

**TECHNISCHER BERICHT:
BEURTEILUNG DER OBERSCHWINGUNGEN DURCH
THYRISTORSTROMRICHTER ZUR SPEISUNG VON
WASSERSTOFF-HYDROLYSE-STACKS UND DEREN
AUSWIRKUNGEN AM VERKNÜPFUNGSPUNKT MIT
DEM SPEISENDEN MS-NETZ AM BEISPIEL EINES
REALISIERTEN PROJEKTES BEI DER
AWG ABFALLWIRTSCHAFTSGESELLSCHAFT MBH
WUPPERTAL**

Anlage:
Hydrolyseanlage



Betreiber:
AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal

1 Vorbemerkungen

Durch die AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal (AWG) wurde eine Wasserstoffanlage zur Erzeugung, Druckspeicherung und Betankung von Bussen errichtet. Die Hydrolysestacks werden von Thyristorstromrichtern gespeist. Die Oberschwingungsbelastung des Netzes durch die nichtsinusförmigen Ströme und durch Kommutierungseinbrüche sind erheblich und abhängig von der Netzimpedanz / Kurzschlussleistung und vom Betriebszustand (Zündwinkel). Im Folgenden wird über die planerische Beurteilung der Netzurückwirkungen auf der Basis der geltenden Regeln berichtet.

2 Oberschwingungen und deren Auswirkungen

Sie erhöhen die Eisenverluste in Transformatoren.

Sie erzeugen Steuer-Blindleistung.

Sie beeinflussen die Abschaltcharakteristik von Motorschutzschaltern und Leistungsschaltern; dies kann zu einer frühzeitigen Auslösung führen.

Sie bilden häufig eigene Drehfelder, die schneller umlaufen als das übliche Drehfeld der 50Hz- Netzspannung. Motoren, die durch das Drehfeld der Netzspannung angetrieben werden, z. B. Asynchronmotoren, werden dadurch beeinflusst, laufen unruhig, werden lauter und haben erhöhte Verluste.

Sie belasten den Neutralleiter (vor allem durch die 3. harmonische Oberschwingung); hierdurch entsteht eine thermische Überlastung und Überspannung bei angeschlossenen Betriebsmitteln.

Sie überlasten unverdrosselte Kompensationsanlagen.

Bei Netzen mit Kompensationsanlagen, Filterkreisen usw. können sie zu Resonanzerscheinungen führen. Diese Netz-Resonanzkreise aus Trafostreuinduktivitäten, Kabelkapazitäten und weiteren Kapazitäten haben eine hohe Güte, was zu hohen Überspannungen führen kann.

Sie verzerren die Netzspannung, da die verzerrten Ströme an den Netzimpedanzen einen verzerrten Spannungsfall hervorrufen. Diese Spannungen treten auch in Netzbereichen auf, in denen keine Oberschwingungserzeuger betrieben werden.

Die Störwirkung des magnetischen Feldes von Oberschwingungsströmen ist wegen der höheren Frequenzen größer (EMV).

3 Netzstruktur und Verknüpfungspunkt

Netzseitig sind zwei Betriebszustände bei der Versorgung des 10kV-Werksnetzes über zwei 25MVA-Trafos aus dem 110kV-Hochspannungsnetz benannt. Für beide Zustände ist der Hydrolysebetrieb zu betrachten. In Abbildung 1 und 2 sind die Betriebszustände schematisch dargestellt.

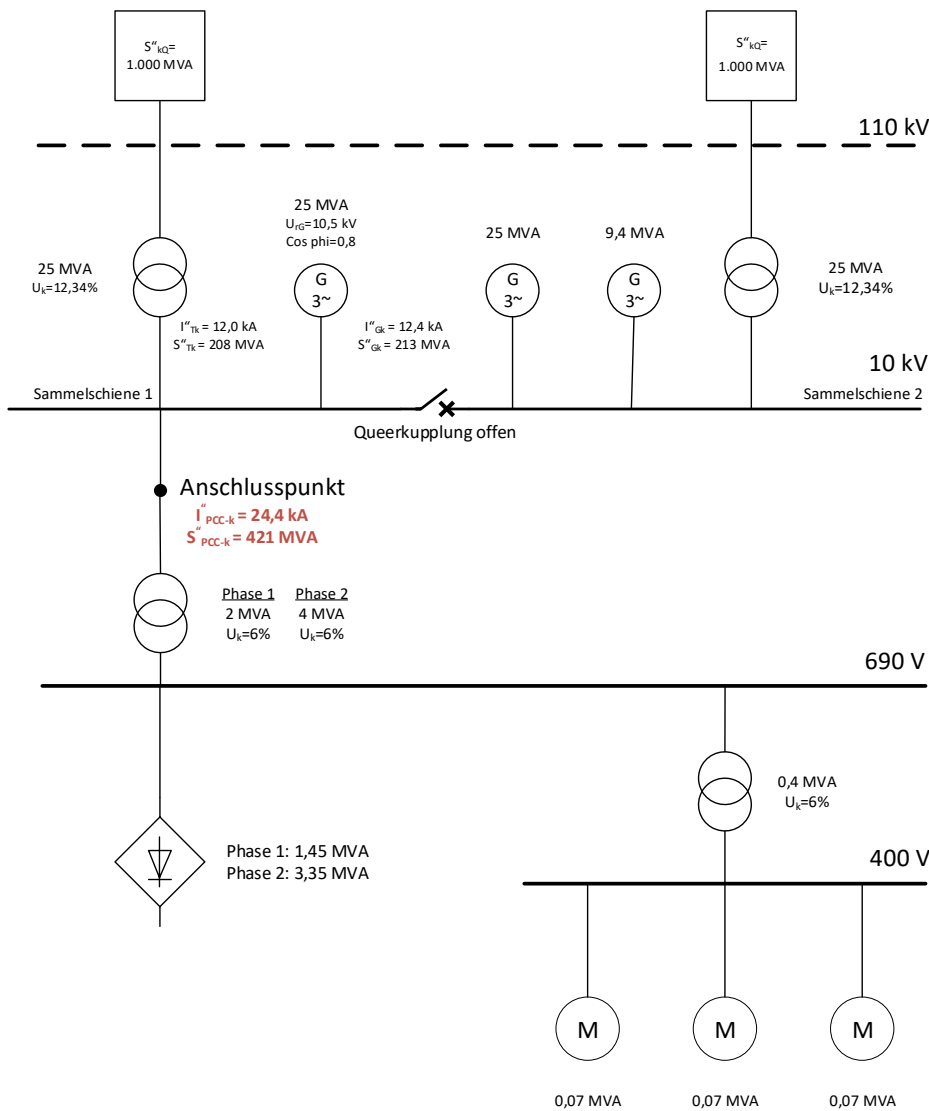


Abb. 1: Betriebszustand 1 – schematische Darstellung

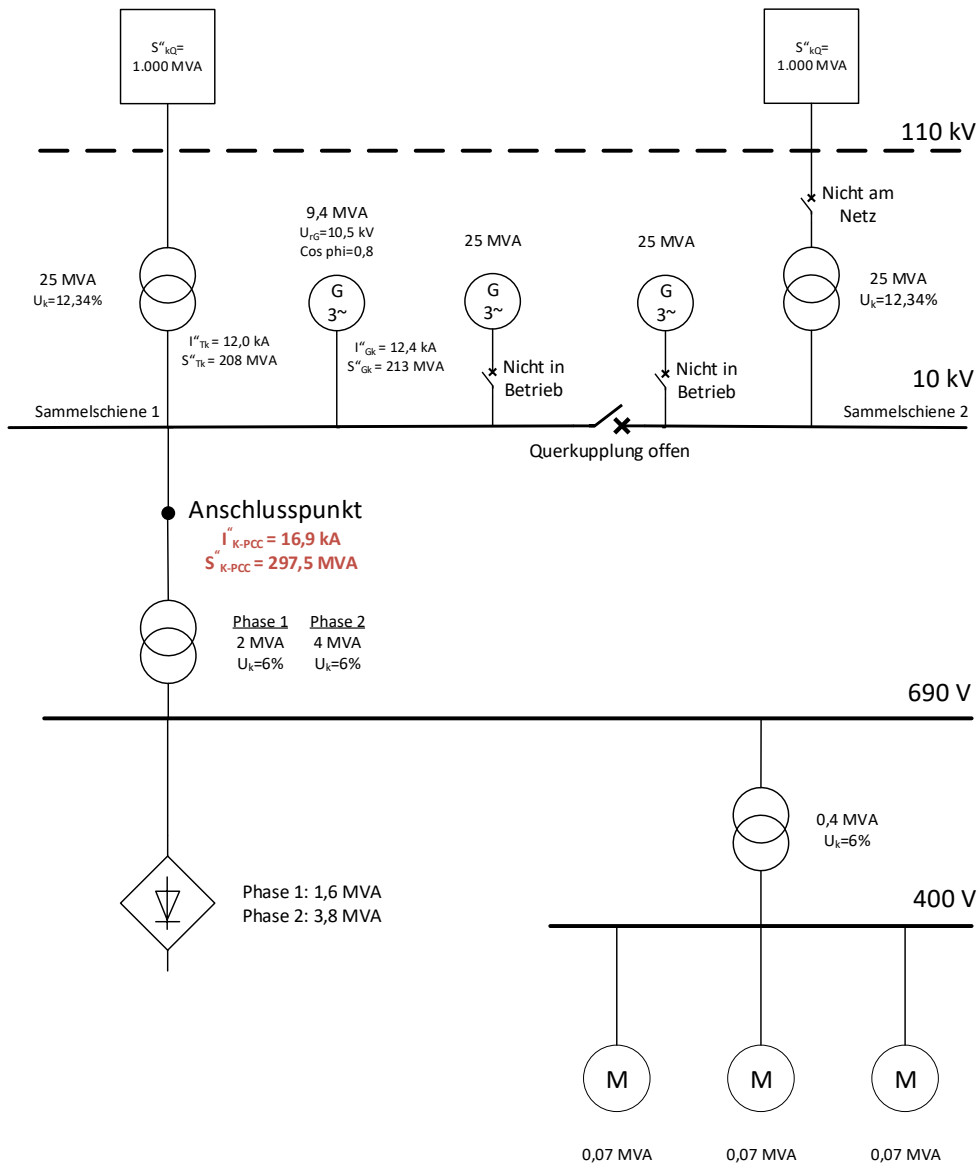


Abb. 2: Betriebszustand 2 – schematische Darstellung

Die folgende Tabelle zeigt die MS-Netz-Daten und die berechneten Kurzschlussleistungen:

Einspeisung		Generator	Betriebszustand 1	Betriebszustand 2
Transformator 110 kV / 10 kV				
Einspeisung		S_{rG}	25 MVA	9,4 MVA
S''_{kQ}	1000 MVA	U_n	10,0 kV	10,0 kV
U_{NQ}	110 kV	U_{rG}	10,5 kV	10,5 kV
I''_{kQ}	5 kA	$\cos\Phi_{rG}$	0,8	
c_{max}	1	X''_d	0,12	
$Z_Q = c \cdot U_{NQ} / (3^{1/2} \cdot I_{kQ})$	12,1 Ω	c_{max}	1	
$Z_{Qt} = Z_Q \cdot (U_{UV} / U_{OV})^2$	0,1103 Ω	R_G	$0,07 \cdot X''_d$	
Transformator				
u_{kr}	12,5 %	$X''_d = X''_d \cdot U_{rG}^2 / S_{rG}$		
U_{RT}	10,5 kV	X''_d	0,5292 Ω	
S_{rT}	25 MVA	R_G	0,0370 Ω	
P_{krT}	130,0 kW			
$R_T = P_{krT} \cdot U_{rT}^2 / S_{rT}^2$	0,0229 Ω	$K_G = U_n / U_{rG} \cdot c_{max} / (1 + X''_d \cdot \sin\Phi_{rG})$	0,888	
$X_T = (Z_T^2 + R_T^2)^{1/2}$	0,5517 Ω			
$Z_T = u_{kr} / 100\% \cdot U_{UV}^2 / S_{rT}$	0,5513 Ω			
$K_T = 0,95 \cdot c / (1 + 0,6 \cdot X_t)$	0,7137 Ω	$I''_{kG} = c_{max} \cdot U_n / (3^{1/2} \cdot K_G \cdot (R_G + jX''_d))$		
$Z_{KT} = Z_T \cdot K_T$	0,3934 Ω			
Gesamt				
$Z_K = Z_{KT} + Z_{Qt}$	0,5037 Ω			
$I''_{kT} = c \cdot U_n / (3^{1/2} \cdot Z_k)$	12,0 kA	I''_{kG}	12,3 kA	4,88 kA
$S''_{kT} =$	208 MVA	S''_{kG}	213 MVA	84,5 MVA
$S''_{k \text{ Betrieb 1}} = S''_{kT} + S''_{kG} =$		421 MVA		
$S''_{k \text{ Betriebs 2}} = S''_{kT} + S''_{kG} =$		297,5 MVA		

Für die beiden Betriebszustände ergibt sich eine Kurzschlussleistung am Netzanschlusspunkt von 297,5 MVA bis 421 MVA.

Im Folgenden wird die Ermittlung der Netzurückwirkungen dargestellt.

4 Anschlussdaten der Hydrolyse- Stromrichter

**Phase 1:
stromrichtergespeister
Hydrolyse-Stack mit 170
Zellen**

P _A (kW)	S _A (kVA)	PF	cos φ	THDi	Strom (I _A)
1.150	1.474	0,78	0,9	57%	1233 A
863	1.182	0,73	0,87	68%	989 A
575	871	0,66	0,84	82%	728 A
414	679	0,61	0,82	91%	568 A
114	221	0,52	0,77	112%	185 A

5 Berechnung der zulässigen Oberwellenströme nach VDI 4110

Ziel ist es, für die Phase 1 zu prüfen, ob die zulässigen Oberwellenströme durch die Ströme der vorstehenden Tabelle nicht überschritten werden. Die Berechnung der zulässigen Oberwellenströme bezogen auf die 50 Hz Grundschwingung erfolgt entsprechend der VDE 41110:2018-11 / Kapitel: 5.4.4 nach Gleichung 1 für die harmonischen Oberwellen und für die zwischenharmonischen Oberwellen nach Gleichung 2.

$$I_{v \text{ zul}} = \frac{p_{vf \ v}}{1000} \cdot \sqrt{\frac{S_{kV}}{S_A}} \cdot I_A$$

Gleichung 1:

$$I_{\mu \text{ zul}} = \frac{1}{k_{\mu}} \cdot \frac{g_{\mu}}{100} \cdot \frac{S_{kV}}{S_A} \cdot I_A$$

Gleichung 2:

S_{kV} = Kurzschlussleistung an Anschlusspunkt

S_A = Leistung der angeschlossenen Anlage

I_A = Strom der angeschlossenen Anlage bei Nennleistung

p_{vf v} = Proportionalitätsfaktor für die Berechnung der zulässigen Oberschwingungsströme

g_μ = Proportionalitätsfaktor für die Berechnung der zulässigen zwischenharmonischen Ströme

k_μ = Resonanzfaktor für die zwischenharmonischen Oberwellen, in folgenden Berechnungen = 1

Die Proportionalitätsfaktoren p_{vf_v} und g_μ sind frequenzabhängig und den Tabellen 2 und 3 zu entnehmen.

Die Berechnung der frequenzabhängig maximal zulässigen Oberwellenströme erfolgt unter Verwendung der berechneten Kurzschlussleistungen am Netzanschlusspunkt sowie den Herstellerangaben der Hydrolyse-Anlage:

Betriebszustand 1 - Netz-Kurzschlussleistung (S_{kV}): 421 MVA

Projekt: Wasserstofftankstelle AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal

Betriebszustand 2 - Netz-Kurzschlussleistung (S_{KV}): 297,5 MVA
 Anlagenleistung (S_A): 1,6 MVA
 Anlagenstrom (I_A): 1300 A

Die Netzurückwirkungen der zusätzlichen 400V Verbraucher (Kompressor, Heizung) wurden aufgrund der geringfügigen Leistung vernachlässigt.

Ungeradzahlige Oberschwingungen nicht durch drei teilbar		
v	$P_{vf\ v}$	k_{korr}
5 ^a	4,10	3,48
7	4,39	1,74
11	2,79	1,74
13	2,18	1,74
17	1,11	1,74
19	0,88	1,74
23	1,03	1,16
25	0,85	1,16
29	0,61	1,16
31	0,52	1,16
35	0,42	1,16
37	0,37	1,16

Geradzahlige Oberschwingungen		
v	$P_{vf\ v}$	k_{korr}
2	2,75	1,74
4	1,2	1,74
6	0,62	1,74
8	0,57	1,74
10	0,49	1,74
12	0,41	1,74
14	0,33	1,74
16	0,28	1,74
18	0,25	1,74
20	0,32	1,16
22	0,3	1,160
24	0,26	1,160
26	0,25	1,160
28	0,23	1,160
30	0,21	1,160
32	0,20	1,160
34	0,18	1,160
36	0,18	1,16
38	0,17	1,16
40	0,16	1,16

durch drei teilbar		
v	$P_{vf\ v}$	k_{korr}
3	3,92	1,74
9	0,7	1,74
15	0,29	1,74
21	0,25	1,16
27	0,14	1,16
33	0,12	1,16
39	0,10	1,16

^a Bedingt durch eine Resonanzstelle bei der 5. Harmonischen in Hochspannungsnetzen mit deutlichem Kabelanteil (z. B. Städtetze oder Windparks) wurde der Faktor p_μ halbiert.

μ	g_μ
1	0,07
2	0,04
3 ... 30	$0,2/(\mu + 0,5)$
31 ... 39	$0,3/(\mu + 0,5)$

Tabelle 2: Proportionalitätsfaktor für die Berechnung der zulässigen harmonischen Oberwellenströme nach VDE41110

Die Ordnung μ der zwischenharmonischen Oberwellen entspricht der Ordnungszahl v der benachbarten, niedrigeren harmonischen Oberwellen.

Tabelle 3: Proportionalitätsfaktor für die Berechnung der zulässigen zwischenharmonischen Ströme nach VDE41110

Projekt: Wasserstofftankstelle AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal

6 Vergleich der zulässigen Oberwellenströme und Herstellerangaben

In Abbildung 2 und 3 sind die berechneten zulässigen Oberwellenströme mit den realen Betriebsströmen für den maximalen Lastfall (1600 kVA) von Phase 1 abgebildet.

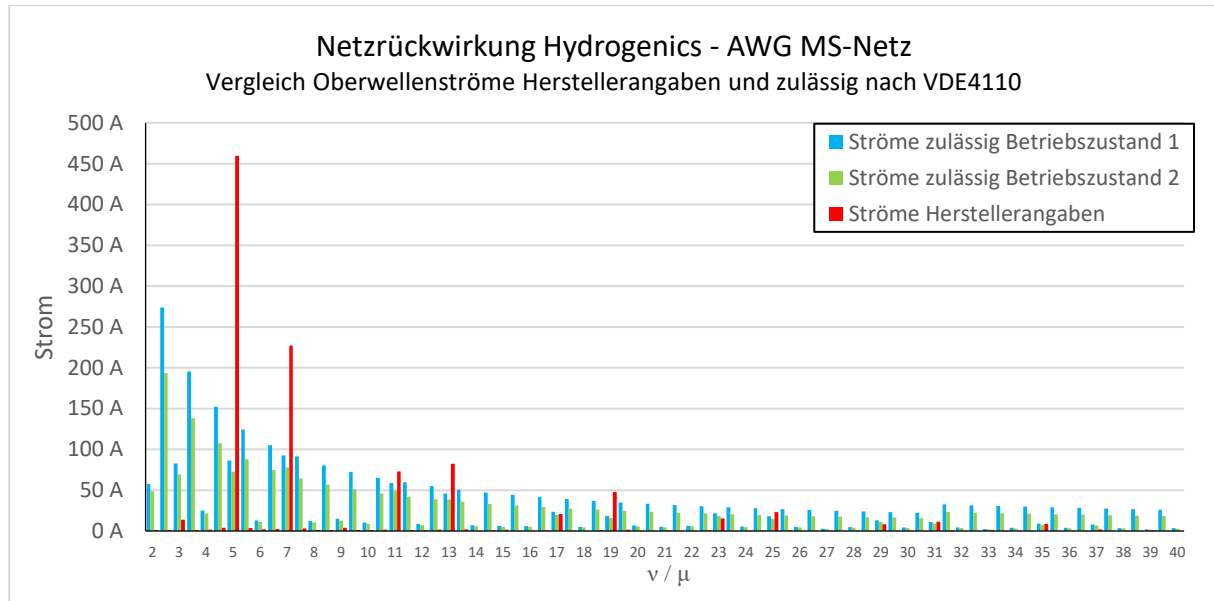


Abbildung 2: Vergleich Oberwellenströme nach VDE4110 und Herstellerangaben (2te-40te Ordnung)

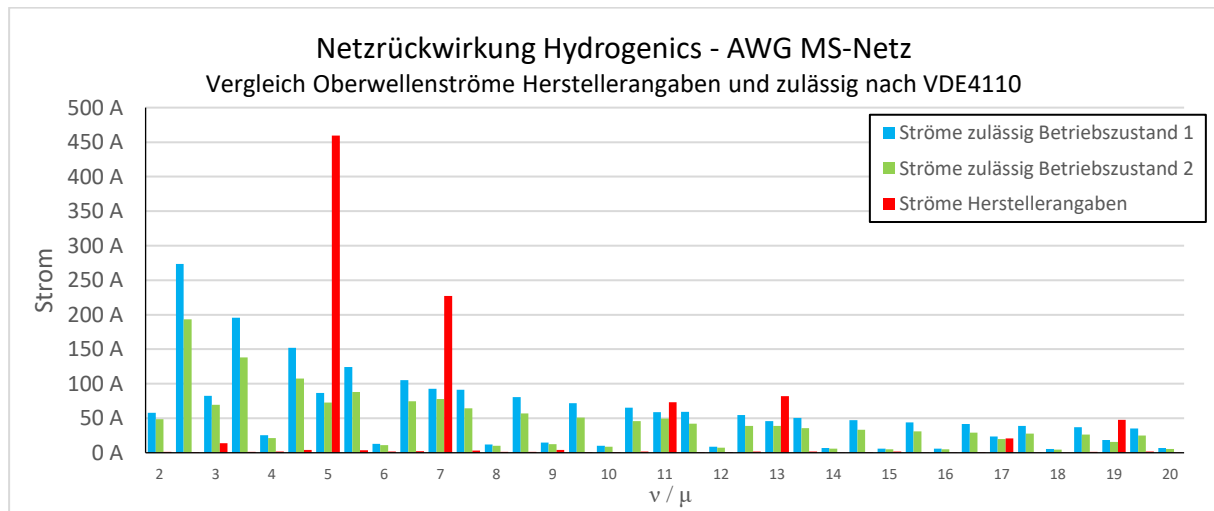


Abbildung 3: Vergleich Oberwellenströme nach VDE4110 und Herstellerangaben (2te-20te Ordnung)

In Abbildung 2 und 3 ist ersichtlich, dass für mehrere Oberwellen die zulässigen Ströme deutlich überschritten werden.

In Tabelle 4 sind die berechneten zulässigen Ströme sowie die Herstellerangaben für alle harmonischen und zwischenharmonischen Oberwellen aufgelistet.

Projekt: Wasserstofftankstelle AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal

v / μ	zulässige Ströme Betriebszustand 1	zulässige Ströme Betriebszustand 2	Ströme Herstellerangaben
1,5	136,8 A	96,7 A	1,5 A
2	57,8 A	48,6 A	1,3 A
2,5	273,7 A	193,4 A	1,1 A
3	82,7 A	69,5 A	13,7 A
3,5	195,5 A	138,1 A	1,2 A
4	25,3 A	21,3 A	1,7 A
4,5	152,0 A	107,4 A	3,9 A
5	86,5 A	72,7 A	459,6 A
5,5	124,4 A	87,9 A	3,5 A
6	13,1 A	11,0 A	1,9 A
6,5	105,3 A	74,4 A	2,3 A
7	92,6 A	77,8 A	226,9 A
7,5	91,2 A	64,5 A	3,1 A
8	12,0 A	10,1 A	1,1 A
8,5	80,5 A	56,9 A	1,2 A
9	14,8 A	12,4 A	3,9 A
9,5	72,0 A	50,9 A	1,0 A
10	10,3 A	8,7 A	1,1 A
10,5	65,2 A	46,0 A	1,8 A
11	58,8 A	49,5 A	73,1 A
11,5	59,5 A	42,0 A	1,1 A
12	8,6 A	7,3 A	0,6 A
12,5	54,7 A	38,7 A	1,6 A
13	46,0 A	38,6 A	82,2 A
13,5	50,7 A	35,8 A	1,8 A
14	7,0 A	5,8 A	0,6 A
14,5	47,2 A	33,3 A	0,7 A
15	6,1 A	5,1 A	1,7 A
15,5	44,1 A	31,2 A	0,6 A
16	5,9 A	5,0 A	0,5 A
16,5	41,5 A	29,3 A	0,9 A
17	23,4 A	19,7 A	20,7 A
17,5	39,1 A	27,6 A	0,5 A
18	5,3 A	4,4 A	0,6 A
18,5	37,0 A	26,1 A	1,3 A
19	18,6 A	15,6 A	47,7 A
19,5	35,1 A	24,8 A	1,6 A
20	6,7 A	5,7 A	0,5 A
20,5	33,4 A	23,6 A	0,5 A
21	5,3 A	4,4 A	0,9 A
21,5	31,8 A	22,5 A	0,5 A
22	6,3 A	5,3 A	0,4 A
22,5	30,4 A	21,5 A	0,8 A
23	21,7 A	18,3 A	15,4 A
23,5	29,1 A	20,6 A	0,5 A
24	5,5 A	4,6 A	0,3 A
24,5	27,9 A	19,7 A	0,9 A
25	17,9 A	15,1 A	23,1 A
25,5	26,8 A	19,0 A	1,0 A
26	5,3 A	4,4 A	0,3 A
26,5	25,8 A	18,2 A	0,3 A
27	3,0 A	2,5 A	0,6 A
27,5	24,9 A	17,6 A	0,3 A
28	4,9 A	4,1 A	0,3 A
28,5	24,0 A	17,0 A	0,5 A
29	12,9 A	10,8 A	8,4 A
29,5	23,2 A	16,4 A	0,5 A
30	4,4 A	3,7 A	0,3 A
30,5	22,4 A	15,9 A	0,6 A
31	11,0 A	9,2 A	11,5 A
31,5	32,6 A	23,0 A	0,6 A
32	4,2 A	3,5 A	0,3 A
32,5	31,6 A	22,3 A	0,3 A
33	2,5 A	2,1 A	1,1 A
33,5	30,6 A	21,6 A	0,2 A
34	3,8 A	3,2 A	0,2 A
34,5	29,7 A	21,0 A	0,5 A
35	8,9 A	7,4 A	8,6 A
35,5	28,9 A	20,4 A	0,5 A
36	3,8 A	3,2 A	0,3 A
36,5	28,1 A	19,9 A	0,3 A
37	7,8 A	6,6 A	1,9 A
37,5	27,4 A	19,3 A	0,2 A
38	3,6 A	3,0 A	0,1 A
38,5	26,7 A	18,8 A	0,2 A
39	2,1 A	1,8 A	0,8 A
39,5	26,0 A	18,4 A	0,2 A
40	3,4 A	2,8 A	0,2 A

Tabelle 4: zulässige Oberwellenströme nach VDE 4110:2018-11 und Herstellerangaben Hydrogenics

Projekt: Wasserstofftankstelle AWG Abfallwirtschaftsgesellschaft mbH Wuppertal

7 Zusammenfassung

Die Netzurückwirkungen der Stromrichter am Anschlusspunkt des Mittelspannungsnetzes übersteigen die zulässigen Werte nach VDE 41110:2018-11 / Kapitel:5.4.4.

Ein Betrieb der Hydrolyseanlage ist bei zugrunde gelegter MS- Netzstruktur sowie den berücksichtigten Leistungs- und THDi- Daten von Hydrogenics ohne Maßnahmen (z.B. passive Saugkreise oder aktive Filter) zur Reduzierung nicht zulässig.

*Bei technischen Fragen wenden Sie sich bitte an:
Herrn Guido Wiekert oder an Herrn Dominic Wode.*

Was sie auch interessieren könnte:

Trouble-shooting bei Problemen mit umrichter gespeisten Antrieben

