

Simulationsbasierte Analyse von Power Quality Phänomenen: Synergien von Power Quality-Messungen und Netzberechnungen

Einleitung

Wie bereits beim Beitrag [„Erhöhte Netzurückwirkungen auf einem Frachtschiff: Systematische Analyse und Netzimpedanzabschätzung“](#) [1] beschrieben wurde, ist es durch den Betrieb von Elektromotoren zu Netzurückwirkungen in der Stromversorgung eines Schiffs gekommen. Der Betrieb der Elektromotoren verursachte ungewünschte Schutzauslösungen. Die Ergebnisse der durchgeführten Power Quality-Messung deuten darauf hin, dass durch den Betrieb von zwei bestimmten Elektromotoren an Bord des Schiffs Oberschwingungsströme erzeugt werden, welche die Netzspannung unzulässig verzerren. Grund für die ausgeprägte Verzerrung der Spannung war eine Resonanz des Netzes im Bereich 1 kHz und 1,5 kHz. Um die Netzurückwirkungsproblematik zu lösen, wurde vom Schiffsbesitzer entschieden, eine Abhilfemaßnahme zu ergreifen. Dazu gibt es verschiedene technische Lösungen. Eine gängige Maßnahme zur Beseitigung von Netzurückwirkungen aufgrund von Oberschwingungen ist die Installation von passiven Filtern. Dieser Beitrag illustriert, wie die Ergebnisse einer Power Quality-Messung sowie der Ansatz von Netzberechnungen genutzt werden können, um harmonische Filter auszulegen und ihre Wirksamkeit zu bewerten.

Vorgehensweise

Die Stromversorgung des Schiffes wurde in DigSilent PowerFactory vereinfacht nachgebildet. Die Nachbildung des Netzes kann der Abbildung 1 entnommen werden. Die Modellierung des Netzes besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: Nachbildung des Netzes und Nachbildung der Oberschwingungsströme der Elektromotoren.

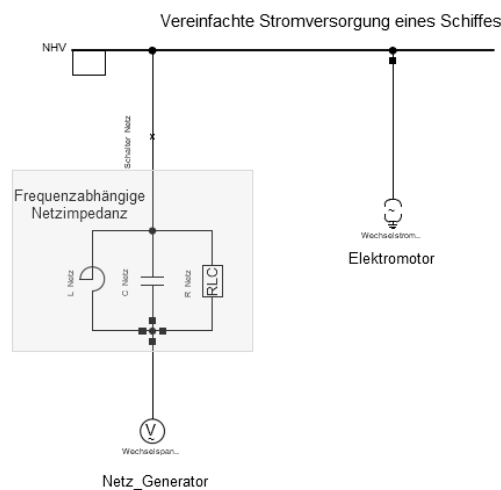


Abbildung 1. Vereinfachte Nachbildung des Netzes zur Beurteilung von Netzurückwirkungen und zur Bewertung der Wirksamkeit von harmonischen Filtern

Modellierung des Netzes

Die Herausforderung bei der Nachbildung des Netzes ist eine realistische Abbildung der Netzimpedanz auf dem Schiff. Diese Impedanz enthält die innere Impedanz des Generators, die Impedanz von Kabelverbindungen sowie die von weiteren Lasten. Die zuverlässigste Methode zur Modellierung der Impedanz ist die direkte Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz, wie sie an Bord des Schiffes vorherrscht. Wenn eine Messung der Netzimpedanz nicht vorliegt, besteht die Möglichkeit diese aus der Power Quality-Messdaten einzuschätzen [1]. Bei dem vorliegenden Fall wurde eine Netzimpedanzmessung nicht durchgeführt, sodass diese aus den gemessenen Motorströmen und den Spannungen abgeschätzt wurde. Die so abgeschätzte Netzimpedanz (orangene Kurve in der Abbildung 2) zeigt eine Parallelresonanz bei ca. 1,2 kHz. Der Verlauf der Netzimpedanz lässt sich simulativ relativ gut über eine RLC-Parallelschaltung nachbilden. Die rote Kurve in der Abbildung 2 zeigt den angenäherte Verlauf für den Betrag der Netzimpedanz.

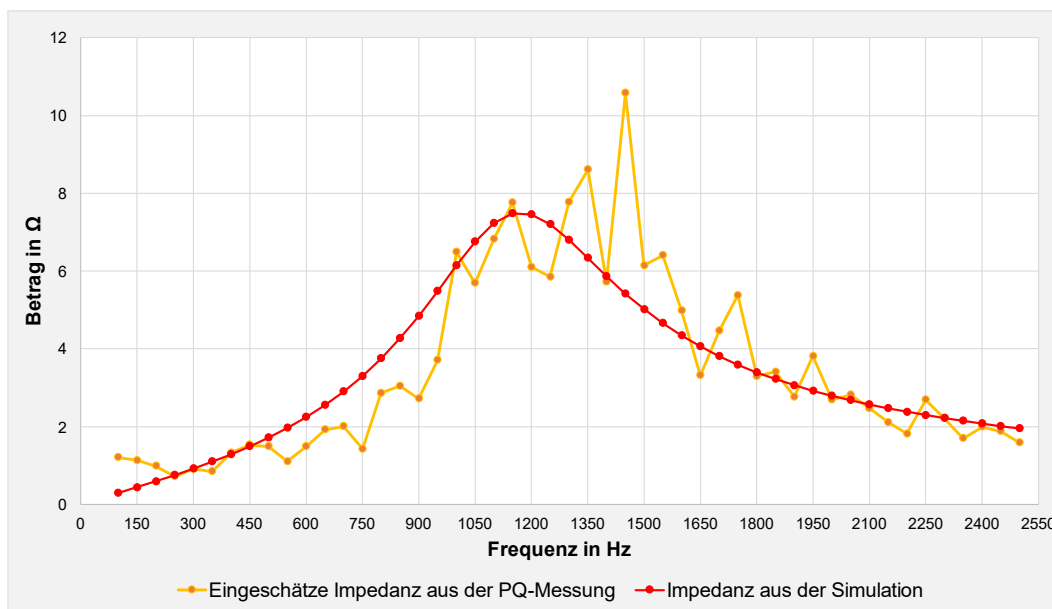


Abbildung 2. Annäherung der Netzimpedanz über eine RLC- Parallelschaltung

Zur Modellierung der frequenzabhängigen Netzimpedanz in PowerFactory gibt es zwei Möglichkeiten: Durch die Nachbildung der Impedanz über ein RLC-Netzwerk, welches den Frequenzgang wiedergibt, oder durch die direkte Eingabe von Impedanzwerten der frequenzabhängigen Netzimpedanz (Betrag und Phasenwinkel, z.B. aus einer Messung) [2]. Da vor Ort bei der Power Quality-Messung keine Netzimpedanzmessung durchgeführt wurde, wird die Netzimpedanz durch eine RLC-Schaltung nachgebildet, wie in der Abbildung 1 zu sehen ist. Die Abbildung 3 zeigt den Verlauf der so nachgebildeten Impedanz.

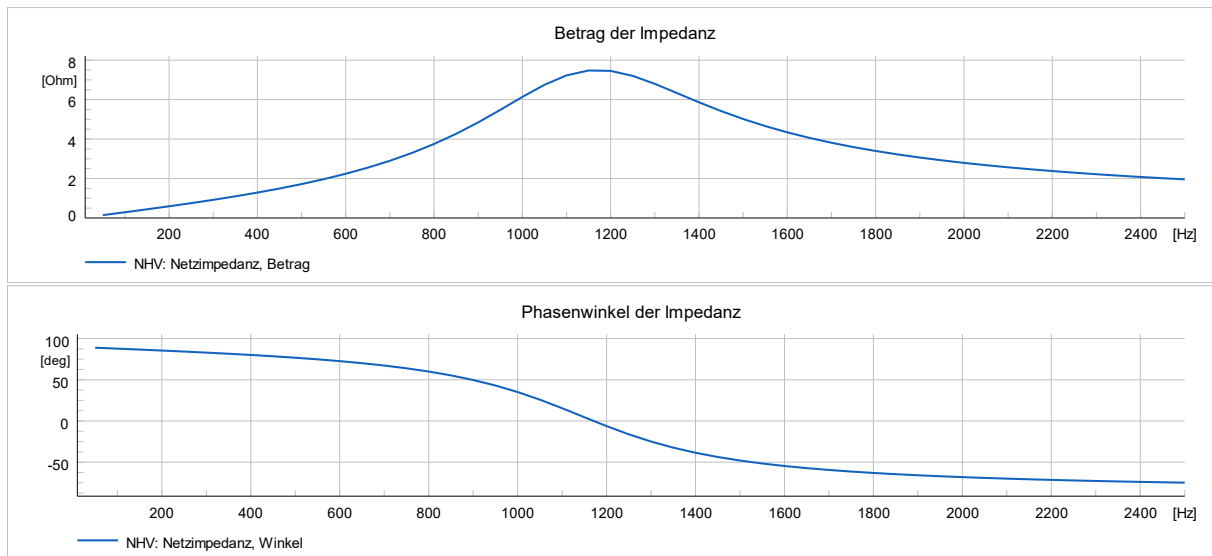


Abbildung 3. Verlauf der über ein RLC-Netzwerk nachgebildeten Netzimpedanz

Die Modellierung des Netzes beinhaltet auch die Modellierung der Netzspannung und deren Oberschwingungen, um die harmonische Vorbelastung des Netzes darstellen zu können. Für diese Modellierung ist eine Messung der Hintergrundharmonischen sehr hilfreich. Eine Messung der Hintergrundharmonischen wurde durchgeführt. Dafür wurden zum Zeitpunkt der Messung die Elektromotoren abgeschaltet.

Modellierung der Oberschwingungen, die durch den Betrieb des E-Motors entstehen

Zur realitätsgetreuen Nachbildung der entstehenden Netzzrückwirkungen durch die Elektromotoren, ist im ersten Schritt deren Funktionsweise bzw. die Ursache der Rückwirkungen zu klären. Die Stromoberschwingungen des Elektromotors wurden durch eine (Oberschwingungs-)Stromquelle nachgebildet. Für die Parametrierung der Stromquelle werden die gemessenen Oberschwingungsströme des Elektromotors verwendet.

Simulationen

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse vorgestellt. Folgende Szenarien wurden simuliert:

- A. Netzsituation ohne Betrieb des E-Motors
- B. Netzsituation beim Betrieb des E-Motors ohne harmonischer Filter
- C. Netzsituation beim Betrieb des E-Motors mit harmonischem Filter

Simulation A: Netzsituation ohne Betrieb des E-Motors

Die Modellierung des Netzes für diese Szenario ist in der Abbildung 4 dargestellt. Die Stromquelle, die des Betrieb des Motors darstellt, wurde hierfür abgeschaltet. Die Abbildung 5 zeigt das harmonische Spektrum der Netzspannung und entspricht den Ergebnissen aus der Power Quality-Messung.

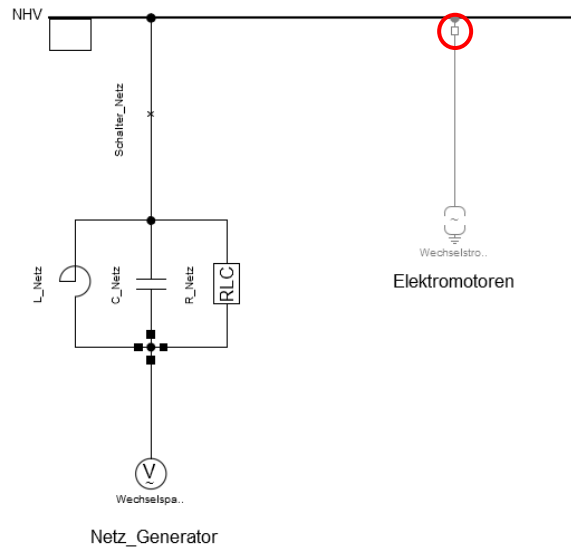


Abbildung 4. Simulationsaufbau zur Abbildung der Netzsituation ohne Betrieb des E-Motors

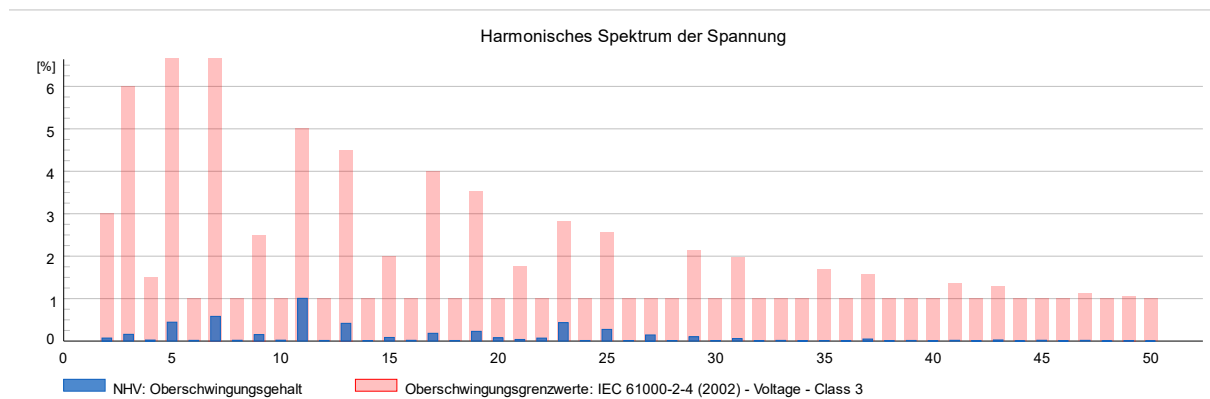


Abbildung 5. Harmonisches Spektrum der Netzspannung ohne Betrieb des E-Motors (Hintergrundharmonische)

Simulation B: Betrieb des E-Motors ohne harmonischer Filter

Zur Simulation dieses Szenarios wurde die harmonische Stromquelle, die den E-Motor nachbildet, zugeschaltet. Die Abbildung 6 (oben) zeigt den Vergleich der harmonischen Spektren der Spannung mit und ohne Betrieb des E-Motors. Im unteren Bereich der Abbildung 6 wird das Stromspektrum des E-Motors gezeigt. Es lässt sich eindeutig feststellen, dass der Betrieb des E-Motors zu einem hohen Anstieg des Oberschwingungsgehalts in der Spannung führt. Nicht nur die niederfrequenten Oberschwingungen (5., 7., 11.) weisen hohe Werte auf, auch im Bereich von 850 Hz (17.) bis 1250 Hz (25.) sind hohe Oberschwingungsgehalte vorhanden. Die Ursache hierfür ist die vergleichsweise hohe Netzimpedanz (Resonanz bei ca. 1150 Hz).

Es wird vermutet, dass die Oberschwingungen, die durch den Betrieb des Motors entstehen, für die Netzurückwirkungsproblematik zuständig sind. Um die Situation aus Sicht der Normung zu betrachten, werden die simulierten Oberschwingungen mit den Grenzwerten der IEC-Norm 61000-2-4 (Klasse3) verglichen (siehe Abbildung 7). Der Abbildung 7 kann entnommen werden, dass es zur Grenzwertverletzung der 17., 19., 23. und 25. Oberschwingung kommt: Darüber hinaus wurde der Zeitverlauf der Spannung bewertet, welcher in der Abbildung 8 dargestellt ist. Wie man sieht, entstehen durch die Oberschwingungen mehrfache Nulldurchgänge. Bei Schutzrelais, die auf dem Prinzip der Nulldurchgangserkennung arbeiten, können mehrfache Nulldurchgänge zur Fehlfunktion führen.

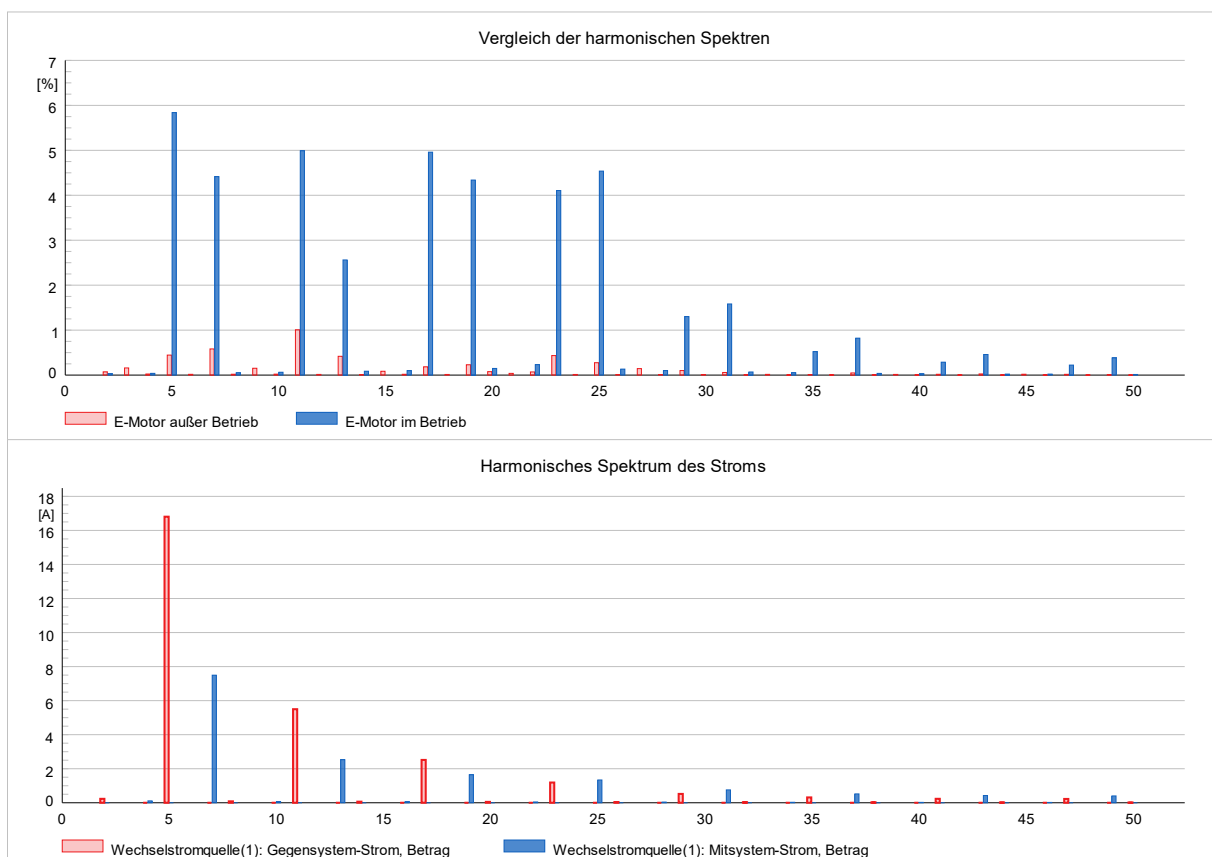


Abbildung 6. Harmonisches Spektrum der Spannung (oben) und harmonisches Spektrum des Stroms (unten) beim Betrieb des E-Motors

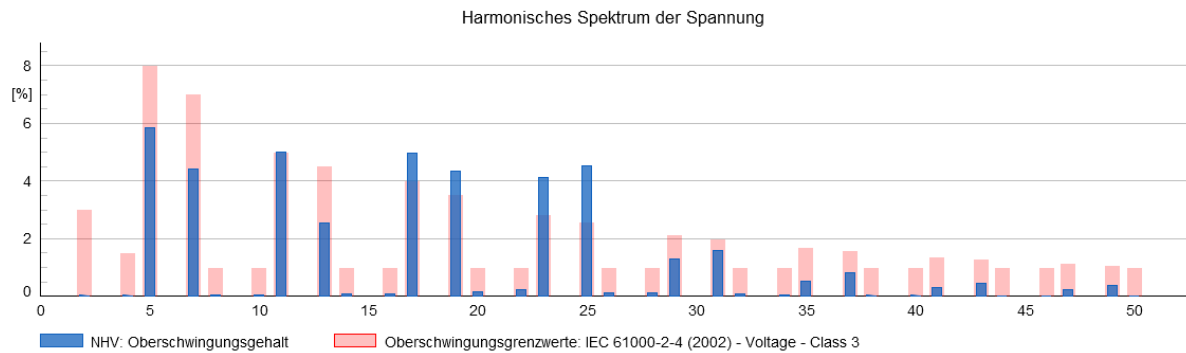


Abbildung 7. Bewertung des Oberschwingungsgehalt nach IEC-Grenzwerten (ohne Filter)

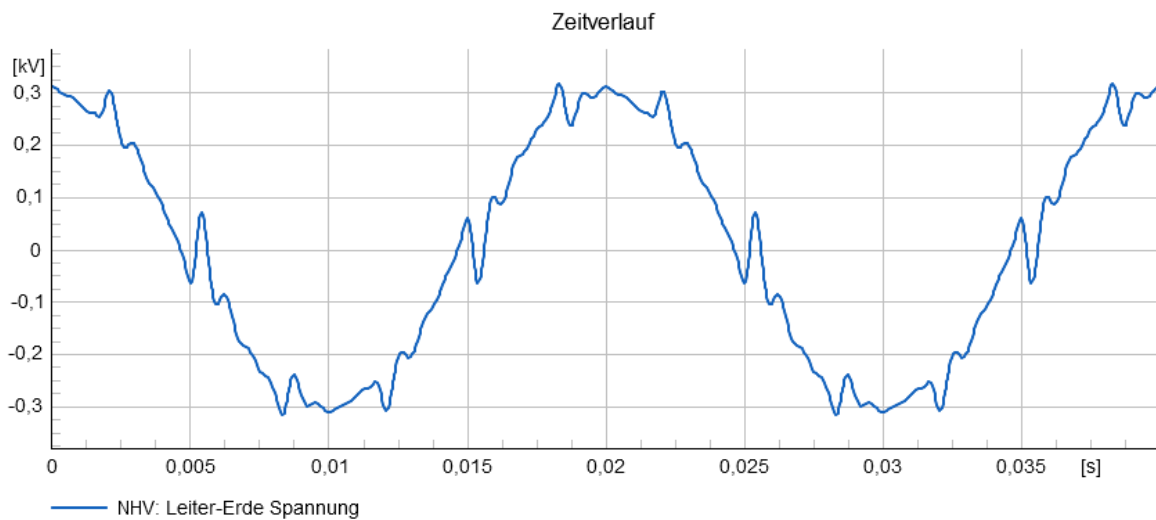


Abbildung 8. Simulierter Zeitverlauf der Spannung

Simulation C: Betrieb des E-Motors mit harmonischem Filter

Aufgrund der Tatsache, dass der Betrieb des E-Motors zur Verletzung der Verträglichkeitspegel der IEC 61000-2-4 (Klasse 3) führt, wird es als notwendig erachtet, eine Abhilfemaßnahme einzuplanen. Eine Möglichkeit besteht in der Installation eines passiven harmonischen Filters, welche in diesem Abschnitt betrachtet wird. Der Einfachheit halber wird nur beispielhaft die Wirksamkeit eines Filters zur Reduktion der 17. Oberschwingung dargestellt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Filter auch Blindleistung bei 50 Hz liefert, wurde im ersten Schritt eine Kapazität ausgewählt, die zu einer geeigneten Kompensation des aktuellen Blindleistungsbedarfs führt. Aus dieser Kapazität (C) und aus der Resonanzfrequenz (850 Hz) wurde der Wert der Induktivität nach der Formel (1) ermittelt.

$$L = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot C} \quad (1)$$

Nach Auslegung des Filters wurde eine harmonische Lastflussberechnung durchgeführt, um die Wirksamkeit zu bewerten. Die Ergebnisse der Netzberechnung können der Abbildung 9 entnommen werden. Erwartungsgemäß konnte der Oberschwingungsgehalt der 17., 19., 23., und 25. Oberschwingung reduziert werden. Auffällig ist, dass der Oberschwingungsgehalt der 5., 7., und 11. Oberschwingung sowie die Gehalte der Oberschwingungen höher der 31. Ordnung durch die „Installation“ des Filters gestiegen sind. Um dieses Verhalten zu analysieren, wurde die frequenzabhängige Netzimpedanz des Netzes (inkl. Filter) in PowerFactory berechnet. Die Abbildung 10 zeigt den Vergleich der Netzimpedanz mit und ohne Filter. Der Filter führt zu den drei wesentlichen Effekten: niedrige Impedanz bei der 17. Oberschwingung, Verschiebung der Resonanz von 1150 Hz (23. Ordnung) auf 1850 Hz (37. Ordnung) und Entstehung einer neuen Resonanz bei 550 Hz (11. Ordnung). Bewertet man die neue Oberschwingungssituation nach den Verträglichkeitspegeln der IEC 61000-2-4 (Klasse 3) stellt man fest, dass es mit dem Filter zu einer Grenzwertverletzung der 11. und 37. Oberschwingung kommt. Somit ist die Oberschwingungsproblematik durch die Installation des geplanten Filters nicht gelöst. Das gezeigte Beispiel soll die Vorteile einer simulativen Untersuchung bei der Auswahl von Abhilfemaßnahmen demonstrieren. Durch eine detailliertere Filterauslegung ist die Oberschwingungsproblematik an Bord des Schiffs zu lösen. Auf die detaillierte Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet.

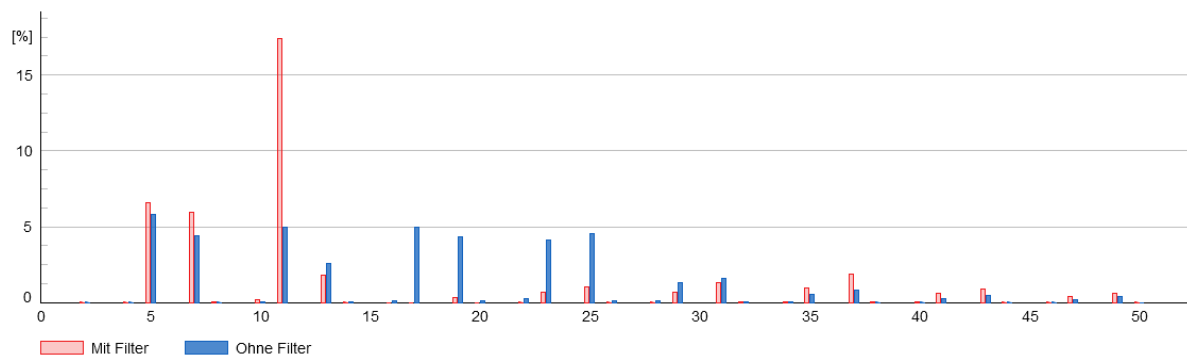


Abbildung 9. Harmonisches Spektrum der Spannung mit und ohne Filter

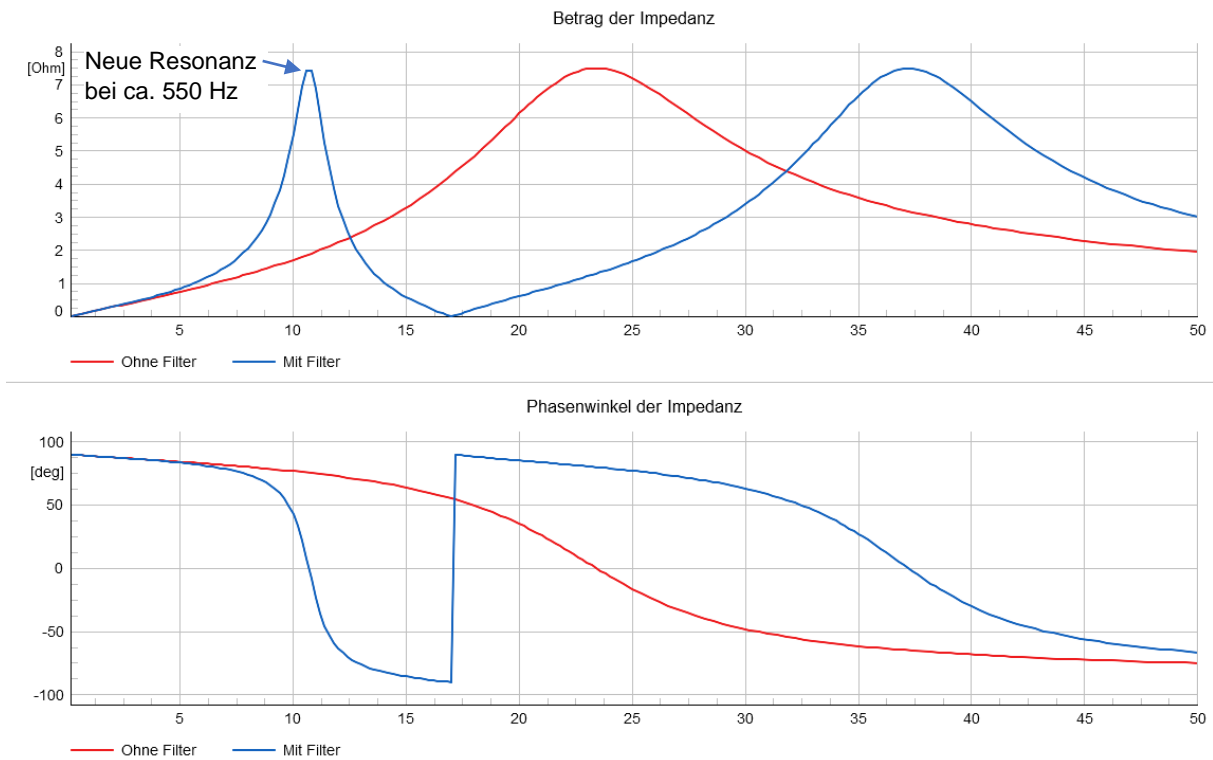


Abbildung 10. Simulierte frequenzabhängige Netzimpedanz unter Berücksichtigung des harmonischen Filters

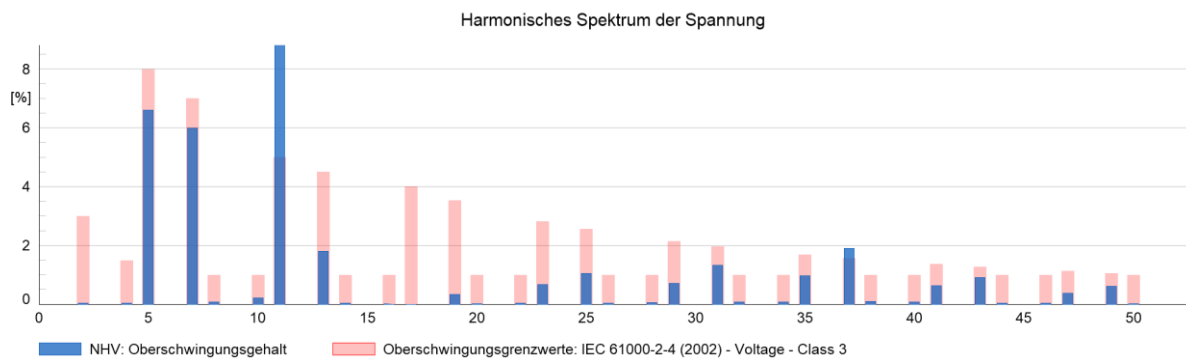


Abbildung 11. Bewertung des Oberschwingungsgehalt nach den IEC-Grenzwerten (mit Filter)

Fazit

Das gezeigte Beispiel illustriert, wie durch eine simulationsbasierte Analyse „Power Quality“-Phänomene systematisch bewertet werden können. Als Ergebnis können nicht nur die Ursachen von Netzrückwirkungen eruiert werden. Es kann auch die Wirksamkeit von Abhilfemaßnahmen (z.B. harmonische Filter) zur Verbesserung der Netzqualitätssituation bewertet werden. Der Schlüssel für eine präzise Analyse ist eine realistische Nachbildung sowohl des Netzes als auch von den Oberschwingungsquellen. Durch eine Power Quality-Messung lassen sich die zur Parametrierung und Validierung der Simulationsmodelle notwendigen Spannungen und Ströme ermitteln

Ein wichtiger Aspekt bei der Beurteilung der Power Quality ist die Kenntnis über die frequenzabhängige Impedanz des Netzes. Häufig wird bei Netzberechnungen nur die Kurzschlussimpedanz des Netzes bei Nennfrequenz (50 Hz) berücksichtigt. In der Realität treten zwischen den Kapazitäten und Induktivitäten im Netz Resonanzen auf, welche zu erhöhten Netzrückwirkungen führen können. Vor allem bei Netzen auf Schiffen, welche eine niedrige Kurzschlussleistung aufweisen, können schon im Bereich von 50 Hz bis 2,5 kHz nennenswerte Netzresonanzen auftreten. Die frequenzabhängige Netzimpedanz lässt sich messtechnisch ermitteln [5]. Wenn eine Messung der Netzimpedanz nicht vorliegt, lässt sich diese bei Netzen mit ausgeprägten Resonanzen anhand des Oberschwingungsgehalts der Spannung und des Stroms einschätzen. Eine weitere Alternative ist die Netzimpedanz rechnerisch zu ermitteln. Dafür müssen allerdings geeignete Modelle (frequenzabhängige Modelle) der Betriebsmittel verwendet werden.

Zur Verbesserung der Oberschwingungssituation wurden bei diesem Projekt verschiedene Varianten bewertet. In diesem Beitrag wurde beispielhaft der Fall dargestellt, bei dem ein passiver Filter zur Filterung des 17. Oberschwingung vorgesehen wurde. Die Ergebnisse der Netzberechnung zeigten, dass durch diesen Filter die Grenzwerteverletzung der Oberschwingungen im Bereich 850 Hz (17. Ordnung) bis 1,25 kHz (25. Ordnung) beseitigt werden konnte. Der Einsatz des Filters führt allerdings zu einer neuen Resonanz bei 550 Hz, welche wieder zu einer eindeutigen Verletzung von Grenzwerten führt. Die Impedanz des Filters sorgt auch zur Verschiebung der ursprünglichen Resonanz. Dieses Phänomen zeigt, wie sorgfältig die Auslegung von passiven harmonischen Filtern durchzuführen ist.

Referenzen

[1] A. Lübke, „[Erhöhte Netzrückwirkungen auf einem Frachtschiff: Systematische Analyse und Netzimpedanzabschätzung](#)“, Göbel News V4-2023, Dezember 2023.

[2] <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/how-do-you-model-frequency-dependent-network-equivalents-fdne-for-harmonic-analysis.html>

[3] IEC 61000-2-4:2002, “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances”, 2002.

[4] Mindykowski, Janusz. (2014). Power quality on ships: Today and tomorrow's challenges. EPE 2014 - Proceedings of the 2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. 1-18. 10.1109/ICEPE.2014.6969860.

[5] J. Velásquez, A. Lübke, B. Grasel, J-H Amrhein, " Nichtinvasive Messung von Netzimpedanzen zur Beurteilung von Netzrückwirkungen", VDE - Hochspannungstechnik 2020 - ETG-Fachtagung, 09. bis 11. November 2020.



Autoren



Juan Velásquez
Hubert Göbel GmbH
j.velasquez@hgmes.de
Siemensstraße 42
59199 Bönen, Deutschland



Alexander Lübke
Hubert Göbel GmbH
a.luebke@hgmes.de
Siemensstraße 42
59199 Bönen, Deutschland



Bernhard Grasel
NEO Messtechnik GmbH
bernhard.grasel@neo-messtechnik.com
Hauptstrasse 7 (Büro), Sonnweg 4 (Lager)
2871 Zöbern, Austria (AT)