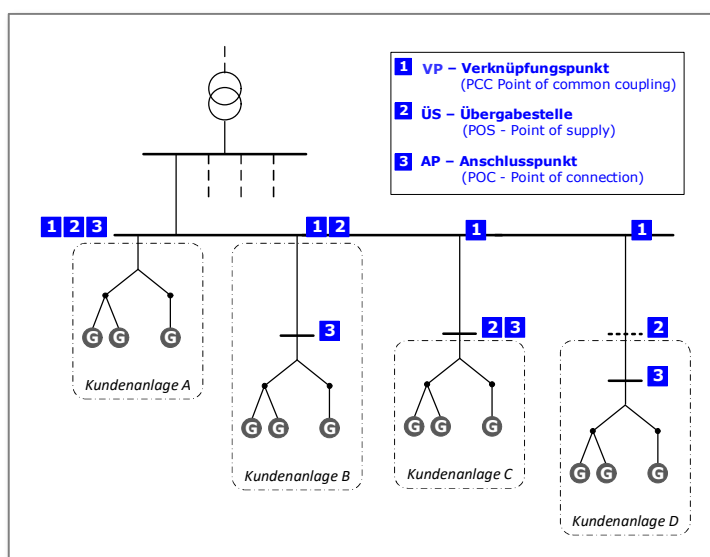


Technische Regeln für die Beurteilung von Netzurückwirkungen

Teil C: Beispiele



Dieses Dokument wurde erarbeitet unter der Verantwortung des internationalen Arbeitskreises EMC & Power Quality (D-A-CH-CZ).

Impressum und Kontakt

Herausgeber:

Österreichs E-Wirtschaft

Brahmsplatz 3
A-1040 Wien
akademie@oesterreichsenergie.at

VSE Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Hintere Bahnhofstrasse 10
CH-5000 Aarau
www.strom.ch

CSRES – Ceske sdruzeni regulovanych elektroenergetickych spolecnosti

Na hroude 19/2149
10000 Praha 10 – Strasnice
www.csres.cz

Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (VDE FNN)

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.

Bismarckstr. 33
10625 Berlin

Copyright:

© VSE, OE, VDE FNN, CSRES

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Jegliche inhaltliche Veränderung ist untersagt. Die Autoren übernehmen keine Haftung für Fehler und behalten sich das Recht vor, dieses Dokument ohne weitere Ankündigungen jederzeit zu ändern.

Inhalt

Vorwort.....	4
1. Anwendung der Technischen Regeln NS	5
1.1 Übersicht.....	5
1.2 Beurteilung eines Drehstrommotors	7
1.3 Beurteilung einer Direktheizung.....	10
1.4 Beurteilung einer Werkstätte mit Drehautomaten	15
1.5 Beurteilung eines Bürohauses.....	23
1.6 Beurteilung eines Skilifts	29
1.7 Beurteilung einer AC-Ladeinfrastruktur.....	37
1.8 Beurteilung einer DC-Ladestation.....	40
1.9 Beurteilung eines Liftes	43
1.10 Beurteilung einer Ladestation für das Zwischenladen von Elektrobussen.....	45
1.11 Beurteilung einer Eigenverbrauchsgemeinschaft (EVG).....	48
2. Anwendung der Technischen Regeln MS.....	55
2.1 Übersicht.....	55
2.2 Beurteilung einer Punktschweißmaschine	56
2.3 Beurteilung einer Seilbahn.....	60
2.4 Beurteilung einer PV-Anlage	65
2.5 Beurteilung eines Aluminiumwerks.....	70
3. Anwendung der Technischen Regeln HS	77
3.1 Übersicht.....	77
3.2 Beurteilung eines Verdichters.....	78

Vorwort

Das Dokument Teil C: Beispiele hat die Arbeitsgruppe mit wesentlicher Unterstützung durch Alain Gilles Zwicker, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Berner Fachhochschule, erstellt. Jene Beispiele aus der Version 2 (2007), welche aus Sicht der Arbeitsgruppe heute noch aktuell sind, wurden komplett überarbeitet und um neue anwendungsorientierte Beispiele ergänzt. Zudem wurden in den Berechnungen die Verweise auf die entsprechenden Formeln in den Teilen Grundlagen sowie Anforderungen und Beurteilung angegeben. Stellvertretend für den in Teil A und Teil B verwendeten Begriff Anlage des Netzbenutzers wird in den Beispielen zur Vereinfachung der Begriff Kundenanlage verwendet.

In den Kapiteln 1 bis 3 sind Anwendungsbeispiele für Kundenanlagen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz, Mittelspannungsnetz und Hochspannungsnetz zu finden. Der Anhang enthält ergänzende Beispiele, welche ausgewählte theoretischen Zusammenhänge verständlicher darstellen, die Anwendung unter Berücksichtigung mehrerer Kundenanlagen in einem Netz illustrieren sowie zusätzliche Tabellen mit Grenzwerten aus verschiedenen Beispielen der Kapitel 1 bis 3. Diese wurden in den Anhang verschoben, um die Lesbarkeit der Kapitel zu verbessern.

Generell werden zwei Ziele mit diesem Teil verfolgt. Erstens sollen die theoretischen Zusammenhänge näher erläutert werden, womit ein unmittelbarer Bezug zum Teil A: Grundlagen hergestellt wird. Zweitens sollen realistische Beispiele aus der Beurteilungspraxis die Herangehensweise illustrieren und die Anwendung der Regeln erleichtern. Damit wird der Bezug zum Teil B: Anforderungen und Beurteilung hergestellt.

Um die Lesbarkeit zu erleichtern, wird für jedes Beispiel eine möglichst einheitliche Struktur verwendet. Zuerst erfolgt eine kurze Beschreibung der Kundenanlage und Anschlusskonfiguration. Falls die Kurzschlussleistung nicht direkt gegeben ist, wird diese anhand der Netzdaten berechnet. Danach wird für jede betrachtete Netzzrückwirkung zuerst (falls zutreffend) die zweistufige Beurteilung durchgeführt. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Emissionsgrenzwerte. Abschließend erfolgt eine rechnerische Bewertung, falls die dafür erforderlichen Daten verfügbar sind.

Es sei darauf hingewiesen, dass für die Beispiele zumeist jeweils nur einzelne Netzzrückwirkungen exemplarisch ausgewählt wurden und diese Auswahl nicht notwendigerweise alle für die entsprechende Kundenanlage relevanten (zu beurteilenden) Netzzrückwirkungen umfassen muss.

Die Arbeitsgruppe wird die Sammlung an Beispielen ständig ergänzen und die neuen Versionen entsprechend nummerieren. Der Änderungsverlauf wird entsprechend kommentiert.

1. Anwendung der Technischen Regeln NS

1.1 Übersicht

Die nachstehenden Tabellen Tab. 1-1 und Tab. 1-2 geben eine Übersicht der Beispiele für Kundenanlagen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz. Basierend auf der Charakteristik der Kundenanlage wird eine Übersicht der zur Beurteilung exemplarisch ausgewählten Netzzrückwirkungen gegeben. Für ausgewählte Beispiele wird ebenfalls die Berechnung der Kurzschlussleistung ausführlich beschrieben.

Tab. 1-1 Übersicht Beispiele NS Teil 1

	Berechnung Kurzschlussleistung	Schnelle Spannungsänderungen	Flicker	Unsymmetrie	Harmonische Zwischenharmonische Supraharmonische	Kommutierungseinbrüche
1.2 Beurteilung eines Drehstrommotors <i>Kundenanlage mit einem Drehstrommotor mit häufigen Anläufen und hohem Anlaufstrom. Beurteilung der Flickerstärke anhand des analytischen Verfahrens.</i>		x	x			
1.3 Beurteilung einer Direktheizung <i>Kundenanlage mit Überlagerung mehrerer unabhängig geschalteter Heizgruppen. Beurteilung der Flickerstärke anhand des analytischen Verfahrens.</i>	x	x	x			
1.4 Beurteilung eines Drehautomaten einer Werkstätte <i>Kundenanlage mit gesteuertem Stromrichter, welcher Oberschwingungen und Kommutierungseinbrüche erzeugt sowie weiteren nichtlinearen Lasten.</i>	x				x	x
1.5 Beurteilung eines Bürohauses <i>Kundenanlage mit hohem Anteil an IT- und Bürogeräten. Beurteilung anhand der Eingruppierung typischer Oberschwingungserzeuger.</i>	x				x	
1.6 Beurteilung eines Skilifts <i>Kundenanlage mit gesteuertem Stromrichter, welcher Oberschwingungen und Kommutierungseinbrüche erzeugt.</i>	x				x	x

Tab. 1-2 Übersicht Beispiele NS Teil 2

	Berechnung Kurzschlussleistung	Schnelle Spannungsänderungen	Flicker	Unsymmetrie	Harmonische Zwischenharmonische Supraharmonische	Kommutierungseinbrüche
1.7 Beurteilung einer AC-Ladeinfrastruktur <i>Kundenanlage mit Einzelladesäulen und geregelter Gesamtleistung zur Einhaltung eines maximalen Leistungsbezugs. Stochastischer Betrieb der Ladesäulen. Beurteilung der Flickerstärke anhand der Flicker-Referenzkurve. Beurteilung der Oberschwingungen unter Annahme aktiver PFC der Ladegeräte.</i>		x	x		x	
1.8 Beurteilung einer DC-Ladestation <i>Kundenanlage mit einzelner Schnellladestation, hoher Ladeleistung und geringer Häufigkeit der Zuschaltung. Beurteilung der Oberschwingungen unter Berücksichtigung der Schaltungstopologie für die Eingruppierung (niedriger THDi).</i>	x	x			x	
1.9 Beurteilung eines Liftes <i>Kundenanlage mit einem Antriebsmotor mit Anlaufhilfe und häufigem Anlauf. Beurteilung der Flickerstärke anhand der Flicker-Referenzkurve.</i>		x	x		x	
1.10 Beurteilung einer Ladestation für Elektrobusse <i>Kundenanlage zum periodischen Zwischenladen von Elektrobussen. Beurteilung der Flickerstärke anhand der Flicker-Referenzkurve. Beurteilung der Oberschwingungen unter Berücksichtigung der Schaltungstopologie für die Eingruppierung (niedriger THDi).</i>		x	x		x	
1.11 Beurteilung einer Eigenverbrauchsgemeinschaft (EVG) <i>Kombination aus Verbrauchsgeräten, PV-Einspeisung und Speichern. Begrenzte Informationen zu Gerätetypen. Vorgabe von Emissionsgrenzwerten bei bekannter Resonanzstelle.</i>		x	x	x	x	

1.2 Beurteilung eines Drehstrommotors

1.2.1 Beschreibung

Es ist der Anschluss eines Motors im NS-Netz (einziges flickerrelevantes Gerät in der Kundenanlage) unter folgenden Voraussetzungen zu beurteilen:

Netz: $S_{rT} = 400 \text{ kVA}$

Anschlusspunkt: $S_{kAP} = 4,2 \text{ MVA}$; $\psi_{AP} = 34^\circ$

Verknüpfungspunkt: $S_{kV} = 4,8 \text{ MVA}$

Vereinbarte Anschlussleistung: $S_A = 150 \text{ kVA}$

Der Netzbetreiber plant zukünftig keinen Anschluss von Erzeugungs- oder Speicheranlagen, daher gilt $k_B + k_E + k_S = 1,0$.

Für den anteiligen Beitrag $P_{stNSges}$ wird der Richtwert $P_{stNSges} = 0,8$ verwendet.

Maximal 5 Motoranläufe (N) in 10 Minuten (T), bei einer nachfolgenden Stillstandzeit von mindestens 2 Stunden, daher keine Langzeit-Flickerbewertung erforderlich.

Motor-Anlauf: $U_r = 400 \text{ V}$, $I_r = 83 \text{ A}$, $k_i = I_a/I_r = 6$, $\varphi_a = 65^\circ$, $F = 0,92$

Bemessungsleistung des Motors:

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_r \cdot I_r = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 83 \text{ A} = 57,5 \text{ kVA}$$

1.2.2 Spannungsänderungen und Flicker

1.2.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r :

$$\frac{S_{kV}}{S_r} = \frac{4,8 \text{ MVA}}{57,5 \text{ kVA}} = 83,5 \quad (\text{B-I Tab. 1-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r liegt unter den erforderlichen Leistungsverhältnissen für Motoren ohne Einschaltstrombegrenzung (B-I Tab. 1-1) für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Scheinleistungsänderung beim Anlauf:

$$\Delta S_A = S_r \cdot k_i = 57,5 \text{ kVA} \cdot 6 = 345 \text{ kVA} \quad (\text{A 4-18})$$

Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$:

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} = \frac{4,8 \text{ MVA}}{345 \text{ kVA}} = 13,9 \quad (\text{B-I Abb. 1-2})$$

Wiederholrate:

$$r = \frac{N}{T} = \frac{5}{10} = 0,5 \text{ min}^{-1}$$

Minimal erforderliches Leistungsverhältnis $(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min}$ für $r < 10 \text{ min}^{-1}$ und $k = 1$ (dreiphasiger Anschluss):

$$(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min} = k \cdot 500 = 1 \cdot 500 = 500 \quad (\text{B-I Tab. 1-3})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$ liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 500 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

1.2.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Für eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (B-I Abb. 1-3) $d_{\text{grenz}} = 3 \%$.

Flicker

Der Gleichzeitigkeitsfaktor wird vom VNB mit $g = 1$ festgelegt.

$$P_{\text{st NS V}} = \frac{P_{\text{st NS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{rT}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = \frac{0,8}{\sqrt{1,0}} \cdot \sqrt{\frac{150 \text{ kVA}}{400 \text{ kVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = 0,49 \quad (\text{B-I 1-5})$$

(B-I 1-7)

$$P_{\text{It NS V}} = 0,65 \cdot P_{\text{st NS V}} = 0,65 \cdot 0,49 = 0,32 \quad (\text{B-I 1-6})$$

1.2.2.3 Rechnerische Bewertung

Die rechnerische Bewertung geht davon aus, dass der Motor das einzige, Flicker verursachende Gerät in der Kundenanlage ist.

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

negatives Vorzeichen für ohmsch-induktive Last.

$$d_{AP} = \frac{\Delta S_A}{S_{kAP}} \cdot \cos(\psi_{AP} - \varphi_a) \cdot 100 \% \quad (\text{A 4-3})$$

$$d_{AP} = \frac{345 \text{ kVA}}{4,2 \text{ MVA}} \cdot \cos(34^\circ - 65^\circ) \cdot 100 \% = 7,0 \%$$

$$d_V = \frac{S_{kAP}}{S_{kV}} \cdot d_{AP} = \frac{4,2 \text{ MVA}}{4,8 \text{ MVA}} \cdot 7,0 \% = 6,16 \% \quad (\text{A 4-38})$$

Schnelle Spannungsänderungen kleiner 3 % am Verknüpfungspunkt sind nicht erfüllt (B-I Kapitel 1.1.2). Der Anschluss kann nicht bewilligt werden. Es sind Maßnahmen zu ergreifen.

Flicker

$R = 1,01$ für $r = 0,5 \text{ min}^{-1}$ (A Abb. 4-5)

$$P_{stAP} = 0,365 \cdot F \cdot R \cdot |d_{AP}/\%| \cdot \sqrt[3,2]{r/\text{min}^{-1}} \quad (\text{A 4-22})$$

$$P_{stAP} = 0,365 \cdot 0,92 \cdot 1,01 \cdot |7,0| \cdot \sqrt[3,2]{0,5} = 1,91$$

$$P_{stV} = \frac{S_{kAP}}{S_{kV}} \cdot P_{stAP} = \frac{4,2 \text{ MVA}}{4,8 \text{ MVA}} \cdot 1,91 = 1,67 \quad (\text{A 4-39})$$

Der Anschluss kann nur mit zusätzlichen Maßnahmen zur Flicker-Reduktion bewilligt werden, da die zu erwartende Kurzzeit-Flickerstärke größer als die zulässige Kurzzeit-Flickerstärke ist.

1.3 Beurteilung einer Direktheizung

1.3.1 Beschreibung

Es ist der Anschluss einer Direktheizung unter folgenden Voraussetzungen zu beurteilen:

Übergeordnetes Netz: $U_{\text{ÜN}} = 20 \text{ kV}$; $S_{\text{kÜN}} = 55 \text{ MVA}$

Transformator: $U_{\text{rT OS}}/U_{\text{rT US}} = 20 \text{ kV}/400 \text{ V}$; $S_{\text{rT}} = 630 \text{ kVA}$; $P_{\text{k}} = 8 \text{ kW}$; $u_{\text{k}} = 5 \%$

Leitung: Kunststoffkabel $4 \times 240 \text{ Al}$; $l = 115 \text{ m}$

$$R'_{\text{L}} = 0,15 \Omega/\text{km}; X'_{\text{L}} = 0,075 \Omega/\text{km}$$

Vereinbarte Anschlussleistung: $S_{\text{A}} = 400 \text{ kVA}$

Last: Direktheizung mit folgenden Gruppen:

10 Gruppen zu 15 kW	150 kW
8 Gruppen zu 12 kW	96 kW
6 Gruppen zu 5 kW	30 kW
8 Gruppen zu 4 kW	32 kW
32 Gruppen total	$P_{\text{A}} = 308 \text{ kW}$

Die Direktheizung (symmetrische Drehstromlast) wird mit elektronischen Schützen mit einer maximalen Taktfrequenz von 0,133 Hz / Gruppe (16 Änderungen/Minute) temperaturgesteuert. Die Steuerungen der einzelnen Gruppen arbeiten unabhängig voneinander, d.h. die Lastschaltungen erfolgen stochastisch. Auf eine gegenseitige Verriegelung der Schützensteuerung zur Verhinderung von Koinzidenz wird verzichtet. Die Direktheizung ist mehr als 2h in Betrieb.

Die nächsten Kunden sind mit separaten Abgängen an der Trafostation (Verknüpfungspunkt) angeschlossen. Der Verknüpfungspunkt wird auf der 400-V-Seite der Trafostation festgelegt ($U_{\text{V}} = 400 \text{ V}$). Der Gleichzeitigkeitsfaktor wurde vom VNB aufgrund der spezifisch für dieses Netz geltenden hohen Diversität der geplanten Kundenanlage mit anderen Kundenanlagen zu $g = 0,6$ festgelegt. Für den anteiligen Beitrag $P_{\text{st NS ges}}$ wird der Richtwert $P_{\text{st NS ges}} = 0,8$ verwendet.

Der VNB schließt im Rahmen der Ausbauplanung den künftigen Anschluss von Erzeugungs- und Speicheranlagen nicht aus und verwendet die Empfehlungswerte für die Ausbaufaktoren.

1.3.2 Berechnung Kurzschlussleistung

Ermittlung der Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt und am Anschlusspunkt aus den gegebenen Netzdaten.

Übergeordnetes Netz:

$$X_{\text{ÜN}} = \frac{U_{\text{ÜN}}^2}{S_{\text{kÜN}}} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{55 \text{ MVA}} = 7,27 \Omega$$

(A 3-2)

bezogen auf 20 kV

$$X_{\text{ÜNV}} = X_{\text{ÜN}} \cdot \left(\frac{U_{\text{rTUS}}}{U_{\text{rTOS}}} \right)^2 = 7,27 \, \Omega \cdot \left(\frac{0,4 \, \text{kV}}{20 \, \text{kV}} \right)^2 = 2,9 \, \text{m}\Omega \quad (\text{A 3-17})$$

bezogen auf 0,4 kV

Transformator:

$$u_{\text{r}} = \frac{P_{\text{k}}}{S_{\text{rT}}} \cdot 100 \% = \frac{8 \, \text{kW}}{630 \, \text{kVA}} \cdot 100 \% = 1,27 \% \quad (\text{A 3-8})$$

$$u_{\text{x}} = \sqrt{u_{\text{k}}^2 - u_{\text{r}}^2} = \sqrt{(5 \%)^2 - (1,27 \%)^2} = 4,84 \% \quad (\text{A 3-9})$$

$$X_{\text{T}} = u_{\text{x}} \cdot \frac{U_{\text{rT}}^2}{S_{\text{rT}}} = \frac{4,84 \%}{100 \%} \cdot \frac{(0,4 \, \text{kV})^2}{0,63 \, \text{MVA}} = 12,3 \, \text{m}\Omega \quad (\text{A 3-7})$$

$$R_{\text{T}} = u_{\text{r}} \cdot \frac{U_{\text{rT}}^2}{S_{\text{rT}}} = \frac{1,27 \%}{100 \%} \cdot \frac{(0,4 \, \text{kV})^2}{0,63 \, \text{MVA}} = 3,22 \, \text{m}\Omega \quad (\text{A 3-6})$$

Leitung:

Für Aluminium- und Kupferleiter wird ein Temperaturkorrekturfaktor von 4 % je 10 K berücksichtigt.

$$R_{\text{L}}(20 \, ^\circ\text{C}) = R'_{\text{L}} \cdot l = 0,15 \, \Omega/\text{km} \cdot 0,115 \, \text{km} = 17,3 \, \text{m}\Omega \quad (\text{A 3-10})$$

$$R_{\text{L}}(70 \, ^\circ\text{C}) = R_{\text{L}}(20 \, ^\circ\text{C}) \cdot \left(1 + \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{\Delta T}{10} \right)$$

$$R_{\text{L}}(70 \, ^\circ\text{C}) = 17,3 \, \text{m}\Omega \cdot \left(1 + \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{50 \, \text{K}}{10} \right) = 20,8 \, \text{m}\Omega$$

$$X_{\text{L}} = X'_{\text{L}} \cdot l = 0,075 \, \Omega/\text{km} \cdot 0,115 \, \text{km} = 8,6 \, \text{m}\Omega \quad (\text{A 3-11})$$

Impedanz und Kurzschlussleistung an der Transformatorstation (Verknüpfungspunkt):

$$R_{\text{kV}} = R_{\text{TV}} = 3,22 \, \text{m}\Omega$$

$$X_{\text{kV}} = X_{\text{ÜNV}} + X_{\text{TV}} = 2,9 \, \text{m}\Omega + 12,3 \, \text{m}\Omega = 15,2 \, \text{m}\Omega$$

$$Z_{\text{kV}} = \sqrt{R_{\text{kV}}^2 + X_{\text{kV}}^2} = \sqrt{(3,22 \, \text{m}\Omega)^2 + (15,2 \, \text{m}\Omega)^2} = 15,54 \, \text{m}\Omega \quad (\text{A 3-18})$$

$$\psi_{\text{V}} = \arctan\left(\frac{X_{\text{kV}}}{R_{\text{kV}}}\right) = \arctan\left(\frac{15,2 \, \text{m}\Omega}{3,22 \, \text{m}\Omega}\right) = 78,0^\circ \quad (\text{A 3-19})$$

$$S_{kV} = \frac{U_{rTUS}^2}{Z_{kV}} = \frac{(0,4 \text{ kV})^2}{15,54 \text{ m}\Omega} = 10,3 \text{ MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

Impedanz und Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt:

Die Impedanz am Anschlusspunkt setzt sich aus der Impedanz am Verknüpfungspunkt und der Kabelimpedanz zusammen.

$$R_{kAP} = R_{kV} + R_L(70^\circ\text{C}) = 3,22 \text{ m}\Omega + 20,8 \text{ m}\Omega = 24 \text{ m}\Omega$$

$$X_{kAP} = X_{kV} + X_L = 15,2 \text{ m}\Omega + 8,6 \text{ m}\Omega = 23,8 \text{ m}\Omega$$

$$Z_{kAP} = \sqrt{R_{kAP}^2 + X_{kAP}^2} = \sqrt{(24 \text{ m}\Omega)^2 + (23,8 \text{ m}\Omega)^2} = 33,8 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-18})$$

$$\psi_{AP} = \arctan\left(\frac{X_{kAP}}{R_{kAP}}\right) = \arctan\left(\frac{23,8 \text{ m}\Omega}{24 \text{ m}\Omega}\right) = 44,8^\circ \quad (\text{A 3-19})$$

$$S_{kAP} = \frac{U_{rTUS}^2}{Z_{kAP}} = \frac{(0,4 \text{ kV})^2}{33,8 \text{ m}\Omega} = 4,73 \text{ MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

1.3.3 Spannungsänderungen und Flicker

1.3.3.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Eine geringe Schalthäufigkeit sind einige Male pro Tag, für diese Anlage liegt eine große Schalthäufigkeit vor.

Es handelt sich um eine Anlage mit mehreren Geräten und B-I Tab. 1-1 sollte im eigentlichen Sinn für einzelne Geräte angewendet werden. Zudem liefert B-I Tab. 1-1 keine Angaben für getaktete Heizungen mit großer Schalthäufigkeit. Damit ist keine vereinfachte Beurteilung möglich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Eine Beurteilung nach Stufe 2 ist nicht möglich, da für die Kombination mehrerer flickererzeugender Geräte keine ungünstigste flickerrelevante Scheinleistungsänderung bestimmbar ist.

1.3.3.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Für eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (A Abb. 1-3) $d_{\text{grenz}} = 3 \%$.

Flicker

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ gemäß Anmerkung 3, B-I Kapitel 1.2.2 gewählt.

$$P_{\text{st NS V}} = \frac{P_{\text{st NS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{\text{r T}}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = \frac{0,8}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{400 \text{ kVA}}{630 \text{ kVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{0,6}} = 0,71 \quad (\text{B-I 1-5})$$

(B-I 1-7)

$$P_{\text{lt NS V}} = 0,65 \cdot P_{\text{st NS V}} = 0,65 \cdot 0,71 = 0,46 \quad (\text{B-I 1-6})$$

1.3.3.3 Rechnerische Bewertung

Für die rechnerische Bewertung ist zu beachten, dass die Berechnung der Bewertungsgrößen für den AP erfolgt und diese dann auf den VP mittels des Verhältnisses der Kurzschlussleistungen umgerechnet werden (vgl. Teil A Grundlagen Kapitel 4.3).

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

z. B. Berechnung für 15-kW-Heizgruppe.

$$\Delta S_A = 15 \text{ kVA}$$

$$d_{\text{i AP}} = \frac{\Delta S_A}{S_{\text{k AP}}} \cdot \cos(\psi_{\text{AP}} - \varphi) \cdot 100 \% \quad (\text{A 4-3})$$

$$d_{\text{i AP}} = \frac{15 \text{ kVA}}{4,73 \text{ MVA}} \cdot \cos(44,8^\circ - 0^\circ) \cdot 100 \% = 0,225 \%$$

$$d_{\text{i V}} = \frac{S_{\text{k AP}}}{S_{\text{k V}}} \cdot d_{\text{i AP}} = \frac{4,73 \text{ MVA}}{10,3 \text{ MVA}} \cdot 0,225 \% = 0,103 \% \quad (\text{A 4-38})$$

Da keine Verriegelung zwischen den Heizgruppen besteht, wird die größte Spannungsänderung durch die gleichzeitige Einschaltung aller Gruppen verursacht.

$$\Delta S_A = 308 \text{ kVA}$$

$$d_{\text{max AP}} = \frac{\Delta S_A}{S_{\text{k AP}}} \cdot \cos(\psi_{\text{AP}} - \varphi) \cdot 100 \% \quad (\text{A 4-3})$$

$$d_{\text{max AP}} = \frac{308 \text{ kVA}}{4,73 \text{ MVA}} \cdot \cos(44,8^\circ - 0^\circ) \cdot 100 \% = 4,62 \%$$

$$d_{\text{max V}} = \frac{S_{\text{k AP}}}{S_{\text{k V}}} \cdot d_{\text{max AP}} = \frac{4,73 \text{ MVA}}{10,3 \text{ MVA}} \cdot 4,62 \% = 2,12 \% \quad (\text{A 4-38})$$

Schnelle Spannungsänderungen kleiner 3 % am Verknüpfungspunkt sind erfüllt (B-I Kapitel 1.1.2).

Flicker

$R = 1,03$ für $r = 16 \text{ min}^{-1}$ (A Abb. 4-5)

$F = 1,0$ (Rechteckförmige Spannungsänderung)

z. B. Berechnung für 15-kW-Heizgruppe.

$$P_{\text{sti AP}} = 0,365 \cdot F \cdot R \cdot |d_{\text{i AP}}/\%| \cdot \sqrt[3,2]{r/\text{min}^{-1}} \quad (\text{A 4-22})$$

$$P_{\text{sti AP}} = 0,365 \cdot 1,0 \cdot 1,03 \cdot |0,225| \cdot \sqrt[3,2]{16 \text{ min}^{-1}} = 0,201$$

Die anderen Heizgruppen werden analog berechnet, so dass sich folgende Werte ergeben:

Tab. 1-3 Schnelle Spannungsänderungen und Kurzzeit-Flickeremissionen der Heizgruppen am Anschlusspunkt (Bsp. 1.3)

Gruppe	$d_{\text{i AP}}$	$P_{\text{sti AP}}$
15 kW	0,225 %	0,201
12 kW	0,180 %	0,161
5 kW	0,075 %	0,067
4 kW	0,060 %	0,054

Die Anwendung des Überlagerungsgesetzes (A4-36) mit $\alpha = 2$ (Summation) ergibt:

$$P_{\text{st AP}} = \sqrt[\alpha]{\sum_{i=1}^M P_{\text{sti AP}}} \quad (\text{A 4-36})$$

$$P_{\text{st AP}} = \sqrt{10 \cdot P_{\text{st 15 kW}}^2 + 8 \cdot P_{\text{st 12 kW}}^2 + 6 \cdot P_{\text{st 5 kW}}^2 + 8 \cdot P_{\text{st 4 kW}}^2}$$

$$P_{\text{st AP}} = \sqrt{10 \cdot 0,201^2 + 8 \cdot 0,161^2 + 6 \cdot 0,067^2 + 8 \cdot 0,054^2} = 0,81$$

$$P_{\text{st V}} = \frac{S_{\text{k AP}}}{S_{\text{k V}}} \cdot P_{\text{st AP}} = \frac{4,73 \text{ MVA}}{10,3 \text{ MVA}} \cdot 0,81 = 0,37 \quad (\text{A 4-39})$$

Da die Anlage innerhalb eines 2h-Intervalls dauernd im Betrieb ist, gilt $P_{\text{lt V}} = P_{\text{st V}} = 0,37$. Die Emissionsgrenzwerte für Kurzzeit- und Langzeit-Flickerstärke werden eingehalten.

1.4 Beurteilung einer Werkstätte mit Drehautomaten

1.4.1 Beschreibung

Es ist der Anschluss einer Werkstätte zu beurteilen mit einer Anschlussleistung von $S_A = 60 \text{ kVA}$. Die Kundenanlage befindet sich 200 m von der Transformatorstation entfernt. Die Versorgung erfolgt über ein Al-Kabel mit einem Querschnitt von 150 mm^2 ($R'_L = 206 \text{ m}\Omega/\text{km}$; $X'_L = 67 \text{ m}\Omega/\text{km}$). Die Bemessungsleistung des Transformators beträgt $S_{rT} = 400 \text{ kVA}$ bei einem $u_k = 4 \%$. Der Anschlusspunkt ist mit dem Verknüpfungspunkt identisch. Der VNB plant in der Zukunft Erzeugungs- und Speichereinrichtungen in dem Netz anzuschließen, hat jedoch noch keine konkreten Vorstellungen von deren Umfang. Die Rundsteuerfrequenz beträgt 721 Hz.

In der Werkstätte befindet sich eine Reihe nennenswerter Oberschwingungserzeuger mit folgenden Leistungen:

Drehautomat mit gesteuertem, netzgeführtem Stromrichter (6-pulsig)	5 kVA
Drehautomat mit gesteuertem, netzgeführtem Stromrichter (6-pulsig)	6 kVA
Inverterschweißgerät	3 kVA
Beleuchtungsanlage mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur	10 kVA
Büro-EDV	2 kVA

Für das Inverterschweißgerät ist die Technologie nicht bekannt. Büro-EDV umfasst einen Computer, einen Drucker, ein Kopier- und ein Faxgerät. Die Leistungsangabe berücksichtigt bereits die zu erwartende Gleichzeitigkeit.

1.4.2 Berechnung Kurzschlussleistung

Ermittlung der Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt bzw. Anschlusspunkt aus den gegebenen Netzdaten.

Transformator:

$$X_T = u_k \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{400 \text{ kVA}} = 16 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-7})$$

Leitung:

Für Aluminium- und Kupferleiter wird ein Temperaturkorrekturfaktor von 4 % je 10 K berücksichtigt.

$$R_L(20^\circ\text{C}) = R'_L \cdot l = 206 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,2 \text{ km} = 41,2 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-10})$$

$$R_L(70^\circ\text{C}) = R_L(20^\circ\text{C}) \cdot \left(1 + \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{\Delta T}{10}\right)$$

$$R_L(70\text{ °C}) = 41,2\text{ m}\Omega \cdot \left(1 + \frac{4\text{ \%}}{100\text{ \%}} \cdot \frac{50\text{ K}}{10}\right) = 49,4\text{ m}\Omega$$

$$X_L = X'_L \cdot l = 67\text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,2\text{ km} = 13,4\text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-11})$$

Impedanz und Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt:

$$Z_{kV} = \sqrt{(X_T + X_L)^2 + (R_L)^2} \quad (\text{A 3-18})$$

$$Z_{kV} = \sqrt{(16\text{ m}\Omega + 13,4\text{ m}\Omega)^2 + (49,3\text{ m}\Omega)^2} = 57,4\text{ m}\Omega$$

$$S_{kV} = \frac{U_n^2}{Z_{kV}} = \frac{(400\text{ V})^2}{57,4\text{ m}\Omega} = 2,78\text{ MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

1.4.3 Harmonische

1.4.3.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{2,78\text{ MVA}}{60\text{ kVA}} = 46,3 \quad (\text{B-I Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 150 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Zur Bestimmung des Oberschwingungserzeugenden Anteils der Anschlussleistung werden die Oberschwingungserzeuger den drei Gruppen zugeordnet (A Kap. 6.7).

Die Beleuchtungsanlage wird aufgrund ihrer Technologie Gruppe 1 zugeordnet. Für alle anderen Geräte ist die Technologie nicht bekannt. Diese werden deshalb der Gruppe 3 zugeordnet.

Tab. 1-4 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsgehalts

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Drehautomat			6 kVA
Drehautomat			5 kVA
Inverterschweißgerät			3 kVA
Beleuchtungsanlage	10 kVA		
Büro-EDV			2 kVA
Summe	10 kVA		16 kVA

Oberschwingungserzeugender Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = \frac{1}{2} \cdot 10 \text{ kVA} + 2 \cdot 16 \text{ kVA} = 37 \text{ kVA} \quad (\text{B-I 3-6})$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{37 \text{ kVA}}{60 \text{ kVA}} = 0,62$$

Zulässiges Verhältnis zwischen dem überschwingungserzeugenden Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage und der Anlagenleistung:

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A} \right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kv}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{2,78 \text{ MVA}}{60 \text{ kVA}}} = 0,56 \quad (\text{B-I 3-5})$$

Das Leistungsverhältnis S_{OS}/S_A liegt über dem maximal zulässigen Leistungsverhältnis von 0,56 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

1.4.3.2 Emissionsgrenzwerte

Impedanzwinkelfaktor:

$$\frac{X}{R} = \frac{X_T + X_L}{R_L} = \frac{16 \text{ m}\Omega + 13,4 \text{ m}\Omega}{49,3 \text{ m}\Omega} = 0,6$$

$$\rightarrow k_{XR} = 0,7 \quad (\text{A Tab. 6-4})$$

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{60 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 86,6 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom:

Da die erste Parallelresonanzstelle unbekannt ist, wird „Variante 3: Verallgemeinerte Berücksichtigung der ersten Parallelresonanzstelle“ (A 6.2.3.3) angewendet:

$k_{v/\mu} = 1,3$ ($k_{XR} \leq 0,95$) für $7 \leq f/f_N \leq 25$, andernfalls $k_{v/\mu} = 1$ (A Tab. 6-3).

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ gemäß Anmerkung, B-I Kapitel 3.1.2 gewählt.

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_v}{1000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \frac{1}{k_{XR}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-1})$$

z. B. Berechnung des 23. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{23 \text{ zul}} = \frac{1,6}{1000} \cdot \frac{1}{1,3} \cdot \frac{1}{0,7} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{2,78 \text{ MVA}}{60 \text{ kVA}}} \cdot 86,6 \text{ A} = 0,892 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Harmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-5 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-1 (Bsp. 1.4)

v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/\text{A}$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/\text{A}$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/\text{A}$
2	4,5	1	3,3	15	0,3	1,3	0,2	28	0,4	1	0,3
3	5,7	1	4,1	16	0,9	1,3	0,5	29	1,0	1	0,7
4	2,9	1	2,1	17	2,6	1,3	1,5	30	0,3	1	0,2
5	13,1	1	9,5	18	0,5	1,3	0,3	31	0,9	1	0,7
6	1,1	1	0,8	19	2,1	1,3	1,2	32	0,4	1	0,3
7	7,8	1,3	4,4	20	0,7	1,3	0,4	33	0,1	1	0,1
8	1,2	1,3	0,7	21	0,2	1,3	0,1	34	0,4	1	0,3
9	1,2	1,3	0,7	22	0,6	1,3	0,3	35	0,7	1	0,5
10	1,6	1,3	0,9	23	1,6	1,3	0,9	36	0,2	1	0,1
11	5,1	1,3	2,8	24	0,4	1,3	0,2	37	0,7	1	0,5
12	0,8	1,3	0,5	25	1,4	1,3	0,8	38	0,3	1	0,2
13	3,7	1,3	2,1	26	0,5	1	0,4	39	0,1	1	0,1
14	1,0	1,3	0,6	27	0,1	1	0,1	40	0,3	1	0,2

Der zulässige PWHIDI ist in Kapitel 1.4.4.2 angegeben.

1.4.4 Zwischenharmonische

1.4.4.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Zwischenharmonische nicht vorgesehen.

1.4.4.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_{\mu} = \frac{c(\mu)}{\mu + 0,5}, \text{ mit } c(\mu) = \begin{cases} 0,2 & \text{für } \mu = 1 \dots 30 \\ 0,3 & \text{für } \mu = 31 \dots 39 \\ 0,1 & \text{für } \mu = 3 \dots 39^{1)} \end{cases} \quad (\text{B-I Tab. 3-4})$$

¹⁾ gilt für die Zwischenharmonische bei bzw. in der Nähe der Rundsteuerfrequenz

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Zwischenharmonische der 7. Ordnung.

$$g_7 = \frac{0,2}{7 + 0,5} = 26,7 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger zwischenharmonischer Strom:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_{\mu}} \cdot \frac{g_{\mu}}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-7})$$

z. B. Berechnung des 7. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{7 \text{ zul}} = \frac{1}{1,3} \cdot \frac{26,7 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{2,78 \text{ MVA}}{60 \text{ kVA}} \cdot 86,6 \text{ A} = 0,82 \text{ A}$$

Die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Für Zwischenharmonische zwischen 3 ... 39 bei bzw. in der Nähe ($\pm 100 \text{ Hz}$) der Rundsteuerfrequenz gilt $g_{\mu} = 0,1/(\mu+0,5)$. Bei einer Rundsteuerfrequenz von 721 Hz sind die 12. – 16. Zwischenharmonische betroffen.

Ergibt sich für Zwischenharmonische ein Grenzwert I_{μ}/I_A grösser 2 %, so ist dieser Wert auf 2 % zu begrenzen. Das betrifft in diesem Fall die 1. – 4. Zwischenharmonische.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Zwischenharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-6 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7 (Bsp. 1.4)

μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$
1	133,3	1	1,7	14	6,9	1,3	0,2	27	7,3	1	0,3
2	80,0	1	1,7	15	6,5	1,3	0,2	28	7,0	1	0,3
3	57,1	1	1,7	16	6,1	1,3	0,2	29	6,8	1	0,3
4	44,4	1	1,7	17	11,4	1,3	0,4	30	6,6	1	0,3
5	36,4	1	1,5	18	10,8	1,3	0,3	31	9,5	1	0,4
6	30,8	1	1,2	19	10,3	1,3	0,3	32	9,2	1	0,4
7	26,7	1,3	0,8	20	9,8	1,3	0,3	33	9,0	1	0,4
8	23,5	1,3	0,7	21	9,3	1,3	0,3	34	8,7	1	0,4
9	21,1	1,3	0,7	22	8,9	1,3	0,3	35	8,5	1	0,3
10	19,0	1,3	0,6	23	8,5	1,3	0,3	36	8,2	1	0,3
11	17,4	1,3	0,5	24	8,2	1,3	0,3	37	8,0	1	0,3
12	8,0	1,3	0,3	25	7,8	1,3	0,2	38	7,8	1	0,3
13	7,4	1,3	0,2	26	7,5	1	0,3	39	7,6	1	0,3

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_{v \text{ zul}}^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_{\mu \text{ zul}}^2} \cdot 100 \% = 17,7 \% \quad (\text{B-I 3-8})$$

1.4.5 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

1.4.5.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Supraharmonische nicht vorgesehen.

1.4.5.2 Emissionsgrenzwerte

Zulässiger supraharmonischer Strom:

$k_b = 1$ (keine genaueren Angaben zu möglichen Resonanzen bekannt).

$r = 0,1$ für $S_{kV} \geq 2 \text{ MVA}$ (B-I Tab. 3-6).

$$I_{b \text{ zul}} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{3,3 \cdot b^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - b}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(r + (1 - r) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{S_{kV}}\right)} \quad (\text{B-I 3-9})$$

z. B. Berechnung des supraharmischen Grenzwerts mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 6,9 kHz.

$$I_{6,9 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 6,9^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 6,9 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{2,78 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{6,9 \text{ zul}} = 0,52 \text{ A}$$

Die supraharmischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Supraharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-7 Supraharmische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-9 (Bsp. 1.4)

b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$
2,1	1	2,4	4,5	1	0,9	6,9	1	0,5
2,3	1	2,1	4,7	1	0,9	7,1	1	0,5
2,5	1	1,9	4,9	1	0,8	7,3	1	0,5
2,7	1	1,8	5,1	1	0,8	7,5	1	0,5
2,9	1	1,6	5,3	1	0,7	7,7	1	0,4
3,1	1	1,5	5,5	1	0,7	7,9	1	0,4
3,3	1	1,4	5,7	1	0,7	8,1	1	0,4
3,5	1	1,3	5,9	1	0,6	8,3	1	0,4
3,7	1	1,2	6,1	1	0,6	8,5	1	0,4
3,9	1	1,1	6,3	1	0,6	8,7	1	0,4
4,1	1	1,0	6,5	1	0,6	8,9	1	0,4
4,3	1	1,0	6,7	1	0,5			

1.4.6 Kommutierungseinbrüche

Da es sich um einen Antrieb mit gesteuertem netzgeführtem Stromrichter handelt, sind die Kommutierungseinbrüche zu beurteilen.

1.4.6.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Anschlussleistung der Stromrichteranlage:

Es ist nicht auszuschließen, dass beide Drehautomaten mit dem gleichen Steuerwinkel betrieben werden. Deshalb wird die Summe der Bemessungsleistungen beider Drehautomaten für die Beurteilung eingesetzt.

$$S_{\text{SRA}} = 11 \text{ kVA} \rightarrow 6 \text{ kVA} + 5 \text{ kVA}$$

Leistungsverhältnis $S_{\text{kV}}/S_{\text{SRA}}$:

$$\frac{S_{\text{kV}}}{S_{\text{SRA}}} = \frac{2,78 \text{ MVA}}{11 \text{ kVA}} = 252,7 \quad (\text{B-I Abb. 4-1})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{\text{kV}}/S_{\text{SRA}}$ liegt über dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 200. Der Anschluss des neuen Drehautomaten mit einer Kommutierungsinduktivität von 4 % ist zulässig. Eine detaillierte Beurteilung (Stufe 2) ist nicht erforderlich.

1.5 Beurteilung eines Bürohauses

1.5.1 Beschreibung

Der geplante Neubau eines Bürohauses mit einer Anschlussleistung von $S_A = 100 \text{ kVA}$ soll aus einer in unmittelbarer Nähe vorhandenen Transformatorstation über ein eigenes Kabel versorgt werden. Die Bemessungsleistung des Transformators beträgt $S_{rT} = 400 \text{ kVA}$ bei einem $u_k = 4 \%$. In dem Netz sind in Relation zur Bemessungsleistung des Transformators nicht mehr als 85 % Bezugsanlagen, 30 % Erzeugungsanlagen und 20 % Speicheranlagen zu erwarten. Die Rundsteuerfrequenz liegt bei 425 Hz. Von den im Bürohaus insgesamt installierten Oberschwingungserzeugern sind folgende Geräte und Anlagen gleichzeitig in Betrieb:

70 Computer mit je	150 VA
50 Bildschirme mit je	80 VA
5 Drucker mit je	200 VA
USV-Anlage inklusive Serverraum	10 kVA
Beleuchtung LED mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur	5 kVA
2 Aufzüge mit 6-pulsigem Stromrichter mit induktiver Glättung mit je	8 kVA
Klimaanlage mit Umrichter	7,5 kVA
PV-Anlage	12 kVA

1.5.2 Berechnung Kurzschlussleistung

Transformator:

$$X_T = u_k \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{400 \text{ kVA}} = 16 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-7})$$

Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt:

$$S_{kV} = \frac{U_{rTUS}^2}{X_T} = \frac{(0,4 \text{ kV})^2}{16 \text{ m}\Omega} = 10 \text{ MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

1.5.3 Harmonische

1.5.3.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{10 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}} = 100 \quad (\text{B-I Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 150 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Zur Bestimmung des Oberschwingungserzeugenden Anteils der Anschlussleistung werden die Oberschwingungserzeuger den drei Gruppen zugeordnet (A Kap. 6.7).

Tab. 1-8 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsgehalts

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
70 Computer			10,5 kVA
50 Bildschirme			4 kVA
5 Drucker			1 kVA
Serverraum			10 kVA
Beleuchtung	5 kVA		
2 Aufzüge		16 kVA	
Klimaanlage			7,5 kVA
PV-Anlage	12 kVA		
Summe	17 kVA	16 kVA	33 kVA

Oberschwingungserzeugender Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr 1} + S_{Gr 2} + 2 \cdot S_{Gr 3} \quad (\text{B-I 3-6})$$

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot 17 \text{ kVA} + 16 \text{ kVA} + 2 \cdot 33 \text{ kVA} = 90,5 \text{ kVA}$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{90,5 \text{ kVA}}{100 \text{ kVA}} = 0,905$$

Zulässiges Verhältnis zwischen dem Oberschwingungserzeugenden Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage und der Anlagenleistung:

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A} \right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{10 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}}} = 0,82 \quad (\text{B-I 3-5})$$

Das Leistungsverhältnis S_{OS}/S_A liegt über dem maximal zulässigen Leistungsverhältnis von 0,82 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

1.5.3.2 Emissionsgrenzwerte

Impedanzwinkelfaktor:

$$\frac{X}{R} > 2,5$$

$$\rightarrow k_{XR} = 1$$

(A Tab. 6-4)

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 144 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

Da die erste Parallelresonanzstelle unbekannt ist, wird „Variante 3: Verallgemeinerte Berücksichtigung der ersten Parallelresonanzstelle“ (A 6.2.3.3) angewendet:

$k_{v/\mu} = 1,15$ ($k_{XR} > 0,95$) für $7 \leq f/f_N \leq 25$, andernfalls $k_{v/\mu} = 1$ (A Tab. 6-3).

$$k_B + k_E + k_S = 0,85 + 0,3 + 0,2 = 1,35$$

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_v}{1000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \frac{1}{k_{XR}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{KV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-1})$$

z. B. Berechnung des 27. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{27 \text{ zul}} = \frac{0,1}{1000} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{10 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}}} \cdot 144 \text{ A} = 0,124 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Harmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-9 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-1 (Bsp. 1.5)

v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/A$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/A$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/A$
2	4,5	1	5,6	15	0,3	1,15	0,3	28	0,4	1	0,5
3	5,7	1	7,1	16	0,9	1,15	1,0	29	1,0	1	1,2
4	2,9	1	3,6	17	2,6	1,15	2,8	30	0,3	1	0,4
5	13,1	1	16,2	18	0,5	1,15	0,5	31	0,9	1	1,1
6	1,1	1	1,4	19	2,1	1,15	2,3	32	0,4	1	0,5
7	7,8	1,15	8,4	20	0,7	1,15	0,8	33	0,1	1	0,1
8	1,2	1,15	1,3	21	0,2	1,15	0,2	34	0,4	1	0,5
9	1,2	1,15	1,3	22	0,6	1,15	0,6	35	0,7	1	0,9
10	1,6	1,15	1,7	23	1,6	1,15	1,7	36	0,2	1	0,2
11	5,1	1,15	5,5	24	0,4	1,15	0,4	37	0,7	1	0,9
12	0,8	1,15	0,9	25	1,4	1,15	1,5	38	0,3	1	0,4
13	3,7	1,15	4,0	26	0,5	1	0,6	39	0,1	1	0,1
14	1,0	1,15	1,1	27	0,1	1	0,1	40	0,3	1	0,4

Der zulässige PWHIDI ist in Kapitel 1.4.4.2 angegeben.

1.5.4 Zwischenharmonische

1.5.4.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Zwischenharmonische nicht vorgesehen.

1.5.4.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_\mu = \frac{c(\mu)}{\mu + 0,5}, \text{ mit } c(\mu) = \begin{cases} 0,2 \text{ für } \mu = 1 \dots 30 \\ 0,3 \text{ für } \mu = 31 \dots 39 \\ 0,1 \text{ für } \mu = 3 \dots 39^{1)} \end{cases} \quad (\text{B-I Tab. 3-4})$$

¹⁾ gilt für die Zwischenharmonische bei bzw. in der Nähe der Rundsteuerfrequenz

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Zwischenharmonische der 4. Ordnung.

$$g_4 = \frac{0,2}{4 + 0,5} = 44,4 \cdot 10^{-3} \quad (\text{B-I Tab. 3-4})$$

Zulässiger zwischenharmonischer Strom:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_\mu} \cdot \frac{g_\mu}{100} \cdot \frac{S_{KV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-7})$$

z. B. Berechnung des 4. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{4\text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{44,4 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{10 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}} \cdot 144 \text{ A} = 6,39 \text{ A}$$

$$I_{4\text{ zul}} > \frac{2\%}{100\%} \cdot I_A \rightarrow I_{4\text{ zul}} = \frac{2\%}{100\%} \cdot I_A = \frac{2\%}{100\%} \cdot 144 \text{ A} = 2,88 \text{ A}$$

Die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Für Zwischenharmonische zwischen 3 ... 39 bei bzw. in der Nähe ($\pm 100 \text{ Hz}$) der Rundsteuerfrequenz gilt $g_\mu = 0,1/(\mu+0,5)$. Bei einer Rundsteuerfrequenz von 425 Hz sind die 6. – 10. Zwischenharmonische betroffen.

Ergibt sich für Zwischenharmonische ein Grenzwert I_μ/I_A grösser 2 %, so ist dieser Wert auf 2 % zu begrenzen. Das betrifft in diesem Fall die 1. – 5. Zwischenharmonische.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Zwischenharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-10 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7 (Bsp. 1.5)

μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu\text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu\text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu\text{ zul}}/\text{A}$
1	133,3	1	2,9	14	13,8	1,15	1,7	27	7,3	1	1,0
2	80,0	1	2,9	15	12,9	1,15	1,6	28	7,0	1	1,0
3	57,1	1	2,9	16	12,1	1,15	1,5	29	6,8	1	1,0
4	44,4	1	2,9	17	11,4	1,15	1,4	30	6,6	1	0,9
5	36,4	1	2,9	18	10,8	1,15	1,4	31	9,5	1	1,4
6	15,4	1	2,2	19	10,3	1,15	1,3	32	9,2	1	1,3
7	13,3	1,15	1,7	20	9,8	1,15	1,2	33	9,0	1	1,3
8	11,8	1,15	1,5	21	9,3	1,15	1,2	34	8,7	1	1,3
9	10,5	1,15	1,3	22	8,9	1,15	1,1	35	8,5	1	1,2
10	9,5	1,15	1,2	23	8,5	1,15	1,1	36	8,2	1	1,2
11	17,4	1,15	2,5	24	8,2	1,15	1,0	37	8,0	1	1,2
12	16,0	1,15	2,0	25	7,8	1,15	1,0	38	7,8	1	1,1
13	14,8	1,15	1,9	26	7,5	1	1,1	39	7,6	1	1,1

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_{v\text{ zul}}^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_{\mu\text{ zul}}^2} \cdot 100\% = 26,9\% \quad (\text{B-I 3-8})$$

1.5.5 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

1.5.5.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Supraharmonische nicht vorgesehen.

1.5.5.2 Emissionsgrenzwerte

Zulässiger supraharmonischer Strom:

$k_b = 1$ (keine genaueren Angaben zu möglichen Resonanzen bekannt).

$r = 0,1$ für $S_{kV} \geq 2 \text{ MVA}$ (B-I Tab. 3-6).

$$I_{b \text{ zul}} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{3,3 \cdot b^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - b}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(r + (1 - r) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{S_{kV}}\right)} \quad (\text{B-I 3-9})$$

z. B. Berechnung des supraharmonischen Grenzwerts mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 4,3 kHz.

$$I_{4,3 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 4,3^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 4,3 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{10 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{4,3 \text{ zul}} = 1,84 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Supraharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-11 Supraharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-9 (Bsp. 1.5)

b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$
2,1	1	4,4	4,5	1	1,7	6,9	1	1,0
2,3	1	4,0	4,7	1	1,6	7,1	1	0,9
2,5	1	3,6	4,9	1	1,6	7,3	1	0,9
2,7	1	3,3	5,1	1	1,5	7,5	1	0,9
2,9	1	3,0	5,3	1	1,4	7,7	1	0,8
3,1	1	2,8	5,5	1	1,3	7,9	1	0,8
3,3	1	2,6	5,7	1	1,3	8,1	1	0,8
3,5	1	2,4	5,9	1	1,2	8,3	1	0,8
3,7	1	2,2	6,1	1	1,2	8,5	1	0,7
3,9	1	2,1	6,3	1	1,1	8,7	1	0,7
4,1	1	2,0	6,5	1	1,1	8,9	1	0,7
4,3	1	1,8	6,7	1	1,0			

1.6 Beurteilung eines Skilifts

1.6.1 Beschreibung

An einer Transformatorstation ($S_{rT} = 250 \text{ kVA}$, $u_k = 4 \%$) wird über ein 200 m langes Kabel aus Aluminium und einem Querschnitt von 150 mm^2 ($R'_L = 206 \text{ m}\Omega/\text{km}$, $X'_L = 70 \text{ m}\Omega/\text{km}$) ein Skilift mit einer Leistung von $S_{rStr} = S_A = 100 \text{ kVA}$ angeschlossen. Der VNB plant künftig Erzeugungsanlagen in dem Netz anzuschließen. Weitere Angaben liegen nicht vor. Der Betreiber des Liftes plant, den vorhandenen Asynchronmotor durch einen Stromrichterantrieb zu ersetzen. Der neue Antrieb soll aus einer 6-pulsigen gesteuerten Drehstrombrücke mit Gleichstrommotor bestehen. Es wird keine Rundsteuerung betrieben.

1.6.2 Berechnung Kurzschlussleistung

Transformator:

$$X_T = u_k \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{250 \text{ kVA}} = 25,6 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-7})$$

Leitung:

Für Aluminium- und Kupferleiter wird ein Temperaturkorrekturfaktor von 4 % je 10 K berücksichtigt.

$$R_L(20^\circ\text{C}) = R'_L \cdot l = 206 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,2 \text{ km} = 41,2 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-10})$$

$$R_L(70^\circ\text{C}) = R_L(20^\circ\text{C}) \cdot \left(1 + \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{\Delta T}{10}\right)$$

$$R_L(70^\circ\text{C}) = 41,2 \text{ m}\Omega \cdot \left(1 + \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{50 \text{ K}}{10}\right) = 49,4 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = X'_L \cdot l = 70 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,2 \text{ km} = 14 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-11})$$

Impedanz und Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt:

$$Z_{kV} = \sqrt{(X_T + X_L)^2 + (R_L)^2} \quad (\text{A 3-18})$$

$$Z_{kV} = \sqrt{(25,6 \text{ m}\Omega + 14 \text{ m}\Omega)^2 + (49,4 \text{ m}\Omega)^2} = 63,3 \text{ m}\Omega$$

$$S_{kV} = \frac{U_n^2}{Z_{kV}} = \frac{(400 \text{ V})^2}{63,3 \text{ m}\Omega} = 2,53 \text{ MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

1.6.3 Harmonische

1.6.3.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{2,53 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}} = 25,3 \quad (\text{B-I Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 150 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Zur Bestimmung des überschwingungserzeugenden Anteils der Anschlussleistung werden die Oberschwingungserzeuger den drei Gruppen zugeordnet (A Kap. 6.7).

Tab. 1-12 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsgehalts

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Gleichstrommotor (6-pulsig)			100 kVA

Oberschwingungserzeugender Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = 2 \cdot 100 \text{ kVA} = 200 \text{ kVA} \quad (\text{B-I 3-6})$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{200 \text{ kVA}}{100 \text{ kVA}} = 2$$

Zulässiges Verhältnis zwischen dem überschwingungserzeugenden Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage und der Anlagenleistung:

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A} \right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{2,53 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}}} = 0,41 \quad (\text{B-I 3-5})$$

Das Leistungsverhältnis S_{OS}/S_A liegt über dem maximal zulässigen Leistungsverhältnis von 0,41 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

1.6.3.2 Emissionsgrenzwerte

Impedanzwinkelfaktor:

$$\frac{X}{R} = \frac{X_T + X_L}{R_L} = \frac{25,6 \text{ m}\Omega + 14 \text{ m}\Omega}{49,4 \text{ m}\Omega} = 0,8$$

$$\rightarrow k_{XR} = 0,75$$

(A Tab. 6-4)

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{100 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 144 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

Da die erste Parallelresonanzstelle unbekannt ist, wird „Variante 3: Verallgemeinerte Berücksichtigung der ersten Parallelresonanzstelle“ (A 6.2.3.3) angewendet:

$k_{v/\mu} = 1,3$ ($k_{XR} \leq 0,95$) für $7 \leq f/f_N \leq 25$, andernfalls $k_{v/\mu} = 1$ (A Tab. 6-3).

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ gemäß Anmerkung, B-I Kapitel 3.1.2 gewählt.

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_v}{1000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \frac{1}{k_{XR}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kv}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-1})$$

z. B. Berechnung des 12. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{12 \text{ zul}} = \frac{0,8}{1000} \cdot \frac{1}{1,3} \cdot \frac{1}{0,75} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{2,53 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}}} \cdot 144 \text{ A} = 0,511 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Harmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-13 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-1 (Bsp. 1.6)

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

Der zulässige PWHIDI ist in Kapitel 1.5.4.2 angegeben.

1.6.4 Zwischenharmonische

1.6.4.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Zwischenharmonische nicht vorgesehen.

1.6.4.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_\mu = \frac{c(\mu)}{\mu + 0,5}, \text{ mit } c(\mu) = \begin{cases} 0,2 & \text{für } \mu = 1 \dots 30 \\ 0,3 & \text{für } \mu = 31 \dots 39 \\ 0,1 & \text{für } \mu = 3 \dots 39^{1)} \end{cases} \quad (\text{B-I Tab. 3-4})$$

¹⁾ gilt für die Zwischenharmonische bei bzw. in der Nähe der Rundsteuerfrequenz

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Zwischenharmonische der 20. Ordnung.

$$g_{20} = \frac{0,2}{20 + 0,5} = 9,8 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger zwischenharmonischer Strom:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_{\mu}} \cdot \frac{g_{\mu}}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-7})$$

z. B. Berechnung des 20. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{20 \text{ zul}} = \frac{1}{1,3} \cdot \frac{9,8 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{2,53 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}} \cdot 144 \text{ A} = 0,275 \text{ A}$$

Die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Ergibt sich für Zwischenharmonische ein Grenzwert I_{μ}/I_A grösser 2 %, so ist dieser Wert auf 2 % zu begrenzen. Das betrifft in diesem Fall die 1. – 2. Zwischenharmonische.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Zwischenharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-14 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7 (Bsp. 1.6)

μ	$g_{\mu} \cdot 10^{-3}$	k_{μ}	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_{\mu} \cdot 10^{-3}$	k_{μ}	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_{\mu} \cdot 10^{-3}$	k_{μ}	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$
1	133,3	1	2,9	14	13,8	1,3	0,4	27	3,6	1	0,3
2	80,0	1	2,9	15	12,9	1,3	0,4	28	3,5	1	0,3
3	57,1	1	2,1	16	12,1	1,3	0,3	29	3,4	1	0,3
4	44,4	1	1,6	17	11,4	1,3	0,3	30	6,6	1	0,2
5	36,4	1	1,3	18	10,8	1,3	0,3	31	9,5	1	0,3
6	30,8	1	1,1	19	10,3	1,3	0,3	32	9,2	1	0,3
7	26,7	1,3	0,7	20	9,8	1,3	0,3	33	9,0	1	0,3
8	23,5	1,3	0,7	21	9,3	1,3	0,3	34	8,7	1	0,3
9	21,1	1,3	0,6	22	8,9	1,3	0,2	35	8,5	1	0,3
10	19,0	1,3	0,5	23	8,5	1,3	0,2	36	8,2	1	0,3
11	17,4	1,3	0,5	24	8,2	1,3	0,2	37	8,0	1	0,3
12	16,0	1,3	0,4	25	3,9	1,3	0,2	38	7,8	1	0,3
13	14,8	1,3	0,4	26	3,8	1	0,3	39	7,6	1	0,3

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_v^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_{\mu}^2} \cdot 100 \% = 11,6 \% \quad (\text{B-I 3-8})$$

1.6.5 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

1.6.5.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Supraharmonische nicht vorgesehen.

1.6.5.2 Emissionsgrenzwerte

Zulässiger supraharmonischer Strom:

$k_b = 1$ (keine genaueren Angaben zu möglichen Resonanzen bekannt).

$r = 0,1$ für $S_{kV} \geq 2 \text{ MVA}$ (B-I Tab. 3-6).

$$I_{b \text{ zul}} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{3,3 \cdot b^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - b}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(r + (1 - r) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{S_{kV}}\right)} \quad (\text{B-I 3-9})$$

z. B. Berechnung des supraharmonischen Grenzwerts mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 5,1 kHz.

$$I_{5,1 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 5,1^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 5,1 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{2,53 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{5,1 \text{ zul}} = 0,74 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Supraharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-15 Supraharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-9 (Bsp. 1.6)

b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$
2,1	1	2,2	4,5	1	0,9	6,9	1	0,5
2,3	1	2,0	4,7	1	0,8	7,1	1	0,5
2,5	1	1,8	4,9	1	0,8	7,3	1	0,5
2,7	1	1,6	5,1	1	0,7	7,5	1	0,4
2,9	1	1,5	5,3	1	0,7	7,7	1	0,4
3,1	1	1,4	5,5	1	0,7	7,9	1	0,4
3,3	1	1,3	5,7	1	0,6	8,1	1	0,4
3,5	1	1,2	5,9	1	0,6	8,3	1	0,4
3,7	1	1,1	6,1	1	0,6	8,5	1	0,4
3,9	1	1,0	6,3	1	0,6	8,7	1	0,4
4,1	1	1,0	6,5	1	0,5	8,9	1	0,3
4,3	1	0,9	6,7	1	0,5			

1.6.6 Kommutierungseinbrüche

Da es sich um einen Antrieb mit gesteuertem netzgeführtem Stromrichter handelt, sind die Kommutierungseinbrüche zu beurteilen.

1.6.6.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Anschlussleistung der Stromrichteranlage:

$$S_{\text{SRA}} = S_{\text{A}} = 100 \text{ kVA}$$

Leistungsverhältnis $S_{\text{kV}}/S_{\text{SRA}}$:

$$\frac{S_{\text{kV}}}{S_{\text{SRA}}} = \frac{2,53 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}} = 25,3 \quad (\text{B-I Abb. 4-1})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{\text{kV}}/S_{\text{SRA}}$ liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 200, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Die detaillierte Beurteilung für Kommutierungseinbrüche ist nicht möglich, da die relative Kurzschlussspannung der Kommutierungsreaktanz u_{kKom} unbekannt ist. Die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten ist nötig.

1.6.6.2 Emissionsgrenzwerte

Relative Kurzschlussspannung der Kommutierungsreaktanz:

Die relative Tiefe der Kommutierungseinbrüche d_{Kom} durch netzgeführte Umrichter darf am Verknüpfungspunkt im ungünstigsten Betriebszustand 10 % nicht überschreiten.

$$d_{\text{Kom}} = K \cdot \sin(\alpha) \cdot \frac{6}{p} \cdot \left(u_{\text{kKom}} \cdot \frac{S_{\text{kV}}}{S_{\text{SRA}}} + 1 \right)^{-1} \quad (\text{B-I 4-1})$$

Durch vereinfachende Annahmen ($K = 1, \alpha = 90^\circ$) und die bekannte Stromrichterkonfiguration ($p = 6$) ergibt sich folgende Vereinfachung:

$$d_{\text{Kom}} = \left(u_{\text{kKom}} \cdot \frac{S_{\text{kV}}}{S_{\text{SRA}}} + 1 \right)^{-1} \quad (\text{B-I 4-3})$$

Umstellung nach u_{kKom} :

$$u_{\text{kKom}} = \left(\frac{1}{d_{\text{Kom}}} - 1 \right) \cdot \frac{S_{\text{SRA}}}{S_{\text{kV}}} \cdot 100 \% = \left(\frac{1}{0,1} - 1 \right) \cdot \frac{100 \text{ kVA}}{2,53 \text{ MVA}} \cdot 100 \%$$

$$u_{\text{kKom}} = 35,6 \%$$

Summe der Reaktanzen zwischen Anschlusspunkt und Stromrichter:

$$X_{k\text{Kom}} = \frac{u_{k\text{Kom}}}{100\ \%} \cdot \frac{U_n^2}{S_{\text{SRA}}} = \frac{35,6\ \%}{100\ \%} \cdot \frac{(400\ \text{V})^2}{100\ \text{kVA}} = 22,5\ \text{m}\Omega \quad (\text{A 7-5})$$

Die Kommutierungsreaktanz $X_{k\text{Kom}}$ müsste demnach mindestens 22,5 mΩ betragen, damit die Kommutierungseinbrüche im ungünstigsten Betriebszustand maximal 10 % betragen.

Da die erforderliche Kommutierungsreaktanz mit 35,6% deutlich über dem maximalen Empfehlungswert von 12,5 % liegt, ist es empfehlenswert eine Technologie zu verwenden, welche keine Kommutierungseinbrüche verursacht. Anderenfalls ist zu prüfen, ob der Antrieb bei der erforderlichen Kommutierungsreaktanz noch störungsfrei arbeiten kann.

1.7 Beurteilung einer AC-Ladeinfrastruktur

1.7.1 Beschreibung

Der Anschluss einer Ladeinfrastruktur mit insgesamt zwölf 22 kW-Ladesäulen soll beurteilt werden. Die beantragte Anschlussleistung beträgt 200 kVA. Der Kunde hat sich verpflichtet, für die Einhaltung der beantragten Leistung durch Abregelung zu sorgen. Die Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt S_{kV} beträgt 14,4 MVA bei einem Netzimpedanzwinkel von 63° . Der Verknüpfungspunkt befindet sich am Anschlusspunkt der Anlage. Die Bemessungsleistung des Trafos S_{rT} beträgt 1250 kVA. Die Rundsteuerfrequenz f_s liegt bei 217 Hz.

Im ungünstigsten Fall wird während eines 10-Minuten-Intervalls jede Minute ein zusätzliches Fahrzeug an eine freie Ladesäule angeschlossen. Pro Stunde tritt dieser ungünstigste Fall maximal einmal auf. Es wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Dauer des Ladevorgangs (in der Regel deutlich größer als 10 min) eine einzelne Ladesäule keine Flickerrelevanz hat.

1.7.2 Spannungsänderungen und Flicker

1.7.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Es handelt sich um eine Anlage mit mehreren Geräten und B-I Tab. 1-1 sollte im eigentlichen Sinn für einzelne Geräte angewendet werden. Damit ist keine vereinfachte Beurteilung möglich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Da jeweils nur eine Ladesäule zugeschaltet wird, kann als ungünstigste flickerrelevante Scheinleistungsänderung ihre Bemessungsleistung eingesetzt werden.

$$\Delta S_A = 22 \text{ kW}$$

Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$:

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} = \frac{14,4 \text{ MVA}}{22 \text{ kW}} = 654,5 \quad (\text{B-I Abb. 1-2})$$

Pro Minute wird nicht mehr als eine Ladesäule eingeschaltet ($r = 1 \text{ min}^{-1}$).

Minimal erforderliches Leistungsverhältnis $(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min}$ für $r < 10 \text{ min}^{-1}$ bei dreiphasigem Anschluss ($k = 1$):

$$(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min} = k \cdot 500 = 1 \cdot 500 = 500 \quad (\text{B-I Tab. 1-3})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$ liegt über dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 500 und erfüllt eine automatische Zulassung. Es wird dennoch empfohlen Emissionsgrenzwerte vorzugeben.

1.7.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Für eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (A Abb. 1-3) $d_{\text{grenz}} = 3 \text{ ‰}$.

Flicker

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung der Gleichzeitigkeitsfaktor $g = 1$, die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ (Anmerkung 3, B-I Kapitel 1.2.1) und der anteilige Beitrag für das NS-Netz zu $P_{\text{st NS ges}} = 0,8$ gewählt.

$$P_{\text{st NS V}} = \frac{P_{\text{st NS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{\text{r T}}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = \frac{0,8}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{200 \text{ kVA}}{1250 \text{ kVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = 0,28 \quad (\text{B-I 1-5})$$

(B-I 1-7)

$$P_{\text{st NS V}} < 0,3 \rightarrow P_{\text{st NS V}} = 0,3 \quad (\text{B-I Abb. 1-3})$$

$$P_{\text{lt NS V}} = 0,65 \cdot P_{\text{st NS V}} = 0,65 \cdot 0,28 = 0,18 \quad (\text{B-I 1-6})$$

$$P_{\text{lt NS V}} < 0,25 \rightarrow P_{\text{lt NS V}} = 0,25 \quad (\text{B-I Abb. 1-3})$$

Die berechneten Grenzwerte sind kleiner als jene Werte, die einer Kundenanlage mindestens zugestanden werden sollen. Deshalb wird der Kundenanlage $P_{\text{st NS V}} = 0,3$ und $P_{\text{lt NS V}} = 0,25$ zugestanden (gemäß B-I Abb. 1-3).

1.7.2.3 Rechnerische Bewertung

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

Da bei AC-Ladung nicht sichergestellt ist, dass jedes Fahrzeug über eine aktive Leistungsfaktor-korrektur verfügt, wird der $\cos$ -Term = 1 gesetzt.

$$d_V = \frac{\Delta S_A}{S_{\text{k V}}} \cdot 100 \text{ ‰} = \frac{22 \text{ kVA}}{14,4 \text{ MVA}} \cdot 100 \text{ ‰} = 0,15 \text{ ‰} \quad (\text{A 4-3})$$

Hinsichtlich schneller Spannungsänderungen sind keine Maßnahmen erforderlich.

Flicker

Für die Bewertung des Kurzzeit-Flickers wird der in der Beschreibung angegebene ungünstigste Fall betrachtet. Die Flickerstärke wird mithilfe der Referenzkurve berechnet. Gemäß Teil A Grundlagen Abb. 4-3: $d_{\text{ref}}(1 \text{ min}^{-1}) = 2,8 \text{ ‰}$.

$$P_{\text{st V}} = \frac{d_V}{d_{\text{ref}}} \cdot P_{\text{st ref}} = \frac{0,15 \text{ ‰}}{2,8 \text{ ‰}} \cdot 1 = 0,05 \quad (\text{A 4-19})$$

Im Zeitintervall für Langzeit-Flicker (2h) kann das Worst-Case-Ereignis maximal zwei Mal auftreten.

$$P_{ltV} = \sqrt[3]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{stVn}^3}{12}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 0,05^3}{12}} = 0,03 \quad (\text{A 4-20})$$

Die Emissionsgrenzwerte für Kurz- und Langzeit-Flicker werden eingehalten.

Langsame Spannungsänderungen (informativ)

Für die Bewertung der langsamen Spannungsänderungen wird die maximal auftretende Leistung (geregelte Gesamtleistung) berücksichtigt.

$$\Delta u_V = \frac{S_A}{S_{kV}} \cdot 100 \% = \frac{200 \text{ kVA}}{14,4 \text{ MVA}} \cdot 100 \% = 1,39 \% \quad (\text{A 4-3})$$

Bei der Berechnung handelt es sich um einen rein informativen Wert. Die Technischen Regeln beurteilen die langsamen Spannungsänderungen für Bezugsanlagen nicht und geben somit keinen Grenzwert vor. Die zulässige langsame Spannungsänderung wird auf Basis der individuellen Planungsrichtlinien des Netzbetreibers festgelegt.

1.7.3 Harmonische, Zwischenharmonische, Supraharmonische (2 – 9 kHz)

Die Beurteilung für Harmonische, Zwischenharmonische und Supraharmonischen sowie die Berechnung deren Emissionsgrenzwerte ist im Anhang zu Teil C im Kapitel 4.1 zu finden.

1.8 Beurteilung einer DC-Ladestation

1.8.1 Beschreibung

Eine 120 kW DC-Ladestation wird am NS-Netz angeschlossen. Die Anschlussleistung der Kundenanlage entspricht der Leistung der Ladestation, da diese das einzige Gerät in der Kundenanlage ist. Der Einschaltstrom beträgt 192,5 A. Die Anlage befindet sich 20 m von der Transformatorstation ($S_{rT} = 1250 \text{ kVA}$; $u_k = 6 \%$; $U_{nOS}/U_{nUS} = 20 \text{ kV}/0,4 \text{ kV}$) entfernt und ist über eine $4 \times 150 \text{ mm}^2$ Aluminiumleitung ($R'_L = 206 \text{ m}\Omega/\text{km}$; $X'_L = 67 \text{ m}\Omega/\text{km}$) angeschlossen. Der Verknüpfungspunkt befindet sich am Anschlusspunkt der Anlage. Die Kurzschlussleistung des übergeordneten Netzes beträgt $S_{kÜN} = 202 \text{ MVA}$ und der Netzwinkel $\psi_{ÜN} = 82^\circ$. Die Rundsteuerfrequenz liegt bei 217 Hz.

1.8.2 Berechnung Kurzschlussleistung

Vorgelagertes Netz:

$$\underline{Z}_{ÜNOS} = \frac{U_{nOS}^2}{(S_{kÜN} \angle \psi_{ÜN})^*} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{202 \text{ MVA} \angle -82^\circ} = 1,98 \Omega \angle 82^\circ \quad (\text{A 3-2})$$

bezogen auf 20 kV

$$\underline{Z}_{ÜNUS} = \underline{Z}_{ÜNOS} \cdot \left(\frac{U_{nUS}}{U_{nOS}} \right)^2 \quad (\text{A 3-17})$$

$$\underline{Z}_{ÜNUS} = 1,98 \Omega \angle 82^\circ \cdot \left(\frac{0,4 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 = 0,8 \text{ m}\Omega \angle 82^\circ \quad \text{bezogen auf 0,4 kV}$$

$$R_{ÜNUS} = Z_{ÜNUS} \cdot \cos(\psi_{ÜN}) = 0,8 \text{ m}\Omega \cdot \cos(82^\circ) = 0,11 \text{ m}\Omega$$

$$X_{ÜNUS} = Z_{ÜNUS} \cdot \sin(\psi_{ÜN}) = 0,8 \text{ m}\Omega \cdot \sin(82^\circ) = 0,78 \text{ m}\Omega$$

Transformator:

$$X_T = u_k \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = 6\% \cdot \frac{(400 \text{ V})^2}{1250 \text{ kVA}} = 7,68 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-7})$$

Leitung:

Für Aluminium- und Kupferleiter wird ein Temperaturkorrekturfaktor von 4 % je 10 K berücksichtigt.

$$R_L(20^\circ\text{C}) = R'_L \cdot l = 206 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,02 \text{ km} = 4,12 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-10})$$

$$R_L(70^\circ\text{C}) = R_L(20^\circ\text{C}) \cdot \left(1 + \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{\Delta T}{10} \right)$$

$$R_L(70^\circ\text{C}) = 4,12 \text{ m}\Omega \cdot \left(1 + \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{50 \text{ K}}{10} \right) = 4,94 \text{ m}\Omega$$

$$X_L = X'_L \cdot l = 70 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,02 \text{ km} = 1,4 \text{ m}\Omega \quad (\text{A 3-11})$$

Impedanz und Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt:

$$Z_{kV} = \sqrt{(X_{\ddot{U}N\ US} + X_T + X_L)^2 + (R_{\ddot{U}N\ US} + R_L)^2} \quad (\text{A 3-18})$$

$$Z_{kV} = \sqrt{(0,78\ \text{m}\Omega + 7,68\ \text{m}\Omega + 1,4\ \text{m}\Omega)^2 + (0,11\ \text{m}\Omega + 4,94\ \text{m}\Omega)^2} = 11,08\ \text{m}\Omega$$

$$\psi_V = \arctan\left(\frac{X_{\ddot{U}N\ US} + X_T + X_L}{R_{\ddot{U}N\ US} + R_L}\right) \quad (\text{A 3-5})$$

$$\psi_V = \arctan\left(\frac{0,78\ \text{m}\Omega + 7,68\ \text{m}\Omega + 1,4\ \text{m}\Omega}{0,11\ \text{m}\Omega + 4,94\ \text{m}\Omega}\right) = 62,9^\circ$$

$$S_{kV} = \frac{U_n^2}{Z_{kV}} = \frac{(400\ \text{V})^2}{11,08\ \text{m}\Omega} = 14,4\ \text{MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

1.8.3 Spannungsänderungen

1.8.3.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r :

$$\frac{S_{kV}}{S_r} = \frac{14,4\ \text{MVA}}{120\ \text{kVA}} = 120,3 \quad (\text{B-I Tab. 1-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 175 (B-I Tab. 1-1) für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

$$\Delta S_A = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_a = \sqrt{3} \cdot 400\ \text{V} \cdot 192,5\ \text{A} = 133,4\ \text{kVA}$$

Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$:

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} = \frac{14,4\ \text{MVA}}{133,4\ \text{kVA}} = 107,9 \quad (\text{B-I Abb. 1-2})$$

Es wird angenommen, dass die Kundenanlage nicht häufiger als 10 Mal pro Minute geschaltet wird.

Minimal erforderliches Leistungsverhältnis $(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min}$ für $r < 10 \text{ min}^{-1}$:

$$(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min} = k \cdot 500 = 1 \cdot 500 = 500 \quad (\text{B-I Tab. 1-3})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$ liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 500 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

1.8.3.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Für eine öffentliche DC-Schnellladestation ist eine Wiederholrate von $0,01 \text{ min}^{-1} \leq r < 0,1 \text{ min}^{-1}$ zu erwarten. Es ist keine Flickerbewertung nötig.

Für eine Wiederholrate $0,01 \text{ min}^{-1} \leq r < 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (A Abb. 1-3) $d_{\text{grenz}} = 3 \%$.

1.8.3.3 Rechnerische Beurteilung

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

Da der Winkel der Laständerung nicht bekannt ist, wird der cos-Term = 1 gesetzt.

$$d_V = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot 100 \% = \frac{133,4 \text{ kVA}}{14,4 \text{ MVA}} \cdot 100 \% = 0,9 \% \quad (\text{A 4-3})$$

Schnelle Spannungsänderungen kleiner 3 % am Verknüpfungspunkt sind erfüllt (B-I Kapitel 1.1.2). Der Anschluss kann bewilligt werden.

1.8.4 Harmonische, Zwischenharmonische, Supraharmonische (2 – 9 kHz)

Die Beurteilung für Harmonische, Zwischenharmonische und Supraharmonischen sowie die Berechnung deren Emissionsgrenzwerte ist im Anhang zu Teil C im Kapitel 4.2 zu finden.

1.9 Beurteilung eines Liftes

1.9.1 Beschreibung

Ein Lift mit Anlaufhilfe und einer Leistung von 101 kVA befindet sich am Hausanschluss ($S_{kAP} = 2 \text{ MVA}$). Die Anschlussleistung der Kundenanlage beträgt 220 kVA. Es gibt keine anderen Kundenanlagen an diesem Strang. Die Leitung wird nur für dieses Gebäude verwendet und daher wird auch in Zukunft keine weitere Kundenanlage an diesem Strang angeschlossen. Daher liegt in diesem Fall der Verknüpfungspunkt in der Trafostation. Die Bemessungsleistung des Trafos $S_{rT} = 400 \text{ kVA}$ und die Kurzschlussleistung in der Trafostation $S_{kV} = 17,03 \text{ MVA}$. Pro Stunde kommt es zu 30 Anläufen. Bei Anlauf des Liftes ist ein Strom von $I_a = 170,8 \text{ A}$ zu erwarten. Die Rundsteuerfrequenz beträgt 1029 Hz.

1.9.2 Spannungsänderungen und Flicker

1.9.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r :

$$\frac{S_{kV}}{S_r} = \frac{17,03 \text{ MVA}}{101 \text{ kVA}} = 168,6 \quad (\text{B-I Tab. 1-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r liegt über dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 75 (B-I Tab. 1-1) und erfüllt eine automatische Zulassung. Es wird dennoch empfohlen Emissionsgrenzwerte vorzugeben.

1.9.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

$$r = 30 \text{ h}^{-1} = 0,5 \text{ min}^{-1}$$

Für eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (A Abb. 1-3) $d_{\text{grenz}} = 3 \%$.

Flicker

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, werden gemäß Empfehlung der Gleichzeitigkeitsfaktor $g = 1$ und der anteilige Beitrag für das NS-Netz zu $P_{\text{st NS ges}} = 0,8$ gewählt. Da kein Anschluss von Erzeugungs- und Speichereinrichtungen zu erwarten ist, wurde $k_B + k_E + k_S = 1$ gewählt.

$$P_{\text{st NS V}} = \frac{P_{\text{st NS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{rT}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = \frac{0,8}{\sqrt{1}} \cdot \sqrt{\frac{220 \text{ kVA}}{400 \text{ kVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = 0,59 \quad (\text{B-I 1-5})$$

(B-I 1-7)

$$P_{\text{It NS V}} = 0,65 \cdot P_{\text{st NS V}} = 0,65 \cdot 0,59 = 0,39 \quad (\text{B-I 1-6})$$

1.9.2.3 Rechnerische Bewertung

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

$$\Delta S_A = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_a = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 170,8 \text{ A} = 118,3 \text{ kVA} \quad (\text{A 4-18})$$

$$d_{\max \text{ AP}} = \frac{\Delta S_A}{S_{k \text{ AP}}} \cdot 100 \% = \frac{118,3 \text{ kVA}}{2 \text{ MVA}} \cdot 100 \% = 5,9 \% \quad (\text{A 4-3})$$

$$d_{\max \text{ V}} = \frac{S_{k \text{ AP}}}{S_{k \text{ V}}} \cdot d_{\max \text{ AP}} = \frac{2 \text{ MVA}}{17,03 \text{ MVA}} \cdot 5,9 \% = 0,7 \% \quad (\text{A 4-38})$$

Schnelle Spannungsänderung kleiner 3 % am Verknüpfungspunkt sind erfüllt (B-I Kapitel 1.1.2).

Flicker

Für die Bewertung des Kurzzeit-Flickers wird angenommen, dass die Anläufe näherungsweise regelmäßig auftreten. Da der Spannungsänderungsverlauf nicht bekannt ist, wird von einem rechteckförmigen Verlauf ausgegangen. Die Flickerstärke wird mithilfe der Referenzkurve berechnet. Gemäß Teil A Grundlagen Abb. 4-3: $d_{\text{ref}}(0,5 \text{ min}^{-1}) = 3,5 \%$.

$$P_{\text{st V}} = \frac{d_{\max \text{ V}}}{d_{\text{ref}}} \cdot P_{\text{st ref}} = \frac{0,7 \%}{3,5 \%} \cdot 1 = 0,2 \quad (\text{A 4-19})$$

Da die Anlage innerhalb eines 2h-Intervalls dauernd im Betrieb ist, gilt $P_{\text{lt V}} = P_{\text{st V}} = 0,2$.

Die zu erwartende Flickerstärke ist kleiner als die zulässige Kurz- und Langzeitflickerstärke. Die Anlage kann bewilligt werden.

1.9.3 Harmonische, Zwischenharmonische, Supraharmonische (2 – 9 kHz)

Die Beurteilung für Harmonische, Zwischenharmonische und Supraharmonischen sowie die Berechnung deren Emissionsgrenzwerte ist im Anhang zu Teil C im Kapitel 4.3 zu finden.

1.10 Beurteilung einer Ladestation für das Zwischenladen von Elektrobussen

1.10.1 Beschreibung

Ein Betreiber des öffentlichen Personennahverkehrs plant seine Busflotte auf batterieelektrische Busse umzustellen. Dies bedingt nicht nur die Beschaffung von E-Bussen, sondern auch von Gelegenheitsladestationen, welche an verschiedenen Punkten entlang der Busroute installiert werden sollen.

Exemplarisch wird eine Ladestation mit einer Bemessungsleistung von $S_r = 600 \text{ kW}$ ($\cos(\varphi) = 1.0$) für das Zwischenladen auf einer längeren Buslinie beurteilt. Die Bemessungsleistung entspricht gleichzeitig der vereinbarten Anschlussleistung. Die Anlage wird an einem bestehenden Transformator mit einer Bemessungsleistung von $S_{rT} = 1 \text{ MVA}$ angeschlossen. Die Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt S_{kV} beträgt 14 MVA und am Anschlusspunkt S_{kAP} 6,3 MVA. Der Netzwinkel am Anschlusspunkt beträgt $\psi_{AP} 63^\circ$. Die Rundsteuerfrequenz liegt bei 317 Hz. Es ist nicht auszuschließen, dass zukünftig Erzeugungs- und Speicheranlagen in dem Netz angeschlossen werden, es sind jedoch keine konkreten Angaben bekannt.

Die Ladestation wird in beide Richtungen verwendet. Die Busperiodizität beträgt während Stoßzeiten fünf Busse (N) pro zehn Minuten (T).

1.10.2 Spannungsänderungen und Flicker

1.10.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r :

$$\frac{S_{kV}}{S_r} = \frac{14 \text{ MVA}}{600 \text{ kVA}} = 23,3 \quad (\text{B-I Tab. 1-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_r liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 175 (B-I Tab. 1-1) für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Da keine Begrenzung der Ladeleistung vorgesehen ist, entspricht die Leistungsänderung der Kundenanlage der Bemessungsleistung der Ladestation.

$$\Delta S_A = S_r = 600 \text{ kVA}$$

Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$:

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} = \frac{14 \text{ MVA}}{600 \text{ kVA}} = 23,3 \quad (\text{B-I Abb. 1-2})$$

Wiederholrate:

Pro Ladevorgang kommt es zu zwei Laständerungen. Die Wiederholrate ist daher doppelt so hoch wie die Busperiodizität.

$$r = 2 \cdot \frac{N}{T} = 2 \cdot \frac{5}{10 \text{ min}} = 1 \text{ min}^{-1}$$

Minimal erforderliches Leistungsverhältnis $(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min}$ für $r < 10 \text{ min}^{-1}$:

$$(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min} = k \cdot 500 = 1 \cdot 500 = 500 \quad (\text{B-I Tab. 1-3})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$ liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 500 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

1.10.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Für eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (B-I Abb. 1-3) $d_{\text{grenz}} = 3 \text{ \%}$.

Flicker

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, werden gemäß Empfehlung der Gleichzeitigkeitsfaktor $g = 1$, der anteilige Beitrag für das NS-Netz zu $P_{\text{st NS ges}} = 0,8$ und $k_B + k_E + k_S = 1,35$ gewählt.

$$P_{\text{st NS V}} = \frac{P_{\text{st NS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{rT}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = \frac{0,8}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{600 \text{ kVA}}{1 \text{ MVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = 0,53 \quad (\text{B-I 1-5})$$

(B-I 1-7)

$$P_{\text{It NS V}} = 0,65 \cdot P_{\text{st NS V}} = 0,65 \cdot 0,53 = 0,34 \quad (\text{B-I 1-6})$$

1.10.2.3 Rechnerische Bewertung

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

$$d_{\text{AP}} = \frac{\Delta S_A}{S_{kAP}} \cdot \cos(\psi_{\text{AP}} - \varphi) \cdot 100 \text{ \%} \quad (\text{A 4-3})$$

$$d_{\text{AP}} = \frac{600 \text{ kVA}}{6,3 \text{ MVA}} \cos(63^\circ - 0^\circ) \cdot 100 \text{ \%} = 4,3 \text{ \%}$$

$$d_V = \frac{S_{kAP}}{S_{kV}} \cdot d_{\text{max AP}} = \frac{6,3 \text{ MVA}}{14 \text{ MVA}} \cdot 4,3 \text{ \%} = 1,9 \text{ \%} \quad (\text{A 4-38})$$

Schnelle Spannungsänderungen kleiner 3 % am Verknüpfungspunkt sind erfüllt (B-I Kapitel 1.1.2).

Flicker

Für die Bewertung des Kurzzeit-Flickers wird der in der Beschreibung angegebene ungünstigste Fall betrachtet. Die Flickerstärke wird mithilfe der Referenzkurve berechnet. Gemäß Teil A Grundlagen Abb. 4-3: $d_{\text{ref}}(1 \text{ min}^{-1}) = 2,8 \text{ ‰}$.

$$P_{\text{st AP}} = \frac{d_{\text{max AP}}}{d_{\text{ref}}} \cdot P_{\text{st ref}} = \frac{4,3 \text{ ‰}}{2,8 \text{ ‰}} \cdot 1 = 1,54 \quad (\text{A 4-19})$$

$$P_{\text{st V}} = \frac{S_{\text{k AP}}}{S_{\text{k V}}} \cdot P_{\text{st AP}} = \frac{6,3 \text{ MVA}}{14 \text{ MVA}} \cdot 1,54 = 0,69 \quad (\text{A 4-39})$$

Es wird davon ausgegangen, dass der ungünstigste Fall im Zeitintervall für Langzeit-Flicker (2h) auftreten kann.

$$P_{\text{lt V}} = P_{\text{st V}} = 0,69$$

Die Emissionsgrenzwerte für Kurz- und Langzeit-Flicker werden nicht eingehalten. Es sind Maßnahmen zu ergreifen.

1.10.3 Harmonische, Zwischenharmonische, Supraharmonische (2 – 9 kHz)

Die Beurteilung für Harmonische, Zwischenharmonische und Supraharmonischen sowie die Berechnung deren Emissionsgrenzwerte ist im Anhang zu Teil C im Kapitel 4.4 zu finden.

1.11 Beurteilung einer Eigenverbrauchsgemeinschaft (EVG)

1.11.1 Beschreibung

Die Eigenverbrauchsgemeinschaft (EVG) besteht aus zwei Mehrfamilienhäusern mit 18 Wohnungen. Zu den Gebäuden gehören Wärmepumpen zum Heizen, eine PV-Dachanlage mit einer Leistung von 50 kW und 6 Ladepunkte in der Tiefgarage. Eine kleine Werkstatt, die eine Schweißmaschine betreibt, gehört ebenfalls zur EVG.

Die vereinbarte Anschlussleistung der EVG beträgt $S_A = 175 \text{ kVA}$ und die Kurzschlussleistung am VP (entspricht der ÜS) $S_{kV} = 2,5 \text{ MVA}$ und $\psi_{kV} = 30^\circ$. Das NS-Netz wird von einem Transformator mit einer Bemessungsleistung $S_{rT} = 400 \text{ kVA}$ versorgt. Die Rundsteuerfrequenz beträgt 317 Hz.

Der VNB hat die Anteilsfaktoren für das NS-Netz, an welches die EVG angeschlossen werden soll, zu $k_B = 1,0$, $k_E = 0,5$ und $k_S = 0$ bestimmt. Die erste Parallelresonanzstelle liegt bei ungefähr $f_{res} = 600 \text{ Hz}$. Zudem hat der VNB den flickerrelevanten Gleichzeitigkeitsfaktor auf $g = 0,7$ und den anteiligen Beitrag des Netzes auf $P_{stNS ges} = 0,8$ festgelegt. Die kleinste Kurzschlussleistung in dem vom betrachteten Ortsnetztransformator versorgten NS-Netz wurde durch den VNB mittels Netzberechnung zu 1,5 MVA berechnet.

1.11.2 Spannungsänderungen und Flicker

1.11.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Es handelt sich um eine Anlage mit mehreren Geräten und B-I Tab. 1-1 sollte im eigentlichen Sinn für einzelne Geräte angewendet werden. Damit ist keine vereinfachte Beurteilung möglich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Eine Beurteilung nach Stufe 2 ist nicht möglich, da für die Kombination mehrerer flickererzeugender Geräte keine ungünstigste flickerrelevante Scheinleistungsänderung bestimmbar ist. Die Beschreibung liefert zudem keine genauen Angaben zu den einzelnen Geräten der EVG.

1.11.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Es wird angenommen, dass eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ auftreten kann.

Für eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (A Abb. 1-3) $d_{\text{grenz}} = 3 \%$.

Flicker

$$k_B + k_E + k_S = 1,0 + 0,5 + 0 = 1,5$$

$$P_{stNSV} = \frac{P_{stNS ges}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{rT}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = \frac{0,8}{\sqrt{1,5}} \cdot \sqrt{\frac{175 \text{ kVA}}{400 \text{ kVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{0,7}} = 0,52 \quad \begin{matrix} \text{(B-I 1-5)} \\ \text{(B-I 1-7)} \end{matrix}$$

$$P_{ItNSV} = 0,65 \cdot P_{stNSV} = 0,65 \cdot 0,52 = 0,34 \quad \text{(B-I 1-6)}$$

1.11.3 Unsymmetrie

1.11.3.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{2.5 \text{ MVA}}{175 \text{ kVA}} = 14,3 \quad (\text{B-I Abb. 2-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 500 (B-I Abb. 2-1) für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Eine Beurteilung nach Stufe 2 ist nicht möglich, da der unsymmetrische Anteil der Geräte der Anlage unbekannt ist. Die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten ist erforderlich.

1.11.3.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktor der Unsymmetrie:

$$s = 20 \text{ für } S_{rT} = 400 \text{ kVA und } S_{k\min} = 1,5 \text{ MVA} \quad (\text{B-I Tab. 2-1})$$

Zulässiger Gegensystemstrom der Kundenanlage:

$$I_2 = \frac{s}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-I 2-1})$$

$$I_2 = \frac{20}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,5}} \cdot \sqrt{\frac{2,5 \text{ MVA}}{175 \text{ kVA}}} \cdot 252,6 \text{ A} = 15,6 \text{ A}$$

Zulässige unsymmetrische Leistung der Kundenanlage:

$$S_{A\text{un}} = \frac{s}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot S_A \quad (\text{B-I 2-2})$$

$$S_{A\text{un}} = \frac{20}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,5}} \cdot \sqrt{\frac{2,5 \text{ MVA}}{175 \text{ kVA}}} \cdot 175 \text{ kVA} = 10,8 \text{ kVA}$$

Anhand der unsymmetrischen Leistung lässt sich leicht feststellen, dass z. B. das einphasige Laden von 3 EVs mit 3,7 kVA in derselben Phase zur gleichen Zeit bei symmetrischer Verteilung der restlichen Leistung akzeptabel ist (geringe Überschreitung um 0,3 kW).

1.11.4 Harmonische

1.11.4.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{2,5 \text{ MVA}}{175 \text{ kVA}} = 14,29 \quad (\text{B-I Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 150 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Eine Beurteilung nach Stufe 2 ist nicht möglich, da die Beschreibung keine genauen Angaben zu den einzelnen überschwingungserzeugenden Geräten der EVG liefert. Die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten ist erforderlich.

1.11.4.2 Emissionsgrenzwerte

Impedanzwinkelfaktor:

$$\frac{X}{R} = \tan(\psi_k) = \tan(30^\circ) = 0,58$$

$$\rightarrow k_{XR} = 0,65 \quad (\text{A Tab. 6-4})$$

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{175 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 252,6 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

Da die erste Parallelresonanzstelle bekannt ist, kann Variante 2 (A 6.2.3.2) angewendet werden:

$k_{v/\mu} = 1$ für $f/f_N < (f_{\text{res}}/f_N - 2,5)$ & $k_{v/\mu} = 1,4$ für $(f_{\text{res}}/f_N - 2,5) \leq f/f_N \leq (f_{\text{res}}/f_N + 2,5)$ & $k_{v/\mu} = 1$ für $f/f_N > (f_{\text{res}}/f_N + 2,5)$

Mit $f_{\text{res}} = 600 \text{ Hz}$ haben die 10. – 14. Harmonischen einen erhöhten Resonanzfaktor.

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_v}{1000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \frac{1}{k_{XR}} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-1})$$

z. B. Berechnung des 5. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{5 \text{ zul}} = \frac{13,1}{1000} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{0,65} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,5}} \cdot \sqrt{\frac{2,5 \text{ MVA}}{175 \text{ kVA}}} \cdot 252,6 \text{ A} = 15,71 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Harmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-16 Zulässige Harmonische gemäß B-I 3-1 (Bsp. 1.11)

v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/\text{A}$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/\text{A}$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/\text{A}$
2	4,5	1	5,4	15	0,3	1	0,4	28	0,4	1	0,5
3	5,7	1	6,8	16	0,9	1	1,1	29	1,0	1	1,2
4	2,9	1	3,5	17	2,6	1	3,1	30	0,3	1	0,4
5	13,1	1	15,7	18	0,5	1	0,6	31	0,9	1	1,1
6	1,1	1	1,3	19	2,1	1	2,5	32	0,4	1	0,5
7	7,8	1	9,4	20	0,7	1	0,8	33	0,1	1	0,1
8	1,2	1	1,4	21	0,2	1	0,2	34	0,4	1	0,5
9	1,2	1	1,4	22	0,6	1	0,7	35	0,7	1	0,8
10	1,6	1,4	1,4	23	1,6	1	1,9	36	0,2	1	0,3
11	5,1	1,4	4,4	24	0,4	1	0,5	37	0,7	1	0,8
12	0,8	1,4	0,7	25	1,4	1	1,7	38	0,3	1	0,4
13	3,7	1,4	3,2	26	0,5	1	0,6	39	0,1	1	0,1
14	1,0	1,4	0,9	27	0,1	1	0,1	40	0,3	1	0,4

Der zulässige PWHIDI ist in Kapitel 1.11.5.2 angegeben.

1.11.5 Zwischenharmonische

1.11.5.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Zwischenharmonische nicht vorgesehen.

1.11.5.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_{\mu} = \frac{c(\mu)}{\mu + 0,5}, \text{ mit } c(\mu) = \begin{cases} 0,2 & \text{für } \mu = 1 \dots 30 \\ 0,3 & \text{für } \mu = 31 \dots 39 \\ 0,1 & \text{für } \mu = 3 \dots 39^{1)} \end{cases} \quad (\text{B-I Tab. 3-4})$$

¹⁾ gilt für die Zwischenharmonische bei bzw. in der Nähe der Rundsteuerfrequenz

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Zwischenharmonische der 7. Ordnung.

$$g_7 = \frac{0,1}{7 + 0,5} = 13,3 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger zwischenharmonischer Strom:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_{\mu}} \cdot \frac{g_{\mu}}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-I 3-7})$$

z. B. Berechnung des 7. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{7 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{13,3 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{2,5 \text{ MVA}}{175 \text{ kVA}} \cdot 252,6 \text{ A} = 0,48 \text{ A}$$

Die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Für Zwischenharmonische zwischen 3 ... 39 bei bzw. in der Nähe (± 100 Hz) der Rundsteuerfrequenz gilt $g_{\mu} = 0,1/(\mu+0,5)$. Bei einer Rundsteuerfrequenz von 317 Hz sind die 4. – 8. Zwischenharmonische betroffen.

Ergibt sich für Zwischenharmonische ein Grenzwert I_{μ}/I_A grösser 2 %, so ist dieser Wert auf 2 % zu begrenzen. Das betrifft in diesem Fall keine Zwischenharmonische.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Zwischenharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 1-17 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7 (Bsp. 1.11)

μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$
1	133,3	1	4,8	14	13,8	1,4	0,4	27	7,3	1	0,3
2	80,0	1	2,9	15	12,9	1	0,5	28	7,0	1	0,3
3	57,1	1	2,1	16	12,1	1	0,4	29	6,8	1	0,2
4	22,2	1	0,8	17	11,4	1	0,4	30	6,6	1	0,2
5	18,2	1	0,7	18	10,8	1	0,4	31	9,5	1	0,3
6	15,4	1	0,6	19	10,3	1	0,4	32	9,2	1	0,3
7	13,3	1	0,5	20	9,8	1	0,4	33	9,0	1	0,3
8	11,8	1	0,4	21	9,3	1	0,3	34	8,7	1	0,3
9	21,1	1	0,8	22	8,9	1	0,3	35	8,5	1	0,3
10	19,0	1,4	0,5	23	8,5	1	0,3	36	8,2	1	0,3
11	17,4	1,4	0,5	24	8,2	1	0,3	37	8,0	1	0,3
12	16,0	1,4	0,4	25	7,8	1	0,3	38	7,8	1	0,3
13	14,8	1,4	0,4	26	7,5	1	0,3	39	7,6	1	0,3

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_{v \text{ zul}}^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_{\mu \text{ zul}}^2} \cdot 100 \% = 10,8 \% \quad (\text{B-I 3-8})$$

1.11.6 Supraharmonische

1.11.6.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Supraharmonische nicht vorgesehen.

1.11.6.2 Emissionsgrenzwerte

Zulässiger supraharmonischer Strom:

$k_b = 1$ (keine genaueren Angaben zu möglichen Resonanzen bekannt).

$r = 0,1$ für $S_{kV} \geq 2 \text{ MVA}$ (B-I Tab. 3-6).

$$I_{b \text{ zul}} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{3,3 \cdot b^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - b}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(r + (1 - r) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{S_{kV}}\right)} \quad (\text{B-I 3-9})$$

z. B. Berechnung des supraharmischen Grenzwerts mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 2,1 kHz.

$$I_{2,1 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 2,1^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 2,1 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{2,5 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{2,1 \text{ zul}} = 2,19 \text{ A}$$

Die supraharmischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 1-18 Zulässige Supraharmische gemäß B-I 3-9 (Bsp. 1.11)

b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$
2,1	1	2,19	4,5	1	0,86	6,9	1	0,49
2,3	1	1,98	4,7	1	0,81	7,1	1	0,47
2,5	1	1,79	4,9	1	0,77	7,3	1	0,45
2,7	1	1,63	5,1	1	0,73	7,5	1	0,43
2,9	1	1,49	5,3	1	0,69	7,7	1	0,42
3,1	1	1,38	5,5	1	0,66	7,9	1	0,40
3,3	1	1,28	5,7	1	0,63	8,1	1	0,39
3,5	1	1,19	5,9	1	0,60	8,3	1	0,38
3,7	1	1,11	6,1	1	0,57	8,5	1	0,36
3,9	1	1,03	6,3	1	0,55	8,7	1	0,35
4,1	1	0,97	6,5	1	0,53	8,9	1	0,34
4,3	1	0,91	6,7	1	0,51			

2. Anwendung der Technischen Regeln MS

2.1 Übersicht

Die nachstehende Tabelle Tab. 2-1 gibt eine Übersicht der Beispiele für Kundenanlagen zum Anschluss an das Mittelspannungsnetz. Basierend auf der Charakteristik der Kundenanlage wird eine Übersicht der zur Beurteilung exemplarisch ausgewählten Netzzrückwirkungen gegeben.

Tab. 2-1 Übersicht Beispiele MS

	Berechnung Kurzschlussleistung	Schnelle Spannungsänderungen	Flicker	Unsymmetrie	Harmonische Zwischenharmonische Supraharmonische	Signalspannungen
2.2 Beurteilung einer Punktschweißmaschine <i>Kundenanlage mit häufigen Anläufen und hohem Anlaufstrom. Last zwischen Außenleiter und Außenleiter. Rechnerische Bewertung der Flickerstärke anhand des analytischen Verfahrens.</i>		x	x	x		
2.3 Beurteilung einer Seilbahn <i>Kundenanlage mit Stromrichter erzeugt Oberschwingungen.</i>					x	
2.4 Beurteilung einer PV-Anlage <i>Beurteilung von Spannungsänderungen und Verzerrung (niedriger THDi).</i>					x	
2.5 Beurteilung eines Aluminiumwerks <i>Erhöhung der Anlagenleistung. Begrenzte Informationen zu Verbrauchertypen. Vorgabe von Emissionsgrenzwerten für unterschiedliche Phänomene. Bewertung der Signalspannungen.</i>			x	x	x	x

2.2 Beurteilung einer Punktschweißmaschine

2.2.1 Beschreibung

In der Kundenanlage soll eine Punktschweißmaschine zwischen zwei Außenleitern des Drehstromnetzes angeschlossen werden. Die Widerstandsschweißmaschine bildet den einzigen Verursacher von Netzurückwirkungen innerhalb der Anlage, d.h. die übrigen Geräte können gegenüber der Schweißmaschine vernachlässigt werden. Der Verknüpfungspunkt liegt auf der MS-Seite der kundeneigenen Transformatorstation. In diesem Falle fallen Anschlusspunkt und Verknüpfungspunkt zusammen. Es sind folgende Daten bekannt:

MS-Verknüpfungspunkt:

$$S_{kV} = 125 \text{ MVA}; \psi_{kV} = 67^\circ$$

Daten des Mittelspannungsnetzes:

HS/MS Transformator	$S_{rT} = 30 \text{ MVA}$
Vereinbarte Versorgungsspannung	$U_c = 10 \text{ kV}$
geplanter Anteil der Bezugsanlagen	$k_B = 0,8$
geplanter Anteil der Erzeugungsanlagen	$k_E = 0,5$
geplanter Anteil der Speichereinrichtungen (derzeit keine Anlagen geplant)	$k_S = 0$
Gleichzeitigkeitsfaktor	$g = 1,0$
anteiliger Beitrag des MS-Netzes	$P_{st \text{ MS ges}} = 0,7$

Daten der Kundenanlage bzw. der Schweißmaschine:

Anschlussleistung der Kundenanlage	$S_A = 100 \text{ kVA}$
Höchstschweißleistung	$S_{A \text{ max}} = 240 \text{ kVA}$
Leistungsfaktor	$\cos(\varphi) = 0,8$
Schweißpulse je Minute	$r = 60 \text{ min}^{-1}; t_p = 240 \text{ ms}$

Die ununterbrochene Betriebsdauer erstreckt sich über ein 40-min-Intervall. Aufgrund des technischen Betriebsablaufs steht die Anlage dann für ca. 2 h still.

Schaltgruppe des Netztransformators: Dy5.

2.2.2 Spannungsänderungen und Flicker

2.2.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Eine vereinfachte Beurteilung ist für Kundenanlagen zum Anschluss an das MS-Netz nicht vorgesehen.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Scheinleistungsänderung:

$$\Delta S_A = S_{A \max} = 240 \text{ kVA}$$

Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$:

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} = \frac{125 \text{ MVA}}{240 \text{ kVA}} = 521 \quad (\text{B-II Abb. 1-1})$$

Erforderliches Leistungsverhältnis $(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min}$:

$$(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min} = 135 \cdot k \cdot \sqrt[3]{r/\text{min}^{-1}} = 135 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt[3]{60} = 915 \quad (\text{B-II Tab. 1-2})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$ liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 915 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

2.2.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Für eine Wiederholrate $r > 0,1 \text{ min}^{-1}$ gilt gemäß (B-II Abb. 1-2) $d_{\text{grenz}} = 2 \%$.

Flicker

Die Summe der Ausbaufaktoren beträgt $k_B + k_E + k_S = 1,3$.

$$P_{\text{st MS V}} = \frac{P_{\text{st MS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{rT}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} \quad (\text{B-II 1-9})$$

$$P_{\text{st MS V}} = \frac{0,7}{\sqrt{1,3}} \cdot \sqrt{\frac{100 \text{ kVA}}{30 \text{ MVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = 0,04 < 0,35 \quad (\text{B-II 1-11})$$

$$P_{\text{st MS V}} = 0,35, P_{\text{lt MS V}} = 0,25$$

2.2.2.3 Rechnerische Bewertung

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

Für die flickerrelevante Spannungsänderung auf der Oberspannungsseite des Dreieck-Stern-Transformators ist die größte Spannungsänderung zu berücksichtigen.

$$d_{L1-L2} = \sqrt{3} \cdot \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi + 30^\circ) \cdot 100 \% \quad (\text{A 4-14})$$

$$d_{L1-L2} = \sqrt{3} \cdot \frac{240 \text{ kVA}}{125 \text{ MVA}} \cdot \cos(67^\circ - 37^\circ + 30^\circ) \cdot 100 \% = 0,17 \%$$

$$d_{L2-L3} = \sqrt{3} \cdot \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi - 30^\circ) \cdot 100 \% \quad (\text{A 4-15})$$

$$d_{L2-L3} = \sqrt{3} \cdot \frac{240 \text{ kVA}}{125 \text{ MVA}} \cdot \cos(67^\circ - 37^\circ - 30^\circ) \cdot 100 \% = 0,33 \%$$

$$d_{L3-L1} = 0 \quad (\text{A 4-16})$$

Flicker

$R = 0,9$ für $r = 60 \text{ min}^{-1}$ (A Abb. 4-5)

$F = 1,0$ (A Abb. 4-6).

$$P_{st} = 0,365 \cdot F \cdot R \cdot |d_{\max}/\%| \cdot \sqrt[3,2]{r/\text{min}^{-1}} \quad (\text{A 4-22})$$

$$P_{st} = 0,365 \cdot 1,3 \cdot 0,9 \cdot 0,33 \cdot \sqrt[3,2]{60} = 0,51$$

Die zulässige Kurzzeit-Flickerstärke wird überschritten. Der Anschluss kann nur mit zusätzlichen Maßnahmen bewilligt werden.

Zusätzliche Betrachtung (dreiphasiger Anschluss):

Beim Einsatz einer Schweißmaschine (gleiche technische Daten und gleiche Betriebsweise) mit Drehstromanschluss (3-phasig) ergeben sich folgende Werte:

Schnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

$$d_{\max} = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot \cos(\psi_{kV} - \varphi) \cdot 100 \% \quad (\text{A 4-3})$$

$$d_{\max} = \frac{240 \text{ kVA}}{125 \text{ MVA}} \cdot \cos(67^\circ - 37^\circ) \cdot 100 \% = 0,17 \%$$

Flicker

$$P_{st} = 0,365 \cdot F \cdot R \cdot |d_{\max}/\%| \cdot \sqrt[3,2]{r/\text{min}^{-1}} \quad (\text{A 4-22})$$

$$P_{st} = 0,365 \cdot 1,3 \cdot 0,9 \cdot 0,17 \cdot \sqrt[3,2]{60} = 0,26$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{st\,i\,n}^3}{12}} = \sqrt[3]{\frac{4}{12} \cdot 0,26^3} = 0,18 \quad (\text{A 4-20})$$

Die Emissionsgrenzwerte für Kurzzeit- und Langzeit-Flickerstärke werden eingehalten.

2.2.3 Unsymmetrie**2.2.3.1 Beurteilung**Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{125 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}} = 1250 \quad (\text{B-II Abb. 2-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt über dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 500 (B-II Abb. 2-1). Der Anschluss ist zulässig in Bezug auf Unsymmetrie. Es wird dennoch empfohlen Emissionsgrenzwerte vorzugeben.

2.2.3.2 EmissionsgrenzwerteZulässiger Gegensystemstrom der Kundenanlage:

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ gemäß Anmerkung 2, B-II Kapitel 2.2 gewählt.

Da keine spezifischen Angaben des VNB zur kleinsten Kurzschlussleistung im MS-Netz vorliegen, wird gemäß Empfehlung $s = 15$ (B-II Kapitel 2-2) verwendet.

$$I_{2V} = \frac{s}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-II 2-1})$$

$$I_{2V} = \frac{15}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{125 \text{ MVA}}{100 \text{ kVA}}} \cdot 5,8 \text{ A} = 2,7 \text{ A}$$

Der Kundenanlage kann ein minimaler Beitrag zur Unsymmetrie gemäß B-II Kapitel 2-2 zugestanden werden.

$$I_{2V} = \frac{1}{500} \cdot \frac{S_{kV}}{\sqrt{3} \cdot U_c} = 14,4 \text{ A} \quad (\text{B-II 2-7})$$

Da die Kundenanlage jedoch nur eine Anschlussleistung von 100 kVA hat entspricht der Grenzwert dem Anlagenstrom $I_A = 5,8 \text{ A}$.

2.3 Beurteilung einer Seilbahn

2.3.1 Beschreibung

Ein Seilbahnbetrieb soll mit einer Anschlussleistung von $S_A = 500 \text{ kVA}$ über einen Transformator mit einer Leistung $S_{rT} = 630 \text{ kVA}$ ($u_{kT} = 4 \%$) an das Mittelspannungsnetz (10 kV) angeschlossen werden. Der Antrieb des Gleichstrommotors erfolgt über einen gesteuerten netzgeführten Stromrichter in Drehstrombrückenschaltung (6-pulsig) ($S_{rStr} = S_A$). Die Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt (Mittelspannungsseite der Transformatorstation) beträgt $S_{kV} = 60 \text{ MVA}$. Die Rundsteuerfrequenz beträgt 1029 Hz. Der Anschluss von Erzeugungsanlagen und Speichern im MS-Netz kann nicht ausgeschlossen werden, weitere Angaben liegen nicht vor.

2.3.2 Harmonische

2.3.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{60 \text{ MVA}}{500 \text{ kVA}} = 120 \quad (\text{B-II Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 300 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Zur Bestimmung des Oberschwingungserzeugenden Anteils der Anschlussleistung werden die Oberschwingungserzeuger den drei Gruppen zugeordnet (A Kap. 6.7).

Es sind keine Angaben zum THDi des 6-pulsigen-Gleichrichters bekannt. Daher wird er der Gruppe 3 zugeordnet (ungünstigster Fall).

Tab. 2-2 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsanteils (Bsp. 2.3)

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
gesteuerter Gleichrichter (6-pulsig)			500 kVA

Oberschwingungserzeugender Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = 2 \cdot 500 \text{ kVA} = 1 \text{ MVA} \quad (\text{B-II 3-7})$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{1 \text{ MVA}}{500 \text{ kVA}} = 2$$

Zulässiges Verhältnis zwischen dem überschwingungserzeugenden Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage und der Anlagenleistung:

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A}\right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{300}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{300}} \cdot \sqrt{\frac{60 \text{ MVA}}{500 \text{ kVA}}} = 0,63 \quad (\text{B-II 3-6})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{OS}/S_A = 2$ liegt über dem maximal zulässigen Leistungsverhältnis von 0,63 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

2.3.2.2 Emissionsgrenzwerte

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{500 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 10 \text{ kV}} = 28,9 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

Der Anschluss von Erzeugungs- und Speichereinrichtungen ist geplant, jedoch sind keine weiteren Angaben bekannt, daher gilt $k_B + k_E + k_S = 1,35$ (gemäß Anmerkung 2, B-II Kapitel 3.1.2).

Da die erste Parallelresonanzstelle unbekannt ist, wird „Variante 3: Verallgemeinerte Berücksichtigung der ersten Parallelresonanzstelle“ (A 6.2.3.3) angewendet: $k_{v/\mu} = 1,5$ für $2 \leq f/f_N \leq 19$, andernfalls $k_{v/\mu} = 1$ (A Tab 6-3).

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_v}{1000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-1})$$

z. B. Berechnung des 15. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{15 \text{ zul}} = \frac{0,4}{1000} \cdot \frac{1}{1,5} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{60 \text{ MVA}}{500 \text{ kVA}}} \cdot 28,9 \text{ A} = 0,073 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 2-3 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-II 3-1 (Bsp. 2.3)

ν	p_ν	k_ν	$I_{\nu \text{ zul}}/\text{A}$	ν	p_ν	k_ν	$I_{\nu \text{ zul}}/\text{A}$	ν	p_ν	k_ν	$I_{\nu \text{ zul}}/\text{A}$
2	4,8	1,5	0,87	15	0,4	1,5	0,07	28	0,3	1	0,08
3	5,1	1,5	0,93	16	0,6	1,5	0,11	29	0,7	1	0,19
4	2,6	1,5	0,47	17	2,1	1,5	0,38	30	0,3	1	0,08
5	12,4	1,5	2,25	18	0,5	1,5	0,09	31	0,6	1	0,16
6	1,0	1,5	0,18	19	1,6	1,5	0,29	32	0,2	1	0,05
7	7,4	1,5	1,34	20	0,4	1	0,11	33	0,1	1	0,03
8	0,9	1,5	0,16	21	0,2	1	0,05	34	0,2	1	0,05
9	1,2	1,5	0,22	22	0,4	1	0,11	35	0,5	1	0,14
10	1,1	1,5	0,20	23	1,2	1	0,33	36	0,2	1	0,05
11	4,3	1,5	0,78	24	0,3	1	0,08	37	0,5	1	0,14
12	0,8	1,5	0,15	25	1,0	1	0,27	38	0,2	1	0,05
13	3,1	1,5	0,56	26	0,3	1	0,08	39	0,1	1	0,03
14	0,7	1,5	0,13	27	0,1	1	0,03	40	0,2	1	0,05

2.3.3 Zwischenharmonische

2.3.3.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Zwischenharmonische nicht vorgesehen.

2.3.3.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_\mu = \frac{c(\mu)}{\mu + 0,5}, \text{ mit } c(\mu) = \begin{cases} 0,1 \text{ für } \mu = 1 \dots 2 \\ 0,2 \text{ für } \mu = 3 \dots 30 \\ 0,3 \text{ für } \mu = 31 \dots 39 \\ 0,1 \text{ für } \mu = 3 \dots 39^{1)} \end{cases} \quad (\text{B-II Tab. 3-3})$$

¹⁾ gilt für die Zwischenharmonische bei bzw. in der Nähe der Rundsteuerfrequenz

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Zwischenharmonische der 8. Ordnung.

$$g_8 = \frac{0,2}{8 + 0,5} = 23,5 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger zwischenharmonischer Strom der Kundenanlage:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_{\mu}} \cdot \frac{g_{\mu}}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-8})$$

z. B. Berechnung des 8. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{8 \text{ zul}} = \frac{1}{1,5} \cdot \frac{23,5 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{60 \text{ MVA}}{500 \text{ kVA}} \cdot 28,9 \text{ A} = 0,543 \text{ A}$$

Die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Für Zwischenharmonische zwischen 3 ... 39 bei bzw. in der Nähe ($\pm 100 \text{ Hz}$) der Rundsteuerfrequenz gilt $g_{\mu} = 0,1/(\mu+0,5)$. Bei einer Rundsteuerfrequenz von 1029 Hz sind die 18. – 22. Zwischenharmonische betroffen.

Ergibt sich für Zwischenharmonische ein Grenzwert I_{μ}/I_A grösser 2 %, so ist dieser Wert auf 2 % zu begrenzen. Das betrifft in diesem Fall die 1. – 7. Zwischenharmonische.

Tab. 2-4 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-II 3-8 (Bsp. 2.3)

μ	$g_{\mu} \cdot 10^{-3}$	k_{μ}	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_{\mu} \cdot 10^{-3}$	k_{μ}	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_{\mu} \cdot 10^{-3}$	k_{μ}	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$
1	66,7	1	0,58	14	13,8	1,5	0,32	27	7,3	1	0,25
2	40,0	1,5	0,58	15	12,9	1,5	0,30	28	7,0	1	0,24
3	57,1	1,5	0,58	16	12,1	1,5	0,28	29	6,8	1	0,24
4	44,4	1,5	0,58	17	11,4	1,5	0,26	30	6,6	1	0,23
5	36,4	1,5	0,58	18	5,4	1,5	0,12	31	9,5	1	0,33
6	30,8	1,5	0,58	19	5,1	1,5	0,12	32	9,2	1	0,32
7	26,7	1,5	0,58	20	4,9	1	0,17	33	9,0	1	0,31
8	23,5	1,5	0,54	21	4,7	1	0,16	34	8,7	1	0,30
9	21,1	1,5	0,49	22	4,4	1	0,15	35	8,5	1	0,29
10	19,0	1,5	0,44	23	8,5	1	0,30	36	8,2	1	0,29
11	17,4	1,5	0,40	24	8,2	1	0,28	37	8,0	1	0,28
12	16,0	1,5	0,37	25	7,8	1	0,27	38	7,8	1	0,27
13	14,8	1,5	0,34	26	7,5	1	0,26	39	7,6	1	0,26

2.3.4 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

2.3.4.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Supraharmonische nicht vorgesehen.

2.3.4.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_b = 1,015 \cdot b^{-0,52} \cdot \left(\frac{0,05 \text{ kHz}}{b} \right) \quad (\text{B-II 3-10})$$

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Supraharmonische mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 5,3 kHz.

$$g_{5,3} = 1,015 \cdot 5,3^{-0,52} \cdot \left(\frac{0,05 \text{ kHz}}{5,3 \text{ kHz}} \right) = 4,0 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger supraharmonischer Strom:

$k_b = 1$ (keine genaueren Angaben zu möglichen Resonanzen bekannt).

$$I_{b \text{ zul}} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{g_b}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-9})$$

z. B. Berechnung des supraharmonischen Grenzwerts mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 5,3 kHz.

$$I_{5,3 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{4,0 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{60 \text{ MVA}}{500 \text{ kVA}} \cdot 28,9 \text{ A} = 0,139 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 2-5 Supraharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-II 3-9 (Bsp. 2.3)

b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$
2,1	16,4	1	0,57	4,5	5,2	1	0,18	6,9	2,7	1	0,09
2,3	14,3	1	0,50	4,7	4,8	1	0,17	7,1	2,6	1	0,09
2,5	12,6	1	0,44	4,9	4,5	1	0,16	7,3	2,5	1	0,09
2,7	11,2	1	0,39	5,1	4,3	1	0,15	7,5	2,4	1	0,08
2,9	10,1	1	0,35	5,3	4,0	1	0,14	7,7	2,3	1	0,08
3,1	9,1	1	0,32	5,5	3,8	1	0,13	7,9	2,2	1	0,08
3,3	8,8	1	0,29	5,7	3,6	1	0,12	8,1	2,1	1	0,07
3,5	7,6	1	0,26	5,9	3,4	1	0,12	8,3	2,0	1	0,07
3,7	6,9	1	0,24	6,1	3,2	1	0,11	8,5	2,0	1	0,07
3,9	6,4	1	0,22	6,3	3,1	1	0,11	8,7	1,9	1	0,07
4,1	5,9	1	0,21	6,5	2,9	1	0,10	8,9	1,8	1	0,06
4,3	5,5	1	0,19	6,7	2,8	1	0,10				

2.4 Beurteilung einer PV-Anlage

2.4.1 Beschreibung

Eine PV-Anlage mit einer Gesamtmodulleistung von 2250 kWp wird über 11 Wechselrichter ($S_{WR} = 110 \text{ kVA}$) an das MS-Netz ($U_c = 21 \text{ kV}$) am Verknüpfungspunkt angeschlossen. Die Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt beträgt $S_{kV} = 125 \text{ MVA}$ und der Netzwinkel $\psi_V = 55^\circ$. Die Rundsteuerfrequenz beträgt 492 Hz. Annahmen bzgl. der Ausbaufaktoren sind nicht bekannt.

Die Anschlussleistung der Kundenanlage wird aus der Wechselrichterleistung berechnet.

$$S_A = 11 \cdot S_{WR} = 11 \cdot 110 \text{ kVA} = 1210 \text{ kVA}$$

Die Spannungsanhebung (langsame Spannungsänderungen) ist unter Berücksichtigung aller anderen Erzeugungs- und Speicheranlagen des MS-Netzes mittels Netzberechnung zu bestimmen.

Die Einschaltung des/der Anlagentransformatoren kann schnelle Spannungsänderungen verursachen, welche ggf. gesondert zu betrachten sind.

2.4.2 Harmonische

2.4.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{125 \text{ MVA}}{1210 \text{ kVA}} = 103,3 \quad (\text{B-II Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 300 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Zur Bestimmung des Oberschwingungserzeugenden Anteils der Anschlussleistung werden die Oberschwingungserzeuger den drei Gruppen zugeordnet (A Kap. 6.7).

Tab. 2-6 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsanteils (Bsp. 2.4)

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
PV-Anlage	1210 kVA		

Oberschwingungserzeugender Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = \frac{1}{2} \cdot 1210 \text{ kVA} = 605 \text{ kVA} \quad (\text{B-II 3-7})$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{605 \text{ kVA}}{1210 \text{ kVA}} = 0,5$$

Zulässiges Verhältnis zwischen dem Oberschwingungserzeugenden Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage und der Anlagenleistung:

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A}\right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{300}} \cdot \sqrt{\frac{S_{KV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{300}} \cdot \sqrt{\frac{125 \text{ MVA}}{1210 \text{ kVA}}} = 0,59 \quad (\text{B-II 3-6})$$

Das Leistungsverhältnis S_{OS}/S_A liegt unterhalb des maximal zulässigen Leistungsverhältnisses von 0,59. Daher ist eine automatische Zulassung erfüllt. Es wird dennoch empfohlen Emissionsgrenzwerte vorzugeben.

2.4.2.2 Emissionsgrenzwerte

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{1210 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 21 \text{ kV}} = 33,3 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

Da die erste Parallelresonanzstelle unbekannt ist, wird „Variante 3: Verallgemeinerte Berücksichtigung der ersten Parallelresonanzstelle“ (A 6.2.3.3) angewendet: $k_{v/\mu} = 1,5$ für $2 \leq f/f_N \leq 19$, andernfalls $k_{v/\mu} = 1$ (A Tab 6-3).

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ (Anmerkung 2, B-II Kapitel 1.3.2) gewählt.

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_v}{1000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{KV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-1})$$

z. B. Berechnung des 27. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{27 \text{ zul}} = \frac{0,1}{1000} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{125 \text{ MVA}}{1210 \text{ kVA}}} \cdot 33,3 \text{ A} = 0,029 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 2-7 Zulässige Harmonische gemäß B-II 3-1 (Bsp. 2.4)

v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/A$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/A$	v	p_v	k_v	$I_{v \text{ zul}}/A$
2	4,8	1,5	0,93	15	0,4	1,5	0,08	28	0,3	1	0,09
3	5,1	1,5	0,99	16	0,6	1,5	0,12	29	0,7	1	0,20
4	2,6	1,5	0,50	17	2,1	1,5	0,41	30	0,3	1	0,09
5	12,4	1,5	2,41	18	0,5	1,5	0,10	31	0,6	1	0,17
6	1,0	1,5	0,19	19	1,6	1,5	0,31	32	0,2	1	0,06
7	7,4	1,5	1,44	20	0,4	1	0,12	33	0,1	1	0,03
8	0,9	1,5	0,17	21	0,2	1	0,06	34	0,2	1	0,06
9	1,2	1,5	0,23	22	0,4	1	0,12	35	0,5	1	0,15
10	1,1	1,5	0,21	23	1,2	1	0,35	36	0,2	1	0,06
11	4,3	1,5	0,84	24	0,3	1	0,09	37	0,5	1	0,15
12	0,8	1,5	0,16	25	1,0	1	0,29	38	0,2	1	0,06
13	3,1	1,5	0,60	26	0,3	1	0,09	39	0,1	1	0,03
14	0,7	1,5	0,14	27	0,1	1	0,03	40	0,2	1	0,06

2.4.3 Zwischenharmonische

2.4.3.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Zwischenharmonische nicht vorgesehen.

2.4.3.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_\mu = \frac{c(\mu)}{\mu + 0,5}, \text{ mit } c(\mu) = \begin{cases} 0,1 \text{ für } \mu = 1 \dots 2 \\ 0,2 \text{ für } \mu = 3 \dots 30 \\ 0,3 \text{ für } \mu = 31 \dots 39 \\ 0,1 \text{ für } \mu = 3 \dots 39^{1)} \end{cases} \quad (\text{B-II Tab. 3-3})$$

¹⁾ gilt für die Zwischenharmonische bei bzw. in der Nähe der Rundsteuerfrequenz

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Zwischenharmonische der 35. Ordnung.

$$g_{35} = \frac{0,3}{35 + 0,5} = 8,5 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger zwischenharmonischer Strom:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_\mu} \cdot \frac{g_\mu}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-8})$$

z. B. Berechnung des 35. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{35 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{8,5 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{125 \text{ MVA}}{1210 \text{ kVA}} \cdot 33,3 \text{ A} = 0,292 \text{ A}$$

Die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Für Zwischenharmonische zwischen 3 ... 39 bei bzw. in der Nähe ($\pm 100 \text{ Hz}$) der Rundsteuerfrequenz gilt $g_\mu = 0,1/(\mu+0,5)$. Bei einer Rundsteuerfrequenz von 492 Hz sind die 7. – 11. Zwischenharmonische betroffen.

Ergibt sich für Zwischenharmonische ein Grenzwert I_μ/I_A grösser 2 %, so ist dieser Wert auf 2 % zu begrenzen. Das betrifft in diesem Fall die 1. – 6. Zwischenharmonische.

Tab. 2-8 Zulässige Zwischenharmonische gemäß B-II 3-8 (Bsp. 2.4)

μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu \text{ zul}}/\text{A}$
1	66,7	1	0,67	14	13,8	1,5	0,32	27	7,3	1	0,25
2	40,0	1,5	0,67	15	12,9	1,5	0,30	28	7,0	1	0,24
3	57,1	1,5	0,67	16	12,1	1,5	0,28	29	6,8	1	0,23
4	44,4	1,5	0,67	17	11,4	1,5	0,26	30	6,6	1	0,23
5	36,4	1,5	0,67	18	10,8	1,5	0,25	31	9,5	1	0,33
6	30,8	1,5	0,67	19	10,3	1,5	0,24	32	9,2	1	0,32
7	13,3	1,5	0,31	20	9,8	1	0,34	33	9,0	1	0,31
8	11,8	1,5	0,27	21	9,3	1	0,32	34	8,7	1	0,30
9	10,5	1,5	0,24	22	8,9	1	0,31	35	8,5	1	0,29
10	9,5	1,5	0,22	23	8,5	1	0,29	36	8,2	1	0,28
11	8,7	1,5	0,20	24	8,2	1	0,28	37	8,0	1	0,28
12	16,0	1,5	0,37	25	7,8	1	0,27	38	7,8	1	0,27
13	14,8	1,5	0,34	26	7,5	1	0,26	39	7,6	1	0,26

2.4.4 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

2.4.4.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Supraharmonische nicht vorgesehen.

2.4.4.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_b = 1,015 \cdot b^{-0,52} \cdot \left(\frac{0,05 \text{ kHz}}{b} \right) \quad (\text{B-II 3-10})$$

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Supraharmonische mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 7,5 kHz.

$$g_{7,5} = 1,015 \cdot 7,5^{-0,52} \cdot \left(\frac{0,05 \text{ kHz}}{7,5 \text{ kHz}} \right) = 2,4 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger supraharmonischer Strom:

$k_b = 1$ (keine genaueren Angaben zu möglichen Resonanzen bekannt).

$$I_{b \text{ zul}} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{g_b}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-9})$$

z. B. Berechnung des supraharmonischen Grenzwerts mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 7,5 kHz.

$$I_{7,5 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{2,4 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{125 \text{ MVA}}{1210 \text{ kVA}} \cdot 33,3 \text{ A} = 0,083 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 2-9 Zulässige Supraharmonische gemäß B-II 3-9 (Bsp. 2.4)

b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$
2,1	16,4	1	0,57	4,5	5,2	1	0,18	6,9	2,7	1	0,09
2,3	14,3	1	0,49	4,7	4,8	1	0,17	7,1	2,6	1	0,09
2,5	12,6	1	0,43	4,9	4,5	1	0,16	7,3	2,5	1	0,09
2,7	11,2	1	0,39	5,1	4,3	1	0,15	7,5	2,4	1	0,08
2,9	10,1	1	0,35	5,3	4,0	1	0,14	7,7	2,3	1	0,08
3,1	9,1	1	0,31	5,5	3,8	1	0,13	7,9	2,2	1	0,08
3,3	8,8	1	0,28	5,7	3,6	1	0,12	8,1	2,1	1	0,07
3,5	7,6	1	0,26	5,9	3,4	1	0,12	8,3	2,0	1	0,07
3,7	6,9	1	0,24	6,1	3,2	1	0,11	8,5	2,0	1	0,07
3,9	6,4	1	0,22	6,3	3,1	1	0,11	8,7	1,9	1	0,07
4,1	5,9	1	0,20	6,5	2,9	1	0,10	8,9	1,8	1	0,06
4,3	5,5	1	0,19	6,7	2,8	1	0,10				

2.5 Beurteilung eines Aluminiumwerks

2.5.1 Beschreibung

Der Betreiber eines Aluminiumwerks ist an das MS-Netz ($U_c = 21 \text{ kV}$) angeschlossen und möchte seine Anschlussleistung von 7 MVA auf 16 MVA erhöhen. Grund ist die Wärmeerzeugung, welche von Gas auf Strom umgestellt werden soll. Die einzelnen dafür erforderlichen Geräte sind nicht bekannt. Der Verknüpfungspunkt liegt auf der MS-Seite der Transformatorstation.

Informationen zum Netzanschluss:

$$S_{kV} \angle \psi = 218 \text{ MVA} \angle 88^\circ$$

$$S_{rT} = 40 \text{ MVA}$$

$$U_c = 21 \text{ kV}$$

2.5.2 Spannungsänderungen und Flicker

2.5.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Eine vereinfachte Beurteilung ist für Kundenanlagen zum Anschluss an das MS-Netz nicht vorgesehen.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Die maximale Scheinleistungsänderung ist unbekannt. Eine detaillierte Beurteilung ist deshalb nicht möglich.

2.5.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Bei unbekannter Wiederholrate gilt gemäß (B-II Abb. 1-2) der niedrigste Grenzwert $d_{\text{grenz}} = 2 \%$.

Flicker:

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung der Gleichzeitigkeitsfaktor $g = 1$ und die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ (Anmerkung 3, B-II Kapitel 1.2.2) gewählt.

Für den anteiligen Beitrag zur Flickerstärke wird der empfohlene Wert $P_{\text{st MS ges}} = 0,7$ gewählt (B-II Kapitel 1.2.1).

$$P_{\text{st MS V}} = \frac{P_{\text{st MS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{rT}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} = \frac{0,7}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{16 \text{ MVA}}{40 \text{ MVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1}} = 0,38 \quad \begin{matrix} \text{(B-II 1-9)} \\ \text{(B-II 1-11)} \end{matrix}$$

$$P_{\text{It MS V}} = 0,65 \cdot P_{\text{st MS V}} = 0,65 \cdot 0,38 = 0,25 \quad \text{(B-II 1-10)}$$

2.5.3 Unsymmetrie

2.5.3.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{218 \text{ MVA}}{16 \text{ MVA}} = 14 \quad (\text{B-I Abb. 2-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 500 (B-II Abb. 2-1), d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Genauere Kenntnisse zum Anteil der unsymmetrischen Leistung der Kundenanlage sind nicht verfügbar. Die detaillierte Beurteilung kann deshalb nicht durchgeführt werden. Eine automatische Zulassung ist nicht möglich, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

2.5.3.2 Emissionsgrenzwerte

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{16 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 21 \text{ kV}} = 440 \text{ A}$$

Zulässiger Gegensystemstrom:

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ gemäß Anmerkung 2, B-II Kapitel 2.2 gewählt.

Da keine spezifischen Angaben des VNB zur kleinsten Kurzschlussleistung im MS-Netz vorliegen, wird gemäß Empfehlung $s = 15$ (B-II Kapitel 2-2) verwendet.

$$I_{2V} = \frac{s}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-II 2-1})$$

$$I_{2V} = \frac{15}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{218 \text{ MVA}}{16 \text{ MVA}}} \cdot 439,9 \text{ A} = 21,0 \text{ A}$$

2.5.4 Harmonische

2.5.4.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{218 \text{ MVA}}{16 \text{ kVA}} = 14 \quad (\text{B-II Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 300 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die detaillierte Beurteilung erforderlich.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Zur Bestimmung des Oberschwingungserzeugenden Anteils der Anschlussleistung werden die Oberschwingungserzeuger den drei Gruppen zugeordnet (A Kap. 6.7). Da keine Angaben zu den Einrichtungen innerhalb der Kundenanlage bekannt sind, kann keine detaillierte Beurteilung durchgeführt werden. Eine automatische Zulassung ist nicht möglich, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

2.5.4.2 Emissionsgrenzwerte

Zulässiger Oberschwingungsstrom:

Da keine spezifischen Angaben vom VNB vorliegen, wird gemäß Empfehlung die Summe der Ausbaufaktoren zu $k_B + k_E + k_S = 1,35$ (Anmerkung 2, B-II Kapitel 1.3.2) gewählt.

Da die erste Parallelresonanzstelle unbekannt ist, wird „Variante 3: Verallgemeinerte Berücksichtigung der ersten Parallelresonanzstelle“ (A 6.2.3.3) angewendet: $k_{v/\mu} = 1,5$ für $2 \leq f/f_N \leq 19$, andernfalls $k_{v/\mu} = 1$ (A Tab 6-3).

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_v}{1000} \cdot \frac{1}{k_v} \cdot \frac{1}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kv}}{S_A}} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-1})$$

z. B. Berechnung des 23. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{23 \text{ zul}} = \frac{1,2}{1000} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{218 \text{ MVA}}{16 \text{ MVA}}} \cdot 440,0 \text{ A} = 1,677 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 2-10 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-II 3-1 (Bsp. 2.5)

ν	p_ν	k_ν	$I_{\nu \text{ zul}}/\text{A}$	ν	p_ν	k_ν	$I_{\nu \text{ zul}}/\text{A}$	ν	p_ν	k_ν	$I_{\nu \text{ zul}}/\text{A}$
2	4,8	1,5	4,47	15	0,4	1,5	0,37	28	0,3	1	0,42
3	5,1	1,5	4,75	16	0,6	1,5	0,56	29	0,7	1	0,98
4	2,6	1,5	2,42	17	2,1	1,5	1,96	30	0,3	1	0,42
5	12,4	1,5	11,56	18	0,5	1,5	0,47	31	0,6	1	0,84
6	1,0	1,5	0,93	19	1,6	1,5	1,49	32	0,2	1	0,28
7	7,4	1,5	6,90	20	0,4	1	0,56	33	0,1	1	0,14
8	0,9	1,5	0,84	21	0,2	1	0,28	34	0,2	1	0,28
9	1,2	1,5	1,12	22	0,4	1	0,56	35	0,5	1	0,70
10	1,1	1,5	1,03	23	1,2	1	1,68	36	0,2	1	0,28
11	4,3	1,5	4,01	24	0,3	1	0,42	37	0,5	1	0,70
12	0,8	1,5	0,75	25	1,0	1	1,40	38	0,2	1	0,28
13	3,1	1,5	2,89	26	0,3	1	0,42	39	0,1	1	0,14
14	0,7	1,5	0,65	27	0,1	1	0,14	40	0,2	1	0,28

2.5.5 Zwischenharmonische

2.5.5.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Zwischenharmonische nicht vorgesehen.

2.5.5.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_\mu = \frac{c(\mu)}{\mu + 0,5}, \text{ mit } c(\mu) = \begin{cases} 0,1 \text{ für } \mu = 1 \dots 2 \\ 0,2 \text{ für } \mu = 3 \dots 30 \\ 0,3 \text{ für } \mu = 31 \dots 39 \\ 0,1 \text{ für } \mu = 3 \dots 39^{1)} \end{cases} \quad (\text{B-II Tab. 3-3})$$

¹⁾ gilt für die Zwischenharmonische bei bzw. in der Nähe der Rundsteuerfrequenz

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Zwischenharmonische der 8. Ordnung.

$$g_4 = \frac{0,1}{4 + 0,5} = 22,2 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger zwischenharmonischer Strom:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_\mu} \cdot \frac{g_\mu}{100} \cdot \frac{S_{\text{kV}}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-8})$$

z. B. Berechnung des 4. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{4\text{ zul}} = \frac{1}{1,5} \cdot \frac{23,5 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{218 \text{ MVA}}{16 \text{ MVA}} \cdot 440,0 \text{ A} = 0,887 \text{ A}$$

Die zwischenharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Für Zwischenharmonische zwischen 3 ... 39 bei bzw. in der Nähe ($\pm 100 \text{ Hz}$) der Rundsteuerfrequenz gilt $g_\mu = 0,1/(\mu+0,5)$. Bei einer Rundsteuerfrequenz von 216,66 Hz sind die 3. – 6. Zwischenharmonische betroffen.

Ergibt sich für Zwischenharmonische ein Grenzwert I_μ/I_A grösser 2 %, so ist dieser Wert auf 2 % zu begrenzen. Das betrifft in diesem Fall keine Zwischenharmonische.

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden die zulässigen Zwischenharmonischen auf eine Nachkommastelle gerundet.

Tab. 2-11 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-II 3-8 (Bsp. 2.5)

μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu\text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu\text{ zul}}/\text{A}$	μ	$g_\mu \cdot 10^{-3}$	k_μ	$I_{\mu\text{ zul}}/\text{A}$
1	66,7	1	4,0	14	13,8	1,5	0,6	27	7,3	1	0,4
2	40,0	1,5	1,6	15	12,9	1,5	0,5	28	7,0	1	0,4
3	28,6	1,5	1,1	16	12,1	1,5	0,5	29	6,8	1	0,4
4	22,2	1,5	0,9	17	11,4	1,5	0,5	30	6,6	1	0,4
5	18,2	1,5	0,7	18	10,8	1,5	0,4	31	9,5	1	0,6
6	15,4	1,5	0,6	19	10,3	1,5	0,4	32	9,2	1	0,6
7	26,7	1,5	1,1	20	9,8	1	0,6	33	9,0	1	0,5
8	23,5	1,5	0,9	21	9,3	1	0,6	34	8,7	1	0,5
9	21,1	1,5	0,8	22	8,9	1	0,5	35	8,5	1	0,5
10	19,0	1,5	0,8	23	8,5	1	0,5	36	8,2	1	0,5
11	17,4	1,5	0,7	24	8,2	1	0,5	37	8,0	1	0,5
12	16,0	1,5	0,6	25	7,8	1	0,5	38	7,8	1	0,5
13	14,8	1,5	0,6	26	7,5	1	0,5	39	7,6	1	0,5

2.5.6 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

2.5.6.1 Beurteilung

Eine Beurteilung auf der Grundlage von Leistungsverhältnissen ist für Supraharmonische nicht vorgesehen.

2.5.6.2 Emissionsgrenzwerte

Proportionalitätsfaktoren:

$$g_b = 1,015 \cdot b^{-0,52} \cdot \left(\frac{0,05 \text{ kHz}}{b} \right) \quad (\text{B-II 3-10})$$

z. B. Berechnung des Proportionalitätsfaktors für Supraharmonische mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 7,5 kHz.

$$g_{3,1} = 1,015 \cdot 3,1^{-0,52} \cdot \left(\frac{0,05 \text{ kHz}}{3,1 \text{ kHz}} \right) = 1,4 \cdot 10^{-3}$$

Zulässiger supraharmonischer Strom:

$k_b = 1$ (keine genaueren Angaben zu möglichen Resonanzen bekannt).

$$I_{b \text{ zul}} = \frac{1}{k_b} \cdot \frac{g_b}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A \quad (\text{B-II 3-9})$$

z. B. Berechnung des supraharmonischen Grenzwerts mit der Mittenfrequenz des Frequenzbandes von 3,1 kHz.

$$I_{3,1 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{218 \text{ MVA}}{16 \text{ MVA}} \cdot 440,0 \text{ A} = 0,546 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 2-12 Supraharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-II 3-9 (Bsp. 2.5)

b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$	b/kHz	$g_b \cdot 10^{-3}$	k_b	$I_{b \text{ zul}}/\text{A}$
2,1	16,4	1	0,99	4,5	5,2	1	0,31	6,9	2,7	1	0,16
2,3	14,3	1	0,86	4,7	4,8	1	0,29	7,1	2,6	1	0,15
2,5	12,6	1	0,76	4,9	4,5	1	0,27	7,3	2,5	1	0,15
2,7	11,2	1	0,67	5,1	4,3	1	0,26	7,5	2,4	1	0,14
2,9	10,1	1	0,60	5,3	4,0	1	0,24	7,7	2,3	1	0,14
3,1	9,1	1	0,55	5,5	3,8	1	0,23	7,9	2,2	1	0,13
3,3	8,8	1	0,50	5,7	3,6	1	0,22	8,1	2,1	1	0,13
3,5	7,6	1	0,45	5,9	3,4	1	0,20	8,3	2,0	1	0,12
3,7	6,9	1	0,42	6,1	3,2	1	0,19	8,5	2,0	1	0,12
3,9	6,4	1	0,38	6,3	3,1	1	0,19	8,7	1,9	1	0,11
4,1	5,9	1	0,36	6,5	2,9	1	0,18	8,9	1,8	1	0,11
4,3	5,5	1	0,33	6,7	2,8	1	0,17				

2.5.7 Signalspannungen

2.5.7.1 Pegelbeeinflussung

Anschlussimpedanz bei 50 Hz:

$$Z_A = \frac{U_n^2}{S_A} = \frac{(21 \text{ kV})^2}{16 \text{ MVA}} = 27,6 \, \Omega \quad (\text{B-II Abb. 5-1})$$

Für Bezugsanlagen mit Verknüpfungspunkt im MS-Netz gilt

$$\varepsilon = \frac{Z_{\text{TRA}}}{Z_A} \geq 0,4$$

Dementsprechend darf die Impedanz bei Rundsteuerfrequenz (bezogen auf 20 kV) den folgenden Wert nicht unterschreiten:

$$Z_{\text{TRA}} = Z_A \cdot \varepsilon = 27,6 \, \Omega \cdot 0,4 = 11 \, \Omega \quad (\text{B-II 5-1})$$

3. Anwendung der Technischen Regeln HS

3.1 Übersicht

Die nachstehende Tabelle Tab. 3-1 gibt eine Übersicht der Beispiele für Kundenanlagen zum Anschluss an das Hochspannungsnetz. Basierend auf der Charakteristik der Kundenanlage wird eine Übersicht der zur Beurteilung exemplarisch ausgewählten Netzzrückwirkungen gegeben.

Tab. 3-1 Übersicht Beispiele HS

	Berechnung Kurzschlussleistung	Schnelle Spannungsänderungen	Flicker	Unsymmetrie	Harmonische Zwischenharmonische Supraharmonische	Signalspannungen
3.2 Beurteilung eines Verdichters <i>Kundenanlage mit häufigen Anläufen. Beurteilung der Flickerstärke anhand des analytischen Verfahrens.</i>		x	x			

3.2 Beurteilung eines Verdichters

3.2.1 Beschreibung

Es ist ein Industriebetrieb ($S_A = 60 \text{ MVA}$) zu beurteilen, der im werkseigenen Mittelspannungsnetz einen Verdichter betreibt. Der Verdichter ist die einzige flickererzeugende Komponente in der Kundenanlage und ist jeweils über weniger als 10 Minuten in Betrieb (kein Dauerbetrieb). Es kommt hierbei zu etwa einem Schaltvorgang des Verdichters pro Minute. Es erfolgt maximal ein Betriebszyklus je 2-h-Intervall. Die schaltbedingte Leistungsänderung beträgt nach Herstellerangaben $\Delta S_A = 15 \text{ MVA}$.

Die bei Schaltvorgängen auftretenden schnellen Spannungsänderungen und Flickerstärke sind zu bewerten. Der Gleichzeitigkeitsfaktor wurde durch den VNB mit $g = 0,3$ angenommen.

Das HS-Netz verfügt über eine Einspeisung ($S_{rT} = S_{N,HS} = 250 \text{ MVA}$). Die Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt des Industriebetriebes wurde zu $S_{kV} = 1100 \text{ MVA}$ ermittelt.

Es ist zusätzlich mittelfristig mit dem Anschluss von Erzeugungsanlagen und Speichern im HS-Netz zu rechnen. Aufgrund der einzelnen Einspeisung wird durch den VNB $k_B + k_E + k_S = 1,35$ festgelegt.

3.2.2 Spannungsänderungen und Flicker

3.2.2.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Eine vereinfachte Beurteilung ist für Kundenanlagen zum Anschluss an das HS-Netz nicht vorgesehen.

Detaillierte Beurteilung (Stufe 2)

Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$:

$$\frac{S_{kV}}{\Delta S_A} = \frac{1100 \text{ MVA}}{15 \text{ MVA}} = 73,3 \quad (\text{B-III Abb. 1-1})$$

Erforderliches Leistungsverhältnis $(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min}$ für $r < 10 \text{ min}^{-1}$:

$$(S_{kV}/\Delta S_A)_{\min} = k \cdot 300 = 1 \cdot 300 = 300 \quad (\text{B-III Tab. 1-2})$$

Das Leistungsverhältnis $S_{kV}/\Delta S_A$ liegt unter dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 300 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

3.2.2.2 Emissionsgrenzwerte

Schnelle Spannungsänderungen

Es gilt gemäß (B-III Abb. 1-2) $d_{\text{grenz}} = 2 \%$.

Flicker

$$P_{\text{st HS V}} = \frac{P_{\text{st HS ges}}}{\sqrt{k_B + k_E + k_S}} \cdot \sqrt{\frac{S_A}{S_{\text{N HS}}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{g}} \quad (\text{B-III 1-4})$$

$$P_{\text{st HS V}} = \frac{0,65}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{60 \text{ MVA}}{250 \text{ MVA}}} \cdot \sqrt{\frac{1}{0,3}} = 0,5$$

$$P_{\text{lt HS V}} = 0,65 \cdot P_{\text{st HS V}} = 0,33$$

3.2.2.3 Rechnerische BewertungSchnelle Spannungsänderungen

Relative Spannungsänderung:

Da der Winkel der Laständerung unbekannt ist, wird der cos-Term = 1 gesetzt.

$$d_V = \frac{\Delta S_A}{S_{kV}} \cdot 100 \% = \frac{15 \text{ MVA}}{1100 \text{ MVA}} \cdot 100 \% = 1,36 \% \quad (\text{A 4-3})$$

Die zulässige relative Spannungsänderung von 2 % wird am Verknüpfungspunkt im HS-Netz eingehalten.

Flicker

$R = 0,99$ für $r = 1 \text{ min}^{-1}$ (A Abb. 4-5).

$F = 1,0$ (Es sind keine Angaben über den Spannungsänderungsverlauf bekannt).

$$P_{\text{st}} = 0,365 \cdot F \cdot R \cdot |d_{\text{max}}/\%| \cdot \sqrt[3,2]{r/\text{min}^{-1}} \quad (\text{A 4-22})$$

$$P_{\text{st}} = 0,365 \cdot 1,0 \cdot 0,99 \cdot |1,36| \cdot \sqrt[3,2]{1} = 0,49$$

$$P_{\text{lt}} = \sqrt[3]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{\text{st } n}^3}{12}} = \sqrt[3]{\frac{0,49^3}{12}} = 0,21 \quad (\text{A 4-20})$$

Die zulässige Kurzzeit-Flickerstärke und die zulässige Langzeit-Flickerstärke werden eingehalten.