

DIN EN 50388-2
(VDE 0115-606-2)
DIN

Diese Norm ist zugleich eine **VDE-Bestimmung** im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.

VDE

ICS 29.280; 45.060.01

Einsprüche bis 2017-10-25

Zusammen mit

E DIN EN 50388-1 (VDE 0115-606-1:2017-09

vorgesehen als Ersatz für **DIN EN 50388**

(VDE 0115-606):2012-12 und

DIN EN 50388 Berichtigung 1

(VDE 0115-606 Berichtigung 1):2013-11

Entwurf

**Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen und Bahnfahrzeuge –
 Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung
 und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität –
 Teil 2: Stabilität und Oberschwingungen;
 Deutsche Fassung prEN 50388-2:2017**

Railway Applications – Fixed installations and rolling stock –
 Technical criteria for the coordination between power supply and rolling stock to achieve
 interoperability –
 Part 2: Stability and harmonics;
 German version prEN 50388-2:2017

Applications ferroviaires – Installations fixes et matériel roulant –
 Critères techniques pour la coordination entre les installations fixes de traction électrique et le
 matériel roulant pour réaliser l'interopérabilité –
 Partie 2 : Stabilité et harmoniques;
 Version allemande prEN 50388-2.2017

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2017-08-25 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
 Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses
 Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.entwuerfe.din.de bzw. für Norm-
 Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de,
 sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser
 Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme oder für Stellungnahmen zu Norm-
 Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in
 DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten
 Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 104 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments prEN 50388-2:2017 „Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen und Bahnfahrzeuge – Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität – Teil 2: Stabilität und Oberschwingungen“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und der Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung der prEN 50388-2:2017 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Das europäische Dokument prEN 50388-2:2017 „Railway Applications – Fixed installations and rolling stock – Technical criteria for the coordination between power supply and rolling stock to achieve interoperability – Part 2: Stability and harmonics“ wurde vom SC 9XC „Electric supply and earthing systems for public transport equipment and ancillary apparatus (Fixed installations)“ des Europäischen Komitees für Elektrotechnische Normung (CENELEC) erarbeitet und von CENELEC den Nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen späteren „Schluss-Entwurf“ prEN nur 2 Monate beträgt und zum „Schluss-Entwurf“ prEN keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine „JA/NEIN“-Entscheidung möglich ist, wobei eine „NEIN“-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der „Entwurf“ prEN als Deutscher Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit noch vor der formellen Abstimmung berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium UK 351.2 „Ortsfeste Anlagen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Für den Fall einer undatierten Verweisung im normativen Text (Verweisung auf ein Dokument ohne Angabe des Ausgabedatums und ohne Hinweis auf eine Abschnittsnummer, eine Tabelle, ein Bild usw.) bezieht sich die Verweisung auf die jeweils aktuellste Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments.

Für den Fall einer datierten Verweisung im normativen Text bezieht sich die Verweisung immer auf die in Bezug genommene Ausgabe des Dokuments.

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden Deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CENELEC [und/oder CEN] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 50388 (VDE 0115-606):2012-12** und **DIN EN 50388 Berichtigung 1 (VDE 0115-606 Berichtigung 1):2013-11** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) **DIN EN 50388 (VDE 0115-606):2012-12** wurde in Teile 1 und 2 aufgeteilt. Die hier vorliegende DIN EN 50388-2 (VDE 0115-606):201X ist einer davon und beinhaltet die Angaben zu Stabilität und Oberleitungen; der andere Teil, DIN EN 50388-1 (VDE 0115-606):201X, beinhaltet die allgemeinen Inhalte.

Deutsche Fassung

**Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen und Bahnfahrzeuge –
Technische Kriterien für die Koordination zwischen Anlagen der
Bahnenergieversorgung und Fahrzeugen zum Erreichen der
Interoperabilität –
Teil 2: Stabilität und Oberschwingungen**

Railway Applications – Fixed installations
and rolling stock –
Technical criteria for the coordination
between power supply and rolling stock to
achieve interoperability –
Part 2: Stability and harmonics

Applications ferroviaires – Installations fixes et
matériel roulant –
Critères techniques pour la coordination entre les
installations fixes de traction électrique et le
matériel roulant pour réaliser l'interopérabilité –
Partie 2 : Stabilité et harmoniques

Dieser Entwurf für eine Europäische Norm wird den CENELEC-Mitgliedern zur CENELEC-Umfrage vorgelegt.
CENELEC Termin: 2017-07-07

Er wurde von CLC/SC 9XC erstellt.

Wenn aus diesem Entwurf eine Europäische Norm wird, sind die CENELEC-Mitglieder gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Dieser Entwurf für eine Europäische Norm wurde von CENELEC in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch) erstellt. Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem CEN-CENELEC Management Centre mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CENELEC-Mitglieder sind die nationalen elektrotechnischen Komitees von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Warnvermerk: Dieses Schriftstück hat noch nicht den Status einer Europäischen Norm. Es wird zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt. Es kann sich noch ohne Ankündigung ändern und darf nicht als Europäische Norm in Bezug genommen werden.



Europäisches Komitee für Elektrotechnische Normung
European Committee for Electrotechnical Standardization
Comité Européen de Normalisation Electrotechnique

CEN-CENELEC Management Centre: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

© 2017 CENELEC – Alle Rechte der Verwertung, gleich in welcher Form und in welchem Verfahren, sind weltweit den Mitgliedern von CENELEC vorbehalten.

Projekt: 60245

Inhalt

Seite

Europäisches Vorwort.....	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Anforderungen	10
4.1 Elektrische Resonanzstabilität	10
4.2 Niederfrequenzstabilität.....	12
4.3 Durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen	15
4.3.1 Allgemeines	15
4.3.2 Fahrzeugpark	15
4.3.3 Umrichter	20
4.3.4 Infrastruktur	20
5 Prüfungen und Dokumentation.....	21
5.1 Elektrische Resonanzstabilität	21
5.1.1 Fahrzeugpark	21
5.1.2 Umrichter	24
5.1.3 Infrastruktur	25
5.2 Niederfrequenzstabilität.....	26
5.3 Durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen	26
5.3.1 Fahrzeugpark	26
5.3.2 Umrichter	27
5.3.3 Infrastruktur	27
Anhang A (informativ) Technischer Hintergrund	29
A.1 Elektrische Resonanzstabilität	29
A.1.1 Hintergrund.....	29
A.1.2 Stabilitätsanalyse der Netze	30
A.1.3 Erfahrungen aus Messungen und Hinweise bezüglich Messungen	30
A.2 Niederfrequenzstabilität.....	30
A.2.1 Allgemeines	30
A.2.2 Definition des Systems	30
A.2.3 Definition der Signale für das DQ-Verfahren.....	31
A.2.4 Kleinsignalmodell für eine Komponente	32
A.2.5 Rückkopplungsschleife.....	32
A.2.6 Festlegung der Frequenzverhalten	33
A.2.7 Stabilitätskriterium	34
A.3 Durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen	36
A.3.1 Energieversorgungsresonanzen	36
A.3.2 Bandbreite und Zeitkonstanten	37
A.3.3 Beispiele	38

A.4	Auf den Betriebshof bezogene Fälle	39
A.4.1	Allgemeines	39
A.4.2	Resonanzstabilität	39
A.4.3	Oberschwingungsüberspannungen	40
Anhang B (informativ)	Beispiele basierend auf vorgefundenen Phänomenen (Messungen)	42
B.1	Elektrische Resonanzinstabilität	42
B.2	Niederfrequente Leistungsschwingungen	42
B.3	Durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen	43
Anhang C (informativ)	Daten bezüglich der Kompatibilitätsstudie über Oberschwingungen und dynamische Effekte	44
C.1	Beschreibung der ortsfesten Anlagen der Bahnenergieversorgung	44
C.2	Beschreibung der Züge	47
Anhang D (informativ)	In Gleichstromsystemen tatsächlich vorgekommene Beispiele	51
Anhang ZZ (informativ)	Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der abzudeckenden EU-Richtlinie 2008/57/EG	53
Literaturhinweise		54

Bilder

Bild 1	– Beispiel für ein Frequenzverhalten der Eingangsadmittanz einer Triebfahrzeugeinheit sowie für verbotene Bereiche des Phasenwinkels	12
Bild 2	– Beeinflussende Einheiten (IU) und Triebfahrzeugeinheiten (TU)	16
Bild 3	– Veranschaulichung von k_z	18
Bild 4	– Schematische Darstellung für die Messung der Eingangsadmittanz	22
Bild 5	– Konfigurationen der Spannungsquelle	23
Bild A.1	– Vereinfachtes Systemblockschaltbild (Fahrzeug und Infrastruktur)	29
Bild A.2	– Definition der Richtung der Ströme und Spannungen	31
Bild A.3	– Beispiel für eine „DQ“-Signaldefinition	31
Bild A.4	– „DQ“-Modell einer Komponente	32
Bild A.5	– „DQ“-Modell eines Systems mit Rückkopplungsschleifen	33
Bild A.6	– Beispiel für „DQ“-Frequenzverhalten	34
Bild A.7	– Generalisierte Definition von „MIMO“-Systemen	34
Bild A.8	– Berechnung der Matrizen Y und Z	35
Bild A.9	– Nyquist-Diagramm für ein stabiles und ein instabiles System	35
Bild A.10	– Beispiele für Ergebnisse aus Stabilitätsberechnungen	36
Bild A.11	– Referenzimpedanz	37
Bild A.12	– Simulierte Oberschwingungsspannung	38
Bild A.13	– Bewertung einer hypothetischen Lokomotive	39
Bild A.14	– Modell einer Systemkapazität	40
Bild A.15	– Typische Spektren für gepulste Netzstromrichter (links) und Diodengleichrichtung (rechts)	40
Bild A.16	– Relative Verluste in Transformatoren des Unterwerks für Diodengleichrichtung	41
Bild B.1	– Fahrleitungsspannung mit elektrischer Resonanzinstabilität	42
Bild B.2	– Beispiel für eine Fahrleitungsspannung (oben) und einen Fahrleistungsstrom (unten)	

(Augenblickswerte)	42
Bild B.3 – Beispiel für eine Fahrleitungsspannung (oben) und einen Fahrleistungsstrom (unten) (Effektivwerte)	43
Bild B.4 – Beispiele für Fahrleitungsspannung mit Thyristor-Gleichrichtung	43
Bild B.5 – Beispiel für Fahrleitungsspannung mit PWM-Stromrichter	43
Bild D.1 – Beispiel für beobachtete Phänomene an Gleichstromnetzen	51
Bild D.2 – Beispiel für Instabilität an einer langen elektrifizierten Gleichstromstrecke	52
Tabellen	
Tabelle 1 – Struktur dieser Europäischen Norm	7
Tabelle 2 – Grenzfrequenz für die Resonanzstabilität	11
Tabelle 3 – Werte für c	12
Tabelle 4 – Fälle der Niederfrequenzstabilität	13
Tabelle 5 – Parameter für Fälle der Niederfrequenzstabilität	13
Tabelle 6 – Werte für $U_{\max H}$	15
Tabelle 7 – Beeinflussende Einheiten (IU)	16
Tabelle 8 – Wert für Z_{res}	16
Tabelle 9 – Werte für N bei einer zufälligen Verschiebung der Schaltwinkel zwischen verschiedenen IUs	18
Tabelle 10 – Grenzwerte für die Überwachung der Spitzenspannung	18
Tabelle 11 – Verwendung von Diodengleichrichtung	19
Tabelle 12 – Wert für $U_{\max H}$	20
Tabelle 13 – Frequenzauflösung des Prüfsignals für 16,7 Hz-Netze	22
Tabelle 14 – Frequenzauflösung des Prüfsignals für 50 Hz-Netze	23
Tabelle 15 – Spezifische Werte der Leitungskapazität	25
Tabelle 16 – Leerlauf-Versorgungsspannungsebenen	25
Tabelle C.1 – Beschreibung elektrifizierter Wechselspannungsfahrleitungen	44
Tabelle C.2 – Beschreibung elektrifizierter Gleichspannungsfahrleitungen	46
Tabelle C.3 – Beschreibung eines Wechselstromzuges in Bezug auf Impedanzen, Oberschwingungen und Stabilität	48
Tabelle C.4 – Beschreibung eines Gleichstromzuges in Bezug auf Impedanzen, Oberschwingungen und Stabilität	50
Tabelle ZZ.1 – Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm, der TSI „Lokomotiven und Personenwagen“ (Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014) und der Richtlinie 2008/57/EG	53
Tabelle ZZ.2 – Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm, der TSI „Energie“ (Verordnung (EU) Nr. 1301/2014 der Kommission vom 18. November 2014) und der Richtlinie 2008/57/EG	53

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 50388-2:2017) wurde durch CLC/SC 9XC „Elektrische Versorgungs- und Erdungssysteme für öffentliche Transporteinrichtungen und Hilfsausrüstungen (ortsfeste Anlagen)“ des Technischen Komitees CENELEC TC 9X „Elektrische und elektronische Anwendungen für Bahnen“ bearbeitet. Es enthält auch die Erfahrung von CLC/SC 9XB „Elektromechanische Geräte für Bahnfahrzeuge“.

Dieses Dokument ist derzeit zur Umfrage eingereicht.

Nachstehende Daten wurden vorgeschlagen:

- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene angekündigt werden muss (doa): dor + 6 Monate
- spätestes Datum, zu dem dieses Dokument auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): dor + 12 Monate
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die diesem Dokument entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): dor + 36 Monate (bei der Abstimmung zu bestätigen oder zu ändern)

Dieses Dokument wird teilweise **EN 50388**:2012 ersetzen.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone CENELEC erteilt hat, und unterstützt grundlegende Anforderungen von EU-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit der EU-Richtlinie 2008/57/EG siehe informativen [Anhang ZZ](#), der Bestandteil dieses Dokuments ist.

Für TSI-Strecken sollten Modifikationen und Verbesserungen in einem Verfahren erfolgen, das mit dem gesetzlichen Status der HS- und CR-TSI zusammenhängt.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm, Teil 2 von **EN 50388**, hängt mit prEN 50388-1 zusammen, die allgemein die technischen Kriterien für die Koordination zwischen der Energieversorgung und dem Fahrzeugpark zur Erreichung der Interoperabilität beschreibt.

Dieser Teil 2 umfasst die Annahmekriterien nach prEN 50388-1:2017, 10.4, Schritt 7, für die Kompatibilität zwischen den Triebfahrzeugeinheiten und der Energieversorgung in Bezug auf:

- die Koordination zwischen gesteuerten Elementen sowie zwischen diesen und den Resonanzen in der elektrischen Infrastruktur, um die Systemstabilität eines Netzes zu erreichen;
- die Koordination des Oberschwingungsverhaltens hinsichtlich der Erregung der elektrischen Resonanzen.

Der Anwendungsbereich gilt für die folgenden elektrischen Zugförderungssysteme:

- Eisenbahnen;
- spurgeführte Nahverkehrssysteme, die in Eisenbahnen integriert sind;
- Materialtransportsysteme, die in Eisenbahnen integriert sind.

Das öffentliche Drehstromnetz ist außerhalb des Anwendungsbereiches. Das bahnspezifische Netz gehört zum Anwendungsbereich.

Diese Europäische Norm gilt in Übereinstimmung mit den in prEN 50388-1:2017, Abschnitt 10, aufgeführten Anforderungen. Sie gilt nicht rückwirkend für bereits im Betrieb befindliche Fahrzeugparks.

Ziel dieses Teils 2 ist die Unterstützung der Abnahme neuer Elemente (neuer Fahrzeuge oder neuer Infrastruktur) durch die Festlegung präziser Anforderungen und Verfahren für den Nachweis der Konformität. Es ist jedoch weiterhin erlaubt, stattdessen das in Teil 1 festgelegte Verfahren anzuwenden. Das in Teil 1 beschriebene Verfahren muss angewendet werden, wenn der zu prüfende Fall nicht von Teil 2 umfasst ist.

Diese Version der Norm gilt ausschließlich für Wechselstromsysteme. Spätere Versionen dürfen auch ähnliche Effekte in Gleichstromnetzen umfassen (siehe [Anhang D](#)).

Die in dieser Norm identifizierten und behandelten Hauptphänomene sind:

- elektrische Resonanzstabilität;
- Niederfrequenzstabilität;
- durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen.

Diese Europäische Norm weist die in [Tabelle 1](#) gezeigte Struktur auf ([Tabelle 1](#) zeigt nur Referenzen zu den wichtigsten Abschnitten).

Tabelle 1 – Struktur dieser Europäischen Norm

Thema	Anforderungen		Prüfungen und Dokumentation	
	Abschnitt	Hauptanforderungen	Abschnitt	Wichtigste Elemente
Elektrische Resonanzstabilität	4.1	Definition der Grenzfrequenz f_L - Die niedrigste Resonanzfrequenz des elektrischen Energiesystems darf nicht $< f_L$ sein. - Alle gesteuerten Elemente müssen bei allen Frequenzen $> f_L$ passiv sein. - Anforderungen an die Filterkondensatoren	5.1	Für die gesteuerten Elemente wird in den meisten Fällen eine Messung des Frequenzverhaltens der Eingangsadmittanz gefordert. 5.1.1.2 definiert, in welchen Fällen die Eingangsadmittanz gemessen werden muss und wie diese gemessen werden muss. 5.1.1.3 definiert, in welchen Fällen eine Simulation ausreicht und legt die Anforderungen an die Simulation fest. 5.1.1.4 definiert, in welchen Fällen eine Konformitätserklärung ausreicht. 5.1.2 definiert, welche Verfahren zur Bewertung der niedrigsten Resonanzfrequenz der Energieversorgung verwendet werden müssen.
	A.1	Technischer Hintergrund für die elektrische Resonanzstabilität		
	B.1	Beispiele für eine vorgefundene elektrische Resonanzinstabilität		
	4.2	Ein stabiler Betrieb muss für eine fest vorgegebene Reihe von Kombinationen der Leistungsquelle(n), des elektrischen Netzes sowie eines oder mehrerer Fahrzeuge an einem einzigen Ort nachgewiesen werden.	5.2	Überprüfung entweder durch - eine Simulation direkt im Zeitbereich; oder durch - das DQ-Verfahren aufgrund der Beschreibung aus der Simulation im Zeitbereich.
Niederfrequenzstabilität	A.2	Technischer Hintergrund für die Niederfrequenzstabilität A.2.2 Definition des Systems A.2.3 Definition der Signale für das DQ-Verfahren A.2.4 Kleinsignalmodell für eine Komponente A.2.5 Rückkopplungsschleife A.2.6 Festlegung der Frequenzverhalten A.2.7 Stabilitätskriterium		
	B.2	Beispiele für vorgefundene niederfrequente Leistungsschwingungen		
	4.3	4.3.2 Fahrzeugpark Definiert den Grenzwert der Überspannung und legt die Berechnungsmethode fest durch Verwendung von einem Spektrum des Fahrleitungsstromes, dem Bandpassfiltern, Additionsmethoden und genormten Energieversorgungsimpedanzen 4.3.2.2 Überspannungserkennung/-schutz 4.3.3 definiert die Grenzwerte der Überspannung für Umrichter und legt das Berechnungsverfahren für Überspannungen fest, indem der Umrichter mit einer Strecke unterschiedlicher Länge kombiniert wird. 4.3.4 Infrastrukturbezogene Themen	5.3	5.3.1 Nachweis der Konformität des Fahrzeugparks durch - Berechnung des Spektrums des Fahrleitungsstromes einschließlich der Plausibilität durch Messung - Berechnung der Oberschwingungsspannung unter Verwendung des in 4.3 festgelegten Verfahrens - Überprüfung der Vernetzung zwischen den Einheiten, wie in 4.3.2.1 beschrieben - Überprüfung des Überspannungsschutzes, wie in 4.3.2.2 beschrieben - Falls Diodengleichrichtung verwendet wird, um die Gefahr von Überspannungen zu mindern (siehe A.3.3), Überprüfung des korrekten Übergangs zwischen dem Pulsen und dem Sperren des Netzstromrichters
Durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen	A.3	Technischer Hintergrund für die durch Oberschwingungen verursachten Überspannungen		
	B.3	Beispiele für vorgefundene durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen		
	A.4	Auf den Betriebshof bezogene Fälle		
	Anhang C	Daten bezüglich der Kompatibilitätsstudie über Oberschwingungen und dynamische Effekte		
Auf alle Phänomene bezogene Themen	Anhang D	In Gleichstromsystemen tatsächlich vorgekommene Beispiele		

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

CEN/TS 50238-2:2015, *Bahnanwendungen – Kompatibilität zwischen Fahrzeugen und Gleisfreimeldesystemen – Teil 2: Kompatibilität mit Gleisstromkreisen*

CEN/TS 50535:2010, *Bahnanwendungen – Hilfsbetriebeumrichtersystem für Schienenfahrzeuge*

prEN 50388-1, *Bahnanwendungen – Ortsfeste Anlagen und Fahrzeuge – Technische Kriterien für die Koordination zwischen der Bahnenergieversorgung und Bahnfahrzeugen zum Erreichen der Interoperabilität – Teil 1: Allgemeines*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN prEN 50388-1:2017 und die folgenden Begriffe.

3.1

neues Element

neue, ertüchtigte oder (in Hard- oder Software) modifizierte Triebfahrzeugeinheit oder neues, ertüchtigtes oder (in Hard- oder Software) modifiziertes Bauteil der Energieversorgung, die/das möglicherweise die Stabilität oder das Oberschwingungsverhalten des Energieversorgungssystems beeinflussen kann, wie z. B.:

- Transformator;
- Hochspannungskabel;
- Filter;
- Stromrichter.

3.2

elektrisches Energiesystem

System, das die Erzeugung, die Verteilung und den Verbrauch der elektrischen Leistung umfasst, d. h. es entspricht dem Energieversorgungssystem zuzüglich der Leistungsschaltkreise aller Züge

3.3

Energieversorgungssystem

System zur Erzeugung oder Verteilung der elektrischen Leistung für die Züge

Anmerkung 1 zum Begriff: In Bahnsystemen schließt „Energieversorgungssystem“ Kraftwerke, Frequenzumrichter, Übertragungsleitungen, Unterwerke einschließlich Hochspannungsimpedanz am Verknüpfungspunkt, die Fahrleitungsanlage und Rückleitungsschaltungen ein.

3.4

Oberschwingung

Spannung oder Strom mit einer anderen Frequenz als der Grundfrequenz

Anmerkung 1 zum Begriff: In dieser Norm wird „Oberschwingung“ ausschließlich für die ausdrückliche Erzeugung solcher Spannungen oder Ströme verwendet. Instabilitäten (, die von den Effekten durch Rückkopplungsschleifen verursacht werden,) erzeugen Spannungen und Ströme bei Frequenzen, die sich auch von der Grundfrequenz unterscheiden, aber diese werden jedoch meistens nicht als Oberschwingungen bezeichnet.

3.5

Stabilität

Eigenschaft eines Systems bei einer kleinen Abweichung in einem Signal immer zu einem bestimmten Betriebspunkt zurückzukehren

Anmerkung 1 zum Begriff: Das System wird als ein stabiles System bezeichnet.

3.6

Instabilität

Eigenschaft eines Systems, die bei einer kleinen Abweichung von einem Betriebspunkt zu einer Verstärkung und somit zu einer Vergrößerung der Abweichung führt

Anmerkung 1 zum Begriff: Das System wird als ein instabiles System bezeichnet.

Anmerkung 2 zum Begriff: Signale (Spannungen und/oder Ströme) erhöhen sich, bis sie durch eine ausdrückliche Handlung des Steuergeräts, Schutzhandlungen, Begrenzungsgeräte (wie Überspannungsableiter) oder einen Schaden an dem System begrenzt werden.

3.7

Kleinsignalverhalten

Reaktion eines Systems auf eine unendlich kleine Abweichung von einem Betriebspunkt

Anmerkung 1 zum Begriff: Das System kann dann für jeden Betriebspunkt mit der Annäherung linearisiert werden, dass dessen Verhalten dem Betriebspunkt zuzüglich des Kleinsignalverhaltens entspricht.

Anmerkung 2 zum Begriff: Für die gegebenen Arten von Systemen können normalerweise 1 – 2 % der Nennwerte als Kleinsignale betrachtet werden.

3.8

aktives Element

Element, das Instabilitäten in einem System erregen kann, d. h. es kann auf bestimmte Frequenzen Energie in das System bringen

Anmerkung 1 zum Begriff: In dem gegebenen Kontext wird „aktiv“ (und somit auch „passiv“) nur für das Kleinsignalverhalten definiert.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Definition von aktivem oder passivem Verhalten gibt es nicht für Elemente in dem DQ-System (Kopplung des Verhaltens von vier Kleinsignalen). Siehe [A.2.3](#) für eine Definition des DQ-Systems.

3.9

passives Element

Element, das auf eine bestimmte Frequenz oder einen bestimmten Frequenzbereich keine Energie in das System bringen kann

Anmerkung 1 zum Begriff: Die obigen Definitionen von „aktiv“ und „passiv“ gelten für die gesamte Norm und unterscheiden sich von anderen Definitionen, in denen „aktiv“ als eine Bezeichnung für ein gesteuertes Element verwendet wird.

3.10

gesteuertes Element

elektrische Komponente oder elektrisches Teilsystem mit internen Rückkopplungsschleifen, die deren/dessen Ausgangssignal in Richtung eines Sollwertes steuern

Anmerkung 1 zum Begriff: Im Anwendungsbereich dieser Norm ist ein „gesteuertes Element“ üblicherweise ein elektronischer Leistungsstromrichter auf der Infrastrukturseite oder im Fahrzeug. Gesteuerte Elemente können bei unterschiedlichen Frequenzen aktiv oder passiv sein.

3.11

Triebfahrzeugeinheit

Einheit mit allen Teilsystemen der Zugförderung, einschließlich Hilfsbetriebe, die durch einen (Dach-)Stromabnehmer gemeinsam ausgeschaltet werden können

3.12

beeinflussende Einheit

Anzahl von Triebfahrzeugeinheiten, die einen Zug bilden, der eine Kommunikationsverbindung in dem fahrzeugseitigen Steuerungssystem zur Vernetzung der Triebfahrzeugeinheiten aufweist

Anmerkung 1 zum Begriff: Die obige Definition ist nicht identisch mit der Definition in [CLC/TS 50238-2](#).

3.13

Wechselrichter

Stromrichter

Hilfsbetriebestromrichter

System mit Leistungsumwandlung von einer Frequenz (Energieversorgungssystem) in eine andere (Fahrmotor, Hilfsbetriebesysteme) durch Pulsbreitenmodulation oder andere Einrichtungen mit schneller Steuerung

3.14

Zugsammelschiene

elektrische Leitung, die durch den ganzen Zug verläuft und die Heizung oder andere Verbraucher in jedem Wagen speist

Anmerkung 1 zum Begriff: Siehe UIC-Merkblatt 552 (Versorgung der Züge mit elektrischer Energie – Technische Einheitsmerkmale der Zugsammelschiene (ZS))

3.15

AT-System oder Autotransformator-Energieversorgungssystem

Bahnenergieversorgungssystem, in dem der Energietransport bei doppelter Spannung stattfindet und das Autotransformatoren verwendet, um die Oberleitung zu speisen

4 Anforderungen

4.1 Elektrische Resonanzstabilität

Bei der elektrischen Resonanzstabilität geht es um die Erregung elektrischer Resonanzen in elektrischen Energiesystemen, die von den Effekten durch Rückkopplungsschleifen in Steuerungen von Netzstromrichtern in Fahrzeugen oder in Umrichtern für Energieversorgungssysteme verursacht werden. Hintergrundinformationen und Beispiele finden sich in [Anhang A](#) bzw. [Anhang B](#).

Um zu vermeiden, dass elektrische Resonanzen in elektrischen Energiesystemen zu Schwingungen angeregt werden und zu zugehörigen Überspannungen führen, müssen die folgenden Anforderungen erfüllt werden:

- Die niedrigste Frequenz in dem elektrischen Energiesystem darf die Grenzfrequenz f_L nicht unterschreiten.
- Das elektrische Energiesystem umfasst das Energieversorgungssystem mit all dessen Komponenten sowie die abgestellten Züge mit Filtern oder Leitungen, die direkt mit dem Energieversorgungssystem verbunden sind. Die Anforderung beeinflusst sowohl die Auslegung als auch den Betrieb des elektrischen Energiesystems (einschließlich der eingeschränkten Einspeisemodi). Wenn Resonanzen unter f_L (wegen Oberwellenfilter oder Blindleistungskompensatoren) unvermeidbar sind, muss eine ausreichende Dämpfung vorgesehen werden, die auf einer Stabilitätsanalyse (siehe [A.1.2](#)) für den in Frage stehenden Fall basiert.
- Alle gesteuerten Elemente müssen bei allen Frequenzen höher als f_L passiv sein; dies bedeutet, dass die Phase für ihre frequenzabhängige Eingangsadmittanz um ± 90 % liegt.

ANMERKUNG Der Stabilitätsspielraum wird als Nullgrad definiert, da die Erfahrung gezeigt hat, dass dieser Messgenauigkeiten ausreichend berücksichtigt.

- Die obige Anforderung betrifft Fahrzeuge (Triebfahrzeugeinheiten), mit der Zugsammelschiene verbundene Hilfsbetriebsstromrichter sowie stationäre Umrichter, die das Energieversorgungssystem speisen.
- Für mit der Zugsammelschiene verbundene Betriebsmittel (1 000 V, 16,7 Hz oder 1 500 V, 50 Hz) bezieht sich CLC/TS 50535 hinsichtlich der Stabilität bereits auf **EN 50388**. In diesem Fall gilt die Anforderung für die zwischen der Zugsammelschiene und der Erde auftretende Eingangsadmittanz. Für elektrische Triebzüge (EMUs) mit Netzen für Hilfsbetriebe mit einem internen Versorgungs- und Rückstrom gilt nur die Anforderung am Dachstromabnehmer des EMU.

Die Grenzfrequenz f_L wird in Tabelle 2 wie folgt definiert:

Tabelle 2 – Grenzfrequenz für die Resonanzstabilität

Frequenz der Energieversorgung	16,7 Hz	50 Hz
Grenzfrequenz f_L für die Resonanzstabilität	87 Hz	300 Hz

ANMERKUNG Diese Werte entsprechen der 5. Oberschwingung plus etwas Toleranz für die Steuerung und die Vorhersage der Resonanzen in realen Systemen. Die folgenden Gründe rechtfertigen den Grenzwert für die 5. Oberschwingung:

- Starke Verzerrungen der Fahrleitungsspannung bei der 3. und 5. Oberschwingung treten heute hauptsächlich wegen des Betriebs von Fahrzeugen mit netzgeführten Gleichrichtern auf. Diese Verzerrungen der Fahrleitungsspannung können zu übermäßigen Spannungs-Oberschwingungskomponenten in der Zwischenkreis-Gleichspannung auf Fahrzeugen mit Wechselrichtern führen. Um dies zu vermeiden, muss es möglich bleiben, größere Verzerrungen der Fahrleitungsspannung bis zur 5. Oberschwingung aktiv gegenzusteuern, die Fahrzeuge um diese Frequenzen herum aktiv machen können. Es ist daher nicht möglich, die Grenzfrequenz bis zur 5. Oberschwingung oder darunter zu begrenzen.
- Bei schwach gedämpften Netzen mit Resonanzen in der Nähe der 5. Oberschwingung (oder darunter) kann das Einschalten/Unter-Spannung-Setzen unter Leerlaufbedingungen zu Dauerschwingungen führen, die durch die Nichtlinearität der Transformatoren (Sättigung des Eisenkerns) erregt werden.
- Die Erfahrung hat gezeigt, dass die Bandbreite zwischen der 5. Oberschwingung und der f_L bei einer Energieversorgung mit 50 Hz höher sein muss als bei einer mit 16,7 Hz, da die Grenzfrequenz für eine Energieversorgung mit 50 Hz eher 300 Hz als 270 Hz beträgt.

Infrastrukturmanager dürfen unterschiedliche Werte festlegen, wenn die Kompatibilität zwischen dem Fahrzeugpark und den Signalanlagen nur durch eine Gegensteuerung auf dem Fahrzeug erreicht werden kann (, die normalerweise Triebfahrzeugeinheiten aktiv macht). Auch in diesen Fällen ist eine einzige f_L immer gültig als die Anforderung an den gesamten Infrastrukturabschnitt (Energieversorgung, Fahrzeuge, Betrieb). Wenn der Infrastrukturmanager einen f_L -Wert wählen muss, der sich von den obigen unterscheidet, muss er dies begründen.

Unterschiedliche Werte für f_L in Systemen mit 16,7 Hz sind:

$f_L = 103$ Hz, wenn Gleisstromkreise mit 100 Hz vorhanden sind;

$f_L = 120$ Hz in Netzen, in denen alte Signalanlagen eine Gegensteuerung der 7. Oberschwingung fordern.

Beispiel: $f_L = 103$ Hz wird in Netzen mit Gleisstromkreisen mit 100 Hz benötigt (100 Hz ist eine natürliche Oberschwingung der Netzfrequenz, die wegen Transienten zu großen Oberschwingungsströmen führen kann). Bei Gleisstromkreisen mit 95 Hz wird eine Gegensteuerung nicht benötigt, und f_L kann auf dem Normalwert von 90 Hz bleiben.

Hinsichtlich der Filterkondensatoren auf dem Fahrzeug gilt die folgende Anforderung. Diese Anforderung gilt nur für neue Fahrzeuge (keine Änderung an vorhandenen Fahrzeugen so lange keine Probleme auftreten):

Wenn kein Traktionsstromrichter gepulst wird, darf der Wert von c (Kapazität pro MW eingebaute Leistung am Rad, d. h. $I_m(Y(f_L)) = 2 \cdot \pi \cdot f_L \cdot c$), der auf dem imaginären Teil von der Admittanz bei f_L basiert, den in Tabelle 3 aufgeführten Wert nicht überschreiten.

Tabelle 3 – Werte für c

Netzfrequenz [Hz]	c [nF / MW] ^a bei f_L
16,7	210
50	25
^a MW ist die Höchstleistung am Rad	

ANMERKUNG Die Anforderung wird notwendig sein, um sicherzustellen, dass z. B. abgestellte Züge die kritische Resonanzfrequenz eines Netzes nicht zu sehr mindern. Die Werte werden so ausgewählt, dass die Resonanzfrequenz in einem kritischen Netz (Resonanz um f_L) (in einem 16,7 Hz-Netz) nicht unter 3,4 Hz bzw. (in einem 50 Hz-Netz) nicht unter 10 Hz fällt, wenn das Verhältnis zwischen der eingebauten Gesamtleistung am Rad und der Leistung des Unterwerks das Vierfache beträgt.

Das folgende Bild 1 veranschaulicht die Anforderungen an das Frequenzverhalten einer Triebfahrzeugeinheit.

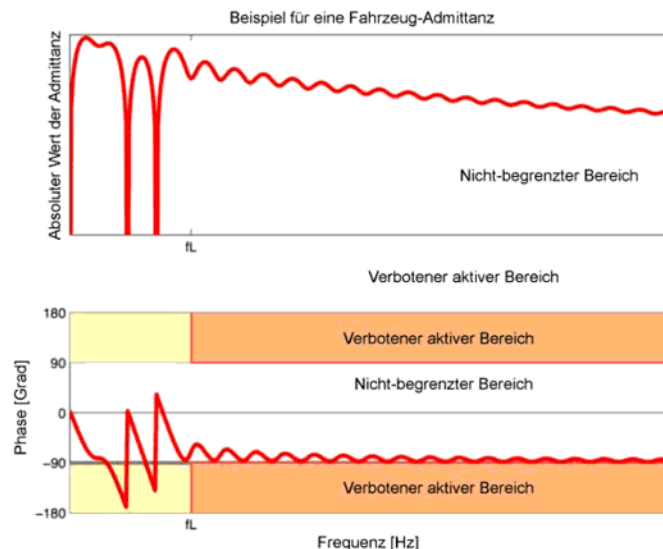


Bild 1 – Beispiel für ein Frequenzverhalten der Eingangsadmittanz einer Triebfahrzeugeinheit sowie für verbotene Bereiche des Phasenwinkels

Siehe 5.1 wegen der Bewertung der oben festgelegten Anforderungen.

4.2 Niederfrequenzstabilität

Bei Niederfrequenzstabilität geht es um Schwingungen bei einer Frequenz unterhalb der Netzfrequenz (50 Hz oder 16,7 Hz). Diese Schwingungen treten zwischen Fahrzeugen und einer Energieversorgung mit induktiven und kapazitiven Elementen auf und werden durch Rückkopplungsschleifen sowie Begrenzungen und Schutzfunktionen innerhalb des Systems eingeleitet. Die Folgen können erhebliche Betriebsunterbrechungen sein, auch wenn der Grenzwert für Überspannungen nicht erreicht wird.

Da die Niederfrequenzstabilität multidimensional ist (gekoppelte Rückkopplungsschleifen sowohl für den Wert als auch für die Phase der Spannung und des Stroms), sind bisher keine einfachen Schnittstellen-Anforderungen an einzelne Komponenten definiert worden.

Das zu untersuchende System ist ein vereinfachter Fall eines Bahnsystems, das aus:

- einer konstanten oder gesteuerten Spannungsquelle (Energieversorgungssystem);
- einem linearen Netzwerk (Energieversorgungssystem);
- einem oder mehreren Fahrzeugen an einem einzigen Ort

besteht.

Die Stabilität muss bei einem vereinfachten System für eine Anzahl von fest vorgegebenen Fällen aufrechterhalten werden.

Tabelle 4 zeigt die genormten Fälle, die bei einer Stabilitätsanalyse zu verwenden sind. Die beiden Spalten rechts definieren die zu untersuchenden Fälle. Tabelle 5 zeigt die zu verwendenden Daten.

Tabelle 4 – Fälle der Niederfrequenzstabilität

Fall	Beschreibung	System		Für die folgenden neuen Elemente zu überprüfen	
		16,7 Hz	50 Hz	Fahrzeuge	Infrastruktur-Komponenten
A	Hohe Fahrleitungsimpedanz/ein oder zwei Züge ^b	X	X	X	
B	Betriebshof/große Anzahl von Zügen ^b	X	X	X	
C	Umformer gegen Züge ^a	X		X	X
D	Umrichter/Kompensatoren gegen Fahrzeuge ²⁾	X	X	X	X
E	Stromrichter/Kompensatoren gegen andere Stromrichter/Kompensatoren ^b	X	X		X
^a Gilt nur für Schweden und Norwegen (Synchron-Synchron-Umformer ohne Dämpfungswicklungen). Die dynamischen Eigenschaften dieser Umformer dürfen nach C.1 vom Infrastrukturmanager mitgeteilt werden. ^b Fälle (A und B im Falle von mehreren Fahrzeugtypen sowie D und E), die für künftige Überarbeitungen dieser Norm definiert sind und Multikomponenten-Simulatoren oder eine MIMO-Nyquist-Stabilitätsanalyse erfordern. Diese sind in der vorliegenden Version nicht weiter beschrieben. In diesen Fällen muss der in prEN 50388-1:2017, Abschnitt 10, beschriebene Prozess verwendet werden.					

Tabelle 5 – Parameter für Fälle der Niederfrequenzstabilität (1 von 2)

Fall	Beschreibung	f_line	U_line [kV]	abs(Z_L)	Winkel(Z_L)	Last	Vorhandene Leistung ^a
A1.1	Hohe Fahrleitungsimpedanz, ein Fahrzeugtyp	16,7	15,75	30 Ohm	35, 45, 55°	keine Last	mindestens 6 MW
A2.1	Hohe Fahrleitungsimpedanz, zwei Fahrzeugtypen	16,7	15,75	30 Ohm	35, 45, 55°	keine Last	mindestens je 3 MW
A3.1	Hohe Fahrleitungsimpedanz, ein Fahrzeugtyp	16,7	17,25	17 Ohm	35, 45, 55°	50 % Bremsung	mindestens 6 MW
A4.1	Hohe Fahrleitungsimpedanz, ein Fahrzeugtyp	16,7	14,25	7 Ohm	35, 45, 55°	80 % Antrieb	mindestens 6 MW
A1.2	Hohe Fahrleitungsimpedanz, ein Fahrzeugtyp	50	26,25	60 Ohm	60, 70, 80°	keine Last	mindestens 6 MW
A2.2	Hohe Fahrleitungsimpedanz, zwei Fahrzeugtypen	50	26,25	60 Ohm	60, 70, 80°	keine Last	mindestens je 3 MW

Tabelle 5 (1 von 2)

Fall	Beschreibung	f_line	U_line [kV]	abs(Z_L)	Winkel(Z_L)	Last	Vorhandene Leistung ^a
A3.2	Hohe Fahrleistungsimpedanz, ein Fahrzeugtyp	50	27,5	44 Ohm	60, 70, 80°	50 % Bremsung	mindestens 6 MW
A4.2	Hohe Fahrleistungsimpedanz, ein Fahrzeugtyp	50	23,75	38 Ohm	60, 70, 80°	80 % Antrieb	mindestens 6 MW
B1.1	Betriebshof, ein Fahrzeugtyp	16,7	15,75	1,5 Ohm	90°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 90 MW
B2.1	Betriebshof, zwei Fahrzeugtypen	16,7	15,75	1,5 Ohm	90°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 45 MW + 22,5 MW des Referenzfahrzeugs im Normalmodus
B3.1	Betriebshof, ein Fahrzeugtyp	16,7	15,75	7 Ohm	55°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 27 MW
B4.1	Betriebshof, zwei Fahrzeugtypen	16,7	15,75	7 Ohm	55°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 13,5 MW + 7 MW des Referenzfahrzeugs im Normalmodus
B1.2	Betriebshof, ein Fahrzeugtyp	50	26,25	4,5 Ohm	90°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 90 MW
B2.2	Betriebshof, zwei Fahrzeugtypen	50	26,25	4,5 Ohm	90°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 45 MW + 22,5 MW des Referenzfahrzeugs im Normalmodus
B3.2	Betriebshof, ein Fahrzeugtyp	50	26,25	10 Ohm	75°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 27 MW
B4.2	Betriebshof, zwei Fahrzeugtypen	50	26,25	10 Ohm	75°	Betriebs-hofsmodus	mindestens 13,5 MW + 7 MW des Referenzfahrzeugs im Normalmodus
C1	Umformer des Typs Q38, ein Fahrzeugtyp	16,6667	15,75	30 Ohm	35, 45, 55°	keine Last	mindestens 6 MW
C2	Umformer des Typs Q38, ein Fahrzeugtyp	16,6667	17,25	17 Ohm	35, 45, 55°	50 % Bremsung	mindestens 6 MW
C3	Umformer des Typs Q38, ein Fahrzeugtyp	16,6667	14,25	7 Ohm	35, 45, 55°	80 % Bremsung	mindestens 6 MW

^a Höchste Leistung der Zugeinheit, aber mindestens die in den Spalten aufgeführten Werte (Leistung am Rad)

ANMERKUNG 1 In den Fällen B1.1 bis B4.2 ist keine Überprüfung erforderlich, falls Diodengleichrichtung verwendet wird.

ANMERKUNG 2 Es wird kein weiterer Stabilitätsspielraum definiert, da dieser in den obigen Parametern (Impedanz) enthalten ist.

ANMERKUNG 3 Betriebshof bedeutet, dass die Summe von Höchstleistungen am Rad des Fahrzeugs dem Wert in der Spalte „Vorhandene Leistung“ entspricht, z. B. für den Fall mit einer vorhandenen Leistung von 90 MW und 15 Triebfahrzeugeinheiten mit je 6 MW Höchstleistung am Rad. Fahrzeugseitige Leistungsschalter sind eingeschaltet, aber ohne Antriebsleistung.

Bei abgestellten Fahrzeugen sollte das Pulsen der netzseitigen Traktionsstromrichter ausgeschaltet werden, wenn die verbrauchte Leistung (z. B. für Hilfsbetriebe) weniger als 12 – 15 % der Nennleistung am Rad beträgt. Diese Werte wurden aus Betrachtungen hinsichtlich des Energieverlusts in Unterwerkstransformatoren abgeleitet, siehe A.4.3. Sollte dies jedoch zu einer Überdimensionierung der Hilfsbetriebebestromrichter führen,

ren, können die Werte angepasst werden. Hilfsbetriebebestromrichter dürfen in diesem Fall über Diodengleichrichter gespeist werden. Dies kann der Stabilität dienen, falls die Anforderungen für eine große Anzahl von Zügen sonst nicht erfüllt werden können.

Bei besonderen Vorgängen auf einer Triebfahrzeugeinheit, wie dem Anlaufen eines Kompressors, der Reaktion auf netzseitige Gleichströme, die den Transformator sättigen, oder der Verletzung von Grenzwerten für Oberschwingungsströme, ist für kurze Zeitspannen das Pulsen der netzseitigen Stromrichter weiterhin erlaubt.

Bezüglich der Bewertung der oben festgelegten Anforderungen siehe 5.2.

4.3 Durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen

4.3.1 Allgemeines

Oberschwingungsströme, die durch das Pulsen von Netzstromrichtern in Fahrzeugen erzeugt werden, können durch elektrische Resonanzen in den elektrischen Energiesystemen verstärkt werden. Dies kann zu Überspannungen führen. Anders als bei Stabilitätsphänomenen gibt es in diesem Fall keine Rückkopplungsschleife. Hintergrundinformationen und Beispiele finden sich in [Anhang A](#).

4.3.2 Fahrzeugpark

4.3.2.1 Erzeugung von Oberschwingungsströmen

Um durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen in Wechselstrom-Bahnenergieversorgungssystemen zu vermeiden, müssen die Fahrzeuge die folgenden Anforderungen erfüllen:

Für eine Zahl von N unabhängig beeinflussenden Einheiten (IU) eines identischen Typs muss der erwartete Effektivwert für die Oberschwingungs-Fahrleitungsspannung U_H bei jeder Resonanzfrequenz unterhalb $U_{\max H}$ nach den in Tabelle 6 aufgeführten Werten liegen:

Tabelle 6 – Werte für $U_{\max H}$

Energieversorgungssystem	15 kV, 16,7 Hz-System	25 kV, 50 Hz-System
$U_{\max H}$	3,2 kV	6,4 kV
Dabei ist $U_{\max H} = U_{\text{peak}} / \sqrt{2} - U_{\max 2}$ und U_{peak} = höchste zulässige Scheitelspannung im Energieversorgungssystem nach prEN 50388-1:2017, 10.4. $U_{\max 2}$ = höchste Spannung nach EN 50163.		

Der Grenzwert gilt für eine IU in allen Betriebsmodi. Anforderungen an eingeschränkte Modi (z. B. ein Drehgestell nicht in Betrieb wegen eines Hardware-Fehlers) werden durch eine andere Definition des Faktors N abgeschwächt.

N wird aus der höchsten Leistung am Rad der beeinflussenden Einheit berechnet und auf die nächsthöhere ganze Zahl aufgerundet. Zwei Fälle müssen berücksichtigt werden (die ungefähr die unterschiedlichen Bedingungen in einem vermaschten oder einem isolierten Netz darstellen). Die IU muss den Grenzwert für alle sechs in [Tabelle 7](#) aufgeführten Fälle einhalten.

Tabelle 7 – Beeinflussende Einheiten (IU)

Anzahl der IU	Vermaschtes Netz	Isoliertes Netz
N (Normalbetrieb)	150 MW/P _{max, wheel}	50 MW/P _{max, wheel}
N (eingeschränkter Betrieb)	6	2
N (Stillstand und keine Zugkraft; gilt für sowohl gepulste Netzstromrichter als auch Diodengleichrichtung)	200 MW/P _{max, wheel}	150 MW/P _{max, wheel}

Eine beeinflussende Einheit (IU) darf aus mehreren Triebfahrzeugeinheiten (TU) bestehen. Die TUs und die IUs werden geringfügig anders als in CLC/TS 50238-2 definiert. Nur die TUs, die von demselben Fahrsteuerschalter gesteuert werden oder ihre Referenzwerte von demselben Fahrsteuerschalter erhalten, sind Teil derselben IU. Unabhängig gesteuerte TUs (eigener Triebfahrzeugführer oder anderer Fahrzeugtyp) sind nicht Teil derselben IU.

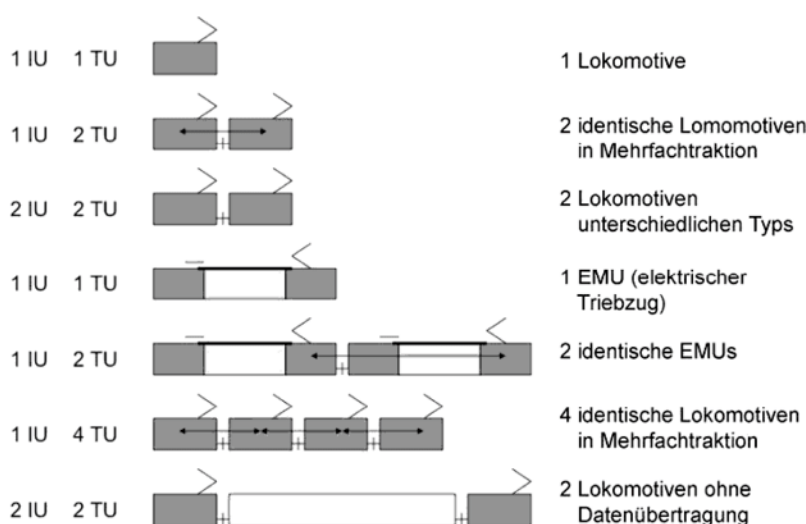


Bild 2 – Beeinflussende Einheiten (IU) und Triebfahrzeugeinheiten (TU)

U_H , die erwartete Oberschwingungsspannung bei der Resonanz, wird wie folgt berechnet:

$$U_H = Z_{res} * I_{IU0} * k_Z * k_N$$

Dabei ist

Z_{res} der genormte Wert für die höchste Impedanz bei den Resonanzen; er ist ohmsch (kein Blindteil (siehe Tabelle 8);

Tabelle 8 – Wert für Z_{res}

Impedanz bei Resonanz	Vermaschtes Netz	Isoliertes Netz
Z_{res}	200 Ohm	2 000 Ohm

I_{IU0} der Bandpass-gefilterte und integrierte Fahrleistungsstrom der beeinflussenden Einheit (siehe unten);

k_Z der Reduktionsfaktor, wobei der Einfluss der passiven Impedanz der beeinflussenden Einheit berücksichtigt wird;

k_N der Faktor, der die Addition der Oberschwingungen zwischen den verschiedenen IUs berücksichtigt.

I_{IU0} wird wie folgt berechnet:

- Simulation des gesamten Fahrleistungsstroms der IU bei Nennspannung und idealer sinusförmiger Versorgungsspannung mit einer Fahrleistungsimpedanz von Null;
- Betriebspunkt an der Stelle, an der der höchste I_{IU0} der IU erwartet wird;
- Bandpass-Filtern mit einer großen Anzahl von Bandpässen:
 - jedes Filter hat eine Mittenfrequenz von f_0 , so dass $500 \text{ Hz} \leq f_0 \leq f_{0\max}$;
 - der Unterschied zwischen zwei f_0 ist so klein, dass nur eine geringe Wahrscheinlichkeit besteht, dass höhere Werte für U_H für Frequenzen, die zwischen diesen beiden f_0 liegen, außer Acht gelassen werden;
 - $f_{0\max}$ ist so hoch, dass sichergestellt ist, dass U_H nur unterhalb der bereits erreichten Werten fallen kann, wenn f_0 weiter steigt;
 - die 2. Ordnung (= 2 * 1. Ordnung) von Bandpassfiltern hat eine 3-dB Bandbreite = $0,1 * f_0$;

ANMERKUNG 1 Diese Eigenschaft wird an typische Resonanzen in dem Bahnenergieversorgungssystem angepasst.

- Integration (Mittelung) durch einen verschiebbaren Effektivwert-Algorithmus mit einer Fensterlänge $T = 0,5 \text{ ms}$:

$$\sqrt{\frac{1}{0,0005} \cdot \int_{tx}^{tx+0,0005} i(t)^2 dt} \quad (1)$$

ANMERKUNG 2 Diese Zeitkonstante ist unabhängig von f_0 und ebenso an die Erregung der typischen Resonanzen in dem Bahnenergieversorgungssystem angepasst.

Da die Fensterlänge kürzer als die Periodendauer des Fahrleistungsstroms für die Grundfrequenz ist, muss die Bewertung in dem Zeitbereich aus dem Fahrleistungsstrom erfolgen.

- I_{IU0} ist dann der höchste Wert, der für jede Mittenfrequenz f_0 über eine Periodendauer des Fahrleistungsstroms erreicht wird.

k_Z wird wie folgt berechnet:

$$k_Z = |Z_{\text{veh}}| / (a * N * Z_{\text{res}} + |Z_{\text{veh}}|) \quad (2)$$

Dabei ist

Z_{res} die genormte Impedanz bei der Resonanz (siehe oben);

Z_{veh} die passive Impedanz der IU von der Energieversorgung aus in den Zug hinein gesehen, wobei die internen Spannungen auf null gesetzt sind. Impedanzen von auf dem Dach verlegten Kabeln, die direkt mit der Fahrleitungsspannung verbunden sind, sowie Nebeneffekte innerhalb der Leitungsschaltungen (z. B. Transformator-Kapazitäten) dürfen nicht berücksichtigt werden, weil ihr Einfluss in dem allgemeinen Effekt der Resonanzverstärkung bereits berücksichtigt ist;

N die erforderliche Anzahl von IUs;

a ein Reduktionsfaktor, der berücksichtigt, dass die Fahrleistungsimpedanz nicht nur an der Spitze einer Resonanz effektiv ist, sondern über eine größere Bandbreite. a muss 0,5 sein;

ANMERKUNG 3 Die Berechnung von k_Z kann in einem vereinfachten Ersatzschaltbild für N IUs (links) in Kombination mit einer einzigen Einheit mit geänderten Streckenparametern (rechts) veranschaulicht werden. Die Spannung am Dachstromabnehmer ist in beiden Fällen die gleiche.

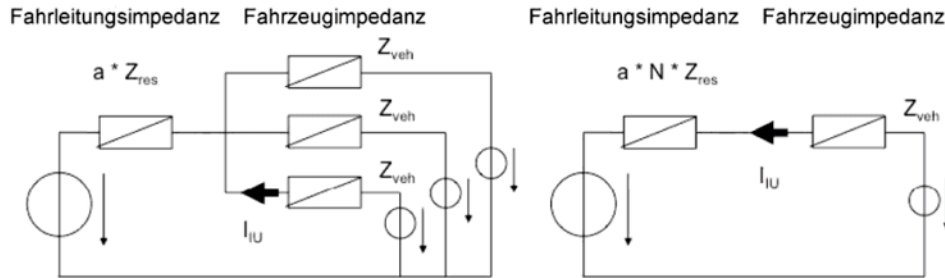


Bild 3 – Veranschaulichung von k_z

k_N wird wie folgt definiert:

- es gibt eine zufällige Verschiebung der Schaltwinkel zwischen den verschiedenen IUs (siehe Tabelle 9);

Tabelle 9 – Werte für N bei einer zufälligen Verschiebung der Schaltwinkel zwischen verschiedenen IUs

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
k_N	1	1,95	2,76	3,38	3,86	4,27	4,63	4,98	5,30	5,60	5,90	6,17	6,44	6,68	6,91	7,12

- wenn $N > 16$, ergibt sich k_N aus der linearen Interpolation von $N = [16; 1\ 600]$ und $k_N = [7,12; 71,2]$ in einer doppelt logarithmischen Skala;

ANMERKUNG 4 Diese Faktoren für $N \leq 16$ sind identisch mit dem Faktor k_L für die Überlagerung von Oberschwingungen mit gleichen Werten, aber die zufällige Phase ist wie in [CLC/TS 50238-2:2015, B.8.2](#), definiert.

- wenn es keine zufällige Verschiebung gibt, ist $k_N = N$.

4.3.2.2 Überspannungserkennung

Triebfahrzeugeinheiten müssen mit einem Schutz gegen Spitzenspannungen auf der Versorgungsspannung ausgerüstet sein. Wenn die Spitzenspannung (die als der höchste Wert während der halben Grundperiode der Netzfrequenz definiert ist), permanent (d. h. in jeder Periodendauer der Netzspannung) den in der nachfolgenden Tabelle festgelegten Wert länger als die festgelegte Zeit t_1 übersteigt, müssen die Traktionsstromrichter das Pulsen beenden und eine Diagnosemeldung muss aufgezeichnet werden. Netzstromrichter können nach einiger Zeit (t_2 ; diese Zeit kann mit anderen Schutzfunktionen der Traktionsstromrichter koordiniert werden) wieder anlaufen. Wenn die Überschreitung wiederholt öfter als t_3 auftritt, müssen die Netzstromrichter gesperrt werden. Andernfalls besteht die Gefahr, dass Überspannungsableiter überlastet werden und Kurzschlüsse in dem Energieversorgungssystem verursachen können. Ein Neuanlauf muss nach dem manuellen Eingreifen durch den Triebfahrzeugführer möglich sein. Der Triebfahrzeugführer muss die Leitstelle von dem Ereignis in Kenntnis setzen. Tabelle 10 zeigt die Grenzwerte für die Spitzenspannung für beide Netzfrequenzen.

Tabelle 10 – Grenzwerte für die Überwachung der Spitzenspannung

Netzfrequenz	Periodische Spitzenspannung für Schutz	Zeit t_1	Zeit t_2	Zeit t_3
16,7 Hz	32 kV ^a	1 s ^b	3 – 5 s	20 s
50 Hz	53 kV ^a	1 s ^b	3 – 5 s	20 s

^a Die Werte sind von den höchsten zulässigen Werten nach prEN 50388-1 zusätzlich ca. 6 % abgeleitet.

^b Dieser Wert erlaubt Springen des Dachstromabnehmers ohne weiteres Eingreifen.

Vorhandene Spannungssensoren können auf den Fahrzeugen verwendet werden. Der Einbau von Präzisionssensoren mit hoher Genauigkeit und/oder großer Bandbreite ist nicht erforderlich. In der Software müssen die Parameter für die Schutzfunktionen so gewählt werden, dass die bestmögliche Übereinstimmung für einen Frequenzbereich bis zu 5 000 Hz mit der in [Tabelle 10](#) festgelegten Spannung gewährleistet ist, soweit die Messgeräte dies erlauben. Diese Erkennung kann auch durch Unterabtastung erreicht werden und erfordert nicht eine Abtastgeschwindigkeit von 10 000 Hz (theoretisch notwendig für eine präzise Erkennung).

ANMERKUNG Dieser Schutz wird:

- verhindern, dass Überspannungsableiter zu viel Energie aufnehmen und in kritischen Fällen versagen;
- den Infrastrukturmanager über das Vorhandensein solcher kritischen Fälle informieren, die andernfalls unerkannt bleiben und später zu Fehlern in dem elektrischen Energiesystem (vorzeitige Alterung, Unterbrechung des Betriebs) führen könnten.

4.3.2.3 Diodengleichrichtung

Wenn die übertragene Leistung eines Traktionsstromrichters niedrig ist und das Fahrzeug steht und weder Zug- noch elektrische Bremskraft benötigt, sollten die netzseitigen Traktionsstromrichter das Pulsen beenden und nur die Freilaufdioden müssen den Laststrom führen. Dieser Betriebsmodus muss angewendet werden, wenn die Leistung unter dem in [Tabelle 11](#) festgelegten Wert ist (siehe [Anhang A](#) für Hintergrundinformationen). Eine Hysterese kann angewendet werden, um sich wiederholende Anläufe und Beenden des Pulsens der netzseitigen Traktionsstromrichter bereits wegen geringer Schwankungen der verbrauchten Leistung zu vermeiden.

Tabelle 11 – Verwendung von Diodengleichrichtung

Netzfrequenz	Augenblickliche Leistung geteilt durch die Nennleistung [kVA] des/der netzseitigen Traktionsstromrichter(s)
16,7 Hz	12 – 15 %
50 Hz	12 – 15 %

Die in [Tabelle 11](#) aufgeführten Werte wurden aus Betrachtungen hinsichtlich des Energieverlusts in dem Unterwerkstransformator abgeleitet, siehe [A.3.3](#). Sollte dies jedoch zu einer Überdimensionierung der Hilfsbetriebsstromrichter führen, können diese Werte angepasst werden.

ANMERKUNG Dieser Betriebsmodus wird benötigt, um Oberschwingungsüberspannungen innerhalb des Betriebsbereichs zu vermeiden, in denen viele Züge abgestellt sind, die alle bei relativ niedriger Leistung betrieben werden (z. B. Mehrsystemzüge, bei denen die Hilfsbetriebe, die Heizung und die Klimaanlage über die Traktionsstromrichter gespeist werden). Der Modus ohne Pulsen des Netzstromrichters wird erheblich weniger Oberschwingungsströme bei einer hohen Frequenz erzeugen, die örtliche Resonanzen in dem Energieversorgungssystem erregen könnte. Andererseits werden mehr niederfrequente Oberschwingungen erzeugt, die den Unterwerkstransformator überlasten könnten (Schwachlast-Faktor). Dieser Betriebsmodus sollte daher auf eine geringe übertragende Leistung begrenzt sein. Diese niederfrequenten Oberschwingungen erregen nicht Resonanzfrequenzen.

Bei besonderen Vorgängen auf einer Triebfahrzeugeinheit, wie dem Anlaufen eines Kompressors, der Reaktion auf netzseitige Gleichströme, die den Transformator sättigen, oder der Verletzung von Grenzwerten für Oberschwingungsströme, ist für kurze Zeitspannen das Pulsen der netzseitigen Stromrichter weiterhin erlaubt.

All diese Anforderungen gelten für neue Fahrzeuge mit konventionellen Transformatoren und PWM-Netzstromrichtern. Bei Überspannungen, die beim Vorhandensein von Triebfahrzeugeinheiten mit phasenanschnitt-gesteuerten Stromrichtern auftreten, muss die Situation überprüft und Gegenmaßnahmen müssen festgelegt werden; hierbei ist der in prEN 50388-1 beschriebene Kompatibilitätsprozess zu verwenden. Wenn die festgelegten Anforderungen mit unkonventionellen neuen Antriebssystemen nicht erfüllt werden können, müssen diese nach dem in prEN 50388-1 beschriebenen Kompatibilitätsprozess behandelt werden.

4.3.3 Umrichter

- Das Pulsen des Umrichters darf nicht unerlaubte Überspannungen in dem 15 kV- oder 25 kV-Netz verursachen. Der höchste Wert, der in dem stationären Betriebszustand des Umrichters erreicht wird, darf den folgenden Wert nicht überschreiten:

$$U_H \leq b \cdot U_{\max H}$$

Tabelle 12 – Wert für $U_{\max H}$

Energieversorgungssystem	15 kV, 16,7 Hz-System	25 kV, 50 Hz-System
$U_{\max H}$	3,2 kV	6,4 kV

(Identische Werte wie für Fahrzeuge, siehe 4.3.2.1.)

Der Faktor b hängt von der Höchstleistung $S_{\max}$ des Umrichters ab:

- für $S_{\max} \geq 50$ MVA: $b = 0,7$
- für $S_{\max} < 50$ MVA: $b = 0,7 \cdot (S_{\max}/50 \text{ MVA})^{0,5}$
- Vorkehrungen zur Verbesserung der Spannungsqualität bei geringem Kostenaufwand (z. B. versetztes Pulsen zwischen den einzelnen Phasenmodulen oder zwischen kompletten Umrichterblöcken) müssen auf jeden Fall durchgeführt werden, auch wenn die oben festgelegten Grenzwerte ohne diese Vorkehrungen eingehalten werden könnten.

4.3.4 Infrastruktur

Für die Infrastruktur (das Energieversorgungssystem) gelten die folgenden Anforderungen:

- Innerhalb Betriebshofbereiche: Die Dimensionierung der Anlagen (Transformator und Kabel) muss nicht nur die Last bei der Grundfrequenz, sondern auch das Spannungsspektrum und die entsprechenden Spitzenspannungen in dem Bereich berücksichtigen. Bei der Dimensionierung neuer Anlagen müssen entsprechende Berechnungen vorgenommen werden. Dabei muss berücksichtigt werden, welche Typen von Triebfahrzeugeinheiten in dem Bereich betrieben werden sollen.

In diesem Kontext ist ein „Betriebshofbereich“ allgemein als ein Bereich definiert, in dem das Verhältnis zwischen der Summe der in allen Triebfahrzeugeinheiten eingebauten und von einem Unterwerk versorgten Leistung bei Stillstand (Antriebsleistung am Rad plus Versorgung der Hilfsbetriebe und des Zuges) und der Bemessungsleistung dieses Unterwerks den Faktor 4 übersteigt.

Bahnhöfe, Güterbahnhöfe und Orte, an denen dieselbe Situation entsteht, werden als Betriebshofbereiche betrachtet.

ANMERKUNG Es ist nicht nur schwierig, allgemeine Regeln für die Dimensionierung festzulegen, sondern diese wären in den meisten Fällen unverhältnismäßig einschränkend. Es ist daher wirtschaftlicher, die Energieversorgung für den tatsächlich vorkommenden Fall auszulegen und einige zusätzliche Berechnungen anzustellen, als alle neuen Speisestationen für Betriebshofbereiche zu überdimensionieren.

- Bei allen anderen Teilen des Energieversorgungssystems (normale Unterwerke, Oberleitungssysteme): Es gibt keine weiteren Beschränkungen wegen der durch Oberschwingungen verursachten Überspannungen (d. h. zusätzlich zu der üblichen Dimensionierung von Anlagen, für die Bemessungsleistung, den Schutz usw.).

ANMERKUNG Die oben festgelegten Anforderungen an die Fahrzeuge werden in den meisten Fällen ausreichenden Schutz gegen die von Oberschwingungen verursachten Überspannungen gewährleisten. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es nicht gerechtfertigt, der Infrastruktur weitere Beschränkungen aufzuerlegen oder weitere Studien zu fordern, außer wenn es um Betriebshöfe geht.

In sehr seltenen Fällen können durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen auftreten, obwohl alle oben festgelegten Anforderungen (an Fahrzeuge, im Falle von Betriebshöfen) eingehalten werden. Solche Fälle werden durch die Schutzfunktion auf den Fahrzeugen erfasst. Der Grund könnte eine örtliche

Resonanz mit niedriger Dämpfung sein. Eine solche Situation muss untersucht werden. Infrastrukturmäßige Gegenmaßnahmen (z. B. Filter, Dämpfungseinrichtungen, Änderung der Abschnitte der Energieversorgung usw.) müssen vorgenommen werden. Die Gegenmaßnahmen dürfen auch auf nicht-interoperablen Fahrzeugen durchgeführt werden, wenn dies wirtschaftlich sinnvoll ist. In diesem Fall muss nach dem in prEN 50388-1:2017, Abschnitt 10, Absatz 10, beschriebenen Kompatibilitätsprozess verfahren werden.

Bezüglich der Bewertung der oben festgelegten Anforderungen siehe 5.3.

5 Prüfungen und Dokumentation

5.1 Elektrische Resonanzstabilität

5.1.1 Fahrzeugpark

5.1.1.1 Allgemeines

Der Nachweis der Konformität wird durch die Angabe des Frequenzverhaltens der Eingangsadmittanz einer Triebfahrzeugeinheit erreicht. Dies muss bis zur Frequenz $f_{\max}$ durchgeführt werden, die sicherstellt, dass das Fahrzeug nur bei $f > f_{\max}$ passiv sein kann. Normalerweise entspricht $f_{\max}$ der Hälfte der Abtastfrequenz der Steuerung des Netzstromrichters (die höher sein darf als die Schaltfrequenz eines Leistungshalbleiters, wenn mehrere Stromrichtermodule von einem Steuergerät gesteuert werden). Der Hersteller muss ausreichende Informationen über das Antriebssystem zur Verfügung stellen, damit $f_{\max}$ definiert werden kann.

Da eine Überlagerung der Eingangsadmittanz mehrerer identischer oder nicht identischer TUs durch Addition einfach erreicht werden kann, ist es nicht erforderlich, die Konformität bei Mehrfachtraktion nachzuweisen.

5.1.1.2 Messungen

Messungen nach der folgenden Spezifikation müssen als eine Typprüfung für neue Fahrzeuge oder für Fahrzeuge mit einem umgerüsteten elektrischen Antriebsstrang oder umgerüsteten Traktionsstromrichtern sowie für die Validierung von Simulatoren durchgeführt werden. Eine kombinierte Prüfung (nach EN 61377-1) von einem Antriebssystem ist eine mögliche Alternative zu Messungen auf dem Fahrzeug, falls die folgenden Anforderungen erfüllt sind.

Die Messungen müssen unter den folgenden Bedingungen durchgeführt werden:

- beim Stillstand, wobei alle Eingangs-Traktionsstromrichter und alle Eingangs-Hilfsbetriebstromrichter pulsen. Beispielsweise kann dies gewöhnlich durch den Aufbau von ungefähr 10 % oder mehr Zugkraft bei angelegten mechanischen Bremsen erreicht werden, um das Pulsen aller Stromrichter sicherzustellen;
- bei einer TU, einschließlich der von einem Dachstromabnehmer versorgten Hilfsbetriebe (eine TU ist z. B. eine Lokomotive, ein Triebkopf, eine Gruppe von Triebfahrzeugeinheiten eines Triebzuges, einschließlich Heizung, Lüftung und Klimaanlage, die über eine stromrichtergespeiste Zugleitung versorgt werden);
- mit allen ohmschen Lasten (z. B. Heizwiderständen) ausgeschaltet, falls diese mit den aus der Fahrleitung gespeisten Stromkreisen direkt verbunden sind (d. h. nicht durch gesteuerte Stromrichter getrennt sind);
- direkt mit der Zugsammelschiene verbundene Stromrichter von Personenwagen müssen separat gemessen werden, z. B. auf einem Prüfstand. Während der Prüfung einer Triebfahrzeugeinheit muss die Zugsammelschiene ausgeschaltet sein.

Während der Messungen müssen mindestens alle Eingangs-Traktionsstromrichter und alle Eingangs-Hilfsbetriebstromrichter der Triebfahrzeugeinheit pulsen. Darüber hinaus muss jede andere betrieblich relevante Konfiguration (z. B. geringere Anzahl pulsender Stromrichter, nur Hilfsbetriebe) auch gemessen werden. Falls dies nicht möglich ist, muss für diese Konfigurationen ein Nachweis der Konformität durch Simulation erbracht werden. Bild 4 zeigt das Messprinzip.

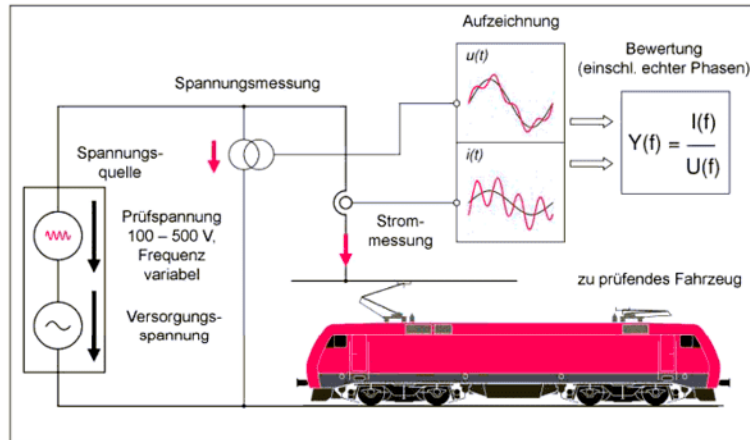


Bild 4 – Schematische Darstellung für die Messung der Eingangsadmittanz

Der Prüfaufbau muss die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Mindestprüffrequenz: $0,9 \cdot f_L$ (oder niedriger);
- höchste Prüffrequenz: ausreichend hoch, um die allgemeinen Anforderungen erfüllen zu können (siehe oben);
- Spannungswert des Prüfsignals: 100 V bei 50 Hz, mindestens 20 Hz bei 2 kHz werden als Mindestwerte am Dachstromabnehmer empfohlen. Im Idealfall sind die Spannungen mindestens zweimal so hoch. Die Spannung des Prüfsignals an der Zugsammelschiene muss in einem ähnlichen Verhältnis zu der entsprechenden Nennspannung sein;

ANMERKUNG Die sich ergebenden Ströme bei der Prüffrequenz betragen normalerweise ungefähr 1 A oder weniger.

- die zu messenden Werte sind die Fahrleitungsspannung am Dachstromabnehmer und der Eingangsstrom des zu prüfenden Fahrzeugs. Die verwendeten Wandler müssen eine ausreichende Genauigkeit aufweisen, nicht nur in Bezug auf den Wert, sondern auch in Bezug auf die Phase;

ANMERKUNG Die folgenden Arten von Wandlern sind erfolgreich verwendet worden: kapazitive (oder ohmsche/kapazitive) Spannungsteiler für die Messung der Fahrleitungsspannung, Rogowski-Spulen für die Messung des Fahrleitungsstroms.

- systematische Messfehler, insbesondere bei der Phase, müssen vor der Messung ermittelt werden. Dies muss durch das Prüfen der gesamten Messkette, einschließlich des Eingangsfilters des Datenaufzeichnungsgeräts, mit bekannten Prüfsignalen oder durch eine Messung eines bekannten Prüfobjektes (z. B. eines Induktors im Energieversorgungspfad, gemessen mit einer Frequenz bis zu dreimal der zu bewertenden Frequenz) erreicht werden. Das Wissen von systematischen Fehlern der Messkette erlaubt es, Messungen entsprechend zu korrigieren.
- die verwendeten Stromwandler dürfen keine Nichtlinearitäten um den Nullstrom herum haben;
- die Frequenz des Prüfsignals muss immer in einem gebrochen rationalen Verhältnis zu der augenblicklichen Grundfrequenz f_N sein. Ergebnisse mit natürlichen Vielfachen der augenblicklichen Grundfrequenz können vernachlässigt werden, da diese alle Nichtlinearitäten des Hauptschaltkreises des Fahrzeugs (z. B. Magnetisierungsstrom des Transformators) enthalten;
- die Frequenzauflösung des Prüfsignals und die Dauer der Bewertung müssen mindestens sein wie in Tabelle 13 und Tabelle 14 dargelegt:

Tabelle 13 – Frequenzauflösung des Prüfsignals für 16,7 Hz-Netze

Prüfsignalfrequenz	Auflösung	Dauer für die Bewertung
$3 - 18 \cdot f_N$ (ca. 50 – 300 Hz)	$1 / 16 \cdot f_N$	≥ 16 Grundperioden
$> 18 \cdot f_N$ (>ca. 300 Hz)	$1 / 4 \cdot f_N$	≥ 4 Grundperioden

Tabelle 14 – Frequenzauflösung des Prüfsignals für 50 Hz-Netze

Prüfsignalfrequenz	Auflösung	Dauer für die Bewertung
$2 - 10 \cdot f_N$ (ca. 100 – 500 Hz)	$1 / 16 \cdot f_N$	≥ 16 Grundperioden
$> 10 \cdot f_N$ (>ca. 500 Hz)	$1 / 8 \cdot f_N$	≥ 8 Grundperioden

- die Prüfungsdauer für eine konstante Prüfsignalfrequenz muss mindestens zweimal so lang sein wie die Dauer für die Bewertung, wobei die Bewertung zum Ende hin jeder Periode mit einer konstanten Prüfsignalfrequenz erfolgt;

ANMERKUNG Dies stellt sicher, dass das Fahrzeug sich in einem ausreichend stationären Zustand befindet.

- Fensterfunktionen (z. B. Hanning-Fenster) dürfen für die Bewertung nicht verwendet werden, da dies negative Auswirkungen auf die Genauigkeit der gemessenen Phasen der Eingangsadmittanz haben kann.

Eine Bewertung, ob eine gemessene Admittanz passiv ist, muss nicht gemacht werden:

- bei (ganzzahligen) Oberschwingungen der Netzfrequenz;
- bei typischen Oberschwingungen des Netzstromrichters.

Bei diesen Frequenzen verhält sich der Stromrichter nicht wie ein System mit Rückkopplungsschleife, sondern wie eine Spannungsquelle, und der Transformator (die Sättigung) verhält sich wie eine Stromquelle. Deshalb ist es nicht möglich, die korrekte Admittanz zu berechnen.

Diese Frequenzen können während der Verarbeitung, aber nicht während der Messung ausgeschlossen werden.

Wenn der Absolutwert des realen Teils der Eingangsadmittanz (Summe dieses Wertes von allen Fahrzeugen des zu betrachtenden Typs, die in dem zu betrachtenden elektrischen Netz betrieben werden) bei einer bestimmten Frequenz klein ist im Vergleich zu der natürlichen Dämpfung in diesem Netz, sind die Phasenkriterien gegenstandslos. Siehe Bild in A.3.1 für Werte einer natürlichen Dämpfung. Um einen gemessenen Wert bei einer bestimmten Frequenz auszuschließen, muss ferner ermittelt werden, dass die Kriterien für die oben festgelegte Prüfspannungsamplitude erfüllt wurden.

Die folgenden, in Bild 5 gezeigten Anordnungen können zur Erzeugung des Prüfsignals verwendet werden:

A. Eine Prüfspannungsquelle **B.** Serieneinspeisung durch Spannungsabfall **C.** Erzeugung eines Prüfsignals

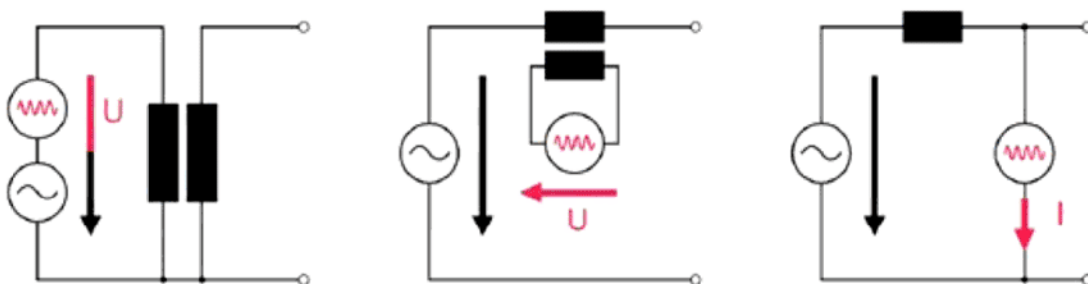


Bild 5 – Konfigurationen der Spannungsquelle

Diese Messanordnungen haben die folgenden Eigenschaften:

- A: die gesamte Prüfanordnung wird von einer einzigen Spannungsquelle versorgt, die im Stande sein muss, sowohl die Grundspannung als auch das Prüfsignal zu versorgen. Vorteil: Unabhängigkeit von der Bahnenergieversorgung, keine besonderen Schutzmaßnahmen. Nachteil: Die gesamte Leistung muss von dieser Quelle erbracht werden, die gleichzeitig im Stande sein muss, hohe, genau einstellbare Frequenzen zu erzeugen;

- B: Das Prüfsignal wird durch einen in Reihe geschalteten Transformator gespeist. Vorteil: Die Anordnung kann durch die normale Bahnenergieversorgung gespeist werden (wenn deren Spannungsverzerrung gering ist), und die erforderliche Leistung der Prüfsignalquelle ist niedrig. Nachteil: Schwieriger Kurzschlusschutz der Prüfsignalquelle;
- C: Das Prüfsignal wird durch einen Spannungsabfall über eine Impedanz erzeugt, die in Längsrichtung in den Versorgungspfad eingefügt wird, und eine Stromquelle wird während der Prüfung parallel zum Fahrzeug angeschlossen. Vorteil: Der gesamte Traktionsstrom fließt nicht über die Prüfsignalquelle, anders als in den Anordnungen A und B. Ferner gibt es keine besonderen Probleme mit dem Schutz der Anordnung. Nachteil: Die Prüfsignalquelle sieht die volle Fahrleitungsspannung und muss daher über einen Transformator angeschlossen werden.

5.1.1.3 Simulation

Simulationsmodelle können in den folgenden Fällen verwendet werden, wenn sie durch Messung validiert worden sind:

- Änderungen, die die Eingangsadmittanz beeinflussen (z. B. Software-Änderungen);
- Betriebspunkte, bei denen Messungen nicht möglich oder nicht praktikabel sind (z. B. bei voller Antriebsleistung), insbesondere bei Betriebspunkten, bei denen die Stabilität kritisch ist.

Alle Simulatoren müssen Real-Code-Simulatoren sein (d. h. sie müssen den vollständigen Steuercode für das Antriebssystem wie auf einem Fahrzeug verwenden, einschließlich aller Effekte der Verzögerungszeiten in der Steuerung und dem zugehörigen Stromrichter). Wenn die Simulation auch für den Nachweis der Konformität nach Änderungen in der Hardware des Steuerungssystems (z. B. Änderung der A/D-Wandler) verwendet wird, muss eine Hardware-in-the-Loop-Simulation erfolgen.

Eine Offline-Simulation mit Non-Real-Code-Modellen kann bei Fahrzeugen nicht verwendet werden, um die Konformität mit den Anforderungen an Resonanzstabilität nachzuweisen.

5.1.1.4 Konformitätserklärung

Der Infrastrukturmanager kann Kriterien definieren, gemäß denen der Nachweis der Konformität mittels einer Erklärung der Konformität zwischen einem neuen Typ von Triebfahrzeugeinheit und einem bereits abgenommenen Typ mit vergleichbaren (konformen) Eigenschaften erbracht werden darf.

5.1.1.5 Dokumentation

Die Dokumentation besteht aus:

- einem Prüfbericht, der folgendes umfasst:
 - a) Fahrzeugnummer;
 - b) Software-Versionen;
 - c) Prüfanordnung und -aufbauten;
 - d) gemessene Konfigurationen (normal, andere Modi wie oben definiert);
 - e) Messergebnisse;
 - f) Simulationsergebnisse, falls vorhanden, und ihre Begründung, falls erforderlich;
 - g) Grund für die Konformitätserklärung, falls zutreffend;
 - h) numerische Daten für die Ergebnisse (Messung und/oder Simulation) für jede Konfiguration: Frequenz, Admittanz (Wert und Phase oder realer und imaginärer Teil) in einem üblichen lesbaren Format. Die Dokumentation muss dem Infrastrukturmanager auf dessen Ersuch zur Verfügung gestellt werden.

5.1.2 Umrichter

Aus Gründen der Stabilität gelten dieselben Anforderungen wie für den Fahrzeugpark.

5.1.3 Infrastruktur

Eine erste Bewertung der niedrigsten Resonanzfrequenz muss unter Verwendung des folgenden, vereinfachten Verfahrens und der folgenden Daten erfolgen (wie in [CLC/TS 50238-2:2015, B.4](#)):

- Gesamtlänge l_{Lines} der elektrifizierten Gleise, einschließlich Nebengleise usw.;
- Gesamtlänge l_{Cables} der Zuleitungskabel;
- spezifische Kapazität c_{Line} der elektrifizierten Gleise mit den folgenden, in Tabelle 15 gezeigten typischen Werten für Strecken ohne Kabel:

Tabelle 15 – Spezifische Werte der Leitungskapazität

	c_{Line}	
c_{Line}	1×15 oder 11×25 kV	21×15 oder 21×25 kV (AT-Systeme) Spezifische Kapazität zwischen Phase und Erde, einschließlich des Effekts der Kopplung zwischen Stromrichtern
Eingleisige Strecke	10 bis 12 nF/km	12 bis 19 nF/km (positive Phase) 9 bis 15 nF/km (negative Phase)
Zweigleisige Strecke	17 bis 20 nF/km	20 bis 24 nF/km (positive Phase) 15 bis 18 nF/km (negative Phase)

- spezifische Kapazität c_{Cables} der Zuleitungskabel: 150 bis 240 (bis 330) nF/km;
- Leerlauf-Versorgungsspannung U_0 ist normalerweise wie in Tabelle 16 angegeben:

Tabelle 16 – Leerlauf-Versorgungsspannungsebenen

f_N	16,7 Hz	50 Hz
U_{nominal}	15 kV	25 kV
U_0	16,5 kV	27,5 kV

- der gesamte Kurzschlussstrom I_{Shc} (d. h. die Summe der Kurzschlussströme aller angeschlossenen Transformatoren in allen Unterwerken). Für diese Berechnung kann die Impedanz des Hochspannungsnetzes vernachlässigt werden; die Daten über den Unterwerkstransformator sind daher ausreichend.

Die niedrigste Resonanz wird dann wie folgt berechnet:

$$f_{\text{res}} = 1/2\pi * 1/\sqrt{L_{\text{Shc}} * C_{\text{Tot}}} \quad (3)$$

Dabei ist L_{Shc} die kombinierte Kurzschlussimpedanz aller Unterwerke:

$$L_{\text{Shc}} = U_0 / I_{\text{Shc}} / (2\pi f_N) \quad (4)$$

Jede Schaltungskonfiguration der Energieversorgung, die im Bahnbetrieb verwendet wird, muss untersucht werden.

Dabei ist C_{Tot} die Gesamtkapazität aller Leitungen und Kabel des untersuchten Bereichs:

$$C_{\text{Tot}} = C_{\text{Lines}} * l_{\text{Lines}} + c_{\text{cable}} * l_{\text{cables}} \quad (4)$$

Es sei angemerkt, dass in einer Näherung erster Ordnung die Kurzschlussströme und die Kapazitäten der positiven und negativen Phasenteile eines AT-Systems linear zusammengefasst werden können, um I_{Shc} und C_{Tot} zu erhalten.

Diese Methode reicht aus, wenn die in dieser Weise berechnete Resonanzfrequenz mindestens 200 % von f_L beträgt. Es wird angenommen, dass die korrekten Kabellängen in den obigen Formeln verwendet worden sind.

Wenn die oben genannte Berechnungsmethode eine Resonanzfrequenz unter 200 % von f_L ergibt, muss die Situation mittels eines validierten Berechnungs-Tools oder durch Messungen analysiert werden.

Messungen sind für gesteuerte Elemente (z. B. Umrichter) in der Energieversorgung als Teil der Typprüfungen erforderlich. Es gelten dieselben Regeln wie für den Fahrzeugpark (siehe auch 5.1.1).

Bei Energieversorgungssystemen als Ganzes sind Messungen nur für die Validierung von Tools oder für die Identifizierung von Komponenten erforderlich, wenn ausreichende Informationen nicht verfügbar sind.

5.2 Niederfrequenzstabilität

Es werden zwischen zwei Arten von Niederfrequenzstabilität unterschieden:

- Kleinsignalstabilität mit den in 4.2 festgelegten Anforderungen;
- Großsignalstabilität: nicht von dieser Norm umfasst.

Die Untersuchung hinsichtlich Kleinsignalstabilität muss:

- in der Form einer Zeitbereichssimulation oder
- nach dem DQ-Verfahren durchgeführt werden. Siehe A.2 für die Definition der Schnittstelleneigenschaften („DQ-Frequenzverhalten“ und MIMO-Nyquist-Verfahren“).

Die Prüfungen müssen auf Fahrzeugen durchgeführt werden, die für den Betrieb mit Synchron-Synchron-Umformern mit oder ohne reduzierte Dämpferwicklungen vorgesehen sind.

Der Zeitbereichssimulator muss ähnlichen Anforderungen an einen Simulator genügen wie bei der elektrischen Resonanzstabilität (Echtzeit oder Real-Code mit validierten Simulatoren).

Die folgenden Anforderungen werden an das zu untersuchende System gestellt:

- bei einer Zeitbereichssimulation (die Simulation muss für eine ausreichend lange Zeit erfolgen, damit kein Zweifel an der Erfüllung der folgenden Anforderungen besteht):
 - a) wird keine selbsterregte/-verstärkte Schwingung akzeptiert;
 - b) wird keine stehende/Dauer-/Langzeit-Schwingung akzeptiert;
 - c) muss die Reaktion auf eine Störung eindeutig gedämpft sein;
- bei einem DQ-Verfahren muss das Nyquist-Stabilitätskriterium des Systems in Form von Spannungen und Strömen erfüllt sein.

5.3 Durch Oberschwingungen verursachte Überspannungen

5.3.1 Fahrzeugpark

Die Konformität der Triebfahrzeugeinheiten mit den Anforderungen aus durch Oberschwingungen verursachten Überspannungen muss wie folgt geprüft und dokumentiert werden:

- Spektrum des Fahrleitungsstromes: Plausibilisierung der Berechnung ohne Energieversorgungsimpedanz bei Leerlauf durch einen Vergleich mit einer Messung. Es muss berücksichtigt werden, dass die größten Emissionen in einem Wechselstrom-Antriebssystem normalerweise bei der höchsten Zwischenkreis-Gleichspannung erfolgen und dass die höchste Zwischenkreis-Gleichspannung normalerweise nur

bei voller Leistung vorhanden ist. Für die Plausibilisierung dieses Effektes kann entweder eine Skalierung auf die höchste Zwischenkreis-Gleichspannung durchgeführt werden oder die Messergebnisse aus den Messungen des Störstroms mit einem fahrenden Zug können verwendet werden. Dokumentation im Prüfbericht.

- Wenn versetztes Pulsen innerhalb einer Triebfahrzeugeinheit (TU) verwendet wird, gelten die folgenden drei Punkte:
 - a) der korrekte Versatz zwischen den PWM-Mustern aller Netzstromrichtermodule muss durch Messung beim Stillstand in der Form einer Spektrumsanalyse des Fahrleitungsstromes der TU geprüft werden. Alle eingeschränkten Modi, die während des Normalbetriebs eintreten können, müssen berücksichtigt werden (z. B. ein Drehgestell nicht in Betrieb). Um zu garantieren, dass die Netzstromrichter normal pulsen, ist 10 % Zugkraft bei angelegten mechanischen Bremsen eine sinnvolle Einstellung. Dokumentation im Prüfbericht;
 - b) Versatz der Pulse zwischen verschiedenen TUs in einer IU: Entweder durch Messung oder durch angemessenen Nachweis der Software-Einstellungen als eine Funktion der Anzahl der TUs in der IU. Dokumentation im Prüfbericht;
 - c) zufälliger Versatz der Pulse zwischen verschiedenen TUs: Die beste Methode, diese Eigenschaft zu prüfen, hängt von der gewählten Lösung der Randomisierung ab. Die Prüfungen hinsichtlich des Versatzes in einer TU sowie zwischen den TUs müssen einen Nachweis einer solchen Randomisierung enthalten, z. B. gegen Nulldurchgänge der Fahrleitungsspannung. Dokumentation im Prüfbericht, einschließlich des Nachweises der Plausibilität der gewählten Methode;
- Überspannungsschutz: Die korrekte Funktion des Überspannungsschutzes muss als Teil der Prüfungen des Schutzes der Fahrleitungsspannung geprüft werden. Es muss überprüft werden, ob der Auslösepegel hinreichend genau ist und ob der Zeitablauf für das Sperren des Stromrichters und die Diagnose-nachrichten korrekt ist. Dokumentation im Prüfbericht;
- Diodengleichrichtung (wenn diese zur Minderung der Gefahr von Überspannungen verwendet wird): Überprüfung der korrekten Funktion (Pulsen/Sperren des Netzstromrichters) für unterschiedliche verbrauchte Leistung beim Stillstand. Für elektrische Triebzüge (EMUs) muss der Leistungsverbrauch für Heizung und Klimaanlage miterfasst werden (wenn diese durch den Netzstromrichter gespeist werden). Dokumentation im Prüfbericht.

5.3.2 Umrichter

Die Konformität der Umrichter mit den Anforderungen aus durch Oberschwingungen verursachten Überspannungen muss wie folgt geprüft und dokumentiert werden:

- die Einhaltung des in 4.3.3 angegebenen höchsten Überspannungswertes muss durch Simulation des Umrichters und eines Abschnittes der vom Umrichter gespeisten Oberleitung nachgewiesen werden. Die höchste Spannung (Spitzenwert während des zeitlichen Verlaufs der Spannung) muss für den Fall eines unbelasteten getrennten Netzes berechnet werden. Die Länge der 15 kV- oder 25 kV-Oberleitung muss so variiert werden, dass Resonanzfrequenzen (der Oberleitung und des Umrichters) von $f_L = 87$ Hz bzw. 300 Hz und höher sich ergeben (gleiche Werte für f_L wie für die Resonanzstabilität). Die kürzeste Fahrleitungslänge muss 0 km betragen. Die Variation der Länge muss so durchgeführt werden, dass alle von dem Umrichter erregten Resonanzen berücksichtigt werden. Die Standard-Netzparameter (für den Fall, dass keine infrastruktur-spezifischen Parameter verfügbar sind,) sind wie folgt: 0,175 Ohm/km, 1,6 mH/km, 11,6 nF/km (alle Werte unabhängig von der Frequenz);
- die Simulation kann im Zeit- oder Frequenzbereich durchgeführt werden. Das Oberleitungsmodell muss höhere Resonanzmodi enthalten;
- die Simulation muss durch Messung der Spannung an der unbelasteten Sammelschiene validiert werden.

5.3.3 Infrastruktur

Die Konformität der Infrastruktur mit den Anforderungen aus durch Oberschwingungen verursachten Überspannungen muss wie folgt dokumentiert werden:

- Bahnstrecken, einschließlich Bahnhöfe, aber ausschließlich Betriebshofbereiche: Keine spezifischen Handlungen sind erforderlich;
- Betriebshofbereiche: Ein Bericht über die Auslegung/den Aufbau muss erstellt werden, in dem die Annahmen bezüglich des Fahrzeugparks und dessen Eigenschaften sowie die Annahmen bezüglich des Betriebs (Anzahl der Züge, Leistungsverbrauch, pulsende Netzstromrichter und/oder Diodengleichrichtung) dokumentiert und die gewählten Infrastruktureigenschaften (Bemessungsleistung, Resonanzfrequenzen) begründet werden. Die wahrscheinlich höchste Spitzenspannung muss dokumentiert werden.

Wenn die Energieversorgung des Bereichs vollendet ist, müssen Prüfungen mit typischen Konfigurationen der Fahrzeuge durchgeführt werden. Die höchste Spitzenspannung muss gemessen und in einem Prüfbericht dokumentiert werden.

Anhang A (informativ)

Technischer Hintergrund

A.1 Elektrische Resonanzstabilität

A.1.1 Hintergrund

Eine Resonanzinstabilität äußert sich als eine Verstärkung der (normalerweise einfrequenten) Spannungsverzerrungen in der Fahrleitungsspannung. Eine Instabilität kommt vor, wenn die Resonanzfrequenz des Energieversorgungssystems mit einer Frequenz zusammenfällt, bei der ein oder mehrere Fahrzeuge ein aktives Verhalten aufweisen, und wenn die Dämpfung bei dieser Frequenz ungenügend ist. Dies kann im Prinzip bei jeder Frequenz geschehen, die höher als die Grundfrequenz ist.

Probleme mit der Resonanzstabilität können in dem Frequenzbereich untersucht werden. Das/die Bahnfahrzeug(e) und die Energieversorgung interagieren, wie im nachfolgenden Bild A.1 gezeigt. Die Energieversorgung besteht aus verteilten Induktanzen und Kapazitäten, die die Pole und die Nulldurchgänge der Übertragungsfunktion der vom Fahrzeug aus gesehenen Impedanz Z_{source} definieren. Hochspannungskabel mit deren langen verteilten Kapazität neigen dazu, die Resonanzfrequenzen (Nulldurchgänge des Admittanz-Terms oder Pole des Impedanz-Terms) zu mindern. Natürliche Dämpfung geschieht hauptsächlich durch Eisenverluste (Erhöhung mit Frequenz) in den magnetischen Kreisen der Generatoren und Transformatoren und im geringeren Maße durch die Verluste in jedem Leiter.

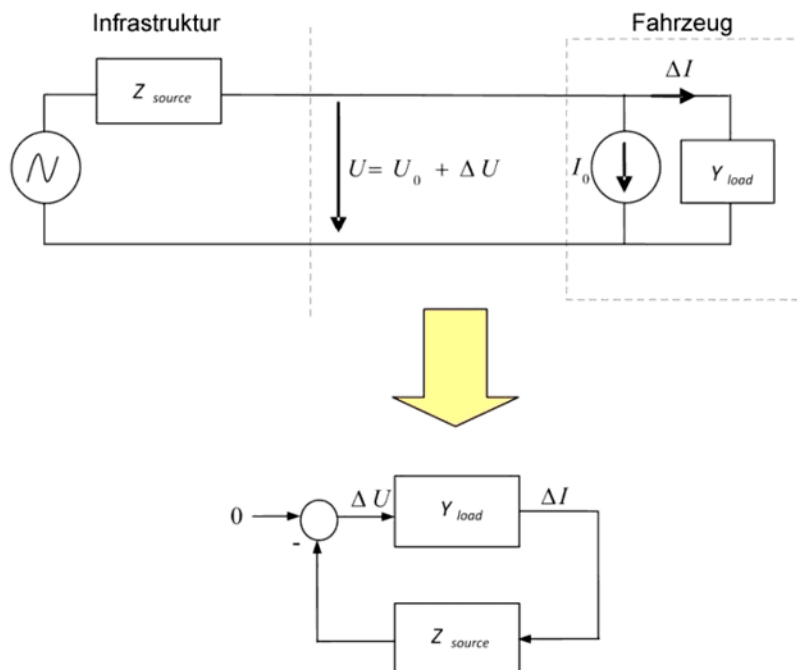


Bild A.1 – Vereinfachtes Systemblockschaltbild (Fahrzeug und Infrastruktur)

Das Fahrzeug reagiert mit einem Strom ΔI der Frequenz f auf jede Spannung ΔU derselben Frequenz. Wegen der unvermeidbaren Verzögerungen in den Rückkopplungsschleifen reagiert das Fahrzeug immer mit einem Strom ΔI verschieden von Null auf eine solche Spannung. Dies wird dann kritisch, wenn der sich ergebende Strom mehr als 90° voraus- oder nachteilend ist in Bezug auf die Spannung ΔU , die ihn verursachte (negativer realer Teil der Eingangsadmittanz). Dies bedeutet, dass das Fahrzeug bei dieser Frequenz Energie in das Netz speist. Das Fahrzeug wird dann „aktiv“ (und ansonsten „passiv“) genannt. Diese Energie wird

von dem Netz an das Fahrzeug bei der Grundfrequenz geliefert, d. h. es findet eine Übertragung von einem Frequenzband in ein anderes statt.

Wenn eine Frequenz, bei der ein Fahrzeug als aktiv gilt, mit einer Resonanzfrequenz des Energieversorgungssystems zusammenfällt, verursacht der Strom ΔI eine Erhöhung von ΔU , auf die das Fahrzeug mit einem noch größeren ΔI reagiert. Diese Instabilität wird nur durch nicht nichtlineare Elemente wie Überspannungsableiter begrenzt und kann zu ernsthaften Betriebsproblemen oder sogar Schäden im Netz führen.

A.1.2 Stabilitätsanalyse der Netze

Eine Stabilitätsanalyse für ein komplettes Netz, einschließlich der Fahrzeuge, wird wie folgt durchgeführt:

- die Admittanzvektoren oder -matrizen gegen die Frequenz werden für jede Komponente (Unterwerk, Übertragungs- und Oberleitungen, Filter, Fahrzeuge usw.) berechnet oder aus Messungen übernommen;
- die Admittanzmatrix des Gesamtsystems wird aus diesen einzelnen Matrizen berechnet;
- die Eingangsadmittanzen Y_{in} , gesehen von außen in dieses System hinein, werden für jeden Ort mit gesteuerten (und daher potenziell aktiven) Elementen berechnet;
- das System ist stabil, wenn die folgende Anforderung für alle Frequenzen f erfüllt sind:

$$\operatorname{real}(Y_{in}(f)) > 0 \text{ für alle } Y_{in}, \text{ bei denen } \operatorname{imag}(Y_{in}(f)) = 0;$$

dies bedeutet, dass das System bei allen Resonanzfrequenzen ausreichend gedämpft ist.

Y_{in} ist die Eingangsadmittanz des Gesamtsystems, gesehen von außen, für jeden Ort, an dem potenziell aktive Elemente angeordnet sind.

A.1.3 Erfahrungen aus Messungen und Hinweise bezüglich Messungen

Die folgenden Maßnahmen und Hinweise sind bisher für das Erreichen ordentlicher Ergebnisse bei Messungen des Frequenzverhaltens der Eingangsadmittanz bekannt. Es muss dennoch in jedem einzelnen Fall überprüft werden, welche angemessen und praktikabel sind.

- Offensichtliche einzelne Ausreißer, insbesondere solche, die sich in der Nähe der typischen, durch das Pulsen des Stromrichters erzeugten Oberschwingungen befinden, können akzeptiert oder verworfen werden;
- es kann hilfreich sein, mehr als einen Stromwandler einzubauen und hiermit zu messen, um Unterschiede und systematische Fehler zu erkennen;
- es wird vorgeschlagen, vor den Messungen unterschiedliche Wandler mit einem Referenzsignal zu prüfen, um denjenigen mit dem kleinsten Phasenfehler zu finden. Es sei angemerkt, dass die Spezifikation für Spannungs- und Stromwandler normalerweise nur den Wert und nicht direkt die Phase spezifiziert.

A.2 Niederfrequenzstabilität

A.2.1 Allgemeines

Dieser informative Anhang definiert die Schnittstellen-Beschreibung zwischen dem passiven Energieversorgungssystem und den gesteuerten Elementen sowie die Methode, die zum Nachweis der im Hauptteil dieser Norm geforderten Kompatibilität angewendet werden kann.

A.2.2 Definition des Systems

Obwohl reale Bahnsysteme viel komplexer sind, kann die Kompatibilität für einen vereinfachten Fall untersucht werden, wie in dem nachfolgenden Bild veranschaulicht.

Dieses System besteht aus: