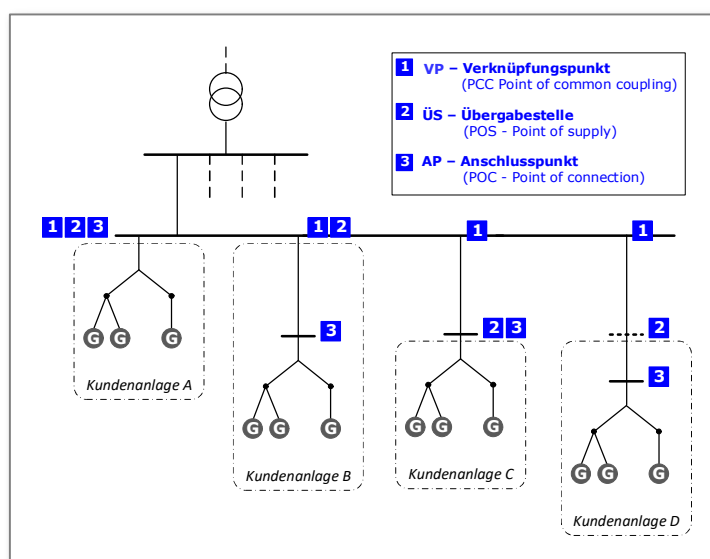


Technische Regeln für die Beurteilung von Netzurückwirkungen

Teil C: Beispiele - Anhang



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 – Stranice
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

1.	Anwendung spezieller Rechenverfahren	4
1.1	Bestimmung der Flickerstärke bei bekannten Spannungsänderungsverläufen	4
1.2	Bestimmung der Flickerstärke von Zwischenharmonischen.....	8
1.3	Bestimmung der Flickerstärke von Phasensprüngen	9
2.	Berechnungen unter Berücksichtigung der Wirkung mehrerer Kundenanlagen	10
2.1	Spannungsanhebung durch mehrere Erzeugungsanlagen im MS-Netz.....	10
2.2	Überlagerung der Flickerstärke mehrerer Kundenanlagen im MS-Netz	15
3.	Berechnungssoftware "TRBNr DACHCZ 3 Tool"	17
4.	Ergänzungen zu den Beispielen	18
4.1	Beurteilung einer AC-Ladeinfrastruktur (Bsp. 1.7)	18
4.2	Beurteilung einer DC-Ladestation (Bsp. 1.8)	23
4.3	Beurteilung eines Liftes (Bsp. 1.9).....	28
4.4	Beurteilung einer Ladestation für Elektrobusse (Bsp. 1.10)	32

1. Anwendung spezieller Rechenverfahren

1.1 Bestimmung der Flickerstärke bei bekannten Spannungsänderungsverläufen

Drei Motoren laufen zeitlich gestaffelt nacheinander an. Die Spannungsänderungsverläufe am Anschlusspunkt AP sind bekannt. Das Verhältnis der Kurzschlussleistungen zwischen AP und V beträgt $S_{kAP}/S_{kV} = 0,82$.

Zu bestimmen ist die Flickerstärke am Verknüpfungspunkt V.

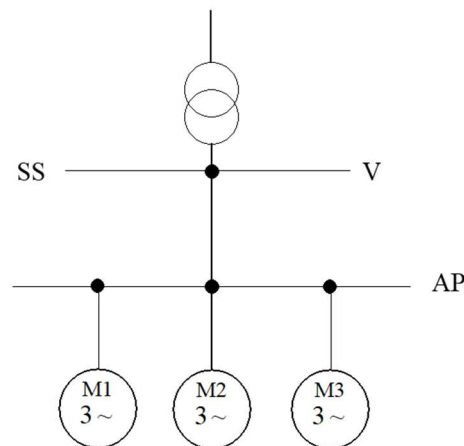


Abb. 1-1 Anschlusschema der Motoren

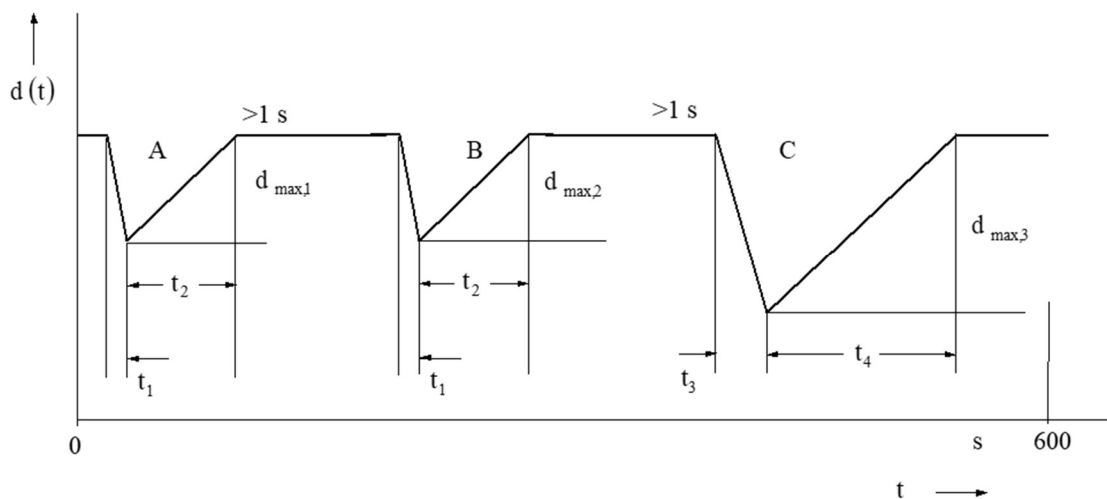


Abb. 1-2 Spannungsänderungsverläufe der Motoren

Daten der Spannungsänderungsverläufe:

$$t_1 = 20 \text{ ms}, t_2 = 100 \text{ ms}, t_3 = 50 \text{ ms}, t_4 = 180 \text{ ms}$$

$$d_{max,1} = d_{max,2} = 2,4 \%, d_{max,3} = 3,5 \%$$

Die beiden ersten Spannungsänderungsverläufe sind gleich.

$$r_{1,2} = 0,1 \text{ min}^{-1}$$

$$F_{1,2} = 0,96 \text{ (Abb. A 4-6 mit } T_f = 20 \text{ ms, } T_t = 100 \text{ ms)}$$

$$R_{1,2} = 0,76 \text{ (Abb. A 4-5 mit } r = 0,1 \text{ min}^{-1}\text{)}$$

$$r_3 = 0,1 \text{ min}^{-1}$$

$$F_3 = 0,87 \text{ (Abb. A 4-6 mit } T_f = 50 \text{ ms, } T_t = 180 \text{ ms)}$$

$$R_3 = 0,76 \text{ (Abb. A 4-5 mit } r = 0,1 \text{ min}^{-1}\text{)}$$

a) Berechnung der Flickerstärke am Anschlusspunkt

Variante 1: Direkte Berechnung mit dem analytischen Verfahren:

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

$$P_{st,1} = P_{st,2} = 0,365 \cdot 0,96 \cdot 0,76 \cdot |2,4| \cdot \sqrt[3,2]{0,1} = 0,31$$

$P_{st,1,2}$ ist die Flickerstärke, die sich ergibt, wenn in dem betrachteten 10-min-Intervall nur der Spannungsänderungsverlauf 1 bzw. 2 vorhanden wäre.

$$P_{st,3} = 0,365 \cdot F_3 \cdot R_3 \cdot |d_{\max,3}/\%| \cdot \sqrt[3,2]{r_3/\text{min}^{-1}} \quad (\text{A 4-22})$$

$$P_{st,3} = 0,365 \cdot 0,87 \cdot 0,76 \cdot |3,5| \cdot \sqrt[3,2]{0,1} = 0,41$$

$P_{st,3}$ ist die Flickerstärke, die sich ergibt, wenn in dem betrachteten 10 min Intervall nur der Spannungsänderungsverlauf 3 vorhanden wäre.

Die gesamte, resultierende Flickerstärke berechnet sich durch Summation mit dem angepassten Summationsexponenten $\alpha_{10}(3) = 1,8$ (Tab. A 4-2):

$$P_{st \text{ AP}} = \sqrt[\alpha]{\sum_i P_{st,i}^\alpha} \quad (\text{A 4-25})$$

$$P_{st \text{ AP}} = \sqrt[1,8]{P_{st,1}^{1,8} + P_{st,2}^{1,8} + P_{st,3}^{1,8}} = \sqrt[1,8]{0,31^{1,8} + 0,31^{1,8} + 0,41^{1,8}} = 0,64$$

Variante 2: Berechnung mittels Flickernachwirkungszeit und analytischem Verfahren:

$$t_{f,1,2} = 2,4 \text{ s} \cdot |F_{1,2} \cdot R_{1,2} \cdot d_{\max,1,2}/\%|^{3,2} \quad (\text{A 4-23})$$

$$t_{f,1,2} = 2,4 \text{ s} \cdot |0,96 \cdot 0,76 \cdot 2,4|^{3,2} = 14,4 \text{ s}$$

$$t_{f,3} = 2,4 \text{ s} \cdot |F_3 \cdot R_3 \cdot d_{\max,3}/\%|^{3,2} = 2,4 \text{ s} \cdot |0,87 \cdot 0,76 \cdot 3,5|^{3,2} = 35,2 \text{ s} \quad (\text{A 4-23})$$

$$P_{st,1} = P_{st,2} = \left(\frac{t_{f,1,2}}{T_p} \right)^{1/3,2} = \left(\frac{14,4 \text{ s}}{600 \text{ s}} \right)^{1/3,2} = 0,31 \quad (\text{A 4-24})$$

$$P_{st,3} = \left(\frac{t_{f,3}}{T_p} \right)^{1/3,2} = \left(\frac{35,2 \text{ s}}{600 \text{ s}} \right)^{1/3,2} = 0,41 \quad (\text{A 4-24})$$

Die gesamte, resultierende Flickerstärke berechnet man durch Summation mit dem angepassten Summationsexponenten $\alpha_{10}(3) = 1,8$ (Tab. A 4-2):

$$P_{st \text{ AP}} = \sqrt[\alpha]{\sum_i P_{st,i}^\alpha} \quad (\text{A 4-25})$$

$$P_{st \text{ AP}} = \sqrt[1,8]{P_{st,1}^{1,8} + P_{st,2}^{1,8} + P_{st,3}^{1,8}} = \sqrt[1,8]{0,31^{1,8} + 0,31^{1,8} + 0,41^{1,8}} = 0,64$$

Variante 3: Berechnung mithilfe der Referenzkurve (Abb. A 4-3):

Berechnung der äquivalenten Spannungssprünge mithilfe der Formfaktoren:

$$|d_{\max,1}|_{\text{ref}} = |d_{\max,2}|_{\text{ref}} = F_{1,2} \cdot |d_{\max,1,2}| = 0,96 \cdot 2,4 \% = 2,3 \%$$

$$|d_{\max,3}|_{\text{ref}} = F_3 \cdot |d_{\max,3}| = 0,87 \cdot 3,5 \% = 3,0 \%$$

Aus der Referenzkurve ergibt sich bei $0,1 \text{ min}^{-1}$ Änderungen ein Spannungssprung von 7,4 % für eine Flickerstärke von $P_{st} = 1,0$.

Die Umrechnung erfolgt mithilfe des Dreisatzes:

$$P_{st,1} = P_{st,2} = \frac{d_{\max,1,2}}{d_{\text{ref}}} \cdot P_{st \text{ ref}} = \frac{2,3 \%}{7,4 \%} \cdot 1 = 0,31 \quad (\text{A 4-19})$$

$$P_{st,3} = \frac{d_{\max,3}}{d_{\text{ref}}} \cdot P_{st \text{ ref}} = \frac{3 \%}{7,4 \%} \cdot 1 = 0,41 \quad (\text{A 4-19})$$

Die gesamte, resultierende Flickerstärke berechnet man durch Summation mit dem angepassten Summationsexponenten $\alpha_{10}(3) = 1,8$ (Tab. A 4-2):

$$P_{st\,AP} = \sqrt[\alpha]{\sum_i P_{st,i}^\alpha} \quad (A\,4-25)$$

$$P_{st\,AP} = \sqrt[1,8]{P_{st,1}^{1,8} + P_{st,2}^{1,8} + P_{st,3}^{1,8}} = \sqrt[1,8]{0,31^{1,8} + 0,31^{1,8} + 0,41^{1,8}} = 0,64$$

b) Berechnung der Flickerstärke am Verknüpfungspunkt:

$$P_{st,V} = P_{st,AP} \cdot \frac{S_{k\,AP}}{S_{k\,V}} = 0,64 \cdot 0,82 = 0,52 \quad (A\,4-39)$$

1.2 Bestimmung der Flickerstärke von Zwischenharmonischen

Es ist die Flickerstärke zweier zwischenharmonischer Spannungen mit den folgenden Daten zu bestimmen.

$$f_{z1} = 35 \text{ Hz}$$

$$u_{z1} = 0,4 \%$$

$$f_{z2} = 65 \text{ Hz}$$

$$u_{z2} = 0,2 \%$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 135^\circ$$

Die Flickerstärke für $u_z = 1 \%$ und $f_z = 35 \text{ Hz}$ bzw. 65 Hz wird aus der zugehörigen Referenzkurve (Abb. A 4-7) zu $P_{st} = 3,15$ ermittelt. Die Umrechnung erfolgt mithilfe des Dreisatzes.

$$P_{st,1} = u_{z1}/\% \cdot P_{st} = 0,4 \cdot 3,15 = 1,26$$

$$P_{st,2} = u_{z2}/\% \cdot P_{st} = 0,2 \cdot 3,15 = 0,63$$

Die Frequenzen 35 Hz und 65 Hz entsprechen paarweise auftretenden Seitenbänder im Abstand von 15 Hz zur Netzfrequenz. Dementsprechend ist die Summation mittels Reduktionsfaktor anzuwenden (vgl. Kap. A 4.2.1.2).

Der Reduktionsfaktor k_{red} (Abb. A 4-8) wird für $u_{z2}/u_{z1} = 0,5$ (kleinstes Verhältnis) und $\varphi = 135^\circ$ zu $k_{red} = 0,49$ bestimmt.

$$P_{st\ res} = k_{red} \cdot (P_{st1} + P_{st2}) = 0,49 \cdot (1,26 + 0,63) = 0,93 \quad (\text{A 4-29})$$

1.3 Bestimmung der Flickerstärke von Phasensprüngen

Es ist die Flickerstärke der beiden Phasensprünge $\Phi(\beta_0, \Delta\beta) = \Phi(15^\circ, 100^\circ)$ und $\Phi(\beta_0, \Delta\beta) = \Phi(30^\circ, -50^\circ)$ zu bestimmen.

Aufgrund der Symmetrieeigenschaften gilt:

$$P_{\text{st}}\{\Phi(\beta_0, \Delta\beta^+)\} = P_{\text{st}}\{\Phi(\beta_0, 180^\circ - |\Delta\beta|^-)\} \quad (\text{A 4-32})$$

$$P_{\text{st}}\{\Phi(30^\circ, -50^\circ)\} = P_{\text{st}}\{\Phi(30^\circ, 130^\circ)\}$$

Unter Anwendung der zugehörigen Referenzkurven (Abb. A 4-9) ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$P_{\text{st}}\{\Phi(\beta_0, \Delta\beta)\} = P_{\text{st}}\{\Phi(15^\circ, 100^\circ)\} = 0,62$$

$$P_{\text{st}}\{\Phi(\beta_0, \Delta\beta)\} = P_{\text{st}}\{\Phi(30^\circ, 130^\circ)\} = 0,73$$

2. Berechnungen unter Berücksichtigung der Wirkung mehrerer Kundenanlagen

2.1 Spannungsanhebung durch mehrere Erzeugungsanlagen im MS-Netz

2.1.1 Beschreibung

Es ist der Anschluss einer Photovoltaikanlage ($P_{A \max} = 800 \text{ kW}$), bestehend aus 4 PV-Wechselrichtern mit einer Bemessungsleistung von je 220 kVA im Hinblick auf langsame Spannungsänderung (Spannungsanhebung) zu beurteilen.

In dem Netz sind zwei Erzeugungsanlagen angeschlossen, welche sich im gleichen Abgang befinden. Die zweite Erzeugungsanlage ist ein Windpark ($P_{WP} = 2,1 \text{ MW}$; $\cos(\varphi) = 1$).

Netzdaten:

Kurzschlussleistung des vorgelagerten Netzes:	$S_{k \text{ VN}} = 1000 \text{ MVA}$
Netztransformator:	$S_{r \text{ T}} = 16 \text{ MVA}$; $u_k = 12 \%$; $P_{Cu} = 92 \text{ kW}$
Freileitung Al/St 70/12:	$R'_L = 0,413 \Omega/\text{km}$; $X'_L = 0,345 \Omega/\text{km}$
Leitungslänge:	$l_{UW-WP} = 4 \text{ km}$; $l_{UW-PV} = 14 \text{ km}$
Spannungsebene:	$U_c = 20 \text{ kV}$

Wären weitere Erzeugungsanlagen und Speichereinrichtungen im Netz angeschlossen, ist die langsame Spannungsänderung (Spannungsanhebung) vorzugsweise mit einem Netzberechnungsprogramm zu bestimmen.

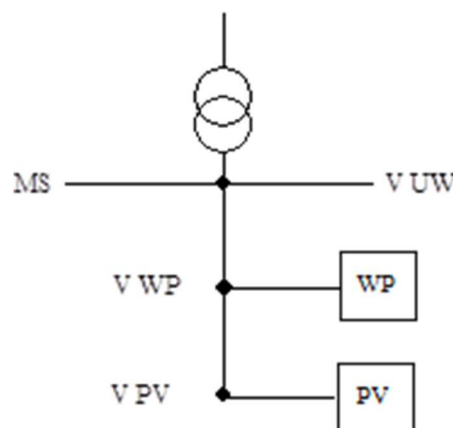


Abb. 2-1 Anschlussschema

Die PV-Anlage hat die Möglichkeit der Einstellung des Verschiebungsfaktors im Bereich $0,95_{\text{untererregt}} \leq \cos(\varphi) \leq 1,0$.

Sowohl die Windkraftanlage als auch die PV-Anlage sind an ihrem jeweiligen Verknüpfungspunkt direkt angeschlossen (Anschlusspunkt gleich Verknüpfungspunkt).

Im Abgang sind bzw. können weitere Bezugsanlagen angeschlossen sein, so dass beide Erzeugungsanlagen verschiedene Verknüpfungspunkte haben.

2.1.2 Berechnung Kurzschlussleistung

Vorgelagertes Netz:

Bei Hoch- und Höchstspannungsnetzen kann die ohmsche Komponente der Impedanz des übergeordneten Netzes vernachlässigt werden.

$$X_{\text{VN OS}} = \frac{U_{\text{n VN}}^2}{S_{\text{k VN}}} = \frac{(110 \text{ kV})^2}{1000 \text{ MVA}} = 12,1 \, \Omega \quad (\text{A 3-2})$$

bezogen auf 110 kV

$$X_{\text{VN US}} = X_{\text{VN OS}} \cdot \left(\frac{U_{\text{r T US}}}{U_{\text{r T OS}}} \right)^2 = 12,1 \, \Omega \cdot \left(\frac{20 \text{ kV}}{110 \text{ kV}} \right)^2 = 0,4 \, \Omega \quad (\text{A 3-17})$$

bezogen auf 20 kV

Transformator:

Der Widerstand des Netztransformators kann aus den Kurzschlussverlusten des Netztransformators berechnet werden.

$$P_{\text{Cu}} = 3 \cdot I_{\text{r}}^2 \cdot R_{\text{T}} = 3 \cdot \frac{S_{\text{r T}}^2}{3 \cdot U_{\text{N}}^2} \cdot R_{\text{T}}$$

Umstellung nach R_{T} :

$$R_{\text{T}} = \frac{U_{\text{n}}^2}{S_{\text{r T}}^2} \cdot P_{\text{Cu}} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{(16 \text{ MVA})^2} \cdot 92 \text{ kW} = 0,14 \, \Omega$$

$$u_{\text{r}} = \frac{R_{\text{T}} \cdot S_{\text{r T}}}{U_{\text{n}}^2} \cdot 100 \% = \frac{0,14 \, \Omega \cdot 16 \text{ MVA}}{(20 \text{ kV})^2} \cdot 100 \% = 0,56 \% \quad (\text{A 3-6})$$

$$u_{\text{x}} = \sqrt{u_{\text{k}}^2 - u_{\text{r}}^2} = \sqrt{(12 \%)^2 - (0,56 \%)^2} \approx 12 \% \quad (\text{A 3-9})$$

$$X_{\text{T}} = u_{\text{x}} \cdot \frac{U_{\text{r T}}^2}{S_{\text{r T}}} = \frac{12 \%}{100 \%} \cdot \frac{(20 \text{ kV})^2}{16 \text{ MVA}} = 3 \, \Omega \quad (\text{A 3-7})$$

Freileitung:

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

$$R_{\text{L,UW-PV}}(20 \, ^\circ\text{C}) = R'_{\text{L}} \cdot l_{\text{UW-PV}} = 0,413 \, \Omega/\text{km} \cdot 14 \text{ km} = 5,78 \, \Omega \quad (\text{A 3-10})$$

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

$$R_{\text{L,UW-PV}}(70 \, ^\circ\text{C}) = 5,78 \, \Omega \cdot \left(1 + \frac{4 \%}{100 \%} \cdot \frac{50 \text{ K}}{10} \right) = 6,94 \, \Omega$$

$$X_{L,UW-PV} = X'_L \cdot l_{UW-PV} = 0,345 \Omega/\text{km} \cdot 14 \text{ km} = 4,83 \Omega \quad (\text{A 3-11})$$

$$R_{L,UW-WP}(20^\circ\text{C}) = R'_L \cdot l_{UW-WP} = 0,413 \Omega/\text{km} \cdot 4 \text{ km} = 1,65 \Omega \quad (\text{A 3-10})$$

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

$$R_{L,UW-WP}(70^\circ\text{C}) = 1,65 \Omega \cdot \left(1 + \frac{4\%}{100\%} \cdot \frac{50 \text{ K}}{10}\right) = 1,98 \Omega$$

$$X_{L,UW-WP} = X'_L \cdot l_{UW-WP} = 0,345 \Omega/\text{km} \cdot 4 \text{ km} = 1,38 \Omega \quad (\text{A 3-11})$$

Impedanz (Betrag und Winkel) und Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt der PV-Anlage (V PV):

$$Z_{kVPV} = \sqrt{(X_{VNUS} + X_T + X_{L,UW-PV})^2 + (R_T + R_{L,UW-PV}(70^\circ\text{C}))^2} \quad (\text{A 3-18})$$

$$Z_{kVPV} = \sqrt{(0,4 \Omega + 3 \Omega + 4,83 \Omega)^2 + (0,14 \Omega + 6,94 \Omega)^2} = 10,86 \Omega$$

$$\psi_{VPV} = \arctan\left(\frac{X_{kVPV}}{R_{kVPV}}\right) = \arctan\left(\frac{X_{VNUS} + X_T + X_{L,UW-PV}}{R_T + R_{L,UW-PV}(70^\circ\text{C})}\right) \quad (\text{A 3-5})$$

$$\psi_{VPV} = \arctan\left(\frac{0,4 \Omega + 3 \Omega + 4,83 \Omega}{0,14 \Omega + 6,94 \Omega}\right) = 49,3^\circ$$

$$S_{kVPV} = \frac{U_n^2}{Z_{kVPV}} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{10,86 \Omega} = 36,8 \text{ MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

Impedanz (Betrag und Winkel) und Kurzschlussleistung am Verknüpfungspunkt des Windparks (V WP):

$$Z_{kVWP} = \sqrt{(X_{VNUS} + X_T + X_{L,UW-WP})^2 + (R_T + R_{L,UW-WP}(70^\circ\text{C}))^2} \quad (\text{A 3-18})$$

$$Z_{kVWP} = \sqrt{(0,4 \Omega + 3 \Omega + 1,38 \Omega)^2 + (0,14 \Omega + 1,98 \Omega)^2} = 5,23 \Omega$$

$$\psi_{VWP} = \arctan\left(\frac{X_{kVWP}}{R_{kVWP}}\right) = \arctan\left(\frac{X_{VNUS} + X_T + X_{L,UW-WP}}{R_T + R_{L,UW-WP}}\right) \quad (\text{A 3-5})$$

$$\psi_{VWP} = \arctan\left(\frac{0,4 \Omega + 3 \Omega + 1,38 \Omega}{0,14 \Omega + 1,98 \Omega}\right) = 66,1^\circ$$

$$S_{kVWP} = \frac{U_n^2}{Z_{kVWP}} = \frac{(20 \text{ kV})^2}{5,23 \Omega} = 76,5 \text{ MVA} \quad (\text{A 3-1})$$

2.1.3 Anforderung

Gemäß B-II Kapitel 1.1.1 darf im ungestörten Betrieb des Netzes der Betrag der von allen Erzeugungs- und/oder Speicheranlagen verursachten langsamen Spannungsänderung an keinem Verknüpfungspunkt in diesem Netz einen Wert von 2 % gegenüber der Spannung ohne Erzeugungs- und/oder Speicheranlagen überschreiten.

2.1.4 Rechnerische Bewertung

PV-Anlage ohne Blindleistungsregelung ($\cos(\varphi) = 1$; $\varphi = 0^\circ$):

$$\Delta S_A = P_{A \max} = 800 \text{ kVA}$$

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

$$d_{V \text{ PV}} = \frac{800 \text{ kVA}}{36,8 \text{ MVA}} \cdot \cos(49,3^\circ) \cdot 100 \% = 1,42 \%$$

PV-Anlage mit Blindleistungsregelung ($\cos(\varphi) = 0,95$; $\varphi = 18,2^\circ$):

$$\Delta S_A = \frac{P_{A \max}}{\cos(\varphi)} = \frac{800 \text{ kVA}}{0,95} = 842 \text{ kVA}$$

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

$$d_{V \text{ PV}} = \frac{842 \text{ kVA}}{36,8 \text{ MVA}} \cdot \cos(49,3^\circ + 18,2^\circ) \cdot 100 \% = 0,88 \%$$

Windpark:

$$\Delta S_A = P_{WP} = 2100 \text{ kVA}$$

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

$$d_{V \text{ PV}} = \frac{2100 \text{ kVA}}{76,5 \text{ MVA}} \cdot \cos(66,1^\circ) \cdot 100 \% = 1,11 \%$$

Unter Berücksichtigung des vorhandenen Windparks und der geplanten Photovoltaikanlage ergeben sich durch Überlagerung der Spannungsänderungen beider Erzeugungsanlagen die Spannungsänderungen gemäß Tabelle Tab. 2-2 (PV-Anlage mit $\cos(\varphi) = 1$) und Tab. 2-2 (PV-Anlage mit $\cos(\varphi) = 0,95$).

Aufgrund der Netztopologie (einfach gespeist, offene Ringe) und weil es keine weiteren Erzeugungs- oder Speicheranlagen im Netz gibt, müssen nur die Spannungsanhebungen an den Verknüpfungspunkten der Erzeugungsanlagen beurteilt werden. An den anderen Punkten im Netz sind kleinere Werte zu erwarten.

Tab. 2-1 Spannungsänderungen am VP der PV-Anlage ($\cos(\varphi) = 1$) und des Windparks

	Spannungsänderung	
	Verknüpfungspunkt WP	Verknüpfungspunkt PV
Windpark ($\cos(\varphi) = 1$)	1,11 %	1,11 %
PV-Anlage ($\cos(\varphi) = 1$)	$\frac{S_{kV PV}}{S_{kV WP}} \cdot 1,42 \% = 0,68 \%$	1,42 %
Summe	1,79 %	2,53 %

Tab. 2-2 Spannungsänderungen am VP der PV-Anlage ($\cos(\varphi) = 0,95$) und des Windparks

	Spannungsänderung	
	Verknüpfungspunkt WP	Verknüpfungspunkt PV
Windpark ($\cos(\varphi) = 1$)	1,11 %	1,11 %
PV-Anlage ($\cos(\varphi) = 0,95$)	$\frac{S_{kV PV}}{S_{kV WP}} \cdot 0,88 \% = 0,42 \%$	0,88 %
Summe	1,53 %	1,99 %

Die zulässige relative Spannungsänderung von kleiner 2 % wird an allen Verknüpfungspunkten eingehalten, sofern keine weiteren Erzeugungs- oder Speicheranlagen im betrachteten MS-Netz angeschlossen werden und die PV-Anlage mit Blindleistungsregelung ($\cos(\varphi) = 0,95$) betrieben wird. Anderenfalls ist die relative Spannungsänderung von 2 % überschritten. Gleiches gilt, wenn eine weitere Erzeugungs- oder Speicheranlage im Netz angeschlossen werden würde, da der vorgegebene Grenzwert von 2 % durch die 1,99 % praktisch ausgeschöpft ist.

2.2 Überlagerung der Flickerstärke mehrerer Kundenanlagen im MS-Netz

Die Kundenanlagen A1, A2 und A3 erzeugen an ihren Verknüpfungspunkten die individuellen Langzeit-Flickerstärken $P_{lt,11}$, $P_{lt,22}$ und $P_{lt,33}$.

Zu bestimmen ist die gesamte Langzeit-Flickerstärke an allen Verknüpfungspunkten. Der Summationsexponent für die Addition der Flickerstärke mehrerer Anlagen beträgt $\alpha = 2,0$ (vgl. Kap. A 4.2.4, kontinuierliche Spannungsschwankungen).

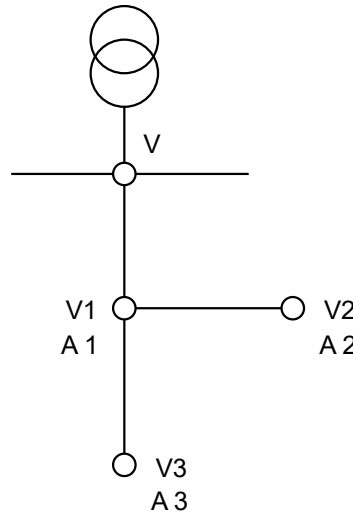


Abb. 2-2 Anschlusschema der Kundenanlagen

Nach dem Prinzip der Flickerausbreitung wird die Flickerstärke in einseitig gespeisten Strahlennetzen ohne Dämpfung zu unterlagerten Punkten übertragen (Abwärtstransfer) und bei der Übertragung zu Punkten höherer Kurzschlussleistung abgemindert (Aufwärtstransfer) (A 4-39). Beispielsweise wird die Flickerstärke der Anlage A2 $P_{lt,22}$ an V2 bei Transfer nach V1 abgemindert und von dort nach V3 ohne weitere Dämpfung übertragen $P_{lt,21} = P_{lt,22} \cdot (S_{k,V2}/S_{k,V1}) = 0,24 = P_{lt,23}$. Die einzelnen Anteile je Verknüpfungspunkt werden mit dem quadratischen Summationsgesetz summiert. Unter Berücksichtigung des Summationsgesetzes beträgt z. B. die Flickerstärke an V1:

$$P_{lt,g,V1} = \left(\sum_i P_{lt}^i \right)^{1/\alpha} \quad (\text{A 4-25})$$

$$P_{lt,g,V1} = \sqrt{P_{lt,11}^2 + P_{lt,21}^2 + P_{lt,31}^2} = \sqrt{0,23^2 + 0,24^2 + 0,23^2} = 0,40$$

Tabelle Tab. 2-3 fasst die Ergebnisse der Anteile der einzelnen Kundenanlagen je Verknüpfungspunkt sowie die daraus resultierende Summe zusammen.

Tab. 2-3 Spannungsänderungen am VP der PV-Anlage ($\cos(\varphi) = 0,95$) und des Windparks

Knoten	A1	A2	A3	gesamt
V1 $S_{kV1} = 1,5 \text{ MVA}$	$P_{lt,11} = 0,23$	$P_{lt,21} = P_{lt,22} \cdot \frac{S_{kV2}}{S_{kV1}}$ $= 0,24$	$P_{lt,31} = P_{lt,33} \cdot \frac{S_{kV3}}{S_{kV1}}$ $= 0,23$	0,40
V2 $S_{kV2} = 0,8 \text{ MVA}$	$P_{lt,12} = P_{lt,11}$ $= 0,23$	$P_{lt,22} = 0,44$	$P_{lt,32} = P_{lt,31}$ $= 0,23$	0,55
V3 $S_{kV3} = 1,0 \text{ MVA}$	$P_{lt,13} = P_{lt,11}$ $= 0,23$	$P_{lt,23} = P_{lt,21}$ $= 0,24$	$P_{lt,33} = 0,35$	0,48
V $S_{kV} = 2,0 \text{ MVA}$	$P_{lt,1V} = P_{lt,11} \cdot \frac{S_{kV1}}{S_{kV}}$ $= 0,17$	$P_{lt,2V} = P_{lt,22} \cdot \frac{S_{kV2}}{S_{kV}}$ $= 0,18$	$P_{lt,3V} = P_{lt,33} \cdot \frac{S_{kV3}}{S_{kV}}$ $= 0,18$	0,30

3. Berechnungssoftware "TRBNr DACHCZ 3 Tool"

Die meisten Berechnungen für die Beispiele im Teil C der „Technischen Regeln zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen“ wurden mit der Berechnungssoftware „TRBNr DACHCZ 3 Tool“ durchgeführt.

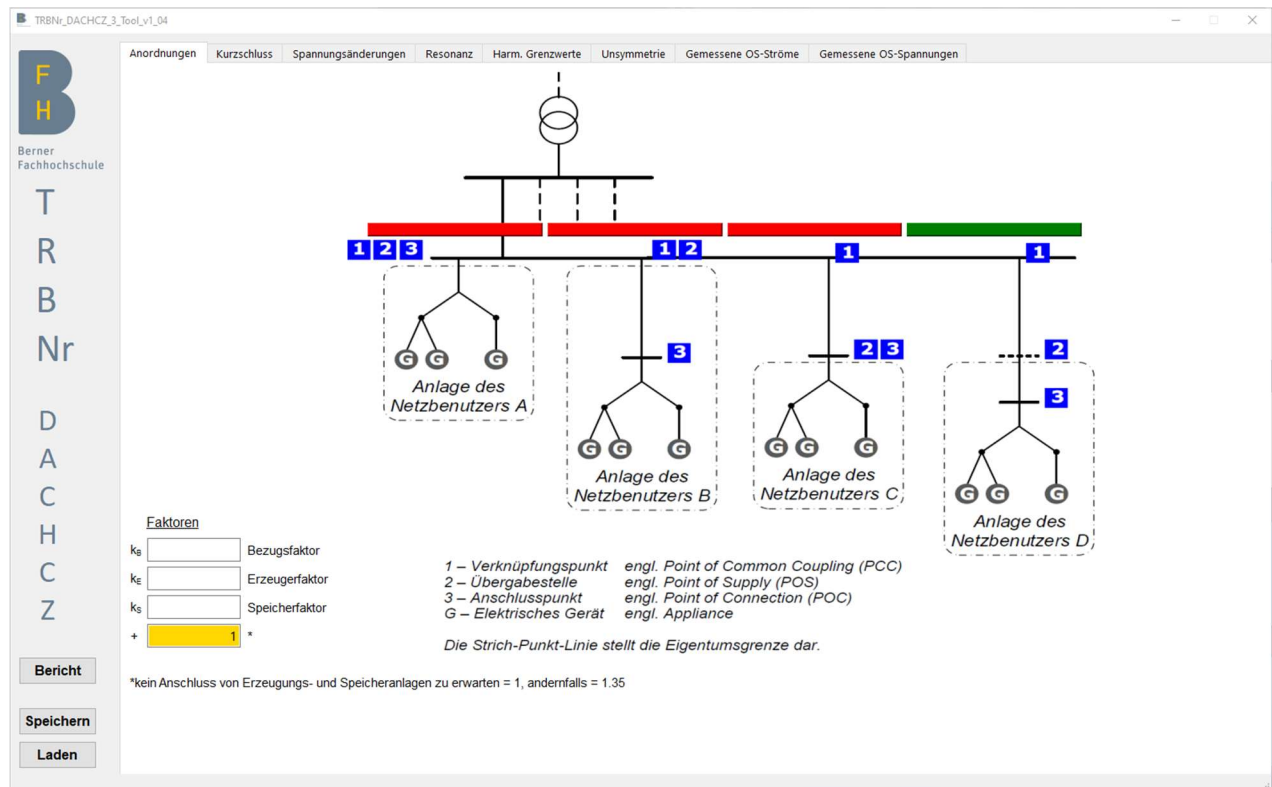


Abb. 3-1 Ausschnitt aus TRBNr DACHCZ 3 Tool

Das Tool basiert auf der 3. Ausgabe der „Technischen Regeln für die Beurteilung von Netzzrückwirkungen“. Es behandelt die aus Sicht der Entwickler des Tools wichtigsten Phänomene und wurde für Beurteilungen und Bewertungen sowie für Schulungszwecke entwickelt. Es wurden sowohl Methoden aus dem Teil A (Grundlagen) wie auch aus dem Teil B (Anforderungen und Beurteilung) implementiert.

Das Tool besteht aus acht Arbeitsblättern (Karteikarten), welche nach Phänomenen strukturiert sind. Die Anordnung der Arbeitsblätter entspricht prinzipiell der sinnvollen Reihenfolge bei der Eingabe von Parametern. Die Eingaben erfolgen entweder numerisch oder über Auswahlmenüs. Bei den meisten Feldern sind bereits Standardwerte hinterlegt, welche abgeändert werden können. Die im Teil C (Beispiele) eingefügten Tabellen werden automatisch generiert.

Das Tool ist kostenlos beim Labor für Elektrizitätsnetze der Berner Fachhochschule (Schweiz) erhältlich. Der Zugang zur Downloadplattform kann per E-Mail an powergrids@bfh.ch angefragt werden.

4. Ergänzungen zu den Beispielen

4.1 Beurteilung einer AC-Ladeinfrastruktur (Bsp. 1.7)

4.1.1 Harmonische

4.1.1.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{14,4 \text{ MVA}}{200 \text{ kVA}} = 72 \quad (\text{B-I Abb. 3-1})$$

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. 4-1 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsgehalts

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Ladeinfrastruktur	12 · 22 kW		
Summe	264 kW		

Die Ladeinfrastruktur wurde der Gruppe 1 zugeordnet, weil mit hoher Wahrscheinlichkeit von Gleichrichtern mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur ausgegangen werden kann. Da trotz der ggf. notwendigen Abregelung auch alle Ladesäulen aktiv sein können und es nicht garantiert ist, dass der Oberschwingungsstrom proportional zur Ladeleistung ist, wird als Gesamtsumme der ober-schwingungserzeugenden Geräte der Gruppe 1 nicht die beantragte Anschlussleistung S_A (200 kVA), sondern die Summe der angeschlossenen Geräte von 264 kVA für die Berechnung von S_{OS} verwendet.

Der ober-schwingungserzeugende Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = \frac{1}{2} \cdot 264 \text{ kW} = 132 \text{ kW} \quad (\text{B-I 3-6})$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{132 \text{ kW}}{200 \text{ kVA}} = 0,66$$

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

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A}\right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{S_{KV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{14,4 \text{ MVA}}{200 \text{ kVA}}} = 0,69 \quad (\text{B-I 3-5})$$

Das Leistungsverhältnis S_{OS}/S_A liegt unter dem maximal zulässigen Leistungsverhältnis von 0,69 und erfüllt eine automatische Zulassung. Es wird dennoch empfohlen Emissionsgrenzwerte vorzugeben.

4.1.1.2 Emissionsgrenzwerte

Impedanzwinkelfaktor:

$$\frac{X}{R} = \tan(\Psi_V) = \tan(63^\circ) = 1,96$$

$$\rightarrow k_{XR} = 0,95 \quad (\text{A Tab. 6-4})$$

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{200 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 288,7 \text{ A}$$

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 $k_B + k_E + k_S = 1,35$ (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 5. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{5 \text{ zul}} = \frac{13,1}{1000} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{0,95} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{14,4 \text{ MVA}}{200 \text{ kVA}}} \cdot 288,7 \text{ A} = 29,07 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-2 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-1 (Bsp. 1.7)

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

Der zulässige PWHIDI ist in Kapitel 4.1.2.2 angegeben.

4.1.2 Zwischenharmonische

4.1.2.1 Beurteilung

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

4.1.2.2 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 14. Ordnung.

$$g_{14} = \frac{0,2}{14 + 0,5} = 13,8 \cdot 10^{-3}$$

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 14. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{14 \text{ zul}} = \frac{1}{1,3} \cdot \frac{13,8 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{14,4 \text{ MVA}}{200 \text{ kVA}} \cdot 288,7 \text{ A} = 2,207 \text{ A}$$

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 217 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. In diesem Fall betrifft das die 1. – 3. Zwischenharmonische.

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

Tab. 4-3 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7

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	5,8	14	13,8	1,3	2,2	27	7,3	1	1,5
2	80,0	1	5,8	15	12,9	1,3	2,1	28	7,0	1	1,5
3	28,6	1	5,8	16	12,1	1,3	1,9	29	6,8	1	1,4
4	22,2	1	4,6	17	11,4	1,3	1,8	30	6,6	1	1,4
5	18,2	1	3,8	18	10,8	1,3	1,7	31	9,5	1	2,0
6	15,4	1	3,2	19	10,3	1,3	1,6	32	9,2	1	1,9
7	26,7	1,3	4,3	20	9,8	1,3	1,6	33	9,0	1	1,9
8	23,5	1,3	3,8	21	9,3	1,3	1,5	34	8,7	1	1,8
9	21,1	1,3	3,4	22	8,9	1,3	1,4	35	8,5	1	1,8
10	19,0	1,3	3,1	23	8,5	1,3	1,4	36	8,2	1	1,7
11	17,4	1,3	2,8	24	8,2	1,3	1,3	37	8,0	1	1,7
12	16,0	1,3	2,6	25	7,8	1,3	1,3	38	7,8	1	1,6
13	14,8	1,3	2,4	26	7,5	1	1,6	39	7,6	1	1,6

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_{v \text{ zul}}^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_{\mu \text{ zul}}^2} \cdot 100 \% = 20,1 \% \quad (\text{B-I 3-8})$$

4.1.3 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

4.1.3.1 Beurteilung

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

4.1.3.2 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 2,7 kHz.

$$I_{2,7 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 2,7^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 2,7 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{14,4 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{2,7 \text{ zul}} = 3,68 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-4 Supraharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-9

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	4,9	4,5	1	1,9	6,9	1	1,1
2,3	1	4,5	4,7	1	1,8	7,1	1	1,1
2,5	1	4,0	4,9	1	1,7	7,3	1	1,0
2,7	1	3,7	5,1	1	1,6	7,5	1	1,0
2,9	1	3,4	5,3	1	1,6	7,7	1	0,9
3,1	1	3,1	5,5	1	1,5	7,9	1	0,9
3,3	1	2,9	5,7	1	1,4	8,1	1	0,9
3,5	1	2,7	5,9	1	1,4	8,3	1	0,9
3,7	1	2,5	6,1	1	1,3	8,5	1	0,8
3,9	1	2,3	6,3	1	1,2	8,7	1	0,8
4,1	1	2,2	6,5	1	1,2	8,9	1	0,8
4,3	1	2,1	6,7	1	1,1			

4.2 Beurteilung einer DC-Ladestation (Bsp. 1.8)

4.2.1 Harmonische

4.2.1.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{12,7 \text{ MVA}}{120 \text{ kVA}} = 105,8 \quad (\text{B-I Abb. 3-1})$$

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).

Da keine näheren Informationen über die Art der DC-Ladestation bekannt sind, wird im Sinne einer „Worst-Case“ Betrachtung die Ladestation der Gruppe 3 zugeordnet.

Tab. 4-5 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsgehalts

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
DC-Ladestation			120 kVA

Oberschwingungserzeugender Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = 2 \cdot 120 \text{ kVA} = 240 \text{ kVA} \quad (\text{B-I 3-6})$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{240 \text{ kVA}}{120 \text{ kVA}} = 2$$

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

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A} \right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{12,7 \text{ MVA}}{120 \text{ kVA}}} = 0,84 \quad (\text{B-I 3-5})$$

Das Leistungsverhältnis S_{OS}/S_A liegt über dem maximal zulässigen Leistungsverhältnis von 0,84 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

4.2.1.2 Emissionsgrenzwerte

Impedanzwinkelfaktor:

$$\frac{X}{R} = \frac{X_{\text{ÜN US}} + X_T + X_L}{R_{\text{ÜN US}} + R_L} = \frac{0,78 \text{ m}\Omega + 7,68 \text{ m}\Omega + 1,4 \text{ m}\Omega}{0,11 \text{ m}\Omega + 4,94 \text{ m}\Omega} = 1,95$$

$$\rightarrow k_{\text{XR}} = 0,95$$

(A Tab. 6-4)

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{120 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 173,2 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

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

$k_{v/\mu} = 1,3$ ($k_{\text{XR}} \leq 0,95$) 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 $k_B + k_E + k_S = 1,35$ (Anmerkung, B-I Kapitel 3.1.2) gewählt.

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

z. B. Berechnung des 31. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{31 \text{ zul}} = \frac{0,9}{1000} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{0,95} \cdot \frac{1}{\sqrt{1,35}} \cdot \sqrt{\frac{12,7 \text{ MVA}}{120 \text{ kVA}}} \cdot 173,2 \text{ A} = 1,453 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-6 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-1

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

Der zulässige PWHIDI ist in Kapitel 4.2.2.2 angegeben.

4.2.2 Zwischenharmonische

4.2.2.1 Beurteilung

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

4.2.2.2 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 36. Ordnung.

$$g_{36} = \frac{0,3}{36 + 0,5} = 8,2 \cdot 10^{-3}$$

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 36. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{36 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{8,2 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{12,7 \text{ MVA}}{120 \text{ kVA}} \cdot 173,2 \text{ A} = 1,503 \text{ A}$$

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 217 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 die 1. – 4. Zwischenharmonische.

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

Tab. 4-7 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7

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	3,5	14	13,8	1,3	2,0	27	7,3	1	1,3
2	80,0	1	3,5	15	12,9	1,3	1,8	28	7,0	1	1,3
3	28,6	1	3,5	16	12,1	1,3	1,7	29	6,8	1	1,2
4	22,2	1	3,5	17	11,4	1,3	1,6	30	6,6	1	1,2
5	18,2	1	3,3	18	10,8	1,3	1,5	31	9,5	1	1,7
6	15,2	1	2,8	19	10,3	1,3	1,4	32	9,2	1	1,7
7	26,7	1,3	3,5	20	9,8	1,3	1,4	33	9,0	1	1,6
8	23,5	1,3	3,3	21	9,3	1,3	1,3	34	8,7	1	1,6
9	21,1	1,3	3,0	22	8,9	1,3	1,3	35	8,5	1	1,5
10	19,0	1,3	2,7	23	8,5	1,3	1,2	36	8,2	1	1,5
11	17,4	1,3	2,5	24	8,2	1,3	1,2	37	8,0	1	1,5
12	16,0	1,3	2,3	25	7,8	1,3	1,1	38	7,8	1	1,4
13	14,8	1,3	2,1	26	7,5	1	1,4	39	7,6	1	1,4

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_v^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_{\mu}^2} \cdot 100 \% = 27,2 \% \quad (\text{B-I 3-8})$$

4.2.3 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

4.2.3.1 Beurteilung

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

4.2.3.2 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 7,3 kHz.

$$I_{7,3 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 7,3^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 7,3 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{12,7 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{7,3 \text{ zul}} = 0,98 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-8 Supraharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-9

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	4,8	4,5	1	1,9	6,9	1	1,1
2,3	1	4,3	4,7	1	1,8	7,1	1	1,0
2,5	1	3,9	4,9	1	1,7	7,3	1	1,0
2,7	1	3,6	5,1	1	1,6	7,5	1	0,9
2,9	1	3,3	5,3	1	1,5	7,7	1	0,9
3,1	1	3,0	5,5	1	1,4	7,9	1	0,9
3,3	1	2,8	5,7	1	1,4	8,1	1	0,8
3,5	1	2,6	5,9	1	1,3	8,3	1	0,8
3,7	1	2,4	6,1	1	1,2	8,5	1	0,8
3,9	1	2,2	6,3	1	1,2	8,7	1	0,8
4,1	1	2,1	6,5	1	1,1	8,9	1	0,7
4,3	1	2,0	6,7	1	1,1			

4.3 Beurteilung eines Liftes (Bsp. 1.9)

4.3.1 Harmonische

4.3.1.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{17,03 \text{ MVA}}{101 \text{ kVA}} = 168,6 \quad (\text{B-I Abb. 3-1})$$

Das Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A liegt über dem erforderlichen Leistungsverhältnis von 150 und erfüllt eine automatische Zulassung. Es wird dennoch empfohlen Emissionsgrenzwerte vorzugeben.

4.3.1.2 Emissionsgrenzwerte

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{101 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 145,8 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

Da die Kurzschlussimpedanz am Verknüpfungspunkt durch ihren induktiven Anteil dominiert wird, wurde der Impedanzwinkelfaktor $k_{XR} = 1$ gewählt.

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

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

Da kein Anschluss von Erzeugungs- und Speichereinrichtungen zu erwarten ist, wurde $k_B + k_E + k_S = 1$ 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 22. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{22 \text{ zul}} = \frac{0,6}{1000} \cdot \frac{1}{1,15} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1}} \cdot \sqrt{\frac{17,03 \text{ MVA}}{101 \text{ kVA}}} \cdot 145,8 \text{ A} = 0,988 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-9 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-1

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

Der zulässige PWHIDI ist in Kapitel 4.3.2.2 angegeben.

4.3.2 Zwischenharmonische

4.3.2.1 Beurteilung

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

4.3.2.2 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 2. Ordnung.

$$g_2 = \frac{0,2}{2 + 0,5} = 80,0 \cdot 10^{-3}$$

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 2. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{2\text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{80,0 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{17,03 \text{ MVA}}{101 \text{ kVA}} \cdot 145,8 \text{ A} = 19,67 \text{ A}$$

$$I_{2\text{ zul}} > \frac{2\%}{100\%} \cdot I_A \rightarrow I_{2\text{ zul}} = \frac{2\%}{100\%} \cdot I_A = \frac{2\%}{100\%} \cdot 145,8 \text{ A} = 2,916 \text{ A}$$

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. – 14. Zwischenharmonische.

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

Tab. 4-10 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7

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	2,9	27	7,3	1	1,8
2	80,0	1	2,9	15	12,9	1,15	2,8	28	7,0	1	1,7
3	57,1	1	2,9	16	12,1	1,15	2,6	29	6,8	1	1,7
4	44,4	1	2,9	17	11,4	1,15	2,4	30	6,6	1	1,6
5	36,4	1	2,9	18	5,4	1,15	1,2	31	9,5	1	2,3
6	30,8	1	2,9	19	5,1	1,15	1,1	32	9,2	1	2,3
7	26,7	1,15	2,9	20	4,9	1,15	1,0	33	9,0	1	2,2
8	23,5	1,15	2,9	21	4,7	1,15	1,0	34	8,7	1	2,1
9	21,1	1,15	2,9	22	4,4	1,15	1,0	35	8,5	1	2,1
10	19,0	1,15	2,9	23	8,5	1,15	1,8	36	8,2	1	2,0
11	17,4	1,15	2,9	24	8,2	1,15	1,7	37	8,0	1	2,0
12	16,0	1,15	2,9	25	7,8	1,15	1,7	38	7,8	1	1,9
13	14,8	1,15	2,9	26	7,5	1	1,9	39	7,6	1	1,9

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_v^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_\mu^2} \cdot 100\% = 41,7\% \quad (\text{B-I 3-8})$$

4.3.3 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

4.3.3.1 Beurteilung

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

4.3.3.2 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 3,7 kHz.

$$I_{3,7 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 3,7^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 3,7 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{17,03 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{3,7 \text{ zul}} = 2,59 \text{ A}$$

Die supraharmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-11 Supraharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-9

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	5,1	4,5	1	2,0	6,9	1	1,1
2,3	1	4,6	4,7	1	1,9	7,1	1	1,1
2,5	1	4,2	4,9	1	1,8	7,3	1	1,1
2,7	1	3,8	5,1	1	1,7	7,5	1	1,0
2,9	1	3,5	5,3	1	1,6	7,7	1	1,0
3,1	1	3,2	5,5	1	1,5	7,9	1	0,9
3,3	1	3,0	5,7	1	1,5	8,1	1	0,9
3,5	1	2,8	5,9	1	1,4	8,3	1	0,9
3,7	1	2,6	6,1	1	1,3	8,5	1	0,9
3,9	1	2,4	6,3	1	1,3	8,7	1	0,8
4,1	1	2,3	6,5	1	1,2	8,9	1	0,8
4,3	1	2,1	6,7	1	1,2			

4.4 Beurteilung einer Ladestation für Elektrobusse (Bsp. 1.10)

4.4.1 Harmonische

4.4.1.1 Beurteilung

Vereinfachte Beurteilung (Stufe 1)

Leistungsverhältnis S_{kV}/S_A :

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

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).

Da keine näheren Informationen über die Art der DC-Ladestation bekannt sind, wird im Sinne einer „Worst-Case“ Betrachtung die Ladestation der Gruppe 3 zugeordnet.

Tab. 4-12 Zuordnung der Oberschwingungserzeuger entsprechend ihres Gesamtoberschwingungsanteils (Bsp. 1.9)

Gerät/Anlage	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3
Ladestation Elektrobusse			600 kVA

Oberschwingungserzeugender Anteil der Anschlussleistung der Kundenanlage:

$$S_{OS} = \frac{1}{2} \cdot S_{Gr1} + S_{Gr2} + 2 \cdot S_{Gr3} = 2 \cdot 600 \text{ kVA} = 1200 \text{ kVA} \quad (\text{B-I 3-6})$$

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = \frac{1200 \text{ kVA}}{600 \text{ kVA}} = 2$$

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

$$\left(\frac{S_{OS}}{S_A}\right)_{zul} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} = \frac{1}{\sqrt{150}} \cdot \sqrt{\frac{14 \text{ MVA}}{600 \text{ kVA}}} = 0,39 \quad (\text{B-I 3-5})$$

Das Leistungsverhältnis S_{OS}/S_A liegt über dem maximal zulässigen Leistungsverhältnis von 0,39 für eine automatische Zulassung, d. h. für den Anschluss ist die Vorgabe von Emissionsgrenzwerten erforderlich.

4.4.1.2 Emissionsgrenzwerte

Anlagenstrom:

$$I_A = \frac{S_A}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{600 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 866,0 \text{ A}$$

Zulässiger Oberschwingungsstrom der Kundenanlage:

Da kein Anschluss von Erzeugungs- und Speichieranlagen zu erwarten ist, wurde $k_B + k_E + k_S = 1$ gewählt. Da die Kurzschlussimpedanz am Anschlusspunkt durch ihren induktiven Anteil dominiert wird, wurde der Impedanzwinkelfaktor $k_{XR} = 1$ gewählt.

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

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

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

z. B. Berechnung des 9. harmonischen Grenzwerts.

$$I_{9 \text{ zul}} = \frac{1,2}{1000} \cdot \frac{1}{1,15} \cdot \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1}} \cdot \sqrt{\frac{14 \text{ MVA}}{600 \text{ kVA}}} \cdot 866,0 \text{ A} = 4,365 \text{ A}$$

Die harmonischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-13 Harmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-1

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	18,8	15	0,3	1,15	1,1	28	0,4	1	1,7
3	5,7	1	23,8	16	0,9	1,15	3,3	29	1,0	1	4,2
4	2,9	1	12,1	17	2,6	1,15	9,5	30	0,3	1	1,3
5	13,1	1	54,8	18	0,5	1,15	1,8	31	0,9	1	3,8
6	1,1	1	4,6	19	2,1	1,15	7,6	32	0,4	1	1,7
7	7,8	1,15	28,4	20	0,7	1,15	2,5	33	0,1	1	0,4
8	1,2	1,15	4,4	21	0,2	1,15	0,7	34	0,4	1	1,7
9	1,2	1,15	4,4	22	0,6	1,15	2,2	35	0,7	1	2,9
10	1,6	1,15	5,8	23	1,6	1,15	5,8	36	0,2	1	0,8
11	5,1	1,15	18,6	24	0,4	1,15	1,5	37	0,7	1	2,9
12	0,8	1,15	2,9	25	1,4	1,15	5,1	38	0,3	1	1,3
13	3,7	1,15	13,4	26	0,5	1	2,1	39	0,1	1	0,4
14	1,0	1,15	3,6	27	0,1	1	0,4	40	0,3	1	1,3

Der zulässige PWHDI ist in Kapitel 4.4.2.2 angegeben.

4.4.1.3 Messtechnische Bewertung

Bei Maximallast einer Ladestation wurden folgende Oberschwingungsströme am Verknüpfungspunkt gemessen:

v	I_v/A	v	I_v/A	v	I_v/A	v	I_v/A	v	I_v/A
1	982.6	11	38.7	21	0.0	31	0.0	41	0.0
2	0.1	12	0.0	22	0.0	32	0.0	42	0.0
3	0.1	13	25.3	23	6.6	33	0.0	43	0.0
4	0.1	14	0.0	24	0.0	34	0.0	44	0.0
5	0.0	15	0.0	25	6.6	35	2.6	45	0.0
6	0.0	16	0.0	26	0.0	36	0.0	46	0.0
7	0.0	17	0.0	27	0.0	37	2.2	47	2.0
8	0.0	18	0.0	28	0.0	38	0.0	48	0.0
9	0.0	19	0.0	29	0.0	39	0.0	49	1.6
10	0.1	20	0.0	30	0.0	40	0.0	50	0.0

Die Oberschwingungsgrenzwerte werden für I_{11} , I_{13} , I_{23} und I_{25} nicht eingehalten. Es sind Maßnahmen zu ergreifen, beispielsweise ein Oberschwingungsfilter.

4.4.2 Zwischenharmonische

4.4.2.1 Beurteilung

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

4.4.2.2 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 37. Ordnung.

$$g_{37} = \frac{0,3}{37 + 0,5} = 8,0 \cdot 10^{-3}$$

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 37. zwischenharmonischen Grenzwerts.

$$I_{37 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{8,0 \cdot 10^{-3}}{100} \cdot \frac{14 \text{ MVA}}{600 \text{ kVA}} \cdot 866,0 \text{ A} = 1,617 \text{ A}$$

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 die 1. Zwischenharmonische.

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

Tab. 4-14 Zwischenharmonische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-7

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	17,3	14	13,8	1,15	2,4	27	7,3	1	1,5
2	80,0	1	16,1	15	12,9	1,15	2,3	28	7,0	1	1,4
3	57,1	1	11,5	16	12,1	1,15	2,1	29	6,8	1	1,4
4	22,2	1	4,5	17	11,4	1,15	2,0	30	6,6	1	1,3
5	18,2	1	3,7	18	10,8	1,15	1,9	31	9,5	1	1,9
6	15,4	1	3,1	19	10,3	1,15	1,8	32	9,2	1	1,9
7	13,3	1,15	2,3	20	9,8	1,15	1,7	33	9,0	1	1,8
8	11,8	1,15	2,1	21	9,3	1,15	1,6	34	8,7	1	1,8
9	21,1	1,15	3,7	22	8,9	1,15	1,6	35	8,5	1	1,7
10	19,0	1,15	3,3	23	8,5	1,15	1,5	36	8,2	1	1,7
11	17,4	1,15	3,1	24	8,2	1,15	1,4	37	8,0	1	1,6
12	16,0	1,15	2,8	25	7,8	1,15	1,4	38	7,8	1	1,6
13	14,8	1,15	2,6	26	7,5	1	1,5	39	7,6	1	1,5

Zulässiger PWHIDI:

$$PWHIDI_{\text{zul}} = \frac{1}{I_A} \cdot \sqrt{\sum_{v=16}^{40} v \cdot I_v^2 + \sum_{\mu=16}^{39} \mu \cdot I_\mu^2} \cdot 100 \% = 10,7 \% \quad (\text{B-I 3-8})$$

4.4.3 Supraharmonische (2 – 9 kHz)

4.4.3.1 Beurteilung

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

4.4.3.2 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 3,3 kHz.

$$I_{3,3 \text{ zul}} = \frac{1}{1} \cdot \frac{3,3 \cdot 3,3^{-0,52} \cdot 1 \text{ A}}{\left(10,25 - \frac{9 \text{ kHz} - 3,3 \text{ kHz}}{\text{kHz}}\right) \cdot \left(0,1 + (1 - 0,1) \cdot \frac{0,57 \text{ MVA}}{14 \text{ MVA}}\right)}$$

$$I_{3,3 \text{ zul}} = 3,85 \text{ A}$$

Die supraharmischen Emissionsgrenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

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

Tab. 4-15 Supraharmische Emissionsgrenzwerte gemäß B-I 3-9

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	4,9	4,5	1	1,9	6,9	1	1,1
2,3	1	4,4	4,7	1	1,8	7,1	1	1,0
2,5	1	4,0	4,9	1	1,7	7,3	1	1,0
2,7	1	3,6	5,1	1	1,6	7,5	1	1,0
2,9	1	3,3	5,3	1	1,5	7,7	1	0,9
3,1	1	3,1	5,5	1	1,5	7,9	1	0,9
3,3	1	2,9	5,7	1	1,4	8,1	1	0,9
3,5	1	2,7	5,9	1	1,3	8,3	1	0,8
3,7	1	2,5	6,1	1	1,3	8,5	1	0,8
3,9	1	2,3	6,3	1	1,2	8,7	1	0,8
4,1	1	2,2	6,5	1	1,2	8,9	1	0,8
4,3	1	2,0	6,7	1	1,1			