a. Lässt sich eine aktive Dämpfung der aufgezeigten, kritischen Resonanzen auch mit (am Markt befindlichen, ggf. weiterzuentwickelnden) Frequenzumrichtern erreichen?

Prinzipiell ist eine aktive Dämpfung durch zentrale, statische Umrichteranlagen möglich („Aktive Filter“). Derzeit beschränkt sich jedoch die Anwendung auf Fälle mit konstanter Netzresonanzfrequenz. Bei variabler Resonanzfrequenz, wie dies im SBB-Netz aufgrund des variablen Kraftwerkseinsatzes der Fall ist, gibt es nach heutigem Stand der Technik noch keine Lösung für das Resonanzproblem.

Dezentrale kleine geregelte Dämpfungselemente (geregelte Eingangsstufen von Hilfsantrieben) könnten theoretisch als Nischenprodukt als Ersatz für passive Dämpfungsglieder für lokale Anwendung gesehen werden, sind aber nicht am Markt erhältlich.

Eine aktive Bedämpfung der aufgezeigten, kritischen Resonanzen lässt sich mit derzeit am Markt befindlichen Frequenzumrichtern wegen der variablen Resonanzfrequenz nicht erreichen. Langfristig ist aber bei entsprechender technischer Weiterentwicklung Potenzial gegeben.

- b. **Wie wirken sich der geografische Ort einer Kabelstrecke (zB 132-kV-UL) und der Ort einer Bedämpfung (zB Generator) und der Ort der Anregung (zB Lokomotive mit Antiregelung) auf die Resonanzfrequenz des gesamten Energienetzes aus?**

Für das gesamte Netz im Verbundbetrieb spielen der Einbauort der Kabel oder Dämpfungselemente sowie der Ort der Anregung grundsätzlich eine untergeordnete Rolle in Bezug auf Resonanzfrequenz und Dämpfung. Bei Berücksichtigung der Möglichkeit der (gewollten oder ungewollten) Inselbildung muss die Installation von Dämpfungselementen mit dem Triebfahrzeug-Einsatz und dem lokalen Kabelanteil koordiniert werden, wodurch sich gegebenenfalls regionale Einschränkungen für den Triebfahrzeugeinsatz ergeben. Derzeitige passive Dämpfungselemente sind beispielsweise für den Triebfahrzeugtyp Re 460 „maßgeschneidert“.

Die Installation von lokal wirkenden Dämpfungselementen muss mit dem Triebfahrzeug-Einsatz und dem lokalen Kabelanteil koordiniert werden.

- c. **Welche weiteren technischen Lösungsmöglichkeiten (zB HGÜ-Lösungen u.a.m) könnten in längerfristiger Zukunft zur Lösung der Resonanzproblematik im CH-Bahn-Energienetz in Betracht gezogen werden? (Vorteile, Nachteile)**

Die **Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)** gestattet es grundsätzlich, unabhängig von den Einschränkungen der frequenzbedingten Interaktionen der Leitungselemente (Induktivitäten, Kapazitäten) mit schnellen Regelkreisen der Verbraucher elektrischer Leistung bzw. Energie zu übertragen. Im großtechnischen Maßstab sind bereits HGÜ-Lösungen in der Höchstspannungsebene erfolgreich implementiert und im Betrieb. Ein großmaßstäbiger Einsatz von HGÜ-Übertragungen

in der Hochspannungsebene (132 kV) oder Mittelspannungsebene (20 kV) ist allerdings heute noch nicht Stand der Technik.

Vorteil der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ): Trennung der Kabel von dem Wechselstromnetz, daher kein Einfluss auf Netzresonanzfrequenz

Nachteil der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ): Deutlich höhere Kosten im Vergleich zu Wechselstromlösungen, nur Gesamtlösungen, keine Teilverkabelungen sinnvoll; Multi-Terminal-Lösungen (vermaschter Betrieb) sind mit VSC-Technologie prinzipiell möglich, es fehlen allerdings Betriebserfahrungen da diese Lösungen heute noch nirgends eingesetzt werden.

Der Einsatz von Kabeln oder kabelähnlichen Leitungen mit einem geringeren Kapazitätsbelag ermöglicht eine Erhöhung der Kabelreserve in einem begrenzten Ausmaß. Als Beispiel wären Kabel mit einer höheren Nennspannung sowie gasisolierte Leitungen (GIL) zu nennen. Die GIL stellt im Vergleich zu Freileitungen und Kabeln die teuerste Variante der Energieübertragung dar und wird deshalb heute und mutmaßlich in den nächsten Jahren nur für extreme Sonderfälle eingesetzt. Erfahrungen mit dieser Technologie existieren derzeit nur für kurze Distanzen z.B. bei Ausleitung aus Kavernenkraftwerken, Auskreuzen von Freileitungen und Energieübertragung auf engstem Raum im Bereich vor Flughäfen, jeweils mit Trassenlänge unter 1 km.

Der Vorteil liegt in der reduzierten Kapazität, die bei gleicher Kabel/GIL-Länge zu einer entsprechend höheren Resonanzfrequenz führt bzw. bei gleicher Resonanzfrequenz zu einer erhöhten möglichen Kabellänge.

Als Nachteil erweist sich, dass die Kapazitätsverringering bei Kabeln mit höherer Nennspannung nur marginal ausfällt und damit der Gewinn an möglicher Kabellänge äußerst begrenzt ist. Bei GIL fällt die Kapazitätsreduktion deutlicher aus, allerdings ist das als Isoliergas verwendete SF₆ aus ökologischer Sicht höchst umstritten, da es das stärkste Treibhausgaspotenzial von allen Gasen hat. Zudem sind GIL über größere Distanzen unerprobt.

d. Empfehlung zum Umgang mit der Thematik

Die angefragten Empfehlungen ergeben sich aus der Synopsis der Fragenblöcke 1-3 und der Zusatzfragen.

4 Befund

Aufgrund des Schreibens, der übergebenen Unterlagen, eigener Berechnungen, des Lokaltermins und der darauf folgenden Aufarbeitung der erhobenen Fakten wird folgendes festgehalten:

- Es wurden die korrekten technischen und wissenschaftlichen Überlegungen angestellt.
- Die zur Nachbildung der beobachteten Netzinstabilitäten erforderlichen Daten wurden in ausreichendem Umfang erhoben und für in den Simulationsmodellen korrekt implementiert.
- Die Genauigkeit der Daten ist aus wissenschaftlicher Sicht ausreichend und plausibel.
- Die gewählte Methode ist geeignet, um die Frage der Grenzen des Kabelausbaus nach dem heutigen Stand von Netz, Triebfahrzeugpark und Sicherungstechnik zu beantworten.
- Der sichere Netzbetrieb ist auf eine klare, schweizweite Begrenzung des Kabelanteils angewiesen.
- Das Tool bzw. die Berechnungsergebnisse wurden durch die Gutachter auf Plausibilität kontrolliert und als geeignet für Bestimmung der Resonanzfrequenz bei gegebenen Triebfahrzeugen-Bedingungen und gegebenem Ausbaugrad befunden.
- Die Methodik entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik.
- Die Projektabgrenzung ist grundsätzlich korrekt, und die Vernachlässigung der Kuppelstellen nach Deutschland und Österreich ist im Sinne der technischen Genauigkeit vertretbar.
- Die maximale Verkabelung hängt bei betrieblich vorgegebenem Kraftwerkseinsatz und Schaltzustand von der für stabilen Netzbetrieb geforderten Mindestresonanzfrequenz bzw. der Interoperabilität aller in diesem Netz fahrenden Schienenfahrzeuge ab.
- Die vorgenannten Punkte gestatten eine Aussage hinsichtlich der technischen Richtigkeit.
- Die Sensitivitäten und Einflussgrößen sowie die technischen Handlungsspielräume sind richtig erkannt und bei der Analyse berücksichtigt worden.
- Der SBB-Bericht „Resonanzproblematik_Bericht_BAV_V10“ ist technisch korrekt und für den versierten Leser nachvollziehbar.
- Die Grenze von 87 Hz, abgeleitet aus der oft dominant auftretenden 5. Oberschwingung, ist aus heutiger Sicht plausibel.

- Unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Fuhrparks, der Lebensdauer von Triebfahrzeugen und der laufenden Entwicklungen ist in den nächsten Jahrzehnten nicht mit einer Verschiebung der Grenze unter 87 Hz zu rechnen.

Graz, den 5.Dezember 2013



Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert



Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner



Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Anlagen
Inffeldgasse 18/I, 8010 Graz, Austria
T: +43(0)316/873-7551
jasmine.kadhim@tugraz.at
► www.lfea.tugraz.at