Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen

TOR Netzrückwirkungen:

Hochspannung

Version 1.0
gültig ab xx.xx.2025

Dokumenten-Historie

Version	Veröffentlichung	Inkrafttreten	verantwortlich	Anmerkungen
1.0	xx.xx.xxxx	xx.xx.xxxx	E-Control	

Die anzuwendenden technischen und organisatorischen Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (TOR) stehen auf der Website der E-Control (www.e-control.at) zur allgemeinen Verfügung. Verweise auf die TOR verstehen sich somit immer auf die jeweils aktuell geltende Version. Jede Anwendung, Verwendung und jedes Zitieren der TOR hat unter diesen Prämissen zu erfolgen. Die sich auf der Website der E-Control befindliche Version gilt als authentische Fassung der TOR.

Für den Inhalt verantwortlich:

Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control)
Rudolfsplatz 13a
1010 Wien
Tel: +43 1 24724-0
E-Mail: tor@e-control.at

ENTWURF

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 3
Einleitung 5
1 Begriffe und Abkürzungen 6
2 Anwendungsbereich 7
3 Bestimmungen, Vorschriften und Verweise 8
3.1 Bestimmungen und Vorschriften 8
3.2 Normative Verweise 8
4 Allgemeines 9
4.1 Beurteilung 10
4.2 Netzseitige Maßnahmen 10
5 Kurzschlussleistung 11
5.1 Bestimmung der Impedanzen 11
5.1.1 Impedanz des übergeordneten Netzes 11
5.1.2 Transformatorimpedanz 12
5.1.3 Leitungsimpedanz 13
5.2 Kurzschlussimpedanz am betrachteten Netzpunkt 14
6 Spannungsänderungen und Flicker 16
6.1 Spannungsänderung 16
6.1.1 Spannungsänderung durch symmetrische Laständerung 16
6.1.2 Spannungsänderung durch unsymmetrische Laständerung (einphasige Lasten) 17
6.1.3 Ermittlung der Laständerung bei Motoranlauf (Asynchronmaschine 17
6.1.4 Langsame Spannungsänderung 18
6.1.5 Schaltbedingte Spannungsänderung 18
6.2 Flicker 18
6.2.1 Überlagerung von Flickerstörquellen 19
6.2.2 Flickerkoeffizient für Stromerzeugungsanlagen 20
6.2.3 Umrechnung auf den Verknüpfungspunkt 20
6.2.4 Planungspegel 20
6.2.5 Emissionsgrenzwerte 21
6.3 Beurteilung 22
6.3.1 Vereinfachte Beurteilung 22
6.3.2 Detaillierte Beurteilung 22
7 Spannungsunsymmetrie 23
7.1 Berechnung von Unsymmetrien 23
7.2 Planungspegel 24

ENTWURF

7.3 Emissionsgrenzwerte 24
7.4 Beurteilung 24
7.5 Maßnahmen 25
8 Oberschwingungen 26
8.1 Planungspegel 26
8.2 Emissionsgrenzwerte 27
8.2.1 Proportionalitätsfaktor 27
8.3 Beurteilung 28
8.4 Maßnahmen 29
9 Zwischenharmonische 30
9.1 Planungspegel 30
9.2 Emissionsgrenzwerte 30
9.2.1 Resonanzfaktor 30
9.2.2 Proportionalitätsfaktor 30
9.3 Beurteilung 31
10 Supraharmonische 32
10.1 Planungspegel 32
10.2 Emissionsgrenzwerte 32
10.2.1 Proportionalitätsfaktor 32
10.3 Beurteilung 32

ENTWURF

Einleitung

Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen (“TOR”) werden gemäß § 22 Z 2 E-ControlG von E-Control in Zusammenarbeit mit den Betreibern von Stromnetzen erarbeitet, von E-Control veröffentlicht und als technisches Regelwerk im Netzanschlussvertrag im Rahmen von Allgemeinen Vertragsbedingungen für die Betreiber von Verteiler- oder Übertragungsnetzen zwischen Netzbetreiber und Netzbenutzer vereinbart.

Die in **[ ]** angeführten Verweise beziehen sich auf die Originalquellen und sind in den Quellenangaben der TOR Begriffe angeführt.

ENTWURF

1 Begriffe und Abkürzungen

Die in diesem Teil der TOR verwendeten Begriffsbestimmungen und -erklärungen sind in den TOR Begriffe gesammelt enthalten.

In diesem Teil der TOR werden folgende Abkürzungen verwendet:

EN	Europanorm
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
HS	Hochspannung
NAP	Netzanschlusspunkt
MS	Mittelspannung
NS	Niederspannung
PLC	Powerline Communication
THD	Total Harmonic Distortion
TOR	Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen
OVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
V	Verknüpfungspunkt
WEA	Windenergieanlage

ENTWURF

2 Anwendungsbereich

Dieser Teil der TOR strebt die einheitliche Vorgangsweise bei der Beurteilung von Netzrückwirkungen in Hochspannungsnetzen mithilfe von standardisierten Grenz- und Richtwerten an.

Im Sinne einer sachgerechten Aufteilung der resultierenden Verantwortung kommen hierfür die folgenden Aktionsfelder in Betracht:

- geeignete planerische und operative Maßnahmen in den Netzen, unter Abwägung der objektiven Qualitätsanforderungen und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit.
- eine Festlegung von Grenzwerten für Anforderungen an elektrische Geräte und Einrichtungen in den einschlägigen EMV-Normen sowie deren Einhaltung.
- nötigenfalls die Auflage zur Vornahme technischer Maßnahmen zur Minderung von Netzrückwirkungen.

Bei Häufung gleichartiger Geräte in einer Anlage eines Netzbenutzers, sowie beim Anschluss von Geräten und elektrotechnischen Anlagen, die den Bedingungen der angeführten Regeln nicht entsprechen, ist eine Anschlussbeurteilung durch den Netzbetreiber erforderlich.

Der Anschluss von einzelnen Geräten und Anlagen, welche die Bedingungen der TOR Netzrückwirkungsrelevante elektrische Betriebsmittel (D1) einhalten, ist im Hinblick auf die Netzrückwirkungen zulässig. Es sind jedoch auch weitere Bestimmungen, wie z.B. die TOR Stromerzeugungsanlagen und TOR Verteilernetzanschluss, zu beachten.

Die Wertebereiche für die einzelnen Merkmale der Spannung in Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetzen sind in der ÖVE/ÖNORM EN 50160 **[5]** festgelegt. Diese Norm gibt die wesentlichen Merkmale der Versorgungsspannung an der Übergabestelle zum Netzbenutzer in öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetzen unter normalen Betriebsbedingungen an. Die in dieser Norm enthaltenen Werte sind nicht als Pegel für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) oder als Grenzwerte für die Aussendung leitungsgeführter Störgrößen von Anlagen der Netzbenutzer in öffentlichen Netzen (Netzanschlussbeurteilung) vorgesehen.

Auf die bisherige Unterscheidung zwischen Verbrauchs- und Stromerzeugungsanlagen wird in diesem Teil der TOR verzichtet.

ENTWURF

3 Bestimmungen, Vorschriften und Verweise

3.1 Bestimmungen und Vorschriften

Für die Errichtung und den Betrieb einer Verbrauchs-, Stromerzeugungs- oder Speicheranlage sind insbesondere einzuhalten (jeweils in der gültigen Fassung):

- Elektrizitätswirtschafts- und -organisationsgesetz 2010 (ElWOG 2010) **[N4]**;
- Elektrotechnikgesetz 1992 (ETG 1992) **[N6]**;
- Elektrotechnikverordnung 2020 mit allen darin enthaltenen Normen (ETV 2020) **[N11]**;
- Elektromagnetische Verträglichkeitsverordnung 2015 (EMV-V 2015) **[N12]**;
- Niederspannungs-Richtlinie **[E2]**;
- Produkthaftungs-Richtlinie 1999 **[E3]**;
- EMV-Richtlinie 2014 **[E6]**;

3.2 Normative Verweise

Die folgenden Normen, geltend zum Zeitpunkt des Inkrafttretens dieser TOR, sind für die Anwendung dieses Teils der TOR zu beachten:

- ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-11 **[3]**;
- ÖVE/ÖNORM EN 50160 **[5]**;
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-15 **[8]**;
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-30 **[10]**;
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-7 **[12]**;

ENTWURF

4 Allgemeines

Durch den verstärkten Einsatz von Leistungselektronik und die damit verbundene Zunahme an Verbrauchern mit nichtlinearen Verhalten in allen Netzebenen entstehen in wachsendem Maße Rückwirkungen auf die elektrischen Netze, die sich in unerwünschten Änderungen

- der Spannungshöhe und
- der Kurvenform der Netzspannung

bemerkbar machen. Als Folge hiervon können andere an das Netz angeschlossene Betriebsmittel und elektrotechnische Anlagen störend beeinflusst werden. Zu unterscheiden sind:

- Funktionsausfälle
- Fehlfunktionen
- Mittelbare oder unmittelbare Schäden einschließlich eventueller Folgeschäden.

Die möglichen Störungen sind abhängig von der Amplitude, der Häufigkeit und der Dauer der Netzrückwirkungen sowie dem Verbreitungsgrad bestimmter elektrotechnischer Anlagen. Weiters ist der Gleichzeitigkeitsfaktor der elektrotechnischen Anlagen zu berücksichtigen, die im Betrieb Netzrückwirkungen verursachen.

Die Rückwirkungen auf das Netz selbst können sich z.B. in folgender Weise äußern:

- Verschlechterung des Leistungsfaktors (Erhöhung der Übertragungsverluste und Verminderung der Wirtschaftlichkeit)
- Ungenügende Erdschlusskompensation.

Zur EMV-Koordination im Verteilernetz werden spezifische Verträglichkeits- bzw. Planungspegel festgelegt. Diese Pegel sollen sicherstellen, dass der tatsächliche Störpegel mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit unter den definierten Grenzen liegt. Eine einzelne Anlage des Netzbenutzers darf demnach nur einen geringen Anteil dieser Verträglichkeits- bzw. Planungspegel beanspruchen. Eine vereinfachte Darstellung der Beziehung zwischen den jeweiligen Pegel ist in Abbildung 1 angeführt.

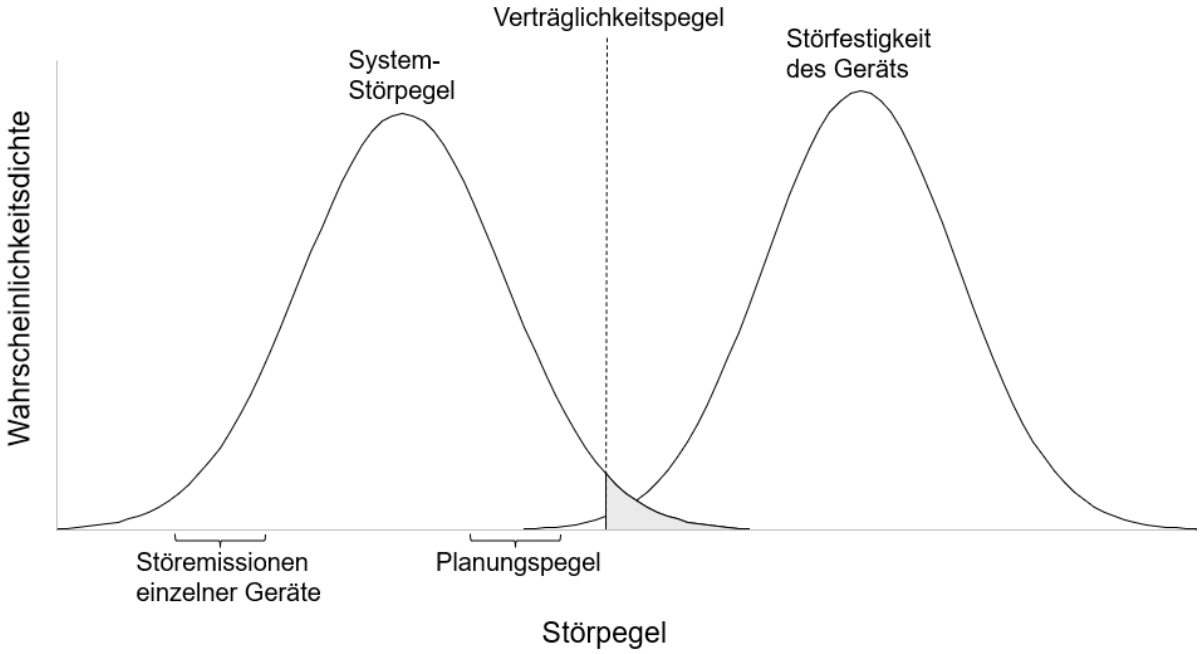

Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung der EMV-Pegel nach OVE EN 61000-2-2 [9]

4.1 Beurteilung

Die Beurteilung von Netzrückwirkungen erfolgt am Verknüpfungspunkt (V). Der Verknüpfungspunkt ist der einer Anlage des Netzbenutzers am nächsten gelegene Punkt in einem öffentlichen Netz, an dem weitere Netzbenutzer angeschlossen sind oder angeschlossen werden können[1].

Ist der Netzanschlusspunkt (NAP) der Anlage des Netzbenutzers in bestimmten Fällen nicht mit dem Verknüpfungspunkt ident, so sind die Emissionsgrenzwerte am Netzanschlusspunkt zu berechnen. Die Beurteilung erfolgt dennoch am Verknüpfungspunkt. Eine Umrechnung der Netzrückwirkungen vom Netzanschlusspunkt zum Verknüpfungspunkt erfolgt auf Basis der entsprechenden Kurzschlussleistungen gemäß:

$$x_{i\,V} = x_{i\,NAP} \cdot \frac{S_{k\,NAP}}{S_{k\,V}} \tag{1}$$

$x_{i\,V}$	Berechnungsgröße am Verknüpfungspunkt
$x_{i\,NAP}$	Berechnungsgröße am Netzanschlusspunkt
$S_{k\,NAP}$	Kurzschlussleistung am Netzanschlusspunkt
$S_{k\,V}$	Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt

4.2 Netzseitige Maßnahmen

Die netzseitigen Maßnahmen zur Vermeidung von unzulässigen Netzrückwirkungen entsprechen grundsätzlich der Erhöhung der Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt. Diese sind u.a. gegeben durch:

- Verstärkung der Zuleitung
- Eigene Zuleitung von einem Netzpunkt mit größerer Kurzschlussleistung
- Transformatortausch (größere Bemessungsleistung oder kleinere Kurzschlussspannung)
- Anschluss an höhere Spannungsebene

Die anlagenseitigen Maßnahmen sind in den jeweiligen Kapiteln angeführt.

ENTWURF

[1] Siehe TOR Begriffe.

5 Kurzschlussleistung

Die Kurzschlussleistung S_k bildet die Berechnungsgrundlage am Netzanschlusspunkt und Beurteilungsgrundlage am Verknüpfungspunkt. Bei der Ermittlung der Kurzschlussleistung ist von jenen normalen Betriebsbedingungen auszugehen, die die kleinste Kurzschlussleistung ergeben. Vorübergehende betriebsbedingte Sonderschaltzustände werden nicht berücksichtigt.

Innerhalb einer Anlage des Netzbenutzers können durch zusätzliche Impedanzen (z.B. Transformator, Leitungen) höhere Netzrückwirkungen auftreten.

Für die Kurzschlussleistung in Drehstromnetzen gilt für einen beliebigen Netzpunkt die Beziehung:

$$S_k = \frac{U^2}{Z_k} \tag{2}$$

S_k	Kurzschlussleistung
U	verkettete Spannung
Z_k	Kurzschlussimpedanz des Netzes

Die Kurzschlussimpedanz setzt sich aus den Impedanzen des übergeordneten Netzes, der Transformatoren und der Leitungen zusammen. Der Einfluss von angeschlossenen Geräten und Anlagen auf das Netz sowie Ableitwiderstände und Kapazitäten von Leitungen können üblicherweise vernachlässigt werden.

5.1 Bestimmung der Impedanzen

5.1.1 Impedanz des übergeordneten Netzes

Die Impedanz des übergeordneten Netzes $Z_{ÜN}$ wird aus der bekannten Kurzschlussleistung $S_{k\,ÜN}$ ermittelt:

$$Z_{ÜN} = \frac{U_{ÜN}^2}{S_{k\,ÜN}} \tag{3}$$

$Z_{ÜN}$	Impedanz des übergeordneten Netzes
$U_{ÜN}$	verkettete Spannung, mit der das übergeordnete *Netz* betrieben wird
$S_{k\,ÜN}$	Kurzschlussleistung des übergeordneten Netzes[2]

Handelt es sich bei dem übergeordneten Netz um ein Hoch- oder Höchstspannungsnetz, kann der ohmsche Anteil der Impedanz vernachlässigt werden, da der Impedanzwinkel bei Hoch- und Höchstspannungsnetzen im Bereich von 75° - 85° liegt.

$$R_{ÜN} \approx 0$$

$$X_{ÜN} \approx Z_{ÜN}$$

Anderenfalls gilt für die Impedanzkomponenten bzw. den Netzimpedanzwinkel:

$$R_{ÜN} = Z_{ÜN} \cdot \cos\psi_{ÜN} \tag{4}$$

$$X_{ÜN} = Z_{ÜN} \cdot \sin\psi_{ÜN} \tag{5}$$

[2] Die *Kurzschlussleistung* kann über den *Netzbetreiber* angefragt werden.

ENTWURF

$$\psi_{ÜN} = \arctan \frac{X_{ÜN}}{R_{ÜN}} \tag{6}$$

$R_{ÜN}$ Resistanz (Wirkwiderstand) des übergeordneten Netzes

$X_{ÜN}$ Reaktanz (Blindwiderstand) des übergeordneten Netzes

$Z_{ÜN}$ Impedanz (Scheinwiderstand) des übergeordneten Netzes

$\psi_{ÜN}$ Netzimpedanzwinkel des übergeordneten Netzes

5.1.2 Transformatorimpedanz

Aus den bekannten Transformatordaten lassen sich die Komponenten R_T und X_T bestimmen:

$$R_T = u_r \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \tag{7}$$

$$X_T = u_x \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} \tag{8}$$

R_T Resistanz des Transformators bezogen auf die Unterspannungsseite

X_T Reaktanz des Transformators bezogen auf die Unterspannungsseite

U_{rT} Bemessungsspannung der Unterspannungsseite des Transformators

S_{rT} Bemessungsscheinleistung des Transformators

u_r Wirkkomponente der Kurzschlussspannung u_k

u_x Blindkomponente der Kurzschlussspannung u_k

Für u_r und u_x gilt:

$$u_r = \frac{P_k}{S_{rT}} \tag{9}$$

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \tag{10}$$

P_k Kurzschlussverluste des Transformators

u_x Relative Kurzschlussspannung

Sind exakte Daten nicht verfügbar (z.B. im Planungsstadium), dann können die Werte aus Tabelle 1 entnommen werden:

S_{rT} [MVA]	Umspannung von/auf	u_k [%]	u_r [%]
0,05 - 0,63	MS/NS	4 - 6	0,05 – 1,5
0,63 - 2,5	MS/NS	4 - 6	< 1
2 - 10	MS/MS	6 - 8	< 1
2 - 10	HS/MS	8 - 17	< 1
12,5 - 50	HS/MS	8 - 17	< 0,6

Tabelle 1: Wertebereiche für u_k und u_r

ENTWURF

5.1.3 Leitungsimpedanz

Sind die Werte für Resistanz- und Reaktanzbelag vom Hersteller bekannt, berechnen sich die Werte $\mathrm{R_L}$ und $\mathrm{X_L}$ nach:

$$\mathrm{R_L} = \mathrm{R'_L} \cdot \ell \tag{11}$$

$$\mathrm{X_L} = \mathrm{X'_L} \cdot \ell \tag{12}$$

$\mathrm{R_L}$ Resistanz (Wirkwiderstand) der Leitung
$\mathrm{R'_L}$ Längenbezogene Resistanz der Leitung
$\mathrm{X_L}$ Reaktanz (Blindwiderstand) der Leitung
$\mathrm{X'_L}$ Längenbezogene Reaktanz der Leitung
ℓ Einfache Länge der Leitung

In der Fachliteratur werden die Beläge auch mit Kleinbuchstaben ($\mathrm{r_L}$ bzw. $\mathrm{x_L}$) bezeichnet. Mehrheitlich werden jedoch gestrichene Großbuchstaben ($\mathrm{R'_L}$ bzw. $\mathrm{X'_L}$) verwendet. In diesem Dokument wird deshalb letztere Bezeichnungsweise benutzt.
Falls keine exakten Herstellerangaben verfügbar sind, kann der Reaktanzbelag aus Tabelle 2 entnommen werden:

Leitungstyp	$\mathbf{X'_L}$
	$\mathbf{\Omega/km}$
Freileitungen	0,3 - 0,4
Kabel	0,08 - 0,12
Isolierte NS-Freileitungen	ca. 0,1

Tabelle 2: Wertebereich X'_L

Der Resistanzbelag berechnet sich aus den geometrischen Daten.

$$\mathrm{R'_L} = \frac{\rho}{\mathrm{A}} \tag{13}$$

$\mathrm{R'_L}$ Längenbezogene Resistanz der Leitung
ρ Spezifischer Leitungswiederstand bezogen auf 20°C
$\rho = 19\,\frac{\Omega\mathrm{mm}^2}{\mathrm{km}}$ für Kupfer
$\rho = 29\,\frac{\Omega\mathrm{mm}^2}{\mathrm{km}}$ für Aluminium
A Wirksamer Leitungsquerschnitt

Hinweis:
Alle vorgenannten Resistanzwerte gelten bei einer Temperatur von 20°C. Die Berechnung von R_L bei anderen Temperaturen erfolgt über Temperaturkoeffizienten:

$$\mathrm{R_{L\vartheta}} = \mathrm{R_L} \cdot [1 + \alpha_{20}\,(\vartheta - 20)] \tag{14}$$

$\mathrm{R_{L\vartheta}}$ Resistanz bei Leitertemperatur ϑ

ENTWURF

R_L Resistanz bei Leitertemperatur $\vartheta = 20°C$

α_{20} Spezifischer Leitungswiederstand bezogen auf $20°C$

$\alpha_{20} = 0{,}00392\ K^{-1}$ für Kupfer

$\alpha_{20} = 0{,}00403\ K^{-1}$ für Aluminium

ϑ Leitertemperatur

5.2 Kurzschlussimpedanz am betrachteten Netzpunkt

Zur Berechnung der resultierenden Kurzschlussimpedanz Z_k müssen alle vorher ermittelten Teilimpedanzkomponenten auf die Spannung des betrachteten Netzpunktes transformiert werden.

Die Transformation erfolgt durch Division der Teilimpedanzkomponenten durch das Quadrat des Übersetzungsverhältnisses aller Transformatoren, welche zwischen betrachteter Teilimpedanz und betrachtetem Netzpunkt angeordnet sind.
Allgemein gilt:

$$R_{m\,tr} = R_m \cdot \frac{1}{ü_{T1}^2} \cdot \frac{1}{ü_{T2}^2} \cdot \ldots \cdot \frac{1}{ü_{Tn}^2} \tag{15}$$

$$X_{m\,tr} = X_m \cdot \frac{1}{ü_{T1}^2} \cdot \frac{1}{ü_{T2}^2} \cdot \ldots \cdot \frac{1}{ü_{Tn}^2} \tag{16}$$

$$ü_{Ti} = \frac{U_{r\,Ti\,OS}}{U_{r\,Ti\,US}} \tag{17}$$

$R_{m\,tr}$ Transformierte Resistanz des Netzelementes m

R_m Resistanz des Netzelementes m

$X_{m\,tr}$ transformierte Reaktanz des Netzelementes m

X_m Reaktanz des Netzelementes m

$ü_{Ti}$ Übersetzungsverhältnis des Transformators i $(i = 1 \div n)$

$U_{r\,Ti\,OS}$ Bemessungsspannung der Oberspannungsseite (OS) des Transformators i

$U_{r\,Ti\,US}$ Bemessungsspannung der Oberspannungsseite (US) des Transformators i

m Netzelement:

- ÜN übergeordnetes Netz
- T Transformator
- L Leitung

Anmerkung:
Die Impedanz eines Transformators ist immer auf dessen Unterspannungsseite bezogen. Dementsprechend bleibt bei der Transformation der Impedanz eines Transformators dessen eigenes Übersetzungsverhältnis unberücksichtigt.

Für überschlägige Berechnungen oder bei kleinen Abweichungen der Spannungsübersetzungsverhältnisse der Transformatoren, von denen der Spannungsebenen kann die Transformation durch Division der Teilimpedanzkomponenten des Netzelementes m durch das Quadrat des Übersetzungsverhältnisses seiner Spannungsebene U_m zur Spannung U des betrachteten Netzpunktes erfolgen. Damit ergeben sich die transformierten Impedanzkomponenten eines Netzelements m vereinfacht zu:

ENTWURF

$$R_{m\,tr} = R_m \left(\frac{U}{U_m}\right)^2 \tag{18}$$

$$X_{m\,tr} = X_m \left(\frac{U}{U_m}\right)^2 \tag{19}$$

$R_{m\,tr}$	Transformierte Resistanz des Netzelementes m
R_m	Resistanz des Netzelementes m
$X_{m\,tr}$	Transformierte Reaktanz des Netzelementes m
X_m	Reaktanz des Netzelementes m
U	Verkettete Spannung am betrachteten Netzpunkt
U_m	Verkettete Spannung des Netzelements m
m	Netzelement:
	ÜN übergeordnetes Netz
	T Transformator
	L Leitung

Im Hoch- und Höchstspannungsnetz kann $R_{ÜN}$ vernachlässigt werden.

Die resultierende Kurzschlussimpedanz Z_k ist die Summe aller transformierten Teilimpedanzen m = 1 … M:

$$R_k = \sum_{m=1}^{M} R_m \tag{20}$$

$$X_k = \sum_{m=1}^{M} X_m \tag{21}$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \tag{22}$$

$$\psi_k = \arctan\frac{X_k}{R_k} \tag{23}$$

$$Z_k = R_k + jX_k = Z_k \cdot e^{j\psi_k} = Z_k \cdot \cos\psi_k + jZ_k \cdot \sin\psi_k \tag{24}$$

R_k	Resultierende Netzresistanz
X_k	Resultierende Netzreaktanz
Z_k	Resultierende Netzimpedanz
ψ_k	Resultierender Netzimpedanzwinkel

ENTWURF

6 Spannungsänderungen und Flicker

Jede Zustandsänderung (Laständerung, Schaltvorgang) bewirkt eine Stromänderung in der Netzeinspeisung und in der Folge eine Spannungsänderung ΔU. Spannungsänderungen können z.B. verursacht werden durch:

- Zuschalten von größeren Lasten, z.B. Motoren, Transformatoren, Kondensatoren
- Motoren in Lastwechselbetrieb (Gattersägen, Steinbrecher, Aufzüge)
- Schweißmaschinen
- Gesteuerte Lasten (Schwingungspaketsteuerung, Thermostatsteuerung usw.)
- Lichtbogenöfen
- Variable Einspeiser (z.B. Windenergieanlagen – WEA)
- Regelbare Transformatoren

Spannungsänderungen müssen begrenzt werden, damit nicht

- durch einzelne tiefe Spannungseinbrüche (z.B. Einschalten von Motoren) Geräte ausfallen oder
- durch wiederholte Spannungsänderungen (z.B. Sägegatter) störender Flicker auftritt.

6.1 Spannungsänderung

Unterschieden wird zwischen Spannungsänderung durch symmetrischer und unsymmetrischer Laständerung, sowie langsamer und schneller Spannungsänderung.

6.1.1 Spannungsänderung durch symmetrische Laständerung

Im Fall symmetrischer Laständerung erfahren alle Spannungen des Drehstromsystems dieselbe relative Spannungsänderung.

Betragsmäßige Spannungsänderung:

$$\begin{aligned}\Delta U_{AP} \approx \Delta U_{\text{Längs AP}} &= \Delta I \cdot (R_{k\,AP} \cdot \cos\varphi \pm X_{k\,AP} \cdot \sin\varphi) \\ &= \frac{\Delta P_A}{U_{AP}} \cdot R_{k\,AP} \pm \frac{\Delta Q_A}{U_{AP}} \cdot X_{k\,AP}\end{aligned} \tag{25}$$

Relative Spannungsänderung:

$$d_{AP} = \frac{\Delta U_{AP}}{U_{AP}} \approx \frac{\Delta P_A}{U_{AP}^2} \cdot R_{k\,AP} + \frac{\Delta Q_A}{U_{AP}^2} \cdot X_{k\,AP} = \frac{\Delta S_A}{S_{k\,AP}} \cdot \cos(\psi_{k\,AP} \pm \varphi) \tag{26}$$

$$\psi_{k\,AP} = \arctan\left(\frac{X_{k\,AP}}{R_{k\,AP}}\right) \tag{27}$$

d_{AP}	Relative Spannungsänderung
ΔU_{AP}	Spannungsänderung
U_{AP}	Verkettete Spannung
ΔS_A	Scheinleistungsänderung
$S_{k\,AP}$	Kurzschlussleistung
$\psi_{k\,AP}$	Netzimpedanzwinkel
φ	Winkel der Laständerung
ΔP_A	Wirkleistungsänderung
ΔQ_A	Blindleistungsänderung
$X_{k\,AP}$	Netzreaktanz
$R_{k\,AP}$	Netzresistanz

ENTWURF

Der Winkel der Laständerung φ ist die Differenz der Winkeländerung zwischen Strom und Spannung zum Zeitpunkt vor der Laständerung gegenüber dem Zeitpunkt nach der Laständerung (quasi-stationär).

Bei ohmsch-induktiver Laständerung bzw. übererregtem Generatorbetrieb ist φ positiv und bei ohmsch-kapazitiver Laständerung bzw. untererregtem Generatorbetrieb ist φ negativ einzusetzen.

Der Ausdruck „$\cos(\psi_{k\,AP} \pm \varphi)$" wird in den nachfolgenden Erläuterungen verkürzt als "$\cos$-Ausdruck" bezeichnet. Bei unbekanntem Winkel der Laständerung ist der "$\cos$-Ausdruck" gleich 1 zu setzen.

6.1.2 Spannungsänderung durch unsymmetrische Laständerung (einphasige Lasten)

Zu unterscheiden ist der Anschluss zwischen zwei Außenleitern und der Anschluss zwischen Außenleiter und Neutralleiter. Die größte relative Spannungsänderung d ist abhängig von der Art der Lastanschaltung:

Einphasige Last zwischen Außenleiter und Außenleiter:

$$d_{L1,L2\,NAP} = 2 \cdot \frac{\Delta S_A}{S_{k\,NAP}} \cdot \cos(\psi_{k\,NAP} \pm \varphi) \tag{28}$$

$d_{L1,L2\,NAP}$	Relative Spannungsänderung
ΔS_A	Scheinleistungsänderung
$S_{kN\,AP}$	Kurzschlussleistung
$\psi_{k\,NAP}$	Netzimpedanzwinkel
φ	Winkel der Laständerung

6.1.3 Ermittlung der Laständerung bei Motoranlauf (Asynchronmaschine)

$$\Delta S_A = \sqrt{3} \cdot I_a \cdot U_r = \sqrt{3} \cdot k_i \cdot I_r \cdot U_r \tag{29}$$

ΔS_A	Scheinleistungsänderung (Laständerung)
U_r	Nennspannung des Motors
I_a	Anlaufstrom
I_r	Nennstrom des Motors
k_i	Anlaufstromverhältnis (Schaltstromfaktor)

$\cos\varphi_a$ = 0,2 - 0,6 bzw. φ_a = 50° - 80°

Der Schaltstromfaktor nach jeweiliger Anlaufart ist in Tabelle 3 angeführt.

Anlaufart	$\mathbf{k_i}$
Motor Direktanlauf	5 - 9
Motor Stern-Dreieck	~3
Motor Verstärkter Stern-Dreieck Anlauf (Kranschaltung)	~4
Motor Sanftanlauf	3,5 - 4,5
Motor Frequenzumrichter	1,2 - 1,5
Generator Einschaltung bei 95% - 105% der Nenndrehzahl	3 - 5

Tabelle 3: Schaltstromfaktor

ENTWURF

Bei größeren relativen Spannungsänderungen ist unter Umständen zu berücksichtigen, dass die Größe der Laständerungen abgemindert wird. Bei Stern-Dreieck-Hochlauf ist auch die Laständerung ΔS_A bei der Umschaltung auf Dreieck zu berücksichtigen. Beim Anlauf mit Anlaufhilfen ist der tatsächliche, reduzierte Anlaufstrom einzusetzen.

Bei Zuschaltung einer Asynchronmaschine ohne Anlaufhilfe und stillstehendem Läufer entspricht der Anlaufstrom dem Anzugsstrom. Zur Verringerung der Scheinleistungsänderung ΔS_A sind allenfalls entsprechend der Maschinenleistung mögliche Anlaufhilfen vorzusehen.

6.1.4 Langsame Spannungsänderung

Das Spannungstoleranzband gemäß OVE EN 50160 **[5]** muss unter normalen Betriebsbedingungen in allen Punkten des Verteilernetzes, insbesondere an den Übergabestellen, eingehalten werden. Innerhalb des Spannungstoleranzbandes ist der Netzbetreiber grundsätzlich frei in der Bewirtschaftung der Anteile für Verbrauchs-, Stromerzeugungs- und Speicheranlagen.

Für die relative Spannungsänderung an jedem beliebigen Verknüpfungspunkt, verursacht durch die Gesamtheit aller Stromerzeugungs- und Speicheranlagen in einem betrachteten Verteilernetz, wird ein Grenzwert von **2%** empfohlen.

Darüber hinaus kann der Netzbetreiber davon abweichende, höhere Grenzwerte vorgeben, wenn die Art und Betriebsweise des Netzes dies erlauben (z.B. bei optimierter Spannungsregelung des HS/MS-Umspanners bzw. bei Einsatz spannungsbeeinflussender Betriebsmittel wie etwa regelbare Ortsnetztransformatoren oder Einzelstrangregler).

In Sonderfällen kann der Netzbetreiber geringere Werte vorgeben, wenn die Art und Betriebsweise des Netzes oder das im Netz, z.B. bereits durch andere Stromerzeugungs- und/oder Speicheranlagen verursachte, vorherrschende Spannungsniveau dies erfordern. Im Falle einer Grenzwertreduktion wird dem betroffenen Netzbenutzer ein ausführlicher Nachweis (z.B. Netzdaten, Lastflussberechnungen, Blindleistungsmanagement) durch den Netzbetreiber zur Verfügung gestellt.

Kann die geplante Erzeugungsleistung wegen der Spannungsanhebung nicht zur Gänze über den vorgesehenen oder vorhandenen Netzanschlusspunkt in das Netz eingespeist werden, bieten sich nach Maßgabe des Netzbetreibers folgende Maßnahmen an:

- Steuerung bzw. Regelung der Blindleistung (Blindleistungsmanagement)
- Steuerung bzw. Regelung der Wirkleistungseinspeisung
- Beschränkung der maximal möglichen Einspeiseleistung
- Anschluss an einen Verknüpfungspunkt mit höherer Kurzschlussleistung
- Optimierte Spannungsregelung am HS/MS-Umspanner
- Einbau eines Strangreglers oder regelbaren Ortsnetztransformators

6.1.5 Schaltbedingte Spannungsänderung

Beim Zu- oder Abschalten von Verbrauchs-, Stromerzeugungs- oder Speicheranlagen an das Hochspannungsnetz (z.B. Zuschalten von Generatoren, Polumschaltung von Asynchrongeneratoren) darf am betrachteten Verknüpfungspunkt der Betrag der relativen Spannungsänderung $\mathbf{d_{zul}}$ **= 2%** nicht überschreiten.

6.2 Flicker

Flicker ist ein subjektiver Eindruck der Unstetigkeit visueller Empfindungen, hervorgerufen durch einen Lichtreiz, mit zeitlicher Schwankung der Leuchtdichte oder der spektralen Verteilung.

Die Flickerstärke ist die Messgröße für den Flicker, welche die Intensität der Flickerstörwirkung festgelegt und beurteilt durch das UIE-IEC-Flickermessverfahren **[8]**, mit Hilfe der folgenden Größen beschreibt.

- **Kurzzeit-Flickerstärke P_{st}**, gemessen über ein Zeitfenster von zehn Minuten
- **Langzeit-Flickerstärke P_{lt}**, berechnet aus einer Folge von 12 P_{st} – Werten (n = 12)

Bei regelmäßig wiederkehrenden rechteckförmigen Spannungsänderungen kann mit Hilfe der Flickergrenzkurve ($P_{st\,ref}$ = 1) die Flickerstärke eines Einzelgerätes oder einer Anlage des Netzbenutzers wie folgt ermittelt werden:

$$P_{st\,i} = \frac{d_i}{d_{ref}} \cdot P_{st\,ref} \tag{30}$$

$$P_{lt\,i} = \sqrt[3]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{st\,i\,n}{}^{3}}{12}} \tag{31}$$

d_i	Relative Spannungsänderung
d_{ref}	Relative Spannungsänderung gemäß Flickergrenzkurve (P_{ref} = 1)
$P_{st\,i}$	Kurzzeitflickerstärke
$P_{st\,ref}$	Grenzwert der Flickerstärke
$P_{lt\,i}$	Langzeitflickerstärke
i	Laufindex für Einzelgeräte bzw. Anlagen des Netzbenutzers
n	Laufindex der 10-Minuten-Werte innerhalb des 2-Stunden-Intervalls

6.2.1 Überlagerung von Flickerstörquellen

Die Störemission eines Einzelgerätes oder einer Anlage des Netzbenutzers ist die Spannungsänderung d_i bzw. die Kurzzeit-Flickerstärke $P_{st\,i}$, die allein durch den Betrieb dieses Gerätes (d.h. durch seine Laständerung) am betrachteten Netzpunkt verursacht wird.

$$P_{st} = \sqrt[\alpha]{P_{st\,1}^{\alpha} + P_{st\,2}^{\alpha} + P_{st\,3}^{\alpha} + \;.\;.\;.\; P_{st\,m}^{\alpha}} = \sqrt[\alpha]{\sum_{i=1}^{M} P_{st\,i}^{\alpha}} \tag{32}$$

P_{st}	Flickerstärke
$P_{st\,i}$	Flickerstärke einer einzelnen Anlage i
α	Summationsexponent
M	Anzahl aller Anlagen

Beim Exponenten α wird unterschieden, ob der Flicker durch kontinuierliche Spannungschwankungen oder durch diskrete Laständerungen (z.B. Schaltvorgänge) hervorgerufen wird.

Für kontinuierliche Spannungsschwankungen wird α = 2 bei der Summation und α = 3 bei der Subtraktion (z.B. bei der Elimination des Hintergrundpegels) empfohlen.

Der Flickerpegel P_{stt} im Netz bzw. der resultierende Spannungsänderungsverlauf d(t) ist das Ergebnis der Summenwirkung aller Anlagen im Netz und ist dementsprechend stets höher als die entsprechenden Werte der Anlage eines einzelnen Netzbenutzers.

ENTWURF

6.2.2 Flickerkoeffizient für Stromerzeugungsanlagen

Mithilfe eines Flickerkoeffizienten und den Netzdaten kann die Flickeremission einer Stromerzeugungsanlage berechnet werden. Der Flickerkoeffizient ist z.B. bei Windenergieanlagen im Prüfbericht angegeben.

$$P_{lt} = c(\psi_{k\,AP}, v_a) \cdot \frac{S_{r\,E}}{S_{k\,NAP}} \tag{33}$$

$S_{r\,E}$	Bemessungsleistung der Stromerzeugungsanlage
$S_{k\,AP}$	Kurzschlussleistung
$c(\psi_{k\,AP}, v_a)$	Flickerkoeffizient
$\psi_{k\,AP}$	Netzimpedanzwinkel
v_a	Mittlere jährliche Windgeschwindigkeit

6.2.3 Umrechnung auf den Verknüpfungspunkt

In strahlenförmigen Netzen verringert sich die Flickerstärke vom Ort der verursachenden Anlage des Netzbenutzers (Netzanschlusspunkt) in Richtung Netzeinspeisung im Verhältnis der Kurzschlussleistung $S_{k\,NAP}$ am Netzanschlusspunkt zur Kurzschlussleistung $S_{k\,V\,i}$ am betrachteten Verknüpfungspunkt V_i. Zu unterlagerten Verknüpfungspunkten erfolgt keine Reduktion der Flickerstärke.

$$P_{st\,V\,i} = P_{st\,NAP} \cdot \frac{S_{k\,NAP}}{S_{k\,V\,i}} \tag{34}$$

$P_{st\,NAP}$	Flickerstärke am Netzanschlusspunkt
$P_{st\,V\,i}$	Flickerstärke am betrachteten Verknüpfungspunkt
$S_{k\,NAP}$	Kurzschlussleistung am Netzanschlusspunkt
$S_{k\,V\,i}$	Kurzschlussleistung am betrachteten Verknüpfungspunkt

6.2.4 Planungspegel

Die Richtwerte für die Planungspegel im Hochspannungsnetz sind:

$$L_{Pst\,HS} = 0{,}7$$

$$L_{Plt\,HS} = 0{,}46$$

Bei der Festlegung des Flickerpegels für die Hochspannung muss die Überlagerung mit anderen Anlagen der Netzbenutzer und dem Flickeranteil $L_{P\,HS}$ aus dem vorgelagerten Netz berücksichtigt werden.

$$L_{Pst\,HöS} = 0{,}45$$

$$L_{Plt\,HöS} = 0{,}3$$

Der aus dem HöS-Netz in das HS-Netz übertragenen maximal mögliche Flickerpegel beträgt:

$$P_{st\,HöS/HS} = T_{Pst\,HöS/HS} \cdot L_{Pst\,HöS} \tag{35}$$

Wobei für den Transferkoeffizienten üblicherweise $T_{Pst\,MS/NS}$ = 1 angenommen werden kann.
Der anteilige Beitrag für alle Analgen der Netzbenutzer beträgt damit:

ENTWURF

$$P_{st\,HS\,ges} = \sqrt[3]{L_{Pst\,HS}^3 - P_{st\,HöS/HS}^3} = \sqrt[3]{L_{Pst\,HS}^3 - \left(T_{Pst\,HöS/HS} \cdot L_{Pst\,HöS}\right)^3} \quad (36)$$

$P_{st\,HS\,ges}$	Zulässige Kurzzeitflickeremission von Lasten im HS-Netz
$P_{st\,HöS/HS}$	Übertragener Flickerpegel HöS/HS
$T_{Pst\,HöS/HS}$	Transferkoeffizient HöS/HS
$L_{Pst\,HöS}$	Planungspegel im HöS-Netz

Mithilfe der Planungspegel und der angeführten Gleichung erfolgt eine individuelle Störkoordination für Flicker über die Netzebenen durch den entsprechenden Netzbetreiber.

6.2.5 Emissionsgrenzwerte

Die zulässige Kurzzeit-Flickerstöraussendung $P_{st\,HS\,V}$ einer einzelnen Anlage eines Netzbenutzers lässt sich durch folgende Gleichungen bestimmen:

$$P_{st\,HS\,V} = P_{st\,HS\,ges} \cdot k_{A\,HS} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = P_{st\,HS\,ges} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{HS}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} \quad (37)$$

$$k_{A\,HS} = \frac{S_A}{S_{HS}} \quad (38)$$

$$S_{HS} = (k_B + k_E + k_S) \cdot S_{N\,HS} \quad (39)$$

$$S_{N\,HS} = \sum_{i=1}^{N} S_{r\,i} \quad (40)$$

Die zulässige Langzeit-Flickerstöraussendung $P_{lt\,HS\,V}$ berechnet sich mit:

$$P_{lt\,HS\,V} = 0{,}65 \cdot P_{st\,HS\,V} \quad (41)$$

$P_{st/lt\,HS\,V}$	Zulässige Kurzzeit/Langzeit-Flickerstöraussendung der Anlage des Netzbenutzers
$P_{st\,HS\,ges}$	Gesamte zulässige Kurzzeit-Flickerstöraussendungen von Lasten
S_A	Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers
S_{HS}	Anschlussleistung des HS-Netzes
$S_{N\,HS}$	Fiktive Netzleistung des HS-Netzes
$S_{r\,i}$	Bemessungsleistung des HöS/HS-Einspeisetransformators i
N	Anzahl an Einspeisetransformatoren in das betrachtete HS-Netz
$k_{A\,HS}$	Anschlussfaktor
g	Gleichzeitigkeitsfaktor
k_B	Bezugsfaktor
k_E	Erzeugerfaktor
k_S	Speicherfaktor

Der Gleichzeitigkeitsfaktor g, und die mögliche Anschlussleistung des Hochspannungsnetzes S_{HS} werden vom Netzbetreiber bekanntgegeben.

ENTWURF

Liegen keine Erkenntnisse vor wird $g = (k_B + k_E + k_S) = 1$ angenommen.

Bei kleinen Anschlussleistungen bzw. bei hohen Störaussendungen werden jeder Anlage eines Netzbenutzers folgende Grenzwerte empfohlen:

$$P_{st\ HS\ V\ min} = 0{,}35$$
$$P_{lt\ HS\ V\ min} = 0{,}25$$
$$P_{st\ HS\ V\ max} = 0{,}50$$
$$P_{lt\ HS\ V\ max} = 0{,}35$$

6.3 Beurteilung

Die Beurteilung erfolgt im Hochspannungsnetz anhand der verketteten Spannung.

6.3.1 Vereinfachte Beurteilung

Richtwerte wie im NS-Netz werden nicht angegeben. Es ist daher für den Anschluss einer Anlage des Netzbenutzers im HS-Netz eine detaillierte Beurteilung durchzuführen.

6.3.2 Detaillierte Beurteilung

Erfassung der Daten des Verteilernetzes und der Anlage des Netzbenutzers (Datenblatt):

- Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt $S_{k\,V}$
- Leistungsänderung der Anlage des Netzbenutzers ΔS_A

Berechnung des Leistungsverhältnisses $\frac{S_{k\,V}}{\Delta S_A}$:

- $\frac{S_{k\,V}}{\Delta S_A} \geq k \cdot 1000$: Anschluss zulässig
- $\frac{S_{k\,V}}{\Delta S_A} < k \cdot 1000$: Vorgabe von Emissionsgrenzwerten

Der Faktor k unterscheidet sich je nach Anschlussart und kann aus Tabelle 4 entnommen werden.

Anschlussart	**k**
Dreiphasig	1
Zweiphasig (ohne Neutralleiter)	$\sqrt{3}$

Tabelle 4: Faktor k – Anschlussart

Ist die zu erwartende, ungünstigste Wiederholrate von der Anlage des Netzbenutzers bekannt, kann das Leistungsverhältnis entsprechend Tabelle 5 herangezogen werden.

Wiederholrate r /min^{-1}	**Leistungsverhältnis $S_{k\,V}$/ ΔS_A**
>500	$k \cdot 1000$
10≤ r ≤500	$k \cdot 135 \cdot \sqrt[3]{r/\mathrm{min}^{-1}}$
<10	$k \cdot 300$

Tabelle 5: Leistungsverhältnis bei verschiedenen Wiederholraten

ENTWURF

7 Spannungsunsymmetrie

Unsymmetrien entstehen durch ungleichmäßige Belastung der drei Außenleiter des Drehstromsystems. Typische Beispiele sind ein- und zweiphasige Lasten, bei denen der Anschluss zwischen Außenleiter und Neutralleiter bzw. zwischen zwei Außenleitern erfolgt.

In MS- und HS-Netzen werden manche Industrieanlagen als Zweiphasenlasten zwischen zwei Außenleitern angeschlossen – z.B.:

- Netzfrequenz-Induktionsöfen
- Widerstandsschmelzöfen
- Konduktive Erwärmungsanlagen
- Widerstandsöfen für die Elektrodenherstellung
- Lichtbogenerwärmungsanlagen
- Widerstandsschweißmaschinen
- Lichtbogen-Stahlschmelzöfen

Unsymmetrien können folgendes bewirken:

- Erhöhung der Strombelastung und der Verluste in Leitungen und Transformatoren:
  Bei gleicher Verbraucherleistung können die Leiterströme den zwei- bis dreifachen Wert, die Verluste in den Zuleitungen den zwei- bis sechsfachen Wert erreichen. Dementsprechend können Leitungen und Transformatoren nur zur Hälfte bzw. zu einem Drittel ihrer Nennleitung belastet werden.
- Verluste in elektrischen Maschinen:
  Unsymmetrische Spannungen führen in elektrischen Maschinen zu unsymmetrischen Strömen und verursachen eine erhöhte thermische Belastung.
- Rüttelmomente in elektrischen Maschinen:
  Das vom Gegensystem der unsymmetrischen Ströme aufgebaute Feld läuft gegen die Drehrichtung des Läufers und verursacht erhöhte mechanischen Beanspruchungen.
- Nichtcharakteristische harmonische Ströme bei netzgeführten Umrichtern:
  Unsymmetrische Spannungen führen bei netzgeführten Umrichtern zu einer unsymmetrischen Stromaufnahme, welche zusätzliche, nichtcharakteristische harmonische Ströme verursachen.

Der Anschluss der Betriebsmittel an die drei Außenleiter ist derart aufzuteilen, dass eine möglichst symmetrische Belastung des Verteilernetzes erfolgt.

7.1 Berechnung von Unsymmetrien

In Drehstromsystemen lässt sich die Unsymmetrie mithilfe der Methode der symmetrischen Komponenten beschreiben. Es wird folgend ausschließlich die Gegensystemunsymmetrie der Grundschwingung betrachtet:

$$k_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \tag{42}$$

k_{U2}	Unsymmetriegrad der Spannung
U_2	Gegensystemkomponente der Spannung (Grundschwingung)
U_1	Mitsystemkomponente der Spannung (Grundschwingung)

ENTWURF

7.2 Planungspegel

Als Richtwert für den Planungspegel wird L_{U2} = 1,4%[3] angeführt.

7.3 Emissionsgrenzwerte

Der Emissionsgrenzwert[4] einer Anlage des Netzbenutzers am Verknüpfungspunkt wird wie folgt berechnet:

$$I_{2\,V} = \frac{s}{1000} \cdot \frac{S_{k\,V}}{\sqrt{(k_B + k_E + k_S) \cdot S_{N\,HS} \cdot S_A}} \cdot I_A \tag{43}$$

$I_{2\,V}$	Zulässiger Gegensystemstrom der Anlage des Netzbenutzers
I_A	Bemessungsstrom der Anlage des Netzbenutzers
S_{kV}	Kurzschlussleistung
$S_{N\,HS}$	Fiktive Netzleistung des HS-Netzes
S_A	Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers
k_B	Bezugsfaktor
k_E	Erzeugerfaktor
k_S	Speicherfaktor

Richtwerte für den Proportionalitätsfaktor s sind in Tabelle 6 angeführt.

Vermaschung und Verdrillung der Leitungen	Hoch	Mittel	Niedrig
Proportionalitätsfaktor s	9,2	8,5	7,5

Tabelle 6: Proportionalitätsfaktor s

Bei einem HS-Netz mit kurzer Gesamtlänge bzw. geringer Vermaschung wird s = 9,2 empfohlen.

7.4 Beurteilung

Eine vereinfachte oder detaillierte Beurteilung ist für Anlagen von Netzbenutzern zum Anschluss an das HS-Netz nicht vorgesehen.

Sind die Emissionsgrenzwerte in Gleichung unverhältnismäßig klein, wird der zulässige Gegensystemstrom bzw. die entsprechende unsymmetrische Leistung folgend ermittelt:

$$I_{2\,V} = \frac{1}{500} \cdot \frac{S_{k\,V}}{\sqrt{3} \cdot U_V} \tag{44}$$

$I_{2\,V}$	Zulässiger Gegensystemstrom der Anlage des Netzbenutzers
$S_{k\,V}$	Kurzschlussleistung
U_V	Verkettete Spannung

$$S_{A\,un} = \frac{1}{500} \cdot S_{k\,V} \tag{45}$$

$S_{A\,un}$	Unsymmetrischer Anteil der Anschlussleistung
$S_{k\,V}$	Kurzschlussleistung

[3] Gemäß IEC 61000-3-13.
[4] Basierend auf dem allgemeinen Ansatz nach IEC 61000-3-14.

ENTWURF

Dadurch wird jeder Anlage eines Netzbenutzers unabhängig von der Anlagengröße ein Beitrag von k_{U2} = 0,2% zugestanden.

7.5 Maßnahmen

Netzseitige Maßnahmen zur Erhöhung der Kurzschlussleistung sind in Kapitel 4 angeführt.

ENTWURF

8 Oberschwingungen

Eine gleichbleibende, periodische Abweichung der Netzspannung von der Sinusform (Spannungsverzerrung) bedeutet, dass der Grundschwingung zusätzliche Schwingungen, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz beträgt, überlagert sind. Solche Oberschwingungen (Harmonische) in der Netzspannung entstehen durch Betriebsmittel (Geräte und Anlagen) mit nichtsinusförmiger Stromaufnahme.

Wesentliche Verursacher von Oberschwingungen sind:

- Betriebsmittel (Geräte und Anlagen) der Leistungselektronik, z.B. Stromrichterantriebe, Gleichrichteranlagen, Dimmer
- Massengeräte mit Gleichstromversorgung wie Fernsehgeräte, Kompaktleuchtstofflampen mit eingebautem elektronischen Vorschaltgerät, IT-Geräte
- Betriebsmittel (Geräte und Anlagen) mit nichtlinearer Strom-Spannungs-Kennlinie, wie Induktions- und Lichtbogenöfen, Gasentladungslampen, Motoren, Kleintransformatoren und Drosseln mit Eisenkern

Hohe Oberschwingungsanteile in der Netzspannung können zu Beeinträchtigungen sowohl des Netzbetriebes als auch von elektrischen Betriebsmitteln bei Netzbenutzern führen, wie z.B.:

- Verkürzung der Lebensdauer von Kondensatoren und Motoren infolge thermischer Zusatzlast
- Akustische Störungen bei Betriebsmitteln mit elektromagnetischen Kreisen (Drosseln, Transformatoren und Motoren)
- Einkopplung von Oberschwingungen in nachrichten- und informationstechnischen Einrichtungen
- Funktionsstörungen bei elektronischen Geräten
- Fehlfunktion von Rundsteuerempfängern und Schutzeinrichtungen
- Erschwerung der Erdschlusskompensation in Netzen mit Resonanzsternpunkterdung

8.1 Planungspegel

Die Planungspegel für Oberschwingungsspannungen in öffentlichen Hochspannungsnetzen sind in IEC 61000-3-6 festgelegt:

Ungeradzahlige Oberschwingungen				Geradzahlige Oberschwingungen	
Keine Vielfache von 3		Vielfache von 3			
ν	Oberschwingungsspannung in %	ν	Oberschwingungsspannung in %	ν	Oberschwingungsspannung in %
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,4	6	0,5
13	3,0	21	0,3	8	0,5
$17 \leq \nu \leq 37$	$2{,}27 \cdot \frac{17}{\nu} - 0{,}27$	$27 \leq \nu \leq 39$	0,2	$10 \leq \nu \leq 40$	$0{,}25 \cdot \frac{10}{\nu} + 0{,}25$

Tabelle 7: Planungspegel für Oberschwingungen nach IEC 61000-3-6

ENTWURF

Der Verträglichkeitspegel für den Gesamtoberschwingungsgehalt ist gemäß OVE EN 50160 **[5]** „in Beratung“.

8.2 Emissionsgrenzwerte

Damit die Planungspegel für die Oberschwingungsspannungen eingehalten werden, ist es notwendig, die Oberschwingungsströme I_ν aus den einzelnen Anlagen des Netzbenutzers zu begrenzen. Die Emissionsgrenzwerte kommen bei Anschlussbeurteilungen durch den Netzbetreiber und bei der messtechnischen Überprüfung von Anlagen der Netzbenutzer zur Anwendung.

$$I_{\nu\,zul} = \frac{1}{k_\nu} \cdot \frac{p_\nu}{1000} \cdot \frac{S_{k\,V}}{\sqrt{(k_B + k_E + k_S) \cdot S_{N\,HS} \cdot S_A}} \cdot I_A \qquad (46)$$

$I_{\nu\,zul}$	Zulässiger Oberschwingungsstrom der Anlage des Netzbenutzers
I_A	Nennstrom der Anlage des Netzbenutzers
$S_{k\,V}$	Kurzschlusslistung
$S_{N\,HS}$	Fiktive Netzleistung des HS-Netzes
S_A	Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers
p_ν	Proportionalitätsfaktor für Harmonische der Ordnung ν
k_ν	Resonanzfaktor
k_B	Bezugsfaktor
k_E	Erzeugerfaktor
k_S	Speicherfaktor

8.2.1 Proportionalitätsfaktor

Die Werte für den Proportionalitätsfaktor p_ν sind der Tabelle 8 zu entnehmen:

ν	p_ν	ν	p_ν	ν	p_ν
2	6,1	15	1,3	28	0,9
3	11,0	16	1,8	29	2,0
4	4,8	17	4,8	30	0,9
5	20,9	18	1,5	31	1,8
6	2,6	19	3,8	32	0,8
7	12,5	20	1,4	33	0,4
8	2,4	21	0,8	34	0,8
9	3,5	22	1,2	35	1,5
10	3,5	23	3,2	36	0,7
11	8,8	24	1,1	37	1,4
12	2,7	25	2,7	38	0,7
13	6,4	26	1,0	39	0,4
14	2,2	27	0,5	40	0,7

Tabelle 8: Proportionalitätsfaktor p_ν:

ENTWURF

8.3 Beurteilung

Die Beurteilung erfolgt anhand dem Oberschwingungslastanteil der Anlage des Netzbenutzers S_{OS} / S_A.

$$\frac{S_{OS}}{S_A} \leq \frac{1}{\sqrt{500}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \tag{47}$$

S_A Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers

S_{OS} Oberschwingungserzeugende Anteil der Anschlussleistung

S_{kV} Kurzschlussleistung

Die Leistungen aller Geräte sind unter Berücksichtigung der zu erwartende Gleichzeitigkeit je Gruppe zusammenzufassen. Bei der Summenbildung werden die Bemessungsleistungen verwendet. Die wirksame Oberschwingungsast erhält man schließlich aus:

$$S_{OS} = 0{,}5 \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} \tag{48}$$

S_{OS} Oberschwingungserzeugende Anteil der Anschlussleistung

S_{Gr} Gesamte Leistung aller Geräte, welche der jeweiligen Gruppe zugeordnet sind

Gruppe 1

Gruppe 2

Gruppe 3

Übersteigt S_{OS} den Betrag von S_A, so ist $S_{OS} = S_A$. Die Bemessungsleistungen von oberschwingungserzeugenden Stromerzeugungsanlagen und/oder Speichereinheiten sind ohne Vorzeichen zu berücksichtigen.

Welche Gruppe ein Oberschwingungserzeuger zuzuordnen ist, hängt vom Gesamtoberschwingungsgehalt seines Stromes THDi ab:

Gruppe 1	THDi ≤ 25%
Gruppe 2	25% < THDi ≤ 50%
Gruppe 3	THDi > 50%

Tabelle 9: Einteilung der Oberschwingungserzeuger

Berechnung des oberschwingungserzeugenden Anteils der Anschlussleistung S_{OS}, sowie Berechnung des Leistungsverhältnisses $\frac{S_{OS}}{S_A}$.

- $\frac{S_{OS}}{S_A} \leq \frac{1}{\sqrt{500}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}}$: Anschluss zulässig
- $\frac{S_{OS}}{S_A} > \frac{1}{\sqrt{500}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}}$: Vorgabe von Emissionsgrenzwerten

Die Bewertung der Anlage des Netzbenutzers hinsichtlich Oberschwingungen kann mithilfe der Abbildung 2 erfolgen.

ENTWURF

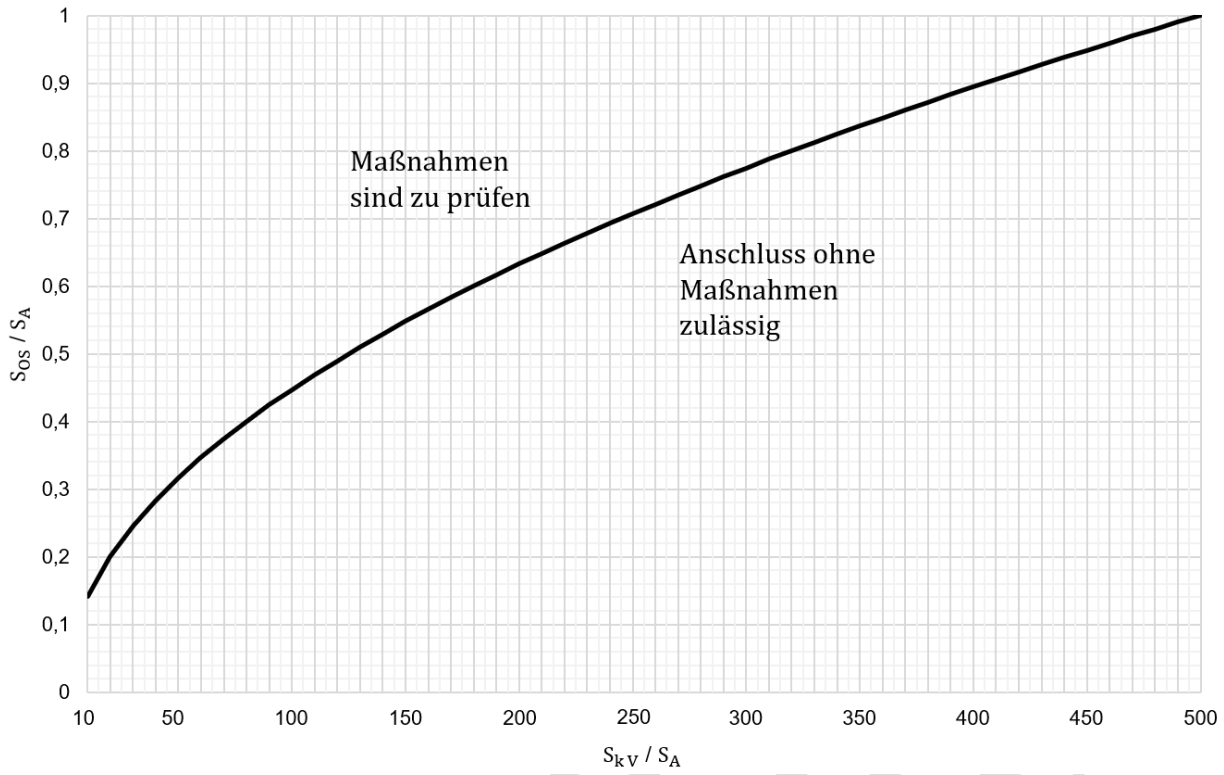

Abbildung 2: Diagramm zur Bewertung des Oberschwingungslastanteils

8.4 Maßnahmen

Anlagenseitige Maßnahmen sind u.a.:

- Einsatz von Betriebsmitteln mit geringerem THDi
- Einsatz von passiven Filtern (Saugkreisanlagen)
- Einsatz von aktiven Filtern

Anlagen der Netzbenutzer mit einem hohen induktiven Blindleistungsbedarf benötigen in der Regel Kompensationseinrichtungen. Diese bestehen im einfachsten Fall aus Kondensatoren, die entweder für die Anlage des Netzbenutzers insgesamt wirken (Zentralkompensation) oder zusammen mit bestimmten Betriebsmitteln (Geräten und Anlagen) zu- und abgeschaltet werden (Einzelkompensation). Resonanzerscheinungen können vermieden werden, wenn den Kondensatoren passende Drosseln vorgeschaltet werden (Verdrosselung), siehe dazu TOR Tonfrequenz-Rundsteuerung (D3).

9 Zwischenharmonische

Eine zwischenharmonische Spannung ist eine sinusförmige Spannung, deren Frequenz zwischen denen der Oberschwingungen liegt, d.h. ihre Frequenz ist kein ganzzahliges Vielfaches der Grundschwingungsfrequenz **[5]**. Diese Spannungen werden in der Regel durch folgende Betriebsmittel verursacht:

- Asynchronmaschinen
- Untersynchrone Kaskadenantriebe
- Frequenzumrichterantriebe
- Betriebsmittel mit Schwingungspaketsteuerungen
- Widerstandsschweißmaschinen
- Lichtbogenöfen
- Fremde Tonfrequenzrundsteuerungen

Die Einprägung von Strömen beliebiger Frequenz hat einen dem Frequenzgang der Netzimpedanz entsprechenden Spannungsabfall zur Folge.

Durch Modulation von Strömen beliebiger Frequenz mit der Netzfrequenz an anderen Betriebsmitteln mit nichtlinearer Strom-Spannungs-Charakteristik entstehen weitere zwischenharmonische Spannungen in Form von Spiegelfrequenzen im Abstand von $n \cdot 50$ Hz, von welchen jene im Abstand von ± 100 Hz von Belang sein können.

Zwischenharmonische Spannungen können vornehmlich Flicker verursachen oder die Funktion von Rundsteueranlagen beeinträchtigen.

9.1 Planungspegel

Richtwerte für Planungspegel sind aktuell in Erarbeitungen und werden in dieser Version nicht angegeben.

9.2 Emissionsgrenzwerte

Die Grenzwerte der zulässigen zwischenharmonischen Ströme sind durch folgende Gleichung gegeben:

$$I_{\mu\,zul} = \frac{1}{k_\mu} \cdot \frac{g_\mu}{100} \cdot \frac{S_{k\,V}}{S_A} \cdot I_A \tag{49}$$

$I_{\mu\,zul}$	Zulässiger zwischenharmonischer Strom
I_A	Nennstrom der Anlage des Netzbenutzer
$S_{k\,V}$	Kurzschlussleistung
S_A	Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers
k_μ	Resonanzfaktor für Zwischenharmonische der Ordnung μ
g_μ	Proportionalitätsfaktor für Zwischenharmonische der Ordnung μ

9.2.1 Resonanzfaktor

Der Resonanzfaktor k_μ ist mit dem Netzbetreiber abzustimmen. Liegen keine Kenntnisse vor, wird k_μ = 1 empfohlen.

9.2.2 Proportionalitätsfaktor

Die Werte für den Proportionalitätsfaktor g_μ sind aus der Tabelle 10 zu entnehmen:

ENTWURF

μ	g_μ
1 - 30	0,2/(μ+0,5)
31 - 39	0,3/(μ+0,5)
3 - 39[5]	0,1/(μ+0,5)

Tabelle 10: Proportionalitätsfaktor g_μ

Es ist das Verhältnis $\frac{I_\mu}{I_A} \leq 2\%$ einzuhalten.

9.3 Beurteilung

Eine Beurteilung auf Basis von Leistungsverhältnissen ist in dieser Version nicht angegeben.

ENTWURF

[5] Für Zwischenharmonische bei oder nahe Rundsteuerfrequenz.

10 Supraharmonische

Als Supraharmonische werden Oberschwingungen oberhalb der 40. Ordnung bezeichnet. In diesem Dokument werden Supraharmonische im Bereich von 2 - 9 kHz behandelt.

10.1 Planungspegel

Richtwerte für Planungspegel sind aktuell in Erarbeitungen und werden in dieser Version nicht angegeben.

10.2 Emissionsgrenzwerte

Die Emissionsgrenzwerte der zulässigen Ströme werden wie folgt berechnet:

$$I_{b\,zul} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{g_b}{100} \cdot \frac{S_{k\,V}}{S_A} \cdot I_A \tag{50}$$

$I_{b\,zul}$	Zulässiger supraharmonischer Strom
I_A	Nennstrom der Anlage des Netzbenutzer
$S_{k\,V}$	Kurzschlussleistung
S_A	Anschlussleistung der Anlage des Netzbenutzers
k_b	Resonanzfaktor für Supraharmonische mit der Mittenfrequenz b
g_b	Proportionalitätsfaktor für Supraharmonische mit der Mittenfrequenz b

10.2.1 Proportionalitätsfaktor

Der Proportionalitätsfaktor g_b wird folgend berechnet:

$$g_b = 1{,}015 \cdot b^{-0{,}52} \cdot \left(\frac{0{,}05\,\mathrm{kHz}}{b}\right) \tag{51}$$

b	Mittenfrequenz des Frequenzbandes b

10.3 Beurteilung

Eine Beurteilung auf Basis von Leistungsverhältnissen ist in dieser Version nicht angegeben.

ENTWURF