

Resonanzproblematik im SBB Energienetz

Autor(en)	Martin Aeberhard, René Vollenwyder, Christine Haag, Benedikt Aeberhardt
Status	Freigegeben
Letzte Änderung	24. September 2012
Letzte Änderung durch	Vollenwyder René (I-ET-EN-ETW-SDE)
Bericht Nummer	SD_12_010 – BAV, V10
Urheberrecht	Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche kommerzielle Nutzung bedarf einer vorgängigen, ausdrücklichen Genehmigung.
Ablage	K:\Dept\G\D.S8315\Vollenwyder\100 Resonanzbericht\010_Aktuelle_Version\Resonanzproblematik_Bericht_BAV_V10.docx

Änderungen:

Version	Datum	Änderung	Name	Geprüft	Freigegeben
V10	24.09.12	<ul style="list-style-type: none"> - Bereinigung Investitionskosten (Kap. 13.1) - Aktualisierung Stand der Verkabelung auf Juli 2012 (Kap. 6.1/6.2) - Kapitel 5 Aufteilung in mittelfristig / langfristig - Aktualisierung der Grafik „Netzresonanz“. Inkl RhB. - Management Summary überarbeitet - Anhang Überarbeitet - Rechtschreibkorrekturen 	VR	AeM,CH,AB	D. Koch
V09	10.04.12	- Initialversion	VR,AeM, CH,AB	AeM, CH, TS,VR	J.Bisaz

Inhaltsverzeichnis

Management Summary	5
1. Einleitung	7
2. Abgrenzung	7
3. Problematik der Netzresonanzen	7
4. Geschichtliche Entwicklung	10
4.1. Schweiz, Normalspurnetz 16.7 Hz	10
4.2. Andere Bahnstromnetze	13
4.2.1. Rhätische Bahn (RhB), Stammnetz	13
4.2.2. Matterhorn Gotthard Bahn (MGB)	14
4.2.3. Österreichische Bundesbahnen (ÖBB)	14
4.2.4. Deutsche Bahn (DB)	14
4.2.5. Trafikverket (Schweden)	15
4.2.6. Bahnstromversorgung mit 50 Hz	15
4.3. Andere Energieversorgungsnetze	15
5. Entwicklung der Resonanzfrequenz im Bahnstromnetz der SBB	17
5.1. Aktuelle und mittelfristige Grenzen	17
5.2. Langfristige Grenzen	18
6. Stand der Verkabelung Ist / Planung	20
6.1. Bestehende Kabelabschnitte	20
6.2. Geplante Kabelabschnitte bis 2025	21
6.3. Kabel im RhB Netz	22
7. Grenzen der zulässigen Resonanzfrequenz	23
8. Technische Möglichkeiten / Massnahmen	25
8.1. Eliminieren/ Vermeiden von anregenden Elementen	25
8.1.1. Neuzulassungen von Fahrzeugen	25
8.1.2. Bereits zugelassene Fahrzeuge	25
8.2. Optimierung Netzstruktur	25
8.2.1. Anpassen der Leitungsführung	25
8.2.2. Einsetzen von Kabeln einer höheren Spannungsebene (dickere Isolation)	25
8.3. Generatoren als dämpfende Elemente einsetzen	27
8.4. Passive Dämpfung	29
9. Alternativen zu Kabeln	30
9.1. Hochspannungs Gleichstromübertragung (HGÜ)	30
9.2. Frequenzumformer (FU)	30
10. Ausblick	32
11. Literaturverzeichnis	33

11.1.	Publikationen	33
12.	Technische Zusammenfassung	34
13.	Anhang	35
13.1.	Investitionskosten	35
13.2.	Energieverluste	36
13.3.	Eigenschaften von Kabelsiphons	37
13.3.1.	Beschädigung Simplonkabel durch Bauarbeiten Dritter 2012	38
13.3.2.	Brand Simplontunnel 2011	38
13.3.3.	Zugentgleisung Simplon 2006	38
13.3.4.	Materialdefekt bei Verkabelung Seebach-Zürich	38
13.3.5.	Schadenfall Kerenzerberg-Tunnel	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzip der Parallelschaltung der Admittanzen von Netz und Triebfahrzeugen, Rückkopplungseffekt	8
Abbildung 2:	Instabilität bei Versuchen mit Re 460 ohne Dämpfungsglieder	11
Abbildung 3:	Vier passive RLC-Dämpfungsglieder im UW Gampel	12
Abbildung 4:	Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Kabelausbaus (aktuell / mittelfristig)	17
Abbildung 5:	Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Kabelausbaus (langfristig)	19

Management Summary

Elektrische Triebfahrzeuge interagieren mit der Bahnstromversorgung. Kommt es zu Anregungen bei Resonanzfrequenz, bewirkt dies ein Aufschwingen des Bahnstromnetzes (Resonanz) und führt bei geringer Dämpfung zu Überspannungen. Im besten Fall entsteht dank rechtzeitigen Schutzabschaltungen „nur“ eine grossflächige Betriebsstörung. Folgen können aber auch Schäden an elektrischen Teilen der Triebfahrzeuge und der Infrastruktur sein.

Ob problematische Resonanzen auftreten oder nicht, ist von vielen Faktoren abhängig, im Wesentlichen von der Anzahl Fahrzeuge, dem Aufenthaltsort der Fahrzeuge, dem Fahrzeugtyp, dem Schaltzustand und dem Verkabelungsanteil des Bahnstromnetzes sowie den momentan eingesetzten Kraftwerken. Es muss gewährleistet sein, dass für jeden möglichen Zustand keine schädigenden Resonanzen auftreten können. Dabei gilt: Je höher der Kabelanteil im Hochspannungsnetz, desto tiefer sinkt die Resonanzfrequenz – und tiefere Resonanzfrequenzen sind generell kritischer.

Grenze der Verkabelung im Bahnstromnetz

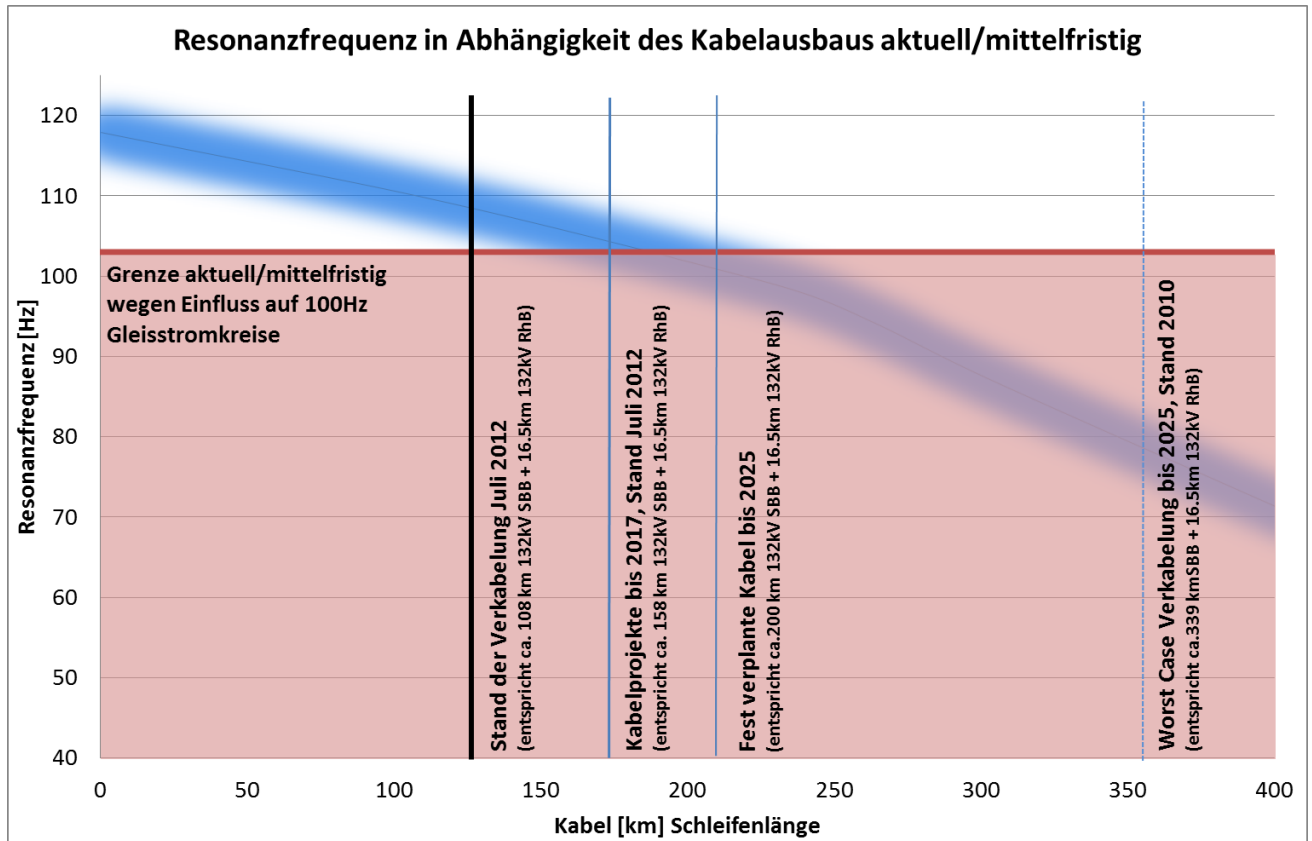
Durch gezielte Massnahmen konnte die SBB den Kabelanteil ihres Übertragungsnetzes deutlich stärker erhöhen als die anderen grossen 16.7-Hz-Bahnstromnetzbetreiber in Europa oder die Übertragungsnetzbetreiber im 50-Hz-Netz.

Mitte der 1990er-Jahre traten jedoch die ersten Resonanzprobleme auf – mit massiven Störungen im Bahnbetrieb: es kam zum gleichzeitigen Ausschalten von Loks in ganzen Regionen und später sogar der ganzen Schweiz. Durch entsprechende Massnahmen konnte das Problem zwar eingegrenzt werden, das Risiko erneuter Resonanzprobleme steigt jedoch mit der zunehmenden Verkabelung im Bahnstromnetz wieder an. Bei ungünstigen Zuständen liegt die Resonanzfrequenz derzeit um 110 Hz. Sie muss heute aufgrund gewisser Sicherungselemente (100 Hz-Gleisstromkreise) zwingend oberhalb der schweizweit festgesetzten Grenze von 103 Hz bleiben.

Entwicklung der Verkabelung und der Resonanzproblematik

In der folgenden Abbildung ist der Zusammenhang zwischen Kabellängen im Bahnstromnetz und der Resonanzfrequenz dargestellt (miteingerechnet und ausgewiesen wurden die Kabel im RhB-Netz, welche aufgrund der Verbindung beider Netze mitwirkt). Die blaue Linie zeigt den Verlauf der Netzresonanzfrequenz. Sie kann sich je nach Schaltzustand des Netzes nach oben oder unten verschieben. Die Breite der Kurve zeigt die Streuung der Randbedingungen für den Normalbetrieb.

Aus der Kurve geht hervor, dass nach Inbetriebnahme der heute bereits fest eingeplanten Kabeln (zum Grossteil bereits im Plangenehmigungsverfahren oder im Bau) die heute gültige Grenze von 103 Hz bei ungünstigen, aber real vorkommenden Zuständen bereits unterschritten wird (rote Linie).



Die heute gültige 103Hz Grenze kann langfristig (20-30 Jahre) auf 87Hz gesenkt werden. Dieser aufwändige und langwierige Prozess zur Senkung der Grenze muss angegangen werden. Es handelt sich dabei um ein Thema mit einer europäischen, verkehrspolitischen Dimension (sämtliche Stromrichter-Fahrzeuge, inkl. dem grenzüberschreitenden Verkehr, müssen angepasst werden), dessen terminliche und finanzielle Umsetzung noch völlig offen ist.

Die Grenze von 87Hz hingegen stellt die nach heutigem Stand der Technik absolute Grenze dar, unterhalb derer sich das Bahnstromnetz nicht mehr stabil betreiben lässt. Im Bereich unterhalb dieser Frequenz ist die Dämpfung im Bahnstromnetz aus physikalischen Gründen so gering, dass Resonanzen nur sehr langsam abklingen.

Auch in Zukunft arbeiten die SBB in internationalen Gremien und mit Technischen Hochschulen und der Industrie daran, weitergehende technische Lösungen für das Resonanzproblem zu finden und sich so einen grösseren Handlungsspielraum für Verkabelung zu schaffen. Solange diese Lösungen nicht absehbar und umsetzbar sind, ist die Bahnstromversorgung in der Schweiz auf eine klare Begrenzung des Kabelanteils angewiesen.

Deshalb ist eine schweizweite Sichtweise im Umgang mit Verkabelungsforderungen im Bahnstromnetz zwingend.

1. Einleitung

Mitte der 1990er-Jahre sind im SBB Bahnstromnetz erstmals Probleme mit Resonanzanregung durch Reglerückkopplung der Triebfahrzeuge aufgetreten. So kam es beispielsweise im April 1995 bei der S-Bahn Zürich zum Betriebsausfall durch simultane Abschaltung der Loks Re 450. Im September 1995 kam es schweizweit, zur simultanen Abschaltung von Loks der Typen Re 450 und Re 460 [15].

Seither wurden diverse Anstrengungen unternommen um diese Phänomene besser zu verstehen und zu beherrschen (vgl. Abschnitt 4 sowie [1]).

Dieser Bericht soll eine Zusammenfassung der in den letzten Jahren erarbeiteten Grundlagen und Lösungsansätze darstellen. Er richtet sich in erster Linie an technische Fachspezialisten für Energienetze. Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten sind im Literaturverzeichnis aufgelistet.

2. Abgrenzung

Bei jedem Vergleich von Kabel- und Freileitungsverbindungen sind neben den im vorliegenden Bericht dargestellten Auswirkungen auf das Resonanzverhalten auch Aspekte der Verfügbarkeit sowie die Lebenszykluskosten zu berücksichtigen. Im Folgenden werden diese Aspekte ausgeklammert. Der Vollständigkeit halber sind lediglich im Anhang Erfahrungswerte und Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Ausbau und dem Betrieb von Kabelverbindungen und Freileitungen im Bahnstromnetz aufgeführt, namentlich

- Vergleich von ausgewiesenen Investitionskosten (als einmalige Kosten) und Energieverlusten (als jährliche Kosten) bei Kabel- und Freileitungen
- Eigenschaften von Kabelsiphons
- Aufgetretene Ausfallzeiten von Kabelverbindungen

3. Problematik der Netzresonanzen

Systeme für die elektrische Energieversorgung weisen wegen ihrer in den Übertragungs- und Fahrleitungsanlagen verteilten Kapazitäten und den in den Transformatoren und insbesondere in Generatoren konzentrierten Induktivitäten, ein oft unerwünschtes Resonanzverhalten auf. Wie weiter unten gezeigt wird, hat vor allem die Leiter-Erde-Kapazität der Hochspannungskabel, d.h. die Kapazität zwischen Kabelschirm und Kabelleiter, einen grossen und ungünstigen Einfluss.

In den meisten Fällen ist es die tiefste Resonanzfrequenz, die kritisch ist. Von einem Triebfahrzeug aus gesehen verhält sich das Energieversorgungssystem bei dieser Frequenz wie ein Parallelschwingkreis. Grundsätzlich gilt:

- Je höher die Kapazität, also der Kabelanteil, umso tiefer liegt die tiefste Resonanzfrequenz. Dabei ist zu bedenken, dass heute im ca. 2'600km langen 132kV Netz¹ (Schleifen-km) der

¹ Weitere ca. 450 km (Schleifenlänge) werden auf der Spannungsebene 66kV betrieben.

SBB die Kabelstrecken einen Anteil von bereits 3.5 % (ca. 90km auf Spannungsebene 132kV) der gesamten Stromkreislängen aufweisen, dabei aber über 50% der elektrischen Kapazität des Leitungsnetzes betragen.

- Tiefe Resonanzfrequenzen sind im Allgemeinen schwach gedämpft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass insbesondere der dämpfende Einfluss der Eisenverluste und der Wirbelstromverluste in den Kupferleitern der elektrischen Maschinen von der Frequenz abhängig ist (Siehe auch Kapitel 8.3).
- Der nachstehend beschriebene Effekt des aktiven Verhaltens von einigen Triebfahrzeugtypen ist bei Frequenzen unterhalb von 200Hz besonders ausgeprägt.

Bei Triebfahrzeugen mit Vierquadrantensteller (4QS - die heute übliche Technik) als Eingangsglied werden Regelungsverfahren angewandt, welche zum Ziel haben, dem Netz einen möglichst sinusförmigen Strom zu entnehmen. Um dieses Ziel zu erreichen, versucht der 4QS bei verzerrter Netzspannung, diese Verzerrung in der Stromrichterspannung möglichst genau nachzubilden. Erfolgt dieser Vorgang unverzögert, ist der Strom verzerrungsfrei. In Wirklichkeit kann die Regelung jedoch nicht beliebig schnell auf solche Netzverzerrungen reagieren. Verzögerungen und Totzeiten in den digitalen Reglern bewirken eine Phasenverschiebung zwischen der Spannungskomponente im Netz und derjenigen Spannung, mit welcher der Stromrichter darauf reagiert.

Am kritischsten ist eine Phasenverschiebung zwischen der Spannungskomponente im Netz und der Stromrichterspannung um 180° . Diese verursacht eine maximale Stromkomponente mit derselben Frequenz. Das Fahrzeug verhält sich dann wie ein negativer Widerstand, weil die erzeugte Stromkomponente in der Amplitude proportional zur anregenden Spannung, aber um 180° phasenverschoben ist. Dieses so genannte aktive Verhalten tritt dann auf, wenn der Phasenwinkel der Eingangsadmittanz des Triebfahrzeuges grösser als 90° oder kleiner als -90° ist. Vor allem Triebfahrzeuge mit 4QS und digitaler Regelung der ersten Generation zeigen bei Frequenzen unter 200Hz oft ein aktives Verhalten (siehe dazu auch Kapitel 8.1).

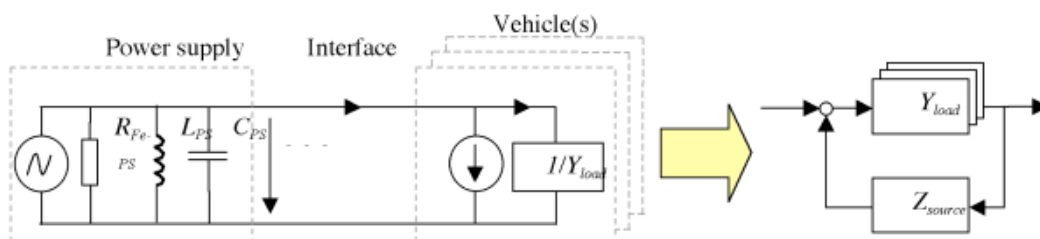


Abbildung 1: Prinzip der Parallelschaltung der Admittanzen von Netz und Triebfahrzeugen, Rückkopplungseffekt

Verkehrt nun ein Triebfahrzeug, welches bei einer bestimmten Frequenz f aktiv ist, in einem Netz mit der gleichen Resonanzfrequenz f und ungenügender Dämpfung, kommt es zu einer Instabilität. Das Fahrzeug reagiert auf jede noch so kleine Spannungskomponente der Frequenz f mit einer Stromkomponente der Frequenz f , welche wiederum wegen der resonanzbedingt sehr hohen Netzimpedanz zu einer noch höheren Spannung mit der Frequenz f führt. Solange sich das System linear verhält, steigt die Spannung wegen dieses Vorgangs unbegrenzt weiter an. Begrenzend wirkt erst ein nichtlineares Verhalten, wie zum Beispiel Schutzabschaltungen, Ansprechen von Überspannungsableitern oder unkontrollierte Überschläge. Bestenfalls können Schäden verhindert werden. In jedem Fall sind aber grossflächige Betriebsstörungen die Folge.

4. Geschichtliche Entwicklung

4.1. Schweiz, Normalspurnetz 16.7 Hz

In der Schweiz haben sich die in Abschnitt 3 beschriebenen Phänomene erstmals in den 1990er-Jahren bemerkbar gemacht. Auslöser war der rasch zunehmende Einsatz grosser Stückzahlen der damals neuen Umrichterlokomotiven Re 450 und Re 460². Die Phänomene manifestierten sich in Form von gleichzeitigen Schutzabschaltungen dieser Loktypen in weiten Teilen des Netzes. Sie führten zu grossen Betriebsstörungen und Zugverspätungen. Weil damals in keinem anderen Land Erfahrungen mit diesen Phänomenen vorlagen, musste die Grundlagen zum Verstehen und Beherrschen des Problems zuerst erarbeitet werden. Wichtige Grundlagenarbeit dazu wurde u.a. im Projekt ESCARV [2] geleistet. Wichtige Erkenntnisse aus diesen Arbeiten flossen in das Programm SAVO-Tool³ der Firma emkamatik ein. Zudem wurden Messmethoden entwickelt, welche über Zwischenschritte schlussendlich zum in [7] beschriebenen Verfahren führten. Der weitere Verlauf der Analysen und Massnahmen bis heute ist durch die folgenden Meilensteine gekennzeichnet:

- 1) 1990er-Jahre: Optimierung der Reglersoftware und der Totzeiten in den Regelkreisen der Netzstromrichter der Lokomotiven soweit, dass die Kompatibilität mit dem damaligen Netzzustand (insbesondere dem Stand der Verkabelung, also ohne Kabel im Lötschberg-Basistunnel (LBT)) erreicht wurde.
- 2) Ab 2002: Systematische Analysen und Prognose der Resonanzprobleme mit der geplanten Inbetriebnahme des LBT. Wichtig in diesem Zusammenhang: Das 132-kV-Kabel Mitholz-Gampel im LBT hat zwar den grössten Einfluss auf das Resonanzverhalten des Netzes. Im Bereich des LBT befinden sich aber auch derart umfangreiche 15-kV-Kabelanlagen, dass gewisse extreme Inselnetz-Konfigurationen auch ohne das 132-kV-Kabel bereits instabil werden können.
- 3) Ab 2006: Systematische Versuche im LBT [8] und mit der statischen Frequenzumformer-Anlage Wimmis [6]. Vergleiche zwischen Messungen und Berechnungen, mit in der Regel guter Übereinstimmung bzw. erklärbaren Abweichungen.
- 4) 2007: Formulierung der Anforderungen an den Frequenzgang der Eingangsadmittanz der Triebfahrzeuge (zunächst SBB EN-Dokument 47.10.001, später Aufnahme in das Regelwerk der SBB, I-20005 [1]). Die Anforderungen werden auch im Network Statement der SBB aufgenommen und sind seit der Ausgabe 2010 darin verankert. Der Nachweis der Einhaltung dieser Anforderungen muss erbracht werden für alle Triebfahrzeuge, die neu auf dem Netz der

² Vor dem Erscheinen dieser Serien waren die Ee 6/6 II die einzigen Lokomotiven der SBB mit Vierquadrantensteller. Von diesen waren allerdings nur zehn Stück vorhanden, und - wie sich später herausstellte - war deren weitgehend analoge Stromrichterregelung auch viel weniger von den im Abschnitt 3 beschriebenen Totzeit-Problemen betroffen.

Einige KTUs setzten ebenfalls schon vor 1990 Lokomotiven Re 456 ein, deren Antriebsstrang praktisch identisch ist mit demjenigen der SBB Re 450. Die Re 456 können ebenfalls Netzresonanzen anregen. Die Anzahl dieser Loks ist aber offenbar genügend klein, so dass sich damals noch keine Probleme manifestiert haben.

³ SAVO-Tool ist ein Programm zur Stabilitäts- und Admittanz-Vorhersage.

SBB oder auf einem durch SBB Energie mit Bahnstrom versorgten anderen Netz zugelassen werden sollen.

- 5) 2007: Systematische Messung des Frequenzganges der Eingangsadmittanz an allen zu diesem Zeitpunkt in der Schweiz zugelassenen Triebfahrzeugen (sofern nicht bereits früher gemessen) [7]. Es zeigte sich, dass neben den bereits erwähnten Re 450 und Re 460 nur Fahrzeuge mit aktiver Aufschaltung ganzzahliger Harmonischer (ETR 470 und in Österreich zugelassene Fahrzeuge mit Aufschaltung der 7. Harmonischen) bei Frequenzen oberhalb von 103 Hz aktiv sind, alle anderen Fahrzeuge waren für Netzresonanzen über 103 Hz unproblematisch.
- 6) 2007: Als Massnahme zur Verbesserung des Frequenzganges der Lok Re 460 werden Versuche unternommen mit einem speziell dafür konzipierten Sperrfilter im Spannungsmesskreis der Netzstromrichter. Die gewünschte Wirkung kann nachgewiesen werden, allerdings ist das Produkt nicht serienreif, und es wird beschlossen, vor einem Entscheid zur allfälligen Weiterentwicklung aus Kostengründen die Ergebnisse der Versuche mit infrastrukturseitigen passiven Dämpfungsgliedern abzuwarten.
- 7) Ab 2007: Messung des Frequenzganges der Eingangsadmittanz auf allen neu zuzulassenden Triebfahrzeugen im Rahmen der Typentests. Es zeigt sich gelegentlich, dass die Anforderungen nicht auf Anhieb erfüllt werden und Nacharbeiten (an der Regelsoftware der Netzstromrichter) notwendig sind.
- 8) Ab 2008: Provisorische Inbetriebnahme des 132-kV-Kabels im LBT mit speziellen, sehr restriktiven Vorschriften zum Generatoreinsatz. Das Kabel ist normalerweise ausgeschaltet, kann aber bei Bedarf (aber in erster Linie nur bei planmässigen Unterbrüchen) unter Einhaltung dieser Vorschriften eingeschaltet werden.
- 9) 2008: Versuche mit einem passiven Dämpfungsglied im UW Gampel zeigen, dass damit auch Netzschaltungen, welche sonst zusammen mit Re 460 instabil sind (vgl. Abbildung 2), stabil betrieben werden können. Aufgrund der positiven Ergebnisse dieses Versuches und grundsätzlicher Erwägungen wird beschlossen, das Resonanzproblem im Zusammenhang mit dem LBT-Kabel mit diesem Ansatz zu lösen und auf die Installation von Sperrfiltern auf allen Re 460 (und eventuell Re 450) wie oben beschrieben, zu verzichten (siehe 6)).

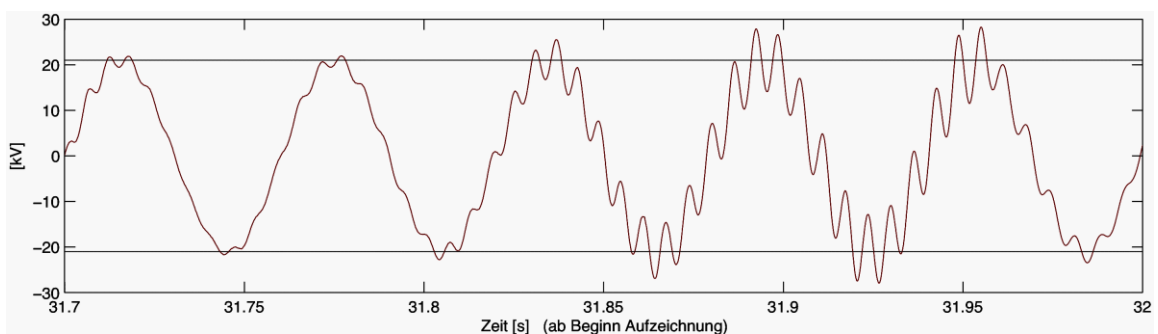


Abbildung 2: Instabilität bei Versuchen mit Re 460 ohne Dämpfungsglieder

- 10) 2008: Überlegungen und Gespräche mit der Industrie über aktive Dämpfungsglieder. Angesichts des mangelnden Interesses der Industrie und der guten Bewährung der passiven Dämpfungsglieder wird der Ansatz zunächst nicht weiterverfolgt.
- 11) Ab 2008: Projektierung, Bau und Inbetriebnahme von insgesamt 12 passiven Dämpfungsgliedern an den Standorten Mitholz (2), Gampel (4), Massaboden (4) und Varzo (2). Als Rückfallebene werden an den 132-kV-Kabeln zudem schnelle Überspannungsrelais installiert, welche im Falle einer aufklingenden Überspannung (als Folge einer Resonanzanregung) die Kabel ausschalten, bevor die Überspannungsableiter ansprechen.
- 12) Ende 2010: Definitive Inbetriebnahme des 132-kV-Kabels Mitholz-Gampel, dank den Dämpfungsgliedern nun ohne betriebliche Einschränkungen und mit dem Kabel im Normalbetrieb eingeschaltet.
- 13) 2010/2011: Durchführung von Studien zu den noch vorhandenen Verkabelungsreserven im Gesamtnetz der SBB und in relevanten Inselnetzen, unter Berücksichtigung aller absehbaren Verkabelungsvorhaben.
- 14) Ab 2011: Überlegungen gemeinsam mit der EPFL und der Industrie, ob eine aktive Bedämpfung der kritischen Resonanzen auch mit statischen Frequenzumrichtern durch entsprechende Zusatzfunktionen in der Regelungssoftware möglich ist. Aussagen dazu können zurzeit noch keine gemacht werden.

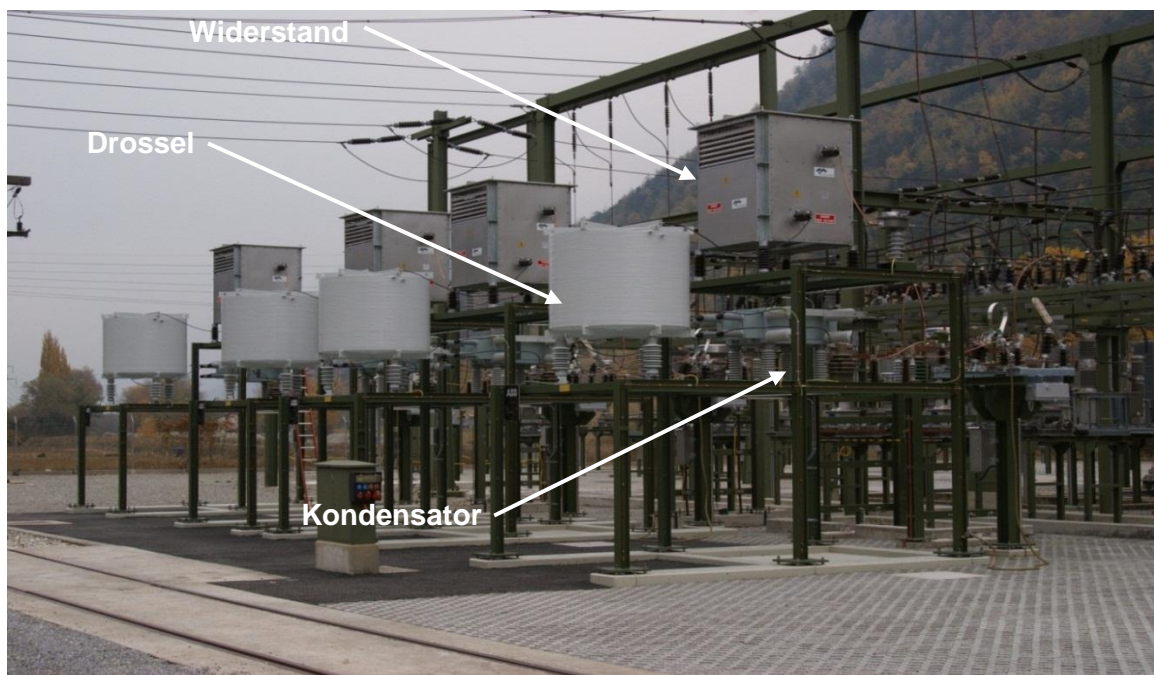


Abbildung 3: Vier passive RLC-Dämpfungsglieder im UW Gampel

Alle genannten Arbeiten erfolgen ab 2005 unter Federführung von SBB Energie Systemdesign in Absprache mit dem BAV und in Zusammenarbeit mit den Divisionen Personen- und Güterverkehr der SBB, mit der BLS, mit den Besitzern anderer in der Schweiz zugelassener Triebfahrzeuge, der Industrie und verschiedenen Ingenieurbüros.

Zum Stand heute kann festgehalten werden, dass mit dem SAVO-Tool eine zuverlässige Vorhersage der Resonanzfrequenzen des Netzes und des Gesamtsystems sowie eine ausreichend genaue Vorhersage der Dämpfung im Gesamtsystem möglich ist. Dies wurde durch eine grosse Zahl von Vergleichen zwischen Messungen und Rechnungen bestätigt.

Das Verhalten der Triebfahrzeuge kann grundsätzlich ebenfalls mit Simulationen vorhergesagt werden. Erforderlich sind Zeitbereichssimulationen, wenn möglich Hardware-in-the-Loop-Simulationen⁴, welche in Echtzeit erfolgen müssen. Dies ist nicht nur sehr aufwendig, sondern es hat sich bei verschiedenen Messungen auch gezeigt, dass heute solche Vorhersagen noch nicht immer die erforderliche Verlässlichkeit erreicht haben. Aus diesem Grund bestehen die SBB für Neuzulassungen im Rahmen der Typenversuche auf einem messtechnischen Nachweis, gemäss R-I-20005 [1].

4.2. Andere Bahnstromnetze

4.2.1. Rhätische Bahn (RhB), Stammnetz

Das 66-kV-Netz der RhB weist einen sehr grossen Kabelanteil auf, insbesondere seit der Inbetriebnahme des 66-kV-Kabels durch den Vereina-Tunnel. Zwar ist eine bestimmte Kapazität im 66-kV-Netz vom (anregenden) Triebfahrzeug aus gesehen wesentlich kleiner als wenn sich die gleiche Kapazität im 132-kV-Netz befände⁵. Trotzdem sah sich die RhB angesichts des sehr hohen Kabelanteils bei der Inbetriebnahme des Vereina-Kabels 2002 veranlasst, die Situation theoretisch und experimentell untersuchen zu lassen. Dabei hat sich bestätigt, dass sehr tiefe Resonanzfrequenzen auftreten, je nach Schaltungszustand bis unter 100 Hz. Allerdings ist die Dämpfung im RhB-Netz im heutigen Zustand immer ausreichend gross, so dass keine Instabilitäten auftreten. Die RhB wird aber bei allfälligen Netzerweiterungen oder Verkabelungen die Situation sehr genau im Auge behalten müssen.

⁴ Dabei wird nur der Leistungsteil und das Netz in der Simulations-Software dargestellt, die Stromrichterregelung ist jedoch auf der echten Hard- und Software des später in das Triebfahrzeug eingebauten Stromrichter-Leitgerätes implementiert

⁵ Shuntkapazitäten müssen mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses von einer Spannungsebene auf eine andere umgerechnet werden. Zum Beispiel wirkt sich eine Kapazität von $x \mu\text{F}$ in einem 132-kV-Netz von der 15-kV-Seite aus gesehen viermal stärker aus als eine gleiche Kapazität in einem 66-kV-Netz. Massgebend sind aber vor allem auch die Spannungsebenen der Generatoren, welche bei jedem Generator anders sein können. Somit ist es nicht möglich pauschale Umrechnungsfaktoren anzugeben, genaue Auskunft liefern nur exakte Netzmodelle. Man kann aber davon ausgehen, dass sich ein bestimmter Kapazitätswert in einem SBB-typischen 132-kV-Netz zwei bis viermal stärker auswirkt als die gleiche Kapazität in einem RhB-typischen 66-kV-Netz. Die Kabel im RhB Netz senken die Resonanzfrequenz des Verbundes SBB-RhB um ca. 2 Hz.

4.2.2. Matterhorn Gotthard Bahn (MGB)

Im Rahmen der Verstärkung der Bahnstromversorgung Richtung Zermatt hat die MGB in den letzten Jahren ein 66-kV-Netz zwischen Gamsen und Herbruggen aufgebaut, welches im neuen Strassentunnel Stägijtschuggu auf einigen Kilometern verkabelt ist. Diese Leitung ist vor allem deshalb kritisch, weil sie sich in der Nähe der grossen Kabelanlagen im LBT und im Simplon befindet. Die Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass dieses Kabel der MGB die Resonanzfrequenzen nicht auf Werte unter 100 Hz verschiebt. Ausserdem profitiert es auch von den Dämpfungsgliedern in den UW Gampel und Massaboden. Zudem wurde messtechnisch nachgewiesen, dass sich alle Umrichtertriebfahrzeugtypen der MGB oberhalb von 103 Hz passiv verhalten, so dass diesbezüglich keine Probleme zu erwarten sind.

4.2.3. Österreichische Bundesbahnen (ÖBB)

Der Grossteil des ÖBB-Bahnstromnetzes wird als gelöschtes 110-kV-Netz betrieben. Um die Erdschlusslöschung überhaupt mit vernünftigem Aufwand zu ermöglichen, sind die ÖBB darauf bedacht, den Kabelanteil in ihrem Netz klein zu halten. Trotzdem sind bei der Inbetriebnahme der Taurus-Lokomotiven im Zusammenhang mit dem 110-kV-Kabel im Tauerntunnel [4] Resonanzprobleme aufgetreten. Dank rechtzeitigem Erkennen der Zusammenhänge, nicht zuletzt auch aufgrund der Erkenntnisse aus dem ESCARV-Projekt und den in der Schweiz durchgeführten Versuchen [2], konnte die Netzstromrichter-Software dieser Lokomotiven damals noch so angepasst werden, dass sie oberhalb von 120 Hz passiv sind. Das Problem konnte so gelöst werden. Dabei darf nicht vergessen werden, dass diese Loks, die ansonsten im elektrischen Teil durchaus mit den Re 460 der SBB ähnlich sind, konzeptionell etwa 10 Jahre jünger sind. Ein ausgedehntes Kabelnetz besteht im Raum Wien. Dieses wird heute noch mit 55 kV betrieben, so dass sich eine dort vorhandene Kabelkapazität im Vergleich zu einer gleichen Kapazität im 110-kV-Netz deutlich weniger stark auswirkt. Gerade im Hinblick auf den geplanten Umbau dieses Netzes auf 110 kV haben die ÖBB sehr frühzeitig passives Verhalten für alle seither beschafften Triebfahrzeuge verlangt. Ihre diesbezügliche Vorschrift ist mit den SBB koordiniert und praktisch identisch, einzig die Grenzfrequenz liegt bei den ÖBB bei 120 Hz (SBB 103 Hz). Dies ist im Hinblick auf die in Österreich aus Störstromgründen erforderliche Aufschaltung der 7. Netzharmonischen notwendig, aber angesichts des dort vorhandenen und absehbaren Kabelanteils noch unkritisch.

4.2.4. Deutsche Bahn (DB)

Das Netz der DB ist wie dasjenige der ÖBB ein gelöschtes 110-kV-Netz. Allerdings weist das Hochspannungsnetz der DB keinen nennenswerten Kabelanteil auf. Es sind auch keine grossflächigen Resonanzprobleme bekannt. Bekannt sind Probleme im ICE-Instandhaltungswerk Rummelsburg bei Berlin. Dort gab es verschiedentlich Probleme mit der 100-Hz-Überwachung. Es wird ein Zusammenhang zwischen der 100-Hz-Antiregelung und einer lokalen Netzresonanz vermutet.

Trotzdem hat die DB AG vorsorglich beschlossen, für ab 2010 neu zuzulassende Triebfahrzeuge passives Verhalten ab einer Frequenz von 120 Hz vorzuschreiben (analog ÖBB).

4.2.5. Trafikverket (Schweden)

Obwohl die 16.7-Hz-Netze in Skandinavien als dezentrale Netze grundsätzlich anders aufgebaut sind als in CH, D, A, sind im Zusammenhang mit der Inbetriebnahme neuer Triebzüge verschiedentlich Probleme mit Netzresonanzanregung aufgetreten. Diese konnten durch Optimierung der Netzstromrichter-Software gelöst werden. Für neu zuzulassende Triebfahrzeuge schreibt die für Schweden und Norwegen gültige *Nordic Electric Power Co-Operation* passives Verhalten oberhalb von 90 Hz vor.

Zusammenfassung 16.7-Hz-Netze: Wie oben gezeigt, waren fast alle Betreiber von 16.7-Hz-Bahnstromnetzen bereits in der einen oder anderen Form von den beschriebenen Resonanzproblemen betroffen. Entsprechend unbestritten sind auch die Tatsachen dass:

- Triebfahrzeuge oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz passiv sein müssen,
- Netze keine Resonanzen auf Frequenzen unterhalb der gleichen Grenzfrequenz aufweisen dürfen,

um das Gesamtsystem stabil betreiben zu können.

Es wird deshalb angestrebt, entsprechende Vorschriften in eine zukünftige Version der Norm EN 50388 aufzunehmen. Zurzeit ist vorgeschlagen, für 16.7-Hz-Netze die Grenzfrequenz bei 90 Hz festzulegen, wobei begründete nationale Abweichungen zulässig sein sollen (bei rechtzeitiger Berücksichtigung in der Projektierung der Fahrzeug- und Stromrichter-Software stellt dies auch kein Problem dar).

4.2.6. Bahnstromversorgung mit 50 Hz

Bei den mit 50 Hz versorgten Bahnen war das Augenmerk bisher - entsprechend den dort gemachten Erfahrungen - viel stärker auf Resonanzen gerichtet, welche durch die Stromrichter-Taktung angeregt werden. Obwohl beides oft verwechselt wird, handelt es sich hierbei um einen völlig anderen Mechanismus der Resonanzanregung, welcher andere Methoden sowohl zur Analyse wie auch zur Lösung erfordert. Die Netzresonanzfrequenzen liegen bei den 50-Hz-Bahnen aufgrund der direkten Speisung aus dem europäischen 50-Hz-Verbundnetz wesentlich höher als bei den 16.7-Hz-Netzen. Dennoch ist zumindest teilweise erkannt, dass das Problem der Resonanzanregung durch Reglerückkopplung in 50-Hz-Netzen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. In Holland wurde die Situation im Zusammenhang mit der neuen HSL-Zuid und der Betuweroute systematisch analysiert [12]. In der Arbeitsgruppe, welche die bereits erwähnte Revision der EN 50388 vorbereitet, ist deshalb angedacht, die gleichen Vorschriften wie für 16.7 Hz auch für 50-Hz-Bahnnetze zu erlassen, mit einer Grenzfrequenz von 270 Hz. Zurzeit ist allerdings nicht sicher, ob der Bedarf nach einer solchen Vorschrift von allen 50-Hz-Bahnnetzbetreibern verstanden und mitgetragen wird.

4.3. Andere Energieversorgungsnetze

Mit diversen Betreibern von öffentlichen 50-Hz-Netzen in der Schweiz hat bereits ein Gedankenaustausch zu den in diesem Dokument beschriebenen Problemen stattgefunden. Bisher sind in diesen Netzen keine entsprechenden Probleme bekannt geworden. Dies dürfte einerseits in der völlig anderen Netzstruktur und dem geringen Kabelanteil auf Höchstspannungsebene (und somit

hohe Resonanzfrequenzen), andererseits im geringen Stromrichterleistungsanteil der Last (im Vergleich mit den Bahnnetzen) begründet sein. Es wird aber allgemein anerkannt, dass das Auftreten ähnlicher Probleme nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden kann. Aus [11] ist zumindest ein Fall bekannt, wo bei einem zur Erschliessung einer Windfarm installierten Blindleistungskompensator eine aktive Bedämpfung von Netzresonanzen realisiert worden ist.

5. Entwicklung der Resonanzfrequenz im Bahnstromnetz der SBB

In Abbildung 4 ist die Netzresonanzfrequenz im Bahnstromnetz der SBB in Abhängigkeit der Kabelkilometer abgebildet. Bei allen Berechnungen wurde auch der Kabelanteil der RhB, mit deren Netz die SBB in Sargans verbunden ist, berücksichtigt. Die wichtigsten Einflussgrößen sind:

- die Entwicklung der Kabel-Kilometer im Bahnstromnetz (siehe Abschnitt 6)
- die Grenzen der zulässigen Verkabelung (siehe auch Abschnitt 7)

5.1. Aktuelle und mittelfristige Grenzen

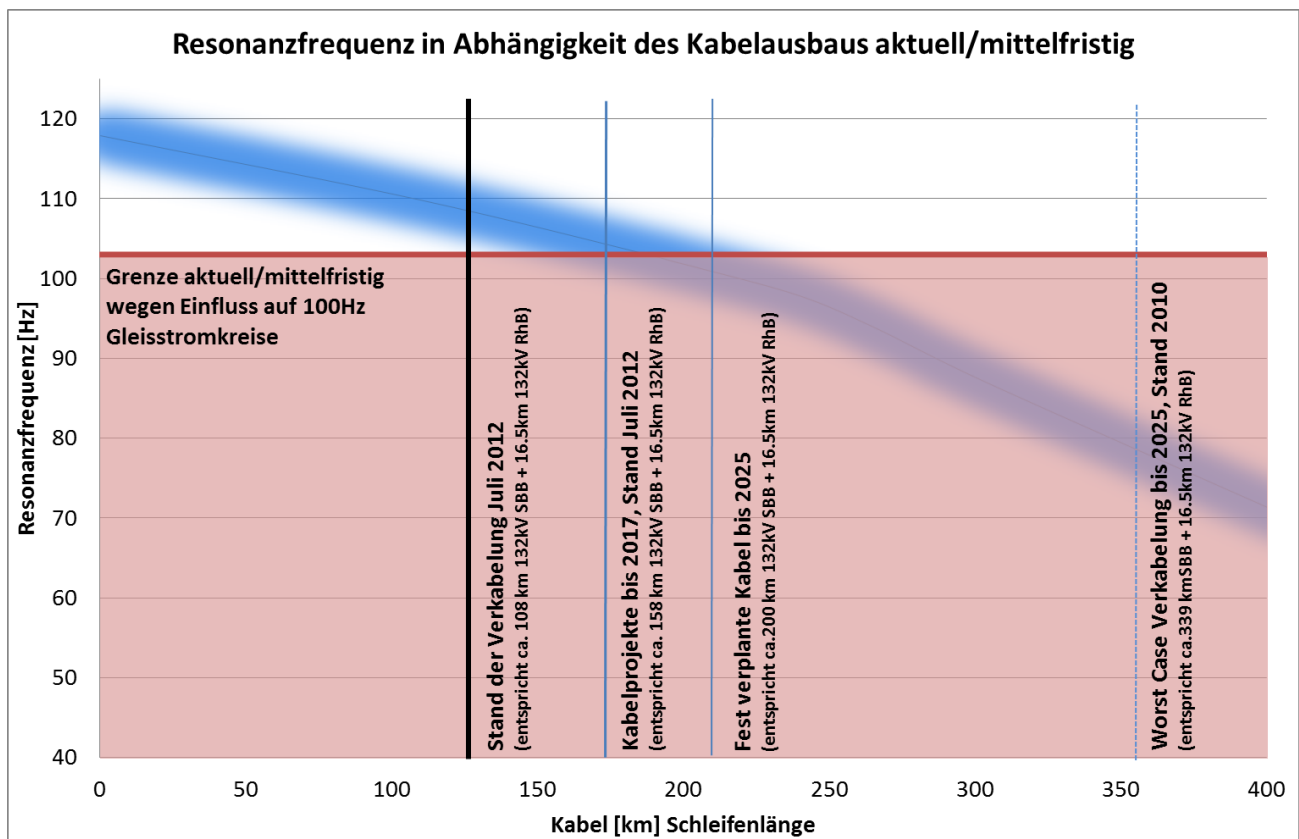


Abbildung 4: Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Kabelausbau (aktuell / mittelfristig)

Die heute gültige Grenze von 103Hz ist mit einer horizontalen roten Linie eingezeichnet. Der heutige Stand der Verkabelung (welcher inkl. RhB einer Schleifenlänge von ca. 124 km umgerechnet auf die Spannungsebene 132kV entspricht) ist mit einer dicken schwarzen Linie gekennzeichnet. Zusätzlich wurden zwei weitere Verkabelungsszenarien eingetragen. Die bereits fest eingeplanten Kabel in den Zeiträumen bis 2017 (ca. 174 km) sowie 2025 (ca. 216 km) und ein Worst Case Verkabelungsszena-

rio bis 2025 (ca. 355km). Im Worst-case-Szenario 2025 sind einige Fälle⁶ abgebildet, bei denen zum Zeitpunkt der Berechnungen in 2010 im Rahmen von Verfahren Verkabelungsforderungen vorlagen. Die blaue Linie zeigt den entsprechenden Verlauf der Netzresonanzfrequenz. Sie kann sich je nach Schaltzustand des Netzes nach oben oder unten verschieben. Aus diesem Grund kann diese Kurve nicht als exakte Linie gezeichnet werden, sondern eher als eine Art „Punktwolke“. Dabei stellt die Unschärfe der Linie die Abhängigkeit vom Schaltzustand dar.

Gut zu sehen ist, dass bereits mit dem geplanten Ausbau und der heute gültigen 103-Hz-Grenze die Reserven ausgeschöpft und sogar überschritten sind.

5.2. Langfristige Grenzen

Durch die Massnahmen, die in Kapitel 7 beschrieben sind, wird es langfristig möglich sein, die heute gültige Grenze von 103Hz auf 87 oder 90Hz zu senken.

⁶ U.a. beinhaltet das Worst-case-Szenario (nicht aber das Szenario bis 2025) die Bestückung des Gotthard-Basistunnels mit einer vorerst zurückgestellten 40km langen Kabelverbindung (PGV ist genehmigt) für die Versorgung der Zwischenanspeisung Sedrun. Dies würde erforderlich bei Umsetzung neuer Konzepte im Güterverkehr (z.B. 1500m/5000t Shuttle in schneller Zugfolge).

Zu beachten ist, dass die Verkabelungsforderungen seit dem Bundesgerichtsurteil im April 2011 zur Verkabelung einer 380kV-Leitung in Riniken AG massiv zugenommen haben.

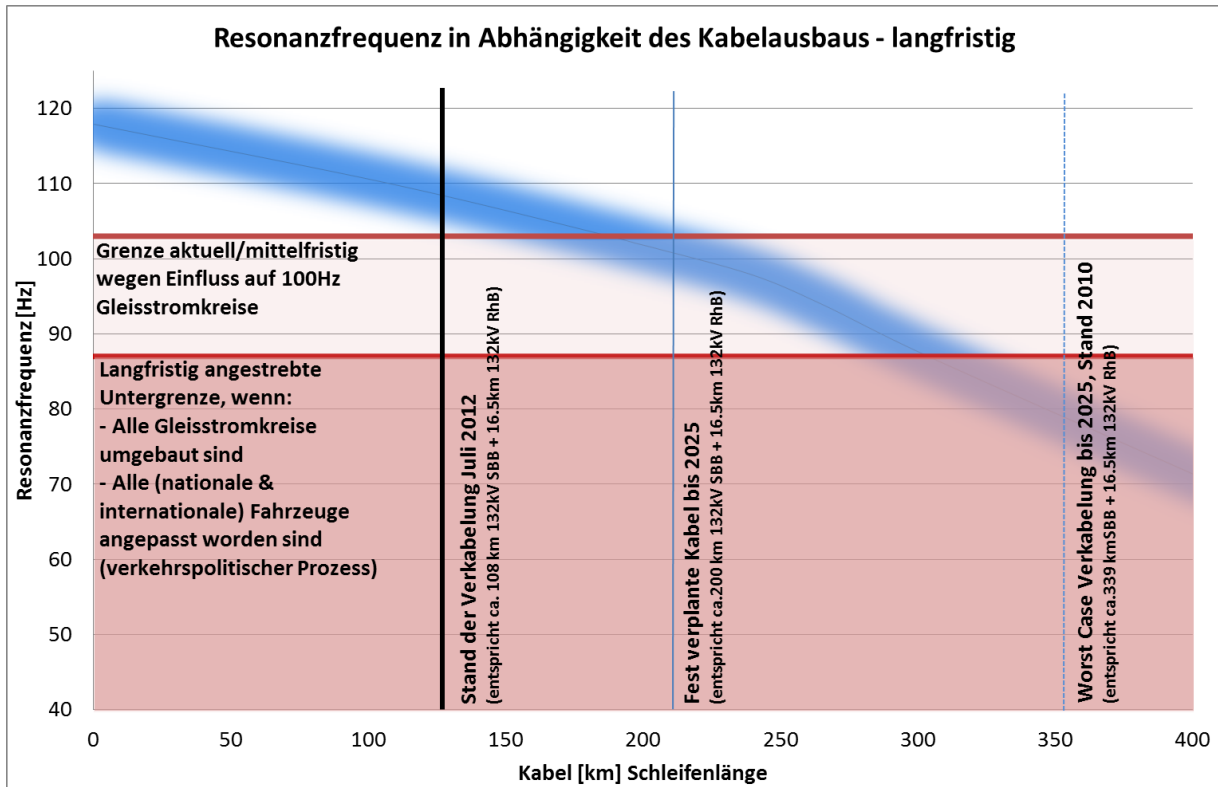


Abbildung 5: Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Kabelausbaus (langfristig)

Abbildung 5 zeigt wie Abbildung 4 die Netzresonanzfrequenz im Bahnstromnetz der SBB in Abhängigkeit der Kabelkilometer. Hier wurde aber zusätzlich die langfristig mögliche 87Hz Grenze eingezeichnet.

6. Stand der Verkabelung Ist / Planung

Wesentlich für die Analyse der Resonanzproblematik im Bahnstromnetz ist einerseits eine Übersicht über die bestehenden Kabelstrecken sowie andererseits über die Kabelstrecken, welche bereits in fortgeschrittener Planung oder im Bau sind.

6.1. Bestehende Kabelabschnitte

In Tabelle 1 ist die Übersicht über die bestehenden und im Normalbetrieb integrierten Kabelabschnitte mit einer Länge > 0.7 km dargestellt. Die Länge berücksichtigt die Anzahl elektrischer Systeme (1 oder 2) multipliziert mit der Trassenlänge. Zudem sind die Kabellängen auf Spannungsebene 66kV entsprechend ihrer Wirkung umgerechnet auf 132kV-Äquivalent. Zusätzlich muss noch die RhB eingerechnet werden (Siehe dazu Abschnitt 6.3)

ULNr	Bezeichnung	Trasseelänge (km)	Wirkung in 132kV-Äquivalent Länge (km)	Kurzbeschreibung
101	132 kV UL (Kw/FU Massaboden) - Brig Mast 5 - Portal Iselle - (fUW Varzo I)	2*20.2	40.4	Simplon: Nordportal Brig – Sudportal Iselle di Trasquera
291	66 kV UL (FU Giubiasco) Manno Mast 628 - SP Pian Scairolo - UW Melide	2*4.7	2.4	Kabel in Stollen mit AET und AIL
294	66 kV UL SP Pian Scairolo - fUW Balerna	2.8	0.7	Seekabel (Luganosee) zwischen Morcote und Brusino
177	66 kV LT Ss Delémont - Bassecourt - Ss Courtemaîche	2.1	0.5	Tunnel de Glovelier
177	66 kV LT Ss Delémont - Bassecourt - Ss Courtemaîche	3	0.8	Tunnel de la Croix
185	132 kV UL FU Wimmis - UW Frutigen	0.7	0.7	Mast 94/95 - UW Frutigen
186	132 kV UL UW Frutigen - UW Mitholz	1.5	1.5	UW Frutigen - Mast E1/3
110	132 kV UL UW Gampel - UW Mitholz	30.7	30.7	Lötschbergtunnel
261	132 kV UL UW Muttenz - UW Haltingen	2*2.4	4.8	Rohrblock Birs und Energieleittunnel der Stadt Basel
204	66 kV UL KA GKw Göschenen - UW Göschenen	2*0.8	0.4	ganze UL in Kabel
313	132 kV UL FU Seebach - Zürich / Kohlendreieck	2*1.3	2.6	Wipkingertunnel
341	66 kV UL Kw Etzelwerk - UW Gossau	6.0	1.5	Seedamm in Betrieb bis 2016
349	132 kV UL Kw Etzelwerk - UW Rapperswil	2*3.6	7.2	Seedamm
353	132 kV UL Kw Etzelwerk - UW Ziegelbrücke - UW Sargans	2*6.3	12.6	Phasensplitting Mels - Sargans
	66 kV Kerenzertunnel	4.6	1.2	Kabel 66kV Kerenzertunnel, in Betrieb bis 2016
Total Kabel im SBB-Netz (gerundet)			108	in 132kV-km-Äquivalent

Tabelle 1: Kabelstrecken in Betrieb, Stand Juli 2012

6.2. Geplante Kabelabschnitte bis 2025

57km Kabelabschnitte sind im Plangenehmigungsverfahren bzw. im Bau. Die Projekte sind mit jeweiligem Stand und dem Grund für die Verkabelung (Umfeld) in Tabelle 2 dargestellt. Die Länge berücksichtigt die Anzahl elektrischer Systeme (1 oder 2) multipliziert mit der Trassenlänge. Kabelrückbau durch den Rückbau der 66kV-Spannungsebene sowie Optimierungsmassnahmen zur Reduktion der kapazitiven Wirkung sind entsprechend ihrer Wirkung auf die Resonanzfrequenz als Einsparungen bzw. Entlastungen dargestellt.

Von	Bis	Trasseelänge (km)	Wirkung in 132kV-Äquivalent Länge (km)	Stand Verfahren	Umfeld	Beschreibung
SP Rüthi	UW Feldkirch	11.0	11.0	betriebsbereit	Naturschutz (österreichisches Verfahren)	Netzkupplung ÖBB
UW Zürich	Kilchberg	2*9.5	19.0	plangenehmigt	Siedlung	Zimmerberg
UW Zürich	FU Seebach	2*4	8.0	im Bau	Siedlung	Teilverkabelung Seebach-Zürich
Winznau Mast 22	UW Olten	2*1.4	2.8	im Bau	Siedlung	2. Anschluss UW-Olten
UW Vezia	Crespera	2*1.1	2.2	PGV	Siedlung	Verlängerung der Kabelstrecke Vezia bis Piano Scaiolo
Rapperswil	Jona	2*3	6.0	PGV genehmigt	Siedlung	Ersatz nördl. Anschluss Rapperswil
Châtelard	Vernayaz	2*4	8.0	PGV	BLN	Plateau de Salvan
Ausbau 66 kV UL Kw Etzelwerk - UW Gossau		-6.0	-1.5	PGV genehmigt	Obsolet nach UL-Einführung Rapperswil	Ausbau nach Spannungsumstellung
Ausbau 66 kV Kerenzertunnel		-4.6	-1.2	PGV	Obsolet nach Ringschluss Ostschweiz	Ausbau nach Spannungsumstellung
Ersatz Simplonkabel 132kV		2*20.2	-5.0	im Bau	Beim Ersatzprojekt Reduktion der Kapazität um 12% durch Erhöhung der Isolation	
Veränderung der Kabel bis 2017			49.4 in 132kV-km-Äquivalent			

Tabelle 2: Kabelprojekte veröffentlicht (Plangenehmigung/Bau), Stand Juli 2012

Weitere 34km Kabellänge sind geplant in fünf Projekten. Eine einschleifige, 10km lange innerstädtische Kabelverbindung soll die Redundanz bei der Inbetriebnahme eines Eisenbahngrossprojektes sicherstellen. Bei drei Projekten handelt sich um Ersatzprojekte für Leitungen mit Baujahr vor 1930/1940, bei denen das Risiko, dass der Ersatz nur mit Kabelabschnitten realisierbar ist, besonders hoch ist. Es sind jeweils Leitungen mit zwei elektrischen Systemen, was einer Trassenlänge von insgesamt 12km entspricht (bzw. 24km Schleifenlänge). Des Weiteren werden im Tessin die bestehenden 66kV Kabel durch 132kV Kabel ersetzt.

Von	Bis	vsL. Länge (km)	Wirkung in 132kV-Äquivalent Länge (km)	Stand Verfahren	Umfeld	Beschreibung
Bellmund	Biel	2 * 2.5	5.0	Vorbereitung PGV (z.T. bereits eingeleitet)	Siedlung / Konflikt A5	Ersatz südliche Anspeisung Biel
Im Gebiet einer benannten Stadt		10.0	10.0	Vorprojekt	Siedlung	Verkehrsaufkommen Eisenbahngrossprojekt
Im Gebiet einer benannten Stadt		2 * 6.5	13.0	Erarbeitung SÜL	Siedlung	Leitungsersatz
In einem BLN-Gebiet		2 * 3	6.0	SÜL eingeleitet	BLN	Leitungsersatz auf neuem Trasse
Umbau der Kabelstrecken von 66kV auf 132kV im Tessin		2*4.7	9.4	Vorprojekt	Ersatz der bestehenden Kabel auf der höheren Spannungsebene	
Wegfall der Kabelstrecken von 66kV im Tessin (nach Umbau)		- 2*4.7	-2.4	Vorprojekt		
Veränderung der Kabel bis 2023			41.1			

Tabelle 3: Interne Planung Kabelprojekte, Stand Juli 2012

Insgesamt sind somit weitere 91 km Kabel im SBB-Bahnstromnetz fest eingeplant. Mit den bereits bestehenden Kabellängen (und den Einsparungen am Simplon und durch Wegfall von 66kV-Kabeln) ergeben sich bis zum Zeitraum 2020/2025 insgesamt ca. 200 km Kabel.

6.3. Kabel im RhB Netz

Da das SBB Netz in Sargans mit der RhB gekoppelt ist, wurde in den Berechnungen auch der Kabelanteil der RhB berücksichtigt. Insgesamt wurden 54.8km 66kV bestehende Kabel berücksichtigt. Zusätzlich wurde für eine allfällige Verkabelung auf der Strecke Chur – Arosa noch weitere 11km Kabel (66kV) eingerechnet. Diese Kabellängen entsprechen in ihrer Wirkung ca. 16.5km 132kV-Kabel.

7. Grenzen der zulässigen Resonanzfrequenz

Als Netzbetreiber und Systemführer für Bahnstrom ist SBB Energie dafür verantwortlich, dass in ihrem Netz unterhalb einer bestimmten Grenzfrequenz keine Netzresonanzen auftreten. Im Gegenzug dürfen sich die Fahrzeuge oberhalb dieser Grenzfrequenz nicht aktiv verhalten (Siehe Kapitel 8.1).

Die heute gültige Grenzfrequenz liegt bei 103Hz. Diese Grenze muss wegen der verbreiteten 100-Hz-Gleisstromkreise (plus Sicherheitsmarge von 3Hz) eingehalten werden. Die Einhaltung der durch die 100-Hz-Gleisstromkreise bedingten 100-Hz-Stromgrenzwerte erfordert auf den meisten Triebfahrzeugen eine 100-Hz-Antiregelung, welche in vielen Fällen aktives Verhalten aufweist. Die Forderung nach passivem Verhalten bei 100 Hz und 100-Hz-Antiregelung schliessen sich daher meistens aus und verunmöglichen somit den Betrieb an einem Netz mit Resonanz in der Nähe von 100 Hz.

Momentan werden diese 100Hz Gleisstromkreise umgebaut. Die Fertigstellung dieses Umbaus ist im Bereich SBB Infrastruktur auf Ende 2013 vorgesehen (Stand August 2012). Mit diesem Umbau wird die Arbeitsfrequenz der Gleisstromkreise auf eine unkritische Frequenz verschoben, d.h. auf eine Frequenz, bei der die Triebfahrzeuge die Störstromgrenzwerte ohne Antiregelung einhalten können.

Sobald der Umbau der 100Hz-Gleisstromkreise vollzogen ist, kann der Prozess zur Senkung der Grenzfrequenz angegangen werden. Folgende Schritte sind notwendig:

1. Fertigstellung des Umbaus aller Gleisstromkreise. (momentane Planung: ca. Ende 2013 auf dem Gebiet SBB Infrastruktur, weitere Infrastrukturbetreiber müssen folgen)
2. Anpassen der Vorschriften J78 und I20005
J78: Der Störstromgrenzwert bei 100 Hz entfällt. Neu wird ein Grenzwert bei einer unkritischen Frequenz erscheinen, dieser kann aber von den Triebfahrzeugen ohne Antiregelung eingehalten werden.
I-20005: Neu zuzulassende Triebfahrzeuge müssen ab diesem Zeitpunkt oberhalb von 87 bzw. 90 Hz⁷ passiv sein. Die tiefere Grenzfrequenz ist bereits heute in der I-20005 erwähnt. Die Fahrzeughersteller wissen also bereits heute, dass der Grenzwert gesenkt wird. Das Einhalten des Grenzwertes ist für die Hersteller normalerweise kein Problem (siehe dazu auch Kapitel 8.1.1).
3. Anpassen **aller** betroffener Fahrzeuge an die neuen Vorschriften.
Bei sämtlichen bereits zugelassenen Fahrzeugen muss sichergestellt werden, dass sie sich oberhalb der neuen Grenzfrequenz nicht aktiv verhalten. Insbesondere müssen sämtliche 100-Hz-Antiregelungen ausgeschaltet werden. Auf vielen moderneren Fahrzeugen handelt es

⁷ Die SBB gehen bisher davon aus, dass der neue Grenzwert bei 87 Hz liegen soll (fünfte Harmonische plus Sicherheitsabstand). Im Rahmen der Revision der I-20005 wird aber zu überlegen sein, ob dann der für die EN 50388 angestrebte Grenzwert von 90 Hz übernommen werden soll (siehe dazu Abschnitt 4.2.5).

sich im Prinzip in erster Linie um eine Softwareanpassung.

Dieser Schritt ist trotzdem äusserst kritisch und die dazu erforderlichen Prozesse (Beauftragung der Fahrzeugbesitzer, Nachweis und Vollzugskontrolle) sind nicht geregelt. **Bereits zugelassene Fahrzeuge müssen abgeändert werden.** Problematisch sind insbesondere international zugelassene Triebfahrzeuge, bei denen nach einer Softwareänderung je nach Land eine teilweise oder vollständige Neuzulassung erforderlich ist.

4. Senkung der Grenze für die Netzresonanzfrequenz auf **87Hz oder 90Hz**
Die neue Grenze wird durch die fünfte Netzharmonische (83.5Hz) plus Sicherheitsmarge bestimmt. Bei der fünften Netzharmonischen klingen Überspannungen wegen der geringen Dämpfung nur sehr langsam ab. Eine weitere Reduktion der Grenzfrequenz ist nach heutigem Stand der Technik noch nicht absehbar.

Bei der Senkung der Grenzfrequenz handelt es sich um ein Thema mit einer europäischen, verkehrspolitischen Dimension (insbesondere Netzzugangsregelungen und Softwareanpassungen Punkt 3), dessen terminliche und finanzielle Umsetzung noch offen ist. Es ist daher heute nicht absehbar, ab welchem Zeitpunkt in der Netzplanung von einer tiefsten Resonanzfrequenz von 87/90 Hz ausgegangen werden kann.

8. Technische Möglichkeiten / Massnahmen

Die SBB treibt Massnahmen voran an den unterschiedlichen Einflussfaktoren (Anregungen, Netzstruktur, Dämpfung), um das Resonanzproblem einzugrenzen und einen grösseren Handlungsspielraum für Verkabelungen zu gewinnen.

8.1. Eliminieren/ Vermeiden von anregenden Elementen

8.1.1. Neuzulassungen von Fahrzeugen

Sämtliche Fahrzeuge, die neu zugelassen werden sollen, müssen den Nachweis erbringen, dass sie sich oberhalb von 103Hz (später 87/90Hz, Siehe Abschnitt 7) passiv verhalten. Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Anforderung von den Herstellern durch Softwareanpassungen eingehalten werden kann, wenngleich nach den Messungen zum Teil Nacharbeiten notwendig sind.

8.1.2. Bereits zugelassene Fahrzeuge

Bei den Fahrzeugen, die bereits zugelassen sind, verhalten sich hauptsächlich die Lokomotiven vom Typ Re 460 und Re 450 oberhalb von 103 Hz nicht passiv. Eine Nachrüstung/Anpassung der Software für ein passives Verhalten bis oberhalb von 87/90Hz ist bei beiden Typen nicht möglich, da die entsprechenden Leittechnikrechner zu langsam sind. Abhilfe schafft hier nur (mindestens) ein Ersatz der Leittechnik. Bei einer Flottengrösse von über 230 Fahrzeugen ist der Aufwand zu gross. Wir gehen davon aus, dass eine solche Anpassung Kosten in einer dreistelligen Millionenhöhe auslösen werden. Für eine präzise Kostenschätzung sind allerdings weitere Untersuchungen notwendig.

8.2. Optimierung Netzstruktur

8.2.1. Anpassen der Leitungsführung

Bei Planung und Bau von Leitungen kann zum Teil durch Optimierung der Netzstruktur auf weitere Kabel verzichtet werden. So soll z.B. in der Westschweiz durch die Verlegung des geplanten neuen Unterwerks vom Standort Neuchâtel nach Planchamps auf 2 x 9 km Kabel verzichtet werden – sofern die neue Verbindung Kerzers – (Cornaux –) Planchamps als Freileitung realisiert werden kann.

8.2.2. Einsetzen von Kabeln einer höheren Spannungsebene (dickere Isolation)

Eine weitere Möglichkeit ist das Einsetzen von Kabeln einer höheren Spannungsebene resp. Kabel mit einer dickeren Isolation. Je höher die Spannungsebene, desto stärker ist die Isolation. Die grössere Dicke der Isolationsschicht bedeutet einen grösseren Abstand zwischen Phasenleiter und Schirm, was wiederum zur Folge hat, dass die spezifische Kapazität der Kabel sinkt. In der Tabelle 4 ist als Beispiel ein PE Kabel mit einem Leiter von 500mm² Querschnitt in zwei Spannungsebenen aufgeführt.

Spannung [kV]	Kapazitätsbelag [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Aussendurchmesser [mm]	Rel. Kapazitätsbelag
150	0.181	85	1.0 (Basis)
220	0.133	102	0.73

Tabelle 4: Kabel mit höherer Nennspannung weisen bei gleichem Kupferquerschnitt eine höhere Isolationsdicke auf.

Daraus folgt ein kleinerer relativer Kapazitätsbelag.

Würden im 132kV-Netz also Kabel mit einer dickeren Isolation verwendet, könnten mehr Kabel eingesetzt werden, bis der gleiche Kapazitätsbelag erreicht wird.⁸ Ein weiterer Vorteil der höheren Spannungsreihe ist, dass die Kabel prozentual mit weniger Spannung belastet sind, was die Ausfallwahrscheinlichkeit senkt (siehe untenstehende Beispiele).

Nachteil dieses Ansatzes sind die höheren Kosten für Material (Kostenerhöhung bei diesem Beispiel um ca. 60%) und Verlegung (je nach Topographie stark variierende Kostenerhöhungen, mit grösseren Biegeradien, grösseren Rohren, grösseren und häufigeren Muffen aufgrund kürzerer Teillängen). Bei bestehenden Rohranlagen kann das Spannungsniveau (Isolationsdicke) beim Ersatz der Kabel nur sehr geringfügig erhöht werden - begrenzt durch die Rohrdurchmesser. Zu beachten ist auch, dass der Kapazitätsbelag je nach verwendetem Leiterquerschnitt stark variiert. Die Tabelle 5 zeigt einen Vergleich von verschiedenen Leiterquerschnitten von 150kV Kabeln:

Kupfer-Querschnitt [mm^2]	Kapazitätsbelag [$\mu\text{F}/\text{km}$]	Aussendurchmesser [mm]	Rel. Kapazitätsbelag
300	0.146	82	1.0 (Basis)
300 max. ⁹	0.132	87	0.9
500	0.181	85	1.24

Tabelle 5: Mit der Erhöhung des Kupfer-Querschnittes erhöht sich auch der Kapazitätsbelag

Gut zu sehen ist, dass eine Erhöhung des Kupfer-Querschnittes eine Zunahme des Kapazitätsbelages zur Folge hat.

⁸ Auch bei konsequentem Einsatz von z.B. 220kV Kabeln anstatt 150kV Kabeln kann der damit gewonnene Handlungsspielraum je nach Region unterschiedlich sein. Der Grund liegt darin, dass letztendlich nicht nur die Resonanzfrequenz des Gesamtnetzes betrachtet werden muss, sondern dass auch jedes für den Betrieb relevante mögliche Inselnetz für sich allein stabil muss betrieben werden können. In diesen Inselnetzen sind die noch vorhandenen Verkabelungsreserven stark unterschiedlich.

⁹ die Zeile „300 max“ zeigt ein Kabel mit 300mm^2 Querschnitt und erhöhter Isolationsdicke.

In zwei Projekten wurde die Umsetzung dieser Massnahme geprüft. Im Projekt Simplon befindet sie sich bereits in der Umsetzung:

Simplontunnel: Im Rahmen der Gesamtanierung der beiden Simplontunnel (2011 bis 2015) müssen beide Simplonkabel ersetzt werden. Das Lichtraumprofil der Züge sowie die weitere Tunnelinfrastruktur bestimmen die Grösse der Rohrdurchmesser. Durch die Belegung mit einem kapazitätsoptimierten Kabel reduziert sich der Kapazitätsbelag um 12.3% (vgl. Kapitel 6. Stand der Verkabelung Ist / Planung). Mit dieser Massnahme hat SBB Energie für 40 km Schleifenverbindung (20 km pro Tunnelröhre) ca. 5.0 km Kabel „gespart“. Die Zusatzaufwände auf der Kostenseite für das dicker Isolierte Kabel belaufen sich auf CHF 600'000 oder 6% der Kabelsumme.

Kerzers-Biel: Für den Sommer 2013 plant SBB-Energie den Einzug von 132kV-Kabeln auf dem Abschnitt Brügg-Unterwerk Biel. Dazu wurde eine kapazitätsarme Variante studiert. Diese spart 15.4% an Kapazitätsbelag gegenüber der herkömmlichen Bauform. Die Mehrkosten für diesen 1,3 km langen Abschnitt betragen rund CHF 100'000 oder 15%. Damit können rund 0.5 km einer einschleifigen SBB-Verbindung „gespart“ werden.

8.3. Generatoren als dämpfende Elemente einsetzen

Die in den Hydrokraftwerken und in den rotierenden Frequenzumformern eingesetzten Synchronmaschinen haben einen grossen Einfluss auf das Resonanzverhalten des Gesamtsystems. Zum einen bewirken ihre Induktivitäten – wie diejenige von Transformatoren in stationären Anlagen und Triebfahrzeugen – als Shuntelemente im System eine Erhöhung der tiefsten Resonanzfrequenz. Das bedeutet: Je mehr Generatoren sich am Netz befinden, desto höher ist die tiefste Resonanzfrequenz. Dieser Effekt kann bereits helfen, die tiefste Resonanzfrequenz aus dem kritischen Frequenzbereich hinaus zu verschieben. Zum anderen bringen die Synchronmaschinen mit ihren Eisenverlusten einen bedeutenden Beitrag zur Dämpfung in das System ein. Wenn die dämpfenden Elemente dem System auf einer kritischen Frequenz genügend Energie entziehen, kann das System trotz Zusammenfallen einer Resonanzfrequenz mit einer Anregungsfrequenz stabil betrieben werden.

Der grosse Einfluss von Anzahl und Grösse der sich am Netz befindenden Generatoren kann mit den vorhandenen Berechnungstools vorausgesagt werden und wurde auch experimentell bestätigt [1],[6],[8]. Wie stark eine bestimmte Maschine das Resonanzverhalten beeinflusst, ist in erster Linie abhängig von den Eigenschaften der betrachteten Maschine; grosse Maschinen haben grundsätzlich stärkeren Einfluss als kleine. Der Ort der Maschine im Netz ist zwar nicht vernachlässigbar, hat aber einen deutlich geringeren Einfluss. Keinen nennenswerten Einfluss hat dagegen der Arbeitspunkt der Maschine, da die massgebenden Elemente des Ersatzschaltbildes, die Induktivitäten und die Eisenverluste, unabhängig sind vom Arbeitspunkt. Will man also eine Maschine als Element zur Lösung von Resonanzproblemen ans Netz nehmen, kann diese grundsätzlich als Generator, als Motor (Pumpbetrieb) oder auch als Phasenschieber betrieben werden.

Im Rahmen der provisorischen Inbetriebnahme des 132-kV-Kabels im LBT vor der Installation der Dämpfungsglieder wurde eine Vorschrift erstellt, welche in Ausnahmefällen ein Einschalten des

Kabeln für ganz bestimmte Netzkonfigurationen mit einer genügenden Zahl von Maschinen erlaubt. Betroffen waren insbesondere der Frequenzumformer Massaboden sowie die Generatoren in den Kraftwerken Vernayaz und Chatelard. Zu diesem Zweck wurde vorgängig eine Vielzahl von Netzkonfigurationen und Generatoreinsätzen rechnerisch untersucht und die entsprechenden Ergebnisse in Tabellen hinterlegt. Dieses Verfahren hat sich insofern bewährt, als bei mehreren ausserordentlichen Einsätzen¹⁰ des 132-kV-Kabels (bei besonderen Netzbedingungen, z.B. Nichtverfügbarkeit der UL Kerzers-Puidoux) nie Probleme mit Netzresonanzen aufgetreten sind.

Trotzdem kommt dieser Ansatz zur grundsätzlichen Beherrschung der Resonanzprobleme aus den folgenden Gründen nicht in Frage:

- Der Betrieb von im Netz sonst nicht benötigten Maschinen hat hohe Kosten zur Folge (Alterung und Verschleiss, Energieverluste) und erschwert auch den Unterhalt des Maschinenparks.
- Das Verfahren ist höchstens in gewissen Teilnetzen (wie dem Bereich Lötschberg-Simplon) möglich. In diversen anderen Teilnetzen sind nicht genügend Generatoren vorhanden.
- Tendenziell wird die Anzahl rotierender Elemente in den Anlagen abnehmen. Einerseits werden rotierende Maschinen in Frequenzumformern ersetzt durch wesentlich wirtschaftlichere statische Umrichter (vgl. auch Kapitel 10). Andererseits soll gemäss Energiestrategie der SBB vom Mai 2012 bei Ersatz- und Ausbauprojekten in Wasserkraftwerken die Kopplung mit dem 50Hz-Netz verstärkt und jeweils die wirtschaftlichste Ausgestaltung der Maschinen (16.7Hz und/oder 50Hz) gewählt werden.
- In gewissen Teilnetzen kann das Verfahren wohl als provisorische Massnahme (wie bei LBT-Kabel gemacht) in Betracht gezogen werden. Allerdings eignet es sich auch dort ausschliesslich für *planbare* ausserordentlich Netzzustände (Bsp: LBT-Kabel: Geplanter Unterhalt an der UL zwischen Kerzers und Puidoux). Bei *ungeplanten* Ereignissen (z.B. Ausschaltung der UL Kerzers – Puidoux aufgrund von Kurzschluss) würde das Überprüfen der Netz-/Generatorkonfiguration, das Treffen der notwendigen Massnahmen (Zuschalten von Generatoren) und das Einschalten der betroffenen Kabelleitung(en) zu viel Zeit in Anspruch nehmen – der durchgängige Bahnverkehr wäre gefährdet.

¹⁰ In dieser Phase war das Kabel im Normalfall an beiden Enden (Mitholz und Gampel) ausgeschaltet und geerdet.

8.4. Passive Dämpfung

Beim Ansatz der passiven Dämpfung [9] wird dem negativen Realteil der Shunt-Admittanz der kritischen Triebfahrzeuge eine entsprechende Shuntadmittanz mit mindestens gleich grossem positivem Realteil gegenübergestellt. Damit verschwindet der negative Realteil im Gesamtsystem (siehe dazu die Ausführungen im Abschnitt 4).

Die dämpfende Wirkung kann mit einem ohmschen Shuntwiderstand erzielt werden. Das Problem dabei ist, dass ein Widerstand, welcher im kritischen Frequenzbereich zwischen ca. 100 und 200 Hz die gewünschte Wirkung hat, einen immens grossen Grundschiwungsstrom (16.7 Hz) und entsprechend riesige Verluste verursachen würde. Es hat sich aber gezeigt, dass mit einem geeignet ausgelegten, zum Widerstand in Serie geschalteten LC-Serienschwingkreis einerseits der Grundschiwungsstrom auf unbedenkliche Werte begrenzt und zusätzlich die Charakteristik zwischen 100 und 200 Hz sehr gut dem aktiven Verhalten der Loks Re 460 angepasst werden kann. Weiter haben sowohl Berechnungen wie auch Versuche bestätigt, dass ein solches Dämpfungsglied im Netz auch in grösserer Distanz vom zu bedämpfenden Objekt (also einem anregenden Triebfahrzeug) noch eine genügende Wirksamkeit hat - weil die Längsimpedanz zwischen den Anregern und den Dämpfungsgliedern gering ist. Dank diesem Umstand wird es überhaupt erst möglich, die Dämpfungsglieder ortsfest vorzusehen.

Die passive Dämpfung wurde im Lötschberg-Simplon Korridor eingesetzt. Die Kosten und Energieverluste dieser Massnahme sind im Anhang 13.1 dargestellt. Die Dämpfungsglieder sind wie oben beschrieben als RLC Glieder ausgeführt. Ein solches Dämpfungsglied ist ausgelegt, dass es eine Lokomotive vom Typ Re 460 bedämpfen kann. Die 12 im Lötschberg/Simplon Korridor verbauten Dämpfungsglieder genügen, um die maximale Anzahl Re 460 zu bedämpfen, welche sich in diesem Korridor befinden (2 Dämpfungsglieder bilden dabei die Redundanz). Abbildung 3 zeigt die Dämpfungsgliederinstallation im Unterwerk Gampel.

Als lokale Massnahme haben sich die Dämpfungsglieder bewährt. Die Untersuchungen haben aber gezeigt, dass sich passive Dämpfungsglieder nicht eignen um flächendeckend eingesetzt zu werden. Die grosse Anzahl, die benötigt würde, senkt die Resonanzfrequenz und wäre somit sogar kontraproduktiv.

9. Alternativen zu Kabeln

9.1. Hochspannungs Gleichstromübertragung (HGÜ)

Da bei einer HGÜ Leitung die beschriebenen Resonanzprobleme nicht auftreten können, gibt es aus Sicht der Resonanzproblematik keine Einschränkungen bei der Verkabelung solcher Leitungen. Hingegen gelten die im Anhang aufgeführten Einschränkungen im Fall von Störungen von Kabeln auch für verkabelte HGÜ-Leitungen.

Momentan können HGÜ-Leitungen nur als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen realisiert werden, da es keine Leistungsschalter für hochgespannten Gleichstrom gibt. An den beiden Enden müssen Konverter-Stationen aufgebaut werden. Diese Konverter-Stationen sind heute üblicherweise in Thyristor- oder IGBT-Technologie aufgebaut. Die zwingend benötigten Konverter-Stationen sind, im Vergleich zu Unterwerken mit Transformatoren, sehr teuer, technologisch aufwändig, sehr gross und kaum überlastbar. Bei kurzen Verbindungen sind die Verluste, die im Konverter entstehen, zudem grösser als die Verringerung der Verluste durch die Verwendung von Gleichstrom. Aus diesen Gründen sind HGÜ-Leitungen heute nur für grosse Distanzen und hohe Leistungen wirtschaftlich betreibbar.

9.2. Frequenzumformer (FU)

Eine weitere Möglichkeit, um Kabel zu vermeiden, sind Frequenzumformer. Diese können entweder in die 132kV Ebene oder aber direkt in die 15kV Fahrleitungsebene einspeisen. Wird eine 16.7Hz-Leitung durch zwei Frequenzumformer ersetzt, wird anstelle dieser Leitung das 50-Hz-Übertragungsnetz beansprucht. Frequenzumformer können jedoch auch als Redundanzen zu bestehenden Leitungen eingesetzt werden, zur Erhöhung der Verfügbarkeit. Um die Lösungen zu vergleichen, sind sowohl Kosteneffekte als auch die Verfügbarkeit der Lösungen zu beachten. Wichtigste Einflussfaktoren auf die Lebenszykluskosten sind:

- die Länge einer erforderlichen Leitung
- die Leistung, die übertragen und eingespiessen werden soll – und damit auch die Netzebene, an der ein Frequenzumformer angebunden werden kann. Bei Netzebenen unterhalb Netzebene 1 steigen die jährlichen Kosten für die Netzanbindung (Anschluss- und Netznutzungskosten) drastisch an.

Ein Vergleich der Life-Cycle-Costs fällt zugunsten der Freileitung aus. Eine beispielhafte Berechnung zeigte, dass

- im besten Fall (Netzanschluss des Frequenzumformers auf Netzebene 1, d.h. mit hoher Leistung – die genauen Bedingungen sind derzeit noch in Diskussion)
- bei einer Leitungslänge von 70 km
- bei einer doppelten Übertragungskapazität der Leitung im Vergleich zum Frequenzumrichter

der Faktor der Lebenszykluskosten zwischen Frequenzumformer und Freileitung mindestens Faktor 2 bis Faktor 4 beträgt. Je kürzer die Leitung, desto höher wird der Kostenfaktor zugunsten der

Freileitung. Zudem ist die Voraussetzung für einen Frequenzumformer eine genügende Anschlussleistung am 50Hz – Netz.

Die Befunde sowohl zu den HGÜ als auch zu den FU wurden bereits in der Arbeitsgruppe Leitungen und Versorgungssicherheit AG LVS [13] erkannt. Trotz tendenziell sinkender Kosten für Leistungselektronik gelten sie weiterhin.

10. Ausblick

Die unter Kapitel 8 genannten Massnahmen sind teilweise bereits umgesetzt oder befinden sich in Umsetzung. Sie stellen das heute technisch Machbare dar. Weitergehende Massnahmen sind denkbar — so könnte man sich vorstellen, dass die Frequenzumformer zusätzlich zu ihrer Grundfunktionalität auch als aktive Dämpfungsglieder eingesetzt werden könnten. Erste Abklärungen haben gezeigt, dass mit heutiger Technik eine breitbandig wirksame Dämpfungsfunktion schwierig realisierbar ist. Was aber bereits bei Windparks realisiert wurde [11], ist eine Dämpfungsfunktion, die auf eine einzelne Frequenz einwirkt. Da sich die Resonanzfrequenz im Bahnstromnetz aber je nach Netzzustand verändert, müsste diese „Dämpfungsfrequenz“ dauernd identifiziert werden.

Parallel zu dieser Forschungsarbeit muss die Verkabelung bis auf weiteres stark begrenzt werden, um die gesetzten Grenzen einhalten zu können. Die diversen Verkabelungsforderungen wären in Gremien zusammen mit den massgebenden Bundesämtern (z.B. innerhalb der SÜL-Begleitgruppe) zu priorisieren und dem heute marginalen Verkabelungspotenzial gegenüberzustellen.

Wir sehen daher folgende nächste Schritte neben der weiteren Forschungsarbeit:

- Diskussion zum Umgang mit Resonanzproblematik in den Genehmigungsverfahren. Unseres Erachtens ist hier eine schweizweite Sichtweise notwendig.
- Senkung der Resonanzfrequenz: Der Umbau der Gleisstromkreise erfolgt auch der Seite SBB Infrastruktur bereits bis Ende 2013, weitere Infrastrukturbetreiber werden folgen. Verkehrspolitisch muss das Thema der Senkung der Frequenzgrenze, wie in Kapitel 7 beschreiben, angegangen werden.

11. Literaturverzeichnis

11.1. Publikationen

- [1] R-I-20005, Anforderungen an die Eingangs-Admittanz von Umrichtertriebfahrzeugen, 01.05.2009
- [2] Kompatibilitätsuntersuchung am schweizerischen 16.7Hz Bahnstromnetz, M. Lörtscher, M. Meyer, A. Schneeberger, B. Hemmer, eb Elektrische Bahnen, 6-7/2001, Seite 292
- [3] EN 50388:2005 Bahnanwendungen – Bahnenergieversorgung und Fahrzeuge – Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität
- [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] Statische Frequenzumrichteranlage Wimmis (Schweiz), M. Thoma, U. Jampen, eb Elektrische Bahnen, 12/2006, Seite 576
- [6] Netzkompatibilitätsstudie und –messungen für die Umrichteranlage Wimmis, M. Meyer, M. Thoma, eb Elektrische Bahnen, 12/2006, Seite 567
- [7] Messung des Frequenzgangs von Triebfahrzeugen, M. Meyer, M. Aeberhard, K. Germann, R. Suter, P. Dähler, eb Elektrische Bahnen, 10/2007, Seite 521
- [8] Auswirkung der Netzresonanzen im Lötschberg Basistunnel, M. Meyer, M. Staldemann, R. Kernen, eb Elektrische Bahnen, 11/2007, Seite 570
- [9] Stabilitätsuntersuchungen im 132kV Netz der SBB, M. Aeberhard, J. Duron, M. Lörtscher, M. Meyer, eb Elektrische Bahnen, 6/2009, Seite 267
- [10] DB Richtlinie 810.0241, Kompatibilität mit den Anforderungen des Netzes - Elektrotechnische Kriterien
- [11] The power to change, ABB review, 1/10, Seite 16
- [12] Netzresonanzmessungen auf HSL Zuid und Betwueroute, M. Meyer, G. van Alphen, Schweizer Eisenbahnrevue, Eisenbahn-Revue International, 12/2006, S. 610
- [13] Schlussbericht der Arbeitsgruppe Leitungen und Versorgungssicherheit (AG LVS), 28.02.2007
- [14] 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
- [15] Netzstabilität in grossen Bahnstromnetzen, Schweizer Eisenbahn-Revue, 7-8/1999

12. Technische Zusammenfassung

Mitte der 1990er – Jahre traten im SBB Bahnstromnetz in Zusammenhang mit neuen Triebfahrzeugen erstmals Resonanzprobleme auf. Seither wurden diverse Anstrengungen unternommen, um die Thematik der Netzresonanzen besser zu verstehen und zu beherrschen.

Treffen aktives Verhalten von Triebfahrzeugen, schwache Dämpfung des Netzes und Resonanzfrequenz des Netzes bei der gleichen Frequenz aufeinander, entstehen Überspannungen (Resonanz).

Im besten Fall entsteht dank rechtzeitigen Schutzabschaltungen „nur“ eine grossflächige Betriebsstörung. Folgen können aber auch Schäden an elektrischen Teilen der Triebfahrzeuge und der Infrastruktur sein.

Ob Resonanzen auftreten, ist von vielen Faktoren abhängig. Anzahl Fahrzeuge, Ort der Fahrzeuge, Fahrzeugtyp, Schaltzustand des Netzes und eingesetzte Kraftwerke haben einen Einfluss. Alle diese Faktoren müssen derart aufeinander abgestimmt sein, dass im normalen Netzbetrieb wie auch bei allen realistisch anzunehmenden speziellen Netzzuständen (Sonderschaltungen) keine Resonanzen auftreten.

Durch den Einbau von weiteren Kabeln in das Hochspannungsnetz wird die Resonanzfrequenz gesenkt. Es gibt heute aufgrund von Gleisstromkreisen bei 103Hz eine klar definierte Grenze, welche die Resonanzfrequenz in keinem Fall unterschreiten darf (auch bei Speziialschaltungen wie z.B. Inselbildungen). Mit den bereits verbauten Kabeln und den weiteren fest eingeplanten Kabeln (zum Grossteil bereits im Plangenehmigungsverfahren oder im Bau) wird diese Grenze bei ungünstigen Verhältnissen erreicht.

Nach heutigem Stand der Technik ist die absolute Grenze, unterhalb der sich das Bahnstromnetz nicht mehr stabil betreiben lässt, bei 87Hz (83.5Hz plus Sicherheitsmarge). Diese Frequenz entspricht der 5. Netzharmonischen, bei der Überspannungen aufgrund geringer Dämpfung nur sehr langsam abklingen. Um die Grenze der Resonanzfrequenz von heute 103Hz auf 87Hz senken zu können, müssen die Gleisstromkreise umgebaut, die Normen für Fahrzeuge angepasst und anschliessend sämtliche Fahrzeuge (inkl. denen des grenzüberschreitenden Verkehrs) den neuen Normen angepasst werden. Es handelt sich dabei um ein Thema mit einer europäischen, verkehrspolitischen Dimension, dessen Umsetzbarkeit noch völlig offen ist.

Mit den im vorliegenden Bericht beschriebenen Massnahmen haben die SBB einen Beitrag geleistet, einen Kabelanteil auf der höchsten Spannungsebene ihres Netzes zu ermöglichen, der in keinem der anderen grossen 16.7-Hz-Bahnstromnetze in Europa und auch in der höchsten Spannungsebene des 50-Hz-Netzes nur annähernd erreicht wird. Auch in Zukunft arbeiten die SBB in internationalen Gremien und mit Technischen Hochschulen und der Industrie daran, weitergehende Lösungen für das Resonanzproblem zu finden und sich so einen grösseren Handlungsspielraum für Verkabelungen zu schaffen. Solange diese Lösungen nicht absehbar sind, ist die Bahnstromversorgung in der Schweiz auf eine klare Begrenzung der Verkabelung angewiesen.

13. Anhang

13.1. Investitionskosten

Zum Vergleich der Investitionskosten von Kabel und Freileitungen sind im Folgenden einige Ausführungskosten (bzw. Kostenvoranschläge bei Projekten kurz vor Ausführung) von in letzter Zeit ausgeführten Kabel- und Freileitungsprojekten dargestellt. Auswahlkriterien waren:

- Bei Freileitungsverbindungen nur Projekte, bei denen SBB alleine baut. Gemeinschaftsprojekte fallen deutlich günstiger aus.
- Bei Kabelverbindungen keine Kabel in Strassen- oder Bahntunnel, da sich die Kosten je nach Kostenteiler dadurch verfälschen (eher zu Ungunsten der Kabelverbindung)

Investitionskosten SBB-Freileitungsprojekte

	Länge Trasse in km	Anzahl Schleifen	Totale Kosten CHF Mio	Kosten in Mio Fr./km	Bemerkungen
Wurmsbach-Ricken	11.5	2	9.7	0.8	Kostenvoranschlag
Kleinbödingen-Ried	7.3	2	3.5	0.5	relativ ebene Kulturlandschaft, wenig Abspannmasten, tatsächliche Baukosten

Investitionskosten SBB-Kabelprojekte

	Länge Trasse in km	Anzahl Schleifen	Totale Kosten CHF Mio	Kosten in Mio Fr./km	Bemerkungen
2. Anschluss Olten, Winznau-Olten	1.3	2	3.6	2.8	Bauprojekt +/- 10%, IBN 2012
Rapperswil- Wurmsbach	3.2	2	7	2.2	Bauprojekt +/- 15% inkl. Abschnitt Horizontalbohrung rund 200 m; Kosten gemäss Detailprojekt
DML, Seebach-Zürich, Wipkingen-Depot G	1.4	2	4.4	3.1	Bauprojekt +/- 10%. Inkl.: 80 m Horizontalbohrung und 100 m Pressung. Exkl: Abbruch Freileitung CHF 0.5 Mio., 1 Reservekabel bereits vorhanden (CHF 154000) verwendet->aufgerechnet
DML, Seebach-Zürich, Depot G-UW Zürich	0.6	2	2.7	4.5	Bauprojekt +/- 10%, exkl. Abbruch Freileitung 200kFr., inkl. Beiträge DML

Die Investitionskosten der Dämpfungsglieder zur Stabilisierung des Lötschbergkabels betragen 5 Mio. CHF für insgesamt 12 Elemente. Müssen Dämpfungsglieder eingesetzt werden, so erhöhen sich die Investitionskosten von Kabelverbindungen um ca. 417'000.-CHF pro Dämpfungsglied.

Fazit: Die Investitionskosten der Kabelverbindungen der SBB sind durchgängig höher als von SBB-eigenen Freileitungen.

13.2. Energieverluste

Die Energieverluste zwischen Kabel und Freileitung werden hier exemplarisch für die Leitung zwischen Mitholz und Gampel (Lötschberg Basistunnel) betrachtet.

Länge: 29.93 km

Strom: 120.2A (gemessener Mittelwert des Stromes von 2011)

Verluste im Kabel

Querschnitt Kupferleiter: 630mm²

Widerstandsbelag: 0.0283 Ω/km (Quelle: Datenblatt Nexans an BLS AlpTransit, 13.02.2007)

$$P_{vK} = R' * 2 * l * I^2 = 0.0283 * 2 * 29.93 * 120.2^2 = 24.47kW$$

$$E_{vK} = 24 * 365 * P_{vK} = 8760 * 24.47 = 214.14MWh$$

Verluste in den Dämpfungsgliedern

Anrechnung der Verluste von 9 Dämpfungsglieder à 5kW für den Lötschbergbasistunnel

$$P_{vD} = 9 * 5kW = 45kW$$

$$E_{vD} = 24 * 365 * P_{vD} = 8760 * 45 = 394.2MWh$$

Verluste in der Freileitung

Querschnitt Leiter: 600mm² (AlMgSi)

Widerstandsbelag: 0.0531 Ω/km (Quelle: Datenblatt Lumpi-Berndorf 600-AL3, 12.10.2011)

Wegen der besseren Kühlung der Freileitungen und auch zur Minimierung der Investitionskosten werden im vorliegenden Beispiel für die gleiche Leistungsdimensionierung ein kleinerer Querschnitt und ein anderes Material verwendet. Prinzipiell könnte die Freileitung aber auch mit höherem Querschnitt gebaut werden.

$$P_{vF} = R' * 2 * l * I^2 = 0.0531 * 2 * 29.93 * 120.2^2 = 45.92kW$$

$$E_{vF} = 24 * 365 * P_{vF} = 8760 * 45.92 = 402.29MWh$$

Fazit

Trotz der tiefen Durchschnittsbelastung dieser exemplarischen Leitung betragen die Verluste des Kabels nur etwa die Hälfte (ca. 53%) der Verluste einer Freileitung. Zu beachten gilt dabei, dass die Verlustberechnung mit heute üblichen Querschnitten gemacht wurde. Mit einer Erhöhung des Querschnittes der Freileitung (analog dem Kabelquerschnitt) könnten die Verluste auf das Niveau des Kabels gesenkt werden.

Die zum Betrieb des Kabels zwingend notwendigen Dämpfungsglieder erhöhen die Verluste des Kabels über das Niveau der Freileitung.

	Kabel (ohne Dämpfung)	Kabel (inkl. Dämpfung)	Freileitung
Energieverlust in MWh	214.14	608.34	402.29

Im Ergebnis kann als Grössenordnung angenommen werden:

- die Energieverluste des Lötschbergkabels alleine betragen ca. die Hälfte einer Freileitungsverbindung gleicher Länge.
- durch den Einsatz von Dämpfungsgliedern steigt der Energieverlust über das Niveau der Freileitung an.

Es ist aber zu beachten, dass aus einem Einzelbeispiel keine allgemein gültigen Schlüsse gezogen werden dürfen. Der Grund liegt in der quadratischen Abhängigkeit der Verluste von der Auslastung der Leitung, und in der nicht immer gleichen Anzahl benötigter Dämpfungsglieder. Ein Vergleich der Verluste muss daher im Einzelfall geprüft werden.

13.3. Eigenschaften von Kabelsiphons

Ein Kabelsiphon ist eine Kabelstrecke in einem Freileitungsabschnitt. Die Fachkommission für Hochspannungsfragen (FKH) beurteilt die elektrotechnischen Kriterien in einem Bericht vom 2. Mai 2011 so [14]: „Mit der Anzahl der Kabelstrecken steigt die Anzahl der Komponenten (Kabel, Kabel-Freiluftendverschlüsse, Überspannungsableiter“. Die Störanfälligkeit steigt, wie die FKH ausführt: *“.. insbesondere die Kabel-Freiluftendverschlüsse tragen wesentlich zu den beobachteten Ausfallzahlen bei.“*

Ausfallzeit von Kabelanlagen

Massgebend für die Ausfallzeiten beim Ersatz gestörter oder beschädigter Kabel sind:

Die Montagezeit: sie beträgt bei einer Kabelanlage typischerweise 6 Wochen.

Die Herstellungszeit des Ersatzmaterials (Kabel, Endmuffen, Überspannungsableiter): sie beträgt oft mehrere Monate. Wie die SBB-Praxisfälle unten zeigen, sind beschädigte Kabelverbindungen oft während Monaten bis zu einem halben Jahr unterbrochen.

Die Erreichbarkeit des Kabeltrassees: Am günstigsten ist eine Trasse unabhängig von anderen Infrastruktur-Anlagen. Bei der SBB verlaufen Kabeltrassen oft durch Eisenbahntunnel. Es muss ein Intervall für die Reparatur beantragt werden. Solche Intervalle sind mit dem zunehmenden Bahnverkehr immer schwieriger zu erhalten. Auch bei Trassen unter Strassen (z.B. die 132kV-Verbindung Winznau-Olten durch den Rankwoog-Kreisel oder die 132kV-Verbindung Mels-Sargans entlang der Autobahn): Bei Defekten in diesen Abschnitten, ist die Zugänglichkeit bei den verantwortlichen Stellen des Kantons zu beantragen.

13.3.1. Beschädigung Simplonkabel durch Bauarbeiten Dritter 2012

Während der Sanierungsarbeiten Ende August 2012 an der Sohle der Station Mitte des Simplontunnels wurde das Kabel gleich vier Mal mechanisch verletzt und musste ausser Betrieb genommen werden.

Ein Schaden ereignete sich, als ein Arbeiter mit einer schweren Fräsmaschine die Sohle des Tunnels bearbeitete. Der Fräskopf stiess auf ein Hindernis, wobei die Fräsmaschine an die in der Nähe befindlichen 132kV-Kabel geschleudert wurde und diese verletzte.

Die drei anderen Schäden wurden beim temporären Umlegen der Kabel verursacht. Die seit 1968 im Kabelkanal befindlichen Kabel haben sich wegen Betonwasser und Schmutz mit den Kanälen verbunden. Beim „Befreien“ der Kabel wurde diese mechanisch beschädigt.

Die Schäden haben zur Konsequenz, dass der Simplontunnel und die Simplonsüdrampe während rund vier Wochen ohne Redundanz betrieben werden muss (Stand 7. September 2012, Reparatur noch nicht umgesetzt). Würde die verbleibende 132kV-Schleife unterbrochen, hätte dies einen schwerwiegenden Einfluss auf den Fahrplan dieser Region.

13.3.2. Brand Simplontunnel 2011

Am 6. Juni 2011 brannte im Simplontunnel II ein Güterzug. Im Brandabschnitt wurde die gesamte Tunnelausrüstung beschädigt, darunter auch die 132kV-Schleife der SBB-Verbindung Massaboden-Varzo. Das Öl-Papier-Kabel musste auf einer Länge von rund drei Kilometern neu fabriziert werden. Ende November 2011 konnte die Schleife wieder in Betrieb genommen werden. Die Verbindung stand während 6 Monaten nicht zur Verfügung.

13.3.3. Zugentgleisung Simplon 2006

Im Herbst 2006 entgleiste in der Nähe des Nordportals des Simplontunnels ein Zug. Dieser beschädigte den Betonkanal der 132kV-Kabelanlage. Auch das im Kanal liegende Kabel wurde beschädigt, und musste ausgetauscht werden. Ersatzkabeln waren verfügbar, jedoch stellte es sich als schwierig heraus, die Reparaturarbeiten im Tunnel auszuführen, ohne den Bahnbetrieb der wichtigen Nord-Südverbindung zu stören. Eine 132kV-Kabelschleife war wegen dieses Zwischenfalls während rund drei Monaten ausser Betrieb.

13.3.4. Materialdefekt bei Verkabelung Seebach-Zürich

Bei der Inbetriebnahme 2007 der neu installierten Kabel der 132-kV-Verbindung Seebach-Zürich im Bereich Oerlikon trat beim zu prüfenden Kabel ein Kurzschluss auf. Dies, weil ein Wassereinschluss unter dem Kabelmantel vorlag. Da es sich um ein heikles Projekt handelte, war ein Reservekabel für

den Notfall vorbereitet. Der Ersatz des fehlerhaften Kabels konnte erst in späteren Intervallen vorgenommen werden, die beschädigte Schleife blieb unterbrochen und die Inbetriebnahme verzögerte sich um rund 9 Wochen.

13.3.5. Schadenfall Kerenzberg-Tunnel

Auf der 66kV-Übertragungsleitung Etzelwerk-Sargans ereignete sich 2009 ein Kurzschluss an einem Kabelendverschluss. Glücklicherweise lag die Fehlerstelle ausserhalb der Tunnelröhre und beeinträchtigte so den Bahnverkehr durch den Tunnel nicht. Die Neu-Produktion der Endverschlüsse führte jedoch zu einer Gesamtausfallzeit von rund vier Monaten.