

Psychoakustische Analyse der Betriebsgeräusche von Photovoltaik-Wechselrichtern

Wolfgang Ellermeier¹, Florian Kattner¹, Lothar Kurtze², Maria Roos³,
Steffen Seeber⁴ und Joachim Böś²

¹ Psychologie, TU Darmstadt, Alexanderstr. 10, 64283 Darmstadt, Email: ellermeier@psychologie.tu-darmstadt.de

² Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, TU Darmstadt

³ Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Kassel

⁴ voltwerk electronics GmbH, Bad Vilbel

Einleitung

Wechselrichter, wie sie in Photovoltaik-Anlagen Verwendung finden, emittieren Geräusche im gesamten hörbaren Spektrum, oftmals mit besonders prominenten Pegelspitzen im Bereich von 16–18 kHz. Die Akustik – und die subjektive Auswirkung – dieser Geräusche wird sowohl von Kunden als auch von Entwicklern häufig als problematisch angesehen. Allerdings gibt es noch kaum publizierte Messungen und unseres Wissens keine systematisch erhobenen subjektiven Bewertungen dieser Geräuschquellen. Deshalb wurden sowohl aufwändige akustische Messungen (siehe [1]) als auch psychoakustische Analysen von Wechselrichter-Geräuschen durchgeführt, um zu ermitteln, ob sich der subjektive Klangeindruck durch geeignete objektive oder psychoakustische Parameter vorhersagen lässt.

Methode

Akustische Messungen

Akustische Messungen an fünf Fabrikaten in verschiedenen Betriebszuständen wurden in einer standardisierten Versuchsanordnung in einem halbschalltoten Raum durchgeführt, und zwar (a) mit einem halbkugelförmigen Array aus 40 Mikrofonpositionen (Details in [1]), (b) mit einem Ultraschallmikrofon und (c) mit einem Kunstkopf (Head Acoustics HMS 4).

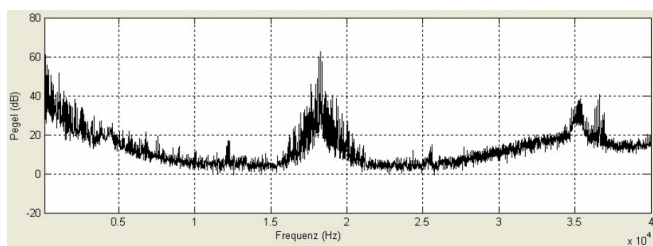


Abbildung 1: Schalldruckpegelspektrum von Wechselrichter A.

Psychoakustische Analyse

Die Messungen aus (a) und (c) wurden mithilfe einer Sound-Quality-Software analysiert (Brüel & Kjær PULSE, Version 14) und zwar bezüglich verschiedener Lautheitsmaße, psychoakustischer Rauigkeit, Schwankungsstärke, Schärfe und Tonhaltigkeit. Dieser Bericht konzentriert sich auf die psychoakustische Auswertung

der Kunstkopfaufnahmen, da diese auch als Stimuli in den Hörversuchen fungierten.

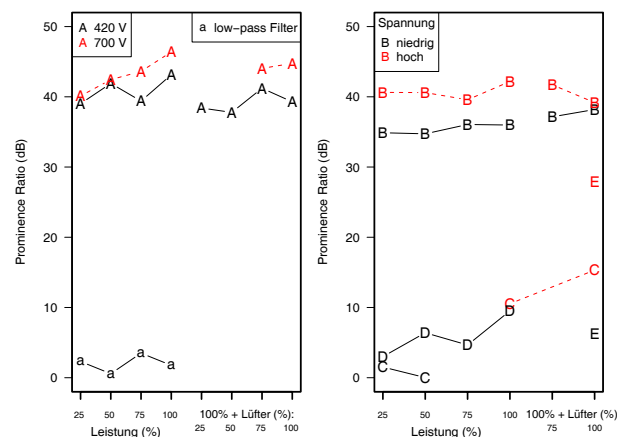


Abbildung 2: Tonhaltigkeit der Wechselrichter-Geräusche. 'Prominence ratio' in dB für die fünf untersuchten Geräte (A–E) in verschiedenen Betriebszuständen. Messungen bei hoher Betriebsspannung: Rote Symbole, gestrichelte Linien.

Hörversuche

42 normal hörende Versuchspersonen im Alter von 19 bis 41 Jahren beurteilten insgesamt 40 Kunstkopfaufnahmen, die über Kopfhörer dargeboten wurden, mit der Methode der Größenschätzung (magnitude estimation [2]) im Hinblick auf die Unangenehmheit des Klangs.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der akustischen Messungen sind in [1] dokumentiert. Exemplarisch zeigt Abb. 1 das mit dem Ultraschallmikrofon aufgenommene Schalldruckpegelspektrum eines Gerätes. Die hochfrequente Spitze bei 18 kHz ist deutlich zu erkennen.

Psychoakustische Metriken

Die aus den Signalen berechneten psychoakustischen Metriken zeigen systematische Abhängigkeiten von Geräteart und Betriebszustand. Abbildung 2 illustriert dies für die wahrgenommene Tonhaltigkeit, die anhand des 'prominence ratio' für alle untersuchten Geräte (A–E) und Betriebszustände wiedergegeben ist. Es ist ersichtlich, dass die Tonhaltigkeit tendenziell mit der Geräteleistung zunimmt (v.a. für Gerät A und D).

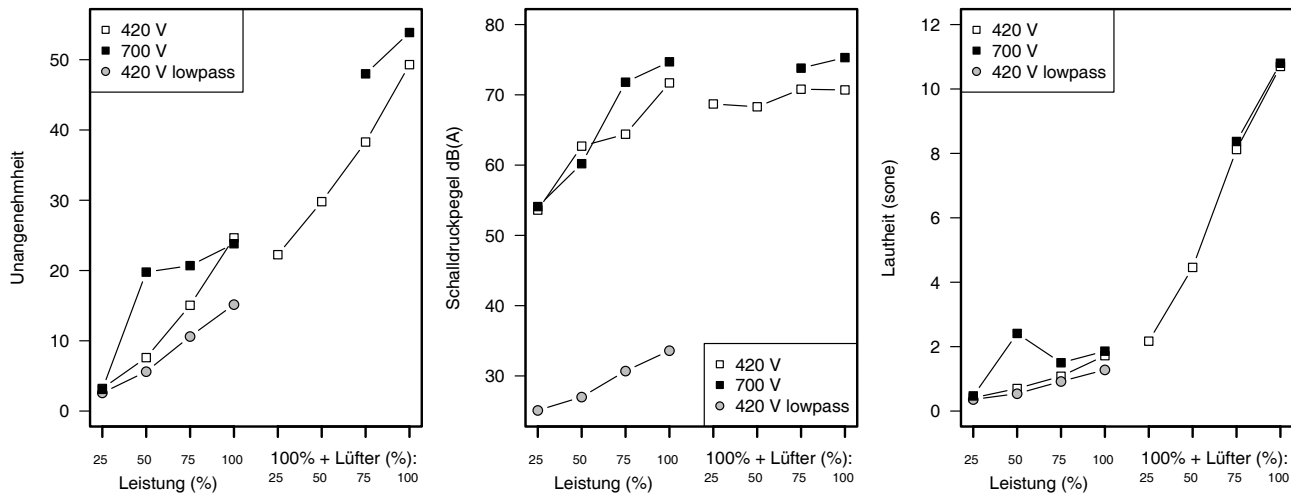


Abbildung 3: Skalierte Unangenehmheit, Schalldruckpegel und psychoakustische Lautheit eines Wechselrichters (Gerät A) in Abhängigkeit von der Geräteleistung (bei abgeschaltetem Lüfter) und der Lüfterdrehzahl bei 100% Leistung (s. Abszisse).

Bei 10 kHz tiefpassgefilterte Aufnahmen von Gerät A zeigen demgegenüber erwartungsgemäß keine Tonhaltigkeit, ebensowenig die eher breitbandig abstrahlenden Geräte C und D. Das Hinzuschalten des Lüfters (rechte Hälften der beiden Grafiken) verändert die Tonhaltigkeit nicht.

Die rechte Grafik in Abbildung 3 zeigt die aus den Signalen berechnete stationäre Lautheit. Es ist ersichtlich, dass die Lautheit auch bei abgeschaltetem Lüfter in Abhängigkeit von der Geräteleistung ansteigt (von unter 1 bis nahe 2 sone); wirklich deutliche Lautheitszuwächse (bis auf über 10 sone) ergeben sich aber erst bei Hinzuschalten des Lüfters. Ähnliche Muster ergaben sich für die anderen untersuchten Geräte.

Geräuschbeurteilungen

Die Ergebnisse der Geräuschbeurteilungen für dasjenige Gerät (A), an dem die meisten Betriebszustände untersucht wurden, finden sich in der linken Grafik in Abb. 3. Sie zeigen eine streng monotone Zunahme der wahrgenommenen Unangenehmheit mit der Geräteleistung und ein weiteres Anwachsen bei Hinzuschalten des Lüfters.

Diskussion

Abbildung 3 erlaubt, exemplarisch für eines der untersuchten Geräte (a) akustische Kennwerte, (b) psychoakustische Parameter und (c) die skalierte Unangenehmheit zu vergleichen. Vergleicht man die linke mit der rechten Grafik in Abb. 3, so erkennt man sehr ähnliche Muster: Tatsächlich korrelieren die aus den Signalen berechnete stationäre Lautheit und die skalierte Unangenehmheit hochsignifikant auch über alle 40 untersuchten Geräuschstichproben hinweg mit $r = 0,897$.

Sowohl die mittleren Unangenehmheitsurteile als auch die Lautheitsmetrik zeigen einen starken Zuwachs in Abhängigkeit von der Lüfterdrehzahl (rechte Hälfte der jeweiligen Grafiken). Allerdings zeigen sich auch Unterschiede: Vergleicht man die Geräuschstichproben, bei denen der hochfrequente Signalanteil herausgefil-

tert wurde (Kreise in Abb. 3) mit den Originalsignalen (darüberliegende offene Quadrate), so ist der Unterschied deutlicher in den Unangenehmheitsratings als in der Lautheitsmetrik. Das zeigt, dass die Unangenehmheit des Klangs auch durch die hochfrequenten Schallanteile mitbestimmt wird, was die Lautheitsmetrik wegen der Begrenzung der Frequenzgruppenfilter auf bis maximal 15,5 kHz nur unzureichend erfasst.

Weit gravierendere Unterschiede ergeben sich jedoch im Vergleich zur konventionellen Abschätzung der Lärmbelästigung durch den A-bewerteten Schalldruckpegel (mittlere Grafik in Abb. 3). Zum einen fallen die tiefpassgefilterten Signale um ca. 30 dB gegenüber den ungefilterten Signalen ab; zum anderen ergibt sich durch Hinzuschalten des Lüfters keine weitere Steigerung im Schalldruckpegel. Beide Effekte sind darauf zurückzuführen, dass die hochfrequenten tonalen Komponenten bei 18 kHz den gemessenen Gesamtpegel dominieren. Der Unangenehmheitseindruck und die Lautheit werden dagegen weit stärker von den breitbandigen Lüftergeräuschen im mittleren Frequenzbereich bestimmt.

Die Ergebnisse legen nahe, dass eine A-bewertete Schallpegelmessung die Klangqualität der Geräuschemissionen von Photovoltaik-Wechselrichtern nicht hörgerecht erfasst. Psychoakustische Metriken – v.a. die Lautheit – liefern eine weit bessere Vorhersage der empfundenen Lästigkeit der Betriebsgeräusche.

Literaturverzeichnis

Literatur

- [1] Meister, A., Moritz, K., Skowronek, A., Kurtze, L., Ellermeier, W., Roos, M., Seeber, S.: Akustische Messungen an Photovoltaik-Wechselrichtern. In DAGA 2011, Düsseldorf, 21.–24. März, 2011
- [2] Hellbrück, J., Ellermeier, W.: Hören – Physiologie, Psychologie und Pathologie. Hogrefe, Göttingen, 2004