

# Grundlagenstudie zu Lärmquellen und Lärmschutzmassnahmen bei ortsfesten Starkstromanlagen

201912 | Akustischer Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)



Bern, 8. Juli 2022  
Version 1.6

## Versionshistorie

Version	Datum	Bemerkungen
1.0	29.04.2021	Entwurf
1.1	25.06.2021	Anpassungen an der Berichtsstruktur
1.2	28.06.2021	Geringfügige formale Anpassungen
1.3	30.03.2022	Daten für Kompensationsspulen ergänzt
1.4	14.04.2022	Geringfügige Ergänzungen zu Lärmschutzmassnahmen
1.5	25.05.2022	Mittelung des Impulshaltigkeitszuschlags bei Freiluftschaltanlagen
1.6	08.07.2022	Erläuterungen zu den Pegelzuschlägen bei Freiluftschaltanlagen

## Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Lärm & NIS, CH-3003 Bern  
 Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmerin: Gartenmann Engineering AG, Mitwirkung der BKW Energie AG  
 Autoren: Dr. Clemens Kuhn-Rahloff (gae), Dieter Fuchs (gae), Lukas Eggimann (BKW)  
 Begleitung BAFU: Nina Mahler, Kornel Köstli

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein die Auftragnehmerin verantwortlich.

## Inhalt

1. Management Summary .....	4
2. Grundlagen.....	7
3. Auftrag .....	8
4. Durchführung der Messungen am Standort Wimmis.....	8
4.1. Transformatoren.....	9
4.2. Umrichter .....	10
4.3. Umformer.....	11
4.4. Gasisolierte Schaltanlagen (GIS).....	12
4.5. Freiluftschaltanlagen .....	12
4.6. Kompensationsspulen (Drosseln).....	13
5. Zusammenfassung der Emissionen und kritische Distanzen für die Beurteilung.....	13
6. Kontext der Fachliteratur und Erfahrungswerte.....	15
6.1. Emissionsdaten.....	15
6.2. Zusammenfassung des Vorgehens für die Lärmberechnungen bei Transformatoren.....	16
6.3. Lärmschutzmassnahmen.....	16
6.4. Relevanz der Messergebnisse für zukünftige Bewilligungsverfahren.....	17

## 1. Management Summary

Das BAFU beauftragte die Gartenmann Engineering AG mit einer Untersuchung über typische Betriebszustände und damit verbundene Lärmemissionen verschiedener Starkstromanlagen. Zweck der Studie ist es, dem BAFU Angaben über die Lärmemissionen verschiedener Anlagentypen als Beurteilungsgrundlage für zukünftige Bewilligungsverfahren zur Verfügung zu stellen. Prinzipiell lassen sich folgende lärmrelevante Anlagenkomponenten unterscheiden:

Equipment	Aufstellung	Geräuschart	Einfluss
Leitenseile / Isolatoren	Im Freien	Knistern, leise, konstant	Wetter, Spannungsebene
Schalter, Trenner, Erder	Im Freien oder Gebäude möglich	Knall, mechanisches Geräusche von Motor (Federantrieb aufziehen, Druckluftkompressor, je nach Alter und Technologie)	Abhängig von Technologie (Spannung und Strom haben eher auf die Technologie und somit indirekt Einfluss)
Transformatoren	Im Freien oder Gebäude möglich	Trafobrummen, bei neuen Trafos relativ leise möglich	Lastabhängig, bei mehreren Trafos in der Anlage können durch Umschaltungen verschiedene Lastsituationen erreicht werden (Ein, Halbe Last des Unterwerks, ganze Last des Unterwerks)
Erdschlusskompensationspulen	Im Freien oder Gebäude möglich	Trafobrummen, nur im Fehlerfall (selten)	Ein / Aus, kann nicht gezielt eingeschaltet werden (es müsste im Netz ein Fehler provoziert werden)
Kompensationsspulen	Im Freien oder Gebäude möglich	Trafobrummen, laut, konstant	Geräusentwicklung je nach Kompensationsleistung
Ventilatoren	Im Freien	Bei Geräten welche Verlustleistung haben (hauptsächlich Trafos) sind die Kühlanlagen teilweise mit Ventilatoren ausgerüstet	Die Ventilatoren können in der Regel manuell ein- und ausgeschaltet werden.
Umformer (mechanisch)	In der Regel im Gebäude	Motor / Generator, laut	Bemerkung: aussterbende Technologie
Umrichter (elektronisch)	In der Regel im Gebäude, Kühler im Freien	Meist ist die Kühlanlage lauter als der Umformer, eher höhere Frequenzen	Leistungsabhängig

An der Unterstation Wimmis (BE), welche Hochspannungsanlagen der BKW Energie AG und der SBB umfasst, wurden Lärmemissionsmessungen an verschiedenen Anlagenteilen durchgeführt und mit Daten des zeitlichen Verlaufs der Netzlast hinterlegt. Untersucht wurden folgende Anlagentypen:

- Transformatoren
- Umrichter (statisch)
- Umformer (drehend)
- Gasisolierte Schaltanlagen (GIS)
- Freiluftschaltanlagen

Zusätzlich wurden Prüfstandsdaten für Kompensationsspulen beigezogen. Zusammenfassend konnte Folgendes festgestellt werden:

- Für Transformatoren, Umrichter und Freiluftschaltanlagen sind typische Emissionsdaten auf Basis der Messergebnisse in Abschnitt 5 zusammengefasst. Darin sind auch für Nutzungszonen verschiedener Empfindlichkeitsstufen nach LSV (ES I bis IV) die Distanzen angegeben, ab denen aufgrund der geometrischen Ausbreitungsdämpfung typischerweise damit zu rechnen ist, dass keine Planungs- bzw. Immissionsgrenzwertüberschreitungen mehr zu erwarten sind
- Generell werden Anlagen des Hochspannungsnetzes mit erheblichen Redundanzen ausgelegt. Transformatoren, Umrichter und Umformer erreichen sehr selten eine Netzlast, welche 50 % ihrer zulässigen Nennleistung überschreitet (ausgenommen bei Störfällen). Schallleistungsdaten von Anlagenkomponenten aus dem Prüfstand, welche in der Regel den Nennleistung-Fall widerspiegeln, sind daher als sehr konservativ zu erachten. Für die Planungspraxis wird daher aufgrund der Ergebnisse in diesem Bericht empfohlen, nicht den Nennleistung-Fall für die Schallemissionen zugrunde zu legen, sondern einen repräsentativen Lastfall des Normalbetriebs unter Berücksichtigung der Redundanzen. Dies entspricht typischerweise Lastfällen von maximal 50 %
- Im Bereich der vorherrschenden, geringen Netzbelastung der Anlagen konnte keine oder nur allenfalls sehr geringe Varianzen der Lärmemissionen in Abhängigkeit der Netzbelastung festgestellt werden. Die Netzlast am untersuchten Transformator variierte beispielsweise im Bereich von rund 25 bis 45 % der Nennleistung. Die Schallpegeländerung im gleichen Zeitraum lag bei 1 bis 2 dB. Für die Planungspraxis dürfte daher die Varianz der Netzlast keine Rolle spielen
- Genauere Lärmbetrachtungen sollten ggf. für Kühlanlagen (Rückkühler) durchgeführt werden, da deren Schallleistung in der Praxis weniger von der effektiven Netzlast als vielmehr von der Aussentemperatur abhängig ist. Ventilatoren von Transformatoren und Drosseln sowie Rückkühler von Umrichtern laufen selten unter Volllast und sind daher für den langfristigen Mittelwert ( $L_{eq}$ ) von untergeordneter Bedeutung. Bei nahe gelegenen Immissionsorten können sie aber insbesondere nachts störend sein. Sie sollten zumindest im Sinne der Lärmvorsorge nach Art. 11 USG in Bewilligungsverfahren berücksichtigt werden
- Theoriebasierten Prognosen der Lärmemissionen anhand der Norm EN 600761 sind nur bis zur einer minimalen Last von 60 % gegenüber der jeweiligen Nennleistung gültig. Die vorliegenden Messergebnisse legen nahe, dass unterhalb von 60 % die Lärmemissionen auf nahezu konstantem Niveau verharren. Für Prognosen von Emissionen bei tieferen Netzlasten kann also der Emissionswert bei 60 % Last zugrunde gelegt werden. Diese Schallemissionswerte für 60 % Last können – wie die Messergebnisse dieser Studie zeigen, mit hinreichender Zuverlässigkeit aus den Daten für volle Last und theoriebasierten Berechnungen gemäss der Norm EN 60076-10 ermittelt werden
- Sowohl für den untersuchten Transformator als auch für den untersuchten Umrichter und die Kompensationsspule konnte eine ausgeprägte Richtcharakteristik der Schallabstrahlung in der Horizontalebene festgestellt werden. Die lokale Schallintensität liegt je nach Abstrahlwinkel um bis zu 5 dB über der räumlich gemittelten Schallintensität. Da die Richtcharakteristik stark vom jeweiligen Anlagentyp und der Bauform abhängen dürfte und da vom Hersteller üblicherweise keine Richtcharakteristikdaten zur Verfügung gestellt werden, kann diese räumliche Varianz in der Planungspraxis nur durch entsprechend grosse Projektierungszuschläge berücksichtigt werden

- Aufgrund der Messergebnisse empfehlen wir folgendes Vorgehen für Lärmprognosen bei Transformatoren:
  - Schallleistungspegel des Transformators bestimmen gemäss Herstellerdatenblatt
  - Falls der Transformator redundant betrieben wird: 4 dB vom garantierten Schallleistungspegel abziehen, um die Teillast zu berücksichtigen
  - Projektierungszuschlag von 5 dB für die Richtcharakteristik addieren
  - Anschliessend die Abstandsämpfung sowie die Pegelzuschläge berücksichtigen gemäss LSV
- Für Kompensationsspulen sollte auf den Schallleistungspegel gemäss Datenblatt ein Projektierungszuschlag von 5 dB für die Richtcharakteristik addiert werden
- Um GIS-Anlagen allfällige weitere empfindliche Anlagenteile und Umformer vor der Witterung zu schützen, werden diese in der Regel in abgeschlossenen Räumen installiert. Die Lärmausbreitung in den Aussenraum wird entsprechend vermindert. Für die Immissionsbeurteilung nach LSV sind diese Anlagen daher meist von geringer Bedeutung
- Freiluftschaltanlagen sind durch kurze, stark impulshaltige Schaltvorgänge gekennzeichnet, welche Schallleistungspegel von über 100 dB(A) erreichen können. Da diese Schaltungen aber sehr selten stattfinden und nur wenige Sekunden andauern, haben sie für die Lärmbeurteilung nach LSV auf Basis des  $L_{eq}$  kaum Bedeutung. Freiluftschaltanlagen kommen heute grösstenteils nur noch in den höheren Spannungsebenen zum Einsatz, wo Schalthandlungen und Schutzauflösungen (ungeplante Schalthandlungen) selten vorkommen. Es kann pro Feld<sup>1</sup> und Jahr im langjährigen Schnitt mit einer Schutzauflösung alle zwei Jahre gerechnet werden. Die geplanten Schalthandlungen, welche in Unterwerken in der Regel zwischen 7 Uhr und 18 Uhr stattfinden, können im Mittel pro Feld mit einer Schalthandlung pro Monat angenommen werden. Beispielsweise bei Wasserkraftwerken kann es aber je nach verfügbarer Wassermenge zu gewissen Jahreszeiten auch nachts zu regelmässigen Schalthandlungen kommen
- Für Transformatoren, Umrichter und Kompensationsspulen wurde untersucht, ob beispielsweise aus sicherheitstechnischen Gründen generell bauliche Massnahmen vorgesehen werden, welche auch eine lärmindernde Wirkung haben (beispielsweise Brandschutzwände). Derartige Massnahmen kommen zwar vor, jedoch kann nicht generell davon ausgegangen werden, dass solche Anlagen stets in lärmabschirmenden Konstruktionen eingebaut werden. Eine Aufstellung ganz im Freien ist prinzipiell möglich, sodass bei der Lärmbeurteilung auch der kritische Fall der Schallabstrahlung ohne weitere Abschirmungen oder die konkrete Situation mit den geplanten baulichen Massnahmen berücksichtigt werden muss

Insgesamt zeigen die Messdaten, dass Anlagen der elektrischen Energieverteilung und für den Bahnstrom aufgrund der hohen Redundanz, weniger kritische Schallabstrahlungen aufweisen dürften, als dies aufgrund von Labormessdaten für den Nennlastfall zu erwarten ist. Bei Kraftwerks- und Industrieanlagen sind generelle Aussagen schwierig. Thermische Kraftwerke laufen in der Regel nahe an der Nennleistung und Kraftwerke erneuerbarer Energien haben durchschnittlich eine tiefere Auslastung. Ebenso werden Kompensationsspulen in der Regel stets mit Nennlast betrieben und erreichen daher im Betrieb den Schallleistungspegel, welcher im jeweiligen Datenblatt angegeben wird.

---

<sup>1</sup> Jede Leitung und jeder Trafo entspricht einem Feld.

## 2. Grundlagen

- [1] Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG), SR-Nummer 814.01, 7. Oktober 1983, Stand 1. Januar 2021
- [2] Lärmschutzverordnung LSV, in Kraft seit 1. April 1987, Stand 7. Mai 2019
- [3] "Ermittlung und Beurteilung von Industrie- und Gewerbelärm – Vollzugshilfe für Industrie und Gewerbeanlage", Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2016
- [4] Norm ISO 9613-2, Dämpfung des Schalls bei Ausbreitung im Freien, Oktober 1999
- [5] Norm DIN EN 60076-10, Leistungstransformatoren – Teil 10: Bestimmung der Geräuschpegel, Juni 2017
- [6] IEC 60076-10-1:2016 +AMD1:2020, Power transformers - Part 10-1: Determination of sound levels – Application guide
- [7] Statische Bahnstromumrichteranlage BKW FMB Energie AG, Wimmis, Schweiz, Anlagenübersicht, ABB Schweiz AG, 15.05.2006
- [8] Akustische Messungen auf dem Gelände der Unterstation Wimmis, 24.03.2021, Gartenmann Engineering AG
- [9] Daten zum Lastfluss während der Lärmmessungen vom 24.03.2021 in Wimmis, Transformatoren 1 und 2, BKW Energie AG, 06.04.2021
- [10] Daten zum Lastfluss während der Lärmmessungen vom 24.03.2021 in Wimmis, Frequenzumformer 2 und Umrichter 1, SBB AG, 24.03.2021
- [11] Transformator-Prüfprotokoll Nr. 83941 für 100 MVA-Trafo entsprechend dem in Wimmis gemessenen Typ, Kollektor Etra s.o.o., 13.05.2020
- [12] Lärmmessungen an einem 75-MVA-Transformator der BKW Energie AG in der Unterstation Brislach (BL), Gartenmann Engineering AG, 13.06.2016
- [13] Lärmemissionsdaten für verschiedene Teillast-Betriebsstufen eines 25-MVA-Trafos der ALSTOM Grid AG, Stand: 05.07.2011
- [14] PC-Programm GNU Octave, Version 6.1.0
- [15] T. Stirl, J. Harthun, M., Gillet, F. Marketos, F. Devaux (2021): *Innovative Lösungen zur Geräuschreduzierung von Transformatoren mit Hilfe der Analyse von Geräuschen*, Bericht zum Stuttgarter Hochspannungssymposium, Universität Stuttgart, 01.03.2021
- [16] Th. Campmans (2018): *Special noise reduction for ventilation outlet of a 50 kV transformer station*, proceedings of the 11th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering (Euronoise), 27<sup>th</sup> to 31<sup>th</sup> of May 2018
- [17] *Fans for oil-cooled Transformers*, ebm-papst Muldingen GmbH & Co. KG, product specifications, [https://www.ebmpapst.com/content/dam/ebm-papst/media/brochures/products/Brochure\\_Fans-for-oil-cooled-transformers\\_EN.pdf](https://www.ebmpapst.com/content/dam/ebm-papst/media/brochures/products/Brochure_Fans-for-oil-cooled-transformers_EN.pdf), zuletzt aufgerufen am 23.04.2021
- [18] Tätigkeitsbericht der Eidgenössischen Elektrizitätskommission (ElCom) 2019, Bern, 6/2020
- [19] Schallleistungspegel gemäss Datenblättern aus Prüfstandsmessungen für eine Kompensationspule des Herstellers Siemens Energy (140 kV, 40 VA, 50 Hz), 17.01.2022

### 3. Auftrag

Das BAFU beauftragte die Gartenmann Engineering AG mit einer Untersuchung über typische Betriebszustände und damit verbundene Lärmemissionen verschiedener Starkstromanlagen. Zweck der Studie ist es, exemplarische Lärmemissionsdaten verschiedener Anlagentypen zu sammeln und daraus eine Beurteilungsgrundlage für zukünftige Bewilligungsverfahren beim BAFU zu entwickeln. Auftragsgemäss umfasst der vorliegende Bericht messtechnische Untersuchungen und Literaturstudien für folgende Anlagentypen:

- Transformatoren
- Umrichter (statisch)
- Umformer (rotierend)
- Gasisolierte Schaltanlagen (GIS)
- Freiluftschaltanlagen
- Kompensationsspulen

Nachfolgend stellen wir zunächst die Messergebnisse für verschiedene Anlagentypen einzeln dar. Das Kapitel 6 setzt die Ergebnisse in den Kontext der Fachliteratur.

### 4. Durchführung der Messungen am Standort Wimmis

Die Messungen wurden am 24.03.2021 zwischen 02:00 Uhr und 07:00 Uhr auf dem Gelände der Unterstation Wimmis (BE) durchgeführt. Die Situation ist in den Beilagen 1 und 2 dargestellt. Eine Fotodokumentation ist Beilage 3 zu entnehmen.

Zum Einsatz kamen folgende Messgeräte:

- 3x Norsonic Nor140, amtlich geeicht und kalibriert
- 1x Norsonic Nor150, amtlich geeicht und kalibriert, mit Intensitätssonde für Richtcharakteristik-Messungen<sup>2</sup>
- 6 mm Schreckschussrevolver für Nachhallzeitmessungen

Messpositionen wurden mit einem Laserdistanzmessgerät eingemessen.

Die Witterungsbedingungen waren ruhig und windstill, die Temperaturen vor Ort lagen im Verlauf der Messung zwischen -4 und 0 °C. Der Himmel war wolkenfrei. Aufgrund von Literaturangaben [6] ist anzunehmen, dass die vergleichsweise tiefen Aussentemperaturen während der Messung keinen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse gehabt haben: Alle untersuchten Anlagen waren bereits vor der Messung in Betrieb und hatten aufgrund der elektrischen Verlustleistung ihre Betriebstemperatur erreicht. Lediglich nach einem Kaltstart wäre ein Anstieg der Emissionen um bis 3 dB bis zum Erreichen der Betriebstemperatur für Transformatoren zu erwarten gewesen. Dieser Fall lag hier jedoch nicht vor.

---

<sup>2</sup> Die räumliche Schallabstrahlung wurde stichprobenartig an Positionen im 45°-Winkel um die jeweilige Quelle in der Horizontalebene untersucht und auf den Abstand zum akustischen Zentrum (Mittelpunkt des Trafos bzw. des Umrichters) normiert. Aus dem Mittelwert dieser Schallintensitätspegel wurde anschliessend die Schallleistung der jeweiligen Quelle ermittelt. Das Hüllflächenverfahren nach ISO 3746 wurde nicht angewendet, da eine vollständige Hüllfläche auch oberhalb der Quelle aus sicherheitstechnischen Gründen (Hochspannung) nicht gemessen werden konnte. Die Genauigkeit der Bestimmung des Schallleistungspegels ist daher in der vorliegenden Situation begrenzt. Wir gehen von einer Genauigkeit der in diesem Bericht angegebenen Schallleistungspegel aus Feldmessdaten von +/-4 dB aus.



Das Grundgeräusch wurde an jeder Messposition geprüft. Ebenso wurde pro Messposition der mögliche Störeinfluss anderer Starkstromkomponenten (z.B. benachbarter Trafos) vor Messbeginn geprüft. Störgeräusche lagen jeweils mindestens 15 dB(A) unter dem zu messenden Geräusch, sodass auf eine Grundgeräuschkorrektur der Messdaten bei der Auswertung verzichtet wurde.

Nachfolgend fassen wir die Messdurchführung und die Ergebnisse für die verschiedenen untersuchten Anlagenkomponenten zusammen.

#### 4.1. Transformatoren

Folgende Messungen wurden an Transformatoren mit einer Nennleistung von jeweils 100 MVA durchgeführt:

- Schalldruckpegel in Oktavbändern und in dB(A) in Abhängigkeit der Netzlast
  - Aufzeichnung der Netzlastdaten im Minutentakt
  - Schallemissionsdaten wurden zur Identifikation allfälliger Störgeräusche in einer Zeitauflösung vom 25 ms aufgezeichnet und bei der Datenauswertung zur Ermittlung der Korrelation mit der Netzlast auf 1-s-Intervalle energetisch gemittelt
- Schalldruckpegel in Oktavbändern und in dB(A) im Leerlauf vor dem Abschalten (nur noch hochspannungsseitig zugeschaltet) sowie im Leerlauf nach dem hochspannungsseitigen Zuschalten
- Schallintensitätspegel in der Horizontalebene durch stichprobenartige Messung mit 45°-Winkeln bei üblicher Netzlast

Die Messergebnisse sind den Beilagen 4 bis 7 sowie Abschnitt 5 zu entnehmen. Zwei Ergebnisse sind bemerkenswert:

- Die Messdaten wurden verglichen mit den theoretisch zu erwartenden Werten anhand von Berechnungen gemäss der Norm EN 60076-10. Diese gehen vom unter Nennleistung zu erwartenden Schalleistungspegel aus, welcher im Herstellerdatenblatt für den Transformator spezifiziert wird [11]. Dieser Wert wäre im Betrieb bei 100 MVA für den hier untersuchten Transformator tatsächlich zu erwarten. Die Netzlast blieb während der Messung unter 50 % der Nennleistung, und die Berechnung der Emissionen gemäss der Norm EN 60076-10 ist nur im Bereich zwischen 60 % und 100 % der Nennleistung gültig (hier: 60 MVA). Aus der grafischen Darstellung ist zu erkennen, dass für tiefere Lasten unter 60 % der Geräuschpegel kaum weiter abfällt: Für tiefere Lasten plafoniert der Geräuschpegel nahezu bei Werten, welche etwa den Emissionen bei 60 % Last entsprechen<sup>3</sup>. Dies ist für Lärmbeurteilungen von Starkstromanlagen der elektrischen Energieverteilung und für den Bahnstrom von Bedeutung, da nahezu alle Anlagen redundant ausgelegt werden. Lasten über 50 % werden praktisch nie erreicht und kommen nur bei Störfällen vor
- Zum anderen zeigt der hier untersuchte Transformator eine ausgeprägte Richtcharakteristik (Beilage 7): Die Schallabstrahlung steigt je nach Abstrahlrichtung um bis zu 5 dB gegenüber der mittleren Schallintensität an. Dieses Ergebnis ist relevant für die Prognose von Lärmimmissionen auf Basis der Prüfprotokolle von Herstellern (Werksabnahmen): Da vom Hersteller üblicherweise nur Angaben zum Schalleistungspegel, jedoch keine Richtcharakteristikdaten zur Verfügung gestellt werden, kann die räumliche Varianz der Abstrahlung in der Planungspraxis nur durch entsprechend grosse Projektierungszuschläge berücksichtigt werden

---

<sup>3</sup> Bis 60 % der Nennleistung ist das Leerlaufgeräusch dominierend, erst darüber wird das Stromgeräusch relevant

Die Ventilatoren der untersuchten Transformatoren konnten nicht manuell zugeschaltet werden und waren aufgrund der tiefen Temperatur ausser Betrieb. Falls Transformator-Ventilatoren drehzahlregelt sind, dann sind sie in Unterstationen – ebenso wie die Trafos selbst – selten unter Volllast in Betrieb. Ventilatoren erreichen unter Volllast typische Schallleistungspegel zwischen 70 und 93 dB(A) ([16], [17]), bei 30 % Teillast fällt allerdings die Schalleistung erheblich ab und liegt typischerweise zwischen 40 und 57 dB(A) [17]. In der Praxis sind Ventilatoren daher im Hinblick auf das Einhalten der Grenzwerte nach LSV im langfristigen Mittelwert ( $L_{eq}$ ) weniger von Bedeutung, sollten aber im Hinblick auf die Lärmvorsorge nach Art. 11 USG in Bewilligungsverfahren berücksichtigt werden.

Der Vollständigkeit halber wurden zusätzlich die Lärmemissionen im Leerlauf beim Herunter- und Ausschalten des Transformators 2 gemessen. Ausserdem wurden Schalthandlungen am Transformator lärmtechnisch erfasst (Stufenschalter, Spannungsregulierung). Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Beim Hochfahren sind aufgrund des zufällig orientierten Magnetfelds im Trafokern für wenige Minuten vergleichsweise hohe Lärmemissionen zu erwarten. Dieser Betriebsfall spielt jedoch aufgrund seines seltenen Auftretens für die  $L_{eq}$ -basierte Beurteilung gemäss LSV praktisch keine Rolle. Die entsprechenden Messergebnisse sind Beilage 6 zu entnehmen
- Schalthandlungen an der integrierten Spannungsregulierung des Trafos (Stufenschalter) führen im Vergleich zu den sonstigen Emissionen des Trafos nur zu unmassgeblichen Schallpegeln. Die Emissionen sind nur von kurzer Dauer und lagen beim hier untersuchten Trafotyp um knapp 20 dB unter Emissionen bei 30 % Last. Auch diese Emissionen sind für die Beurteilung gemäss LSV bedeutungslos. Von einer detaillierten Darstellung dieser Messergebnisse sehen wir an dieser Stelle ab

#### 4.2. Umrichter

Folgende Messungen an einem exemplarischen Umrichter mit einer Nennleistung von 20 MVA wurden durchgeführt. Die Messergebnisse sind Beilage 7 sowie Abschnitt 5 zu entnehmen:

- Schalldruckpegel in Oktavbändern und in dB(A) in Abhängigkeit des Netzlast
  - Aufzeichnung der Netzlastdaten im Minutentakt
  - Schallemissionsdaten wurden zur Identifikation allfälliger Störgeräusche in einer Zeitauflösung vom 25 ms aufgezeichnet und bei der Datenauswertung zur Ermittlung der Korrelation mit der Netzlast auf 1-s-Intervalle energetisch gemittelt
- Schallintensitätspegel in der Horizontalebene durch stichprobenartige Messung mit 45°-Winkeln bei üblicher Netzlast

Folgende Ergebnisse sind hervorzuheben:

- Der Umrichter zeigt im betrachteten Lastbereich praktisch keine Varianz der Schallemissionen: Eine Erhöhung der Netzlast von 1 MVA auf 13 MVA führte lediglich zu einer Erhöhung der Emissionen um 1-2 dB und zeigt nur sehr geringe, momentane Streuungen. Auf eine Auswertung mit Hilfe einer Regressionsanalyse wurde daher verzichtet.
- Kennzeichnend für die Emissionen sind drei verschiedene Anlagenkomponenten, welche über eine Grundfläche von rund 10 m x 20 m räumlich voneinander getrennt aufgestellt sind:
  - Die Transformatoren und Umrichter auf der Drehstromseite (50 Hz)
  - Die Transformatoren und Umrichter auf der Bahnstromseite (16.7 Hz)
  - Rückkühler in der Mitte der Umrichteranlage

Die Verteilung dieser Komponenten erklärt auch die ausgeprägte Richtcharakteristik der Schallabstrahlung des Umrichters, siehe Beilage 7. Ähnlich wie beim untersuchten Transformator steigt auch hier die Schallabstrahlung je nach Abstrahlrichtung um bis zu 5 dB gegenüber der mittleren Schallintensität an

Herstellerangaben für die Schallabstrahlung von Umrichtern sind in der Regel nur eingeschränkt verfügbar. Prinzipiell kann aber von folgenden Eckdaten ausgegangen werden:

- Wo keine Emissionsdaten aus Werksabnahmen verfügbar sind, liefern die Berechnungsgrundlagen der Norm EN 60071-10 eine Abschätzung, da der Schallpegel bei hohen Lasten voraussichtlich durch die Transformatorgeräusche des Umrichters dominiert wird. Für tiefere Lasten unter 60 % kann der nach Norm berechnete Wert für 60 % Last als konservative Schätzung angesetzt werden in der Annahme, dass die Geräuschemissionen bei geringeren Lasten nahezu auf dem Wert von 60 % verharren werden (siehe Messergebnisse aus Abschnitt 4.1)
- Ähnlich wie für Transformatoren gilt auch für Umrichter, dass diese in der Regel redundant ausgelegt werden. Es ist im Normalbetrieb selten mit mehr als 50 % Last zu rechnen und die Lastspitzen sind durch den Tag, wenn die meisten Züge fahren zu erwarten
- Bei warmen Aussentemperaturen kann je nach Umrichtertyp der Schallemissionspegel der Rückkühler für die Gesamtemissionen entscheidender sein als die Emissionen der Transformatoren – dies gilt umso mehr, als dass die Transformatoren praktisch nie mit Volllast gefahren werden. In kritischen Fällen der Lärmbeurteilung (nahegelegene Immissionsorte) sollten daher die Emissionen der Rückkühler einzeln geprüft werden.  
Aufgrund der tiefen Temperaturen während der Messungen waren die Rückkühler am Standort Wimmis ausser Betrieb. Da Rückkühler je nach erforderlicher maximaler Kühlleistung in ihrer Auslegung stark variieren, verzichten wir hier darauf, exemplarische Lärmemissionsdaten aus Datenblättern zu nennen. Rückkühler sollten in Bewilligungsverfahren in jedem Fall über das Herstelldatenblatt lärmtechnisch einzeln beurteilt werden
- Falls für die Umrichteranlage ein gesamthafter Schallleistungspegel in den Lärmberechnungen zugrunde gelegt wird und keine genaueren Angaben über die Richtcharakteristik vorliegen, sollte die gerichtete Schallabstrahlung durch einen Projektierungszuschlag von 5 dB berücksichtigt werden
- Umrichteranlagen sind in Gebäuden oder Container aufgestellt. In diesem Fall ist für die Ausenlärmbetrachtung aber zumindest massgeblich, dass sich die Rückkühler und i.d.R. die Transformatoren im Freien befinden

Für die hier durchgeführte Messdatenauswertung wurden die verschiedenen Lärmquellen der untersuchten Umrichteranlage innerhalb der Anlagenfläche von 10 m x 20 m auf ein gemeinsames akustisches Zentrum als Ersatzschallquelle zurückgeführt. Hieraus ergibt sich der vergleichsweise hohe, rechnerische Gesamtschallleistungspegel der Punkschallquelle von 93 dB(A), siehe Abschnitt 5.

### 4.3. Umformer

Umformer sind in geschlossenen Hallen eingebaut (Motor- Generatorengruppe) – so auch der untersuchte Umformer 2 mit einer Nennleistung von 33 MVA am Standort Wimmis. Generell gilt, dass Umformer praktisch nicht mehr neu installiert werden, sondern durch Umrichter ersetzt werden. Folgende Messwerte wurden ermittelt:

- Hallenvolumen: 4'800 m<sup>3</sup>
- Mittlere Nachhalzeit: 2.3 s

- Hallradius: 2.6 m (Die Messposition mit einer Distanz 6.6 m lag im Diffusfeld)
- Schalldruckpegel  $L_p$ : 75.2 dB(A)
- Errechneter Schallleistungspegel der Anlage:  $L_w$ : 94 dB(A)

Der Umformer zeigte praktisch keinerlei Abhängigkeit des Betriebsgeräuschs von der Netzlast: Während die Netzlast im Bereich zwischen 0.1 und 13 MVA schwankte, wurden konstante Emissionen von  $L_w = 94$  dB(A) gemessen. Dies ist nicht erstaunlich, da das Betriebsgeräusch anders als bei statischen Umrichtern durch die mechanische Rotation der Anlage dominiert wird, welche sich unter Last nicht ändert.

Da Umformer meist in geschlossen Hallen installiert werden, spielen diese Starkstromanlagen bei Berechnungen der Schallausbreitung im Aussenraum in der Planungspraxis eine untergeordnete Rolle.

#### 4.4. Gasisolierte Schaltanlagen (GIS)

Ebenso wie Umformer werden GIS-Anlagen in der Regel in geschlossenen Räumen installiert, um die zahlreichen Komponenten gegen Witterungseinflüsse zu schützen. Die Gasisolierung und Kapselung der Anlagen bewirkt eine wesentliche verminderte Schallabstrahlung im Vergleich zu Freiluftschaltanlagen (siehe Abschnitt 4.5).

Die Messergebnisse zu GIS-Anlagen sind der Beilage 8 zu entnehmen. GIS-Anlagen tragen aufgrund der in der Regel starken Abschottung gegen den Aussenraum nur unmassgeblich zu den Lärmemissionen von Starkstromanlagen bei.

#### 4.5. Freiluftschaltanlagen

Freiluftschaltanlagen sind durch kurze, stark impulshaltige Schaltvorgänge gekennzeichnet, welche Schallleistungspegel von über 100 dB(A) erreichen können. Da diese Schaltungen aber sehr selten stattfinden und nur wenige Sekunden andauern, haben sie für die Lärmbeurteilung nach LSV auf Basis des  $L_{eq}$  kaum Bedeutung. Freiluftschaltanlagen kommen heute grösstenteils nur noch in den höheren Spannungsebenen zum Einsatz, wo Schalthandlungen und Schutzauslösungen (ungeplante Schalthandlungen) selten vorkommen. Bei Unterwerken kann pro Feld<sup>4</sup> und Jahr im langjährigen Schnitt mit einer Schutzauslösung alle zwei Jahre gerechnet werden. Die geplanten Schalthandlungen, welche in der Regel zwischen 7 Uhr und 18 Uhr stattfinden, können im Mittel pro Feld mit einer Schalthandlung pro Monat angenommen werden. Bei Wasserkraftwerken beispielsweise können je nach Jahreszeit und verfügbarer Wassermenge Schalthandlungen durchaus auch nachts über einen gewissen Zeitraum regelmässig vorkommen.

Die Messergebnisse von Freiluftschaltanlagen sind der Beilage 8 sowie Abschnitt 5 zu entnehmen. Da die Schaltgeräusche aufgrund Ihrer stochastischen Eigenschaften einer relativ hohen Schwankungsbreite unterworfen sind, wurde in der Ausbreitungsrechnung in Abschnitt 5 ein Projektierungszuschlag von 5 dB auf die Emissionsdaten berücksichtigt.

Druckluftkompressoren werden bei diesen Schaltanlagen teilweise eingesetzt, um die Schalter mit ausreichend Kraft gegen das elektrische Feld bewegen zu können. Die Kompressoren haben für das Geräusch der Schaltanlagen wesentliche Bedeutung, da deren Spitzenpegel zwar geringer ist als der

---

<sup>4</sup> Jede Leitung und jeder Trafo entspricht einem Feld.

des Schaltvorgangs selbst, der Druckaufbau nach dem Schaltvorgang jedoch einige Minuten Zeit in Anspruch nimmt. Die Einwirkzeit ist somit für die Gesamtemissionen der Schaltanlage relevant. Als Lärmschutzmassnahme können ggf. die Kompressoren eingehaust werden.

Der Lärm der Freiluftschaltanlage setzt sich also aus dem stark impulshaltigen Geräusch des Schaltens selbst sowie aus dem Antriebsgeräusch zusammen, wobei letzteres eine gewisse Tonhaltigkeit besitzt. Die entsprechenden Pegelzuschläge K2 und K3 sind gutachterlich im Einzelfall zu bestimmen. Im hier untersuchten Fall konnte festgestellt werden, dass der Schaltimpuls für die Berechnung des Beurteilungspegels auch für den zusammengesetzten Pegel (Schalten + Antriebsgeräusch) massgeblich ist. Die Pegelzuschläge, welche in Abschnitt 6, Tab. 1 ausgewiesen sind, entsprechen den rechnerisch über die gesamte Dauer der Lärmemission berechneten Pegelzuschlägen. Zu erkennen ist an diesen Resultaten, dass im vorliegenden Fall das impulshafte Schaltgeräusch für die Bestimmung der Pegelzuschläge dominant ist. Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass dies je nach Antriebstyp situativ unterschiedlich sein kann. Generell sind Pegelzuschläge im Einzelfall immissionsseitig zu bestimmen – von den in diesem Bericht angewendeten Pegelzuschlägen kann daher begründet abgewichen werden. Die Zuschläge für Freiluftschaltanlagen sind hierbei besonders zu beachten.

#### **4.6. Kompensationsspulen (Drosseln)**

Kompensationsspulen werden üblicherweise mit maximaler Scheinleistung betrieben und erreichen daher im Betrieb zumeist die Schallleistungspegel, wie sie in den Herstellerdatenblättern angegeben werden.

Für die vorliegende Untersuchung wurden Daten einer Kompensationsspule des Lieferanten Siemens Energy beigezogen (140 kV, 80 MVar, 50 Hz). Der Schallleistungspegel der Spule wurde im Prüfstand im Hüllflächenverfahren bestimmt (in diesem Fall 88 dB(A) ohne Ventilatoren). Eine differenzierte Messung der Richtcharakteristik war aufgrund der dortigen Platzverhältnisse nicht möglich. Jedoch zeigt eine orientierende Messung auf zwei gegenüberliegenden Seiten der Kompensationsspule Pegelunterschiede zum umlaufend gemittelten Schallleistungspegel, welche innerhalb des bereits in Abschnitt 4.1 beschriebenen Bereichs von +/-5 dB liegen. Aufgrund der prinzipiellen Bauweise mit konstruktionsbedingten Asymmetrien (Lage Spulen im Kessel, wegen der Anordnung des Stufenschalters und der Schaltleitungen) und der Positionierung der Kühler ist davon auszugehen, dass die für Transformatoren getroffene Annahme der Richtcharakteristik auch für Kompensationsspulen gültig ist.

Wir empfehlen daher, für Kompensationsspulen einen Projektierungszuschlag von 5 dB in der Planung anzuwenden, um die Richtcharakteristik zu berücksichtigen.

### **5. Zusammenfassung der Emissionen und kritische Distanzen für die Beurteilung**

Die in der nachfolgenden Tabelle dargestellte Zusammenfassung beschränkt sich auf im Aussenraum relevante Lärmquellen (ohne Umformer, ohne GIS-Anlagen u.ä. in Gebäuden).

Angenommene Pegelkorrekturen im Immissionsort nach Anhang 6, Abs. 33, LSV:		Bemerkungen
Lärmart (Industrie)	K1	für alle Quellen
Tonhaltigkeit	K2	bis und mit 100 m, für Trafo, Umrichter und Umformer
Tonhaltigkeit	K2	bei mehr als 100 m, für Trafo, Umrichter und Umformer
Tonhaltigkeit	K2	für Schaltanlagen
Impulshaltigkeit	K3	für Trafo, Umrichter und Umformer
Impulshaltigkeit	K3	bis und mit 100 m, für Schaltanlagen
Impulshaltigkeit	K3	bis und mit 200 m, für Schaltanlagen
Impulshaltigkeit	K3	bei mehr als 200 m, für Schaltanlagen

Quelle	L <sub>w</sub> (dB(A))	k <sub>p</sub>	Projektorungszuschlag* pro Vorgang (s)	mittl. Dauer pro Nacht (h)	Häufigkeit zeitliche Verdünnung (dB)	Planungswerte nachts				Immissionsgrenzwerte nachts			
						ES I	ES II	ES III	ES IV	ES I	ES II	ES III	ES IV
Trafo 100 MVA, redundant	72	5	permanent	0	80	40	30	10	40	30	10	10	10
Kompensationsspule, 80 MVar	88	5	permanent	0	400	200	100	90	200	100	90	100	50
Umrichter 21 MVA, Rückkühler aussser Betrieb	93	5	permanent	0	700	400	200	100	400	200	100	100	90
Freiluftschaltanlagen	110	5	34,5	0,25	-27	200	100	90	100	90	50	50	30

\*Projektorungszuschlag: Bei Trafos/Umrichtern für Richtcharakteristik (siehe entsprechende Messergebnisse), bei Schaltanlagen für stochastische Quelleigenschaften.

\*\*Distanzangaben sind als Grössenordnungen zu verstehen und bis 100 m auf 10 m genau gerundet, darüber auf 100 m genau

Anmerkungen:

- Die angegebenen Distanzen vergrössern sich entsprechend beim Zusammenwirken mehrerer Quellen (energetische Addition der Pegel)
- Schaltanordnungen an Transformatoren (Stufenschalter, Spannungsregulierung) sind für die Lärmbeurteilung nach LSV unmassgeblich
- GIS-Schaltanlagen und rotierende Umformer werden in der Regel im Gebäude aufgestellt und sind daher in dieser Tabelle nicht aufgeführt.

Tab. 1: Übersicht Emissionsdaten und typische Distanzen zum Einhalten von Immissionsgrenzwerten und Planungswerten. Für die Häufigkeit der Schaltvorgänge an den Freiluftschaltanlagen wurde in dieser Tabelle eine konservative Schätzung angenommen. Für die Pegelzu- schläge bei Freiluftschaltanlagen ist Abschnitt I.4.5 zu beachten.

## 6. Kontext der Fachliteratur und Erfahrungswerte

### 6.1. Emissionsdaten

Für Transformatoren liegen verschiedene Literaturdaten vor, von denen wir hier in erster Linie die Norm EN 60076-10 heranziehen. Gemäss dieser Norm lässt sich der Schallleistungspegel von Transformatoren anhand der Nennleistung berechnen:

$$L_{WA,lr} \approx 39 + 18 \cdot \lg \frac{S_r}{1 \text{ MVA}}$$

mit:

$L_{WA,lr}$ : Der geschätzte A-bewertete Schallleistungspegel des Transformators bei Bemessungsstrom von 50 Hz bei Kurzschlussbedingung

$S_r$ : Die Bemessungsleistung des Transformators in MVA

Für den vorliegenden Transformator ergibt sich auf Basis dieser Berechnung ein Pegel  $L_{WA,lr} = 75.0$  dB(A). Die Geräuschentwicklung von Trafos ist im Wesentlichen durch die magnetische Flussdichte im Trafokern gegeben und daher für verschiedene Trafos vergleichsweise gut prognostizierbar. Im hier untersuchten Fall stimmt dieser theoretisch errechnete Wert sehr genau mit dem gemessenen Wert von 75.1 dB(A) gemäss Herstellerdatenblatt [11] überein<sup>5</sup>.

Die Wirkung möglicher Lärminderungsmaßnahmen durch Auswahl geeigneter Kernbleche und magnetischer Flussdichtepiegel liegt im Bereich von 2 bis 3 dB(A) (Stirl et al. 2021 [15]), sind aber Gegenstand der aktuellen Entwicklung und noch nicht allgemein verfügbar.

Für tiefere Betriebslasten als 60 % der Nennleistung sind den Autoren dieses Berichts keine Literaturwerte für Schallemissionen bekannt. Die vorliegenden Messergebnisse sowie Erfahrungswerte aus anderen Projekten ([12], [13]) legen allerdings nahe, dass die Schallemissionen bei tieferen Lasten nahe dem Wert verharren, der einer Last von 60 % entspricht (siehe Beilage 5).

Insgesamt zeigen die Messdaten, dass Starkstromanlagen der elektrischen Energieverteilung und für den Bahnstrom mit hohem Redundanzanteil weniger kritische Schallabstrahlungen aufweisen dürften, als dies aufgrund von Labormessdaten für den Nennleistungsfall zu erwarten ist.

Diese Erkenntnisse sind insofern auch auf Umrichter anwendbar, als dass deren Schallemissionen ebenfalls im Wesentlichen durch die magnetischen Felder der Transformatoren auf beiden Seiten des Umrichters verursacht werden. Auch Umrichter werden in der Regel mit hohen Redundanzen ausgelegt und erreichen sehr selten Lasten oberhalb von 50 % ihrer Nennleistung. Hierbei ist zu beachten, dass je nach Netzfrequenz unterschiedliche Berechnungsformeln für die theoretische Ermittlung des Schallleistungspegels zum Einsatz kommen (vgl. EN 60076-10 [5]).

Rückkühler von Umrichtern sollten im Hinblick auf die zu erwartenden Schallemissionen ggf. einzeln geprüft werden, da deren Schallpegel nicht nur von der Netzlast sondern insbesondere auch von der Aussentemperatur abhängig sind. Bei tiefen Netzlasten und hohen Aussentemperaturen können die

<sup>5</sup> Die Norm EN 60076-10 gibt für die Prognose des Trafo-Schallleistungspegels bei Nennleistung eine Toleranz von +/- 6 dB an. Da heute Datenblätter mit Schallemissionsdaten aus dem Prüfstand zur üblichen Hersteller-Dokumentation für Transformatoren gehören, hat diese Prognosetoleranz für die Praxis kaum Bedeutung.

Rückkühler von Umrichtern für deren Gesamtschallpegel dominant sein<sup>6</sup>. Ähnliches gilt für Transformator-Ventilatoren und Ventilatoren an Drosseln.

## 6.2. Zusammenfassung des Vorgehens für die Lärmberechnungen bei Transformatoren

Aufgrund der Messergebnisse empfehlen wir folgendes Vorgehen für Lärmprognosen bei Transformatoren:

- Schallleistungspegel des Transformators bestimmen gemäss Herstellerdatenblatt
- Falls der Transformator redundant betrieben wird: 4 dB vom garantierten Schallleistungspegel abziehen, um die Teillast zu berücksichtigen (entspricht 50 % Last)
- Projektierungszuschlag von 5 dB für die Richtcharakteristik addieren
- Anschliessend die Abstandsdämpfung sowie die Pegelzuschläge berücksichtigen gemäss LSV

## 6.3. Lärmschutzmassnahmen

Auf der Basis von Erfahrungswerten kann Folgendes festgehalten werden:

- Umformer und gasisolierte Schaltanlagen (GIS) werden im Regelfall in geschlossenen Räumen installiert, um diese Anlagen vor der Witterung zu schützen. Dementsprechend sind diese normalerweise auch lärmtechnisch abgeschirmt und für die Aussenlärmbeurteilung von geringer Bedeutung
- Transformatoren, Umrichter und Kompensationsspulen verfügen zwar häufig über Abschirmungen, welche beispielsweise aufgrund des Brandschutzes gefordert werden – allgemein zwingend vorgesehen ist dies aber nicht. Für die lärmtechnische Beurteilung ist es daher erforderlich, allfällig erforderliche Abschirmmassnahmen (z.B. Lärmschutzwände) im Einzelfall zu prüfen und zu spezifizieren.
- Ventilatoren von Transformatoren und Kompensationsspulen laufen – sofern sie drehzahlregelt sind – selten unter Vollast und sind daher für den langfristigen Mittelwert ( $L_{eq}$ ) von untergeordneter Bedeutung. Bei nahe gelegenen Immissionsorten können sie aber insbesondere nachts störend sein. Sie sollten zumindest im Sinne der Lärmvorsorge nach Art. 11 USG in Bewilligungsverfahren berücksichtigt werden. Bei genügenden Platzverhältnisse können die Kühler so dimensioniert werden, dass auf Ventilatoren verzichtet werden kann. In der Schweiz sind heute Einheiten bis zu einer Nennleistung von 800 MVA ohne Ventilatoren installiert worden
- Rückkühler von Umrichtern sollten im Hinblick auf die zu erwartenden Schallemissionen ggf. einzeln geprüft werden, da deren Schallpegel nicht nur von der Netzlast sondern insbesondere auch von der Aussentemperatur abhängig sind. Bei tiefen Netzlasten und hohen Aussentemperaturen können die Rückkühler von Umrichtern für deren Gesamtschallpegel dominant sein
- Freiluftschaltanlagen erzeugen zwar hohe Lärmspitzen, diese kommen aber betrieblich nur vergleichsweise selten vor und sind nur von kurzer Dauer. In den meisten Fällen sind diese Anlagen daher für die lärmtechnische Beurteilung nach LSV nicht relevant, sofern diese nicht regelmässig nachts stattfinden.

---

<sup>6</sup> Dieser Fall konnte bei der hier durchgeführten Messung aufgrund der niedrigen Aussentemperaturen nicht geprüft werden.



#### 6.4. Relevanz der Messergebnisse für zukünftige Bewilligungsverfahren

Um die Relevanz der jeweiligen Messergebnisse für die Praxis einzuordnen, wurde eine Abschätzung über Anzahl der verschiedenen Anlagentypen in der Schweiz erstellt. Aus dem Tätigkeitsbericht der ElCom 2019 lassen sich folgende Zahlen abschätzen:

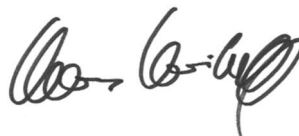
- Transformatoren (ohne Transformatoren mit einer Unterspannung < 1 kV): ca. 1400 Transformatoren an ca. 700 Standorten
- Trafo- und Maststationen (lokales Verteilnetz, 400 V): ca. 55'000 Standorte
- Umrichter<sup>7</sup> (statisch) und Umformer (rotierend): ca. 20 Standorte, wovon Umformer neu nicht mehr gebaut sondern durch Umrichter abgelöst werden
- Gasisolierte Schaltanlagen (GIS): ca. 700 Standorte (Tendenz zunehmend)
- Freiluftschaltanlagen, häufiger in den höchsten Netzebenen: ca. 150 Standorte (Tendenz abnehmend)

Ausgehend von einer Lebensdauer den Anlagen von 40 Jahren ist davon auszugehen, dass jährlich zwischen 4 und 8 Umrichter- bzw. Transformatoranlagen mit entsprechenden Schaltanlagen erneuert oder neu geplant werden.

Für Kompensationsspulen fehlen Literaturdaten, da diese Anlagen erst seit kurzem in grösserem Umfang errichtet werden. Aufgrund von Schätzungen der BKW Energie AG (welche an der Erstellung dieses Berichts beteiligt war), gehen wir von einer Grössenordnung von ca. 10 neuen Kompensationsspulen in der Schweiz in den nächsten 10 Jahren aus.



Dieter Fuchs  
MSc ETH Zürich / dipl. Akustiker SGA



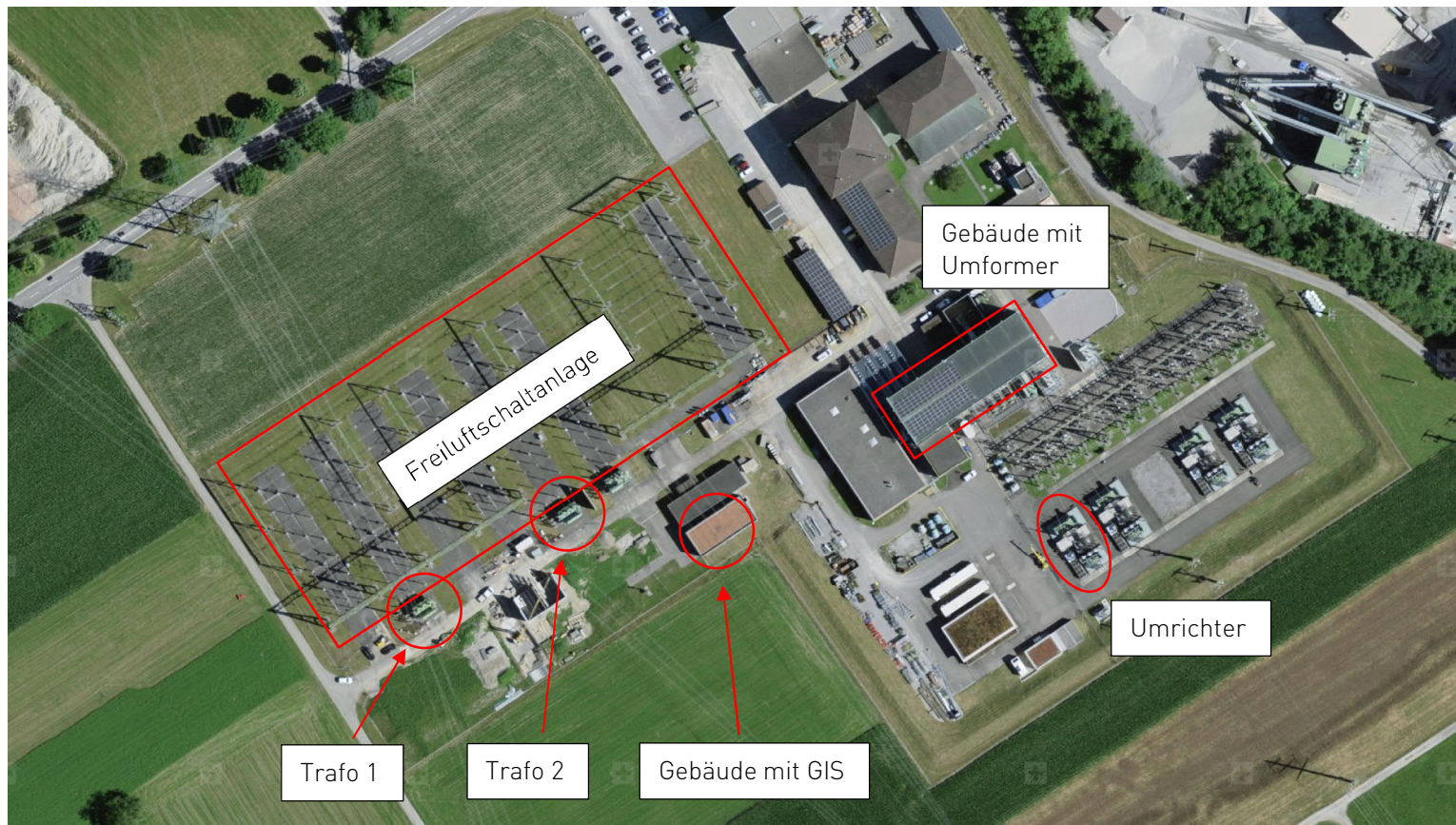
ppa. Clemens Kuhn-Rahloff  
Dr. phil. Dipl.-Ing. (FH) SIA  
Partner

T 031 533 06 08  
E c.kuhn-rahloff@gae.ch

- Beilagen:
- Nr. 1: Gesamtsituation mit gemessenen Lärmquellen
  - Nr. 2: Messpositionen Trafos, Freiluftschaltanlagen und Umrichter
  - Nr. 3: Fotodokumentation
  - Nr. 4: Pegelzeitverlauf und Spektren der gemessenen Anlagen
  - Nr. 5: Trafo 1: Schallemissionen in Abhängigkeit der Netzlast
  - Nr. 6: Trafo 2: Schallemissionen im Leerlauf
  - Nr. 7: Richtcharakteristik Trafo 1 und Umrichter 1
  - Nr. 8: Messergebnisse Schaltanlagen

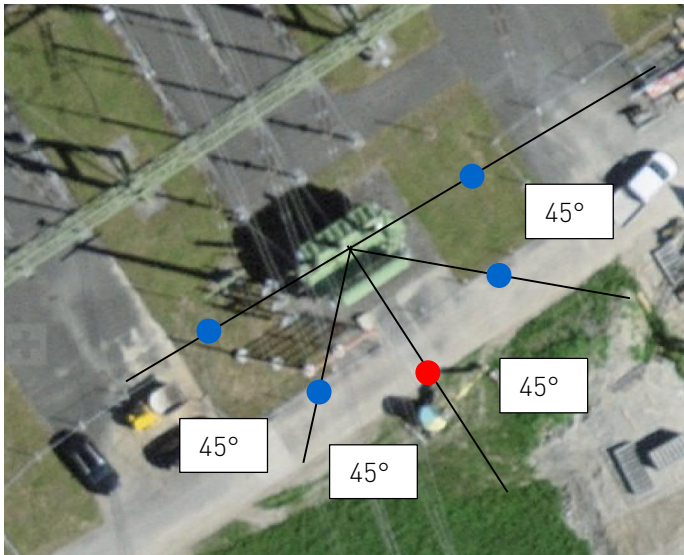
<sup>7</sup> Siehe <https://company.sbb.ch/de/sbb-als-geschaeftspartner/leistungen-evu/energie/bahn-haushaltsstrom.html>

Unterwerk in Wimmis (BE) mit den markierten gemessenen Lärmquellen



(map.geo.admin.ch)

### Trafo 1



Roter Messpunkt: Referenzmesspunkt für die Schalldruckpegelmessung

Blaue Messpunkte: Zusätzliche Messpunkte für die Intensitätsmessung (Richtcharakteristik)

Distanz zu Trafooberfläche bei jedem Messpunkt 12 m

Bemerkung: Der Trafo selbst hat eine Breite von 6 m. Als Distanz wurde die doppelte Breite gewählt, um mit der Messposition nicht mehr im Nahfeldwirkungsbereich zu liegen

Höhe ab Boden: 1.5m

### Trafo 2



Roter Messpunkt für die Schalldruckpegelmessung (Schalldleistungsermittlung)

Distanz zu Trafoecke: 12 m

Höhe ab Boden: 1.5m

### Freiluftschaltanlage



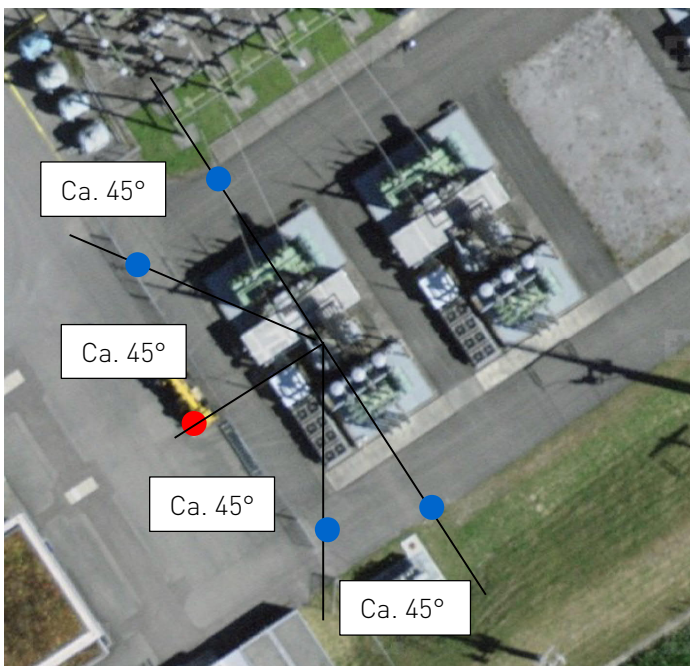
Roter Messpunkt für die Schalldruckpegelmessung (Schalldruckleistungsermittlung)

Distanzen zu den gemessenen Schaltstellen:

12.7 m bzw. 14.7 m

Höhe ab Boden: 1.5m

### Umrichter



Roter Messpunkt: Referenzmesspunkt für die Schalldruckpegelmessung

Distanz zu Umrichterzentrum: 11.6 m

Höhe ab Boden: 4.8 m

Blaue Messpunkte: Zusätzliche Messpunkte für die Intensitätsmessung (Richtcharakteristik)

Distanz jeweils zu einer Trafoecke/-oberfläche: 11.6 m

Höhe ab Boden: 1.5 m

Da die Distanz ab Trafoecke gewählt wurde, ist die Winkelaufteilung um das Umrichterzentrum aufgrund der grossen Umrichterabmessungen nur näherungsweise in 45 Grad-Ab-schnitte erfolgt.

(Luftaufnahmen von map.geo.admin.ch)

### Trafo 1



Trafo 1 mit Referenzmikrofonposition (rot markiert)

### Trafo 2

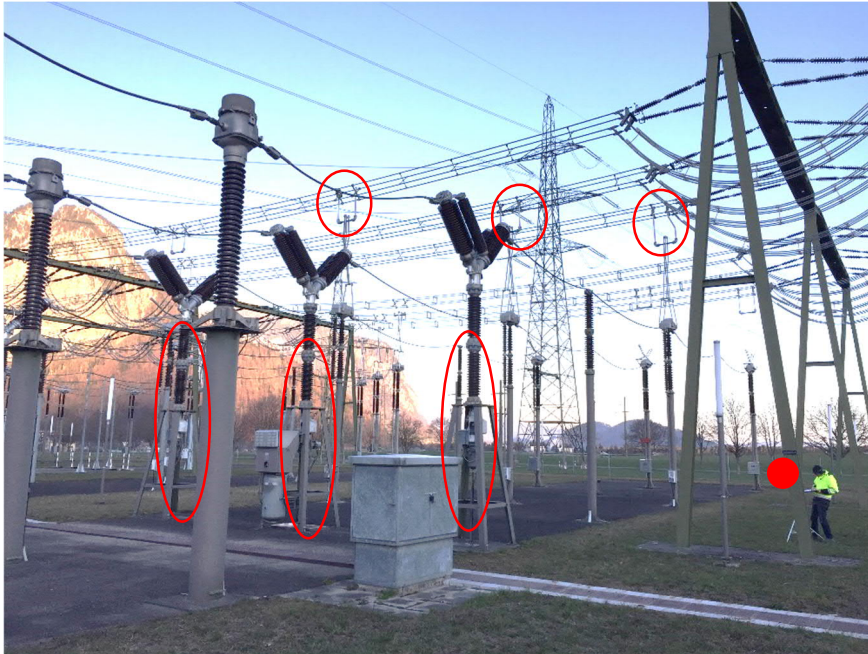


Gesamtansicht



Seitenansicht:  
Ventilatoren und Schaltelemente des Trafos

## Freiluftschaltanlage



Gesamtansicht der Anlage  
Messposition (roter Punkt), Orte der Geräuscentstehung bei den Schaltvorgängen (rot umkreist)



rot markiert: Ort der Lichtbogengeräusch-  
entstehung bei den Schaltvorgängen



Detailansicht Schalter

## Umrichter



Gesamtansicht des Umrichters [rot umrahmt] mit Referenzmikrofonposition (roter Punkt)



Detailansicht:

Mitte: Rückkühler

rechts: Trafoeinheit des Umrichters

hinter dem Rückkühler steht der Container  
mit der Leistungselektronik

### Umformer



Gesamtansicht des Umformers in der Maschinenhalle  
Referenzmikrofon zur Messung des Pegelzeitverlaufs ist rot markiert

### GIS-Anlage in Gebäude



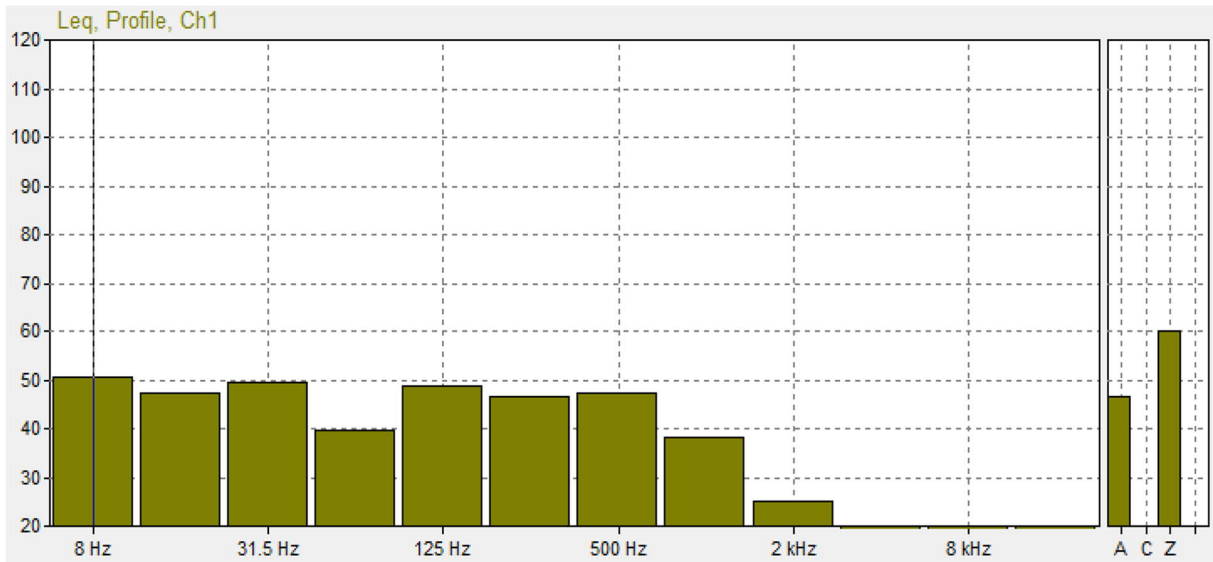
Messposition 1 (rot markiert)



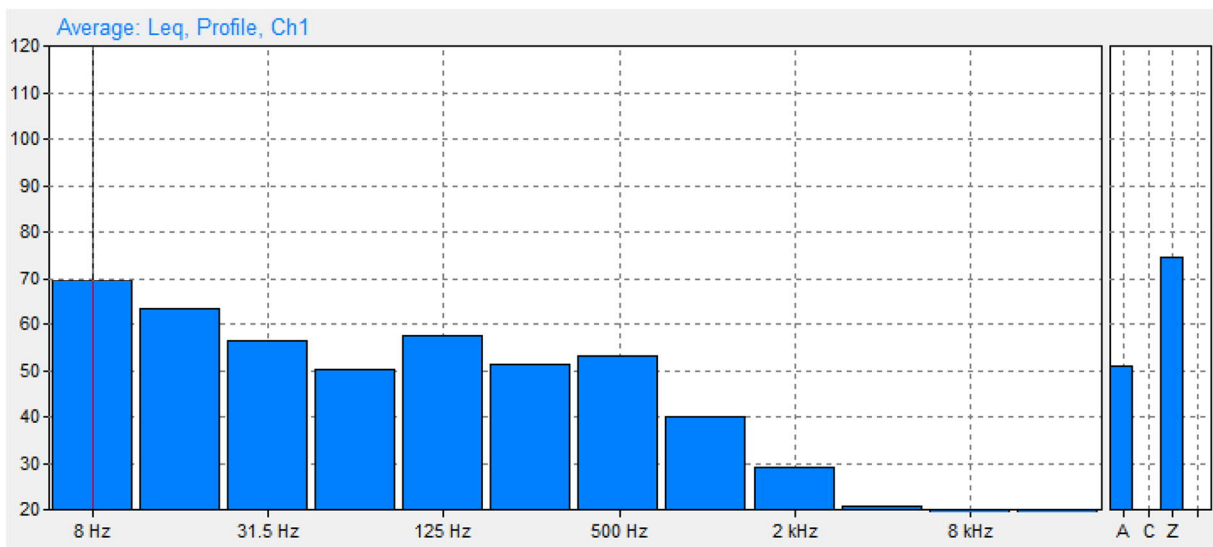
Messposition 2 (rot markiert)



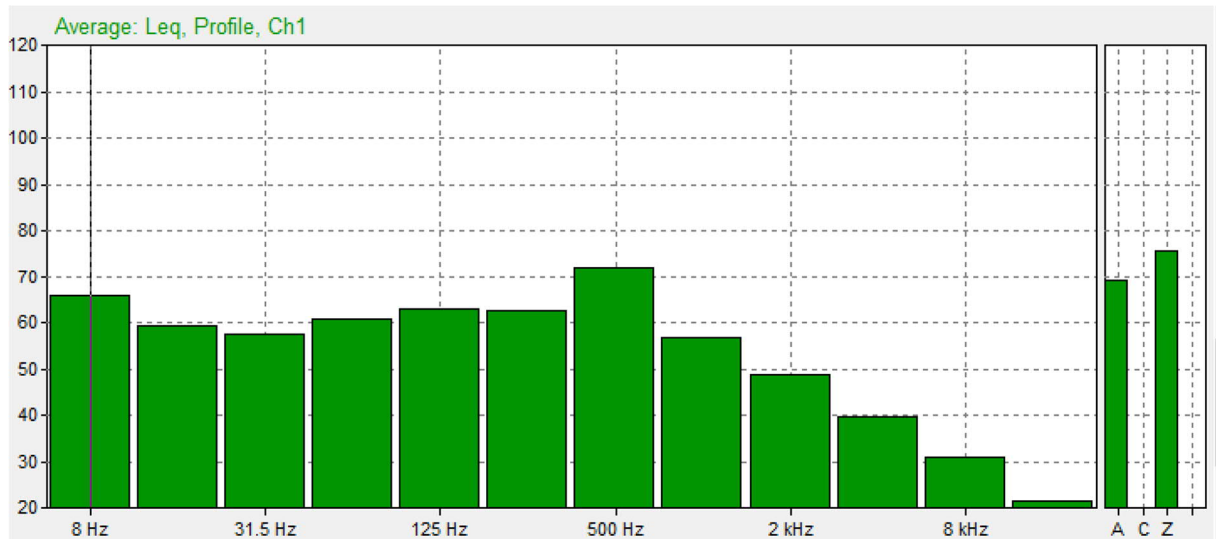
**Trafo 1 Spektrum bei maximaler gemessener Last (46 %)**



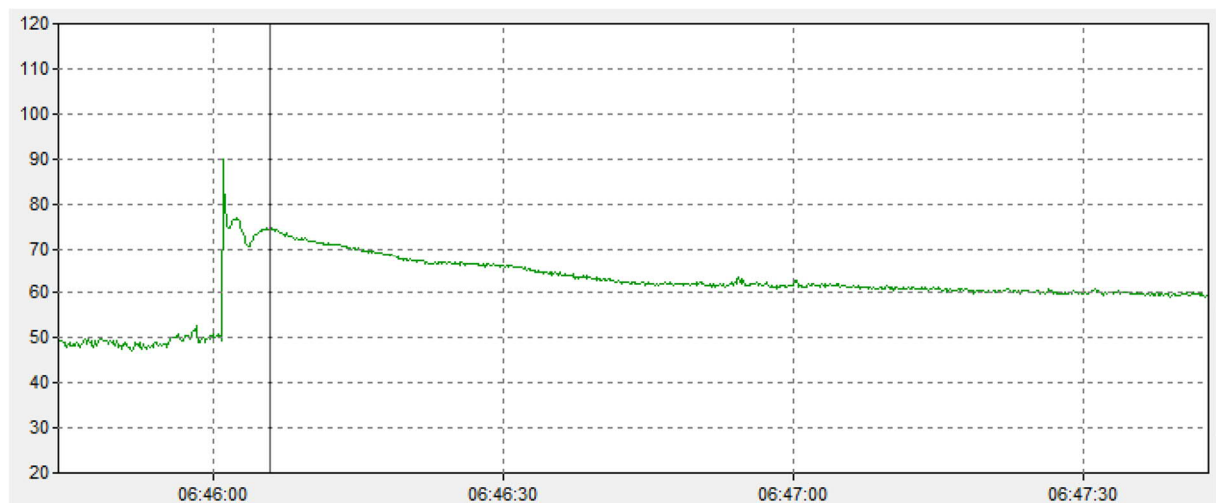
**Trafo 2: Spektrum im Leerlauf vor dem Abschalten (nur noch hochspannungsseitig zugeschaltet)**



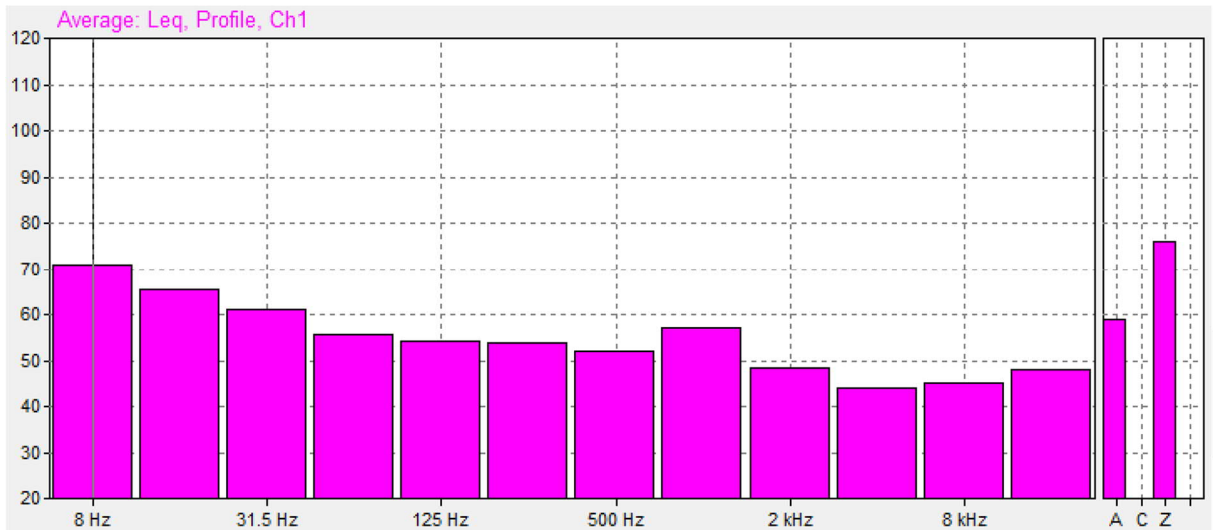
**Trafo 2: Spektrum im Leerlauf nach dem hochspannungsseitigen Zuschalten**



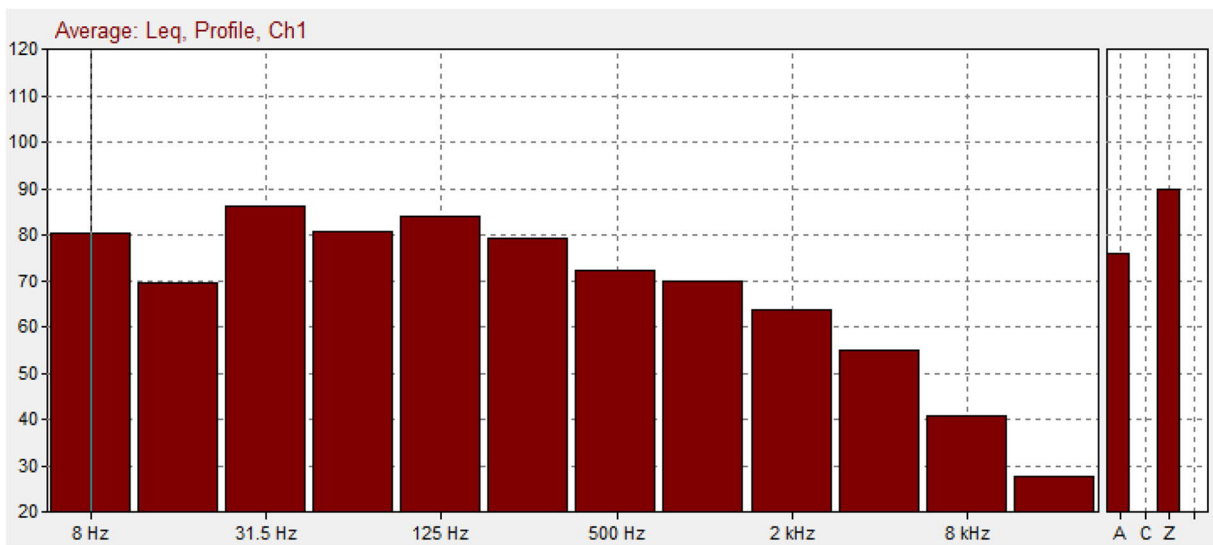
**Trafo 2: Hochspannungsseitiges Zuschalten mit anschliessendem Leerlauf**



**Umrichter: Spektrum bei maximaler gemessener Last (65 %)**



**Umformer (Raumschalldruckpegel)**

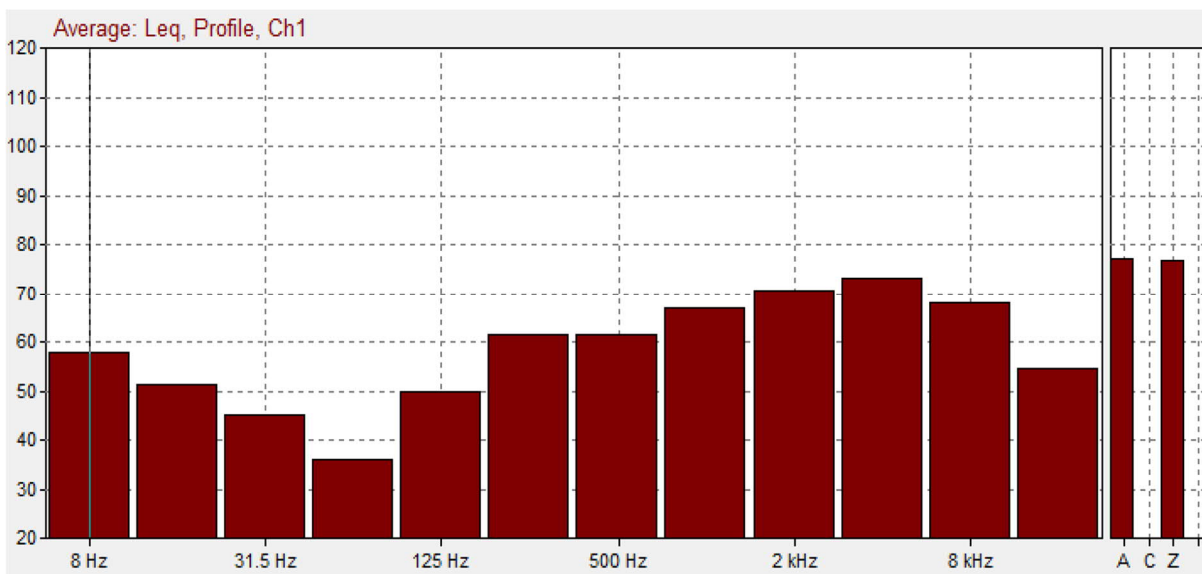


### GIS-Schaltvorgang (Pegelzeitverlauf)

Hinweis: Während des Schaltvorgangs sind mehrere Motoren- und Schlaggeräusche nacheinander zu hören.

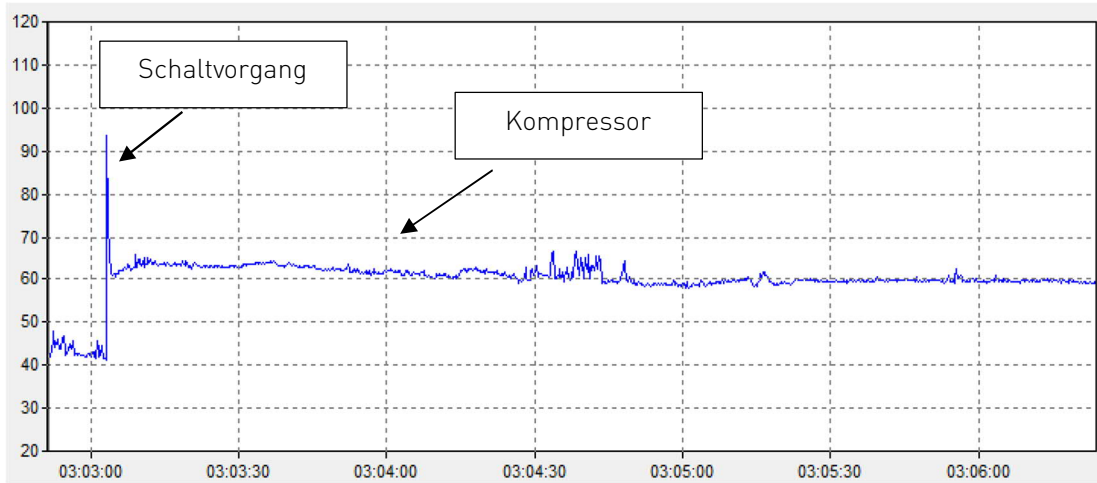


### GIS-Schaltvorgang (Spektrum des Mittelungspegels)



### Freiluftschaltanlage: Pegelzeitverlauf des Trenners 220 kV (ausschalten)

Hinweis: Nach dem Schaltvorgang sind für einige Minuten Kompressorgeräusche entstanden, da die Druckluftanlage wieder den notwendigen Druck herstellen musste.



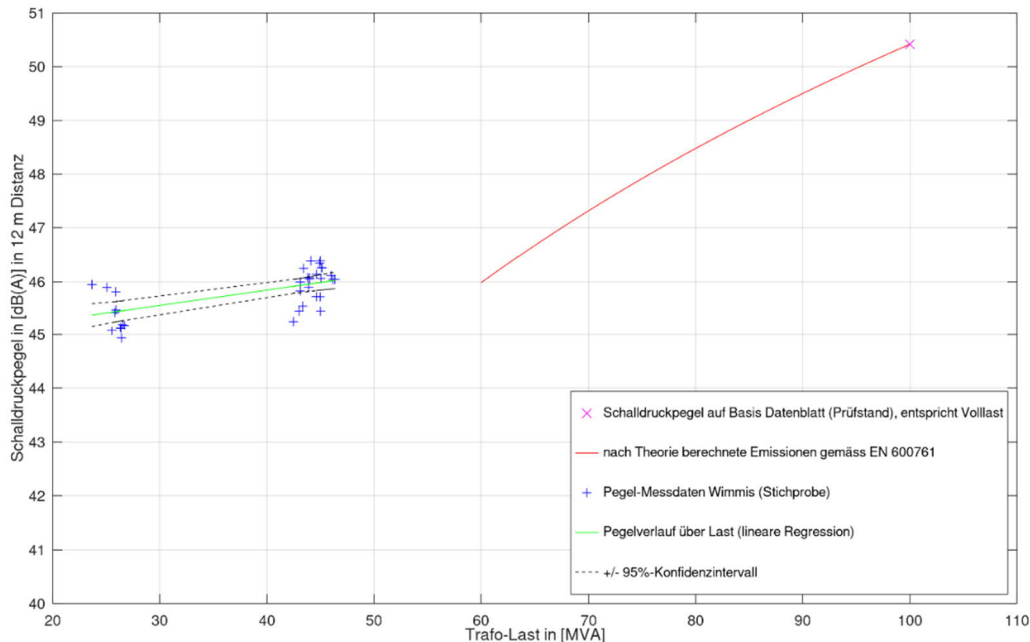


Abb. 1: Schallemissionen Trafo 1 in Abhängigkeit der Netzlast sowie theoretische Werte

Die Darstellung zeigt sowohl die Messdaten (blaue Kreuze) mit der daraus errechneten Lastabhängigkeit der Schallemissionen (grüne Kurve) als auch den theoretisch berechneten Wert der Schallemissionen gemäss der Norm EN 60076-10. Bei der Berechnung der theoretischen Werte wurde die Richtwirkung der Schallabstrahlung des Transformators berücksichtigt. Die Richtwirkung auf die Mikrofonposition betrug 4.9 dB im Vergleich zur mittleren Schallabstrahlung.

Die Berechnung der Emissionen gemäss der Norm EN 60076-10 ist zwar nur im Bereich zwischen 60 % und 100 % der Nennlast gültig (hier: 60 MVA). An den Messdaten ist zu erkennen, dass für tiefere Lasten der Geräuschpegel nahezu bei Werten plafoniert, welche etwa den Emissionen bei 60 % Last entsprechen.

Zur Information: Die rote Kurve berechnet sich gemäss der Norm EN 60076-10 wie folgt:

$$L_{WA,IT} = L_{WA,Ir} + 40 \cdot \lg \frac{I_T}{I_R}$$

mit:

$L_{WA,Ir}$ : Der gemessene oder berechnete A-bewertete Schallleistungspegel des Transformators bei Bemessungsstrom

$L_{WA,IT}$ : Der berechnete A-bewertete Schallleistungspegel beim Istwert des Stroms

$I_R$ : Der Bemessungsstrom

$I_T$ : Der Istwert des Stroms

Näherungsweise gilt für die Schallemissionsberechnung:

$$40 \cdot \lg \frac{I_T}{I_R} = 20 \cdot \lg \frac{S_T}{S_R}$$

mit:

$S_R$ : Die Nennleistung des Transformators

$S_T$ : Die Scheinleistung (Istwert) des Transformators

Uhrzeit	Last [MVA]	Last [%]	Distanz zur Quelle [m]	Schalldruckpegel $L_{p,eq,1m}$ [dB(A)]	Schalleistungspegel $L_{w,eq}$ [dB(A)]	Bemerkungen
02:40	31	31%	12	75	83	Normalbetrieb
03:15	0	0%	12	71	79	Leerlauf
06:46	0	0%	12	86	94	über 2 Minuten nach dem Einschalten in den Leerlauf aus dem spannungslosen Zustand

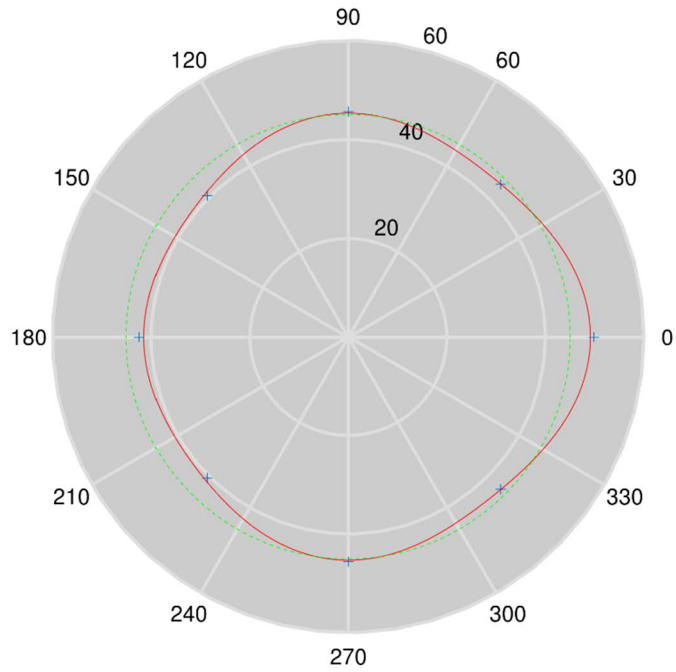


Abb. 1: Richtcharakteristik Trafo 1. Die Richtcharakteristik wurde anhand der Messdaten mit Hilfe einer trigonometrischen Reihe 4. Ordnung interpoliert. Die Standardabweichung zwischen den Messdaten und der Interpolation beträgt 0.5 dB

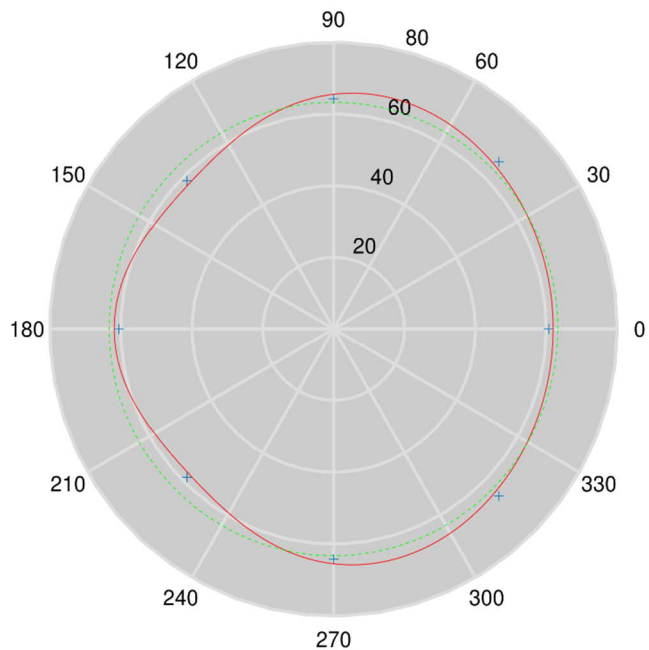


Abb. 2: Richtcharakteristik Umrichter 1. Die Richtcharakteristik wurde anhand der Messdaten mit Hilfe einer trigonometrischen Reihe 5. Ordnung interpoliert. Die Standardabweichung zwischen den Messdaten und der Interpolation beträgt 1.3 dB



Uhrzeit [hh:mm]	Schallquelle	Gesamtdauer des Vorgangs [mm:ss]	mittl. Distanz zur Quelle [m]	Schalldruckpegel		Schalleistungspegel		Schallexpositionpegel SEL <sub>1m</sub> [dB(A)]
				L <sub>p,Fmax,1m</sub> [dB(A)]	L <sub>p,eq,1m</sub> [dB(A)]	L <sub>w,Fmax</sub> [dB(A)]	L <sub>w,eq</sub> [dB(A)]	
02:56	GIS-Schalter, 50 kV, aus	00:11	2.0	102	88	110	96	98
02:55	GIS-Schalter, 50 kV, aus	00:02	2.0	105	97	113	105	100
03:05	GIS-Schalter, 220 kV, aus	11:23	12.7	116	84	124	92	112
03:17	Trenner, 220 kV, aus	00:10	14.7	124	114	132	122	124
03:23	GIS-Schalter, 50 kV, aus	00:03	2.0	82	74	90	82	78
03:24	GIS-Schalter, 50 kV, aus	00:03	2.0	78	73	86	81	78
03:26	GIS-Schalter, 50 kV, ein	00:06	2.0	90	82	98	90	90
03:27	GIS-Schalter, 50 kV, aus	00:06	2.0	104	90	112	98	98
06:51	Trenner, 220 kV, ein	00:02	14.7	122	118	130	126	121
06:51	Schalter, 220 kV, ein	11:23	12.7	127	94	135	102	122
06:53	GIS-Schalter, 50 kV, ein	00:10	2.0	101	87	109	95	97
06:54	GIS-Schalter, 50 kV, ein	00:02	2.0	106	97	114	105	100
<b>arithmetischer Mittelwert GIS-Schaltanlagen:</b>				<b>103</b>	<b>86</b>	<b>104</b>	<b>94</b>	<b>92</b>
<b>arithmetischer Mittelwert Trenner (Freiluft):</b>				<b>105</b>	<b>102</b>	<b>130</b>	<b>110</b>	<b>120</b>