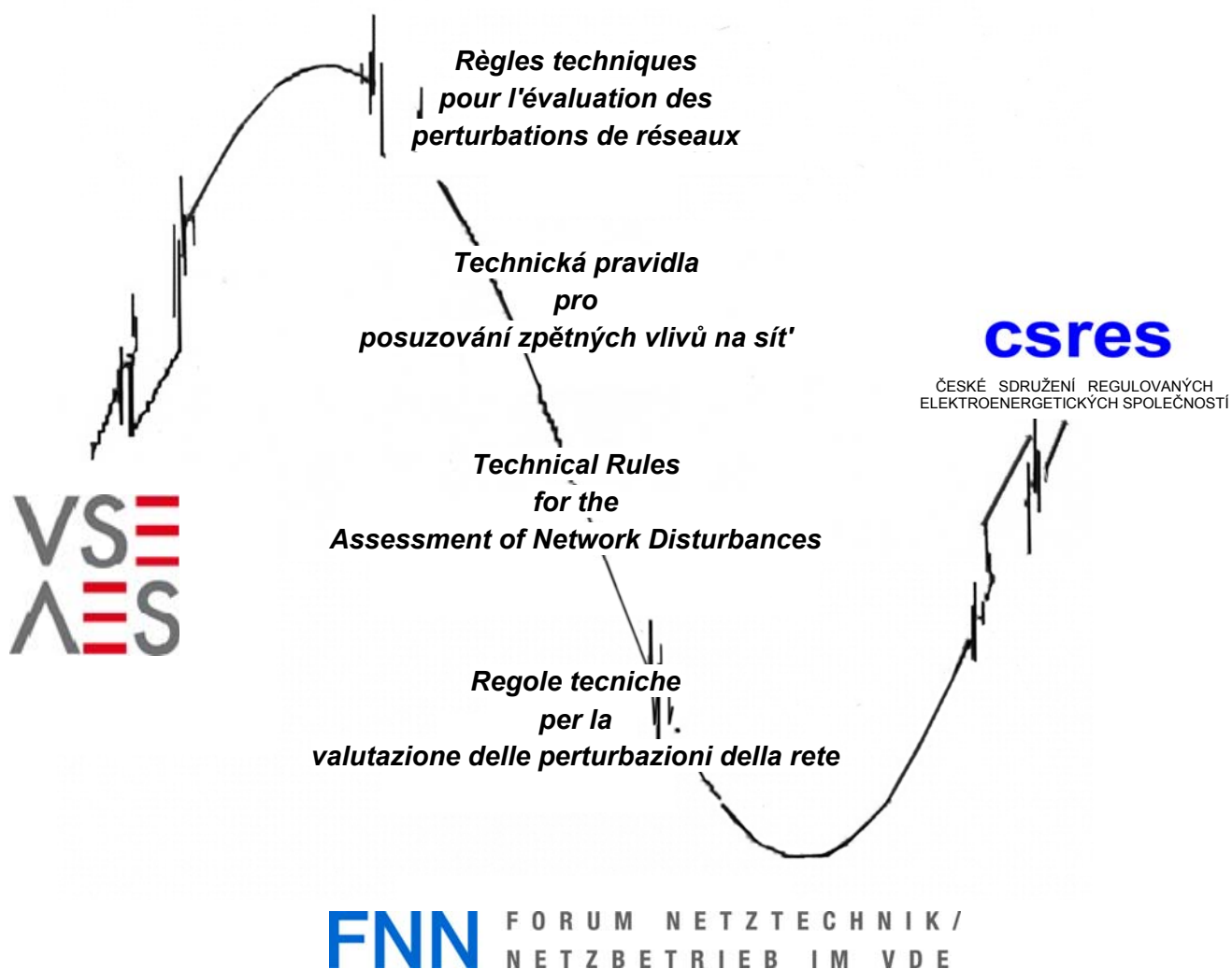


**Technische Regeln
zur
Beurteilung von Netzurückwirkungen**



Ergänzungsdokument

zur

**Beurteilung von Anlagen für den Anschluss an
Hochspannungsverteilernetze**

D-A-CH-CZ Technische Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen
Ergänzungsdokument zur Beurteilung von Anlagen für den Anschluss an
Hochspannungsverteilernetze

Herausgeber:

Bezugsquelle:

A – Österreich:

Oesterreichs E-Wirtschaft
Brahmsplatz 3, A-1040 Wien
Tel: +43-1-501 98-0
E-Mail: info@oesterreichsenergie.at

Oesterreichs E-Wirtschaft Akademie
GmbH
Brahmsplatz 3, A-1040 Wien
Tel: +43-1-501 98-302
E-Mail: akademie@oesterreichsenergie.at

CH – Schweiz:

VSE – Verband Schweizerischer
Elektrizitätsunternehmen
Hintere Bahnhofstrasse 10
CH-5001 Aarau
Tel. +41 -62-825 25 25
E-Mail: info@strom.ch

VSE – Verband Schweizerischer
Elektrizitätsunternehmen
Hintere Bahnhofstrasse 10
CH-5001 Aarau
Tel. +41 – 62-825 25 25
E-Mail: info@strom.ch
Best.-Nr. 301/006

CZ -- Tschechische Republik:

CSRES – Ceske sdruzeni regulovanych
elektroenergetickych spolecnosti
Na hroude 19,
CZ – 14000 Praha 2
Tel.: +420 222 241 157
E-Mail: csres@iol.cz

CSRES – České sdružení regulovaných
elektroenergetických společností
Na hroude 19,
CZ – 14000 Praha 2
Tel.: +420 222 241 157
E-Mail: csres@iol.cz
Best.-Nr. 103/07

D -- Deutschland:

Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (**FNN**)
Bismarckstraße 33
D - 10625 Berlin
Tel. +49 30 38386870
E-Mail: fnn@vde.com

Redaktion:

Dipl.-Ing. Gert Pascoli, Oesterreichs E-Wirtschaft
Dipl.-Ing. FH Hansjörg Holenstein, VSE
Dr.-Ing. Jan Meyer, Technische Universität Dresden

INHALT

Abschnitt A - Allgemeines	5
1 Vorwort	5
2 Einführung und Grundlagen	7
3 Begriffe und Definitionen	10
4 Kurzschlussleistung	13
Abschnitt B - Abnehmeranlagen	14
1 Spannungsänderungen und Flicker	14
2 Spannungsunsymmetrie	19
3 Oberschwingungen	21
4 Kommutierungseinbrüche	30
5 Zwischenharmonische und höherfrequente Anteile	33
6 Signalübertragung (Tonfrequenzrundsteuerung)	36
Abschnitt C – Erzeugungsanlagen	40
1 Spannungsanhebung	40
2 Spannungsänderungen und Flicker	40
3 Spannungsunsymmetrie	40
4 Oberschwingungen	40
5 Kommutierungseinbrüche	41
6 Zwischenharmonische und höherfrequente Anteile	41
7 Tonfrequenzrundsteueranlagen	41
Abschnitt D - Beispiele	43
1 Oberschwingungsbewertung eines Windparks	43
2 Beeinflussung der Tonfrequenzrundsteuerung	45
Abschnitt E – Literaturverweise und Anhänge	47
1 Literatur	47

Abschnitt A - Allgemeines

1 Vorwort

In bestimmten Fällen besteht die Notwendigkeit die Anlage eines Netzbenutzers in das Hochspannungsverteilernetz (HS-Netz) einzubinden. Dies erfordert eine Beurteilung und Begrenzung der Netzurückwirkungen im HS-Netz, welche durch das Grunddokument (2. Ausgabe der „Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“) bisher nicht abgedeckt sind.

Das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) hat mit der 3. Ausgabe der Europäischen Norm EN 50160 (Ratifizierung am 01.03.2010) [51] Rand- und Richtwerte für die „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen“ auch für die HS-Netze vorgegeben.

Die Arbeitsgruppe D-A-CH-CZ sieht sich dadurch veranlasst, ein Ergänzungsdokument für die 2. Ausgabe der „Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“ zu erarbeiten, das die HS-Netze einbezieht. In Deutschland sind auch die Technischen Anschlussbedingungen Hochspannung (TAB HS) zu beachten.

Das Ergänzungsdokument enthält ausschließlich die für diese Netze geltenden Kenngrößen, Grenz- und Richtwerte sowie die vom Grunddokument abweichenden und notwendigen ergänzenden Definitionen, Verfahren und Gleichungen. Das Ergänzungsdokument ist nicht als separates Dokument zu betrachten, sondern immer im Zusammenhang mit dem Grunddokument anzuwenden.

Die im Ergänzungsdokument angegebenen Verfahren und Gleichungen dienen einer vereinfachten, überschlägigen Beurteilung und sind kein Ersatz für eine detaillierte Netzberechnung.

Zur besseren Übersichtlichkeit wird für das Ergänzungsdokument eine veränderte Struktur eingeführt. Sie bildet die Grundlage für eine zukünftige 3. Ausgabe der „Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen“, die für alle betrachteten Spannungsebenen Gültigkeit haben wird. Das Dokument wird dabei in folgende Abschnitte gegliedert:

- Abschnitt A - Allgemeines
- Abschnitt B - Abnehmeranlagen
- Abschnitt C - Erzeugungsanlagen
- Abschnitt D - Beispiele
- Abschnitt E - Literaturverweise und Anhänge

Das vorliegende Ergänzungsdokument ist das Ergebnis der Zusammenarbeit von Experten der vier Länder Deutschland, Österreich, Schweiz und Tschechische Republik, insbesondere der Herren

Dipl.-Ing. FH Ueli Ammeter	Centralschweizerische Kraftwerke AG, Luzern
Dipl.-Ing. FH Thomas Gränicher	BKW FMB Energie AG, Bern
Dr.-Ing. Jaroslav Hanzlik	EGC GmbH, Budweis
Dipl.-Ing. FH Hansjörg Holenstein	Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen, Aarau
Dipl.-Ing. Michael Mercker	Vattenfall Europe Distribution, Berlin
Dr.-Ing. Jan Meyer	Technische Universität Dresden
Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Mombauer	Hochschule Mannheim
Ing. Walter Niederhuemer	Linz Strom Netz GmbH
Dipl.-Ing. Gert Pascoli	Österreichs Energie, Wien
Dipl.-Ing. Dieter Quadflieg	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN), Berlin
Dipl.-Ing. Mark Schocke	Rhein-Ruhr Verteilnetz GmbH, Wesel
Prof. Dr.-Ing. Gert Winkler	Technische Universität Dresden
Dipl.-HTL-Ing. Josef Zierlinger	EVN Netz GmbH, St. Pölten

2 Einführung und Grundlagen

Der Verträglichkeitspegel dient der Koordination von Störfestigkeit und Störaussendung von Geräten und dient zur Sicherstellung der Elektromagnetischen Verträglichkeit. Er ist für NS- und MS-Netze definiert und darf nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit von den Störpegeln im Netz überschritten werden. Er beinhaltet die Anteile der Störaussendungen der betrachteten und aller vorgelagerten Spannungsebenen. In HS-Netzen werden Planungspegel vom Netzbetreiber in eigener Verantwortung und unter Berücksichtigung der individuellen Netzverhältnisse festgelegt.

Der Pegel für die zulässige Gesamtstöraussendung einer einzelnen Spannungsebene ist mit den entsprechenden Pegeln aller anderen Spannungsebenen zu koordinieren. Diese Pegel entsprechen weder dem Verträglichkeitspegel (NS, MS) noch dem Planungspegel (HS) und müssen kleiner als diese sein. Innerhalb einer Spannungsebene erfolgt die Bestimmung spezifischer Störaussendungsgrenzwerte für die einzelnen Anlagen der Netzbenutzer auf der Grundlage des Pegels der zulässigen Gesamtstöraussendung dieser Spannungsebene (Abb. A2-1).

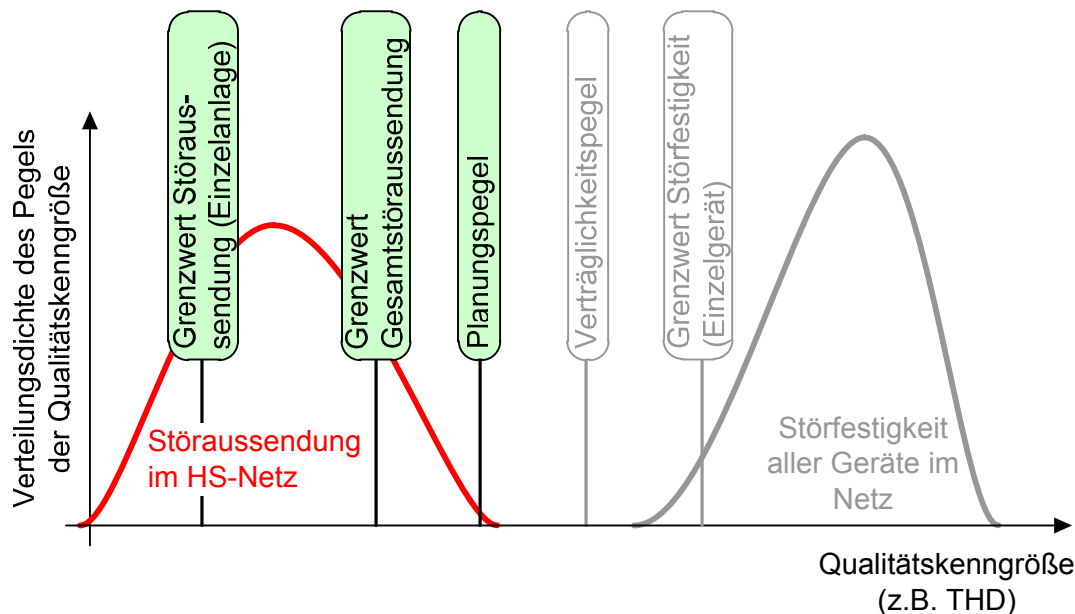


Abb. A2-1 Wichtige Größen der EMV-Koordination

Das Ergänzungsdokument enthält Anhaltswerte für die Planungspegel und Pegel der zulässigen Gesamtstöraussendung in HS-Netzen, die nicht zu überschreiten sind. Sie basieren auf Angaben aus den international abgestimmten Technischen Berichten IEC 61000-3-6 [52], 61000-3-7 [53] und 61000-3-13 [54]. In Einzelfällen kann eine Reduzierung erforderlich sein, die jedoch individuell zu betrachten ist.

Erzeugungsanlagen und Abnehmeranlagen werden abweichende Störaussendungsgrenzwerte zugeteilt. Damit wird dem unterschiedlichen Charakter Rechnung getragen.

Bei der Erarbeitung des Ergänzungsdokumentes wurden u.a. folgende Besonderheiten berücksichtigt, die eine Beurteilung von Anschlüssen im HS-Netz von jener in NS- bzw. MS-Netzen unterscheidet:

- **Kurzschlussleistung:**
Aufgrund der Vermaschung des HS-Netzes erfolgt die Berechnung der Kurzschlussleistung in den meisten Fällen rechnergestützt.
- **Spannungsänderungen und Flicker:**
Flickeraussendungen im HS-Netz betreffen alle unterlagerten Netzebenen und erfordern deshalb eine besonders sorgfältige Bewertung. Das wird u.a. durch einen einheitlichen Summationsexponent für die Überlagerung verschiedener Flickerquellen berücksichtigt.
- **Spannungsunsymmetrie:**
Eine Beurteilung einphasiger Anlagen ist im HS-Netz nicht vorgesehen.
- **Oberschwingungen:**
In den HS-Netzen sind Resonanzerscheinungen zu berücksichtigen. Diese können zu einer Erhöhung von Oberschwingungsspannungen und einer Überschreitung von deren Grenzwerten führen. Es wird ein Verfahren angegeben, das überschlägig die Bestimmung der Oberschwingungsspannungen für diesen Zustand erlaubt. Außerdem wird eine Koordination eingeführt, die Erzeugungsanlagen und Abnehmeranlagen ganzheitlich betrachtet.
- **Kommutierungseinbrüche:**
Die Berücksichtigung des Steuerwinkels und höherer Pulszahlen bei der Beurteilung ermöglicht eine individuelle Auslegung der Kommutierungsinduktivität.
- **Zwischenharmonische und höherfrequente Anteile:**
Die Beurteilung von zwischenharmonischen Spannungen wurde um ein Verfahren zur Bewertung der zulässigen Oberschwingungsströme erweitert.
- **Signalübertragung:**
Bei der Bewertung der Beeinflussung von TRA-Anlagen ist zwischen Abnehmeranlagen und Erzeugungsanlagen zu unterscheiden. Für die Beurteilung von Abnehmeranlagen wird der Impedanzfaktor eingeführt.

Das Beurteilungsschema folgt bei der Bewertung konsequent einem zweistufigen Ablauf (Abb. A2-2). Die erste Stufe stellt eine vereinfachte Bewertung auf der Grundlage des Leistungsverhältnisses dar. Wenn die Beurteilung in der ersten Stufe nicht ausreichend ist, muss eine detailliertere Bewertung nach Stufe 2 erfolgen. Dazu werden auf Basis differenzierterer Eingangsdaten der Anlage des Netzbenutzers Störaussendungsgrenzwerte berechnet. Ist entsprechend der Beurteilung nach Stufe 2 nur ein Anschluss unter Auflagen möglich, sind spezielle Abhilfemaßnahmen notwendig, von denen nur ausgewählte, in HS-Netzen angewendete Verfahren qualitativ beschrieben sind.

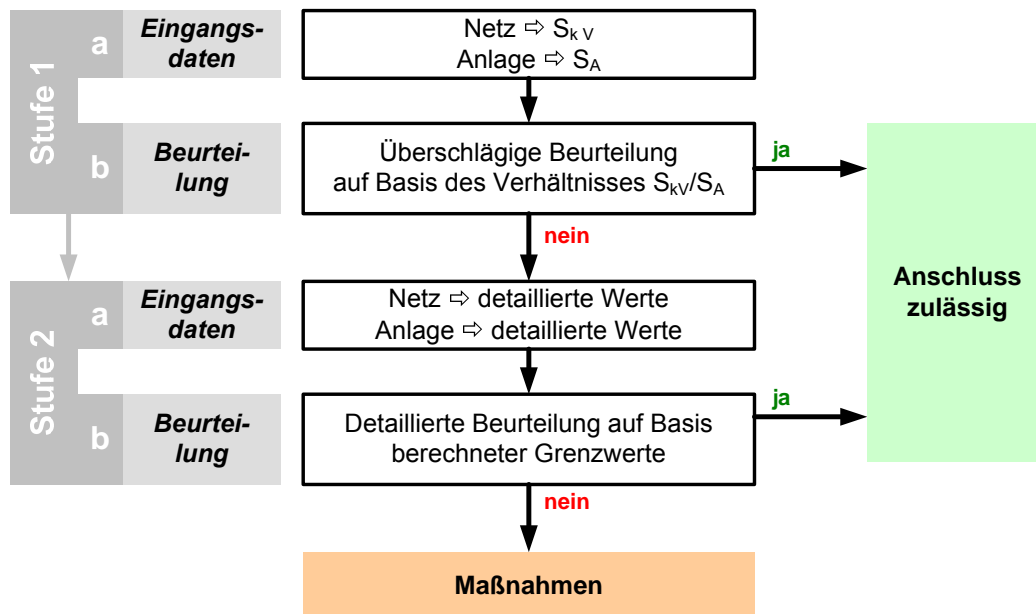


Abb. A2-2 Allgemeines Beurteilungsschema

Es wird empfohlen, den Anschluss einer Anlage des Netzbenutzers durch Messungen zu begleiten. Die Messungen sollten vor und nach dem Anschluss einer Anlage durchgeführt werden. Für den Fall, dass die Aussendungsgrenzwerte der Anlage und/oder die Planungspegel im Netz bei Betrieb dieser Anlage überschritten werden, sollten konkrete Abhilfemaßnahmen vertraglich vereinbart sein.

Für Messungen zum Nachweis der Einhaltung vorgegebener Emissionsgrenzwerte sind die Verfahren gemäß EN 61000-4-30 [55] Klasse A anzuwenden. Falls in [55] keine Methoden existieren, wird das zu verwendende Verfahren im entsprechenden Kapitel beschrieben.

3 Begriffe und Definitionen

Abnehmerfaktor k_B

Verhältnis von maximal anschließbarer Leistung aller Abnehmeranlagen und fiktiver Netzleistung des HS-Netzes

Erzeugerfaktor k_E

Verhältnis von maximal anschließbarer Leistung aller Erzeugungsanlagen und fiktiver Netzleistung des HS-Netzes

Erzeugungsanlage (EZA)

Anlage, in der sich ein oder mehrere Erzeugungseinheiten elektrischer Energie befinden (einschließlich der Anschlussanlage) und alle zum Betrieb erforderlichen elektrischen Einrichtungen.

Erzeugungseinheit (EZE)

eine einzelne Anlage, die elektrische Energie erzeugt.

Fiktive Netzleistung des HS-Netzes $S_{N HS}$

Summe der Bemessungsleistungen aller Transformatoren, welche aus der übergeordneten Spannungsebene in das betrachtete HS-Netz einspeisen.

Gütefaktor g

Bewertungsfaktor, mit dem die Überhöhung der elektrischen Größen in einem Schwingkreis bei Resonanz bestimmt wird ([47] IEC 151-15-46, modifiziert)

Anm.: Der Gütefaktor g eines Schwingkreises ist ein Maß für die Schärfe der Resonanz. Er wird in einem Parallelschwingkreis berechnet nach

$$g = \frac{R_p}{\sqrt{L_p / C_p}}$$

Seine Größe ist wesentlich von den resistiven Schaltelementen (Lasten) R_p abhängig. Der Gütefaktor g ist nicht mit dem Resonanzfaktor k_v (vgl. Abschnitt B3.1) identisch.

Hochspannung (HS)

Spannung zur Stromversorgung, deren Nennwert zwischen 36 kV und 150 kV (Effektivwert) liegt [51].

Impedanz bei Rundsteuerfrequenz Z_s

Impedanz der gesamten Anlage des Netzbenutzers am Verknüpfungspunkt V bei Rundsteuerfrequenz f_s

Impedanzfaktor ϵ

Verhältnis der Impedanz bei Rundsteuerfrequenz Z_S zur Anschlussimpedanz Z_A für die gesamte Anlage des Netzbenutzers

Kurzschlussimpedanz am Verknüpfungspunkt Z_{kV}

Impedanz bei Netzfrequenz, die sich durch Kurzschluss am Verknüpfungspunkt ergibt.

Anm.: Die Kurzschlussimpedanz Z_{kV} ist die Gesamtimpedanz der Betriebsmittel im Kurzschlusskreis ohne die angeschlossenen Lasten.

Sie ist die Grundlage für die Beurteilung von Spannungsänderungen, Flicker und Oberschwingungsspannungen einzelner Kundenanlagen.

Mittenfrequenz eines 200-Hz-Frequenzbandes b

Frequenz in der Mitte eines 200-Hz-Frequenzbandes ([26] Anhang B).

Netz (Elektrizitätsversorgungsnetz)

Gesamtheit der miteinander verbundenen Leitungen, Schalt-, Umspann- und Umrichter-Anlagen ([47] IEV 601-01-02, modifiziert)

Netzebenenfaktor k_N

Faktor, der den Anteil einer Störgröße an einer Spannungsebene kennzeichnet.

Anm.: Der Netzebenenfaktor k_N ist ortsabhängig.

Netzfrequenz f_N

Eine der vereinbarungsgemäß in Netzen der Elektrizitätsversorgung verwendeten Frequenzen ([47] IEV 601-01-05, modifiziert)

Oberschwingungsimpedanz am Verknüpfungspunkt Z_{vV}

Impedanz am Verknüpfungspunkt zur Kundenanlage für die Harmonische v .

Anm.: Die Oberschwingungsimpedanz Z_{vV} ist die Gesamtimpedanz der Betriebsmittel des Netzes einschließlich der angeschlossenen Lasten.

Sie findet insbesondere Verwendung bei der Berücksichtigung von Resonanzerscheinungen.

Für Planungsrechnungen wird die Oberschwingungsimpedanz Z_{vV} unter der Voraussetzung induktiver Netze näherungsweise aus der Kurzschlussimpedanz Z_{kV} ermittelt:

$$Z_{vV} \approx v \cdot Z_{kV}$$

Ordnungszahl einer Zwischenharmonischen μ

Nichtganzzahliges Verhältnis der Frequenz einer Zwischenharmonischen zur Grundschiwingung.

Anm.: Die Grundschiwingung hat die Ordnungszahl $v = 1$ in der Fourier-Reihe.

Planungspegel ([15], modifiziert)

Pegel einer bestimmten Störgröße, der als Bezugswert bei der Festlegung von Grenzwerten für die Aussendung von Lasten und Anlagen (Netzen, Installationen) verwendet wird.

Anm.: Der Planungspegel ist ortsabhängig und wird von Verantwortlichen für die Planung und den Betrieb des Netzes in dem in Frage kommenden Bereich angenommen.

Resonanz

Zustand eines Netzes, in welchem es fähig ist, Teilspannungen bzw. Teilströme zu erzeugen, die höher als die entsprechenden Quellenspannungen bzw. Quellenströme sein können.

Anm.: In einem Netz mit mehreren Induktivitäten und Kapazitäten treten mehrere Resonanzstellen auf.

Bei Serien- oder auch Reihenresonanzkreisen weist die Impedanz ein Minimum, bei Parallelresonanzkreisen ein Maximum auf.

Resonanzfaktor k_v

Verhältnis der tatsächlichen Oberschwingungsimpedanz $Z_{v,v}$ zu der näherungsweise aus der Kurzschlussimpedanz berechneten Impedanz $v \cdot Z_{k,v}$ (Netzgerade). Der Resonanzfaktor ist nicht mit dem Gütefaktor g identisch.

Resonanzfrequenz f_{res}

Frequenz, bei der in einem Netz Resonanz auftritt ([47] IEV 801-24-06, modifiziert)

Anm.: In einem Netz treten mehrere Resonanzfrequenzen auf.

Es wird zwischen Serien- oder auch Reihenresonanzfrequenz und Parallelresonanzfrequenz unterschieden.

Unsymmetriegrad k

Maß der Unsymmetrie in einem Drehstromnetz, ausgedrückt als Verhältnis der Effektivwerte von Gegen- und Mitkomponente von Spannung oder Strom (angegeben in Prozent) ([47] IEV 604-01-30 modifiziert)

4 Kurzschlussleistung

Alle Arten von Netzurückwirkungen sind am Verknüpfungspunkt zu beurteilen. Beurteilungsgrundlage ist die Kurzschlussleistung S_{kV} am Verknüpfungspunkt.

Hochspannungsnetze werden vorzugsweise vermascht betrieben. Die vereinfachte Berechnung der Kurzschlussleistung entsprechend dem Verfahren des Grunddokumentes ist daher nicht anwendbar. Die Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt wird dann mit einem Netzberechnungsprogramm bestimmt.

Es ist darauf zu achten, dass jener Schaltzustand ausgewählt wird, der den im Normalbetrieb ungünstigsten Fall darstellt, also zur niedrigsten Kurzschlussleistung führt. Sind im betrachteten Hochspannungsnetz Erzeugungsanlagen angeschlossen, bleiben diese bei der Bestimmung der Kurzschlussleistung unberücksichtigt.

Für die Beurteilung von Oberschwingungen ist die Frequenzabhängigkeit der Netzimpedanz zu beachten. Detaillierte Betrachtungen dazu erfolgen im Abschnitt B Kapitel 3.1 des Ergänzungsdokumentes.

Abschnitt B - Abnehmeranlagen

1 Spannungsänderungen und Flicker

Ungeachtet einer geänderten Nutzung unterschiedlicher Beleuchtungseinrichtungen bleibt das P_{st} -Störbewertungsverfahren unverändert. Das Schutzziel „Begrenzung der Leuchtdichteänderungen“ infolge unterschiedlicher Störgrößen (Spannungsschwankungen, Zwischenharmonische, Phasensprünge) auf die Pegel, die in einer 230V/60W-Glühlampe erzeugt werden, wird erreicht, wenn beliebige Beleuchtungseinrichtungen bei beliebigen Störgrößen keine höheren Leuchtdichteänderungen erzeugen, als die Referenzglühlampe.

1.1 Grundlagen

Der Flickerpegel im HS-Netz wird nur gering gedämpft in die unterlagerten Spannungsebenen übertragen. Deshalb gelten bei der Beurteilung der Flickeremission von Anlagen mit Anschluss an das HS-Netz höhere Anforderungen. Es ist in jedem Fall sicherzustellen, dass der Verträglichkeitspegel für die Langzeitflickerstärke im NS-Netz $P_{lt} = 0,8$ nicht überschritten wird.

Für die Überlagerung einzelner Flickerquellen ist für die Kurzzeit- und die Langzeitflickerstärke das quadratische Summationsgesetz zu verwenden [43], z.B.

$$P_{lt} = \sqrt{\sum_{i=1}^m P_{lti}^2} \quad (\text{B1-1})$$

P_{lti} *Langzeitflickerstärke der einzelnen Flickerquellen*
 m *Anzahl der einzelnen Flickerquellen*

1.2 Planungspegel

Planungspegel werden vom Netzbetreiber festgelegt und können so individuelle Besonderheiten (z.B. Netzstruktur, Art der Lasten) berücksichtigen. Richtwerte für Planungspegel im HS-Netz [53] sind:

$$P_{st} = 0,8$$

$$P_{lt} = 0,6$$

1.3 Beurteilung

1.3.1 Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

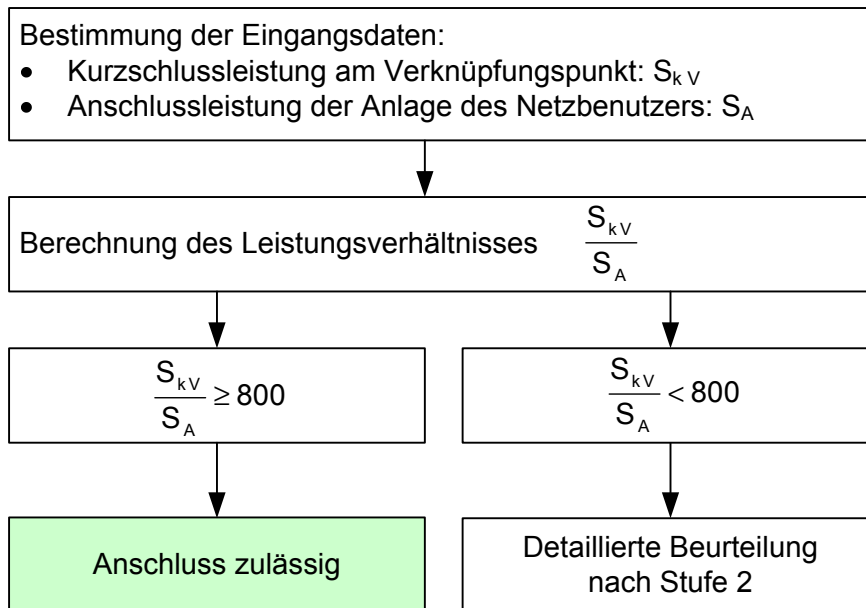


Abb. B1-1: Schema zur vereinfachten Beurteilung nach Stufe 1

Ist die von der Anlage zu erwartende, ungünstigste Wiederholrate bekannt, kann das Leistungsverhältnis entsprechend Tab. B1-1 für die vereinfachte Beurteilung verwendet werden.

Tab. B1-1: Grenzwerte des Leistungsverhältnisses für die vereinfachte Beurteilung bei verschiedenen Wiederholraten

Wiederholrate r / min^{-1}	Leistungsverhältnis S_{kV} / S_A
$r > 200$	800
$10 \leq r \leq 200$	$135 \cdot \sqrt[3]{r / \text{min}^{-1}}$
$r < 10$	250

Die maximale flickerrelevante Leistungsänderung ΔS_A kann unter Umständen die Anschlussleistung S_A überschreiten. In diesem Fall ist diese anstelle der Anschlussleistung S_A im Leistungsverhältnis einzusetzen. Ist die maximale flickerrelevante Leistungsänderung ΔS_A der Anlage kleiner als die Anschlussleistung S_A , kann diese im Leistungsverhältnis anstelle der Anschlussleistung der Anlage S_A berücksichtigt werden.

1.3.2 Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

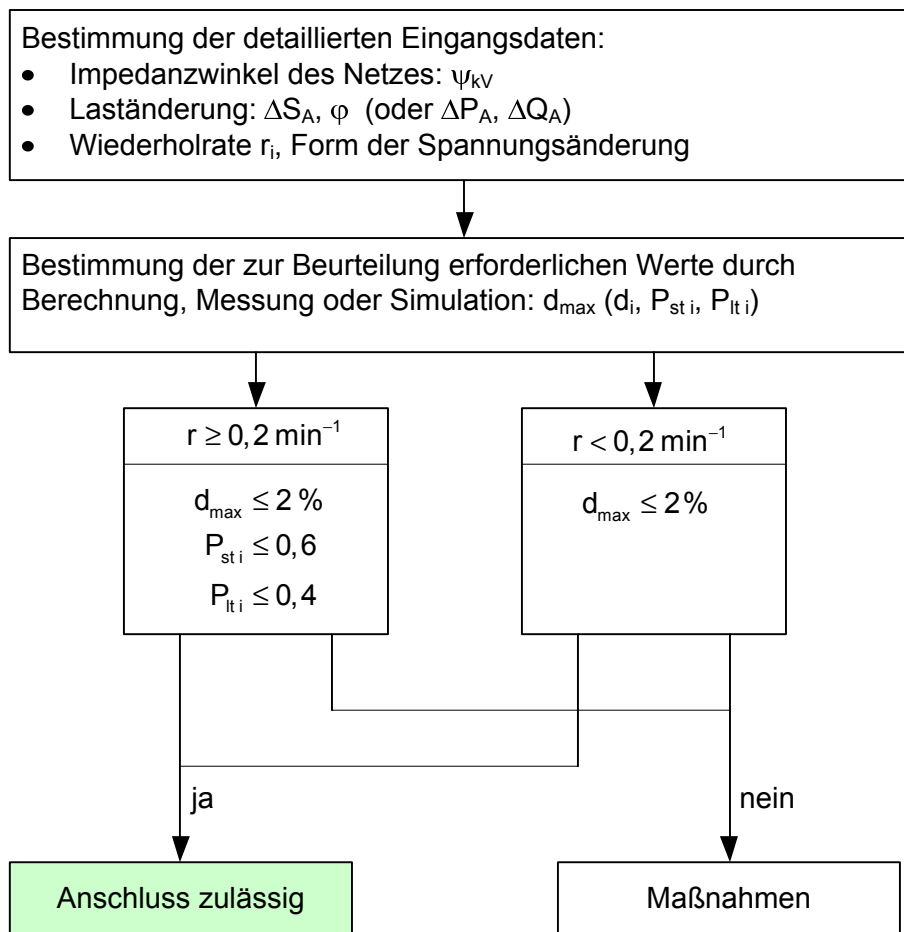


Abb. B1-2: Schema zur detaillierten Beurteilung nach Stufe 2

Einzelne Beispiele haben gezeigt, dass die Langzeitflickerstärke eines Drehstromlichtbogenofens in erster Näherung auch nach folgender Gleichung abgeschätzt werden kann:

$$P_{lt} \approx 70 \cdot \frac{S_r}{S_{kV}} \quad (\text{B1-2})$$

P_{lt} Langzeitflickerstärke der Anlage des Netzbenutzers
 S_r Bemessungsleistung des Lichtbogenofens in MVA
 S_{kV} Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt in MVA

1.4 Emissionsgrenzwerte

Die Emissionsgrenzwerte wurden auf Basis der Planungspegel unter Berücksichtigung üblicher Transferkoeffizienten ermittelt. Für die Anlage eines einzelnen Netzbenutzers darf die Kurzzeitflickeremission den Wert von

$$P_{sti} = 0,6$$

und die Langzeitflickeremission den Wert

$$P_{lti} = 0,4$$

nicht überschreiten.

Die Beurteilung nach Emissionsgrenzkurve (Abb. B1-3) ist ausführlich in Kap. 4.4.1 des Grunddokumentes beschrieben.

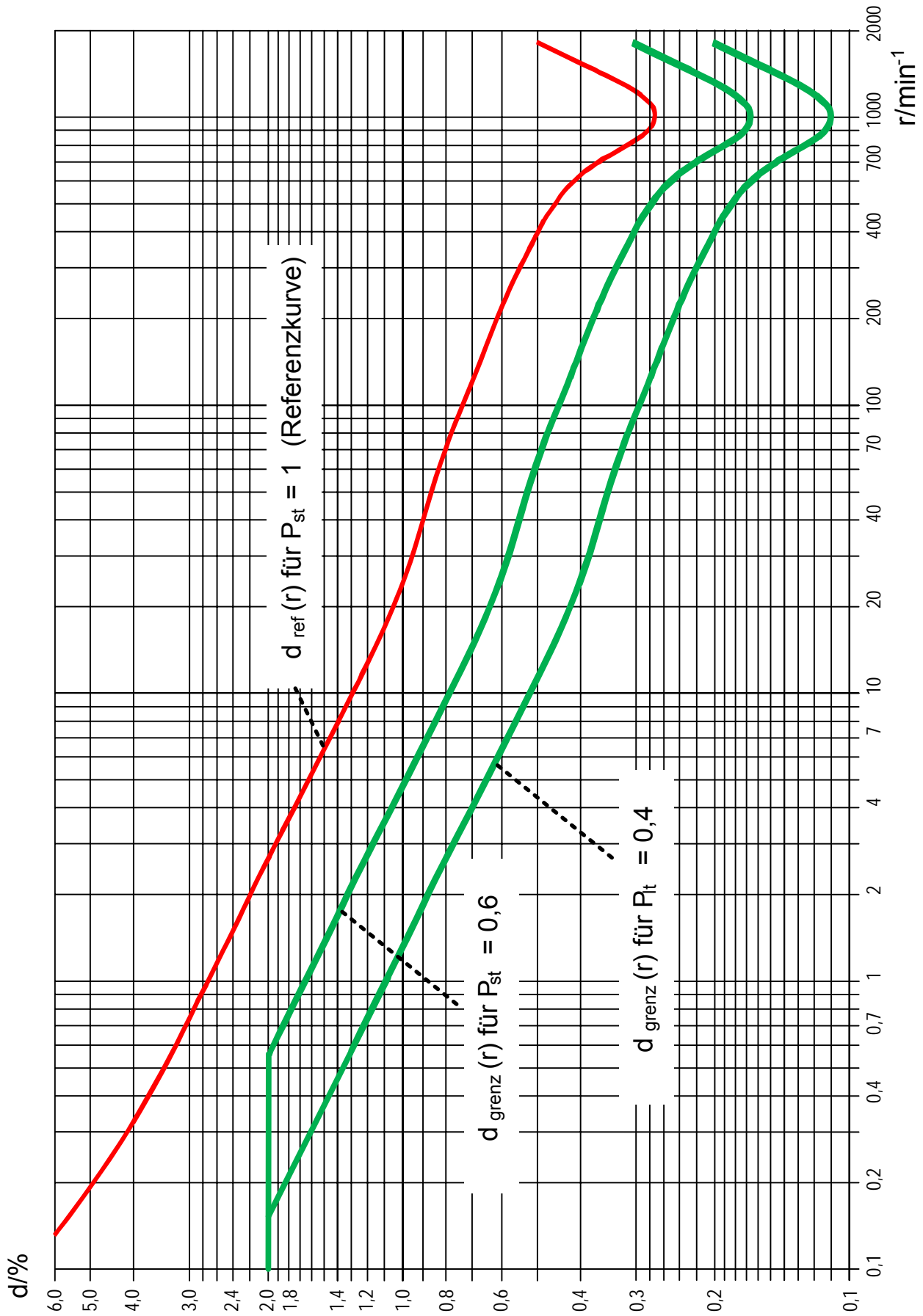


Abb. B1-3: Emissionsgrenzkurve (Flickergrenzkurve) für regelmäßige rechteckförmige Spannungsschwankungen

Die Begrenzung der Emissionsgrenzkurve (Flickergrenzkurve) nach Abb. B1-3 bedeutet nicht, dass oberhalb von $r = 1800 \text{ min}^{-1}$ keine Flickererscheinungen mehr auftreten. Flicker kann auch bei deutlich höheren Wiederholraten (bis nahe $r = 12000 \text{ min}^{-1}$) auftreten (vgl. Abb. B1-4).

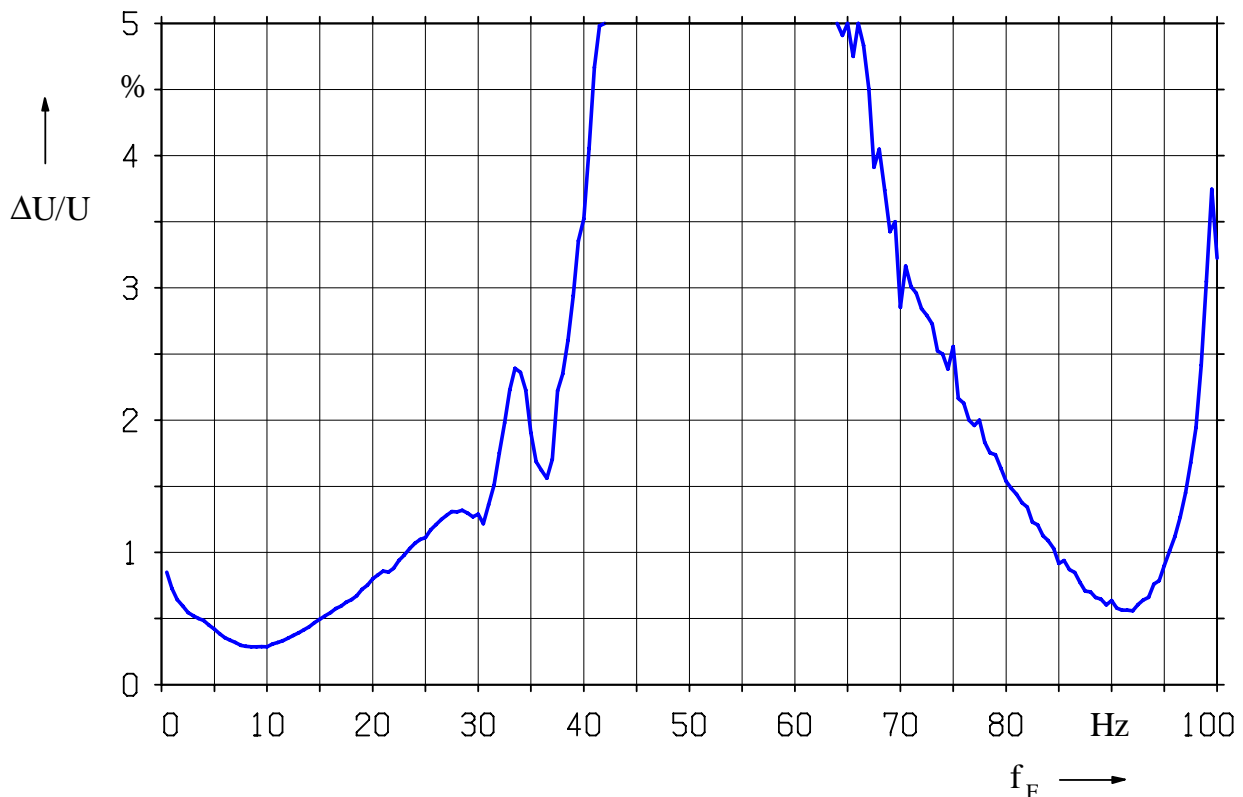


Abb. B1-4: Referenzkurve für $P_{st} = 1$ im Bereich bis $f_F = 100 \text{ Hz}$ ($r = 12000 \text{ min}^{-1}$) für rechteckförmige Spannungsschwankungen [24]

1.5 Maßnahmen

Das Grunddokument beschreibt verschiedene netzseitige und anlagenseitige Maßnahmen, welche in vielen Fällen analog auch im HS-Netz angewendet werden können.

1.6 Messung

95% der Werte für Kurzzeit-Flickerstärke P_{st} und Langzeit-Flickerstärke P_{lt} sollten über 1 Woche im gesamten HS-Netz die Planungspegel nicht überschreiten. Für zusätzliche Beurteilungsverfahren wird auf IEC 61000-3-7 [53] verwiesen.

2 Spannungsunsymmetrie

2.1 Grundlagen

Der Anschluss unsymmetrischer Verbraucher im Hochspannungsnetz erfolgt ausschließlich zweiphasig.

2.2 Planungspegel

Planungspegel werden vom Netzbetreiber festgelegt und können so individuelle Besonderheiten berücksichtigen. Als Richtwert für den Planungspegel gilt ein Unsymmetriegrad:

$$k_u = 1 \%$$

2.3 Beurteilung

2.3.1 Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

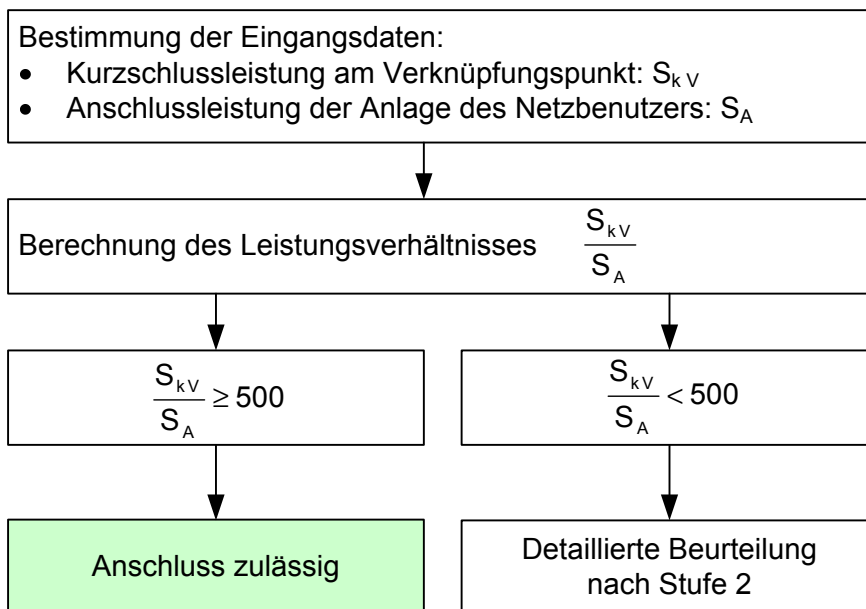


Abb. B2-1: Schema zur vereinfachten Beurteilung nach Stufe 1

2.3.2 Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Die detaillierte Beurteilung erfordert eine genauere Untersuchung der Situation im betrachteten HS-Netz. Dies betrifft die aktuellen Pegel im Netz und weitere, bereits vorhandene zweiphasige Anlagen.

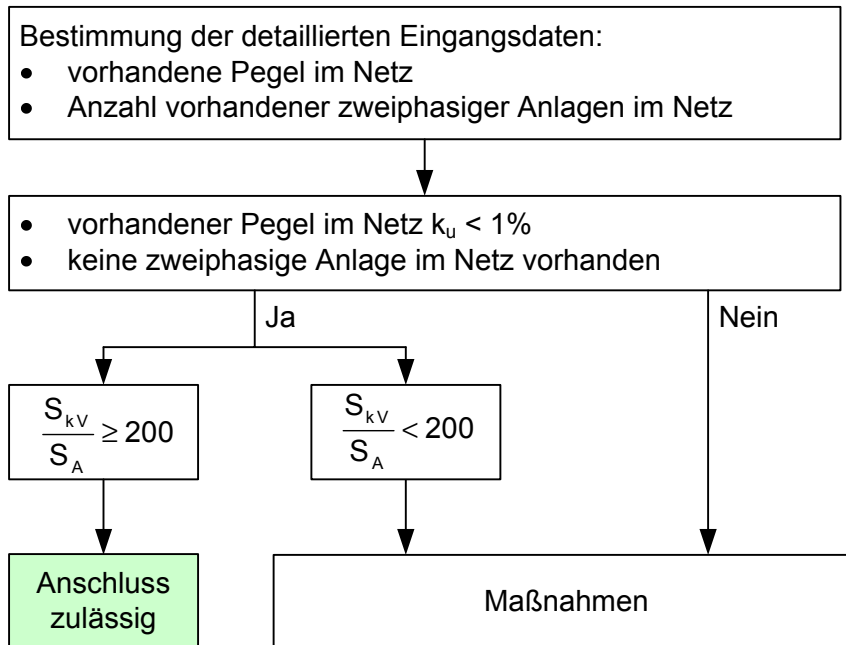


Abb. B2-2: Schema zur detaillierten Beurteilung nach Stufe 2

2.4 Emissionsgrenzwerte

Unter der Maßgabe, dass nur eine einzige zweiphasige Anlage angeschlossen wird, darf der Unsymmetriegrad k_u folgenden Wert nicht überschreiten:

$$k_u \cong \frac{S_A}{S_{kV}} \leq 0,5\% \quad (\text{B2-1})$$

S_A Anschlussleistung der zweiphasigen Anlage des Netzbenutzers in MVA
 S_{kV} Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt in MVA

Unter der Voraussetzung einer gezielt alternierenden Phasenzuordnung gilt obiger Grenzwert je Phasenpaar (L1-L2, L2-L3, L1-L3).

2.5 Maßnahmen

Das Grunddokument beschreibt verschiedene netzseitige und anlagenseitige Maßnahmen, welche in vielen Fällen analog auch im HS-Netz angewendet werden können.

2.6 Messung

95% der 10-Minuten-Mittelwerte über 1 Woche sollten den Planungspegel nicht überschreiten. Für zusätzliche Beurteilungsverfahren wird auf IEC 61000-3-13 verwiesen [54]. Die Genauigkeit der verwendeten Spannungswandler kann erheblichen Einfluss auf die Messwerte haben.

3 Oberschwingungen

3.1 Grundlagen

Die Kurzschlussimpedanz am Verknüpfungspunkt Z_{kV} als Basis für die Berechnung der Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt S_{kV} gilt nur für Netzfrequenz. Für Frequenzen ungleich der Netzfrequenz gelten andere Werte. Zur Berechnung des Emissionsgrenzwertes für eine Oberschwingung ist die Kenntnis ihrer Oberschwingungsimpedanz erforderlich.

Die Berechnung der Emissionsgrenzwerte für Oberschwingungen gemäß Grunddokument basiert auf einer vereinfachten Annahme der Oberschwingungsimpedanz (Impedanzgerade) entsprechend

$$Z_{vV} = v \cdot Z_{kV} \quad (\text{B3-1})$$

v	<i>Ordnungszahl der Harmonischen</i>
Z_{vV}	<i>Oberschwingungsimpedanz am Verknüpfungspunkt bei Ordnungszahl v</i>
Z_{kV}	<i>Kurzschlussimpedanz am Verknüpfungspunkt bei Netzfrequenz</i>

Durch diese vereinfachte Betrachtung werden im Netz auftretende Resonanzen nicht berücksichtigt.

In HS-Netzen sind Resonanzerscheinungen zu berücksichtigen. Die frequenzabhängige Netzimpedanz weist fast immer mehrere Resonanzstellen auf. Resonanzfrequenz und Gütefaktor der Resonanzstellen sind im starken Maße vom Aufbau des Netzes, dem aktuellen Schaltzustand des Netzes, unter Umständen vom Schaltzustand des übergeordneten Höchstspannungsnetzes und der Netzbelastung abhängig.

Der Anschluss einer Oberschwingungen aussendenden Anlage am Verknüpfungspunkt kann Auswirkungen am Verknüpfungspunkt selbst haben oder Resonanzen an anderen Punkten im Netz anregen.

Allgemein gelten folgende qualitative Zusammenhänge:

- Die Resonanzfrequenz der ersten Parallelresonanzstelle in Freileitungsnetzen liegt bei vergleichbarer Netzgröße höher als jene in Kabelnetzen.
- Die Resonanzfrequenz der ersten Parallelresonanzstelle nimmt mit zunehmender Netzgröße bei vergleichbarem Netzaufbau ab.
- Eine hohe Netzbelastung wirkt dämpfend auf die Überhöhung von Resonanzen.
- Schwachlastzeiten stellen im Sinne von Resonanzerscheinungen in der Regel den ungünstigsten Fall dar.

Die zuverlässige Bestimmung der Resonanzstellen im HS-Netz ist komplex und praktisch nur durch eine detaillierte Netzstudie mit umfangreichen Simulationen verschiedener Szenarien möglich. Die Ergebnisse hängen auch hier in hohem Maße von der Qualität der Eingangsdaten und den verwendeten Modellen für die Netzelemente und Lasten ab.

Zur Berücksichtigung von Resonanzen wird die Gleichung (B3-1) zur Bestimmung der Oberschwingungsimpedanz um einen Resonanzfaktor k_v erweitert.

$$Z_{v,v} = k_v \cdot v \cdot Z_{k,v} \quad (\text{B3-2})$$

v	Ordnungszahl der Harmonischen
k_v	Resonanzfaktor für die Harmonische mit der Ordnungszahl v
$Z_{v,v}$	Oberschwingungsimpedanz am Verknüpfungspunkt bei Ordnungszahl v
$Z_{k,v}$	Kurzschlussimpedanz am Verknüpfungspunkt bei Netzfrequenz

Der Resonanzfaktor k_v gibt die Überhöhung der Resonanz bezogen auf die vereinfachte Berechnung gemäß Gleichung (B3-1) an und ist nicht mit dem Gütefaktor g identisch.

Für die Bestimmung des Resonanzfaktors k_v und damit der Oberschwingungsimpedanz $Z_{v,v}$ als Grundlage für die Festlegung von Emissionsgrenzwerten und zur Abschätzung der Risiken bei der Anwendung des vereinfachten Beurteilungsschemas sind 3 Varianten möglich. Dabei werden ausschließlich Resonanzen am Verknüpfungspunkt berücksichtigt. Sollen alle Punkte im betrachteten HS-Netz auf mögliche Auswirkungen von Resonanzen untersucht werden, ist dies ausschließlich durch eine Netzstudie (Variante 1) möglich. Ein mögliches Verfahren wird in IEC 61000-3-6 [52] angegeben.

Variante 1: Individuelle Berücksichtigung aller vorhandenen Resonanzstellen

Die zuverlässigsten Aussagen zur Oberschwingungsimpedanz werden durch eine Netzstudie erreicht. Diese wird insbesondere für solche Netze empfohlen, welche aufgrund ihrer Konfiguration Resonanzstellen bei charakteristischen Frequenzen mit signifikanter Anregung (z.B. 5. oder 7. Harmonische) erwarten lassen. Bei der Betrachtung verschiedener Szenarien (z.B. Starklast/Schwachlast, unterschiedliche Schaltzustände) sind zur Berechnung der Emissionsgrenzwerte die ungünstigsten Werte für die Oberschwingungsimpedanz zu verwenden. Für Oberschwingungen oberhalb der ersten Parallelresonanzstelle sind auch die Ergebnisse der Netzsimulation zunehmend unsicher.

Variante 2: Überschlägige Berücksichtigung der ersten Parallelresonanzstelle

Die Bestimmung der ersten Parallelresonanzstelle kann auf Basis einer vereinfachten Ersatzschaltung entsprechend Abbildung B3-1 erfolgen.

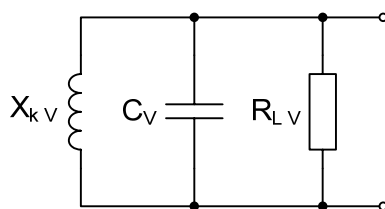


Abb. B3-1: vereinfachtes Ersatzschaltbild zur Modellierung der ersten Parallelresonanzstelle

$X_{k,v}$ Reaktanz der Kurzschlussimpedanz

C_v Kapazität bezogen auf den Verknüpfungspunkt (u.a. Kabelkapazität, Kapazität unverdrosselter Kompensationsanlagen, ...)

$R_{L,v}$ Resistanz der Last bezogen auf den Verknüpfungspunkt (Netzlast)

Die maximale Impedanz wird ungefähr bei der ersten Parallelresonanzstelle des Netzes mit der Resonanzfrequenz f_{res} erreicht. Hierfür gilt die überschlägige Beziehung

$$f_{\text{res}} \approx f_N \sqrt{\frac{S_{kV \text{ akt}}}{Q_V}} \quad (\text{B3-3})$$

f_N *Netzfrequenz*
 $S_{kV \text{ akt}}$ *tatsächliche Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt bei Netzfrequenz*
 Q_V *Blindleistung bei Netzfrequenz nach $Q_V = 2\pi \cdot f_N \cdot C_V \cdot U_N^2$*

Das Modell liefert unter der Annahme, dass die wirksamen Anteile der Gesamtkapazität C_V direkt oder sehr nahe an der Sammelschiene angeschlossen sind, in den meisten Fällen Ergebnisse mit guter Genauigkeit. Während diese Annahme in MS-Netzen zumeist Gültigkeit besitzt, ist in HS-Netzen fast immer von einer nicht zu vernachlässigenden Verteilung der Kapazität im Netz auszugehen. In vielen Fällen kann die Resonanzfrequenz deshalb höher als nach Gleichung (B3-3) sein.

Die Netzlast beeinflusst maßgeblich die Dämpfung und damit die Impedanzüberhöhung an der ersten Parallelresonanzstelle im Vergleich zur Impedanzgeraden. Eine exakte Abschätzung ist erfahrungsgemäß nur in seltenen Fällen möglich. Anhaltswerte für den Resonanzfaktor enthält Tab. B3-1. Falls dem Netzbetreiber aus Erfahrungen geeignetere Werte für den Resonanzfaktor vorliegen, sollten diese verwendet werden.

Tab. B3-1 Anhaltswerte für den Resonanzfaktor k_v in Abhängigkeit der Ordnungszahl v

	$2 \leq v < (v_{\text{res}} - 2)$	$(v_{\text{res}} - 2) \leq v \leq (v_{\text{res}} + 2)$	$v > (v_{\text{res}} + 2)$
Netze mit hohem Kabelanteil	$k_v = 1$	$k_v \approx 1,5 \dots 2,5$	$k_v \approx 1$
Netze mit hohem Freileitungsanteil		$k_v \approx 2 \dots 3$	

*Anm.: Es gilt $v_{\text{res}} = f_{\text{res}} / f_N$
Für den Bereich der Resonanz können die Resonanzfaktoren variieren. Ist in Schwachlastzeiten ein sehr niedriger Anteil ohmscher Lasten zu erwarten, sollte der Resonanzfaktor aus dem obereren Wertebereich gewählt werden.*

Variante 3: Keine Berücksichtigung von Resonanzen

Falls keine weiteren Netzdaten verfügbar sind und die Gefahr von Resonanzüberhöhungen als gering eingeschätzt wird, kann eine überschlägige Abschätzung von Emissionsgrenzwerten auch ohne Berücksichtigung von Resonanzen erfolgen. Dazu gilt $k_v = 1$ für alle Harmonischen. Gleichung (B3-2) vereinfacht sich dann zu Gleichung (B3-1), welche auch der Berechnung der Emissionsgrenzwerte in NS-/MS-Netzen zugrunde liegt. Die Näherung führt im Allgemeinen zu vertretbaren Grenzwerten, kann in Einzelfällen jedoch zu unzulässig hohen Oberschwingungspegeln für einzelne Harmonische führen. Begleitende Messungen werden unbedingt empfohlen.

3.2 Planungspegel und zulässige Gesamtstöraussendung

Abb. B3-2 zeigt die Zusammenhänge zwischen Verträglichkeitspegel, Planungspegel und zulässiger Gesamtstöraussendung als Grundlage für die koordinierte Festlegung von Emissionsgrenzwerten für Oberschwingungen.

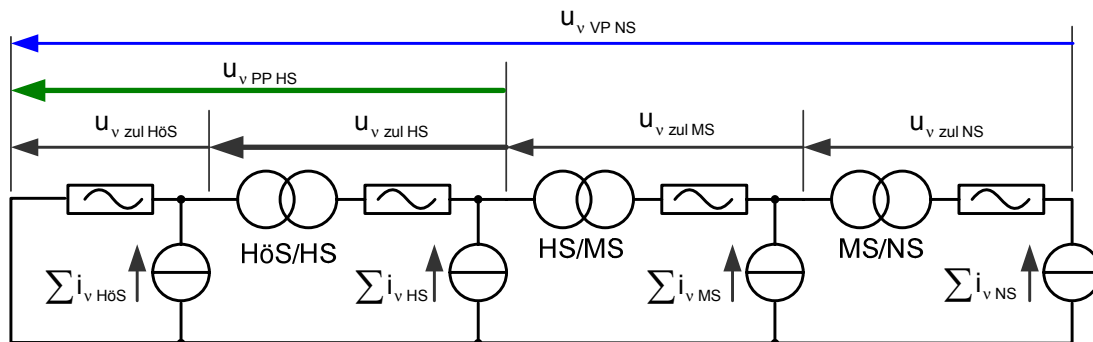


Abb. B3-2: Ersatzschaltbild für die Koordination von Emissionsgrenzwerten für Oberschwingungen

Basierend auf dem Verträglichkeitspegel für NS-Netze nach IEC 61000-2-2 [15] ergibt sich die zulässige Gesamtstöraussendung für das HS-Netz entsprechend

$$u_{v \text{ zul HS}} = u_{v \text{ VP NS}} \cdot k_{N \text{ HS}} \quad (\text{B3-4})$$

- $u_{v \text{ VP NS}}$ Verträglichkeitspegel im NS-Netz für die Harmonische mit der Ordnungszahl v
- $u_{v \text{ zul HS}}$ zulässige Gesamtstöraussendung im HS-Netz für die Harmonische mit der Ordnungszahl v
- $k_{N \text{ HS}}$ Netzebenenfaktor für das HS-Netz
(Richtwert: $k_{N \text{ HS}} = 0,25$)

Planungspegel werden vom Netzbetreiber festgelegt und können so individuelle Besonderheiten berücksichtigen. Richtwerte für die Planungspegel sind in IEC 61000-3-6 [52] angegeben. Sie sollten auch bei Ausnutzung der gesamten in einem HS-Netz verfügbaren Anschlusskapazität nicht überschritten werden.

Tab. B3-2 gibt Anhaltswerte für die zulässige Gesamtstöraussendung an. Diese basieren auf einem Netzebenenfaktor $k_{N \text{ HS}} = 0,25$ und den ebenfalls angegebenen Verträglichkeitspegeln. Bei abweichendem Netzebenenfaktor können die entsprechenden Werte gemäß Gleichung (B3-4) berechnet werden.

Tab. B3-2 Verträglichkeitspegel (NS-Netz) und Anhaltswerte für die zulässige Gesamtstöraussendung (HS-Netz) für ausgewählte Harmonische

v	5	7	11	13	17	19		THDu
$u_{v \text{ VP NS}} / \%$	6,0	5,0	3,5	3,0	2,0	1,75		8,0
$u_{v \text{ zul HS}} / \%$	1,5	1,25	0,9	0,75	0,5	0,45		2,4

3.3 Beurteilung

3.3.1 Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

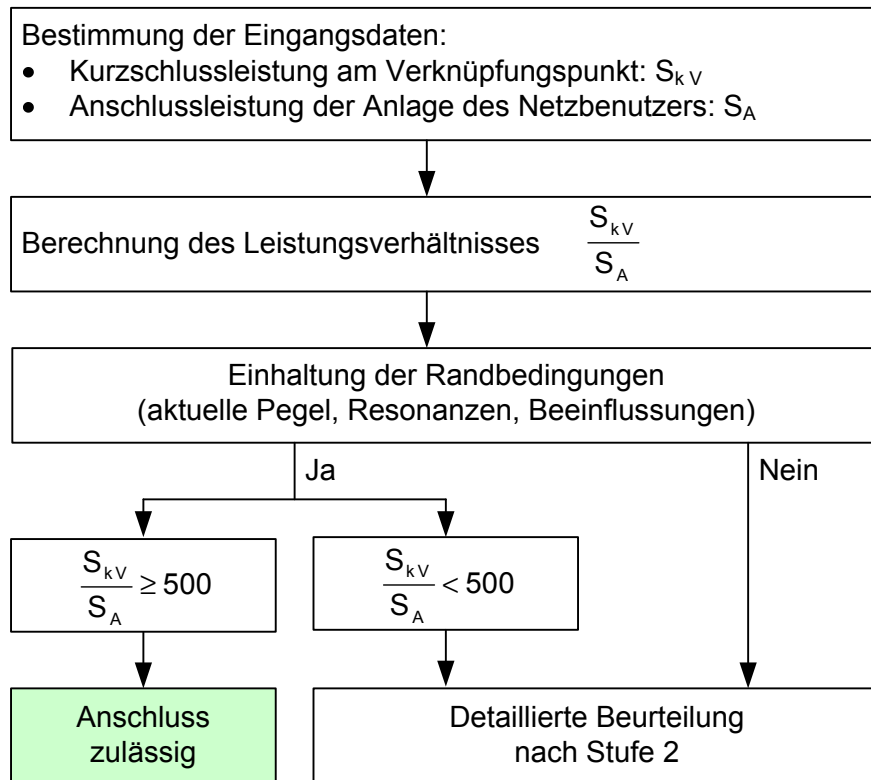


Abb. B3-3: Schema zur vereinfachten Beurteilung nach Stufe 1

Gegenüber dem Beurteilungsverfahren im Grunddokument ist die Anwendung der 1.Stufe in HS-Netzen an zusätzliche Randbedingungen gebunden:

1. Die aktuellen Pegel der Oberschwingungsspannung im HS-Netz weisen eine ausreichende Reserve zum Planungspegel auf.
2. Resonanzstellen im HS-Netz weisen keinen Resonanzfaktor $k_v > 2$ auf.
3. Die Wahrscheinlichkeit der unzulässigen Beeinflussung von Anlagen anderer Netzbenutzer ist gering.

3.3.2 Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

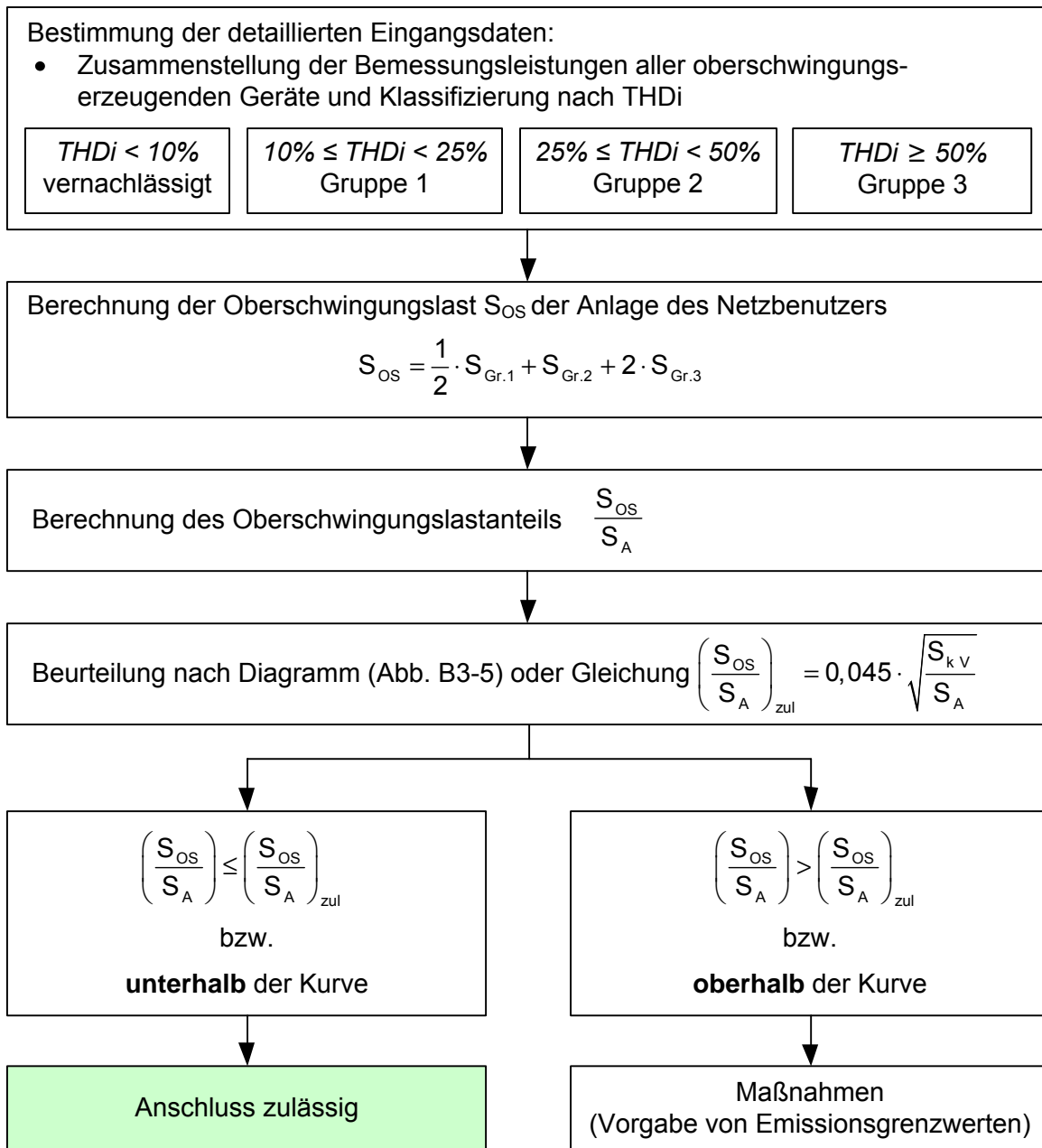


Abb. B3-4: Schema zur detaillierten Beurteilung nach Stufe 2

Anhaltswerte für den THDi ausgewählter Gerätegruppen gibt das Grunddokument bzw. IEC 61000-3-6 [52]. Wird bei Beurteilung nach Stufe 2 eine Anlage als zulässig bewertet, ist trotzdem die Einhaltung der Randbedingungen für Stufe 1 zu prüfen. Die zusätzliche Vorgabe von Emissionsgrenzwerten und die messtechnische Überprüfung nach Anschluss der Anlage werden empfohlen.

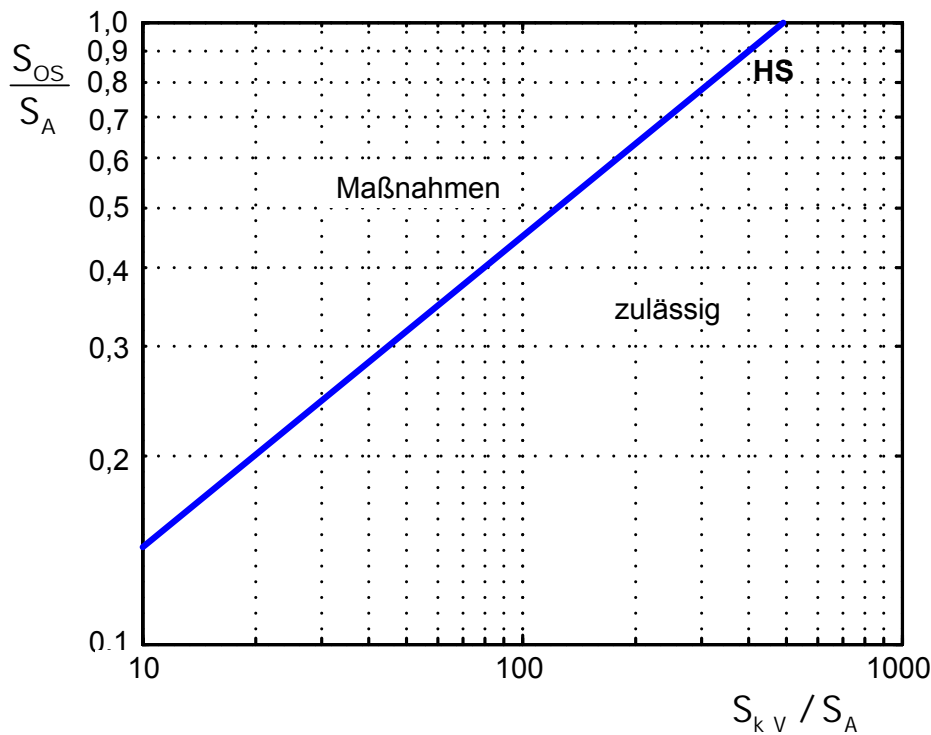


Abb. B3-5: Diagramm zur Beurteilung nach Stufe 2

3.4 Emissionsgrenzwerte

HS-Netze sind bevorzugt vermascht und verfügen in der Regel über mehr als eine Einspeisung. Zur leistungsproportionalen Aufteilung der zulässigen Gesamtstöraussendung werden deshalb fiktive Netzleistung S_{NHS} , Abnehmerfaktor k_B und Erzeugerfaktor k_E eingeführt. Die fiktive Netzleistung ist die Summe der Bemessungsleistungen aller Einspeisetransformatoren:

$$S_{NHS} = \sum_{i=1}^N S_{r_i} \quad (B3-5)$$

S_{NHS} fiktive Netzleistung des HS-Netzes in MVA
 S_{r_i} Bemessungsleistung des Einspeisetransformators i in MVA
 N Anzahl der Einspeisetransformatoren

Der Abnehmerfaktor ist bis auf einzelne Ausnahmen kleiner 1 und gibt das Verhältnis von maximal anschließbarer Anschlussleistung aller Abnehmeranlagen und fiktiver Netzleistung des HS-Netzes an.

$$k_B = \frac{S_{A \max}}{S_{NHS}} \quad (B3-6)$$

S_{NHS} fiktive Netzleistung des HS-Netzes in MVA
 $S_{A \max}$ maximal anschließbare Leistung aller Abnehmeranlagen für das HS-Netz in MVA
 k_B Abnehmerfaktor

Der Erzeugerfaktor gibt das Verhältnis von maximal anschließbarer Leistung aller Erzeugungsanlagen und fiktiver Netzleistung des HS-Netzes an. Der Faktor 0,5 berücksichtigt, dass für Erzeugungsanlagen im Vergleich zu Abnehmeranlagen nur reduzierte Grenzwerte zulässig sind (vgl. Abschnitt C Kapitel 4).

$$k_E = 0,5 \cdot \frac{S_{E \max}}{S_{NHS}} \quad (\text{B3-7})$$

S_{NHS}	<i>fiktive Netzleistung des HS-Netzes in MVA</i>
$S_{E \max}$	<i>maximal anschließbare Leistung aller Erzeugungsanlagen für das HS-Netz in MVA</i>
k_E	<i>Erzeugerfaktor</i>

Der Wert $S_{E \max}$ eines HS-Netzes ergibt sich aus Lastfluss-, Kurzschluss- und Stabilitätsberechnung. Als Richtwert kann für $S_{E \max}$ eine Größenordnung von $0,5 \cdot S_{NHS}$ verwendet werden.

Die allgemeine Gleichung zur Berechnung der Emissionsgrenzwerte lautet:

$$\frac{I_v}{I_A} = \frac{k_{NHS} \cdot u_{v \text{ VP NS}}}{k_v \cdot v} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot \left(\frac{S_A}{(k_B + k_E) \cdot S_{NHS}} \cdot \frac{1}{g} \right)^{\frac{1}{\alpha_v}} \quad (\text{B3-8})$$

S_{NHS}	<i>fiktive Netzleistung des HS-Netzes in MVA</i>
$u_{v \text{ VP NS}}$	<i>Verträglichkeitspegel im NS-Netz für die Harmonische mit der Ordnungszahl v</i>
k_{NHS}	<i>Netzebenenfaktor für das HS-Netz</i>
k_B	<i>Abnehmerfaktor</i>
k_E	<i>Erzeugerfaktor</i>
v	<i>Ordnungszahl der Harmonischen</i>
k_v	<i>Resonanzfaktor für die Harmonische mit der Ordnungszahl v</i>
I_v	<i>Oberschwingungsstrom in A</i>
I_A	<i>Anlagenstrom in A</i>
g	<i>Gleichzeitigkeitsfaktor</i>
S_{kV}	<i>Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt in MVA</i>
S_A	<i>Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers in MVA</i>
α_v	<i>Summationsexponent für Überlagerung: 1...für $v = 3$; 1,4...für $10 > v \geq 5$; 2...für $v \geq 10$</i>

Durch vereinfachende Annahmen ($\alpha_v = 2$; $g = 1$) bzw. Anwendung gebräuchlicher Anhaltswerte ($u_{v \text{ zul HS}}$ gemäß Tab. B3-2) ergibt sich folgende vereinfachte Gleichung:

$$\frac{I_v}{I_A} = \frac{q_v}{10000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \sqrt{\frac{S_{kV}}{(k_B + k_E) \cdot S_{NHS}}} \quad (\text{B3-9})$$

q_v	<i>Proportionalitätsfaktor für die Harmonische mit der Ordnungszahl v</i>
k_v	<i>Resonanzfaktor für die Harmonische mit der Ordnungszahl v</i>
I_v	<i>Oberschwingungsstrom in A</i>
I_A	<i>Anlagenstrom in A</i>
S_{kV}	<i>Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt in MVA</i>
S_A	<i>Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers in MVA</i>
S_{NHS}	<i>fiktive Netzleistung des HS-Netzes in MVA</i>
k_B	<i>Abnehmerfaktor</i>
k_E	<i>Erzeugerfaktor</i>

Tab. B3-3 Proportionalitätsfaktor q_v für ausgewählte Oberschwingungen

v	5	7	11	13	17	19	> 19
q_v	30	15	8	5	3	2	1

Der Gesamtüberschwingungsgehalt des Stromes $THDi_A$ berechnet sich aus den Emissionsgrenzwerten (Gleichung B3-9) gemäß:

$$THDi_A = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} I_v^2}}{I_A} \quad (B3-10)$$

- $THDi_A$ Gesamtüberschwingungsgehalt der Anlage des Netzbenutzers
 I_v Oberschwingungsstrom in A
 I_A Anlagenstrom in A
 v Ordnungszahl der Harmonischen

Es ist zu beachten, dass der berechnete Gesamtüberschwingungsgehalt des Stromes $THDi_A$ nicht mit dem üblicherweise messtechnisch bestimmten $THDi$ übereinstimmt (siehe Kapitel 3.6).

3.5 Maßnahmen

Das Grunddokument beschreibt verschiedene netzseitige und anlagenseitige Maßnahmen, welche in vielen Fällen analog auch im HS-Netz angewendet werden können.

Darüber hinaus kann als netzseitige Maßnahme die gezielte Verteilung von anzuschließender Anlage und weiteren Anlagen auf unterschiedliche Sammelschienen erfolgen.

3.6 Messung

Jeder Anschluss im HS-Netz sollte durch Messungen dokumentiert werden. Die Messung muss alle für den Betrieb relevanten Zustände der Anlage und alle möglichen Schaltungsvarianten des Netzes umfassen.

Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der Stromharmonischen und die ausreichende Reserve der Spannungsharmonischen zum Planungspegel sind zu überprüfen. Stromharmonische sind als harmonische Untergruppen entsprechend IEC 61000-4-7 [56] zu erfassen und als Absolutwerte mit den berechneten Emissionsgrenzwerten zu vergleichen.

Zum Nachweis der Einhaltung des Gesamtüberschwingungsgehaltes des Stromes $THDi_A$ ist der üblicherweise gemessene Wert $THDi$ nach folgender Gleichung umzurechnen:

$$THDi_A = THDi \cdot \frac{I_1}{I_A} \quad (B3-11)$$

95% der 10-Minuten-Mittelwerte über 1 Woche sollten den Planungspegel nicht überschreiten. Für zusätzliche Messverfahren wird auf IEC 61000-3-6 verwiesen [52].

Die Messung der Spannungsharmonischen kann durch das frequenzabhängige Übertragungsverhalten der verwendeten Spannungswandler für höhere Harmonische erheblich verfälscht sein. Für die Messung der Stromharmonischen sind im Allgemeinen nur geringe Fehler zu erwarten.

4 Kommutierungseinbrüche

4.1 Grundlagen

Stromrichter finden sich in der Energietechnik in einem breiten Einsatzspektrum mit Leistungen bis zu einigen hundert Megawatt.

- statische Erregeranlagen für Synchrongeneratoren und Motoren
- Anfahrumsrichter
- Stromrichter für Pumpspeicheranlagen
- Stromversorgung für Elektrolyse und Lichtbogenöfen
- Walzwerkantriebe
- Direktumsrichter (für Netzkupplungen bei HGÜ oder Bahn)

4.2 Planungspegel

Planungspegel für Kommutierungseinbrüche werden nicht angegeben.

4.3 Beurteilung

Eine Anschlussbeurteilung hinsichtlich Kommutierungseinbrüche ist nur für gesteuerte netzgeführte Stromrichter notwendig.

4.3.1 Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

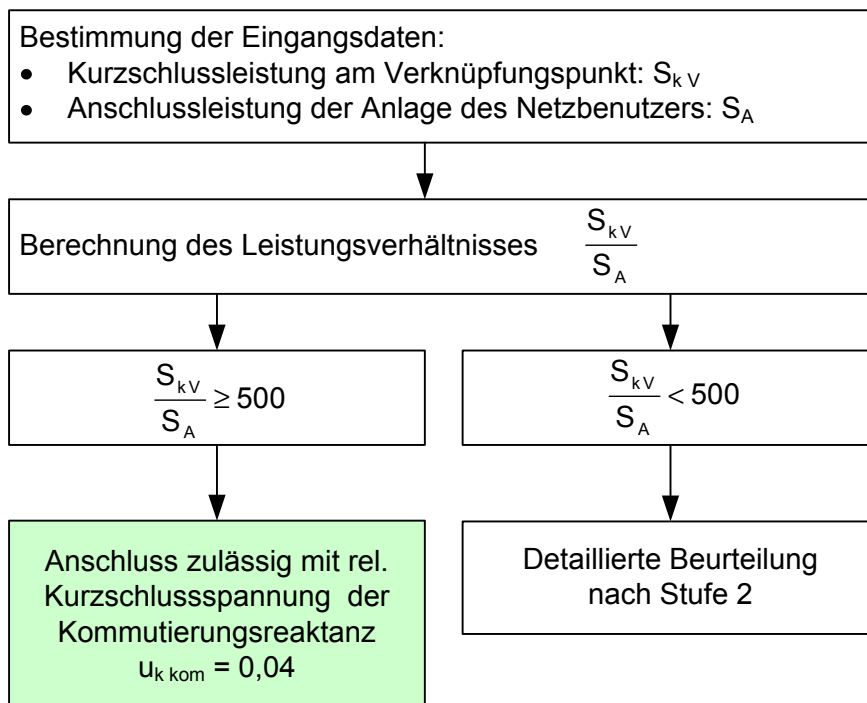


Abb. B4-1: Schema zur vereinfachten Beurteilung nach Stufe 1

Ist die Pulszahl des in der Anlage eingesetzten Stromrichters bekannt, kann zur vereinfachten Beurteilung das Leistungsverhältnis nach Tab. B4-1 eingesetzt werden. Bei mehreren Stromrichtern ist immer die ungünstigste Pulszahl zu verwenden.

Tab. B4-1: Grenzwerte des Leistungsverhältnisses für die vereinfachte Beurteilung bei verschiedenen Wiederholraten

Pulszahl	Leistungsverhältnis S_{kV} / S_A
6-pulsig	500
12-pulsig	250
24-pulsig	125

Enthält die Anlage nur einen einzelnen Stromrichter mit bekannter Bemessungsleistung $S_{r\text{Str}}$, kann diese anstelle der Anschlussleistung der Anlage S_A bei der vereinfachten Beurteilung eingesetzt werden.

4.3.2 Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Wird der Wechselrichter mit einem von 90° abweichenden Steuerwinkel betrieben, so kann die geringere Einbruchtiefe bei der Kommutierung mit dem Faktor $\sin \alpha$ berücksichtigt werden. Bei der Beurteilung ist immer der im Betrieb ungünstigste Steuerwinkel anzunehmen. Dabei sind auch Anfahrvorgänge zu berücksichtigen.

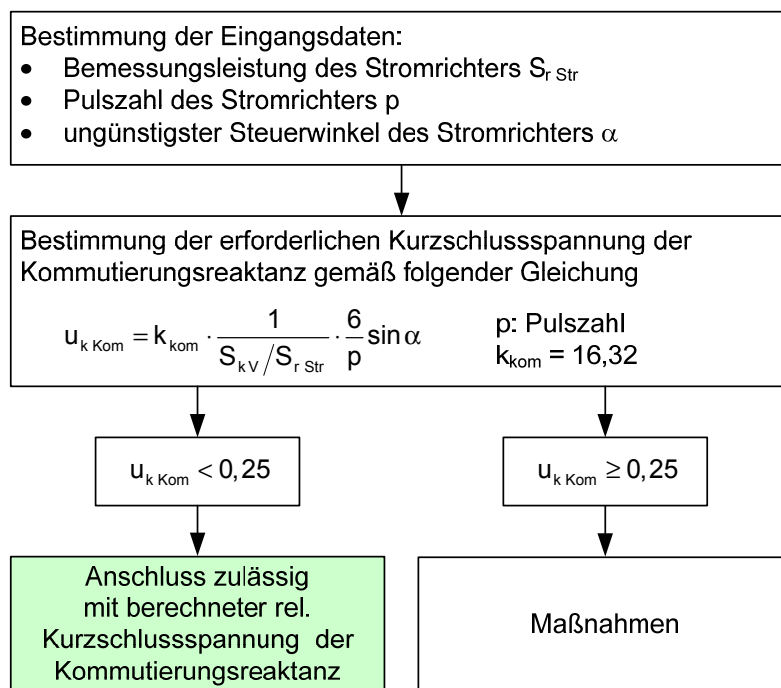


Abb. B4-2: Schema zur detaillierten Beurteilung nach Stufe 2

Der Faktor k_{kom} in Bild B4-2 ergibt sich aus Gleichung (7-2) Kapitel 7.3.1.2 des Grunddokumentes.

Die Bestimmung der relativen Kurzschlussspannung der Kommutierungsreaktanz $u_{k\text{Kom}}$ kann auch nach Bild B4-3 erfolgen. Dabei kann der Wert $u_{k\text{Kom}}$ für 6-pulsige Stromrichter direkt abgelesen werden. Für Stromrichter mit höheren Pulszahlen ist der abgelesene Wert gemäß folgender Gleichung umzurechnen:

$$u_{k\text{Kom}} = u_{k\text{Kom } 6p} \cdot \frac{6}{p} \quad (\text{B4-1})$$

$u_{k\text{Kom } 6p}$ rel. Kurzschlussspannung der Kommutierungsreaktanz für 6-Puls-Stromrichter
 p Pulszahl des Stromrichters

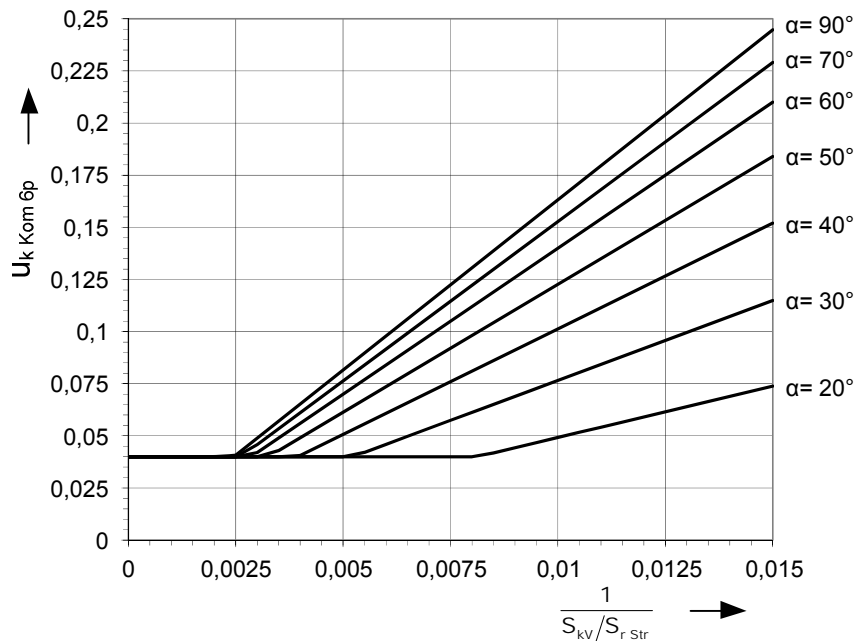


Abb. B4-3: Erforderliche relative Kurzschlussspannung $u_{k,Kom}$ der Kommutierungsreaktanz X_{Kom} in Abhängigkeit vom Verhältnis $1/(S_{kv}/S_{r,Str})$ für verschiedene Steuerwinkel für 6-pulsige Stromrichter

Bei einem Wert von $u_{k,Kom} > 0,25$ resultieren eine lange Dauer der Kommutierung und ein hoher Spannungsabfall, wodurch der Stromrichterbetrieb stark beeinträchtigt werden kann. Die Berechnung des tatsächlichen Einflusses kann allerdings nur mit Hilfe einer Computersimulation durchgeführt werden.

4.4 Emissionsgrenzwerte

Die relative Tiefe der Kommutierungseinbrüche d_{Kom} soll am Verknüpfungspunkt im ungünstigsten Betriebszustand des Stromrichters $d_{Kom} = 5\%$ nicht überschreiten.

4.5 Maßnahmen

Das Grunddokument beschreibt verschiedene netzseitige und anlagenseitige Maßnahmen, welche in vielen Fällen analog auch im HS-Netz angewendet werden können.

Darüber hinaus kann eine Erhöhung der Pulsigkeit gesteuerter netzgeführter Stromrichter bis $p=96$ eine Reduktion der Kommutierungseinbrüche bewirken.

4.6 Messung

Die Messung der Kommutierungseinbrüche erfolgt mittels Transientenrekorder oder Oszilloskop. Die zur Anpassung der Messgrößen verwendeten Wandler bzw. Sensoren müssen für die Messung transients Vorgänge geeignet sein.

5 Zwischenharmonische und höherfrequente Anteile

5.1 Grundlagen

Zwischenharmonische können bereits bei niedrigen Pegeln zu störenden Flickererscheinungen führen und in der Nähe der Rundsteuerfrequenz von TRA deren Funktion unzulässig beeinflussen.

Höherfrequente Anteile größer 2 kHz treten u.a. bei Anlagen mit selbstgeführten Wechselrichtern auf.

Sofern der Netzbetreiber eine TRA betreibt, sind die von ihm verwendeten Rundsteuerfrequenzen zu erfragen und Schaltfrequenzen in der Nähe zu vermeiden.

Weitere Ausführungen sind im Grunddokument zu finden.

5.2 Planungspegel

In Anlehnung an IEC 61000-3-6 [52] werden Planungspegel entsprechend Tab. B5-1 festgelegt.

Tab. B5-1 Planungspegel für Zwischenharmonische und höherfrequente Harmonische

	Frequenzbereich	Planungspegel
Zwischenharmonische der Ordnungszahl $\mu < 2$	bis 100 Hz	$u_\mu = 0,1\%$
Zwischenharmonische der Ordnungszahl $\mu > 2$	100 Hz bis 9 kHz	$u_\mu = 0,2\%$
200-Hz-Frequenzband mit der Mittenfrequenz b (gemäß IEC 61000-4-7)	2 bis 9 kHz	$u_b = 0,3\%$

5.3 Beurteilung

5.3.1 Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

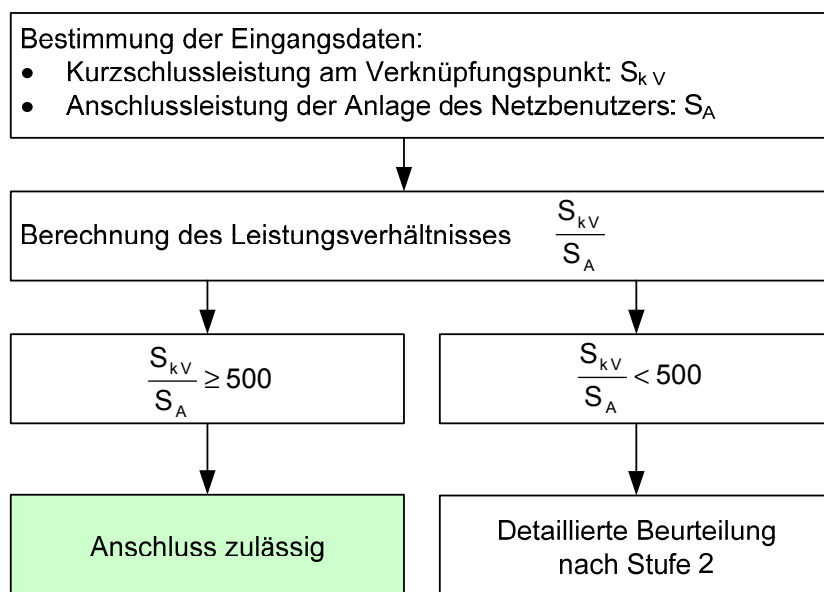


Abb. B5-1: Schema der vereinfachten Beurteilung nach Stufe 1

5.3.2 Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

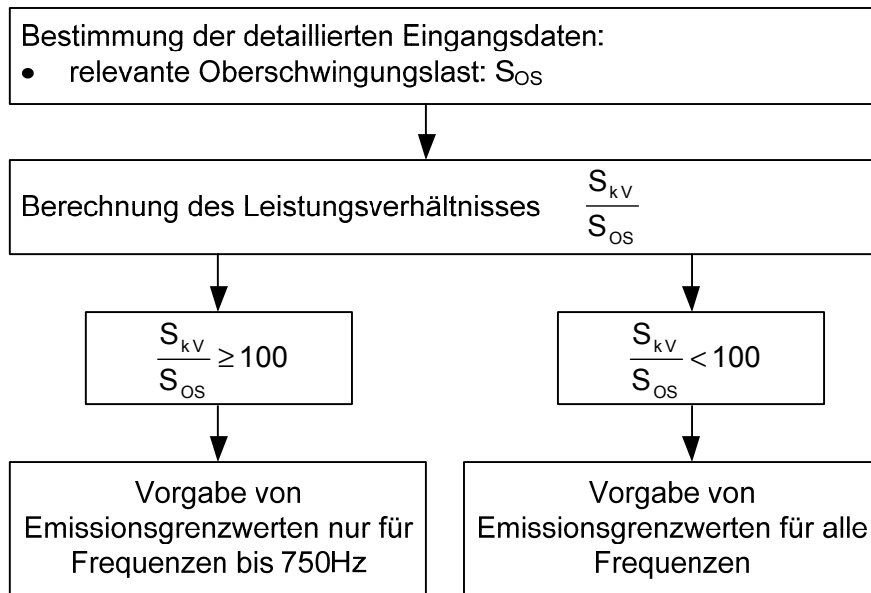


Abb. B5-2: Schema der detaillierten Beurteilung nach Stufe 2

Die relevante Oberschwingungslast S_{OS} umfasst nur Anlagen, welche Zwischenharmonische oder höherfrequente Anteile erzeugen. Sie entspricht entweder der Summe der Bemessungsleistungen aller gleichartigen Einzelanlagen oder der Bemessungsleistung der leistungsstärksten Anlage.

5.4 Emissionsgrenzwerte

Für die Berechnung der zulässigen Pegel für die Anlage des Netzbenutzers sind die Grenzwerte nach Tab. B5-2 zugrunde zulegen.

Tab. B5-2 Emissionsgrenzwerte für Zwischenharmonische und höherfrequente Anteile einer Einzelanlage

	Frequenzbereich	Grenzwert
Zwischenharmonische der Ordnungszahl μ	bis 9 kHz	$u_{\mu \max} = 0,1\%$
200-Hz-Frequenzband mit der Mittenfrequenz b (gemäß IEC 61000-4-7)	2 bis 9 kHz	$u_{b \max} = 0,3\%$

Der Überlagerungseffekt für Zwischenharmonische niedriger Ordnungszahlen zwischen den einzelnen Netzebenen ist gering. Eine Koordination zwischen den Spannungsebenen ist deshalb nicht erforderlich. Für flickerrelevante Zwischenharmonische kleiner 100 Hz kann eine Überlagerung u.U. nicht vernachlässigt werden.

Die Ausbreitung höherfrequente Anteile ist lokal begrenzt, so dass für eine Anlage des Netzbenutzers der gesamte Planungspegel ausgenutzt werden kann.

Die Emission der Anlage des Netzbenutzers wird basierend auf ihrem Beitrag zum entsprechenden Spannungspegel gemäß Tab. B5-2 bestimmt. Zusätzlich können auch die Oberschwingungsströme bewertet werden. Diese sind gemäß Gleichung (B5-1) für Zwischenharmonische der Ordnungszahl μ bzw. gemäß Gleichung (B5-2) für 200-Hz-Bänder mit der Mittenfrequenz b zu berechnen. Lokale Netzresonanzen werden durch die Gleichungen nicht berücksichtigt.

$$\frac{I_{\mu}}{I_A} = \frac{u_{\mu \max}}{\mu} \cdot \frac{S_{kV}}{S_{OS}} \quad (\text{B5-1})$$

$$\frac{I_{\mu}}{I_A} = \frac{50}{b} \cdot u_{b \max} \cdot \frac{S_{kV}}{S_{OS}} \quad (\text{B5-2})$$

$u_{\mu \max}$	Zulässiger Pegel der Zwischenharmonischen mit der Ordnungszahl μ
$u_{b \max}$	Zulässiger Pegel des 200-Hz-Bandes mit der Mittenfrequenz b
I_{μ}	Strom der Zwischenharmonischen/des 200-Hz-Bandes in A
I_A	Anlagenstrom in A
S_{kV}	Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt in MVA
S_{OS}	relevante Oberschwingungslast in MVA

Für die Bewertung des Beitrags zum Spannungspegel ist jene Kombination aus Betriebszustand / Netzzustand auszuwählen, welche die betragsmäßig größte Erhöhung des resultierenden Spannungspegels bedingt.

Für den Frequenzbereich der Tonfrequenzrundsteuerung +/-100Hz ist Kapitel 6 zu beachten.

5.5 Maßnahmen

Das Grunddokument beschreibt verschiedene netzseitige und anlagenseitige Maßnahmen, welche in vielen Fällen analog auch im HS-Netz angewendet werden können.

Für den Fall des Auftretens von Resonanzerscheinungen sind ggf. Zusatzmaßnahmen erforderlich.

5.6 Messung

Der Nachweis der Einhaltung kann entweder durch Messung des Stroms oder durch Bestimmung des Beitrags zum Spannungspegel erfolgen.

In jedem Fall darf dabei der Planungspegel nach Tab. B5-1 nicht überschritten werden.

Für die Messung der Zwischenharmonischen ist gemäß IEC 61000-4-7 [56] die entsprechende zentrierte zwischenharmonische Untergruppe zu verwenden. Für die höherfrequenten Harmonischen ab 2 kHz ist ein 200-Hz-Frequenzband gemäß IEC 61000-4-7 [56] Anhang B anzuwenden.

Die Messung kann durch das frequenzabhängige Übertragungsverhalten der verwendeten Spannungswandler für höhere Frequenzen erheblich verfälscht sein.

Für die Bewertung flickerrelevanter Zwischenharmonischer ist ein Nachweis der Einhaltung der entsprechenden Flickerpegel gemäß Abschnitt B Kapitel 1 mittels Flickermeter erforderlich.

6 Signalübertragung (Tonfrequenzrundsteuerung)

6.1 Grundlagen

6.1.1 Kundenanlagen

Damit die Rundsteuerung nicht durch die an das Netz angeschlossenen Anlagen von Netzbenutzern unzulässig beeinträchtigt wird, sind die nachfolgenden Einflussgrößen zu beachten:

- Belastung der Rundsteuersendeanlagen
- Steuerpegeländerungen
- Störspannungen

Bei einer Beurteilung aus Sicht der Rundsteuerung wird nicht das einzelne Betriebsmittel, sondern die Kundenanlage in Ihrer Gesamtbelastung am Verknüpfungspunkt betrachtet.

Die Höhe der Beeinflussung auf die Rundsteuerung, die eine Anlage des Netzbenutzers verursachen darf, ist abhängig von dem Verhältnis der gesamten Bemessungsleistung des jeweiligen Netzes zur Leistung der Anlage des Netzbenutzers.

Rundsteueranlagen werden für eine Belastung dimensioniert, die der Bemessungsleistung des Netzes entspricht. Für weiterführende Informationen, u.a. zur gegenseitigen Beeinflussung verschiedener TRA, wird auf das Grunddokument bzw. TRA-Empfehlung [29] und VDEW-Empfehlung [57] verwiesen.

6.1.2 Fremde TRA – Anlagen

Fremde TRA-Anlagen können sich entweder im HS-Netz oder in anderen Netzebenen befinden.

Im Falle von frequenzgleichen TRA – Systemen oder einer Abweichung ± 100 Hz darf die Übertrittsspannung bzw. deren Modulationsprodukte (± 100 Hz) in ein anderes Netz die Nichtfunktionsspannung der dortigen Rundsteuerempfänger keinesfalls überschreiten.

Es ist dabei zu berücksichtigen, dass durch kapazitive Lasten die Übertrittsspannung angehoben und damit höher werden kann als der Übertrittspegel des beeinflussenden Netzes.

Während TRA im HS-Netz andere TRA im MS-Netz beeinflussen können, ist eine Beeinflussung von TRA im HS-Netz durch TRA im MS-Netz unwahrscheinlich.

6.1.3 Impedanzfaktor

Betreibt oder plant der Netzbetreiber eine Rundsteuerung im HS-Netz und liegt der Verknüpfungspunkt V der Anlage des Netzbenutzers ebenfalls in diesem HS-Netz, so muss die Tonfrequenzimpedanz Z_s der Anlage des Netzbenutzers ausreichend hoch sein. Ansonsten wird die Rundsteuerung unzulässig beeinflusst.

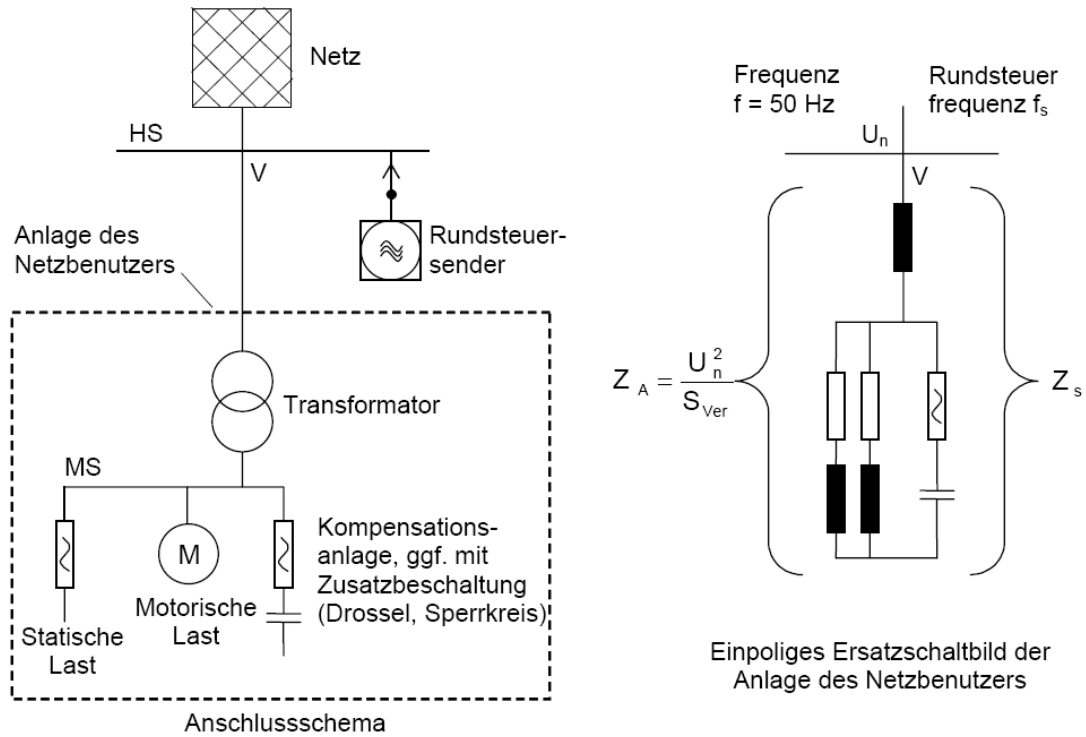


Abb. B6-1: Vereinfachte Modellbildung zur Bestimmung der Anschlussimpedanz Z_A

Für Anlagen von Netzbenutzern mit Verknüpfungspunkt V im HS-Netz gilt:

$$\varepsilon = \frac{Z_s}{Z_A} \quad (\text{B6-1})$$

ε Impedanzfaktor
 Z_s Impedanz bei Rundsteuerfrequenz
 Z_A Anschlussimpedanz

6.2 Planungspegel

Planungspegel werden nicht angegeben.

6.3 Beurteilung

6.3.1 Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

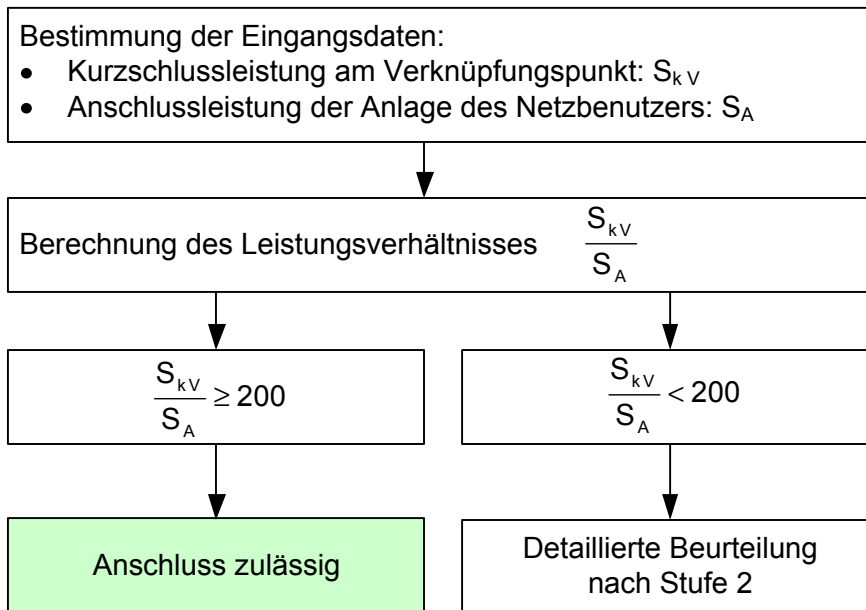


Abb. B6-2: Schema zur vereinfachten Beurteilung nach Stufe 1

6.3.2 Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Die Beurteilung mittels Impedanzfaktor ist nicht für die Beeinflussung des TRA-Pegels durch Erzeugungsanlagen bestimmt (vgl. Abschnitt C7).

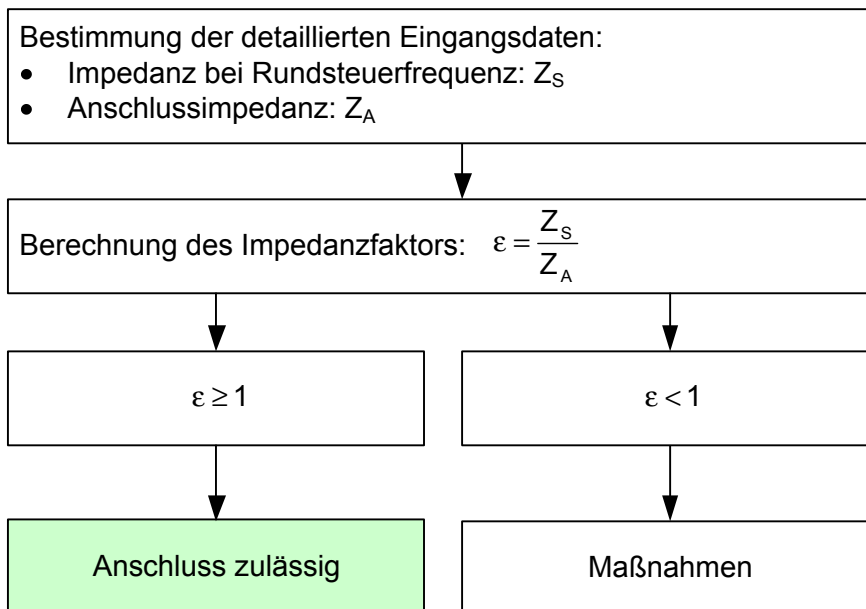


Abb. B6-3: Schema zur detaillierten Beurteilung nach Stufe 2

Kann die Impedanz der Anlage in der Planungsphase aufgrund fehlender Daten nicht genügend genau bestimmt werden, so wird eine Abnahmemessung nach Fertigstellung der Anlage empfohlen. Dabei soll die Einhaltung der Impedanzfaktoren mit Hilfe einer frequenzselektiven Spannungs/Strom-Messung überprüft werden.

6.4 Emissionsgrenzwerte

Die Emissionsgrenzwerte dienen einer Begrenzung der Steuerpegelbeeinflussung durch eine Kundenanlage.

Die Kundenanlage muß die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte nach Abschnitt B Kapitel 5 einhalten.

Verwendet der Kunde elektrische Betriebsmittel, deren Funktion durch Rundsteuersendungen beeinträchtigt werden können, so hat er selbst dafür zu sorgen, dass durch den Einbau geeigneter technischer Mittel oder durch Wahl entsprechender Geräte eine Beeinträchtigung vermieden wird.

Der in das übergeordnete Netz übertragene Pegel der Rundsteuerspannung sollte 0,3% bis 0,5% nicht überschreiten.

6.5 Maßnahmen

Das Grunddokument beschreibt verschiedene netzseitige und anlagenseitige Maßnahmen, welche in vielen Fällen analog auch im HS-Netz angewendet werden können.

6.5.1 Beeinflussung von TRA durch Netzurückwirkungen

- Einbau von Sperrkreisen zur Vermeidung von unzulässigen TRA – Pegelreduktionen (Signalabsaugung z.B mittels Generatoren)
- Verdrosselung von Anlagen zur Blindleistungskompensation
- Beeinflussungen durch nicht netzfrequente Störpegel

Anm.: Sperrkreise können das Impedanzverhalten beeinflussen und zu unerwünschten Resonanzerscheinungen führen.

6.5.2 Gegenseitige Beeinflussung verschiedener TRA

- Codierung der Telegramme und Absprache der Sendezeiten
- Sendewiederholung bei nicht plausiblen Abläufen
- Reduktion der Sendepiegel im störenden Netz
- Vermeidung von erkannten kritischen Schaltzuständen
- Entkopplung durch gegenphasige Aussteuerung
- Impedanzentkopplung (Einbau von TRA-Sperrkreisen bzw. TRA-Saugkreisen)
- Entkopplung über Befehlskodierung (gegenseitige Verriegelung der TRA)
- Anpassung der Sendefrequenz

Anm.: Um die in das übergeordnete Netz übertragenen Spannungspegel niedrig zu halten, werden die Sendeanlagen wenn nötig mit Tonfrequenzsperrern (bei Parallelankopplung) oder mit Saugkreisen (bei Serienankopplung) ausgestattet.

6.6 Messung

Der Pegel des Rundsteuersignals ist gemäß IEC 61000-4-30 [55] Klasse A basierend auf den 10-Perioden-Effektivwerten zwischen Beginn und Ende einer Signalübertragung zu bestimmen. Die Messung der Pegel bei TRA-Frequenz kann durch das frequenzabhängige Übertragungsverhalten der eingesetzten Spannungswandler verfälscht sein.

Abschnitt C – Erzeugungsanlagen

Abschnitt C ist nur für Österreich, Schweiz und Tschechische Republik gültig. In Deutschland gilt bis auf weiteres der VDN-Leitfaden EEG-Erzeugungsanlagen am Hoch- und Höchstspannungsnetz [58], welcher für 110-kV-Hochspannungsnetze künftig durch die Technischen Anschlussbedingungen TAB HS ersetzt wird.

1 Spannungsanhebung

Der Betrieb der Erzeugungsanlage darf nur innerhalb des Spannungsbands des Netzbetreibers erfolgen.

Die einzuhaltenden Spannungsbänder (Regelbereiche) der Hochspannung sind beim jeweiligen Netzbetreiber zu erfragen.

2 Spannungsänderungen und Flicker

Einzelne Spannungsänderungen dürfen am Verknüpfungspunkt der Erzeugungsanlage mit dem HS-Netz 2 % ($r < 0,1 \text{ min}^{-1}$; 1 Änderung in 10 Minuten) der Nennspannung nicht überschreiten.

Es gilt darüber hinaus:

- schaltbedingte Spannungsänderungen je Erzeugungseinheit: $d_{\max} \leq 0,5 \%$
- schaltbedingte Spannungsänderungen für die Erzeugungsanlage: $d_{\max} \leq 2 \%$.

Die zulässige Flickerstärke, welche die Gesamtheit aller Erzeugungsanlagen im Hochspannungsnetz maximal bewirken darf, beträgt $P_{\text{st}} = 0,5$ bzw. $P_{\text{it}} = 0,35$.

Für die Berechnung der Gesamtflickerstärke mehrerer Erzeugungsanlagen ist das quadratische Summationsgesetz gemäß Gleichung (B1-1) zu verwenden.

3 Spannungsunsymmetrie

Generell sind am HS-Netz nur dreiphasige Erzeugungsanlagen anzuschließen. Hierbei ist der Unsymmetriegrad von $k_u < 0,3 \%$ einzuhalten.

4 Oberschwingungen

Für die Berechnung der Emissionsgrenzwerte für Erzeugungsanlagen gilt Gleichung (B3-9), wobei die Proportionalitätsfaktoren q_v entsprechend Tabelle C4-1 zu verwenden sind.

Tab. C4-1 Proportionalitätsfaktor q_v für ausgewählte Oberschwingungen

v	5	7	11	13	17	19	> 19
q_v	15	7,5	4	2,5	1,5	1	0,5

Eine vereinfachte Beurteilung auf Basis des Leistungsverhältnisses S_{KV}/S_A ist nicht zulässig.

Für Anlagen auf Basis doppelt gespeister Asynchrongeneratoren sind 25% der Bemessungsleistung zu berücksichtigen.

Direkt angeschlossene Synchron- bzw. Asynchrongeneratoren sind nicht zu berücksichtigen.

5 Kommutierungseinbrüche

Die relative Tiefe von Kommutierungseinbrüchen d_{kom} durch netzgeführte Umrichter darf am Verknüpfungspunkt im ungünstigsten Betriebszustand den Wert von $d_{\text{kom}} = 3\%$ nicht überschreiten.

Für die Berechnung der relativen Kurzschlussspannung der Kommutierungsreaktanz in Beurteilungsstufe 2 ist für Erzeugungsanlagen $k_{\text{kom}} = 27,9$ zu verwenden.

6 Zwischenharmonische und höherfrequente Anteile

Die Bewertung erfolgt entsprechend Abschnitt B Kapitel 5.

7. Tonfrequenzrundsteueranlagen

Die vereinfachte Beurteilung ist gemäß Abb. B6-2 durchzuführen. Als Anschlussleistung ist die Summe der Bemessungsleistung aller Erzeugungseinheiten einzusetzen.

Der Pegel der Tonfrequenzspannung am Verknüpfungspunkt (V) darf durch den Anschluss einer Erzeugungsanlage um nicht mehr als 5% abgesenkt werden (vgl. Abb. C7-1). Dieser abgesenkte Pegel muss mit ausreichender Reserve die Ansprechspannung des Rundsteuerempfängers übersteigen. Die Größe dieser Reserve bestimmt für das HS-Netz der Netzbetreiber. Für die detaillierte Beurteilung ist Abb. C7-2 zu verwenden.

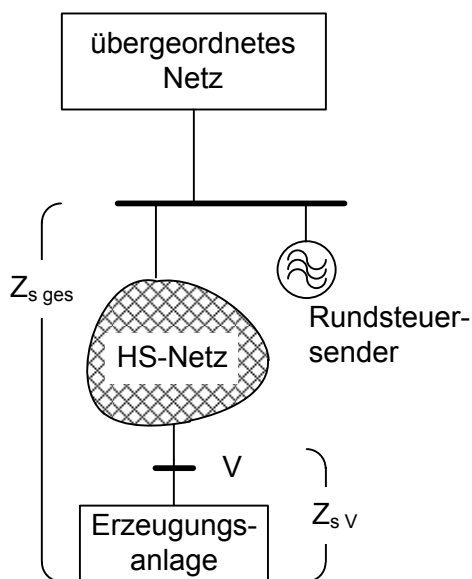


Abb. C7-1: Allgemeines Ersatzschaltbild

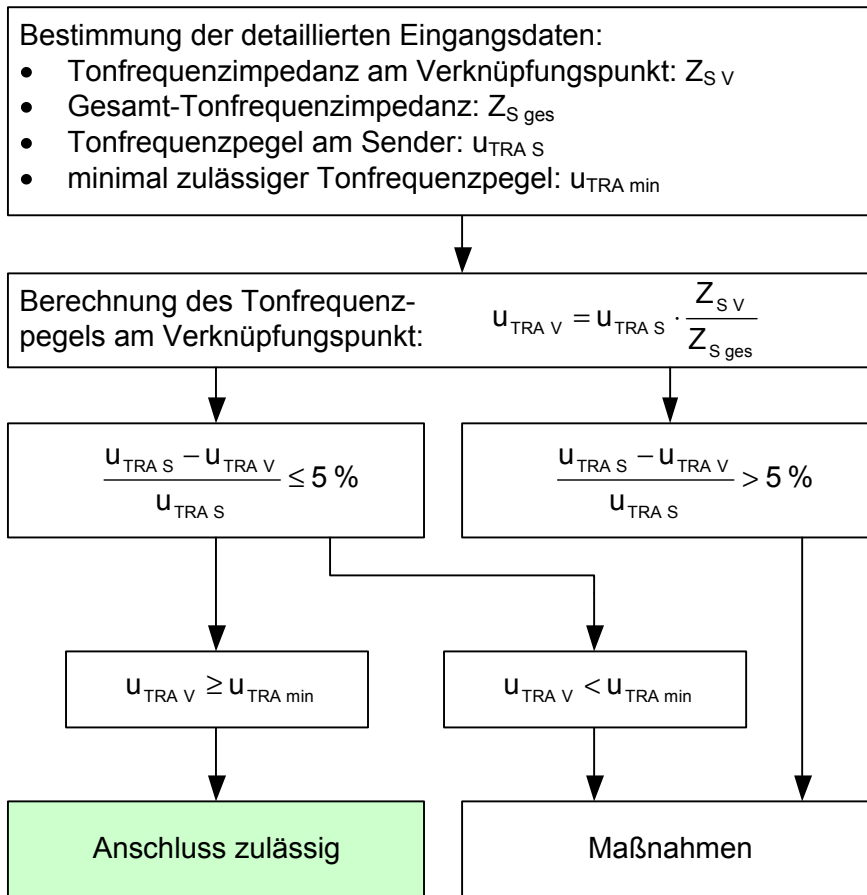


Abb. C7-2: Schema zur detaillierten Beurteilung nach Stufe 2

Abschnitt D - Beispiele

1 Oberschwingungsbewertung eines Windparks

Beschreibung des Netzes:

Transformator: $\ddot{u} = 380 \text{ kV} / 110 \text{ kV}$

$S_{rT} = 250 \text{ MVA}$ (einzige Einspeisung des HS-Netzes)

$u_k = 22 \%$

HS-Netz: Ausdehnung: $\ell = 50 \text{ km}$

Kabel: $C_b = 0,175 \mu\text{F/km}$

Verknüpfungspunkt

(20 km vom UW): $S_{kV} = 800 \text{ MVA}$ (zur Bewertung der Netzrückwirkungen)

$S_{kV \text{ akt}} = 882 \text{ MVA}$ (zur Abschätzung der Resonanzfrequenz)

maximal geplante Anschlussleistung für Abnehmer:

$S_{B \text{ max}} = 250 \text{ MVA}$

maximal geplante Anschlussleistung für Erzeuger:

$S_{E \text{ max}} = 125 \text{ MVA}$

Beschreibung der Anlage des Netzbenutzers:

Windpark: $S_A = 60 \text{ MVA}$ (Einspeiseleistung)

Zuordnung entsprechend THDi zu Gruppe 1

Beurteilung nach Stufe 1:

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{800 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = 13,3 < 500 \rightarrow \text{detaillierte Beurteilung nach Stufe 2 erforderlich}$$

Beurteilung nach Stufe 2:

$$S_{OS} = S_A$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{60 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} = 1$$

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A} \right)_{zul} = 0,045 \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} = 0,045 \cdot \sqrt{13,3} = 0,16$$

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A} \right)_{zul} < \frac{S_{OS}}{S_A} \rightarrow \text{Vorgabe von Emissionsgrenzwerten}$$

Berechnung der Emissionsgrenzwerte:

Bestimmung der ersten Resonanzstelle nach Variante 2:

$$\begin{aligned}
 Q_V &= 2\pi \cdot f_N \cdot C_V \cdot U_N^2 \\
 &= 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,175 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \cdot 50 \text{ km} \cdot (110 \text{ kV})^2 \\
 &= 33,26 \text{ Mvar}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{\text{res}} &\approx f_N \sqrt{\frac{S_{kV \text{ akt}}}{Q_V}} \\
 &\approx 50 \text{ Hz} \cdot \sqrt{\frac{882 \text{ MVA}}{33,26 \text{ MVA}}} = 258 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Es ergibt sich eine Resonanzstelle nahe der 5. Harmonischen. Gemäß Tab. B3-1 werden folgende Resonanzfaktoren gewählt:

$$\begin{aligned}
 v < 4 & : k_v = 1 \\
 4 \leq v \leq 6 & : k_v = 2,5 \\
 v > 6 & : k_v = 1
 \end{aligned}$$

Bestimmung von Abnehmer- und Erzeugerfaktor:

$$\begin{aligned}
 k_B &= \frac{S_{A \text{ max}}}{S_{NHS}} \\
 &= \frac{250 \text{ MVA}}{250 \text{ MVA}} = 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 k_E &= 0,5 \cdot \frac{S_{E \text{ max}}}{S_{NHS}} \\
 &= 0,5 \cdot \frac{125 \text{ MVA}}{250 \text{ MVA}} = 0,25
 \end{aligned}$$

$$\frac{I_v}{I_A} = \frac{q_v}{10000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{(k_B + k_E) \cdot S_{NHS}}}$$

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{60 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 110 \text{ kV}} = 315 \text{ A}$$

Übersicht der Emissionsgrenzwerte:

v	5	7	11	13	17	19	> 19
q _v	15	7,5	4	2,5	1,5	1	0,5
k _v	2,5	1	1	1	1	1	1
I _v	1,1 A	1,4 A	0,7 A	0,5 A	0,3 A	0,2 A	0,1 A

Berechnung des Gesamtüberschwingungsgehaltes des Stromes THDi_A aus den Emissionsgrenzwerten:

$$\text{THDi}_A = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{50} I_v^2}}{I_A} = 0,65 \%$$

Für $v > 19$ wurden bei der Berechnung die Oberschwingungen der Ordnungszahlen $v = 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47, 49$ berücksichtigt.

2 Beeinflussung der Tonfrequenzrundsteuerung

Beschreibung:

An ein 110-kV-HS-Netz soll ein Kraftwerk mit zwei Generatoren angeschlossen werden. Jeder Generator speist über einen Transformator ein. Beide Transformatoren sind über eine 20km lange 110-kV-Einfachleitung mit der Sammelschiene des 400kV/110kV-Umspannwerkes verbunden. Diese Sammelschiene wird zur Einspeisung eines Rundsteuersignals genutzt. Verknüpfungspunkt ist die Oberspannungsseite der Transformatoren.

Generatoren : $S_r = 70 \text{ MVA}$

$U_r = 10,5 \text{ kV}$

$x_d'' = 0,15$

$R/X = 0,1$

Transformatoren: $\ddot{u} = 110 \text{ kV} / 10,5 \text{ kV}$

$S_r = 70 \text{ MVA}$

$u_k = 8 \%$

$R/X = 0,1$

110-kV-Leitung: $\ell = 20 \text{ km}$

$X'_L = 0,4 \Omega/\text{km}$

$R'_L = 0,347 \Omega/\text{km}$

110-kV-Anlage: $S_{kV} = 2800 \text{ MVA}$ (110-kV-Sammelschiene)

TRA-Anlage: $f_s = 216,6 \text{ Hz}$

$u_s = 2\%$ (110-kV-Sammelschiene)

Beurteilung nach Stufe 1:

Berechnung:

$$S_A = 2 \cdot S_{rT} = 2 \cdot 70 \text{ MVA} = 140 \text{ MVA}$$

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{2800 \text{ MVA}}{140 \text{ MVA}} = 20 < 200 \rightarrow \text{detaillierte Beurteilung nach Stufe 2 erforderlich}$$

Beurteilung nach Stufe 2:

Berechnung:

Leitung:

$$\begin{aligned}
 X_{SL} &= \frac{f_s}{f_N} \cdot X'_L \cdot \ell & R_{SL} &= R'_L \cdot \ell \\
 &= \frac{216,6 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \cdot 0,4 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 20 \text{ km} & &= 0,347 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 20 \text{ km} \\
 &= 34,7 \Omega & &= 6,9 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{SL} &= \sqrt{R_{SL}^2 + X_{SL}^2} \\
 &= \sqrt{(6,9 \Omega)^2 + (34,7 \Omega)^2} \\
 &= 35,4 \Omega
 \end{aligned}$$

Generator:

$$\begin{aligned}
 X_{SG} &= \frac{f_s}{f_N} \cdot x_d'' \cdot \frac{U_{rTOS}^2}{S_r} & R_{SG} &= 0,1 \cdot X_{SG} \\
 &= \frac{216,6 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \cdot 0,15 \cdot \frac{(110 \text{ kV})^2}{70 \text{ MVA}} & &= 11,2 \Omega \\
 &= 112,3 \Omega
 \end{aligned}$$

Transformator:

$$\begin{aligned}
 X_{ST} &= \frac{f_s}{f_N} \cdot u_k \cdot \frac{U_{rTOS}^2}{S_r} & R_{ST} &= 0,1 \cdot X_{ST} \\
 &= \frac{216,6 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}} \cdot 0,08 \cdot \frac{(110 \text{ kV})^2}{70 \text{ MVA}} & &= 6,0 \Omega \\
 &= 59,9 \Omega
 \end{aligned}$$

Impedanz am Verknüpfungspunkt:

$$\begin{aligned}
 Z_{SV} &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(R_{ST} + R_{SG})^2 + (X_{ST} + X_{SG})^2} \\
 &= \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(17,2 \Omega)^2 + (172,2 \Omega)^2} \\
 &= 86,5 \Omega
 \end{aligned}$$

Beurteilung nach Stufe 2:

Tonfrequenzspannung am Verknüpfungspunkt:

$$\begin{aligned}
 u_{TRAV} &= u_{TRAS} \cdot \frac{Z_{SV}}{Z_{Sges}} \\
 &= 2 \% \cdot \frac{86,5 \Omega}{86,5 \Omega + 35,4 \Omega} = 1,42 \%
 \end{aligned}$$

Die Reduktion der Tonfrequenzspannung um 29% ist wesentlich größer als 5%. Deshalb sind Zusatzmaßnahmen (Tonfrequenzsperrern) notwendig.

Abschnitt E – Literaturverweise und Anhänge

1 Literatur

Alle Literaturverweise mit den Nummern [1] bis [50] beziehen sich auf das Grunddokument.

- [51] EN 50160: Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen:2010 + Cor. :2010.
- [52] IEC 61000-3-6 Ed.2: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems. (2008)
- [53] IEC 61000-3-7 Ed.2: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems. (2008)
- [54] IEC 61000-3-13 Ed.1: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-13: Limits - Assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems. (2008)
- [55] EN 61000-4-30 Ed.2: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-30: Prüf- und Messverfahren - Verfahren zur Messung der Spannungsqualität (IEC 61000-4-30:2008)
- [56] EN 61000-4-7 Ed.2: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 4-7: Prüf- und Messverfahren - Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten (IEC 61000-4-7:2002 + A1:2008)
- [57] VDEW Richtlinie: Netzleitsysteme in Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU)
- [58] VDN Leitfaden: EEG Erzeugungsanlagen am Hoch- und Höchstspannungsnetz. 2004