

Statische Bahnstromumrichter – Definition von Störstromanforderungen

1. Systembeschreibung

1.1. Übersicht

Die Abbildung 1 zeigt die einfachste mögliche Systemübersicht, mit dem Umrichter, einer einzigen Fahrleitung, und einem Triebfahrzeug. Der Umrichter speist direkt in die Fahrleitung. Rechts ist das ganze System dargestellt, links ist der Umrichter vom Netz getrennt.

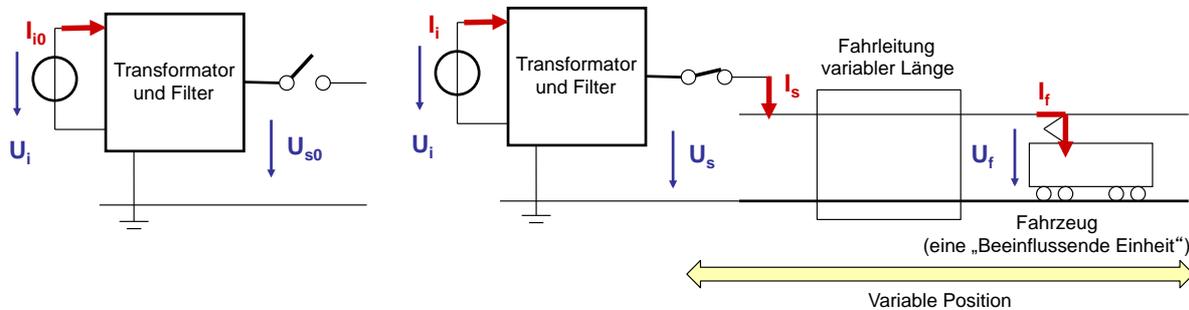


Abbildung 1 - Umrichter vom Netz getrennt sowie mit Netz und Fahrzeugen verbunden

1.2. Umrichter

Der Umrichter besteht aus einer inneren Spannungsquelle U_i und einem Block aus Transformator und Filter. Die innere Spannungsquelle muss nicht eine einzige, konkret im Umrichter vorhandene Quelle sein. Je nach Bauart des Umrichters kann sie – im Sinne der Quellenüberlagerung – aus mehreren Modulspannungen eines Zwischenkreisumrichters oder den Zweigspannungen eines Direktumrichters zusammengesetzt sein.

Dasselbe gilt für den Block aus passiven Komponenten, hier bezeichnet als „Transformator und Filter“. Es muss kein Filter vorhanden sein, und bei einem Direktumrichter auch kein Transformator. Im Minimum besteht dieser Block aus einer Drosselspule. Der Block lässt sich in jedem Fall als lineares Netzwerk in einer einfachen Matrixgleichung darstellen:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ -I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{U,ii} & Y_{U,is} \\ Y_{U,si} & Y_{U,ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_s \end{bmatrix}$$

Dabei bedeuten:

U_i	Innere Umrichterspannung (bei mehreren Modulen zusammengesetzt aus den Spannungen aller Module)
U_s	Sammelschienenspannung
I_i	Innerer Umrichterstrom
I_s	Sammelschienestrom (positiv vom Umrichter ins Netz)
$Y_{U,ii}$	Verhältnis Umrichterstrom zu innerer Umrichterspannung, bei kurzgeschlossener Sammelschiene
$Y_{U,is}$	Verhältnis Umrichterstrom zu Sammelschienenspannung, bei kurzgeschlossener Umrichterspannung
$Y_{U,si}$	Verhältnis Sammelschienestrom zu innerer Umrichterspannung, bei kurzgeschlossener Sammelschiene
$Y_{U,ss}$	Verhältnis Sammelschienestrom zu Sammelschienenspannung, bei kurzgeschlossener Umrichterspannung

Ist der Umrichter vom Netz getrennt, bleibt die Admittanzmatrix unverändert. Auch die innere Spannung U_i ändert sich nicht, wenn die gleiche Grundschwingung vorgegeben wird. Dies gilt insbesondere bei Umrichtern, die als Spannungsquellen ohne schnelle Rückkoppelung des Stromes in die Regelung betrieben werden /6/.

$$\begin{bmatrix} I_{i0} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{U,ii} & Y_{U,is} \\ Y_{U,si} & Y_{U,ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_{s0} \end{bmatrix}$$

mit (zusätzlich gegenüber oben)

I_{i0}	Innerer Umrichterstrom bei offener Sammelschiene
U_{s0}	Sammelschienenspannung bei offener Sammelschiene

Die Definition der Eigenschaften des Umrichters (Spektrum der inneren Spannung, Anordnung und Impedanzen der passiven Komponenten) liegen in der Verantwortung des Umrichterherstellers. Die Admittanzmatrix lässt sich auch durch den Netzbetreiber nachrechnen, aufgrund der Anordnung (Schaltschema) und der Typentestprotokolle der Elemente.

1.3. Leitungen

Die Fahrleitungen dienen als Übertragungspfad zwischen Umrichter und Fahrzeug. Die Leitungen sind als resonant zu betrachten, was im Tonfrequenzbereich zu einer beträchtlichen Verstärkung von Störströmen und -spannungen führen kann. Bei der Auslegung eines Umrichters für beliebige Netze, aber auch bei Schaltungsänderung in einem gegebenen Netz und unter dem Einfluss verschiedener Triebfahrzeugimpedanzen ändern sich die Resonanzfrequenzen. Zeitlich kann eine Resonanzfrequenz aber beliebig lange bei einer Frequenz verweilen. Man muss deshalb bei der Auslegung des Umrichters bei jeder im Netz vorhandenen Tonfrequenz-Arbeitsfrequenz eines Gleisstromkreises mit der maximal möglichen Verstärkung durch Resonanzen rechnen.

Auch die Leitung lässt sich als Zweipol mit einer Matrixgleichung beschreiben. Sie bestimmt aus den Spannungen U_s an der Sammelschiene und U_f am Fahrzeug die entsprechenden Ströme:

$$\begin{bmatrix} I_s \\ -I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{L,ss} & Y_{L,sf} \\ Y_{L,fs} & Y_{L,ff} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_s \\ U_f \end{bmatrix}$$

mit (zusätzlich gegenüber oben)

U_f	Spannung am Ort des Fahrzeugs
I_f	Strom des Fahrzeugs (positiv vom Netz ins Fahrzeug)
$Y_{L,ss}$	Verhältnis Sammelschienensstrom zu Sammelschienenspannung, bei kurzgeschlossenem Fahrzeug
$Y_{L,sf}$	Verhältnis Sammelschienensstrom zu Spannung am Fahrzeug, bei kurzgeschlossener Sammelschiene
$Y_{L,fs}$	Verhältnis Fahrzeugstrom zu zu Sammelschienenspannung, bei kurzgeschlossenem Fahrzeug
$Y_{L,ff}$	Verhältnis Fahrzeugstrom zu Spannung am Fahrzeug, bei kurzgeschlossener Sammelschiene

Die Eigenschaften einer Leitung ergeben sich aus den Leiterquerschnitten, -materialien und der Geometrie der Leiteranordnung. Sie variieren also von Strecke zu Strecke. Im Hinblick die Definition an die Anforderungen für Umrichter müssen die Eigenschaften aber normiert werden. Für die folgenden Betrachtungen wird eine eingleisige Strecke mit Erdseil verwendet. Wird ihre von der 15-kV-Sammelschiene aus gesehene Eingangsadmittanz ($Y_{L,ss}$ = Verhältnis I_s / U_s wenn $U_f = 0$) berechnet, so sieht sie für eine willkürlich gewählte Leitungslänge wie folgt aus:

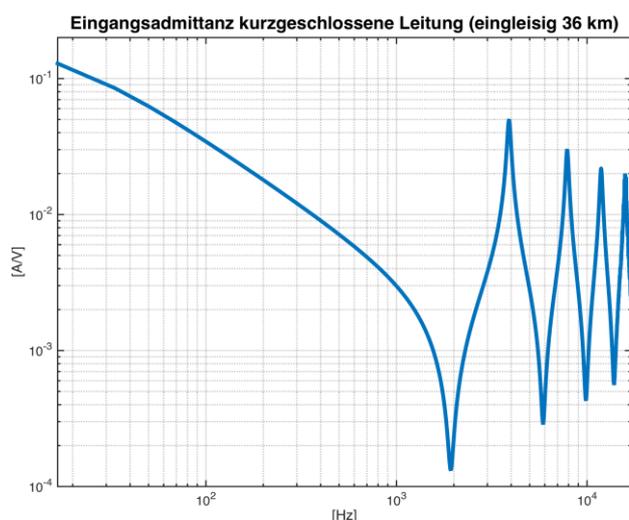


Abbildung 2 - Admittanz-Frequenzgang einer eingleisigen Bahnstrecke (Modellrechnung)

Der Verlauf ist ähnlich wie die in /2/ (TS 50238-2:2020, Anhang C.3 für ein 25-kV-, 50-Hz-AT-System) dargestellten gemessenen Netzadmittanzen. Allerdings sind dort die Impedanzen des Unterwerktrafos inbegriffen, hier nicht. Die

Dämpfung von Resonanzen ist frequenzabhängig. Dieser Verlauf kann als typisch für Bahnfahrleitungen angesehen werden. Er deckt jedoch nicht alle denkbaren „Worst Cases“ ab. Für weitere Beispiele siehe /8/ (Lötschberg-Basistunnel) sowie /9/ (SBB-Verbundnetz sowie HSL Zuid).

1.4. Fahrzeuge

Rückströme können nur in die Gleisstromkreise fließen, wenn Fahrzeuge im Netz sind. Im Sinne der Quellenüberlagerung treten die Fahrzeuge mit ihrer vom Netz her gesehenen Eingangsimpedanz oder -admittanz auf. Zur Herleitung des „Worst Case“ genügt es, die passiven Admittanzen zu verwenden, also eine eventuelle aktive Störstromunterdrückung zu vernachlässigen. Ebenso genügt es, bei jeder Frequenz die jeweils größtmögliche Admittanz zu berücksichtigen. Diese ergibt sich einerseits aus der kleinsten Trafostreuinduktivität (wobei hier alle in einer „Beeinflussenden Einheit“ BE parallelgeschalteten Trafos zu berücksichtigen sind) und der größtmöglichen Kapazität von Hochspannungskabeln, welche die Stromabnehmer, Hauptschalter und Transformatoren der BE verbinden:

$$Y_f = 1 / (j 2\pi f L_T) \quad Y_f = j 2\pi f C_K$$

Die Werte müssen für ein normiertes Vorgehen einheitlich festgelegt werden. Für die weiteren Betrachtungen werden die folgenden Werte gewählt:

- Für die Induktivität L_T : eine Nenn-Scheinleistung von 20 MVA für die BE (z.B. ein Hochgeschwindigkeitszug von 400 m Länge) und eine relative Kurzschlussspannung von 20 % (typischer Wert für Fahrzeugtransformatoren). Dies entspricht 21.5 mH an 15 kV. Es gibt heute keine normierte Grenze für die minimale induktive Fahrzeug-Eingangsimpedanz. Gerundet wird ein Wert von 20 mH verwendet.
- Für die Kabelkapazität C_K : eine typische spezifische Kapazität von 200 nF/km und eine maximale Zuglänge von 400 m, folglich 80 nF. Es gibt heute keine normierte Grenze für die maximale Eingangskapazität von Fahrzeugen. Künftig wird ein Grenzwert notwendig sein, um die Kompatibilität im Gesamtsystem sicherzustellen, wenn für jedes einzelne Element Schnittstellen-Anforderungen aufgestellt werden.

Es ergeben sich die folgenden Verläufe für Y_f (Abbildung 3):

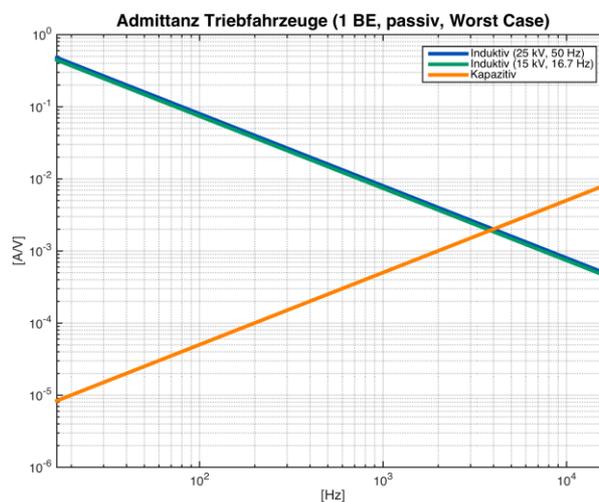


Abbildung 3 - Admittanz-Frequenzgang von Fahrzeugen (angenommener Worst Case)

1.5. Gleisstromkreise

Zur Definition der Störstrom- bzw. Störspannungsanforderungen für Umrichter müssen diejenigen Typen von Gleisstromkreisen berücksichtigt werden, die im Speisebereich des Umrichters liegen. Somit sind die Störstromanforderungen an den gesamten Rückstrom eines Zuges, d.h. einer „Beeinflussenden Einheit“ BE, bekannt /2/, /3/, /4/, /5/. Sie sind für jede Arbeitsfrequenz f_0 definiert durch den Stromwert I_0 , die Filterkurve (Bandpassfilter) mit Bandbreite und Filterordnung sowie die Integrationszeit T .

Zu beachten ist nun, dass der volle Grenzwert von der BE bereits an einer sinusförmigen Spannung voll ausgeschöpft werden darf. Der Gesamt-Rückstrom der BE entsteht aber durch die Wirkung der BE selbst plus durch den Anteil des Umrichters. Somit bleibt für den Umrichter theoretisch keine zulässige Störstromerzeugung übrig.

Dieser Widerspruch lässt sich nur lösen, wenn für den Umrichter für den Ort der BE ein relativer Anteil k_I definiert wird, der so begrenzt wird, dass nach den etablierten Superpositionsregeln keine nennenswerte Erhöhung des Störstroms im Rückstrom der BE zu erwarten ist.

Für die folgenden Untersuchungen werden deshalb folgende Annahmen getroffen:

- die Störstromerzeugung von Umrichter und Triebfahrzeugen (BE) sind sowohl in Amplitude als auch in Phase vollständig unkorreliert; damit ist das Wurzelgesetz anwendbar
- dem Umrichter wird $k_I = 0.3$ zugestanden
- damit beträgt der maximale, relative Erwartungswert am Ort der BE $\sqrt{1 + 0.3^2} = 1.044$

Bemerkungen: Der Umrichter selbst wird nicht als BE behandelt. Er liegt zwar im Stromkreis Quelle – Übertragungsnetz – Fahrzeug und trägt somit zum Störstrom der BE bei. Der Strom des Umrichters ist aber ohne Bedeutung. Einerseits sind die Erdungsverhältnisse völlig anders (der Umrichter steht nicht direkt mit Gleisstromkreisen in Verbindung, sondern nur über die Fahrzeuge). Andererseits speist ein Umrichter gewöhnlich mehrere Strecken, d.h. sein Strom enthält den Gesamtstrom mehrerer BE. Dieser darf nicht gegen die Grenzwerte für eine einzige BE bewertet werden. Für die Herleitung der Grenzwerte für den Umrichter ist der Fall mit nur einer BE am kritischsten. Befinden sich mehrere BEs im Netz, so wird der vom Umrichter erzeugte und durch seine eigene Impedanz limitierte Anteil auf mehrere BEs aufgeteilt (Stromteiler-Effekt).

2. Berechnungen

2.1. Relativer Störstrom am Ort der Fahrzeuge

2.1.1. Methode

Vor der Definition von Anforderungen an den Umrichter wird das System zunächst für einige Fälle analysiert. Dabei wird berechnet, wieviel Strom der Umrichter unter gegebenen Verhältnissen erzeugt (Speisung auf eine Fahrleitung gegebener Länge, Fahrzeug mit gegebener Admittanz an einem gegebenen Standort), und zwar relativ, bezogen auf 1 V innere Umrichterspannung. Dieses Verhältnis lässt sich für einen gegebenen Umrichter als Frequenzgang bestimmen.

Im nächsten Schritt werden der Fahrzeugstandort und die Leitungslänge variiert. Dies ergibt eine Schar von Frequenzgängen (Abbildung 5, Abbildung 6) farbige Kurven in den Figuren unten).

Vergleichsweise wird auch der Strom berechnet, der in das Fahrzeug (bzw. die „Beeinflussende Einheit“ BE) fließt, wenn es keine Leitung zwischen Umrichter und Fahrzeug hat (grüne und orange Kurve).

Aus diesen einfach zu berechnenden Vergleichskurven (nur Umrichter und Fahrzeug, keine Leitung) kann eine obere Enveloppe bestimmt werden, welche von der jeweils ungünstigeren Fahrzeugadmittanz und einer frequenz-abhängigen, maximal zu erwartenden Resonanzverstärkung ausgeht (schwarze Kurve). Der Faktor für die Resonanzverstärkung ergibt sich aus den Resonanzen im Leitungsnetz ($Y_{L,ss}$, siehe oben) zusammen mit dem Umrichter. Er wird für alle Frequenzen oberhalb der tiefsten Resonanzfrequenz von Fahrleitungsnetzen (ca. 500 Hz) wie folgt angenommen (Abbildung 4):

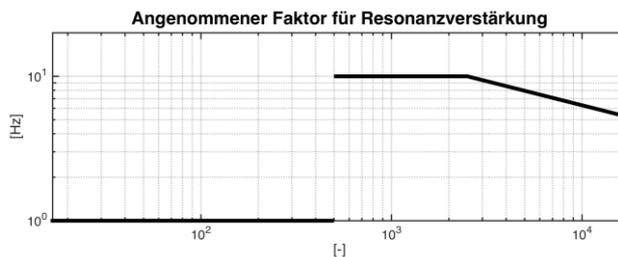


Abbildung 4 – Frequenzabhängiger Faktor für Resonanzverstärkung, vereinfachende Annahme

Die tiefste Resonanz entsteht dabei aus den Induktivitäten der Kraftwerke / Umrichter / Unterwerke, zusammen mit den verteilten Kapazitäten der Fahrleitungen und Speisekabel (siehe auch /8/).

Wie erwähnt wird nur einzelnes Fahrzeug im Netz betrachtet, was den „Worst Case“ darstellt. Sind mehrere Fahrzeuge vorhanden, teilt sich der vom Umrichter erzeugte Störstrom, der durch die Umrichterimpedanz begrenzt wird, auf die Fahrzeuge auf, was zu kleineren Strömen pro Fahrzeug führt.

2.1.2. Speisung ins Fahrleitungsnetz

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die Ergebnisse für einen Umrichter, der direkt ins 15-kV-Fahrleitungsnetz speist. Dabei handelt es sich um angenommene Umrichterparameter und nicht um ein existierendes Produkt. Der Umrichter kann ohne oder mit einem Filter an der Ausgangssammelschiene ausgerüstet sein.

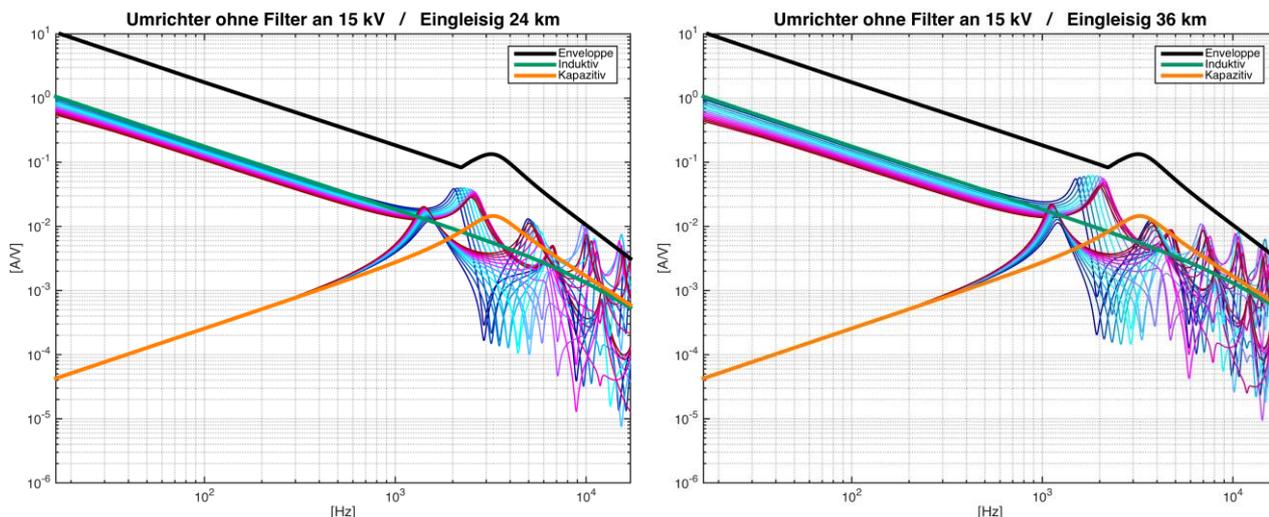


Abbildung 5 – Relativer Störstrom am Ort des Fahrzeugs bei Variation des Fahrzeugstandorts (blau bis violett), sowie nach dem Verfahren nach TR-EMV Teil 4. Umrichter ohne Filter, Speisung direkt auf 15 kV

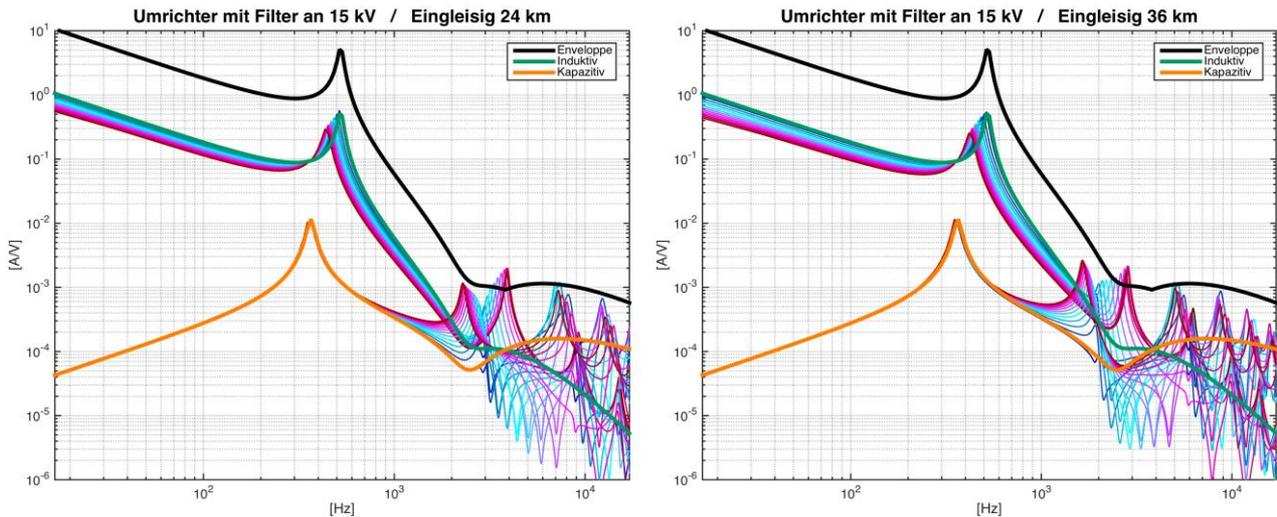


Abbildung 6 – Relativer Störstrom am Ort des Fahrzeugs, Umrichter mit Filter, Speisung direkt auf 15 kV

Gut erkennbar ist, dass die Enveloppe (die nur aus den Umrichter- und Fahrzeugparametern sowie dem Faktor für Resonanzverstärkung berechnet ist) in guter Näherung eine „vernünftige“ Obergrenze für die zu erwartenden Störströme pro Volt innere Umrichterspannung ist.

Eine kleinere Fahrzeug-Eingangskapazität oder größerer Eingangsinduktivität führt in jedem Fall zu geringeren, vom Umrichter erzeugten Störströmen, wie Vergleichsrechnungen gezeigt haben.

2.1.3. Speisung ins Hochspannungsnetz

Speist der Umrichter in ein Hochspannungsnetz ein (110 oder 132 kV), so kann die gleiche Methode zur Berechnung der größten erwarteten Störströme am Ort von Triebfahrzeugen angewendet werden. Zusätzlich zu berücksichtigen sind die Impedanz des Unterwerkstransformators, welche hier als rein induktiv angenommen wird, sowie eine Hochspannungsleitung von variabler Länge (Abbildung 7).

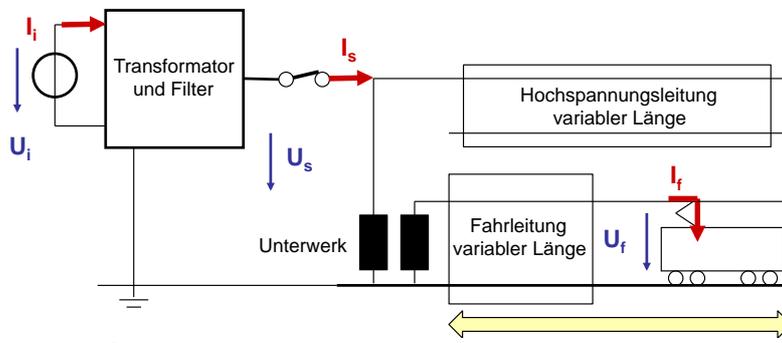


Abbildung 7 – Systemerweiterung um ein Hochspannungsnetz und Unterwerk

Die folgenden Diagramme in Abbildung 8 zeigen wiederum das Verhältnis Störstrom am Ort des Fahrzeugs zu innerer Umrichterspannung, zunächst ohne Hochspannungsleitung.

Auch hier ist die ohne Berücksichtigung des Fahrleitungsnetzes berechnete Enveloppe eine gute Näherung für die Eingrenzung der einzelnen Fälle.

Nicht einbezogen in die Untersuchung wurden Unterwerktrafos mit kapazitiven Kopplungen. Es darf angenommen werden, dass diese lediglich die Resonanzstellen verschieben, alle Ergebnisse aber immer noch in guter Näherung innerhalb der vereinfacht berechneten Umhüllenden liegen.

Hinweis: die absoluten Werte der Übertragungsfunktion dürfen nicht direkt zwischen den Fällen „Fahrleitungsnetz“ und „Hochspannungsnetz“ verglichen werden. Die Bezugsgröße (innere Umrichterspannung) ist vom Umrichtertyp abhängig, ebenso die Impedanzen und Übersetzungsverhältnisse des Umrichtertrafos.

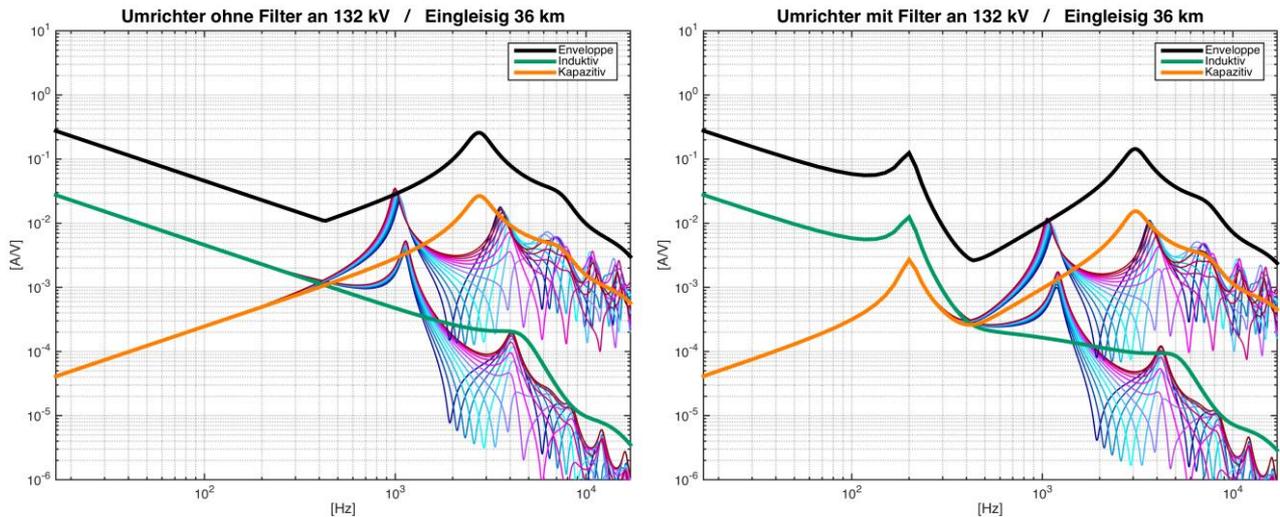
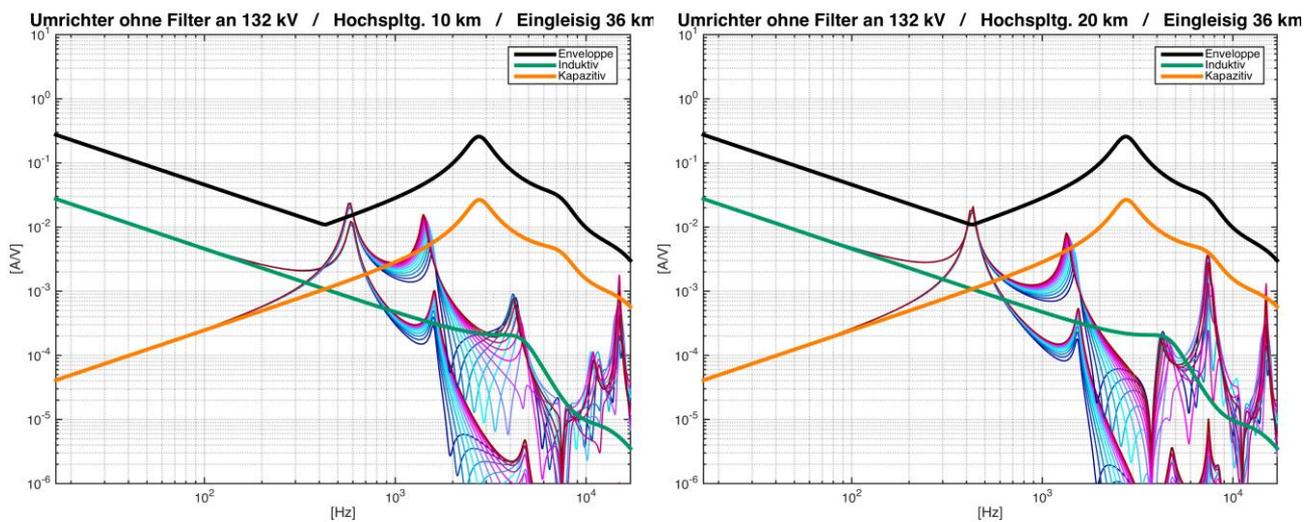


Abbildung 8 – Relativer Störstrom am Ort des Fahrzeugs, Umrichter ohne Filter, Speisung auf 132 kV, ohne Hochspannungsleitung

2.1.4. Einfluss von Hochspannungsleitungen

Wird das Netzmodell um eine Hochspannungsleitung an der Umrichtersammelschiene (also zwischen Umrichter und Unterwerkstrafo) ergänzt, so entstehen die in den folgenden Figuren gezeigten Ergebnisse. Sie gelten für eine Hochspannungsleitung von 10, 20 bzw. 100 km, sonst sind die Verhältnisse gleich wie oben.



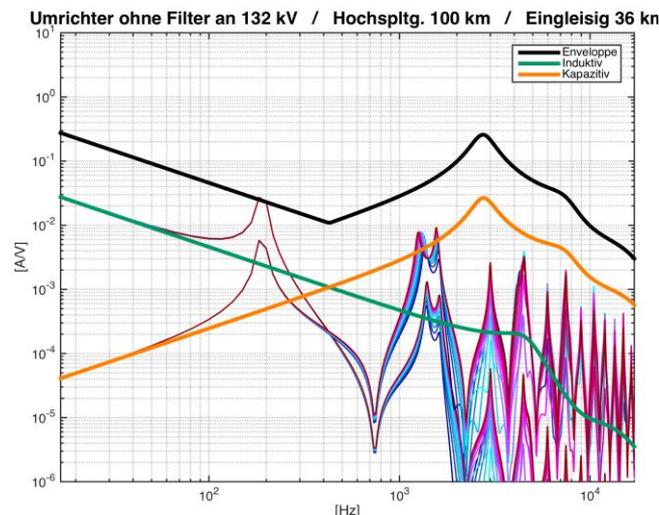


Abbildung 9 – Relativer Störstrom am Ort des Fahrzeugs, Umrücker ohne Filter, Speisung auf 132 kV, Hochspannungsleitung variabler Länge

Je länger die Hochspannungsleitung ist, desto tiefer liegt die (nun von der Hochspannungsseite dominierte) tiefste Resonanzfrequenz. Sie kann die typischen Werte zwischen 100 und 200 Hz erreichen.

Die Hochspannungsleitung wirkt mit ihrer Kapazität wie ein Zusatzfilter zwischen Umrücker und Fahrleitung. Oberhalb der tiefsten Resonanzfrequenz wird die Störstromübertragung vom Umrücker in den Rückstrom der Triebfahrzeuge deshalb erheblich abgeschwächt. Man sieht, dass oberhalb der tiefsten Resonanz im Hochspannungsnetz keine relevante Resonanzüberhöhung mehr gegenüber den Referenzfällen ohne Leitungen auftritt. Als Enveloppe bei Tonfrequenzen ergeben somit die ohne den Resonanz-Zuschlagsfaktor gerechneten Werte für kapazitive Fahrzeuge (orange) eine gute Näherung für die obere Grenze.

2.2. Zulässige Spannung am vom Netz getrennten Umrücker

2.2.1. Methode

Aus dem Betrieb des Umrückers mit Fahrleitungsnetz und Fahrzeugen (Enveloppe) kann nun aus den Matrixgleichungen zurückgerechnet werden, wie groß die zulässige harmonische Umrückerspannung U_i bei einem gegebenen Fahrzeugstrom I_f ist. Wird angenommen, dass diese Spannung bei gegebener Grundschiebungsamplitude unabhängig vom Laststrom ist (was bei Regelung als sinusförmige Spannungsquelle der Fall ist), so kann daraus vorwärts die maximale Spannung U_{s0} berechnet werden, die an der vom Netz getrennten Sammelschiene anliegen darf.

Die folgenden Figuren zeigen jeweils die entsprechende Funktion U_{s0} / I_f (gelbe Kurve) sowie die für die einzelnen Arbeitsfrequenzen der Gleisstromkreise abgeleiteten Grenzwert für U_{s0} (orange Dreiecke). Dabei gilt eine Ausnutzungszahl $k_1 = 0.3$ (unabhängig vom Typ des Gleisstromkreises) sowie die Annahme, dass über alle Frequenzen und Speisesysteme mit Resonanzverstärkung zu rechnen ist. Wird k_1 verändert, so ändern sich auch die zulässigen Grenzen proportional zu k_1 .

Hinterlegt ist zudem ein Beispiel für das Spektrum einer Sammelschienenspannung ohne Netz (grau; keine realen Produkte), sowie die dadurch aus einer Bandpassbewertung entsprechend der Auswertungsmethode von Rückströmen der Triebfahrzeuge abgeleiteten Spannungswerte (schwarze Sterne).

In den Figuren sind jeweils die Spektren und erreichten Werte für einen einzigen Arbeitspunkt des Umrückers gezeigt (Grundschiebungsspannung, Netzfrequenz). Der Nachweis muss selbstverständlich für alle betrieblich vorkommenden Arbeitspunkte erfolgen (Worst-Case-Spektrum), messtechnisch für die im Hauptdokument TR-EMV Teil 4 genannten.

2.2.2. Speisung ins Fahrleitungsnetz

Im gezeigten Beispiel dürfte ein Umrichter ohne Filter an der vom Netz getrennten 15-kV-Sammelschiene einen Spannungspegel von 0.72 bzw. 1.74 V (42 bzw. 100 Hz) und zwischen etwa 4 und 110 V aufweisen (Tonfrequenz-Gleisstromkreise). Das gezeigte Spektrum (Figur links) hält diese Anforderungen für die Tonfrequenzen nicht ein.

Wird der gleiche Umrichter mit einem Filter ausgerüstet (Abbildung 10 - rechts), ändern sich die zulässigen Spannungswerte. Dies zeigt die Notwendigkeit, dass diese Werte mit den in einem konkreten Projekt eingebauten Impedanzwerten für die Umrichteranlage berechnet werden müssen, und nicht abschließend in einer Spezifikation vorgegeben werden können. (Hinweis: in bisherigen Spezifikationen für einige Umrichterprojekte wurden Näherungen aufgrund gewisser Annahmen für die Impedanzen verwendet).

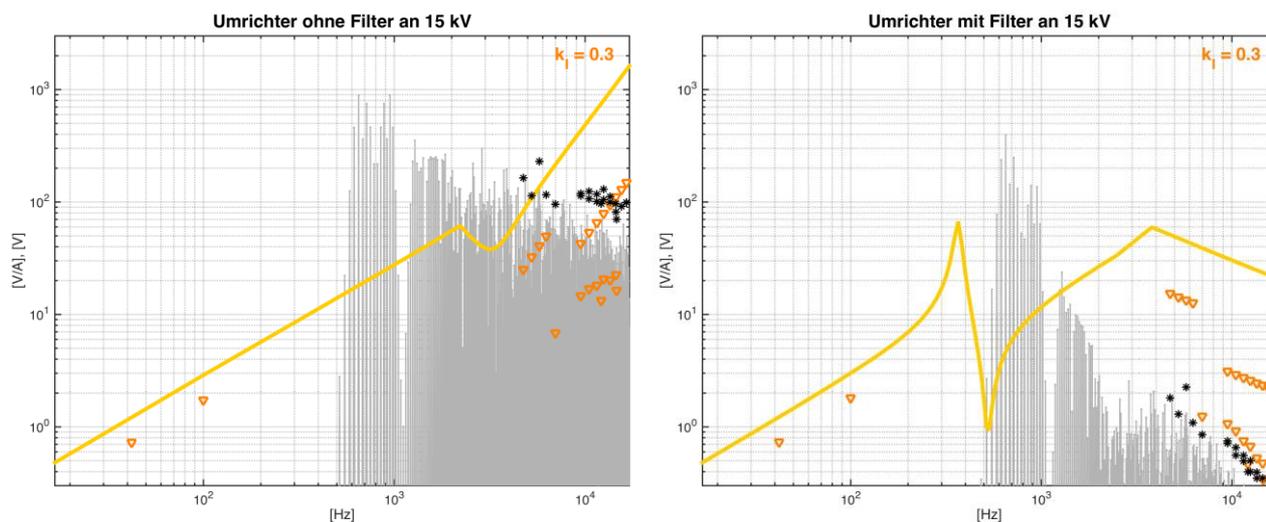


Abbildung 10 – Grenzwerte und erreichte Werte, Umrichter ohne und mit Filter, Speisung direkt auf 15 kV

Der Beispiel-Umrichter mit Filter hält die Anforderungen für die tieffrequenten und die FTGS-Frequenzen ein, ebenso für EON und GLS9/15. Pro memoria: es handelt sich nicht um reale Anlagedaten. Neben den passiven Elementen (Trafo, ggf. Filter) sind auch die Taktfrequenzen und -verfahren abweichend angenommen.

Rechenbeispiel: bei 4750 Hz beträgt der zulässige Gesamtstückstrom einer Beeinflussenden Einheit 1 A (erstes Band der Gleisstromkreise FTGS 46). Davon darf der Umrichter ohne Filter gemäss Annahme einen Anteil $k_I = 0.3$ erzeugen, also 300 mA. Nach der ersten Figur links im Kapitel 0 erzeugt er maximal 60 mA pro Volt innere Umrichterspannung. Die innere Umrichterspannung darf also maximal 5 V betragen. Da der Umrichter kein Filter hat, übersetzt sich diese bei den gewählten Parametern (Trafoübersetzung ca. 15 kV / 3 kV) um den Faktor 5 auf die vom Netz getrennte 15-kV-Sammelschiene. Somit beträgt der Grenzwert an der vom Netz getrennten Sammelschiene bei 4750 Hz rund 25 V. Enthält der Umrichter ein Filter, ist dieses bei der Zurückrechnung von der inneren auf die Sammelschienenenspannung zu berücksichtigen, was eine frequenzabhängige Übersetzung ergibt.

2.2.3. Speisung ins Hochspannungsnetz

Bei Speisung ins Hochspannungsnetz ergeben sich wie erwartet rund 8- bis 10-mal höhere Spannungspegel:

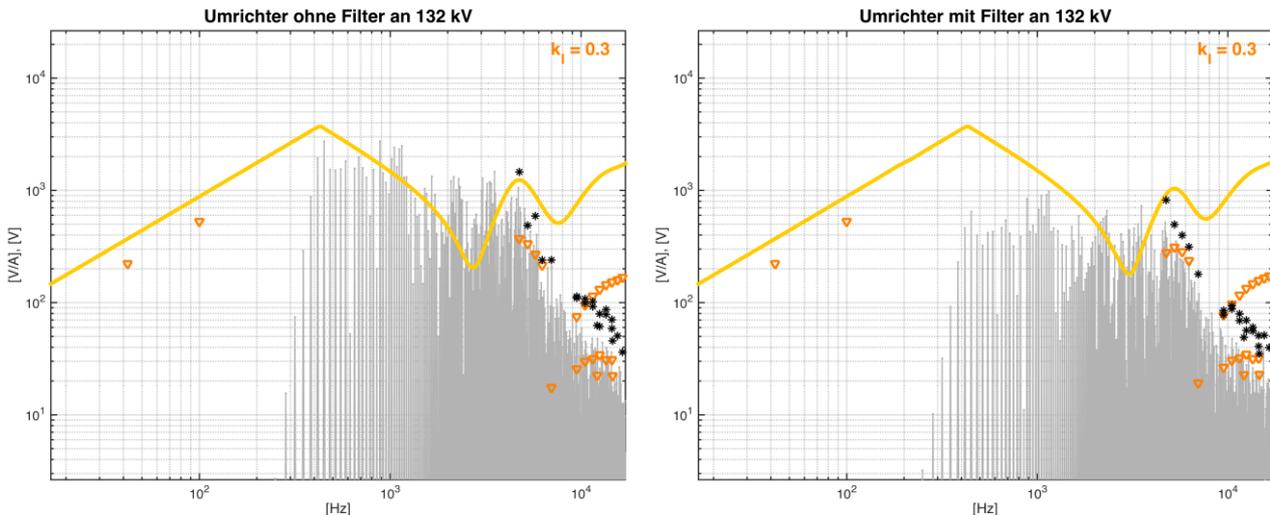


Abbildung 11 – Grenzwert und erreichte Werte, Umrichter ohne und mit Filter, Speisung auf 132 kV

Beide Umrichter würden die Anforderungen bei Tonfrequenzen nicht überall einhalten. Nicht berücksichtigt ist dabei aber, dass bei Einspeisung in Hochspannungsnetze auf den Faktor für Resonanzverstärkung verzichtet werden darf. Berücksichtigt man dies, wären die zulässigen Limiten bis 2.5 kHz um Faktor 10, darüber abnehmend bis immer noch Faktor 3 höher.

2.2.4. Reelle oder komplexe Fahrzeugimpedanz

Werden die Fahrzeugimpedanzen (entsprechend 20 mH, 80 nF) in jedem Fall komplex in die Rechnungen eingesetzt, können sich Resonanzen zwischen Umrichter und Fahrzeug ergeben. Dies kann die Spannungsgrenzwerte verfälschen, da diese Resonanzen bereits durch den Resonanzfaktor abgedeckt sind.

Verdeutlicht wir das durch die folgenden Impedanzverläufe. Gezeigt ist jeweils die innere Umrichterspannung U_i bezogen auf den Fahrzeugstrom I_r . Die durchgezogenen Linien zeigen die Rechnung mit komplexer Zugimpedanz, die gestrichelten mit reeller Fahrzeugimpedanz. Die linke Figur gilt für den Umrichter als einfache Längsimpedanz, die rechte für den Umrichter als LC-Schaltung. Die Umrichterinduktivität beträgt 10 mH, die Umrichterkapazität 10 μ F.

Man sieht, dass die Vereinfachung den gewünschten Effekt hat, die Resonanz zwischen Umrichter und Zug zu eliminieren. Im unteren Frequenzbereich bewirkt sie aber eine konstante Abweichung für den induktiven Zug. Daher wird die im Hauptdokument der TR-EMV Teil 4 beschriebene Fallunterscheidung benötigt.

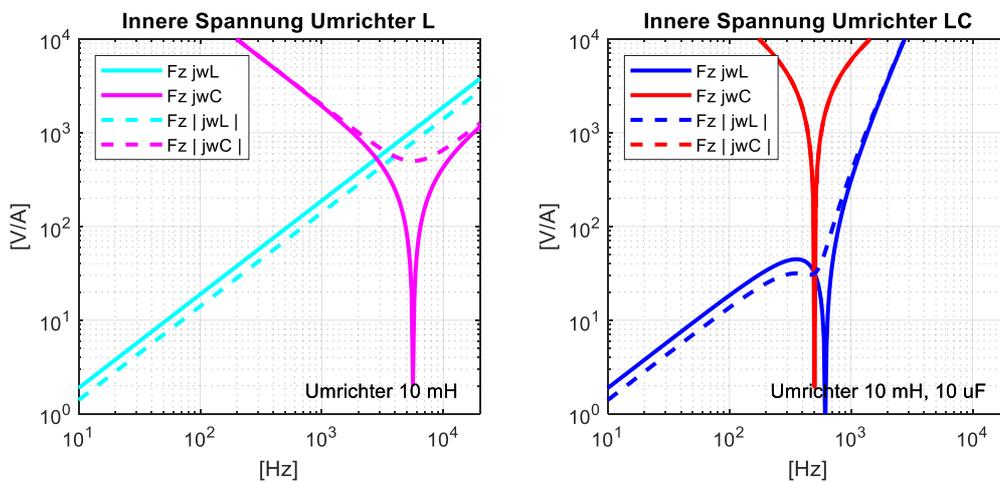


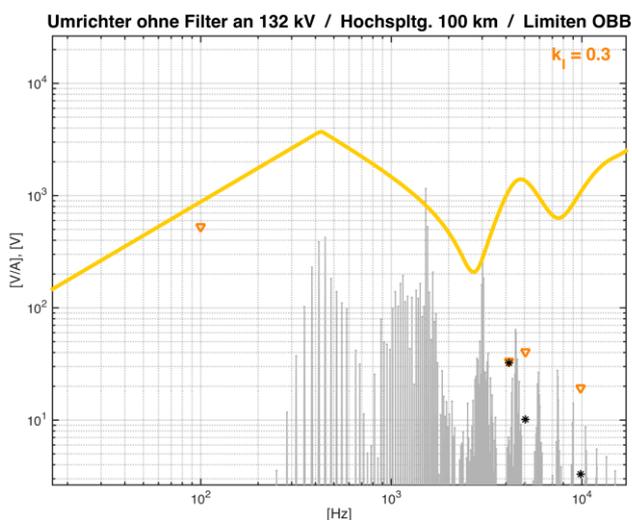
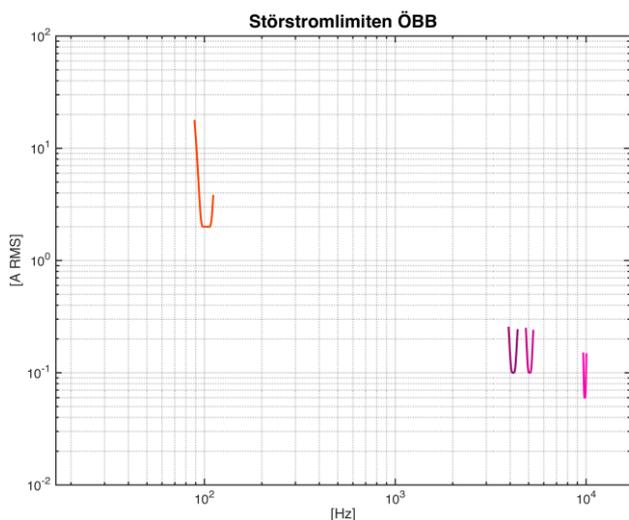
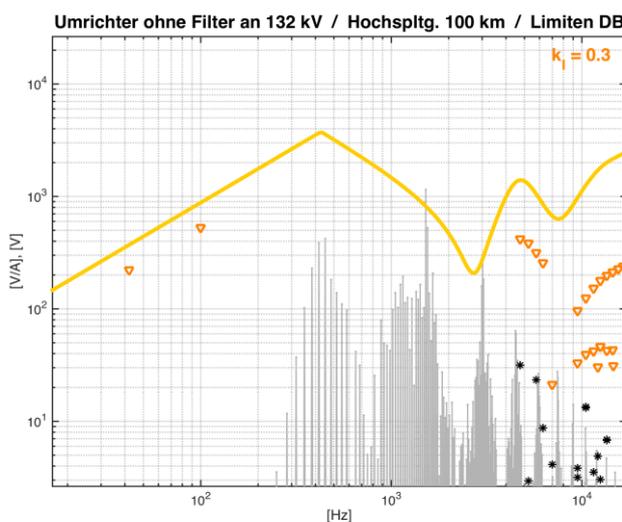
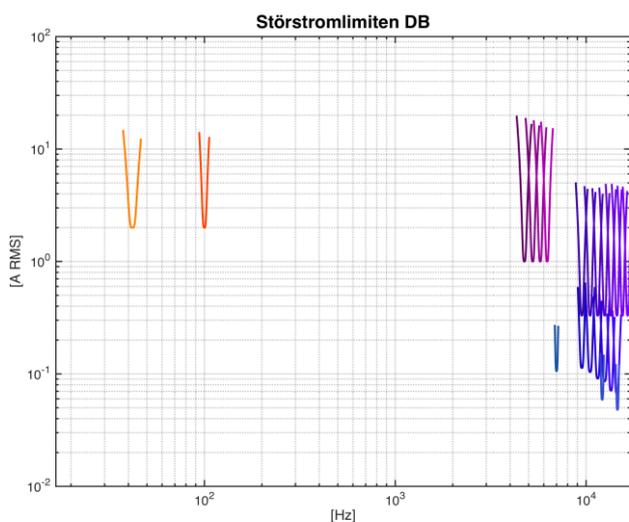
Abbildung 12 – Auswirkung der Rechnung mit komplexer oder reeller Fahrzeugimpedanz

2.2.5. Vergleich der DB-, ÖBB- und SBB-Störspannungsgrenzen

Unter den gleichen Annahmen (überall an 132 kV, und Resonanzverstärkung möglich), zusätzlich aber bei paralleler Speisung einer 100 km langen Hochspannungsleitung, ergeben sich die folgenden Resultate für die erwarteten Pegel an der Sammelschiene (schwarze Sterne), hier im Vergleich für die DB-, ÖBB- und SBB-Störstrom- / Störspannungsgrenzen [3/, /4/, /5/]. Es zeigt sich, dass die Hochspannungsleitung zu einer starken Abschwächung der Pegel im Tonfrequenzbereich führt.

Der Umrichter hält unter diesen Voraussetzungen (Speisung in eine Hochspannungsleitung) die Anforderungen auch mit dem Abschlagsfaktor für die Resonanzanregung ein. Für die Nachweismessung wird aber geeigneter Weise die vom Netz getrennte Sammelschiene, dafür ohne Resonanzfaktor verwendet.

Hinweis: Generell soll die Messung an der ausspeisenden Stelle, möglichst nahe am Umrichter erfolgen, beispielsweise also von längeren Kabelstrecken und getrennt von umfangreicheren Sammelschienen in einem Werk. Der im vorliegenden Dokument verwendete Begriff „Sammelschiene“ bezieht sich auf diesen Ort.



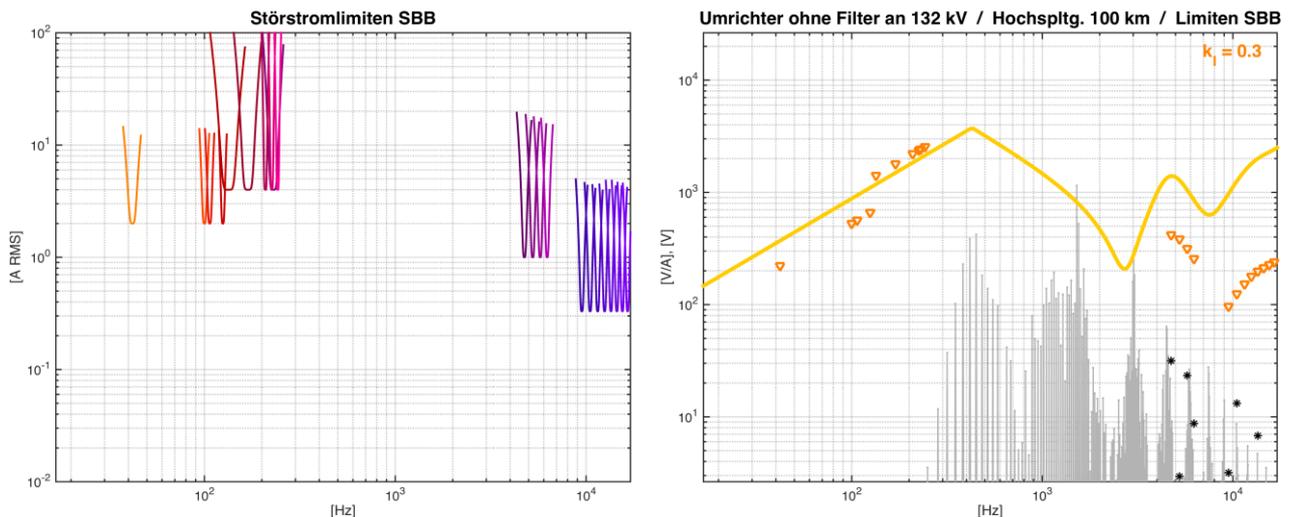


Abbildung 13 – Vergleich für die Störstromlimiten in Deutschland, Österreich und der Schweiz

2.2.6. Zusammenhang mit der Spannungsverzerrung (THDu) bei Speisung ins Hochspannungsnetz

Die Anforderungen von DB Energie an statische Umrichter verlangen eine maximale Spannungsverzerrung THDu (Total Harmonic Distortion, voltage) von 1.5 % an der vom Netz getrennten Sammelschiene. Zudem dürfen einzelne Harmonische nicht mehr 1 % der Grundschwingung betragen. Andere Bahnen haben zum Teil abweichende, auch größere Werte. Aus dieser Anforderung lässt sich die Kompatibilität mit Gleisfreimeldeanlagen vereinfacht überprüfen.

Die folgende Figur zeigt als Beispiel die Ergebnisse unter folgenden Annahmen: ein 50-MVA-Umrichter mit zugeordnetem Trafo mit 10 % Kurzschlussspannung, ein Unterwerkstrafo mit 20 MVA und ebenfalls 10 % Kurzschlussspannung, Fahrzeugimpedanz wie oben definiert, keine Resonanzverstärkung. Das Spektrum der inneren Spannung wird durch ein „weißes Rauschen“ angenähert, also eine auf alle Frequenzen zufällig und damit annähernd gleichmäßig verteilte Spannungsverzerrung.

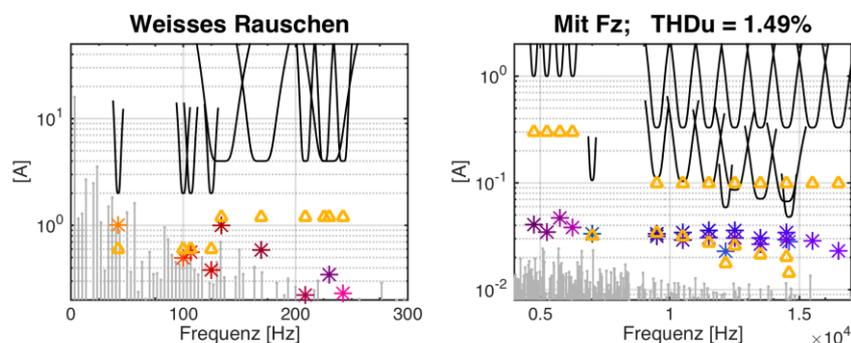


Abbildung 14 – Grenzwerte und erreichte Werte, Umrichter ohne Filter mit definierter Spannungsverzerrung (THDu), Speisung auf 110 kV (ohne Hochspannungsleitung / ohne Resonanzfaktor)

Es bedeuten: schwarze Kurve: Original-Störstromlimiten für eine beeinflussende Einheit, orange Dreiecke: zulässiger Bandpass-Output am Ort des Fahrzeugs unter Berücksichtigung des Faktors $k_1 = 0.3$, farbige Sterne: erreichte Werte.

Daraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Einhaltung eines THDu-Werts von 1.5 % stellt die Kompatibilität mit UGSK- und FTGS-Gleisstromkreisen mit ausreichender Reserve sicher, sofern im Spannungsspektrum die Verzerrung breitbandig verteilt ist.
- Bei 100-, 106.7- und 125-Hz-Gleisstromkreisen werden die Grenzwerte knapp eingehalten, wenn $k_1 = 0.3$ ist. Bei $k_1 = 0.1$ ist die Situation ebenfalls nach dem vollständigen Verfahren zu prüfen.

- Für GLS-Gleisstromkreise ist die Kompatibilität damit nicht in jedem Fall sichergestellt, insbesondere, da dort $k_1 = 0.1$ gilt (oben dargestellt ist $k_1 = 0.3$). Das gleiche gilt für 42-Hz-Gleisstromkreise, für die ein Nachweis auf diese Art nicht möglich ist.

Ist die Spannungsverzerrung auf einzelne Frequenzbänder konzentriert, ist dieser vereinfachte Nachweis nicht möglich. Dies lässt sich für die 42-Hz-Gleisstromkreise plausibilisieren: im weiter oben gezeigten Beispiel für einen Umrichter am 132-kV-Netz beträgt der zulässige Spannungspegel rund 220 V und somit ca. 0.17 % (bei $k_1 = 0.3$). Dies liegt weit unterhalb von 1 % und zeigt auf, dass für diesen Fall zumindest die Bandbreiten der Filterkurven einbezogen werden müssen.

2.3. Abhängigkeiten

Nur ansatzweise untersucht, und nicht dokumentiert wurde der Einfluss einiger Abhängigkeiten. Die zwei wesentlichen sind:

- Sammelschienen-Kapazität, inkl. Hochspannungskabel zwischen Umrichter und Sammelschienen, oder im Abgang zu den Unterwerkstrafos. Diese wirken sich (gleich wie Hochspannungsleitungen) günstig auf das Verhalten bei Tonfrequenzen aus. Sind sie systematisch im System vorhanden und bekannt, dürfen sie bei der Bestimmung der zulässigen Spannungspegel berücksichtigt werden (analog zu Filtern am Umrichterausgang).
- Frequenzabhängige Dämpfung. Für die Fahrzeuge wird sie (im Sinne eines Worst Case) als null angenommen, d.h. die Fahrzeuge sind entweder reine Induktivitäten (Worst Case) oder reine Kapazitäten (realistisch). Für das Verhalten der Fahrleitungen wurden die dokumentierten Annahmen getroffen, was sich im definierten frequenzabhängigen Faktor für Resonanzverstärkung niederschlägt. Für die Umrichteranlage (vor allem Trafo und Drosseln) sind sie jedoch Teil der zuzulassenden Anlage und oftmals nicht genau bekannt. Hier wird man (wie in der vorliegenden Untersuchung) mit typischen Werten rechnen müssen, damit nicht einerseits viel zu schlechte Verhältnisse vorgetäuscht werden (keine frequenzabhängigen Verluste), oder andererseits sich ein Hersteller seine Anlage „gesundrechnen“ kann (Annahme viel zu hoher frequenzabhängiger Verluste).

2.4. Modellvalidierung

2.4.1. Allgemeines

Grundsätzlich stützen sich alle Berechnungen und Aussagen der vorliegenden Studie auf validierte Rechen-tools und Netzmodelle. Die verwendeten Umrichtermodelle stammen ebenfalls aus realen Projekten, sind aber soweit parametermässig verfremdet, dass keine Rückschlüsse auf reale Projekte möglich sind.

Das vorgeschlagene Vorgehen zur Definition der Störstromanforderungen an Umrichter wurde bisher teilweise angewendet, aber noch nicht vollständig (d.h. ohne die erst im Projekt zu bestimmenden Störspannungspegel; diese wurden in der Spezifikation aufgrund von Annahmen vorgegeben).

2.4.2. Wimmis

Von der Anlage in Wimmis (Schweiz; ABB-Zwischenkreisumrichter an 132 kV) liegen umfangreiche Messungen auch zusammen mit Fahrzeugen vor. Daraus lässt sich die Gültigkeit der Superposition der vom Umrichter und von den Fahrzeugen erzeugten Störströme sowie ihr nicht korreliertes Verhalten nachweisen.

Die folgenden Diagramme in Abbildung 15 zeigen einen Vergleich der Modellrechnung (links, nur Einfluss des Umrichters, aber an der konkreten Fahrzeugimpedanz) und der Messung (rechts, inkl. Einfluss der Stromrichtertaktung des Fahrzeugs, die aber außerhalb des charakteristischen Frequenzbands des Umrichters liegt). Die Übereinstimmung ist sehr gut. Lediglich die Resonanzdämpfung ist in Realität etwas besser als im Modell angenommen.

Für weitere Informationen dazu siehe /7/.

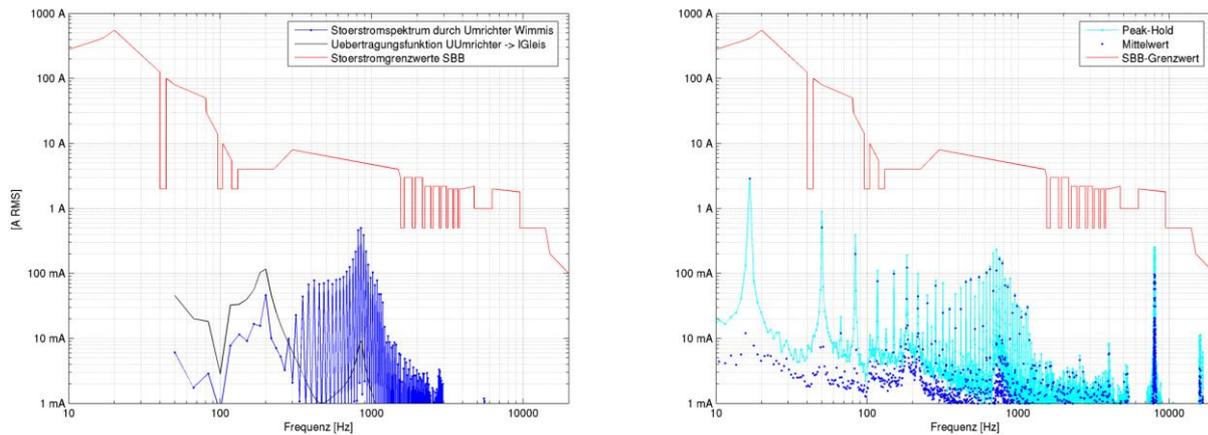


Abbildung 15 – Vergleich gerechnetes (links) und gemessenes Stromspektrum (rechts) am Ort eines Fahrzeugs

Die beiden Diagramme in Abbildung 16 zeigen einen Vergleich der Harmonischen eines Zuges, bestehend aus vier Lokomotiven, bei Speisung durch einen rotierenden Umformer (links) und durch den neuen Umrichter (rechts). Der Beitrag des Umrichters ist nur schwach erkennbar (um 300 Hz). Dort, wo der Zug selbst die höchsten Emissionen hat, ist praktisch keine Änderung ersichtlich. Der unter dem Pegel des Zuges bleibende, unkorrelierte Beitrag des Umrichters beeinflusst das Gesamtergebnis kaum.

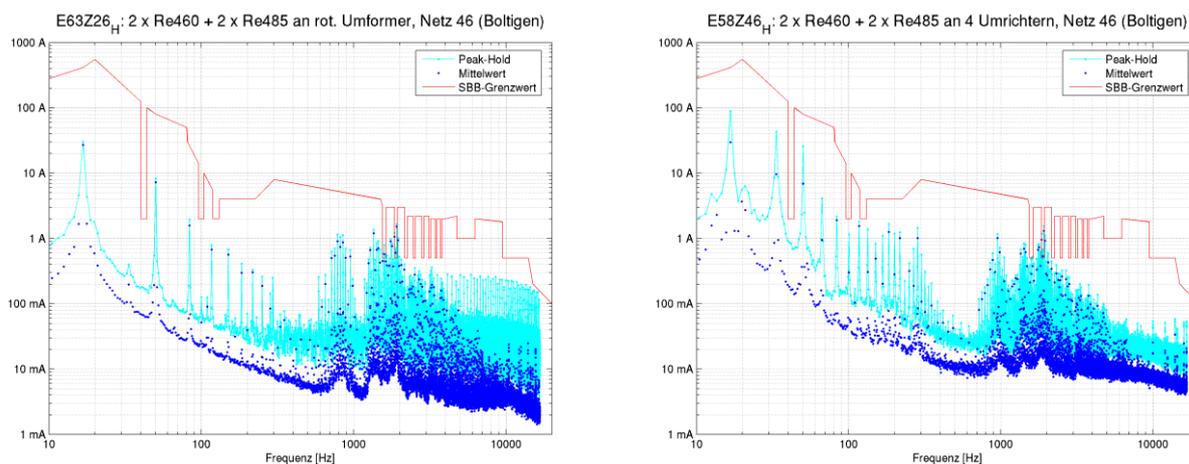


Abbildung 16 – Vergleich gemessenes Stromspektrum am Ort des Fahrzeugs, bei Speisung durch rotierenden Umformer (links) und statische Umrichter (rechts)

Hinweis: die Störstromgrenzen für die SBB (als „Gabarit“) entsprechen noch den Vorschriften von 2005.

2.4.3. Winkeln

Von der Anlage in Winkeln (Schweiz; Siemens-Direktumrichter an 132 kV) liegen Rechnungen und Messungen zum Vergleich der Spannungsspektren an der Sammelschiene vor. Daraus lassen sich grundsätzlich die Machbarkeit der Methode mit der Spezifikation und der Nachweis zulässiger Spannungspegel ableiten, sowie der Einfluss der Hochspannungsleitungen auf das Verhalten bei Tonfrequenz.

Die Diagramme in Abbildung 17 zeigen oben die Ergebnisse der Vorausrechnung ohne (links) und mit einer kurzen Hochspannungsleitung (rechts), unten die Messung ohne Hochspannungsleitung, aber mit der real vorhandenen Sammelschienen-Kapazität (Rechnung: emkamatik, Messung: Enotrac; beides nicht öffentlich publiziert).

Ohne Berücksichtigung der Sammelschienen-Kapazität würde der Umrichter die Anforderungen im Tonfrequenzbereich nicht einhalten. Dies zeigt, dass es wichtig ist, diesen Parameter zumindest in guter Näherung mit einzubeziehen, da er bei der Einhaltung der Anforderungen hilft. Auch die Herleitung der zulässigen Spannungspegel geschah damals noch für im voraus angenommene Impedanzen der Anlage.

Grundsätzlich ist aber gut erkennbar, dass die vorgeschlagene Methode funktioniert, und einfach und ohne großen Aufwand an Nachweismessungen anwendbar ist.

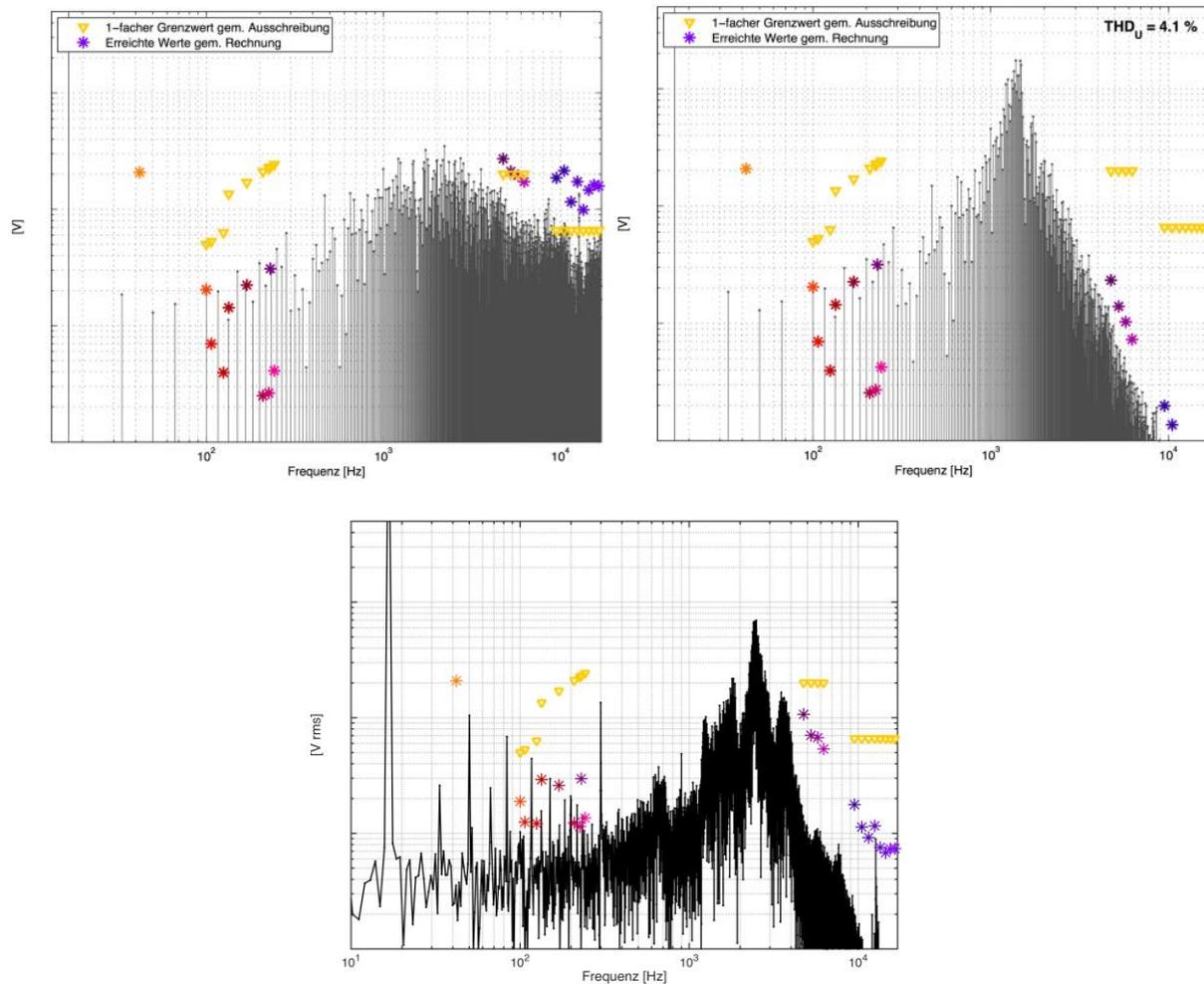


Abbildung 17 – Vergleich Rechnung (oben links und rechts) und Messung einer Umrichteranlage beim Vorgehen nach TR-EMV Teil 4 (während der Entwurfsphase der Methode)

2.4.4. Validierung der Methode

Im Rahmen der Arbeitsgruppe Störströme wurden, basierend auf dem Entwurf der TR-EMV Teil 4 und dem vorliegenden Dokument, weitere Validierungsrechnungen und Vergleiche mit Messungen (Abbildung 17) erfolgreich durchgeführt, für Umrichter die direkt ins 15-kV-Netz einspeisen.

3. Literatur

- /1/ Cenelec: Bahnanwendungen – Kompatibilität zwischen Fahrzeugen und Gleisfreimeldesystemen – Teil 1: Allgemein. Europäische Norm EN 50238-1:2019, Oktober 2019
- /2/ Cenelec: Bahnanwendungen – Kompatibilität zwischen Fahrzeugen und Gleisfreimeldesystemen – Teil 2: Kompatibilität mit Gleisstromkreisen. Europäische Technische Spezifikation TS 50238-2:2020, Juli 2020
- /3/ Technische Regelung für den Nachweis der elektromagnetischen Verträglichkeit zwischen Schienenfahrzeugen und der Infrastruktur im Geltungsbereich der EBO (TR-EMV). Teil 2 – Nachweis der Einhaltung der Störstromgrenzwerte. Ausgabe 1.0 vom 1.10.2015
- /4/ ÖBB Infra: Anforderungskatalog Triebfahrzeuge. Regelwerk 50.02.01, 3. Ausgabe vom 1.12.2013

-
- /5/ SBB Infrastruktur: Technischer Netzzugang: Regelung Störströme (Kompatibilität mit Gleisstromkreisen) und geometrische Fahrzeugbedingungen. Regelwerk SBB, Dokument I-50097, Version 2-0 vom 9.9.2019
 - /6/ M. Meyer, G. Rader: ÖBB Infrastruktur: Konzept für die Nachbildung der Schwungmasse in der Regelung statischer Frequenzumrichter. Elektrische Bahnen 10/2017, Seiten 566 – 580
 - /7/ M. Meyer, M. Thoma: Netzkompatibilitätsstudie und -messungen für die Umrichteranlage Wimmis. Elektrische Bahnen 12/2006, Seiten 567 – 574
 - /8/ M. Meyer, M. Stadelmann, R. Kern: Auswirkung der Netzresonanzen im Lötschberg-Basistunnel. Elektrische Bahnen 11/2007, Seiten 570 – 576
 - /9/ M. Meyer, G. van Alphen: Netzresonanzmessungen auf HSL Zuid and Betuweroute. Schweizer Eisenbahn-Revue und Eisenbahn-Revue International 12/2006, Seiten 610 – 611