



Christopher Hribernik, BSc

Oberschwingungsanalyse in einem Industrienetz

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur
Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Graz, April 2021



© fotopro

Oberschwingungsanalyse in einem Industrienetz

Masterarbeit von
Christopher Hribernik, BSc

Betreuer:
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner

April 2021

Technische Universität Graz
Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Inffeldgasse 18/l
8010 Graz
Austria

Institutsleiter

Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner

Masterarbeit von
Christopher Hribernik, BSc

April 2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit bildet den Abschluss meines Studiums, wodurch ein weiterer wichtiger Lebensabschnitt zu Ende geht.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer *Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner* für die umfangreiche Unterstützung meiner Masterarbeit bedanken. Durch seine fachlichen Anregungen und Hinweise stand er mir bei den auftretenden Fragestellungen immer zur Seite.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn *Ing. Peter Schitz*, der mich zu Beginn dieser Masterarbeit bei der Modellierung des Industrienetzes unterstützt hat.

Einen besonderen Dank darf ich meinen StudienkollegInnen und Freunden aussprechen, die mir eine tolle Zeit in Graz verschafft haben. Dazu zählen vor allem die Mitglieder des Dynamobauzeichensaals. Der Dynamobauzeichensaal war ein zentraler und wichtiger Bestandteil im Laufe meines Studiums, wo ich nicht nur für das Studium lernte, sondern auch den einen oder anderen Freund gewinnen durfte.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Freundin bedanken, die mich vor allem am Ende des Studiums ermutigt hat und darüber hinaus Verständnis und Geduld zeigte.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Familie, die mich immer unterstützt und an mich geglaubt hat. Ohne euren Rückhalt wäre das Studium in dieser Form nicht möglich gewesen.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit Oberschwingungsuntersuchungen im Industrienetz eines Papier- und Zellstoffwerkes. Ein Ziel dieser Arbeit ist die Erfassung der einzelnen Oberschwingungs-Spannungspegeln und des THD-Wertes von signifikanten Anschlusspunkten. Die Ergebnisse werden auf Einhaltung der Grenzwerte in den vorgeschriebenen Normen überprüft. Des Weiteren wird die Änderung des THD-Wertes für zwei Varianten des Inselnetzbetriebes untersucht. Ein weiteres Ziel ist die Analyse der Oberschwingungsemission an der Übergabestelle zum öffentlichen Netz (PCC) in Anlehnung an eine Methode der CIGRE/CIRED JWG C4.109.

Die Umsetzung dieser Ziele erfolgt durch eine Vor-Ort-Messung im Industrienetz und der anschließenden Auswertung der Messdaten. Dabei werden die Messungen an der Übergabestelle zum öffentlichen Netz (PCC) und an zwei anlageninternen Anschlusspunkten (SS1 und SS2) durchgeführt. Die erforderlichen Kurzschlussleistungen und Oberschwingungsimpedanzen werden mithilfe von Netzberechnungen berechnet.

Alle untersuchten Oberschwingungs-Spannungspegel und THD-Werte liegen unterhalb der festgelegten Grenzen in den dafür vorgesehenen Normen. Bei beiden Varianten des Inselnetzbetriebes steigt der THD-Wert an den Messpunkten SS1 und SS2 im annähernd gleichen Ausmaß wie die Kurzschlussleistung an diesen Messpunkten sinkt. Am Messpunkt PCC ist die Änderung des THD-Wertes stärker vom Schaltzustand und den dadurch wirksamen Oberschwingungsquellen abhängig. Bei der Analyse der Oberschwingungsemission müssen die einzelnen Komponenten des gemessenen Stromzeigers am Messpunkt PCC berücksichtigt werden, da sonst keine zielführende Aussage in Bezug auf die Oberschwingungen im Industrienetz getroffen werden kann. Es ist anzumerken, dass die Oberschwingungen von unterschiedlichen Anlagen im öffentlichen Netz andere Winkel als die Oberschwingungen im Industrienetz aufweisen können. Somit kann eine Überlagerung dieser Komponenten zu einer Verringerung oder Erhöhung der Oberschwingungsemission am Messpunkt führen.

Schlüsselwörter: Oberschwingungsanalyse, Industrienetz, Oberschwingungen, Spannungsqualität, Oberschwingungsemission, Oberschwingungs-Gesamtverzerrung, THD, Oberschwingungsimpedanz, Verträglichkeitspegel, Papierfabrik

Abstract

This master thesis deals with harmonic analysis in the industrial network of a paper and pulp mill. One objective of this work is the acquisition of individual harmonic voltage levels and the THD values of significant connection points. The results are verified for compliance with the limits in the prescribed standards. Furthermore, the change of the THD value is investigated for two variants of island network operation. Another objective is the analysis of the harmonic emission at the transfer point to the public grid (PCC) according to a method of the CIGRE/CIREC JWG C4.109.

These objectives are implemented by performing an on-site measurement in the industrial network and a subsequent evaluation of the measured data. The measurements are carried out at the transfer point to the public grid (PCC) and at two plant-internal connection points (SS1 and SS2). The required short-circuit power and harmonic impedances are obtained by means of network calculations.

All investigated harmonic voltage levels and THD values are below the specified limits in the designated standards. In both variants of island network operation, the THD value at SS1 and SS2 increases to approximately the same extent as the short-circuit power decreases at these measuring points. At the measuring point PCC, the change in THD value is more dependent on the switching state and the harmonic sources that are effective as a result. When analysing the harmonic emission, the individual components of the measured current phasor at PCC must be taken into account, otherwise no successful statement can be made with regard to the harmonics in the industrial network. It should be noted that the harmonics from different installations in the public network may have different angles than the harmonics in the industrial network. Thus, a superposition of these components can lead to a reduction or increase of the harmonic emission at the measuring point.

Keywords: harmonic analysis, industrial network, harmonics, power quality, harmonic emission, total harmonic distortion, THD, harmonic impedance, compatibility level, paper mill

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------|--|
| A/D-Wandler | Analog-Digital-Wandler |
| AC | Alternating Current - Wechselstrom |
| B6 | Brückenschaltung mit sechs Dioden |
| CENELEC | Comité Européen de Normalisation Électrotechnique - Europäische Komitee für elektrotechnische Normung |
| DC | Direct Current - Gleichstrom |
| DFT | Diskrete Fourier-Transformation |
| DT | Dampfturbine |
| EMC | Electromagnetic Compability - Elektromagnetische Verträglichkeit |
| EMV | Elektromagnetische Verträglichkeit |
| EN | Europäische Norm |
| ESB | Ersatzschaltbild |
| FFT | Fast Fourier Transform - schnelle Fourier-Transformation |
| GB | Gigabyte |
| IDFT | Inverse Diskrete Fourier-Transformation |
| IEAN | Institut für Elektrische Anlagen und Netze |
| IEC | International Electrotechnical Commission - Internationale Elektrotechnische Kommission |
| IEV | International Electrotechnical Vocabulary - Internationale Elektrotechnische Wörterbuch |
| IPC | In-plant Point of Coupling - Anlageninterner Anschlusspunkt |
| JWG | Joint Working Group - Gemeinsame Arbeitsgruppe |
| KA | Kraftanlage, Bezeichnung der 10,5-kV-Anlage des Industrienetzes |
| OS | Oberschwingung |
| OVE | Österreichischer Verband für Elektrotechnik (früher ÖVE) |
| PCC | Point of Common Coupling - Verknüpfungspunkt |
| PM8 | Papiermaschine 8 |

| | |
|----------|--|
| POC | Point of Connection - Anschlusspunkt |
| POE | Point of Evaluation - Bewertungspunkt |
| RB4 | Recovery Boiler 4, Laugenverbrennungskessel |
| RT | Regeltransformator |
| SS1, SS2 | Sammelschiene 1, Sammelschiene 2 |
| THD | Total Harmonic Distortion - Oberschwingungs-Gesamtverzerrung |
| TR | Technical Report - Technischer Bericht |
| TU Graz | Technische Universität Graz |

Symbole

| | |
|----------------------------------|---|
| Δf | Frequenzauflösung |
| $\underline{a}, \underline{a}^2$ | Einheitszeiger |
| A_0 | Koeffizient zur Beschreibung des Gleichanteiles eines Signales |
| A_h, B_h | Fourier-Koeffizienten der h -ten Oberschwingung |
| \underline{C}_h | Komplexer Fourier-Koeffizient der h -ten Oberschwingung |
| D | Verzerrungsleistung |
| \underline{E}_{h0} | Zeiger der Hintergrund-Oberschwingungsspannung der h -ten Oberschwingung, Hintergrund-Emissionspegel |
| \underline{E}_{hc} | Emissionspegel der Oberschwingungsspannung der h -ten Oberschwingung |
| f | Frequenz |
| f_1 | Grundschwingungsfrequenz |
| f_A | Abtastfrequenz |
| h | Ordnungszahl der Oberschwingung |
| \underline{I}_h | Zeiger des Oberschwingungsstromes der h -ten Oberschwingung, Emissionspegel des Oberschwingungsstromes der betrachteten Anlage |
| \underline{I}_h' | Erster Term von \underline{I}_h |
| \underline{I}_h'' | Zweiter Term von \underline{I}_h |
| \underline{I}_{hc} | Oberschwingungsquellen (der h -ten Oberschwingung) in der betrachteten Anlage |
| j | Imaginäre Einheit |
| N | Blocklänge, Anzahl der Abtastwerte |
| n | Nummer der Abtastwerte |
| p | Pulszahl |
| P | Wirkleistung |
| Q | Blindleistung |
| S | Scheinleistung |
| S_k'' | Kurzschlussleistung |

| | |
|--|---|
| S_{rG} | Bemessungsscheinleistung des Generators |
| S_{rT} | Bemessungsscheinleistung des Transformators |
| t | Zeit |
| $\underline{T}, \underline{T}_s$ | Transformationsmatrix, Index „s“ für symmetrische Komponenten |
| T_1 | Periodendauer der Grundschiwingung |
| T_A | Abtastintervall |
| THD_u | THD-Wert der Spannung |
| T_w | Fensterlänge |
| U_1 | Spannung der Grundschiwingung |
| U_h | Spannung der h -ten Oberschiwingung |
| u_h | relative Oberschiwingung, Oberschiwingungs-Verhältnis |
| \underline{U}_h | Zeiger der Oberschiwingungsspannung der h -ten Oberschiwingung |
| $\hat{U}_{L1}, \hat{U}_{L2}, \hat{U}_{L3}$ | Spitzenwert der Leiter-Erde-Spannung |
| U_n | Nennspannung |
| $x(t)$ | Eingangssignal, analoges Signal |
| $\underline{x}, \underline{x}_s$ | Vektor für verschiedene Größen (Strom, Spannung, ...), Index „s“ für symmetrische Komponenten |
| $X[h]$ | DFT-Spektrum, Spektralfunktion |
| $x[n]$ | zeitdiskrete Funktion/Signal, Folge der Abtastwerte |
| $\underline{X}_0, \underline{X}_1, \underline{X}_2$ | Größe für das Null-, Mit- und Gegensystem |
| x_d'' | Subtransiente Reaktanz in pu |
| $\underline{X}_{L1}, \underline{X}_{L2}, \underline{X}_{L3}$ | Größen für das Drehstromsystem |
| \underline{Z}_h | komplexe OS-Impedanz des Netzes (der h -ten Oberschiwingung) |
| \underline{Z}_{hc} | komplexe OS-Impedanz der betrachteten Anlage (der h -ten Oberschiwingung) |
| ϕ_h, ϕ_{hc} | Winkel der OS-Impedanz \underline{Z}_h und \underline{Z}_{hc} |
| ω | Elektrische Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Allgemeines | 3 |
| 2.1 | Oberschwingungen | 3 |
| 2.1.1 | Allgemeines zu Oberschwingungen | 3 |
| 2.1.2 | Symmetrische Komponenten und Oberschwingungen | 5 |
| 2.1.3 | Ursachen von Oberschwingungen | 7 |
| 2.1.4 | Auswirkungen von Oberschwingungen | 9 |
| 2.2 | Diskrete Fourier-Transformation | 11 |
| 2.3 | Oberschwingungsimpedanz | 13 |
| 2.4 | Begriffe und Definitionen | 14 |
| 2.5 | Relevante Normen hinsichtlich Oberschwingungen | 16 |
| 2.5.1 | EN 50160 | 16 |
| 2.5.2 | Normenreihe EN 61000 | 17 |
| 2.6 | Beurteilung von Oberschwingungsemissionen | 22 |
| 2.6.1 | Allgemeine Richtlinien zur Beurteilung von Emissionspegeln | 22 |
| 2.6.2 | Definition des Oberschwingungs-Emissionspegels | 23 |
| 3 | Industrienetz | 27 |
| 3.1 | Papier- und Zellstoffwerk Mondi Frantschach GmbH | 27 |
| 3.2 | Netzstruktur des Industrienetzes | 28 |
| 3.2.1 | Allgemeine Beschreibung | 28 |
| 3.2.2 | Eigenerzeugung | 29 |
| 3.2.3 | Oberschwingungserzeuger im Industrienetz | 29 |
| 3.2.4 | Betriebszustände | 30 |
| 3.3 | Kurzschlussleistungen | 32 |
| 3.4 | Oberschwingungsimpedanz | 34 |
| 3.5 | Oberschwingungsmessungen im Industrienetz | 36 |
| 3.5.1 | Messkonzept | 36 |
| 3.5.2 | Auswahl der Messpunkte und Messdauer | 40 |
| 3.5.3 | Ungenauigkeiten in der Messkette und sonstige Anmerkungen | 43 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.5.4 | Auswertung der Messungen..... | 44 |
| 4 | Oberschwingungs-Spannungspegel | 46 |
| 4.1 | Wochenweise Untersuchung der OS-Spannungspegel..... | 46 |
| 4.1.1 | Allgemeines | 46 |
| 4.1.2 | Verwendete Normen für den Vergleich der Ergebnisse..... | 46 |
| 4.1.3 | Oberschwingungs-Spannungspegel | 48 |
| 4.1.4 | Oberschwingungs-Gesamtverzerrung | 52 |
| 4.1.5 | Zusammenfassung und Erkenntnisse..... | 54 |
| 4.2 | Detaillergebnisse für unterschiedliche Betriebszustände | 55 |
| 4.2.1 | Allgemeines | 55 |
| 4.2.2 | Betriebszustände | 55 |
| 4.2.3 | Oberschwingungs-Gesamtverzerrung | 58 |
| 4.2.4 | Zusammenfassung und Erkenntnisse..... | 62 |
| 5 | Analyse der Oberschwingungsemission | 63 |
| 5.1 | Allgemeines | 63 |
| 5.2 | Betriebszustand | 68 |
| 5.3 | Tabellen der gemessenen und berechneten Oberschwingungen | 69 |
| 5.3.1 | Tabellen zur Auswertung der 5. Oberschwingung..... | 69 |
| 5.3.2 | Tabellen zur Auswertung der 11. Oberschwingung..... | 69 |
| 5.4 | Berechnungsbeispiel..... | 70 |
| 5.4.1 | Berechnung von E_{hc} | 70 |
| 5.4.2 | Berechnung von E_{h0} | 70 |
| 5.4.3 | Berechnung von I_{hc} | 70 |
| 5.4.4 | Berechnung der Komponenten I_h' und I_h'' | 71 |
| 5.5 | Ergebnisse der 5. Oberschwingung..... | 72 |
| 5.6 | Ergebnisse der 11. Oberschwingung..... | 74 |
| 5.7 | Zusammenfassung und Erkenntnisse..... | 76 |
| 6 | Zusammenfassung und Schlussfolgerung | 78 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 81 |

8 Anhang 84

1 Einleitung

Das Thema „Spannungsqualität“ ist ein wichtiger Bestandteil der Versorgungsqualität von elektrischen Netzen und wird durch die folgenden Parameter beschrieben [1], [2]:

- Spannungshöhe, langsame Spannungsänderungen
- Kurze und lange Versorgungsunterbrechungen
- Spannungseinbrüche
- Spannungsunsymmetrie
- Spannungsform (**Oberschwingungen**, Zwischenharmonische, Signalspannungen)
- Frequenz
- Transiente und netzfrequente Überspannungen
- Schnelle Spannungsänderungen, Flicker

Die Spannungsqualität wird sowohl von Einflüssen in der Erzeugung und Übertragung als auch von Netzurückwirkungen durch Kundenanlagen beeinflusst. Eine unzureichende Spannungsqualität kann unter Umständen zu Beschädigungen von Betriebsmitteln und dadurch zu hohen Kosten für Energieversorgungsunternehmen und Kunden führen. In Industrieanlagen, wie z. B. in der Papier- oder Halbleiterindustrie, entstehen dadurch hohe Kosten durch Produktionsausfälle, Wiederanlaufkosten und weitere Zusatzkosten [1].

Diese Masterarbeit handelt grundsätzlich von dem Spannungsqualitätsparameter „**Oberschwingungen**“. Oberschwingungen in elektrischen Netzen können aufgrund der zusätzlichen thermischen Belastung der Betriebsmittel zu einer Erhöhung der Verluste und in weiterer Folge zur Verkürzung der Lebensdauer dieser Betriebsmittel führen. Sie können aber auch zu Fehlfunktionen oder Ausfällen von Betriebsmitteln führen. Durch die ständige Erweiterung und der stärkeren Auslastung von Industrienetzen verändert sich auch die Oberschwingungsbelastung (positiv oder negativ). Die Kenntnis der aktuellen Oberschwingungen an der Übergabestelle zum öffentlichen Netz und innerhalb eines Industrienetzes ist daher meist nicht gegeben. Für Oberschwingungen, aber auch für andere Spannungsqualitätsparameter, wurden Vorschriften und Normen geschaffen, in denen u. a. Grenzwerte und Messverfahren festgelegt sind. Die Vorgabe und Einhaltung von Grenzwerten sind notwendig, um eine zufriedenstellende Spannungsqualität erzielen zu können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Oberschwingungsuntersuchungen im Industrienetz des Papier- und Zellstoffwerkes Mondi Frantschach GmbH. Das Industrienetz umfasst mittelspannungsseitig eine 10,5-kV- und eine 20-kV-Anlage, wo sowohl große Verbraucher- als auch Erzeugeranlagen angeschlossen sind. Im Werk befinden sich Verbraucher, die einen hohen Anteil an Stromrichter aufweisen. Stromrichteranlagen und die damit verbundene Leistungselektronik zählen zu den bedeutendsten Oberschwingungsverursachern und können sich negativ auf die Spannungsqualität auswirken. Da das Industrienetz im Laufe der Jahre immer wieder erweitert oder erneuert wurde und die aktuelle Situation bzgl. Oberschwingungen nicht bekannt ist, soll eine Oberschwingungsanalyse durchgeführt werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Messung und Auswertung von Oberschwingungs-Spannungspegeln und der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung von relevanten Anschlusspunkten. Die Ergebnisse der Oberschwingungs-Spannungspegel und der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung werden anschließend auf Einhaltung der festgelegten Grenzwerte in den dafür vorgesehenen Normen überprüft. Die untersuchten Messpunkte sind die Übergabestelle zum öffentlichen Netz (PCC) sowie zwei anlageninterne Anschlusspunkte (SS1 und SS2) des Industrienetzes. Des Weiteren wird die Änderung der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung an diesen Messpunkten für unterschiedliche Betriebszustände untersucht. Durch unterschiedliche Schaltzustände im Industrienetz verändert sich die Kurzschlussleistung an den Messpunkten. Die in dieser Arbeit untersuchten Betriebszustände sind zwei mögliche Varianten des Inselnetzbetriebes (10,5-kV-Inselnetz und 20-kV-Inselnetz). Ein weiteres Ziel ist die Analyse der Oberschwingungsemission an der Übergabestelle zum öffentlichen Netz. Dabei wird eine bereits vorgestellte Methode (CIGRE/CIREN JWG C4.109 [3]) auf gemessene und berechnete Werte angewendet und anschließend die Ergebnisse analysiert.

Im Industrienetz werden zunächst Vor-Ort-Messungen mit einer Beobachtungsdauer von zwei Wochen durchgeführt. Des Weiteren erfolgt eine Erhebung des Werksnetzes mit Hilfe der Netzberechnungssoftware PowerFactory von DlgSILENT. Dadurch können die Oberschwingungsimpedanz und die Kurzschlussleistungen an den untersuchten Messpunkten berechnet werden. Die Auswertungen erfolgen hauptsächlich mit der Entwicklungsumgebung MATLAB.

Gliederung dieser Masterarbeit:

- Kapitel 2 beinhaltet den allgemeinen Teil mit den wichtigsten Themen für die Oberschwingungen, Diskrete Fourier-Transformation, Begriffe und Definitionen, relevante Normen hinsichtlich Oberschwingungen und die Beurteilung von Oberschwingungsemissionen.
- In Kapitel 3 wird das Industrienetz erläutert, wo zuerst das Papier- und Zellstoffwerk vorgestellt und dann auf die Netzstruktur des Mittelspannungsnetzes eingegangen wird. Es werden außerdem die Oberschwingungsmessungen im Industrienetz sowie die Auswertung der Messdaten beschrieben.
- Kapitel 4 ist in zwei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden die Ergebnisse der Oberschwingungs-Spannungspegel und der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung an den ausgewählten Messpunkten präsentiert. Im zweiten Teil werden die Detailergebnisse für unterschiedliche Betriebszustände gezeigt.
- In Kapitel 5 erfolgt eine Analyse der Oberschwingungsemission in Anlehnung an die Methode von CIGRE/CIREN JWG C4.109 [3].
- Die Arbeit wird mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse sowie den damit verbundenen Schlussfolgerungen in Kapitel 6 abgeschlossen.

2 Allgemeines

Dieses Kapitel beinhaltet den allgemeinen Teil dieser Arbeit und bietet einen Einblick in die Materie der Oberschwingungen. Es wird zunächst erläutert, was Oberschwingungen sind, wo diese verursacht werden und welche Auswirkungen sie auf das elektrische Netz und dessen Betriebsmittel haben. Anschließend folgt eine Einführung in das Thema der diskreten Fourier-Transformation (DFT), welche ein wichtiges Werkzeug für die Auswertung von Oberschwingungen ist. Des Weiteren werden die Begriffe und Definitionen sowie die für diese Arbeit relevanten Normen hinsichtlich Oberschwingungen beschrieben. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Beurteilung von Oberschwingungsemissionen.

2.1 Oberschwingungen

2.1.1 Allgemeines zu Oberschwingungen

[1], [4], [5], [6], [7]

Die Netzspannung in Energieversorgungsnetzen sollte idealerweise eine reine sinusförmige Signalform aufweisen, jedoch kommt es aufgrund von Rückwirkungen zu einer Verzerrung und infolgedessen zu einer Abweichung von der Sinusform. Die Grundschwingung wird dabei durch sinusförmige Signale überlagert, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches von der Grundfrequenz ist. Diese überlagerten Signale werden als (harmonische) „Oberschwingungen“ bezeichnet. In der Praxis entstehen Rückwirkungen u. a. durch den vermehrten Einsatz von nicht linearen Verbrauchern, leistungselektronischen Einrichtungen und weiteren Ursachen, welche im Abschnitt 2.1.3 näher erläutert werden.

Jedes nichtsinusförmige Signal kann durch eine Aufsummierung von sinusförmigen Signalen zusammengesetzt werden (Fourier-Synthese). Umgekehrt kann jedes nichtsinusförmige Signal in einzelne sinusförmige Funktionen zerlegt werden (Fourier-Analyse). Diese Methode hat der französische Mathematiker Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) bereits im Jahre 1822 vorgestellt, welche demzufolge als Fourier-Transformation bezeichnet wird.

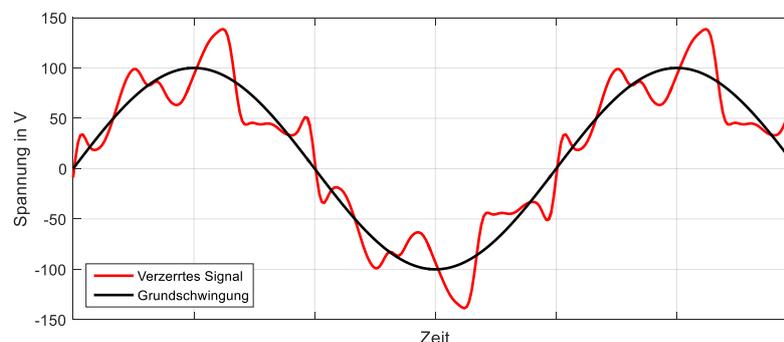


Abbildung 2.1: Beispiel eines stark verzerrten Signales

Abbildung 2.1 zeigt beispielsweise ein stark verzerrtes Signal, welches in eine Grundschwingung und mehrere Oberschwingungen zerlegt werden kann. Die Zerlegung des verzerrten Signals aus Abbildung 2.1 lässt sich anhand eines Spektrums darstellen (siehe Abbildung 2.2). In Oberschwingungsanalysen werden solche Spektren häufig zur Darstellung von Oberschwingungsanteilen eines verzerrten Signales eingesetzt.

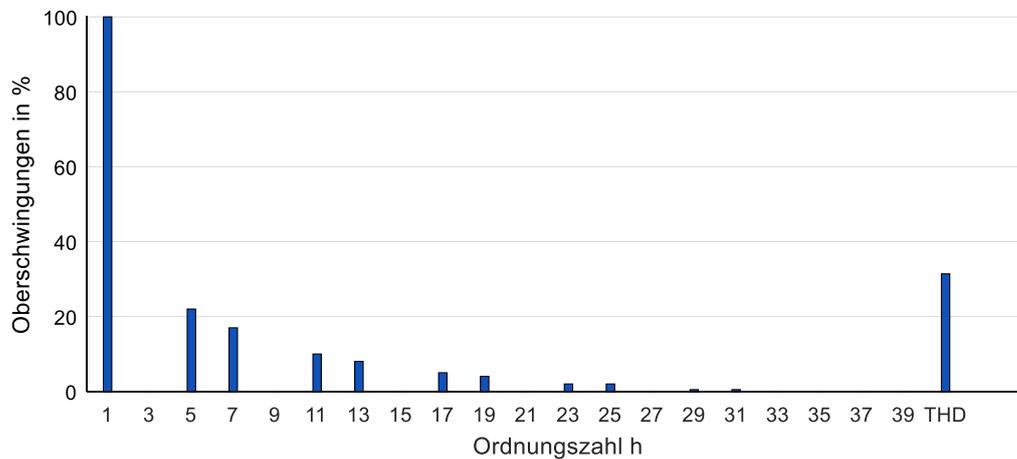


Abbildung 2.2: Oberschwingungsspektrum des verzerrten Signales

Allgemein lässt sich jede periodische Funktion $f(t)$ als eine Fourier-Reihe darstellen. Sie ist definiert als die unendliche Summe von trigonometrischen Funktionen (Sinus und Kosinus) mit der Grundschwingungsfrequenz $\omega_1 = 2\pi f_1$ und ganzzahligen Vielfachen davon.

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} A_h \cos(h \cdot \omega_1 t) + B_h \sin(h \cdot \omega_1 t) \quad (2-1)$$

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} \underline{C}_h e^{-j\omega_1 t} \quad (2-2)$$

Die Formel (2-1) ist als Fourier-Reihe in trigonometrischer Form und die Formel (2-2) als komplexe Fourier-Reihe dargestellt. A_h und B_h sind die Fourier-Koeffizienten bzw. \underline{C}_h die komplexen Fourier-Koeffizienten, wobei es sich um Scheitelwerte und nicht um Effektivwerte handelt. A_0 ist der überlagerte Gleichanteil, der das Signal lediglich entlang der vertikalen Achse verschiebt. Das ganzzahlige Verhältnis einer Oberschwingungsfrequenz f_h zur Grundfrequenz f_1 wird als Oberschwingungsordnung oder auch Ordnungszahl h bezeichnet (siehe Formel (2-3)). In den verschiedenen Literaturquellen wird die Ordnungszahl durch unterschiedliche Indizes (z. B. k , n oder v) gekennzeichnet. In dieser Arbeit wird für die Ordnungszahl der Buchstabe h verwendet.

$$h = \frac{\omega_h}{\omega_1} = \frac{f_h}{f_1} \quad (2-3)$$

Liegt beim Signal $f(t)$ eine Symmetrie zur Abszisse (Zeitachse bzw. Nulllinie) vor, so besteht das dazugehörige Spektrum ausschließlich aus Spektralkomponenten mit ungerader Ordnungszahl. Da diese Symmetrieeigenschaft im Allgemeinen für Spannung und Strom gegeben ist, sind Oberschwingungen mit gerader Ordnungszahl kaum enthalten. Bei Drehstromsystemen treten daher in den Strom- und Spannungsspektren hauptsächlich Spektralkomponenten mit ungerader Ordnungszahl auf.

In manchen Fällen können auch Signalanteile mit nicht ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz auftreten, die als „Zwischenharmonische“ definiert werden. Darüber hinaus werden Signalanteile mit Frequenzen unterhalb der Grundfrequenz als „Subharmonische“ bezeichnet. Der Vollständigkeit halber sollen auch Signale mit höherfrequenten Anteilen bis zu 150 kHz (so genannte „Supraharmonische“) erwähnt werden, welche aber nicht Teil dieser Arbeit sind.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit wird die Netzfrequenz ($f_1 = 50$ Hz) als Grundschiebungsfrequenz eingesetzt. In dieser Arbeit werden die Oberschwingungen in einem Frequenzbereich von 0 Hz bis 2000 Hz (40. Oberschwingung) untersucht.

2.1.2 Symmetrische Komponenten und Oberschwingungen

[1], [8], [9], [10]

Eine der wichtigsten Modaltransformationen in der elektrischen Energietechnik ist die Methode der „Symmetrischen Komponenten“, die auf Charles LeGeyt Fortescue (1876-1936) zurück geht. Ein großer Vorteil dieser Methode ist die vollständige Entkopplung der Systeme und somit eine Vereinfachung der mathematischen Beschreibung von Drehstromnetzen. Ein Drehstromsystem lässt sich demnach in ein Mit-, Gegen- und Nullsystem, welche als symmetrische Komponenten bezeichnet werden, aufteilen.

In den Formeln (2-4) bis (2-6) sind die Transformationsbeziehungen allgemein beschrieben. An der Stelle des \underline{x} können die Größen für Strom, Spannung, Leistung usw. eingesetzt werden.

Symmetrierung:

$$\underline{x}_S = \underline{T}_S^{-1} \cdot \underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{X}_1 \\ \underline{X}_2 \\ \underline{X}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{X}_{L1} \\ \underline{X}_{L2} \\ \underline{X}_{L3} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Entsymmetrierung:

$$\underline{x} = \underline{T}_S \cdot \underline{x}_S = \begin{bmatrix} \underline{X}_{L1} \\ \underline{X}_{L2} \\ \underline{X}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{X}_1 \\ \underline{X}_2 \\ \underline{X}_0 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Einheitszeiger:

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (2-6)$$

In Formel (2-4) werden die Drehstromgrößen (L1, L2, L3) in das System der symmetrischen Komponenten (1, 2, 0) durch eine Multiplikation mit der Matrix \underline{I}_s^{-1} transformiert. Durch die Formel (2-5) erfolgt mit Hilfe der Matrix \underline{I}_s eine Rücktransformation von den symmetrischen Komponenten zu den Drehstromgrößen.

Oberschwingungen in Drehstromsystemen können, gleich wie die Grundschiwingung, in symmetrische Komponenten aufgeteilt werden. Tabelle 2.1 zeigt den Zusammenhang von Oberschwingungen mit symmetrischen Komponenten, wobei diese Besonderheiten nur bei symmetrischen Spannungsverhältnissen in Drehstromsystemen gelten. Das ist der Fall, wenn die Spannungen in allen drei Phasen die gleiche Kurvenform aufweisen und die Phasenverschiebung zwischen den Grundschiwingungen der Spannungen exakt 120° beträgt.

Tabelle 2.1: Mit-, Gegen- und Nullsystem von Oberschwingungen (gilt nur im Idealfall)

| Symmetrische Komponenten | Mitsystem | Gegensystem | Nullsystem |
|--------------------------------------|-----------|-------------|------------|
| Ordnungszahl $h = 1, 2, 3, \dots$ | 1 | 2 | 3 |
| | 4 | 5 | 6 |
| | 7 | 8 | 9 |
| | 10 | 11 | 12 |
| | ... | ... | ... |
| | $3h-2$ | $3h-1$ | $3h$ |

Oberschwingungen im Mitsystem haben eine zum Drehstromsystem identische Phasenfolge. Im Gegensystem ist die Phasenfolge gegenläufig zum Drehstromsystem. Beim Nullsystem ist die Phasenverschiebung hingegen null. Nullsysteme können in den verketteten Spannungen nicht auftreten und in den meisten Fällen ist eine Übertragung in andere Spannungsebenen aufgrund der Schaltgruppe der Transformatoren und der Sternpunktbehandlung nicht möglich.

In der Praxis sind die oben genannten Symmetrieeigenschaften nicht immer realisierbar und daher setzen sich Oberschwingungen meistens aus Mit-, Gegen- und Nullsystem zusammen. Aufgrund dieser Tatsache können sich auch Teile der durch 3 teilbaren Oberschwingungen in andere Netzebenen ausbreiten.

2.1.3 Ursachen von Oberschwingungen

[1], [5], [6], [7], [11], [12], [13]

Das Vorhandensein von Oberschwingungen in elektrischen Energiesystemen ist keine Neuheit. In den letzten Jahrzehnten hat sich jedoch die Anzahl und Typenvielfalt von Oberschwingungserzeugern geändert.

Die Hauptursache von Oberschwingungen ist die nichtsinusförmige Stromaufnahme von Verbrauchern (oder allgemein Netzelementen) bei sinusförmiger Spannung. Die Oberschwingungsströme fließen durch die vorhandenen Netzimpedanzen und erzeugen dadurch Oberschwingungsspannungen, welche sich über das gesamte Netz ausbreiten können.

Zu den wesentlichen Oberschwingungserzeugern zählen u. a. Transformatoren, Generatoren und Motoren, Lichtbogenöfen und -schweißanlagen sowie die Betriebsmittel der weitverbreiteten Leistungselektronik. Neben der Stahl-, Papier- und Textilindustrie, wo immer mehr effiziente Frequenzumrichter zum Einsatz kommen, zählen auch Betriebsmittel in Geschäfts- und Wohnhäusern zu Oberschwingungserzeugern, wenn man die Summe aller beeinflussenden Einzellasten berücksichtigt.

Nachfolgend werden einige Quellen von Oberschwingungen kurz beschrieben.

2.1.3.1 Transformatoren

Der Eisenkern von Transformatoren weist eine nichtlineare Magnetisierungskennlinie auf, besonders im Sättigungsbereich. Dort führt nämlich bereits eine kleine Spannungsänderung zu einer großen Stromänderung. Es kann zum erhöhten Oberschwingungsgehalt von Strom und Spannung kommen. Durch eine Vormagnetisierung des Eisenkernes kann es zu einer Verschiebung der Magnetisierungskennlinie und dadurch zu unsymmetrischen Eigenschaften kommen. Die Vormagnetisierung geschieht u. a. beim Einschalten von Transformatoren im Leerlauf (Rusheffekt) oder durch geomagnetisch induzierte Ströme. Transformatoren sind im Normalbetrieb keine bedeutenden Oberschwingungsquellen, können jedoch im Sättigungsbereich erkenntliche Oberschwingungen erzeugen. Daher sollten Transformatoren ausreichend dimensioniert und nicht dauerhaft in Überlast betrieben werden.

2.1.3.2 Generatoren und Motoren

Synchrongeneratoren können aufgrund der Nutung im Ständer und Läufer sowie der nicht exakt sinusförmigen Flussverteilungen Oberschwingungen erzeugen. Es kommt zu einer geringen Abweichung von der idealen Sinusform. Durch eine sinnvolle Konstruktion der Maschine, wie die Schrägung der Läuferfuten gegen die Ständerfuten (etwa um eine Nutteilung) oder eine Minimierung der Nutöffnungen, kann eine annähernd ideale sinusförmige Kurvenform erreicht werden. Im Normalbetrieb sind Generatoren keine bedeutenden Oberschwingungsquellen, im Fehlerfall kann sich der Oberschwingungsgehalt aufgrund von Sättigungserscheinungen aber erhöhen.

2.1.3.3 Lichtbogenöfen und -schweißanlagen

Lichtbogenöfen weisen eine nichtlineare Strom-Spannungs-Charakteristik (Lichtbogencharakteristik) auf und können dadurch Oberschwingungen verursachen. Durch die verschiedenen Phasen von Lichtbogenöfen, sowie die stochastischen Änderungen der Lichtbogenlänge ist ein breites Oberschwingungsspektrum bis 1 kHz möglich. Es können neben ganzzahligen Oberschwingungen auch Zwischenharmonische auftreten.

2.1.3.4 Leistungselektronik, Stromrichteranlagen

Stromrichteranlagen und die damit verbundene Leistungselektronik zählen zu den bedeutendsten Oberschwingungsquellen und sind sowohl in der Industrie als auch im Haushalt weit verbreitet.

Schaltnetzteile werden verwendet, um aus einer Eingangs-Wechselspannung eine geregelte Ausgangs-Gleichspannung bereitzustellen. Sie finden heutzutage in nahezu jeder Sparte ihre Anwendung, vor allem bei moderneren Elektrogeräten. AC-seitig nehmen diese Netzteile in jeder Halbwelle der Netzfrequenz einen pulsformigen Strom auf. Der DC-seitige Kondensator wird nur dann aufgeladen, wenn die Versorgungsspannung den Pegel der Gleichspannung überschreitet. Die Dauer der Stromimpulse ist stark abhängig von der Größe des Gleichstromes, der Glättungskapazität und eventuell vorhandenen Drosseln. Das aus dem verzerrten Signal resultierende Oberschwingungsspektrum ist bedeutend abhängig von der Glättung des Gleichstromes bzw. der Gleichspannung. Diese Massengeräte mit DC-Versorgung zeigen durch ihre hohe Verbreitung – als Summe der Einzellasten in einem gemeinsamen Verknüpfungspunkt – eine große Wirkung.

In Drehstromsystemen werden Gleichrichterschaltungen verwendet, um einen Dreiphasenwechselstrom in einen Gleichstrom umzuwandeln. Es kommt dabei die dreiphasige oder auch Sechspuls-Brückenschaltung (B6-Schaltung) zur Anwendung. Die Sechspuls-Brückenschaltung erzeugt im Strom ein Oberschwingungsspektrum mit den Ordnungszahlen $6n \pm 1$ (5, 7, 11, 13, 17, 19 usw.). Das Oberschwingungsspektrum hängt vor allem von der Pulszahl p ab, wobei die Ordnungszahlen mit der Formel (2-7) allgemein berechnet werden können.

$$h = n \cdot p \pm 1 \quad \text{mit } n = 1, 2, 3 \dots \quad (2-7)$$

Beim Einsatz einer Zwölfpuls-Brückenschaltung können Oberschwingungen reduziert werden. Die Zwölfpuls-Brückenschaltung kommt zustande, in dem zwei Sechspuls-Brückenschaltungen wechselstromseitig so parallel geschaltet werden, dass sie untereinander eine Phasenverschiebung von 30° aufweisen. Dies kann erreicht werden, wenn eine Sekundärseite in Yy -Schaltung und die andere in Yd -Schaltung ausgeführt ist. Für diese Ausführung werden oft Dreiwicklungs-Transformatoren verwendet. Die Phasendrehung führt zur teilweisen Aufhebung der Oberschwingungen, sodass lediglich Oberschwingungen der Ordnung $12n \pm 1$ (11, 13, 23, 25 usw.) verbleiben.

2.1.4 Auswirkungen von Oberschwingungen

[1], [6], [11], [12]

Oberschwingungen können sowohl das Versorgungsnetz als auch die Betriebsmittel innerhalb einer Anlage (z. B. Kundenanlage) negativ beeinflussen. Dadurch ergibt sich eine große Anzahl an Auswirkungen, die in diesem Abschnitt erwähnt werden.

Oberschwingungen können kurz- oder langzeitige Folgen nach sich ziehen. Kurzzeitige Auswirkungen von Oberschwingungen zeigen sich als Fehlfunktionen oder sogar Ausfälle von elektrischen Betriebsmitteln, wohingegen langzeitige Auswirkungen zusätzliche thermische und mechanische Belastungen der Betriebsmittel zur Folge haben. Eine Temperaturerhöhung in den elektrischen Betriebsmitteln (Kabel, Transformatoren, Motoren, ...) verursacht nicht nur Verluste, sondern hat auch eine bedeutende Verkürzung der Lebensdauer dieser Betriebsmittel zur Folge.

Nachfolgend werden, ohne eine Bedeutung der Reihenfolge, einige mögliche Auswirkungen von Oberschwingungen aufgezählt [1], [6]:

- Thermische Belastung von Transformatoren
- Thermische und mechanische Belastung von Motoren
- Thermische Belastung von Kompensationseinrichtungen
- Überlastung von Neutralleitern
- Anstieg der maximalen Versorgungsspannung aufgrund von Oberschwingungen
- Beeinflussung von Schutzeinrichtungen (Fehlauslösung, Nulldurchgangsstörungen)
- Verringerung der Löschfähigkeit bei Erdschlusslöschung
- Beeinflussung von Rundsteueranlagen
- Beeinflussung von Kommunikationssystemen (Fernmeldeeinrichtungen)
- Flicker durch Zwischenharmonische
- Fehlmessungen durch Induktionszähler
- Fehlerhafter Betrieb oder Ausfall von IT-Anlagen einschließlich Datenverluste
- Fehlinterpretation digitaler Signale durch Störungen aufgrund von Oberschwingungen

Bei verzerrten Signalen (Strom oder Spannung) gibt es auch eine Auswirkung auf die Leistungsdefinition, die sich von der allgemeinen Definition für sinusförmige Größen unterscheidet. Eine zur Blindleistung Q und Wirkleistung P orthogonal stehende Komponente kann definiert werden, nämlich die Verzerrungsleistung D . Die Scheinleistung ergibt sich durch die geometrische Addition von Wirk-, Blind- und Verzerrungsleistung (Formel (2-8)). Das Vorzeichen der Verzerrungsleistung D ist unbestimmt, bei gleicher Kurvenform von Strom und Spannung verschwindet diese Komponente [1], [11].

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2-8)$$

Diese Ansicht der Leistungsdefinition geht auf Constantin Budeanu (1886-1959) zurück. Weitere interessante Ansichten zur Leistungsbewertung mit verzerrten Signalen sind u. a. in [11] zusammengefasst.

Die Auswirkungen von Oberschwingungen können mit Hilfe von verschiedenen Kenngrößen bewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Kenngrößen „Oberschwingungs-Gesamtverzerrung“ und „Oberschwingungs-Verhältnis“ zur Bewertung von Oberschwingungen verwendet [1], [6], [2], [14].

Oberschwingungs-Gesamtverzerrung THD (Total Harmonic Distortion)

Die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung (oder auch Oberschwingungsgehalt) ist definiert als das Verhältnis des Effektivwertes aller Oberschwingungen (bis zu einer bestimmten Ordnung h_{\max}) zum Effektivwert der Grundschwingung. Der sogenannte „THD-Wert“ der Spannung THD_u wird anhand der Formel (2-9) ausgedrückt. Für alle Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird der THD-Wert bis zur 40. Oberschwingungsordnung ermittelt ($h_{\max} = 40$). Dies wird z. B. auch in den Normen [2] und [14] empfohlen.

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (2-9)$$

Oberschwingungs-Verhältnis (harmonic ratio)

Das Oberschwingungsverhältnis (auch relative Oberschwingung) ist der prozentuelle Anteil einer Oberschwingung bezogen auf den Anteil der Grundschwingung. Das h -te Oberschwingungs-Verhältnis einer Spannung wird mit Hilfe von Formel (2-10) ausgedrückt.

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\% \quad (2-10)$$

Die Ausdrücke in den Formeln (2-9) und (2-10) können auch auf den Strom angewendet werden. Um die Auswirkungen von Oberschwingungen möglichst gering halten zu können, wurden Grenzwerte für Oberschwingungen (Spannungen und Ströme) in den entsprechenden Normen definiert. Die für diese Arbeit relevanten Normen werden in Kapitel 2.5 beschrieben.

2.2 Diskrete Fourier-Transformation

Die in diesem Kapitel erläuterten Zusammenhänge wurden hauptsächlich aus folgender Literatur entnommen: [4], [15], [16]

Zu einem besseren Verständnis der zeitdiskreten Signalverarbeitung und der schnellen Fourier-Transformation (FFT) wird u. a. die einschlägige Fachliteratur [17] und [18] empfohlen.

In der digitalen Signalverarbeitung ist die Diskrete Fourier-Transformation (DFT) eines der wichtigsten Werkzeuge. Im Jahre 1965 wurde durch Cooley und Tukey ein effizienter Rechenalgorithmus vorgestellt, welcher als die schnelle Fourier-Transformation (FFT) bekannt ist. Die FFT ist, wie der Name schon sagt, eine effizient implementierte Form der DFT, welche aber mit weniger Rechenoperationen auskommt. Mit Hilfe der DFT (bzw. FFT) können Spektralkomponenten von zeitdiskreten periodischen Signalen bestimmt werden und daher ist sie in einer Oberschwingungsanalyse unverzichtbar [4], [16].

Ein analoges Signal $x(t)$ wird im Zeitabstand mit dem Abtastintervall T_A abgetastet. Es entsteht eine Folge der Abtastwerte bzw. das zeitdiskrete Signal $x[n]$ im Ausdruck (2-11). Die Abtastfrequenz f_A ist laut Beziehung (2-12) definiert.

$$x[n] = x(t = n \cdot T_A) \quad (2-11)$$

$$f_A = \frac{1}{T_A} \quad (2-12)$$

Die DFT transformiert eine zeitdiskrete und periodisch fortgesetzte Folge $x[n]$ der Länge N in ein diskretes periodisches Frequenzspektrum $X[h]$. Das Transformationspaar wird durch die Gleichungen (2-13) und (2-14) ausgedrückt. Die sogenannte Blocktransformation ordnet N Signalelemente im Zeitbereich genau N Signalelementen im Frequenzbereich zu. N ist die Blocklänge bzw. die Anzahl der Abtastwerte im Zeitfenster, n ist die Nummer der Abtastwerte und h ist die Nummer der Spektrallinien (bzw. die Ordnungszahl) [15], [16].

Die DFT ist wie folgt definiert:

$$X[h] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi n}{N}h} \quad h = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (2-13)$$

Umgekehrt lautet die (rücktransformierte) inverse DFT (IDFT):

$$x[n] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{h=0}^{N-1} X[h] e^{j\frac{2\pi n}{N}h} \quad n = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (2-14)$$

Das Signal in Formel (2-13) wird nur während eines bestimmten Zeitfensters (window) betrachtet, wobei das Zeitfenster eine Länge von $T_w = N \cdot T_A$ Sekunden hat. Es wird außerdem vorausgesetzt, dass sich das Signal außerhalb dieses Zeitfensters periodisch fortsetzt. Damit die DFT das korrekte Spektrum liefert, muss die Fensterlänge T_w gleich einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer T_1 (Grundschwingungsperiode des Eingangssignals) sein, siehe Bedingung (2-15). Die Frequenzauflösung Δf , also der Abstand zweier Frequenzpunkte, entspricht der Beziehung in Formel (2-16). Die komplexe Spektralfunktion $X[h]$ besitzt daher ausschließlich diskrete Werte in gleichen Abständen [4], [15].

$$T_w = k \cdot T_1 \quad k = 1, 2, 3 \dots \quad (2-15)$$

$$\Delta f = \frac{f_A}{N} = \frac{1}{N \cdot T_A} = \frac{1}{T_w} \quad (2-16)$$

Bei der Abtastung von analogen Signalen muss das Abtasttheorem von C. E. Shannon (oder auch Nyquist-Theorem) beachtet werden. Eine kontinuierliche Funktion kann aus ihren Abtastwerten eindeutig rekonstruiert werden, wenn die Fourier-Transformierte nur Frequenzkomponenten enthält, die kleiner als die halbe Abtastfrequenz sind. Die Abtastfrequenz f_A muss mehr als doppelt so hoch sein wie die höchste vorkommende Frequenz des abgetasteten Signals. Je höher die Abtastfrequenz ist, desto höher ist der Abstand zwischen den Teilspektren. Bei Verletzung des Abtasttheorems kann es zu einer Überlappung der Teilspektren (Aliasing) kommen, wodurch das Spektrum verfälscht wird. Durch den Einsatz von Anti-Aliasing-Filter und Tiefpassfilter höherer Ordnung kann der Aliasing-Effekt vermieden werden [4], [15].

Wird die Bedingung in (2-15) nicht eingehalten, kann es zum sogenannten Leckeffekt (leakage effect) kommen. Beim Leckeffekt können neue Frequenzkomponenten entstehen, die im ursprünglichen Signal nie vorhanden waren. Die Ursache sind Unstetigkeitsstellen, die bei der periodischen Fortsetzung des Zeitsignals entstehen. Die Komponente einer Frequenz kann in die Nähe einer anderen Komponente „auslaufen“. Durch die Auswahl von unterschiedlichen Fensterfunktionen können die Fehler, die beim Leckeffekt entstehen, abgeschwächt werden. Dabei werden die Abtastwerte mit einer Fensterfunktion gewichtet, um die Unstetigkeitsstellen zu umgehen. Es existiert eine große Anzahl an Fensterfunktionen, die für die verschiedensten Problemstellungen angewendet werden können. Auf die einzelnen Fensterfunktionen soll hier aber nicht mehr näher eingegangen werden [1], [15], [17].

2.3 Oberschwingungsimpedanz

Die Oberschwingungsimpedanz ist eine frequenzabhängige Impedanz, die von einem bestimmten Punkt aus in Richtung Netz oder in Richtung Verbraucher betrachtet wird. Sie ist u. a. abhängig von der Netzstruktur, der aktuellen Kurzschlussleistung und den aktuellen Schaltzuständen im Netz. Die korrekte Nachbildung von Netzwerkelementen (Leitungen, Transformatoren, Lasten, Synchrongenerator usw.) ist bei der Ermittlung der Oberschwingungsimpedanz essentiell. Es müssen zum Beispiel die Leitungskapazitäten berücksichtigt werden, um ein vernünftiges Ergebnis zu erzielen. Existieren Resonanzstellen (Parallel- oder Serienresonanz), ist es sinnvoll, den Skin-Effekt und den Proximity-Effekt mitzuberücksichtigen [1], [19].

Die Nachbildung von Betriebsmitteln sowie die Bestimmung der Oberschwingungsimpedanz sind in der Literatur [19] und [20] ausführlich beschrieben.

2.4 Begriffe und Definitionen

In diesem Abschnitt werden einige wichtige Begriffe und Definitionen erläutert. Die Formulierungen wurden unverändert aus dem internationalen elektrotechnischen Wörterbuch (International Electrotechnical Vocabulary, IEV) bzw. aus den entsprechenden Normen übernommen. Die entnommenen Formulierungen wurden daher kursiv und unter Anführungszeichen geschrieben.

Elektromagnetische Verträglichkeit EMV – electromagnetic compatibility EMC

„Fähigkeit einer Einrichtung oder eines Systems, in ihrer/seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend zu funktionieren, ohne unzulässige elektromagnetische Störungen in dieser Umgebung zu verursachen.“ (IEV 161-01-07) [21]

Elektromagnetische Störgröße – electromagnetic disturbance

„Elektromagnetische Erscheinung, die die Funktion eines Geräts, einer Ausrüstung oder eines Systems beeinträchtigen oder lebende oder tote Materie ungünstig beeinflussen kann.“ (IEV 161-01-05) [21]

Pegel (einer zeitabhängigen Größe) – level (of a time varying quantity)

„Wert einer Größe, wie z. B. einer Leistung oder einer Feldgröße, die in einer bestimmten Weise während eines bestimmten Zeitintervalls gemessen und/oder ausgewertet wird.“ (IEV 161-03-01) [21]

Störfestigkeit (gegenüber einer Störgröße) – immunity (to a disturbance)

„Fähigkeit eines Geräts, einer Anlage oder eines Systems, in Gegenwart einer elektromagnetischen Störgröße ohne Beeinträchtigung der Funktion zu funktionieren.“ (IEV 161-01-20) [21]

Elektromagnetischer Verträglichkeitspegel – (electromagnetic) compatibility level

„Festgelegter elektromagnetischer Störpegel, der als Bezugspegel zur Koordination bei der Festlegung von Emissions- und Störfestigkeitsebenen verwendet wird.“ (IEV 161-03-10) [21]

Planungspegel – planning levels

„Pegel einer bestimmten Störgröße in einer besonderen Umgebung, der als Bezugswert bei der Festlegung von Grenzwerten für die Aussendung von großen Lasten und Anlagen (Netzen, Installationen) verwendet wird, um diese Grenzwerte mit allen für die Einrichtung, deren Anschluss an das Elektrizitätsversorgungsnetz vorgesehen ist, angenommenen Grenzwerten zu koordinieren.“ (EN 61000-2-4) [22]

Elektromagnetische Emission – electromagnetic emission

„Phänomen, bei dem elektromagnetische Energie von einer elektromagnetischen Störquelle ausgeht.“ (IEV 161-01-08) [21]

Emissionspegel (für eine Störquelle) - emission level (of a disturbing source)

„Pegel einer bestimmten elektromagnetischen Störung, die von einem bestimmten Gerät, einer Anlage oder einem System ausgesendet wird.“ (IEV 161-03-11) [21]

Emissionsgrenzwert (für eine Störquelle) – emission limit (from a disturbing source)

„Festgelegter maximaler Emissionspegel einer elektromagnetischen Störquelle.“ (IEV 161-03-12) [21]

Anlageninterner Anschlusspunkt – in-plant point of coupling IPC

„(Anschluss-)Punkt innerhalb eines Stromversorgungsnetzes oder einer Anlage (Installation), der elektrisch einem speziellen Verbraucher am nächsten liegt und an den andere Verbraucher angeschlossen sind oder sein können.“ (EN 61000-2-4) [22]

Verknüpfungspunkt – point of common coupling PCC

„Punkt in einem Stromversorgungsnetz, der elektrisch einem bestimmten Verbraucher am nächsten liegt und an den andere Verbraucher angeschlossen sind oder sein können.“ (IEV 161-07-15) [21]

Anschlusspunkt – point of connection POC

„Punkt in einem öffentlichen Stromversorgungsnetz, an dem die betrachtete Anlage angeschlossen ist oder angeschlossen werden kann.“ (IEC/TR 61000-3-6) [23]

Bewertungspunkt – point of evaluation POE

„Punkt in einem öffentlichen Stromversorgungsnetz, an dem die Emissionspegel einer bestimmten Anlage anhand der Emissionsgrenzwerte zu beurteilen sind. Dieser Punkt kann der Verknüpfungspunkt (PCC) oder der Anschlusspunkt (POC) oder jeder andere vom Netzbetreiber oder -eigentümer festgelegte oder vereinbarte Punkt sein.“ (IEC/TR 61000-3-6) [23]

2.5 Relevante Normen hinsichtlich Oberschwingungen

In den folgenden Unterkapiteln werden die für diese Masterarbeit relevanten Normen hinsichtlich Oberschwingungen beschrieben.

2.5.1 EN 50160

[6], [2]

ÖVE/ÖNORM EN 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen

Die Europanorm „EN 50160“ definiert, beschreibt und spezifiziert die wesentlichen Qualitätsmerkmale der Versorgungsspannung in öffentlichen Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetzen unter normalen Betriebsbedingungen. Die Versorgungsspannung ist als Produkt anzusehen, wobei essentielle Merkmale und Grenzwerte durch die Norm vorgegeben sind. Der Versorger garantiert den Kunden dadurch eine Mindestqualität der Versorgungsspannung an beliebigen Übergabestellen in öffentlichen Elektrizitätsnetzen. Dabei muss beachtet werden, dass die vorgegebenen Grenzen nur im normalen Betriebszustand eingehalten werden können. Bei von den normalen Betriebsbedingungen abweichenden Betriebszuständen, z. B. vorübergehenden Versorgungsmaßnahmen, Störungen und Ausnahmesituationen, gilt diese Norm nicht.

Wesentliche Kennwerte sind Frequenz, Spannungshöhe, Kurvenform und Symmetrie der Leiterspannungen. Die Norm gliedert die Merkmale der Spannung in „andauernde Phänomene“ und „Spannungseignisse“. Andauernde Phänomene sind Abweichungen vom Nennwert, die dauerhaft auftreten. Sie entstehen größtenteils aufgrund von Lastmustern, Laständerungen oder nichtlinearen Lasten. Bei Spannungseignissen handelt es sich um plötzliche und erhebliche Abweichungen vom Nennwert bzw. von der gewünschten Kurvenform. Die Ursachen sind vor allem unvorhersehbare Ereignisse (z. B. Fehler an Betriebsmitteln) oder äußere Einwirkungen.

Andauernde Phänomene:

- Netzfrequenz
- Langsame Spannungsänderungen, Spannungshöhe
- Schnelle Spannungsänderungen, Flicker
- Unsymmetrie der Versorgungsspannung
- **Oberschwingungsspannung**
- Zwischenharmonische Spannung
- Netz-Signalübertragungsspannungen auf der Versorgungsspannung

Spannungseignisse:

- Unterbrechungen der Versorgungsspannung
- Einbrüche und Überhöhungen der Versorgungsspannung
- Transiente Überspannungen

In Mittelspannungsnetzen werden Oberschwingungsspannungen unter normalen Betriebsbedingungen während eines beliebigen Wochenintervalls definiert. Dabei gelten die folgenden Anforderungen:

- Es müssen 95 % der 10-Minuten-Mittelwerte des Spannungseffektivwertes jeder einzelnen Oberschwingung kleiner oder gleich der festgelegten Grenzwerte sein (siehe Tabelle A - 1 und Abbildung A - 1).
- Die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung der Versorgungsspannung (THD_u) muss kleiner oder gleich 8 % sein. Dabei wird der THD -Wert aus allen Oberschwingungen bis zur 40. Ordnung gebildet.

Die Werte in Tabelle A - 1 sind nicht dafür vorgesehen, als Werte für elektromagnetische Verträglichkeit oder als Grenzwerte für Störaussendungen verwendet zu werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen an einer Übergabestelle zum öffentlichen Versorgungsnetz durchgeführt und anschließend die Oberschwingungs-Spannungspegel wochenweise ausgewertet. Die Ergebnisse werden u. a. mit den festgelegten Werten der Norm EN 50160 verglichen.

2.5.2 Normenreihe EN 61000

Die weltweit führende Organisation für die Ausarbeitung und Veröffentlichung internationaler Standards im elektrotechnischen Bereich ist die IEC (International Electrotechnical Commission) mit Sitz in Genf. Die IEC hat eine Reihe von Normen mit der Bezeichnung elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) definiert, welche als IEC 61000 bekannt sind [24].

Bevor mit der Beschreibung der weiteren Normen fortgefahren wird, erfolgt ein kurzer Überblick über die Normenreihe IEC 61000, welche nach Tabelle 2.2 strukturiert und veröffentlicht ist [25].

Tabelle 2.2: Struktur der Normenreihe IEC 61000-x-x

| | | |
|------------------|--|--|
| 61000-1-x | Allgemeines | Allgemeine Betrachtungen Definitionen, Begriffe |
| 61000-2-x | Umgebung | Umgebungsbeschreibung Einteilung der Umgebung in Klassen Verträglichkeitspegel |
| 61000-3-x | Grenzwerte | Grenzwerte der Störaussendung und Störfestigkeit |
| 61000-4-x | Prüf- und Messverfahren | Messverfahren Prüfverfahren |
| 61000-5-x | Installationsrichtlinien und Abhilfemaßnahmen | Installationsrichtlinien Abhilfemaßnahmen und Geräte |
| 61000-6-x | Fachgrundnormen | |
| 61000-9-x | Verschiedenes | |

Die meisten Normen der Reihe IEC 61000 wurden von CENELEC als Europannorm (EN) in die Reihe EN 61000 übernommen.

2.5.2.1 EN 61000-2-4

[22]

ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-4 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 2-4: Umgebungsbedingungen – Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen

Diese Norm beschäftigt sich mit leitungsgeführten Störgrößen (im Frequenzbereich von 0 kHz bis 9 kHz) und beinhaltet zahlenmäßige Verträglichkeitspegel für industrielle und nicht-öffentliche Stromversorgungsnetze mit Nennspannungen bis 35 kV (50 Hz oder 60 Hz). Die Verträglichkeitspegel werden für jeden anlageninternen Anschlusspunkt (IPC) festgelegt, wo elektromagnetische Störgrößen auftreten können. Sie dienen als Richtlinie für die Festlegung von Grenzwerten für die Störemission und für die Auswahl von Störfestigkeitspegeln für Geräte innerhalb dieser Anlagen.

Es werden folgende Störphänomene behandelt:

- Abweichungen der Spannung
- Spannungseinbrüche und Kurzzeitunterbrechungen der Versorgungsspannung
- Spannungsunsymmetrie
- **Oberschwingungen bis zur 50. Ordnung**
- Zwischenharmonische bis zur 50. Ordnung
- Spannungsanteile bei höheren Frequenzen (oberhalb der 50. Ordnung)
- Gleichanteile
- Transiente Überspannungen

Die Verträglichkeitspegel werden für drei verschiedenen elektromagnetische Umgebungsklassen angegeben, welche durch die Eigenschaften des Stromversorgungsnetzes bestimmt werden (siehe Tabelle 2.3).

Tabelle 2.3: Elektromagnetische Umgebungsklassen, Beschreibung und Beispiele; Die Informationen wurden aus der Norm EN 61000-2-4 [22] zusammengefasst.

| Klassen | Beschreibung | Beispiele |
|------------------|---|--|
| Klasse 1: | gilt für geschützte Versorgungen und bezieht sich auf den Betrieb von sehr empfindlich auf Störgrößen reagierende Betriebsmittel; Verträglichkeitspegel sind kleiner als Pegel für öffentliche Netze; | - elektrische Ausrüstung von technischen Laboratorien, - bestimmte Automatisierungs- und Schutzrichtungen, - Datenverarbeitungseinrichtungen, - USV, Filter, ... - i. A. Niederspannungsgeräte |
| Klasse 2: | gilt allgemein für Verknüpfungspunkte mit dem öffentlichen Netz (PCC) und für anlageninterne Anschlusspunkte (IPC); Verträglichkeitspegel sind i. A. identisch mit denjenigen für öffentliche Netze; | - Komponenten, die für den Betrieb am öffentlichen Netz entwickelt wurden |
| Klasse 3: | gilt nur für anlageninterne Anschlusspunkte (IPC) in industriellen Umgebungen; Verträglichkeitspegel sind für einige Störgrößen höher als diejenigen der Klasse 2; | - Hauptteil der Last wird durch Stromrichter gespeist, - Schweißmaschinen sind vorhanden, - große Motoren werden häufig gestartet, - Lasten schwanken sehr schnell |

Die einzelnen Grenzwerte für die jeweiligen Klassen sind direkt aus der Norm EN 61000-2-4 oder aus den Tabellen im Anhang (Tabelle A - 2 bis Tabelle A - 5) zu entnehmen. Für die Grenzwerte der Klassen 2 und 3 sind diese in Abbildung A - 1 grafisch dargestellt.

Die angegebenen Verträglichkeitspegel beziehen sich auf quasi-stationäre und nicht veränderliche Oberschwingungen und dienen als Bezugswerte sowohl für Langzeitwirkungen als auch für kurzzeitige Wirkungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen an einem anlageninternen Anschlusspunkt (IPC) durchgeführt und die Oberschwingungs-Spannungspegel mit den Verträglichkeitspegeln dieser Norm verglichen.

2.5.2.2 EN 61000-2-12

[26]

ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-12 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 2-12: Umgebungsbedingungen – Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Mittelspannungsnetzen

Diese Norm befasst sich, ähnlich wie die vorher beschriebene Norm EN 61000-2-4, mit Verträglichkeitspegeln für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen. In dieser Norm wird der Frequenzbereich, speziell für Netz-Signalübertragungssysteme, auf 148,5 kHz erweitert. Die Verträglichkeitspegel gelten für Mittelspannungsnetze mit einer Nennspannung von 1 kV bis 35 kV (50 Hz oder 60 Hz). Die Verträglichkeitspegel werden für öffentliche Mittelspannungs-Energieversorgungsnetze festgelegt, wo elektromagnetische Störgrößen auftreten können. Sie dienen u. a. als Richtlinie für die Festlegung von Grenzwerten für die Störemission in öffentliche Niederspannungs-Energieversorgungsnetze und für festzulegende Störfestigkeitseinstufungen für Geräte in diesen Netzen.

Es werden folgende Störphänomene behandelt:

- Spannungsschwankungen und Flicker
- Spannungseinbrüche und Kurzzeitunterbrechungen der Versorgungsspannung
- Spannungsunsymmetrie
- **Oberschwingungen bis zur 50. Ordnung**
- Zwischenharmonische bis zur 50. Ordnung
- Spannungsverzerrungen bei höheren Frequenzen (oberhalb der 50. Ordnung)
- Gleichanteile
- Transiente Überspannungen
- Netz-Signalübertragung

Die festgelegten Verträglichkeitspegel gelten

- am Verknüpfungspunkt von privaten Anlagen, in denen Geräte und Einrichtungen direkt oder über Transformatoren angeschlossen sind, oder
- an Mittelspannungsanschlüssen von Schaltstationen, welche öffentliche Niederspannungs-Energieversorgungsnetze speisen.

Die in dieser Norm festgelegten Verträglichkeitspegel für einzelne Oberschwingungsanteile der Spannung unterscheiden sich nicht von den Verträglichkeitspegeln, die in der Norm EN 61000-2-4 für die Klasse 2 definiert wurden (siehe Abbildung A - 1). In Tabelle A - 6 im Anhang sind diese Grenzwerte aufgelistet.

Wie bereits im Unterkapitel 2.5.1 erwähnt, wurden Messungen an einer Übergabestelle zum öffentlichen Versorgungsnetz durchgeführt. Die ausgewerteten Oberschwingungs-Spannungspegel werden mit den Verträglichkeitspegeln dieser Norm sowie der Norm EN 50160 verglichen.

2.5.2.3 EN 61000-4-7

[14]

ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-7 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-7: Prüf- und Messverfahren – Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten

Die Norm EN 61000-4-7 befasst sich mit Geräten zur Messung von spektralen Anteilen bis zu einem Frequenzbereich von 9 kHz, wobei zwischen Oberschwingungen, Zwischenharmonischen und Anteilen oberhalb des Frequenzbereichs bis 9 kHz unterschieden wird. Es werden Anforderungen für Messgeräte festgelegt, die zur Prüfung einzelner Geräte auf Übereinstimmung mit Störaussendungsgrenzwerten (sind in bestimmten Normen festgelegt) vorgesehen sind. Die Messgeräte beruhen auf der diskreten Fourier-Transformation und sind in der Lage, Oberschwingungen bis zur 50. Ordnung messen.

Die Norm beinhaltet u. a. grundsätzliche Konzepte, Genauigkeitsklassen von Messeinrichtungen, Genauigkeitsanforderungen und den grundsätzlichen Aufbau von Messgeräten. Es wird zum Beispiel vorgeschrieben, dass die Fensterbreite, über die die DFT durchgeführt werden soll, 10 Grundschwingungsperioden (für 50-Hz-Netze: $10 \times T_1 \approx 200$ ms) mit rechteckiger Gewichtung betragen und auf die Grundfrequenz des betrachteten Netzes synchronisiert sein muss.

2.5.2.4 EN 61000-4-30

[25]

ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-30 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-30: Prüf- und Messverfahren – Verfahren zur Messung der Spannungsqualität

In dieser Norm werden Verfahren für die Messung von Spannungsqualitätsparametern sowie für die Interpretation der Ergebnisse dieser Messungen festgelegt. Sie behandelt grundsätzlich die Verfahren für Messungen am Betriebsort. Darüber hinaus bietet diese Norm im Anhang einen Leitfaden für Anwendungen an.

In Bezug auf Oberschwingungen verweist diese Norm hauptsächlich auf die Norm EN 61000-4-7. Ein für diese Arbeit wichtiger Punkt ist u. a. die Aufrechnung von Messungen über Zeitintervalle. Es muss zum Beispiel ein 10-Minuten-Intervall aus 10-Perioden-Intervallen (für 50 Hz) aufgerechnet werden, wobei eine Mindestbeobachtungsdauer von einer Woche empfohlen wird.

2.6 Beurteilung von Oberschwingungsemissionen

Die Beurteilung von Oberschwingungsemissionen wird in Anlehnung an den technischen Bericht von IEC/TR 61000-3-6 [23] und der technischen Broschüre von CIGRE/CIREC JWG C4.109 [3] beschrieben.

Der technische Bericht von IEC enthält Richtlinien für den Anschluss von störenden Anlagen an öffentliche Mittel- und Hochspannungsnetze. Eine störende Anlage wird darin als eine Anlage beschrieben, die Oberschwingungen (und/oder Zwischenharmonische) erzeugt. Dies kann entweder eine Verbraucher- oder eine Erzeugeranlage sein. Dieser Bericht bietet Richtlinien für die Koordinierung der Oberschwingungsspannungen zwischen verschiedenen Spannungsebenen, um die Verträglichkeitspegel am Verknüpfungspunkt zu erfüllen [23].

Die technische Broschüre von CIGRE/CIREC befasst sich hauptsächlich mit den Erfahrungen bei der Anwendung von Richtlinien zur Emissionsbewertung. Dabei wird überprüft, ob die tatsächlichen Störaussendungspegel einer bestimmten Anlage die nach IEC/TR 61000-3-6 festgelegten Grenzwerte einhalten. Die Erfahrungen werden überprüft und in dieser Broschüre ausgearbeitet [3].

Nachfolgend werden die für diese Arbeit relevanten Abschnitte aus [23] und [3] zusammengefasst.

2.6.1 Allgemeine Richtlinien zur Beurteilung von Emissionspegeln

Die Beurteilung der Emissionspegel von störenden Anlagen erfolgt am Bewertungspunkt (point of evaluation – POE), der als Punkt definiert ist, an dem die Emissionspegel einer bestimmten Anlage auf Einhaltung der Emissionsgrenzwerte beurteilt werden. Dieser Punkt kann zum Beispiel der Anschlusspunkt (point of connection – POC) oder der Verknüpfungspunkt (point of common coupling – PCC) einer störenden Anlage sein.

Es stellt sich zunächst die Frage, ob der Störpegel tatsächlich durch die betrachtete Anlage erhöht wird oder nicht.

Im ersten Schritt muss bestimmt werden, ob der gesamte Spannungsstörpegel im Vergleich zum Zustand vor dem Anschluss („pre-connection“) verringert oder erhöht ist im Zustand nach dem Anschluss („post-connection“). Der Spannungspegel vom Zustand „pre-connection“ ist auch als Hintergrund-Störpegel bekannt.

Streng genommen muss dieser Vergleich auf statistischer Basis erfolgen. Der Störpegel muss über einen ausreichend langen Zeitraum (üblicherweise eine Woche) gemessen und die statistischen Werte für beide Zustände ermittelt werden. Für Oberschwingungen sind das dementsprechend die 95%-Quantile, gemessen auf einer 10-Minuten-Basis.

Im Falle einer Verringerung des gesamten Spannungsstörpegels wird die betrachtete Anlage als akzeptabel bewertet. Es sind darüber hinaus keine weiteren Untersuchungen erforderlich, auch wenn der gemessene Strom verzerrt ist.

Im anderen Fall, wo sich der gesamte Spannungsstörpegel erhöht, muss in einem zweiten Schritt die Emission der betrachteten Anlage ermittelt und mit den einzelnen Emissionsgrenzwerten verglichen werden.

Es ist nicht immer möglich, die betrachtete Anlage für einen bedeutenden Zeitraum herunterzufahren, um dadurch den Zustand „pre-connection“ zu beurteilen. In solchen Fällen müssen andere Ansätze verwendet werden, um in weiterer Folge abschätzen zu können, ob der Störpegel durch die betrachtete Anlage erhöht oder verringert wird.

Die Bedingungen für die Beurteilung der Emissionspegel sollten zwischen Systembetreiber oder -eigentümer und dem Kunden vereinbart werden. Der Bewertungszeitraum sollte mindestens eine Woche im Normalbetrieb betragen, inklusive Zeiträume mit einem erwarteten Maximum der Störpegel der störenden Anlage. Bei der Entwicklung von Emissionsgrenzwerten sollte die Netzstruktur Eventualitäten enthalten, die bei der Planungsphase berücksichtigt wurden.

In manchen Fällen sind die notwendigen Daten für die zuvor erwähnten Methoden nicht vorhanden. Hier müssen verschiedene Näherungswerte berücksichtigt werden. Diese Näherungen beinhalten u. a. die Verwendung von kürzeren Beobachtungszeiträumen, in denen die betrachtete Anlage nicht in Betrieb ist. Dadurch können längerfristige Bedingungen durch kurze Intervalle angenähert werden. Es können bei der Ermittlung der statistischen Werte auch mehrere kurze Intervalle miteinander kombiniert werden.

Alle Messungen, die für die Bewertung des Emissionspegels benötigt werden, müssen entsprechend der Norm EN 61000-4-30 durchgeführt werden.

2.6.2 Definition des Oberschwingungs-Emissionspegels

Für die Beurteilung der Oberschwingungsemission kann das in Abbildung 2.3 dargestellte Ersatzschaltbild verwendet werden. Dabei ist \underline{U}_h der Zeiger der Oberschwingungsspannung am Bewertungspunkt (POE), \underline{I}_h ist der Zeiger des Oberschwingungsstromes, \underline{E}_{h0} ist der Zeiger der Hintergrund-Oberschwingungsspannung, \underline{Z}_h und \underline{Z}_{hc} sind die komplexen Oberschwingungsimpedanzen des Netzes und der betrachteten Anlage und \underline{I}_{hc} sind die in der betrachteten Anlage vorhandenen Oberschwingungsquellen.

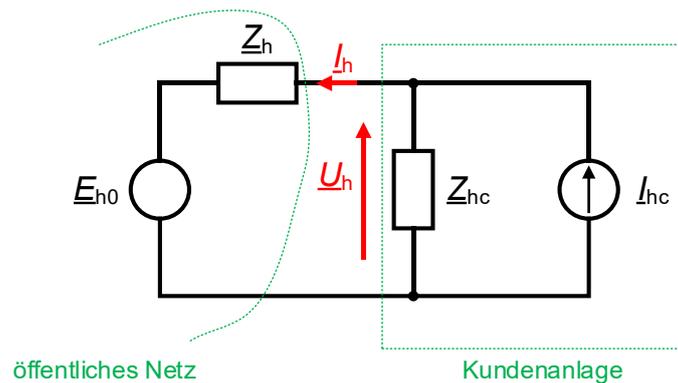


Abbildung 2.3: Ersatzschaltbild zur Definition von Oberschwingungs-Emissionspegeln
Quelle: In Anlehnung an [3]

Der Emissionspegel der Oberschwingungsspannung, der von einer Anlage am Bewertungspunkt (POE) in das öffentliche Netz wirkt, ist definiert als der Betrag von \underline{E}_{hc} bei jeder Oberschwingungsfrequenz, die von der betrachteten Anlage verursacht wird [23]. In Abbildung 2.4 wird diese Definition durch den Zeiger \underline{E}_{hc} veranschaulicht.

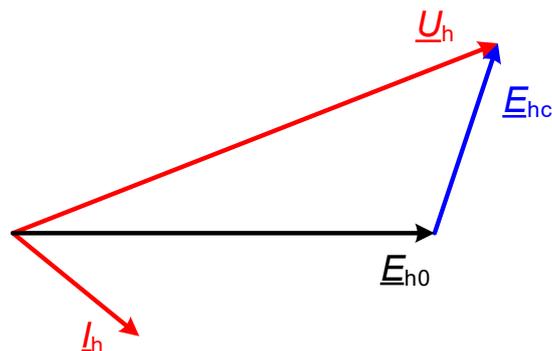


Abbildung 2.4: Definition des Oberschwingungs-Emissionspegels \underline{E}_{hc}
Quelle: In Anlehnung an [3]

Bevor die betrachtete Anlage ans (öffentliche) Versorgungsnetz angeschlossen wird, gibt es am POE nur einen Beitrag des Hintergrund-Emissionspegels \underline{E}_{h0} . Beim Anschluss der betrachteten Anlage an das Versorgungsnetz fließt der Strom I_h durch die Oberschwingungsimpedanz Z_h des Netzes. Dieser Strom ist definiert als der Emissionspegel des Oberschwingungsstromes der betrachteten Anlage [23]. Der Strom I_h lässt sich anhand von Formel (2-17) berechnen.

$$I_h = I_{hc} \frac{Z_{hc}}{Z_h + Z_{hc}} - \frac{E_{h0}}{Z_h + Z_{hc}} \quad (2-17)$$

Der erste Term in Formel (2-17) steht im Einklang mit den vorhandenen Oberschwingungsquellen in der betrachteten Anlage. Der zweite Term reflektiert die Wechselwirkung zwischen den Oberschwingungsquellen, die an beliebigen Stellen im Versorgungsnetz vorhanden sind, und der Oberschwingungsimpedanz Z_{hc} der betrachteten Anlage.

Auch bei einer betrachteten Anlage ohne Oberschwingungsquellen können durch diesen Ansatz Emissionswerte angegeben werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn in der betrachteten Anlage Kondensatorbänke vorhanden sind, die mit dem Versorgungsnetz interagieren und es infolgedessen zur Resonanz führt.

Ist der Wert für I_h bekannt, kann der Emissionspegel der Oberschwingungsspannung \underline{E}_{hc} mit Hilfe der Formel (2-18) berechnet werden.

$$\underline{E}_{hc} = \underline{Z}_h \cdot I_h = \underline{U}_h - \underline{E}_{h0} \quad (2-18)$$

Es ist deutlich zu erkennen, dass \underline{E}_{hc} abhängig von der Oberschwingungsimpedanz \underline{Z}_h des Netzes am POE ist. Die Oberschwingungsimpedanz \underline{Z}_h ist entweder bekannt oder muss berechnet werden.

Es ist anzumerken, dass die Emissionsbewertung nur dann berücksichtigt wird, wenn der resultierende Spannungszeiger \underline{U}_h einen größeren Betrag als der Hintergrund-Emissionspegel \underline{E}_{h0} aufweist. Nur in diesem Fall müssen die Emissionswerte (für den Strom oder die Spannung) mit den vorgegebenen Grenzwerten verglichen werden [23], [3].

2.6.2.1 Zusammensetzung von I_h

Wie in Formel (2-17) angegeben, setzt sich der Strom I_h aus zwei Termen zusammen. Diese Zerlegung wird in diesem Unterkapitel näher betrachtet. Als Grundlage für die Zusammensetzung des Stromes I_h wird das Überlagerungsprinzip bzw. Superpositionsprinzip herangezogen.

Befinden sich in einem linearen Netzwerk mehrere Quellen (Ursachen), die an einer Stelle im Netzwerk einen Strom oder eine Spannung (Gesamtwirkung) erzeugen, so kann gemäß dem Überlagerungsprinzip die Wirkung der einzelnen Quellen (Einzelwirkung) getrennt betrachtet und die Gesamtwirkung durch die Summe der Einzelwirkungen ermittelt werden. Alle Quellen, bis auf die betrachtete, werden als energiemäßig nicht vorhanden angesehen und somit durch ihre Innenwiderstände ersetzt (Kurzschluss für Spannungsquellen, Leerlauf für Stromquellen) [27], [28].

Für die Anwendung des Superpositionsprinzips auf den Strom I_h dient die Abbildung 2.5.

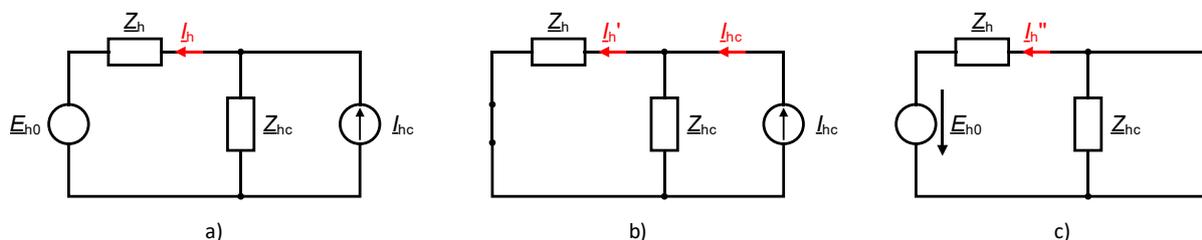


Abbildung 2.5: Ersatzschaltbilder zur Anwendung des Überlagerungsprinzips für den Strom I_h
 a) ESB aus Abbildung 2.3; b) Beitrag nur der betrachteten Anlage; c) Beitrag nur des Versorgungsnetzes

Zur Berechnung des Stromes I_h' aus b) wird die Stromteilerregel angewendet und dadurch ergibt sich das Ergebnis in Formel (2-19).

$$I_h' = I_{hc} \frac{Z_{hc}}{Z_h + Z_{hc}} \quad (2-19)$$

Der Strom I_h'' aus c) wird durch das ohmsche Gesetz ermittelt, unter Berücksichtigung der richtigen Vorzeichen. Es ergibt sich dadurch die Formel (2-20).

$$I_h'' = -\frac{E_{h0}}{Z_h + Z_{hc}} \quad (2-20)$$

Der Strom I_h wird anschließend durch die Überlagerung der beiden Ströme aus b) und c) berechnet, siehe Formel (2-21).

$$I_h = I_h' + I_h'' = I_{hc} \frac{Z_{hc}}{Z_h + Z_{hc}} - \frac{E_{h0}}{Z_h + Z_{hc}} \quad (2-21)$$

2.6.2.2 Herleitung von I_{hc}

Durch die Umformung von Formel (2-18) und Einsetzen von E_{h0} in Formel (2-17), erhält man folgenden Ausdruck für den Strom I_h :

$$I_h = I_{hc} \frac{Z_{hc}}{Z_h + Z_{hc}} - \frac{U_h - Z_h I_h}{Z_h + Z_{hc}} \quad (2-22)$$

Durch Kürzen und Umformen von Formel (2-22), erhält man einen Ausdruck für I_{hc} in Abhängigkeit des Stromes I_h , der Spannung U_h und der Oberschwingungsimpedanz Z_{hc} der betrachteten Anlage, wie in Formel (2-23) angegeben.

$$I_{hc} = I_h + \frac{U_h}{Z_{hc}} \quad (2-23)$$

Die beschriebenen Definitionen und Zusammenhänge sind wichtig für die Analyse der Oberschwingungsemission in Kapitel 5.

3 Industriernetz

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Beschreibung des betrachteten Industriernetzes. Zunächst werden das Papier- und Zellstoffwerk vorgestellt und die Netzstruktur des Werksnetzes dargelegt. Des Weiteren wird auf die Kurzschlussleistungen und Oberschwingungsimpedanzen im Industriernetz eingegangen. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit den durchgeführten Oberschwingungsmessungen im Industriernetz.

3.1 Papier- und Zellstoffwerk Mondi Frantschach GmbH

Im Folgenden wird das Papier- und Zellstoffwerk Mondi Frantschach GmbH vorgestellt, wobei die Informationen hauptsächlich aus [29], [30] und [31] entnommen wurden.

Mondi Frantschach GmbH ist ein Unternehmen der Mondi-Gruppe. Die Mondi-Gruppe ist ein international bedeutender Verpackungs- und Papierkonzern, der rund 26000 Mitarbeiter in mehr als 30 Ländern beschäftigt. Mondi Frantschach GmbH ist ein Papier- und Zellstoffwerk und zählt zu einem der führenden Hersteller von hochqualitativen Sackkraft- und Spezialkraftpapieren sowie Spezialmarktzellstoffen, die an Verpackungshersteller und Verarbeitungsbetriebe auf der ganzen Welt geliefert werden. Der Produktionsstandort befindet sich in Frantschach-St. Gertraud, einer Marktgemeinde mit rund 2600 Einwohnern im Bezirk Wolfsberg in Kärnten (Stand 1. Jänner 2020) [32]. Mondi Frantschach GmbH beschäftigt rund 450 Mitarbeiter und ist eines der größten und bedeutendsten Unternehmen in dieser Region.

Das Werk Mondi Frantschach GmbH betreibt derzeit drei Papiermaschinen sowie eine Zellstofftrocknungsanlage und produziert damit die Verpackungspapiere und den Spezialmarktzellstoff. Im Werk werden jährlich ungefähr 1,4 Millionen m³ Holz verwertet, wobei das Holz größtenteils aus den Wäldern Österreichs stammt. Der Rohstoff besteht zu einer Hälfte aus Durchforstungsholz und zur anderen Hälfte aus Sägerestholz. Über 90 % der Produkte werden weltweit in mehr als 60 Länder exportiert.

Das Thema Nachhaltigkeit ist ein integraler Bestandteil des Geschäftsmodells von der Mondi-Gruppe. Der Energieverbrauch des Papier- und Zellstoffwerkes Mondi Frantschach GmbH wird überwiegend aus erneuerbaren Energiequellen (Biomasserückstände aus Rinde und Laugenverbrennung) abgedeckt. Durch die Errichtung eines Laugenverbrennungskessels RB4 (Recovery Boiler 4) im Jahr 2012 und weitere Investitionen in die Kraftanlage kann das Werk energieautark betrieben werden. Es wird dadurch nicht nur die im Werk erforderliche Energie erzeugt, sondern auch zusätzliche Energie in Form von Wärme, welche im viertgrößten Fernwärmenetz von Kärnten benutzt wird.

3.2 Netzstruktur des Industriernetzes

In diesem Abschnitt wird das Werksnetz von Mondi Frantschach GmbH beschrieben, wobei hier nur das Mittelspannungsnetz betrachtet wird. Im Rahmen der Masterarbeit wurde die Netzberechnungssoftware PowerFactory von DIgSILENT verwendet, um das Werksnetz nachzubilden. Mit Hilfe dieser Software wurden u. a. die Kurzschlussleistungen und die Oberschwingungsimpedanzen an den Knoten berechnet.

3.2.1 Allgemeine Beschreibung

Das elektrische Industriernetz beinhaltet zwei verschiedene Mittelspannungsanlagen, die örtlich voneinander getrennt sind. Auf der einen Seite gibt es die 20-kV-Anlage, welche an das öffentliche 20-kV-Netz der KNG-Kärnten Netz GmbH angebunden ist und außerdem Teile der Rohstoffverarbeitung von Mondi Frantschach GmbH versorgt. Auf der anderen Seite gibt es die 10,5-kV-Anlage, welche über zwei Regeltransformatoren mit der 20-kV-Anlage verbunden ist. In Abbildung 3.1 ist ein vereinfachtes Schema des Industriernetzes zu sehen.

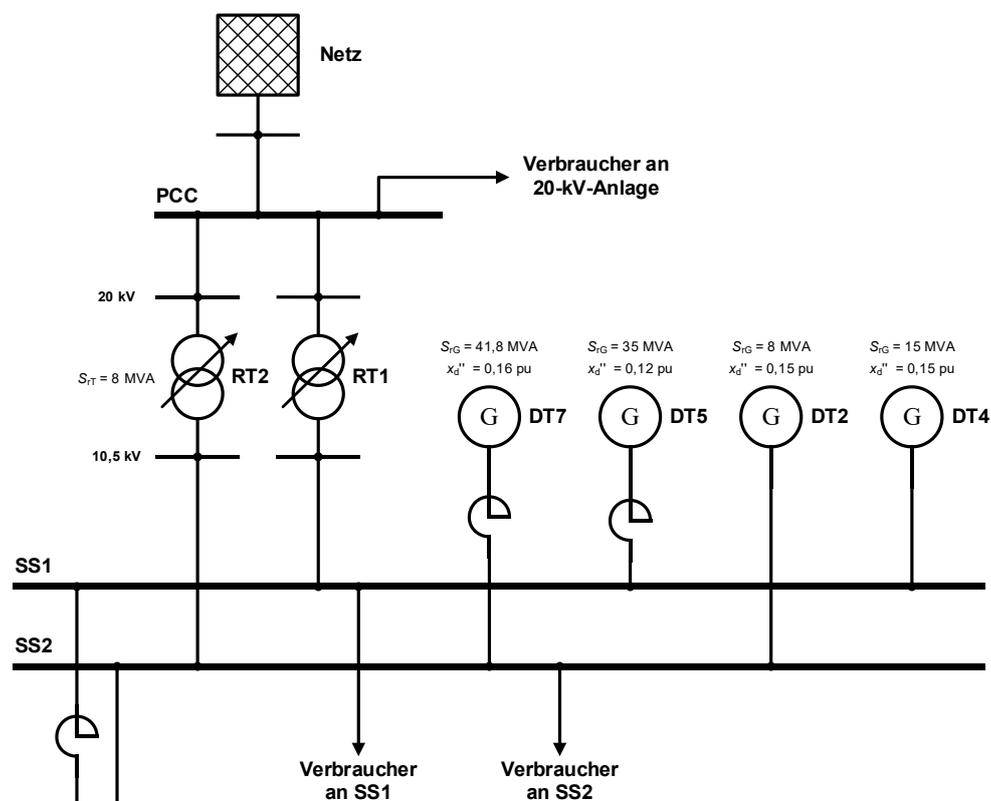


Abbildung 3.1: Vereinfachte Darstellung des Industriernetzes

Die 10,5-kV-Anlage ist eine luftisolierte Innenraum-Schaltanlage in offener Bauweise und besteht aus einem Doppelsammelschienensystem (SS1 und SS2). Sie wird in weiterer Folge oft als „Kraftanlage“ (kurz: KA) bezeichnet und ist das elektrotechnische Herzstück des Papier- und Zellstoffwerkes. An der Kraftanlage sind die Synchrongeneratoren für die Energieeinspeisung und die Verbraucher angeschlossen. Die Papier- und Zellstoffproduktion hängt daher vom einwandfreien Betrieb der Kraftanlage ab.

Die beiden Sammelschienen SS1 und SS2 der Kraftanlage können entweder starr oder über eine Drossel miteinander verbunden werden. Die starre Kupplung wird z. B. bei Lastumschaltungen von SS1 auf SS2 und umgekehrt verwendet. Im Normalbetrieb sind die beiden Sammelschienen jedoch stets über die Drosselkupplung verbunden. Die Drosselkupplung dient vor allem der Begrenzung für im Fehlerfall auftretende Kurzschlussströme.

3.2.2 Eigenerzeugung

Wie im vorigen Kapitel erwähnt, ist das Werk Mondi Frantschach GmbH in der Lage, sich selbst mit Energie aus Biomasse zu versorgen. Dafür wird die thermische Energie über Dampfturbinen in mechanische Energie umgewandelt. Die mechanische Energie wird über Synchrongeneratoren in elektrische Energie umgewandelt. Im Werksnetz (Abbildung 3.1) sind insgesamt vier Synchrongeneratoren in Betrieb, die in das 10,5-kV-Netz einspeisen. Der schwächste Generator hat eine Bemessungsscheinleistung von $S_{rG} = 8$ MVA und der stärkste Generator hat eine Bemessungsscheinleistung von $S_{rG} = 41,8$ MVA. Die vier Generatoren sind nicht immer gleichzeitig in Betrieb, wie später im Kapitel 3.3 gezeigt wird. Neben den vier beschriebenen Generatoren gibt es auch noch Dieselgeneratoren für die Notstromversorgung, welche in dieser Arbeit aber nicht betrachtet werden.

3.2.3 Oberschwingungserzeuger im Industriernetz

Abbildung 3.2 zeigt die Wirkleistungsaufnahme von zwei großen Verbrauchern des Industriernetzes während des Beobachtungszeitraumes von zwei Wochen. Dabei handelt es sich um 10-Sekunden-Momentanwerte der Wirkleistung einer Papiermaschine (PM8) und eines Laugenverbrennungskessels (RB4). Die Daten stammen aus internen Betriebsaufzeichnungen des Werkes Mondi Frantschach GmbH.

Die beiden Verbraucher haben einen hohen Anteil an Stromrichter (Sechspulsige-Brückenschaltungen etc.). Auffällig dabei ist der Zeitraum 14. Juni bis 17. Juni, wo die Wirkleistungsaufnahme der beiden Verbraucher sehr gering oder null ist. In diesem Zeitraum gab es einen Stillstand einiger großer Verbraucher, welcher eine Auswirkung auf die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung hat, wie später in Kapitel 4 gezeigt wird. Die restliche Zeit des Beobachtungszeitraumes sind die beiden Verbraucher im Normalbetrieb.

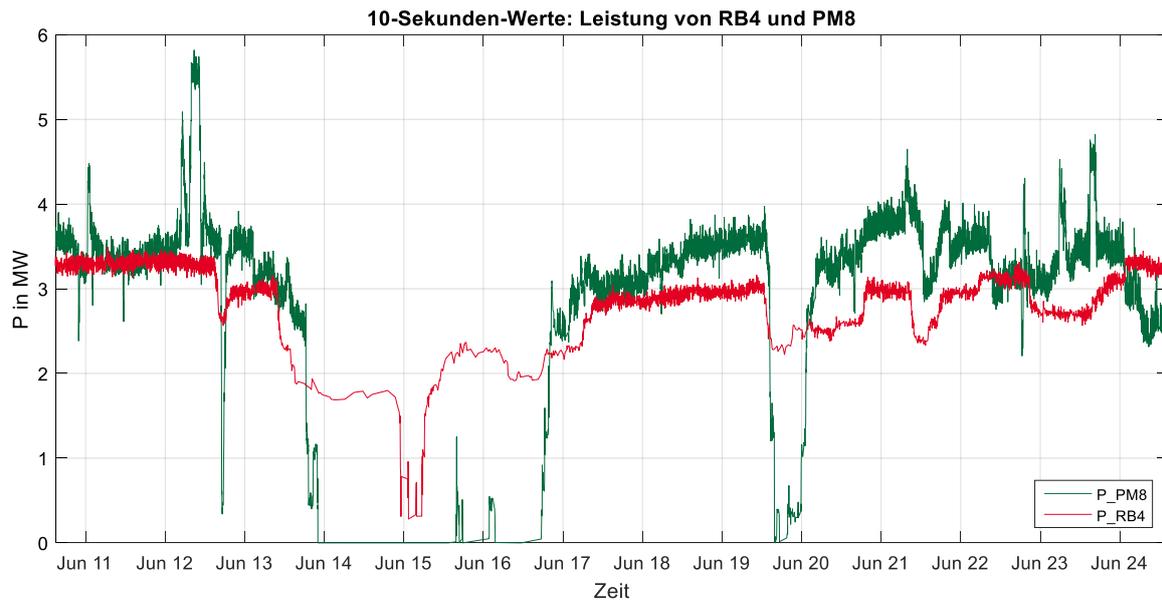


Abbildung 3.2: Wirkleistungsaufnahme der Verbraucher PM8 und RB4 während des Beobachtungszeitraumes von zwei Wochen

Im Industrienetz gibt es noch weitere Verbraucher mit einem hohen Anteil an Stromrichtern, wie z. B. eine weitere Papiermaschine oder einen Rindenkessel. Neben Lasten, die mit Stromrichter gespeist werden, gibt es direktstartende 10,5-kV-Motoren, die durch ihre Anordnung in den 10,5-kV-Hauptverteilschienen die Rückwirkungen ausreichend vermindern. An der 20-kV-Seite des Werks sind zum Teil auch Stromrichter vorhanden, aber im Vergleich zu den Verbrauchern auf der 10,5-kV-Seite ist der Oberschwingungsbeitrag verhältnismäßig klein.

3.2.4 Betriebszustände

Das Industrienetz wird hauptsächlich mit Netzanbindung betrieben, kann aber durchaus auch als Inselnetz betrieben werden. Das ist z. B. zur Vermeidung von Spannungseinbrüchen bei einem sich nähernden Gewitter in der Umgebung des Werks der Fall. Dabei wird das Werk über die interne Leitstelle in den Inselnetzbetrieb geschaltet. Für den Betrieb im Inselnetz gibt es die zwei möglichen Varianten: „20-kV-Inselnetz“ und „10,5-kV-Inselnetz“. Für den Inselnetzbetrieb wird hauptsächlich die Variante „20-kV-Inselnetz“ verwendet. Die Variante „10,5-kV-Inselnetz“ wird nur in seltenen Fällen verwendet. Die drei möglichen Betriebszustände des Werksnetzes sind in Abbildung 3.3 schematisch dargestellt.

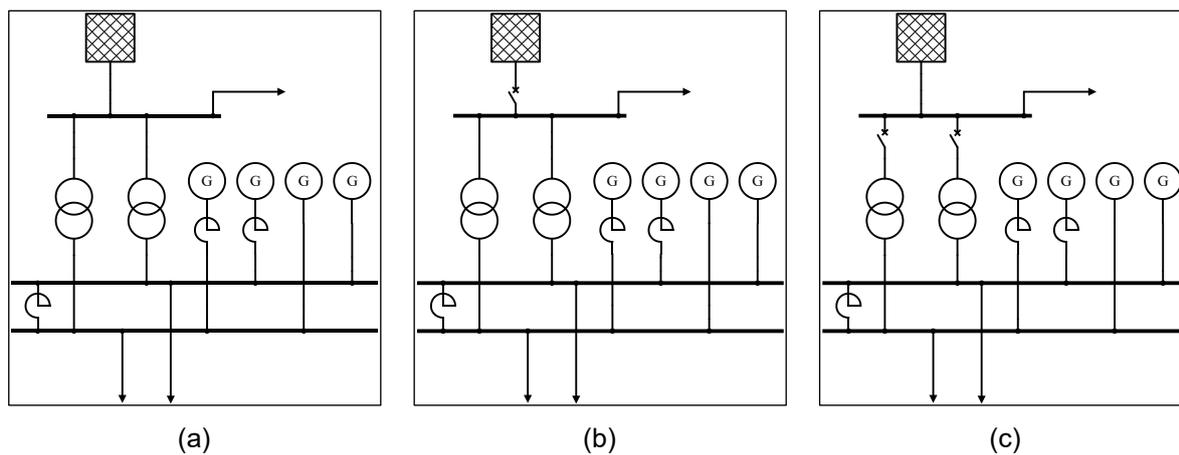


Abbildung 3.3: Vereinfachte Darstellung der Betriebszustände des Werksnetzes
 (a) Normalbetrieb mit Netzanbindung; (b) „20-kV-Inselnetz“; (c) „10,5-kV-Inselnetz“

3.3 Kurzschlussleistungen

Nachfolgend werden die für diese Arbeit relevanten Kurzschlussleistungen beschrieben.

Die Kurzschlussleistungen an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2 wurden mit Hilfe der Netzberechnungssoftware PowerFactory von DigSILENT ermittelt. Dabei ist eine korrekte Dateneingabe in das Programm essentiell, wie z. B. folgende Parameter:

- Kurzschlussleistung der Netzeinspeisung (Slackknoten)
- Leitungslängen und -typen,
- Widerstands-, Induktivitäts- und Kapazitätsbeläge der Leitungen,
- Transformator Daten,
- Daten der Synchrongeneratoren etc.

Während des zweiwöchigen Beobachtungszeitraumes gab es im Industriernetz verschiedene Betriebszustände. Es liefen nicht immer alle vier Synchrongeneratoren gleichzeitig und zudem wurde das Werksnetz auch zeitweise im Inselnetz betrieben. Die berechneten Kurzschlussleistungen an den Knoten PCC, SS1 und SS2 zu den verschiedenen Betriebszuständen sind in Tabelle 3.1 angegeben. In dieser Tabelle ist zusätzlich ersichtlich, ob das Industriernetz im Inselnetzbetrieb oder mit Anbindung an das öffentliche Netz betrieben wird und welche Synchrongeneratoren in diesem Betriebszustand in Betrieb sind. Der Verlauf der Kurzschlussleistung ist in Abbildung 3.4 für Woche 1 und in Abbildung 3.5 für Woche 2 dargestellt.

Tabelle 3.1: Mögliche Betriebszustände während des Beobachtungszeitraumes und die dazugehörigen berechneten Kurzschlussleistungen an den Knoten PCC, SS1 und SS2

| Betriebs- zustand | KURZSCHLUSSLEISTUNG Sk''max | | | öff. Netz | GENERATOR | | | | INSEL | |
|----------------------|-----------------------------|-----|-----|--------------|-----------|-----|-----|-----|-------|------|
| | PCC | SS1 | SS2 | | DT2 | DT4 | DT5 | DT7 | 10kV | 20kV |
| - | MVA | MVA | MVA | - | - | - | - | - | - | - |
| 1 | 411 | 605 | 696 | x | x | x | x | x | | |
| 2 | 405 | 582 | 588 | x | x | | x | x | | |
| 3 | 392 | 535 | 433 | x | x | | x | | | |
| 4 | 402 | 570 | 542 | x | x | x | x | | | |
| 5 | 193 | 514 | 487 | | x | x | x | | | x |
| 6 | 197 | 529 | 533 | | x | | x | x | | x |
| 7 | 235 | 528 | 615 | | x | x | x | x | x | |
| 8 | 203 | 557 | 641 | | x | x | x | x | | x |

Anmerkung: Eine niedrigere Kurzschlussleistung hat eine höhere Impedanz zur Folge. Durch die höhere Impedanz steigen auch die Oberschwingungsspannungen aufgrund der eingepprägten Oberschwingungsströme [1].

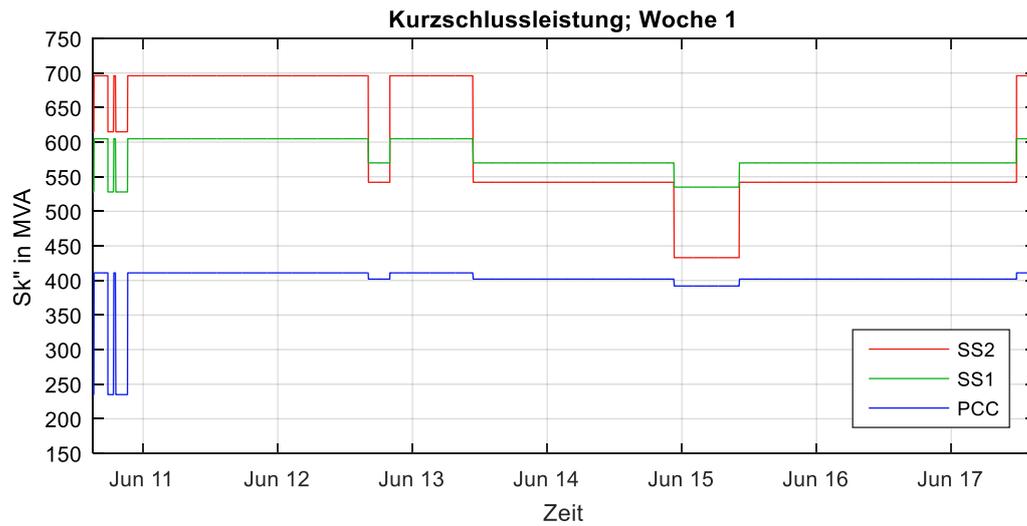


Abbildung 3.4: Kurzschlussleistungen an den Messpunkten SS1, SS2 und PCC; Woche 1

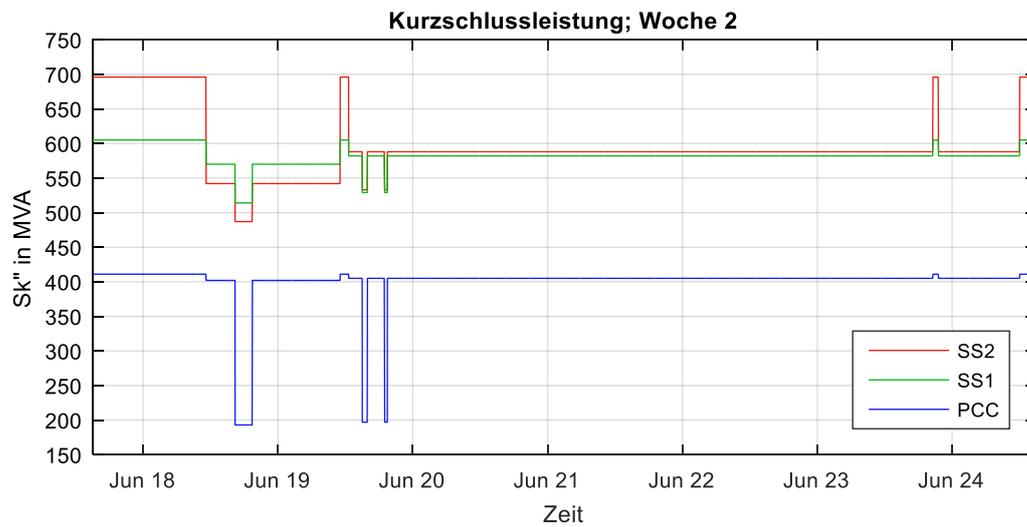


Abbildung 3.5: Kurzschlussleistungen an den Messpunkten SS1, SS2 und PCC; Woche 2

3.4 Oberschwingungsimpedanz

In diesem Kapitel wird die Oberschwingungsimpedanz, welche im Kapitel 5 benötigt wird, beschrieben. Dabei handelt es sich um die Oberschwingungsimpedanz am Messpunkt PCC, welche zur Analyse der Oberschwingungsemission erforderlich ist. Die Berechnungen wurden mit Hilfe der Netzberechnungssoftware PowerFactory von DlgSILENT durchgeführt, wobei auch hier die korrekte Eingabe der Daten wesentlich ist.

Es werden die Oberschwingungsimpedanzen für folgende Betriebszustände berechnet:

- Oberschwingungsimpedanz des öffentlichen Netzes $\underline{Z}_{h,PCC}$, berechnet am Messpunkt PCC. Dabei sind alle Leistungsschalter in Richtung Industriernetz geöffnet.
- Oberschwingungsimpedanz des Industriernetzes $\underline{Z}_{hc,PCC}$, berechnet am Messpunkt PCC. Dabei ist der Leistungsschalter in Richtung öffentliches Netz geöffnet.

In Abbildung 3.6 sind die Beträge der berechneten Oberschwingungsimpedanzen $\underline{Z}_{h,PCC}$ (blau) und $\underline{Z}_{hc,PCC}$ (rot) über die Frequenz bis 1000 Hz dargestellt.

In Abbildung 3.7 sind die Winkel der Oberschwingungsimpedanzen $\phi_{h,PCC}$ (blau) und $\phi_{hc,PCC}$ (rot) über die Frequenz bis 1000 Hz dargestellt.

Die Frequenz wurde bis 1000 Hz gewählt, da für die Auswertungen in Kapitel 5 nur die 5. Oberschwingung (250 Hz) und die 11. Oberschwingung (550 Hz) untersucht werden.

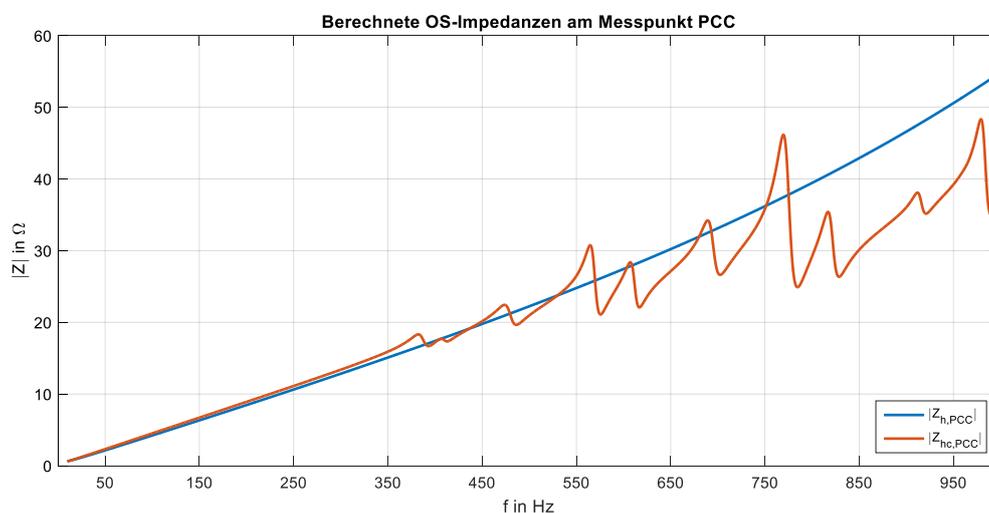


Abbildung 3.6: Beträge der berechneten OS-Impedanzen am Messpunkt PCC;
OS-Impedanz des öffentlichen Netzes $\underline{Z}_{h,PCC}$ (blau),
OS-Impedanz des Industriernetzes $\underline{Z}_{hc,PCC}$ (rot)

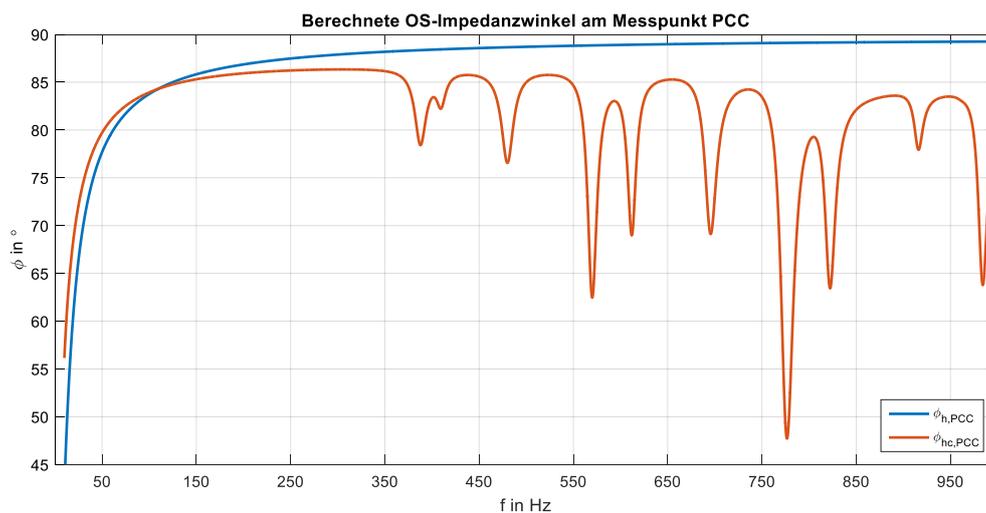


Abbildung 3.7: Berechneter OS-Impedanzwinkel am Messpunkt PCC;
OS-Impedanzwinkel des öffentlichen Netzes $\phi_{h,PCC}$ (blau),
OS-Impedanzwinkel des Industriernetzes $\phi_{ic,PCC}$ (rot)

3.5 Oberschwingungsmessungen im Industrienetz

Nachfolgend werden das Messkonzept, die Auswahl der Messpunkte, die Ungenauigkeiten in der Messkette und die Auswertung der Messungen beschrieben.

3.5.1 Messkonzept

Wie bereits im einleitenden Kapitel erwähnt, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Beurteilung der Oberschwingungs-Spannungspegel und eine Analyse der Oberschwingungsemission. Dafür wurden im Industrienetz von Mondi Frantschach GmbH Vor-Ort-Messungen durchgeführt und diese anschließend ausgewertet.

Für die Auswertung der Oberschwingungs-Spannungspegel werden die Zeitverläufe der Spannungen an der 20-kV-Anlage (Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Netz, PCC) und an der 10,5-kV-Anlage (Kraftanlage, SS1 und SS2) benötigt. Für die Analyse der Oberschwingungsemission ist neben dem zeitlichen Spannungs- auch der Stromverlauf an der 20-kV-Anlage erforderlich. Für weitere Untersuchungen außerhalb der Masterarbeit wurden noch weitere Ströme von ausgewählten Abgängen mitgemessen.

Um die Spannungen und Ströme, sowohl an der 20-kV-Anlage als auch an der 10,5-kV-Anlage erfassen zu können, müssen zwei separate Messgeräte eingesetzt werden. Darüber hinaus müssen die Messgeräte in der Lage sein, qualitative Daten über einen längeren Zeitraum erfassen und speichern zu können. Zusätzlich ist es erforderlich, dass die gespeicherten Rohdaten in ein MATLAB-konformes Datenformat (*.mat-File) konvertiert werden können.

3.5.1.1 Messgeräte und Zubehör

Die Anforderungen an die Messgeräte sind eine Langzeitmessung der zeitlichen Strom- und Spannungsverläufe, mehrere voneinander isolierte Messkanäle sowie die einfache Bedien- und Transportierbarkeit. Für das Messvorhaben werden daher zwei mobile Messgeräte der Firma DEWETRON GmbH und das dazugehörige Softwarepaket DEWESoft eingesetzt. In der 10,5-kV-Anlage (Kraftanlage) wird das Messgerät „DEWE-2600“ mit 16 verfügbaren Kanälen und in der 20-kV-Anlage (PCC) das Messgerät „DEWE-3200“ mit 8 verfügbaren Kanälen eingesetzt. Die Messgeräte inklusive Zubehör wurden vom Institut für Elektrische Anlagen und Netze (IEAN) der Technischen Universität Graz (TU Graz) zur Verfügung gestellt.



Abbildung 3.8: Symbolbilder der beiden eingesetzten Messgeräte (Firma DEWETRON GmbH),
(a) DEWE-3020 [33] und (b) DEWE-2600 [34]

Zur Messung der zeitlichen Strom- und Spannungsverläufe werden bei beiden Messgeräten (siehe Abbildung 3.8) isolierte Eingangsverstärker der DAQP-Serie verwendet. Diese Messverstärker vergrößern das Eingangssignal, um für die A/D-Wandler-Karte eine höhere Spannung bereitzustellen. Bei den DAQP-Modulen können verschiedene Messbereiche und Filter eingestellt werden [35]. Beim Messgerät DEWE-3020 können insgesamt 8 DAQP-Module und beim DEWE-2600 sogar insgesamt 16 Module verwendet werden.

3.5.1.2 Spannungsmessung

Die Spannungsmessung erfolgt am Messgerät DEWE-2600 über DAQP-HV Module und am Messgerät DEWE-3020 über DAQP-DMM Module. Die Spezifikationen dieser Module sind in den Tabellen im Anhang (Tabelle A - 7 und Tabelle A - 8) zu finden. Das DAQP-HV Modul kann eine Eingangsspannung bis maximal 1400 V direkt messen, beim DAQP-DMM Modul sind es maximal 1000 V. Die Bandbreite der Module sind 300 kHz für das DAQP-HV und 20 kHz für das DAQP-DMM. Für die Betrachtungen im Rahmen der Masterarbeit sind diese Bandbreiten ausreichend.

Die Spannungen werden an den Sekundärklemmen der vorhandenen induktiven Spannungswandler in der jeweiligen Anlage abgegriffen.

Übersetzungsverhältnis der installierten Spannungswandler:

- 10000 V / 100 V in der 10,5-kV-Anlage (SS1 und SS2)
- 20000 V / 100 V in der 20-kV-Anlage (PCC)

3.5.1.3 Strommessung

Für die Strommessung werden an beiden Messgeräten (DEWE-2600 und DEWE-3020) die DAQP-LV Module verwendet. Diese Module haben einen maximalen Eingangsbereich von 50 V und eine Bandbreite von 300 kHz. Die Spezifikationen des DAQP-LV Moduls sind im Anhang (Tabelle A - 9) zu finden.

In der Anlage stehen induktive Stromwandler in Innenraumausführung zur Verfügung. Diese besitzen einen Mess- und einen Schutzkern. Je nach Zugänglichkeit wird der Strom entweder am Schutzkern (z. B. im Schaltschrank) oder am Messkern gemessen.

Die Ströme im Wandlersekundärkreis werden hauptsächlich über Wechselstromzangen des Typs „FLUKE i5s“ mit einem Nennstrom von 5 A gemessen. Da nicht ausreichend Stromzangen zur Verfügung standen, wurden die restlichen Ströme über Strommesswiderstände im Sekundärkreis (mit einem Widerstand von 0,1 Ω) gemessen.

Beim Einbau der Strommesswiderstände muss in den Stromkreis eingegriffen werden, sofern dafür keine freien Klemmen vorgesehen sind.

Beim Einbau der Stromzangen muss auf die korrekte Richtung geachtet werden, die an den Stromzangen durch einen Pfeil gekennzeichnet ist. Ein falscher Einbau der Zangen hat eine Drehung des Stromwinkels um 180° zur Folge. Die Stromzangen werden um den Leiter gelegt, ohne in den Stromkreis eingreifen zu müssen, was ein großer Vorteil ist. Die Spezifikationen der Wechselstromzange „FLUKE i5s“ sind im Anhang in Tabelle A - 10 zu finden. Die Stromzangen haben einen kontinuierlichen Strombereich von 10 mA bis 6 A, einen Ausgangspegel von 400 mV/A und einen nutzbaren Frequenzbereich von 40 Hz bis 5 kHz [36].



Abbildung 3.9: Wechselstromzange „FLUKE i5s“ (links) und Strommesswiderstand (rechts)

3.5.1.4 Grundeinstellungen

Vor dem Beginn der Messung müssen noch einige Grundeinstellungen in der Software DEWESoft, die auf den Messgeräten installiert ist, eingestellt werden. Es werden Einstellungen für die Abtastfrequenz, Speichereinstellungen und Einstellungen für die einzelnen Kanäle vorgenommen.

Wie bereits erwähnt, werden in dieser Arbeit Oberschwingungen bis zur 40. Ordnung (2 kHz) ausgewertet. Um das Abtasttheorem von Shannon nicht zu verletzen, ist eine Abtastfrequenz von mehr als 4 kHz notwendig. Die nächsthöher einzustellende Abtastfrequenz am Messgerät liegt bei 5 kHz und darauffolgend bei 10 kHz. Um kein Risiko einzugehen, wurde eine Abtastfrequenz von **10 kHz** ausgewählt. Somit können auch Oberschwingungen bis zur 50. Ordnung problemlos erfasst werden.

Die einzelnen Kanäle am Messgerät müssen vor Beginn der Messungen noch richtig in der Software DEWESoft konfiguriert werden. In Tabelle A - 11 sind die Kanaleinstellungen der beiden Messstationen aufgelistet.

Ein wichtiger Parameter für die Strommessung ist der Messbereich, der vor allem vom Übersetzungsverhältnis vorhandener Stromwandler, dem Umrechnungsverhältnis vorhandener Stromzangen und dem maximal zu erwartenden Leiterstrom abhängig ist. Der in der Software einzustellende Messbereich ist dabei als Spitzenwert zu sehen. Bei der Strommessung am Abgang PCC (siehe Kanal Setup in Tabelle A - 11, Messstation 1, Kanal 4 und 5) sind beispielsweise ein induktiver Stromwandler mit einem Übersetzungsverhältnis von 600 A / 5 A und eine Stromzange mit einem Umrechnungsverhältnis von 400 mV / 1 A zu berücksichtigen. Fließt ein Strom von 600 A auf der Primärseite, so ist eine umgerechnete Spannung von 2 V am Eingang zu messen. Es wurde hier der nächsthöher regulierbare Spannungsbereich von 2,5 V eingestellt.

Bei der Spannungsmessung ist in unserem Fall nur das Übersetzungsverhältnis des Spannungswandlers in der jeweiligen Anlage zu berücksichtigen. Bei der Spannungsmessung am Messpunkt PCC (siehe Kanal Setup in Tabelle A - 11, Messstation 1, Kanal 0 bis 2) ist beispielsweise ein induktiver Spannungswandler mit einem Übersetzungsverhältnis von 20000 V / 100 V zu berücksichtigen. Der Spitzenwert der gemessenen Leiter-Erde-Spannung (z. B. \hat{U}_{L1}) in der 20-kV-Anlage ($U_n = 20$ kV) ergibt laut Berechnung (3-1) einen Wert von 16,33 kV. Dies entspricht auf der Sekundärseite 81,6 V, der eingestellte Spannungsbereich von 100 V ist daher ausreichend für die Untersuchungen im Normalbetrieb.

$$\hat{U}_{L1} = U_n \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 20 \text{ kV} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 16,33 \text{ kV} \quad (3-1)$$

3.5.2 Auswahl der Messpunkte und Messdauer

3.5.2.1 Messdauer

Da für die Beurteilung der Oberschwingungs-Spannungspegel eine Mindestbeobachtungsdauer von einer Woche empfohlen wird (z. B. in EN 61000-4-30 [25]), wurden im Rahmen dieser Arbeit die Messungen über zwei Wochen durchgeführt. Der Startzeitpunkt der Messungen ist der 10. Juni 2020 um 15:00 Uhr. Für die Auswertung der Messdaten werden die zwei Wochen-Intervalle „Woche 1“ und „Woche 2“ definiert. Die Start- und Endzeiten von Woche 1 und Woche 2 sind in Tabelle 3.2 angegeben.

Tabelle 3.2: Start- und Endzeiten der beiden Wochen-Intervalle „Woche 1“ und „Woche 2“

| Woche | Startzeit | Endzeit |
|----------|-------------------------|-------------------------|
| Woche 1: | 10.06.2020 um 15:00 Uhr | 17.06.2020 um 15:00 Uhr |
| Woche 2: | 17.06.2020 um 15:00 Uhr | 24.06.2020 um 15:00 Uhr |

3.5.2.2 Auswahl der Messpunkte

Für das Messvorhaben im Industrienetz wurden die zwei Stationen „Messstation 1“ und „Messstation 2“ definiert. Messstation 1 umfasst die Messungen in der 20-kV-Anlage (PCC) und Messstation 2 die Messungen in der 10,5-kV-Anlage (Kraftanlage, SS1 und SS2). Abbildung 3.10 zeigt ein vereinfachtes Schaltbild für das Messvorhaben im Industrienetz.

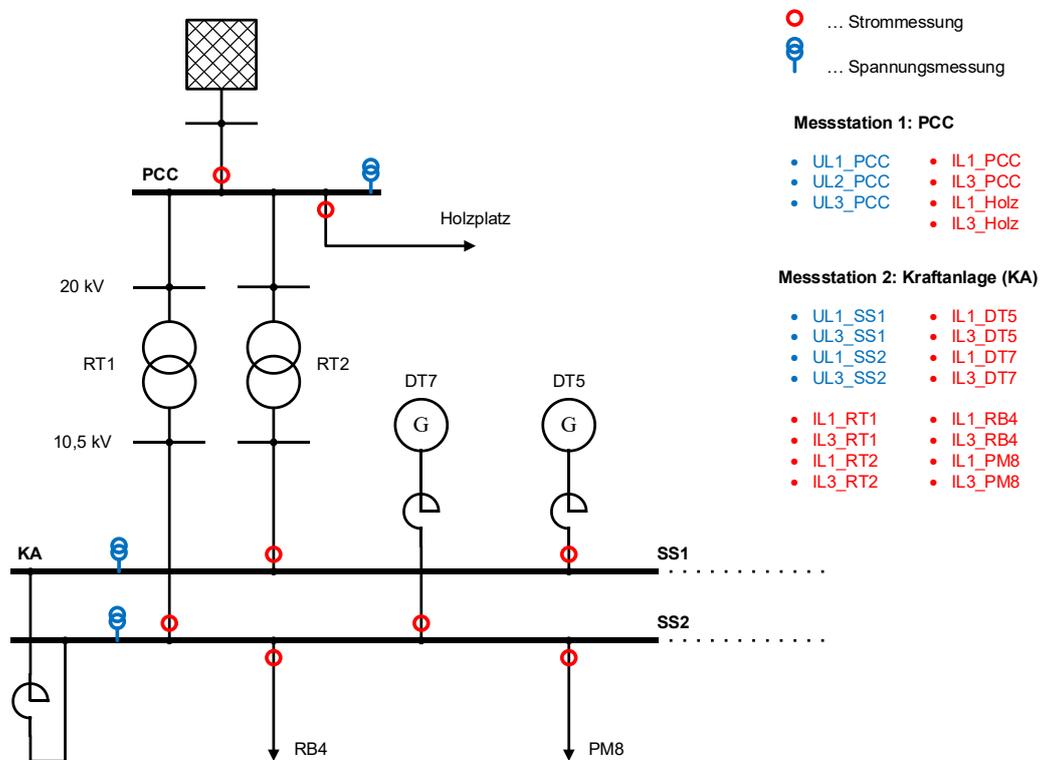


Abbildung 3.10: Vereinfachtes Schaltbild des Werksnetzes für die Messungen im Industrienetz

Spannungsmesspunkte:

- Leiter-Erde-Spannungen an der Sammelschiene in PCC (L1, L2, L3)
- Leiter-Erde-Spannungen an SS1 und SS2 in der Kraftanlage (jeweils L1 und L3)

Strommesspunkte (jeweils L1 und L3):

- PCC (Abgang in Richtung öffentliches Netz)
- Abgang der beiden Regeltransformatoren RT1 und RT2 (auf 10,5-kV-Seite)
- Abgang der beiden leistungsstärksten Synchrongeneratoren DT5 und DT7
- Abgänge von zwei großen Verbrauchern im Werksnetz PM8 und RB4 (beide Verbraucher haben einen hohen Anteil an Stromrichter)
- Abgang zum Holzplatz (u. a. große Motoren mit Direktstart)

Die Spannungsmessungen werden für die Auswertungen in Kapitel 4 und Kapitel 5 benötigt. Der Strom vom Abgang PCC wird zusätzlich in Kapitel 5 benötigt. Die restlichen Messpunkte sind für diese Arbeit nicht relevant, stehen aber für weitere Untersuchungen zur Verfügung.

In Messstation 1 (Abbildung 3.11) wurden die Leiter-Erde-Spannungen an der Sammelschiene, der Strom am Abgang bzw. an der Einspeisung in Richtung öffentliches Netz und der Strom am Abgang zum Holzplatz gemessen. Die Spannungsmessung erfolgte an allen drei Phasen L1, L2 und L3. Die Ströme wurden jeweils nur in den Phasen L1 und L3 gemessen. Zum einen, da nur Stromwandler in den Phasen L1 und L3 installiert sind, und zum anderen wegen der begrenzten Kanäle des Messgerätes DEWE-3020.

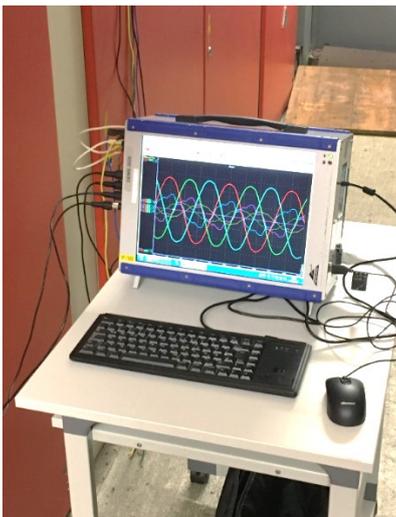


Abbildung 3.11: Messstation 1 in der 20-kV-Anlage mit Messgerät DEWE-3020

In Messstation 2 wurden die Leiter-Erde-Spannungen an den beiden Sammelschienen SS1 und SS2 gemessen, wobei hier jeweils nur die Phasen L1 und L3 gemessen wurden. Für die Strommessung wurden die Abgänge der beiden Regeltransformatoren RT1 und RT2, die Abgänge der Generatoren DT5 und DT7, der Abgang von der Papiermaschine 8 (PM8) sowie der Abgang des Laugenverbrennungskessels oder auch „Recovery Boiler 4“ (RB4) gemessen. Aufgrund der Verfügbarkeit der installierten Stromwandler in der Anlage sowie der begrenzten Kanalanzahl des Messgerätes DEWE-2600, wurde generell nur an den Phasen L1 und L3 gemessen.

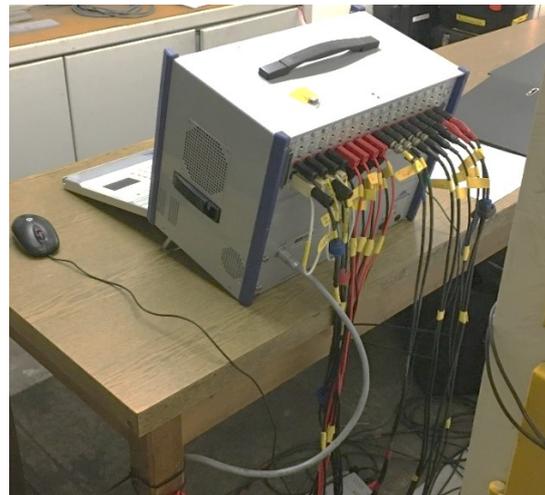


Abbildung 3.12: Messstation 2 in der 10,5-kV-Anlage mit Messgerät DEWE-2600

3.5.3 Ungenauigkeiten in der Messkette und sonstige Anmerkungen

Eine Messkette umfasst alle Einrichtungen, die zum Ergebnis einer Messung beitragen. Sie besteht u. a. aus allen Messwandlern, den Messleitungen, dem Messgerät selbst und der Bewertungseinheit.

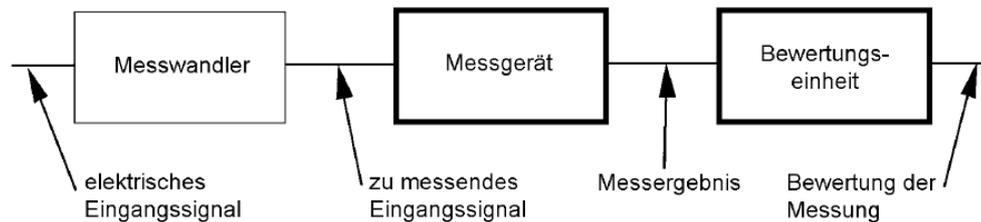


Abbildung 3.13: Messkette [25]

In der gesamten Messkette sind mehrere Komponenten vorhanden, die mit ihren individuellen Messgenauigkeiten arbeiten.

Die Spannungen in der Mittelspannungsanlage werden nicht direkt, sondern über induktive Spannungswandler gemessen. Diese haben je nach Nennspannungsbereich ein unterschiedliches Übertragungsverhalten, welches generell bei niedrigeren Nennspannungen besser ist. Induktive Spannungswandler für den Mittelspannungsbereich weisen im geforderten Frequenzbereich bis 2 kHz noch ein gutes Übertragungsverhalten auf [4], [37].

Die Ströme werden in der Anlage über induktive Stromwandler gemessen und können dann sekundärseitig für Mess- und Schutzzwecke verwendet werden. Aufgrund des geringeren Einflusses der Streuinduktivitäten und Eigenkapazitäten sind die Übertragungseigenschaften bei induktiven Stromwandlern besser als bei induktiven Spannungswandlern. Im Frequenzbereich bis zu einigen kHz weisen sie ein nahezu ideales Übertragungsverhalten auf, was für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit (bis 2 kHz) ausreichend ist [4], [37].

Die Eingangsströme, die vom Messgerät (DEWE-3020 und DEWE-2600) weiterverarbeitet werden, werden hauptsächlich über Stromzangen gemessen, die auch ihre eigenen Messgenauigkeiten haben. Die Genauigkeiten der Stromzangen sowie die der Eingangsverstärker (DAQP-XX) sind in den jeweiligen Spezifikationen im Anhang zu finden.

Die beiden eingesetzten Messgeräte DEWE-3020 und DEWE-2600 waren während der Messungen untereinander nicht zeitsynchronisiert. Es ist daher keine exakte Korrelation der Messdaten zwischen den einzelnen Messgeräten möglich. Die Zeitstempel der gespeicherten Messdaten sind auf die Systemuhr des jeweiligen Messgerätes bezogen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ist das aber ausreichend, da keine exakte Korrelation unter den beiden Messgeräten notwendig ist.

3.5.4 Auswertung der Messungen

Nach der zweiwöchigen Vor-Ort-Messung im Industriernetz stehen über 500 Gigabyte (GB) Rohdaten für die weitere Auswertung zur Verfügung. Die Rohdaten im DeweSoft-Proprietären Format wurden als Files mit einer Speichergröße von einem Gigabyte abgespeichert, was bereits in den Grundeinstellungen so voreingestellt wurde. Diese Files beinhalten die zeitlichen Verläufe aller oben genannten Messpunkte, bestehend aus Zeit- und Signaldaten. Mit Hilfe der Software DeweSoft werden die Rohdaten vom DeweSoft-Proprietären Format (*.d7d-File) in ein MATLAB-konformes Datenformat (*.mat-File) umgewandelt. Die Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit erfolgen hauptsächlich mit Hilfe der Entwicklungsumgebung MATLAB.

Wie bereits erwähnt, wurden die Rohdaten als Files mit einer Größe von einem GB gespeichert. Es wurde daher nicht der gesamte Zeitverlauf von zwei Wochen auf einem File gespeichert, da die Datenmenge für die Bearbeitung am Rechner sonst zu groß wäre. Darüber hinaus kann sich pro File die Länge der zeitlichen Verläufe unterscheiden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Netzfrequenz der Grundschiwingung nicht exakt 50 Hz ($T_1 = 20$ ms) ist, sondern sich ständig minimal verändert.

Um eine lückenlose Auswertung der Zeitverläufe durchführen zu können, müssen die einzelnen Daten (Files) innerhalb der Berechnung effizient zusammengeschachtelt werden. Sind zum Beispiel auf einem File 53-Minuten Zeitverlauf einer Spannung gespeichert, so können daraus fünf 10-Minuten-Mittelwerte berechnet werden. Die restlichen 3-Minuten müssen zwischengespeichert, das aktuelle File gelöscht und das neue File geladen werden. An diese 3-Minuten werden dann die ersten 7-Minuten vom neuen File angehängt und es kann somit wieder ein lückenloser 10-Minuten-Mittelwert berechnet und gespeichert werden. Diese Schritte wiederholen sich so lange, bis alle Files (Messdauer von 2 Wochen) ausgewertet sind.

3.5.4.1 Vorgehensweise bei der Ermittlung eines 10-Minuten-Mittelwertes

Im Rahmen dieser Arbeit werden, vor allem in Kapitel 4, 10-Minuten-Mittelwerte betrachtet. Wie so ein 10-Minuten-Mittelwert zustande kommt, zeigt folgendes Beispiel. Voraussetzungen für dieses Beispiel sind eine konstante Netzfrequenz von $f_1 = 50$ Hz und eine Abtastrate von $f_A = 10$ kHz. Der Zeitabstand zwischen den abgetasteten Samples ist dann $T_A = 1/f_A = 0,1$ ms. Es existieren dann 200 abgetastete Samples pro Grundschiwingungsperiode ($T_1 = 20$ ms).

In der Realität ist die Netzfrequenz nicht konstant, sondern schwankt im mHz-Bereich um die Frequenz von 50 Hz. Das heißt, es existieren auch nicht exakt 200 abgetastete Samples pro Grundschiwingungsperiode. Da die Fensterlänge kein ganzzahliges Vielfaches der Grundschiwingungsperiode ist (siehe Bedingung (2-15)), kann es zu dem bereits beschriebenen Leckeffekt (Kapitel 2.2) kommen. Dieser Effekt wirkt sich am stärksten auf die 2. Oberschiwingung aus und es können geradzahlige Oberschiwingungen aufscheinen, die im eigentlichen Signal nicht vorkommen. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit werden diese Fehler jedoch in Kauf genommen.

Das Beispiel wird anhand der Abbildung 3.14 und folgender Reihenfolge erläutert:

1. Die Messdaten der Files werden auf Blöcke mit 10-Minuten-Messreihen aufgeteilt und zwischengespeichert. Bei $f_1 = 50$ Hz und $f_A = 10$ kHz sind das insgesamt 6000000 Samples.
2. Aus jeder 10-Minuten-Messreihe werden Zeitfenster mit einer Länge von 10-Perioden der Grundschiwingung ($10 \cdot 200$ Samples = 2000 Samples) gebildet. Für einen Block mit 10-Minuten sind das insgesamt 3000 10-Perioden-Zeitfenster.
3. Für jedes 10-Perioden-Zeitfenster wird eine FFT berechnet (Rechteckfenster mit 200 ms). Es werden die Amplituden und Winkel aller Oberschwingungen bis 2 kHz (40. Oberschwingung) gespeichert.
4. Um einen 10-Minuten-Mittelwert zu erhalten, wird der Mittelwert von allen 3000 berechneten FFT's in diesen 10-Minuten gebildet.
5. Die Schritte wiederholen sich für alle weiteren 10-Minuten-Mittelwerte, bis in Summe die gesamte Messdauer von zwei Wochen (das sind 2016 10-Minuten-Mittelwerte) berechnet wurde.
6. Anhand der 10-Minuten-Mittelwerte können dann weitere Berechnungen durchgeführt werden.

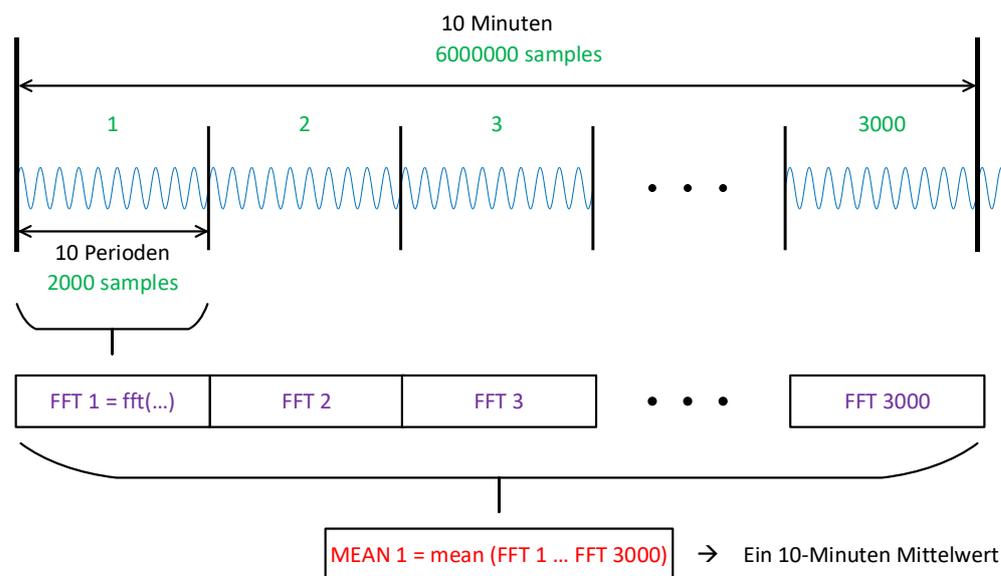


Abbildung 3.14: Ermittlung eines 10-Minuten-Mittelwertes

3.5.4.2 Phasenkorrektur – Bezugswinkel

Für die Untersuchungen in Kapitel 5 werden auch die Phasenwinkel der Oberschwingungen benötigt. Um einen anschaulichen Vergleich unter den Phasoren zu schaffen, werden die Oberschwingungszeiger der Phasenspannung \underline{U}_{L1} immer als Bezugspunkt gewählt und deren Winkel auf 0° gesetzt. Für alle anderen gemessenen Größen erfolgt eine Phasenkorrektur um den Winkel von \underline{U}_{L1} . Das gilt für die Grundschiwingung und für alle betrachteten Oberschwingungen.

4 Oberschwingungs-Spannungspegel

Dieser Teil der Masterarbeit beschäftigt sich mit den Oberschwingungs-Spannungspegeln von drei Messpunkten. Dabei handelt es sich um den Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Netz **PCC** auf der 20-kV-Seite und die beiden anlageninternen Anschlusspunkte **SS1** und **SS2** auf der 10,5-kV-Seite. Der erste Teil befasst sich mit der allgemeinen, wochenweisen Untersuchung der Oberschwingungs-Spannungspegel und deren Gegenüberstellung mit den Verträglichkeitspegeln in den jeweiligen Normen. Der zweite Teil beinhaltet eine spezifische Untersuchung der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung in unterschiedlichen Betriebszuständen.

4.1 Wochenweise Untersuchung der OS-Spannungspegel

Zu Beginn dieses Abschnittes wird die allgemeine Vorgehensweise erläutert. Darauf folgt die wochenweise Untersuchung der Oberschwingungs-Spannungspegel und der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung. Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst.

4.1.1 Allgemeines

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Oberschwingungs-Spannungspegel ist an die Normen EN 61000-4-7 [14] und -4-30 [25] angelehnt, wobei eine Mindestbeobachtungsdauer von einer Woche vorgegeben wird. Es werden zunächst die 10-Minuten-Mittelwerte durch eine Aufrechnung von den 10-Perioden-Intervallen der FFT ermittelt. Anschließend werden daraus die 95%-Wahrscheinlichkeitswerte der individuellen relativen Oberschwingungen bis zur 40. Ordnung sowie der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung gebildet. Aufgrund des zweiwöchigen Beobachtungszeitraumes der Messungen können zwei wochenweise Untersuchungen durchgeführt werden. Die Start- und Endzeiten dieser beiden Wochen (Woche 1 und Woche 2) sind in Tabelle 3.2 angegeben.

Die 95%-Quantile jeder einzelnen relativen Oberschwingung bis zur 40. Ordnung werden in den nachfolgenden Balkendiagrammen für die betrachteten Messpunkte dargestellt. Das bedeutet, dass 95% aller 10-Minuten-Mittelwerte in einer Woche kleiner sind als die dargestellten Werte in den Balkendiagrammen.

4.1.2 Verwendete Normen für den Vergleich der Ergebnisse

Die in den Normen festgelegten Werte für die einzelnen Oberschwingungsspannungen sowie für die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung sind im Anhang zu finden. Die durch Messungen und Berechnungen erhaltenen Oberschwingungs-Spannungspegel werden mit diesen festgelegten Grenzwerten verglichen.

Der Messpunkt PCC ist ein Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Versorgungsnetz und daher werden die Oberschwingungs-Spannungspegel an diesem Messpunkt mit den Grenzwerten in den dafür vorgesehenen Normen EN 50160 und EN 61000-2-12 zum Vergleich herangezogen. Die Werte in der Norm EN 50160 sind nicht als Verträglichkeitspegel oder Grenzwerte vorgesehen, wie es die Werte in der Norm EN 61000-2-12 sind. Sie haben aber eine offensichtliche Ähnlichkeit mit den Werten in der Norm EN 61000-2-12 und sind lediglich bis zur 25. Oberschwingungsordnung definiert.

Die beiden Messpunkte SS1 und SS2 sind als anlageninterne Anschlusspunkte definiert. Für einen Vergleich der Oberschwingungs-Spannungspegel mit festgelegten Normen wird die dafür vorgesehene Norm EN 61000-2-4 herangezogen. Die beiden anlageninternen Anschlusspunkte können im Sinne der elektromagnetischen Umgebungsklassen (siehe Tabelle 2.3) sowohl in Klasse 2 als auch in Klasse 3 eingegliedert werden. Die Klasse 3 kommt aufgrund der Vielzahl an Stromrichtern und der häufig gestarteten Motoren in Frage. Anzumerken ist, dass die Verträglichkeitspegel in Klasse 2 niedriger sind als die Verträglichkeitspegel in Klasse 3. Des Weiteren sind die Werte in der Norm EN 61000-2-4 und Klasse 2 ident mit den Werten in der Norm EN 61000-2-12.

Die Grenzwerte der erwähnten Normen sind sowohl grafisch als auch tabellarisch im Anhang zu finden.

4.1.3 Oberschwingungs-Spannungspegel

Nachfolgend werden je Messpunkt die 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von Woche 1 und Woche 2 dargestellt.

4.1.3.1 PCC

In Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 sind die 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel am Messpunkt PCC dargestellt.

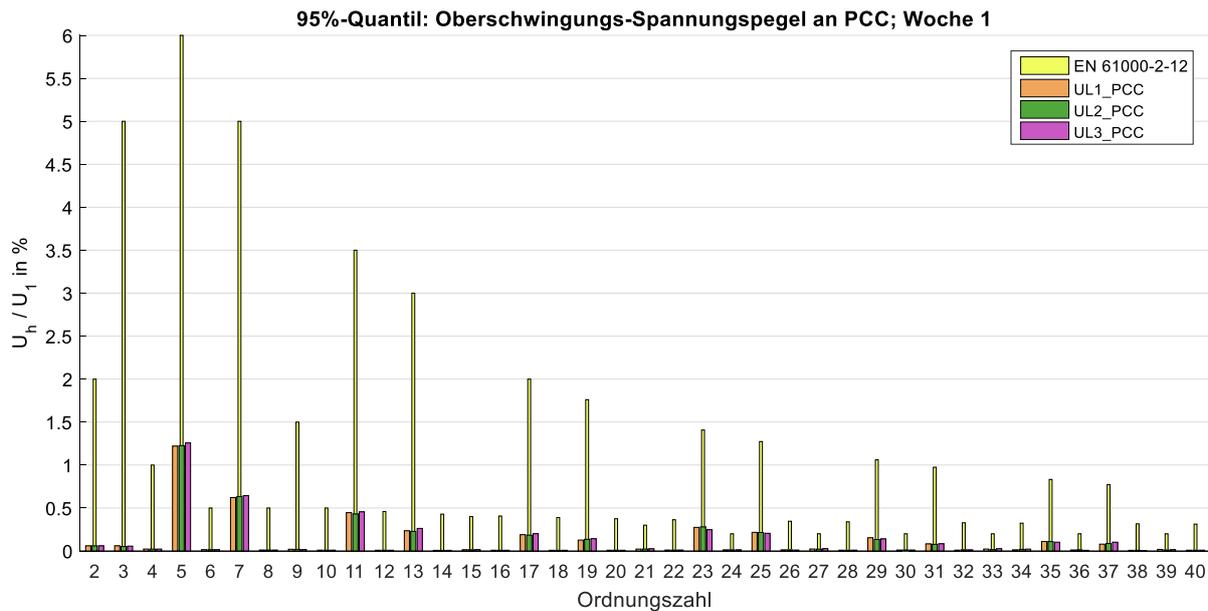


Abbildung 4.1: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von allen gemessenen Phasenspannungen am Messpunkt PCC; Woche 1

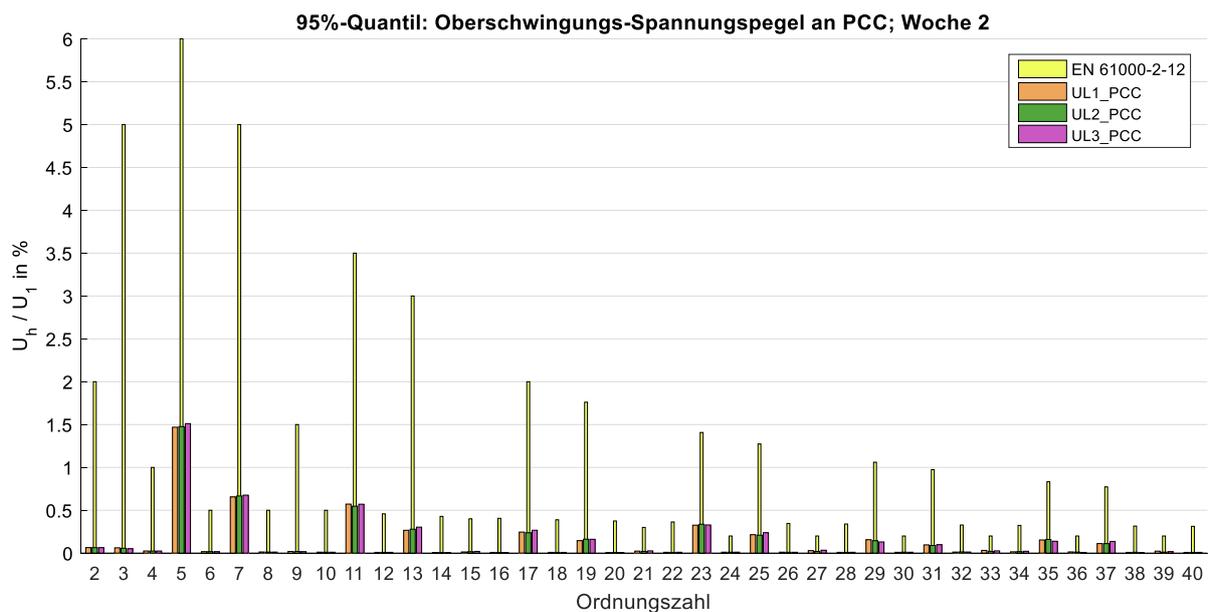


Abbildung 4.2: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von allen gemessenen Phasenspannungen am Messpunkt PCC; Woche 2

In Abbildung 4.3 ist eine Gegenüberstellung der Oberschwingungs-Spannungspegel von Woche 1 und Woche 2 dargestellt.

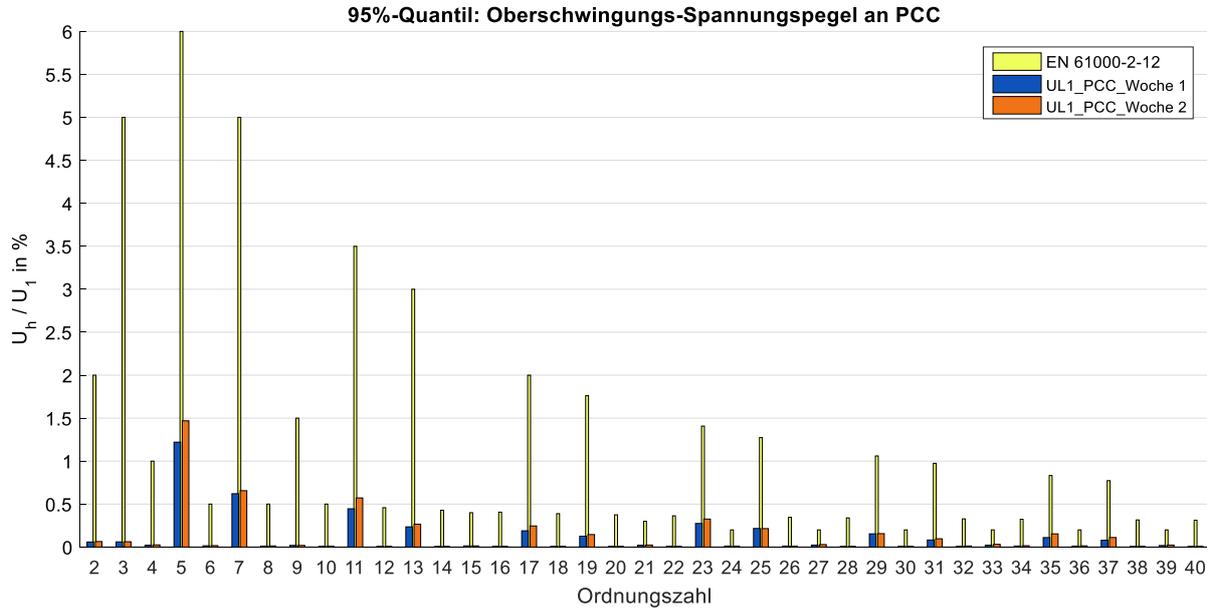


Abbildung 4.3: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von der Phasenspannung U_{L1} am Messpunkt PCC; Gegenüberstellung von Woche 1 und Woche 2

4.1.3.2 SS1

In Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 sind die 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel am Messpunkt SS1 dargestellt.

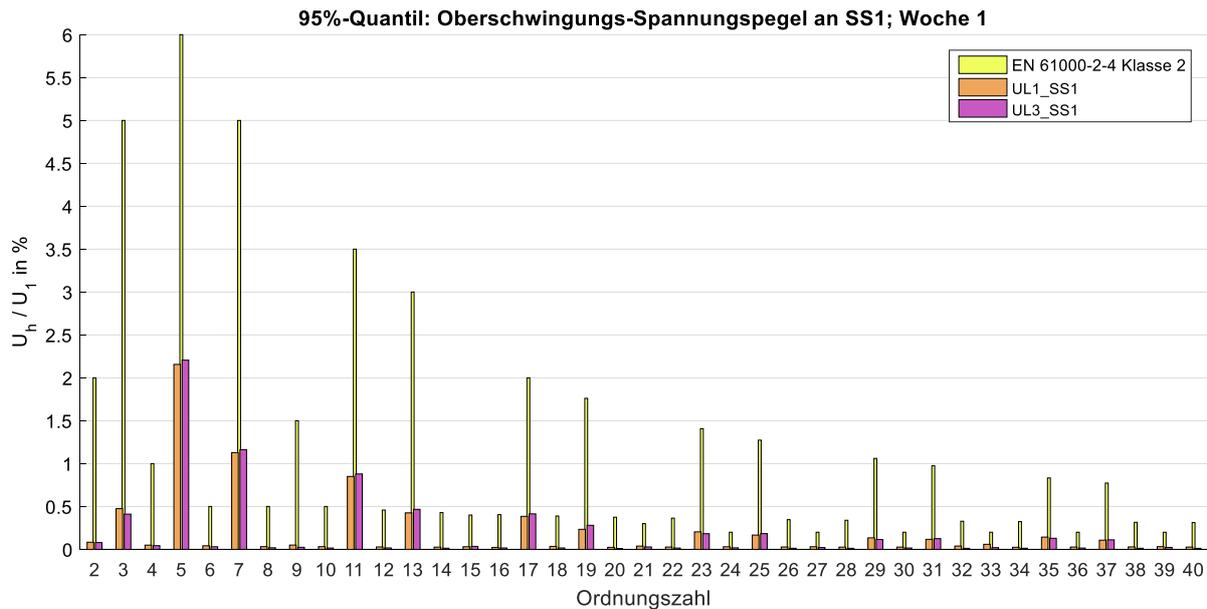


Abbildung 4.4: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von allen gemessenen Phasenspannungen am Messpunkt SS1; Woche 1

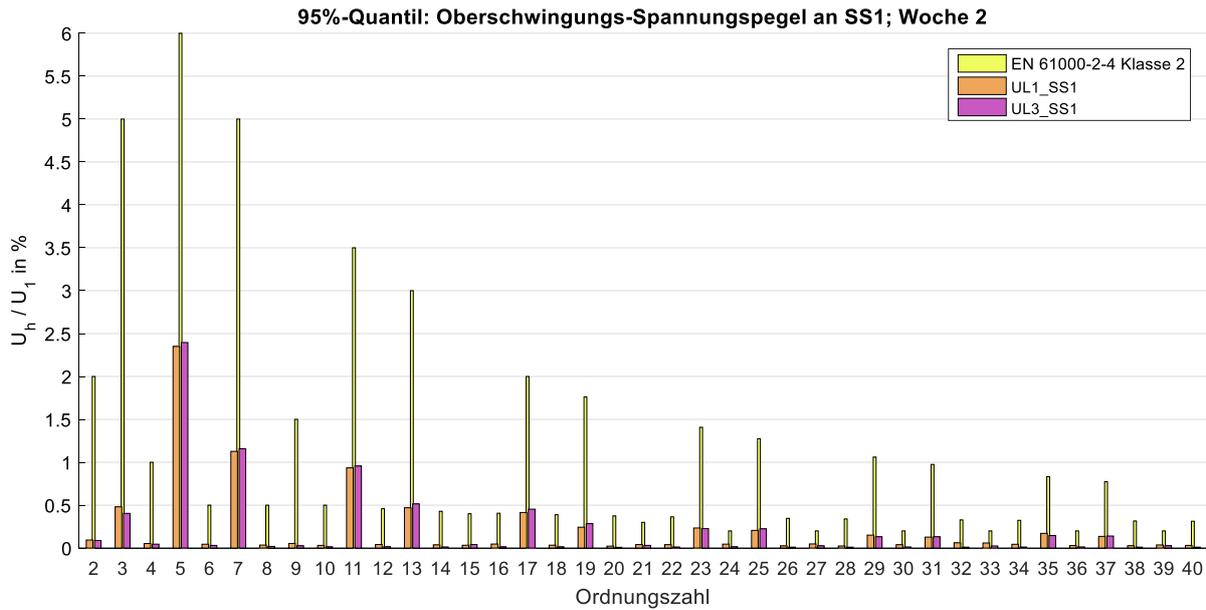


Abbildung 4.5: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von allen gemessenen Phasenspannungen am Messpunkt SS1; Woche 2

4.1.3.3 SS2

In Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 sind die 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel am Messpunkt SS2 dargestellt.

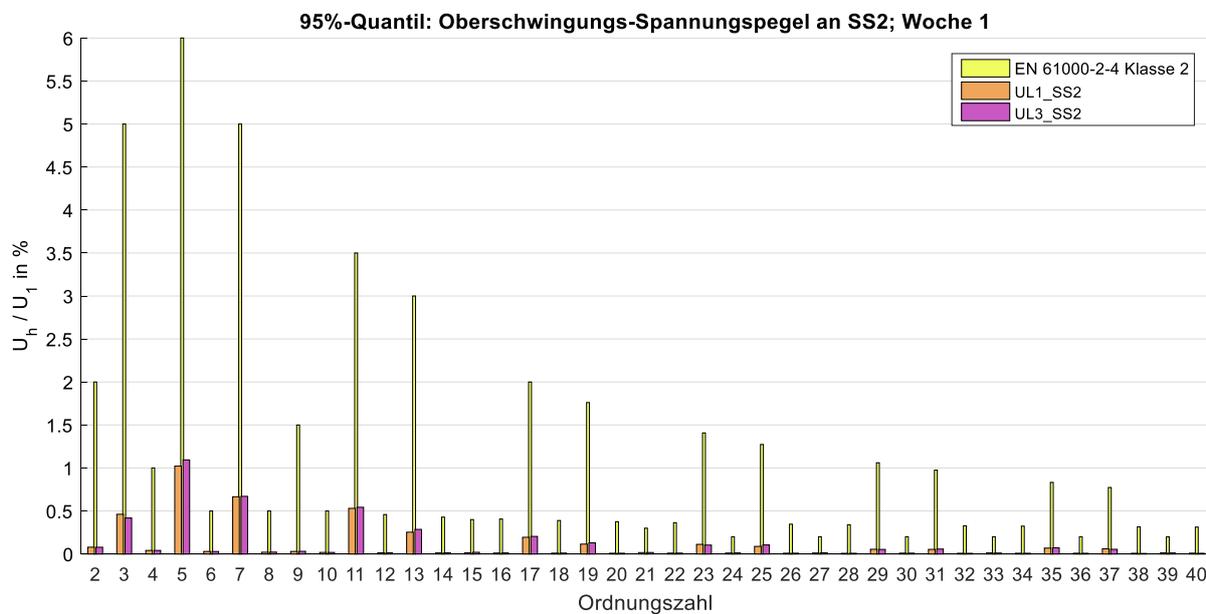


Abbildung 4.6: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von allen gemessenen Phasenspannungen am Messpunkt SS2; Woche 1

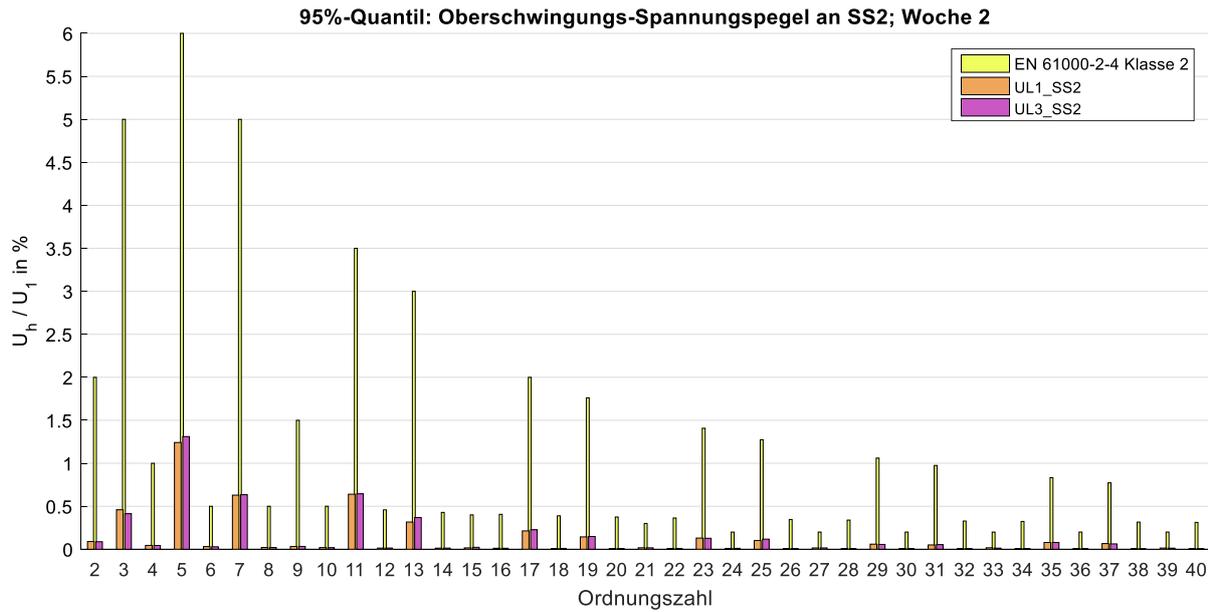


Abbildung 4.7: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von allen gemessenen Phasenspannungen am Messpunkt SS2; Woche 2

In Abbildung 4.8 ist eine Gegenüberstellung der Oberschwingungs-Spannungspegel von den Messpunkten SS1 und SS2 zu sehen.

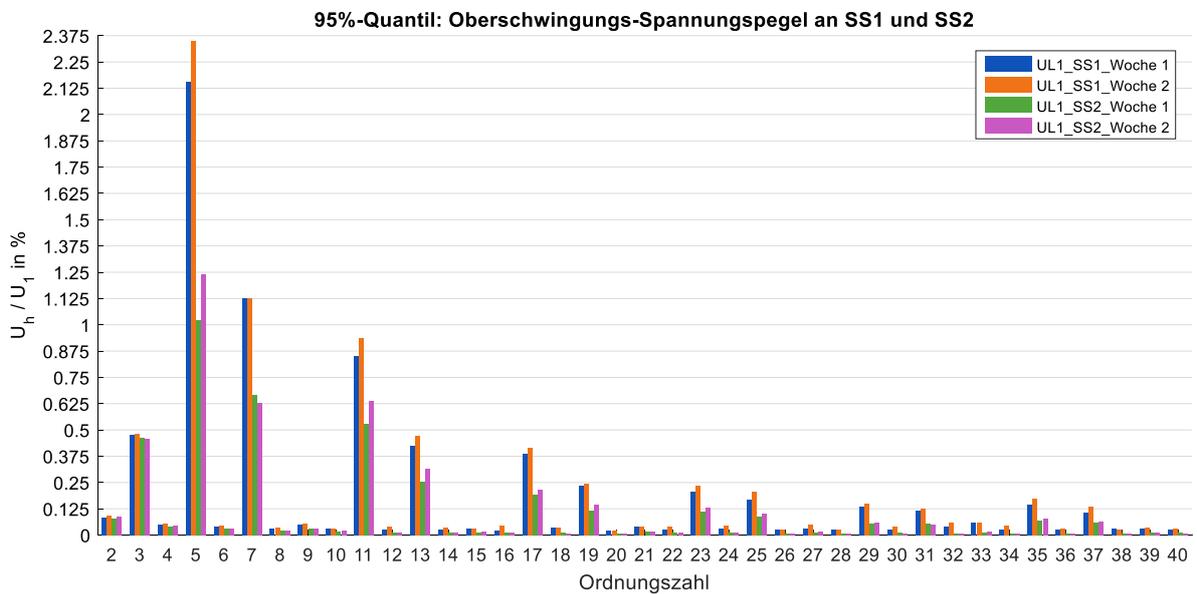


Abbildung 4.8: 95%-Quantile der Oberschwingungs-Spannungspegel von der Phasenspannung U_{L1} an den Messpunkten SS1 und SS2; Gegenüberstellung von Woche 1 und Woche 2

4.1.4 Oberschwingungs-Gesamtverzerrung

In Abbildung 4.9 sind die berechneten THD-Werte der Phasenspannungen U_{L1} (10-Minuten-Mittelwerte) an den drei Messpunkten PCC, SS1 und SS2 über den Beobachtungszeitraum von zwei Wochen dargestellt. In diesem Diagramm ist eine Unterteilung in die Zeiträume Woche 1 und Woche 2 ersichtlich.

Die THD-Werte wurden ausschließlich von der Phase L1 dargestellt, da sie in den anderen gemessenen Phasen je Messpunkt nahezu denselben Verlauf aufweisen.

Im Zeitraum vom 14. Juni bis 17. Juni war eine Papiermaschine (PM8) laut Messungen (Abbildung 3.2) außer Betrieb. Ebenso gibt es in diesem Zeitraum einen Leistungseinbruch des Laugenverbrennungskessels (RB4) mit einem Minimum am 15. Juni. Bei beiden Verbrauchern handelt es sich um wesentliche Oberschwingungsquellen, da diese einen hohen Anteil an Stromrichter beinhalten (u. a. Sechspuls-Brückenschaltungen). In Abbildung 4.9 ist im genannten Zeitbereich ebenfalls eine Senkung des THD-Wertes der drei Messpunkte zu erkennen. Die Tatsache, dass zumindest zwei große Oberschwingungserzeuger im Industrienetz außer Betrieb sind, wirkt sich durchaus auf die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung aus. Für die weiteren Verbraucher im Industrienetz gibt es keine Auskunft über den Leistungsbedarf in diesem Beobachtungszeitraum. Um genauere Aussagen treffen zu können, müssten alle Verbraucher (zumindest die großen Oberschwingungserzeuger im Industrienetz) untersucht werden.

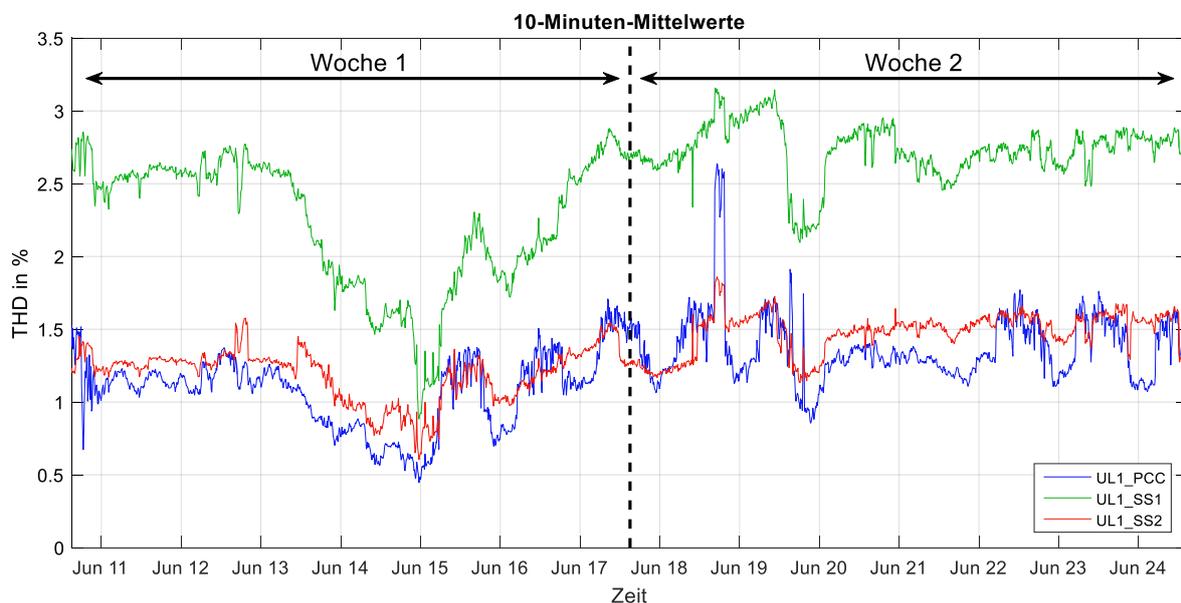


Abbildung 4.9: THD-Werte der Spannungen (U_{L1}) an PCC, SS1 und SS2 über zwei Wochen

In der Tabelle 4.1 sind die THD-Werte aller gemessenen Spannungen für Woche 1 und Woche 2 zu sehen. In dieser Tabelle sind die Maximalwerte, die 95%-Quantile und die Mittelwerte der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung gegenübergestellt.

Tabelle 4.1: THD-Werte aller gemessenen Spannungen in Woche 1 und Woche 2

| Woche 1 | THD-Werte in % | | | Woche 2 | THD-Werte in % | | |
|---------|----------------|-------------|------------|---------|----------------|-------------|------------|
| | Maximalwert | 95%-Quantil | Mittelwert | | Maximalwert | 95%-Quantil | Mittelwert |
| UL1 PCC | 1,71 | 1,48 | 1,07 | UL1 PCC | 2,64 | 1,68 | 1,37 |
| UL2 PCC | 1,71 | 1,49 | 1,09 | UL2 PCC | 2,69 | 1,68 | 1,38 |
| UL3 PCC | 1,78 | 1,54 | 1,12 | UL3 PCC | 2,72 | 1,73 | 1,42 |
| UL1 SS1 | 2,88 | 2,76 | 2,24 | UL1 SS1 | 3,16 | 3,02 | 2,73 |
| UL3 SS1 | 2,93 | 2,75 | 2,23 | UL3 SS1 | 3,14 | 3,00 | 2,68 |
| UL1 SS2 | 1,58 | 1,45 | 1,19 | UL1 SS2 | 1,86 | 1,65 | 1,48 |
| UL3 SS2 | 1,64 | 1,50 | 1,23 | UL3 SS2 | 1,92 | 1,71 | 1,54 |

In Abbildung 4.10 sind die 95%-Quantile des THD-Wertes aller gemessenen Spannungen in einem Balkendiagramm dargestellt. Die Werte wurden aus der Tabelle 4.1 entnommen. Zusätzlich sind die Grenzwerte für die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung aus den entsprechenden Normen dargestellt.

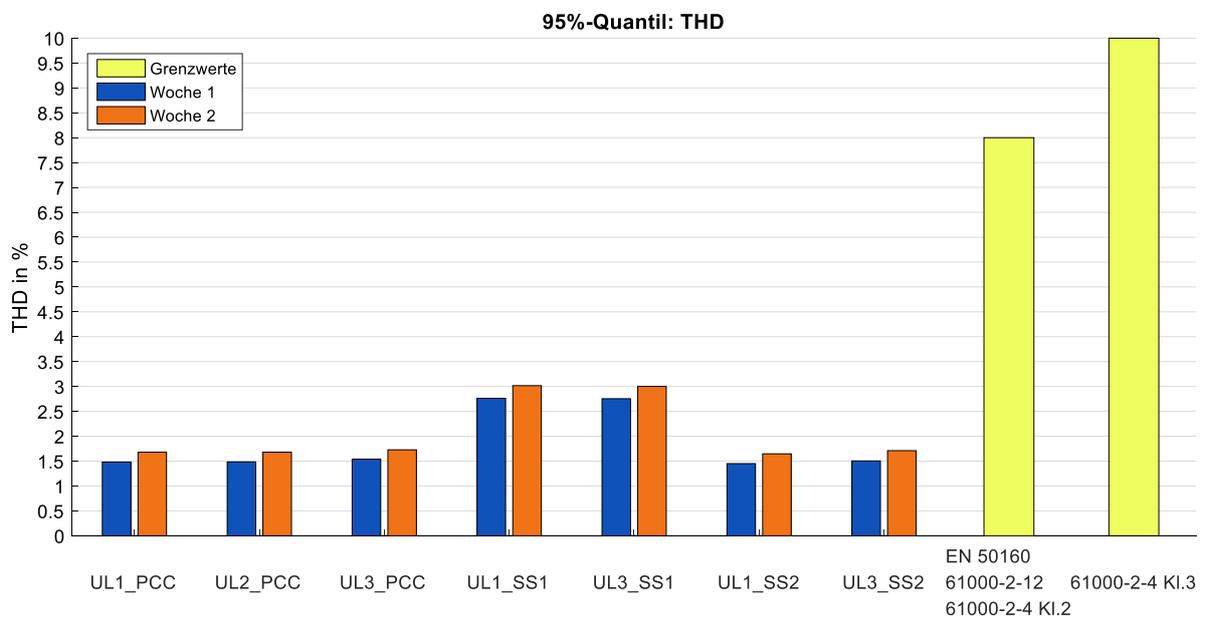


Abbildung 4.10: 95%-Quantile der THD-Werte von allen gemessenen Phasenspannungen; Gegenüberstellung von Woche 1 und Woche 2 mit Grenzwerten aus den entsprechenden Normen

Die THD-Werte (95%-Quantile) der gemessenen Phasenspannungen sind wesentlich kleiner als die Grenzwerte in den dafür vorgesehenen Normen.

Es ist außerdem zu erkennen, dass alle THD-Werte aus der Woche 2 größer sind als die THD-Werte aus Woche 1.

4.1.5 Zusammenfassung und Erkenntnisse

- Alle einzelnen Oberschwingungs-Spannungspegel liegen unterhalb der festgelegten Verträglichkeitspegel aus der für den **Messpunkt PCC** vorgesehenen Norm EN 61000-2-12. Die dargestellten Werte sind ebenfalls bis einschließlich der 25. Oberschwingungsordnung kleiner als die Werte aus der Norm EN 50160.
- Alle einzelnen Oberschwingungs-Spannungspegel im Werk liegen unterhalb der festgelegten Verträglichkeitspegel aus der für die **Messpunkte SS1 und SS2** vorgesehenen Norm EN 61000-2-4 (Klasse 2 und somit auch Klasse 3).
- Die Oberschwingungs-Spannungspegel des Messpunktes SS1 sind generell höher als die des Messpunktes SS2. Während des zweiwöchigen Beobachtungszeitraumes waren große Oberschwingungsverursacher, wie z. B. zwei Papiermaschinen und ein Laugenverbrennungskessel, an SS1 angeschlossen. Daher sind die höheren Oberschwingungs-Spannungspegel am Messpunkt SS1 nachvollziehbar.
- Die Oberschwingungs-Spannungspegel sowie die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung der drei untersuchten Messpunkte sind i. A. in Woche 2 höher als in Woche 1, aber noch immer deutlich unter den jeweiligen Grenzwerten. Ein Grund dafür ist der länger andauernde Stillstand großer Oberschwingungserzeuger in Woche 1.

4.2 Detailergebnisse für unterschiedliche Betriebszustände

Im letzten Kapitel wurde eine Auswertung der Oberschwingungs-Spannungspegel sowie der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung jeweils für eine Woche gezeigt. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung bei unterschiedlichen Betriebszuständen verändert.

4.2.1 Allgemeines

Im Verlauf der zweiwöchigen Vor-Ort-Messung durchlief das Industrienetz verschiedene Betriebszustände in Bezug auf die Kurzschlussleistungen (siehe Tabelle 3.1, Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5). Neben dem Normalbetrieb, wo eine Anbindung an das öffentliche Netz gegeben ist, wurde das Werksnetz auch im Inselnetz betrieben. Für den Inselnetzbetrieb sind die beiden Varianten **10,5-kV-Inselnetz** und **20-kV-Inselnetz** möglich. Diese beiden Varianten des Inselnetzbetriebes und deren Auswirkung auf die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung werden in diesem Kapitel erläutert. Dabei wird untersucht, inwiefern sich der THD-Wert im Inselnetzbetrieb im Vergleich zum Betrieb mit Netzanbindung (Normalbetrieb) verändert. Es werden die drei Messpunkte **PCC**, **SS1** und **SS2** genau betrachtet.

Während der 10,5-kV- und 20-kV-Inselnetzbetriebe gibt es keine bedeutenden Ausfälle der Verbraucher oder Erzeuger des Werks. Dadurch gibt es auch keine bemerkenswerten Unterschiede der Oberschwingungserzeuger im Netz. Es ändert sich lediglich der Schaltzustand im Industrienetz und infolgedessen die Kurzschlussleistungen. Das gilt auch für den unmittelbaren Zeitpunkt vor und nach dem Inselnetzbetrieb.

Anstatt der 10-Minuten-Mittelwerte, wie es im vorigen Kapitel der Fall war, werden hier 10-Sekunden-Mittelwerte verwendet, da dadurch mehr Datenpunkte dargestellt werden können. Somit sind auch die Unterschiede der THD-Werte besser zu erkennen.

4.2.2 Betriebszustände

Es folgt eine Beschreibung der Betriebszustände vor, während und nach dem betrachteten Inselnetzbetrieb. Alle Betriebszustände und die dazugehörigen Kurzschlussleistungen im Laufe des zweiwöchigen Beobachtungszeitraumes wurden bereits in Tabelle 3.1 gezeigt.

4.2.2.1 10,5-kV-Inselnetzbetrieb

Für die Untersuchung der THD-Werte werden die Kurzschlussleistungen der Betriebszustände vor, während und nach dem 10,5-kV-Inselnetzbetrieb benötigt, siehe Tabelle 4.2. In diesem Fall sind die Kurzschlussleistungen vor und nach dem Inselnetzbetrieb gleich groß (Betriebszustand 1). Während des 10,5-kV-Inselnetzbetriebes sind die Kurzschlussleistungen von Betriebszustand 7 gegeben. In den beiden Betriebszuständen sind alle vier Synchrongeneratoren in Betrieb. Im Betriebszustand 7 ist die Kurzschlussleistung am Messpunkt PCC um 176 MVA (rund 43%) kleiner als im Betriebszustand 1. An den Messpunkten SS1 und SS2 sind es rund 12% weniger.

Tabelle 4.2: Kurzschlussleistungen an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2 für die Untersuchung des 10,5-kV-Inselnetzbetriebes

| Betriebszustand | KURZSCHLUSSLEISTUNG $S_{k''max}$ | | | öff. Netz | GENERATOR | | | | INSEL | |
|-----------------|----------------------------------|-----|-----|-----------|-----------|-----|-----|-----|-------|------|
| | PCC | SS1 | SS2 | | DT2 | DT4 | DT5 | DT7 | 10kV | 20kV |
| - | MVA | MVA | MVA | - | - | - | - | - | - | - |
| 1 | 411 | 605 | 696 | x | x | x | x | x | | |
| 7 | 235 | 528 | 615 | | x | x | x | x | x | |

In Abbildung 4.11 ist eine vereinfachte Darstellung der beiden Betriebszustände zu sehen. Während des 10,5-kV-Inselnetzbetriebes (Betriebszustand 7) sind die Leistungsschalter auf der 20-kV-Seite der Regeltransformatoren offen. Auf der 10,5-kV-Seite wird der Energiebedarf der Verbraucher von den vier Synchrongeneratoren gedeckt. Die Verbraucher auf der 20-kV-Seite des Werks werden währenddessen vom öffentlichen Netz versorgt.

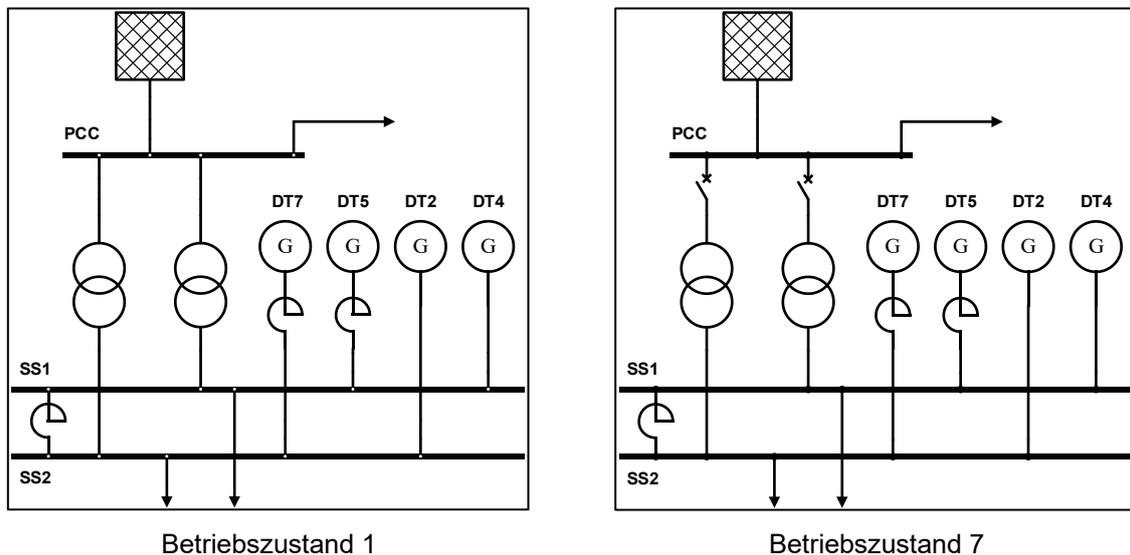


Abbildung 4.11: Vereinfachte Darstellung der Betriebszustände 1 und 7

4.2.2.2 20-kV-Inselnetzbetrieb

Für die Untersuchung der THD-Werte werden, analog zum 10,5-kV-Inselnetzbetrieb, die Kurzschlussleistungen vor, während und nach dem 20-kV-Inselnetzbetrieb benötigt (Tabelle 4.3). Auch hier sind die Kurzschlussleistungen vor und nach dem 20-kV-Inselnetzbetrieb gleich groß (Betriebszustand 4). Während des 20-kV-Inselnetzbetriebes sind die Kurzschlussleistungen von Betriebszustand 5 gegeben. In beiden Betriebszuständen ist der Synchrongenerator DT7 nicht in Betrieb. Im Betriebszustand 5 ist die Kurzschlussleistung am Messpunkt PCC um 209 MVA (rund 52%) kleiner als im Betriebszustand 4. An den Messpunkten SS1 und SS2 sind es rund 10% weniger.

Tabelle 4.3: Kurzschlussleistungen an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2 für die Untersuchung des 20-kV-Inselnetzbetriebes

| Betriebszustand | KURZSCHLUSSLEISTUNG $S_{k''max}$ | | | öff. Netz | GENERATOR | | | | INSEL | |
|-----------------|----------------------------------|-----|-----|-----------|-----------|-----|-----|-----|-------|------|
| | PCC | SS1 | SS2 | | DT2 | DT4 | DT5 | DT7 | 10kV | 20kV |
| - | MVA | MVA | MVA | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 402 | 570 | 542 | x | x | x | x | | | |
| 5 | 193 | 514 | 487 | | x | x | x | | | x |

Eine vereinfachte Darstellung der Betriebszustände 4 und 5 ist in Abbildung 4.12 zu sehen. Während des 20-kV-Inselnetzbetriebes (Betriebszustand 5) ist der Leistungsschalter in Richtung öffentliches Netz offen. Der komplette Energiebedarf des Werks wird währenddessen von den drei aktiven Synchrongeneratoren gedeckt. Da die Messung vor dem Leistungsschalter installiert war, wurde somit nur der Beitrag vom Industrienetz gemessen. Das, was am Messpunkt PCC währenddessen gemessen wird, ist die Summe aller Oberschwingungserzeuger des Industrienetzes, ohne einen Beitrag des öffentlichen Netzes.

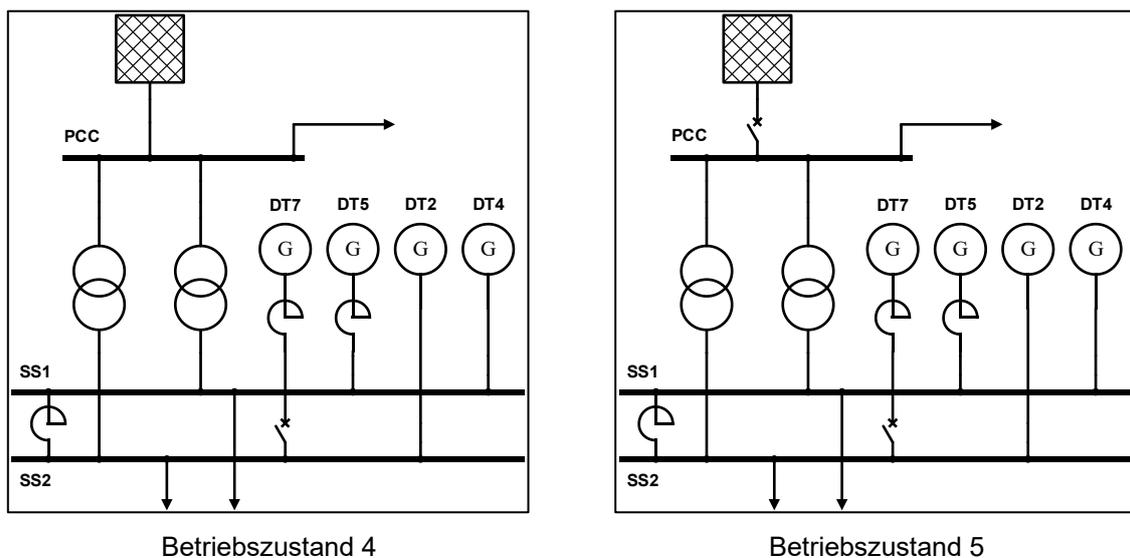


Abbildung 4.12: Vereinfachte Darstellung der Betriebszustände 4 und 5

4.2.3 Oberschwingungs-Gesamtverzerrung

4.2.3.1 10,5-kV-Inselnetzbetrieb

In Abbildung 4.13 sind die THD-Werte der Phasenspannungen U_{L1} jeweils an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2 über einen Zeitraum von sechs Stunden vom 10. Juni 2020 dargestellt. In diesem Zeitraum gibt es zwei 10,5-kV-Inselnetzbetriebe, wobei die jeweiligen Start- und Endzeiten in der Tabelle 4.4 angegebenen sind.

Tabelle 4.4: Start- und Endzeiten der beiden 10,5-kV-Inselnetzbetriebe

| | Startzeit | Endzeit |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 10,5-kV-Inselnetzbetrieb | 10.06.2020 um 17:43 Uhr | 10.06.2020 um 18:47 Uhr |
| | 10.06.2020 um 19:08 Uhr | 10.06.2020 um 21:16 Uhr |

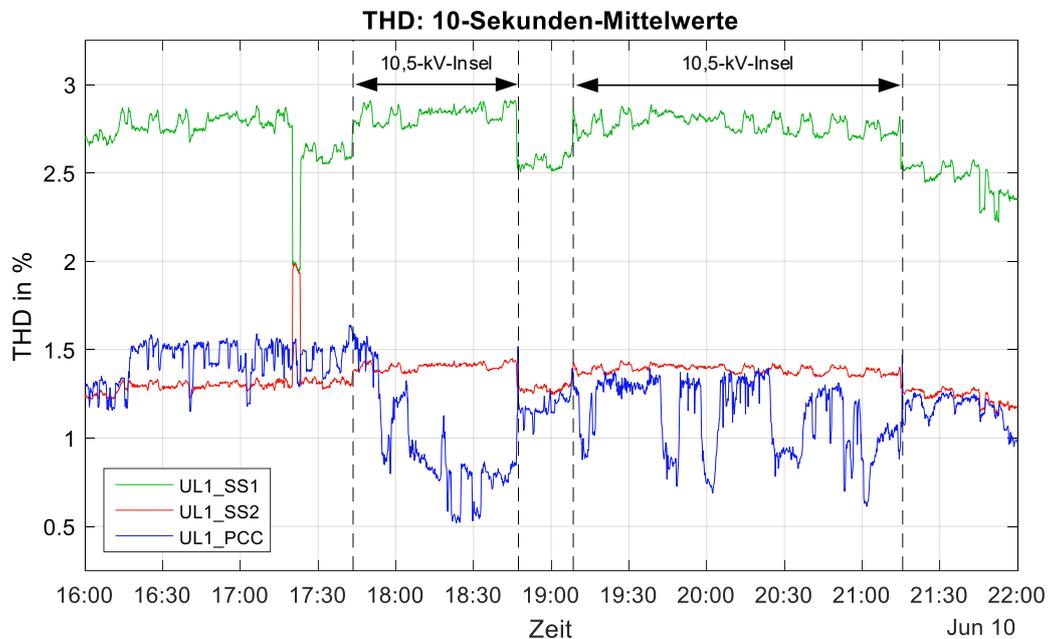


Abbildung 4.13: THD-Werte der Spannungen (U_{L1}) an PCC, SS1 und SS2 während der beiden 10,5-kV-Inselnetzbetriebe

Die THD-Werte während der beiden 10,5-kV-Inselnetzbetriebe sind in Abbildung 4.14 und Abbildung 4.15 separat und vergrößert dargestellt.

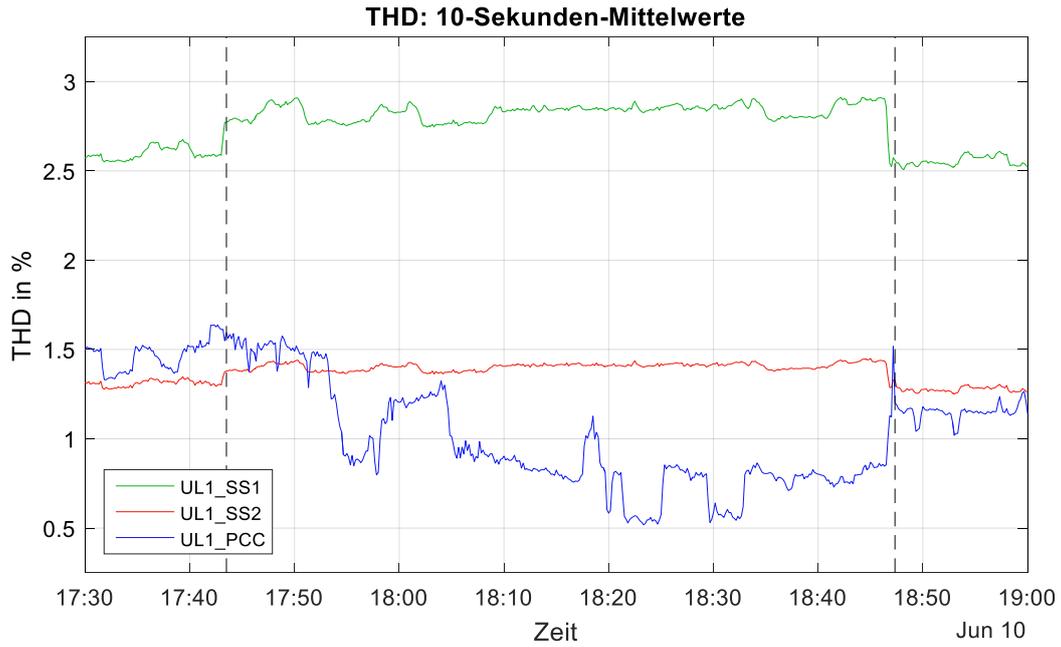


Abbildung 4.14: THD-Werte der Spannungen (U_{L1}) an PCC, SS1 und SS2; 10,5-kV-Inselnetzbetrieb, Zeitbereich von 17:30 Uhr bis 19:00 Uhr vergrößert

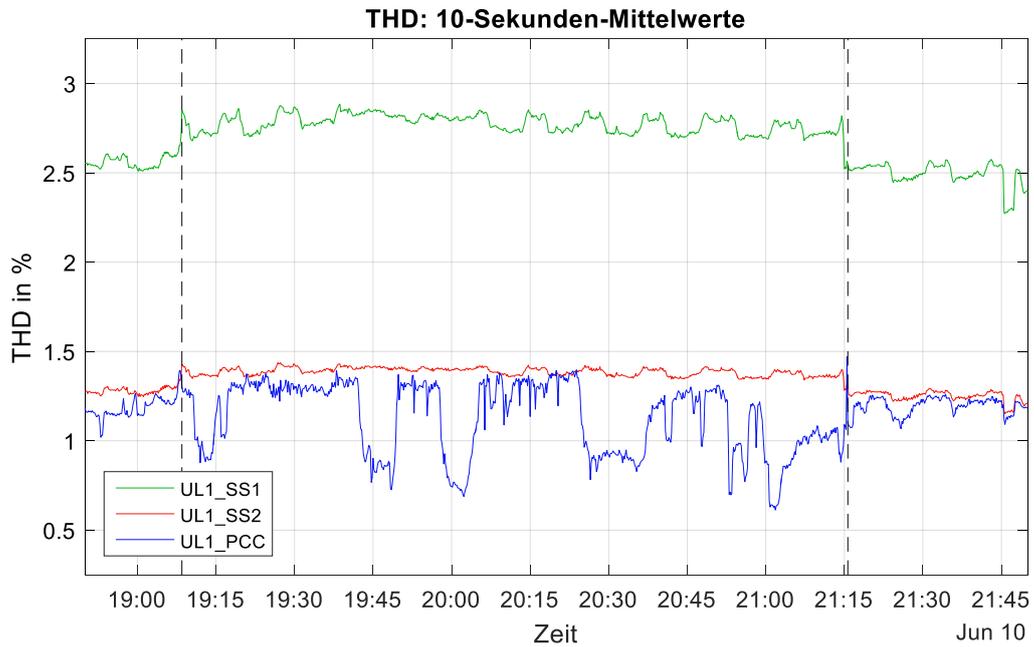


Abbildung 4.15: THD-Werte der Spannungen (U_{L1}) an PCC, SS1 und SS2; 10,5-kV-Inselnetzbetrieb, Zeitbereich von 18:50 Uhr bis 21:50 Uhr vergrößert

Im Vergleich zum Normalbetrieb steigt der THD-Wert während des 10,5-kV-Inselnetzbetriebes an den Messpunkten SS1 und SS2 um 7 % bis 13 % an.

Der minimale Anstieg des THD-Wertes an SS1 und SS2 ist in der geringeren Kurzschlussleistung und der dadurch höheren Impedanz während des 10,5-kV-Inselnetzbetriebes begründet. Anders ausgedrückt sind im Industrienetz die gleichen Oberschwingungserzeuger bei geringerer Kurzschlussleistung vorhanden, was zu einer Erhöhung des THD-Wertes führt.

Der THD-Wert am Messpunkt PCC hat die Tendenz, während des 10,5-kV-Inselnetzbetriebes zu sinken. Im Vergleich zum Normalbetrieb sind außerdem größere relative Schwankungen zu sehen.

Am Messpunkt PCC ist die Kurzschlussleistung während des 10,5-kV-Inselnetzbetriebes um mehr als die Hälfte kleiner, durch den offenen Leistungsschalter fallen jedoch die Oberschwingungsquellen von der 10,5-kV-Seite des Werks weg. Es verbleiben lediglich die Oberschwingungserzeuger des öffentlichen Netzes und der 20-kV-Seite des Werks (Holzplatz etc.).

Am Übergang vom 10,5-kV-Inselbetrieb in den Normalbetrieb sind im THD-Wert am Messpunkt PCC Spitzen zu erkennen. Diese Spitzen könnten mit dem Einschaltvorgang der leerlaufenden Regeltransformatoren zusammenhängen, da es durch den sogenannten „Rusheffekt“ zu einer erhöhten Oberschwingungs-Gesamtverzerrung kommen kann.

4.2.3.2 20-kV-Inselnetzbetrieb

In Abbildung 4.16 sind die THD-Werte der Phasenspannungen U_{L1} jeweils an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2 über einen Zeitraum von über vier Stunden vom 18. Juni 2020 dargestellt. In diesem Zeitraum wurde das Industrienetz im 20-kV-Inselnetz betrieben. Die Start- und Endzeit des 20-kV-Inselnetzbetriebes sind in Tabelle 4.5 angegeben.

Tabelle 4.5: Start- und Endzeit des 20-kV-Inselnetzbetriebes

| 20-kV-Inselnetzbetrieb | Startzeit | Endzeit |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | 18.06.2020 um 16:21 Uhr | 18.06.2020 um 19:27 Uhr |

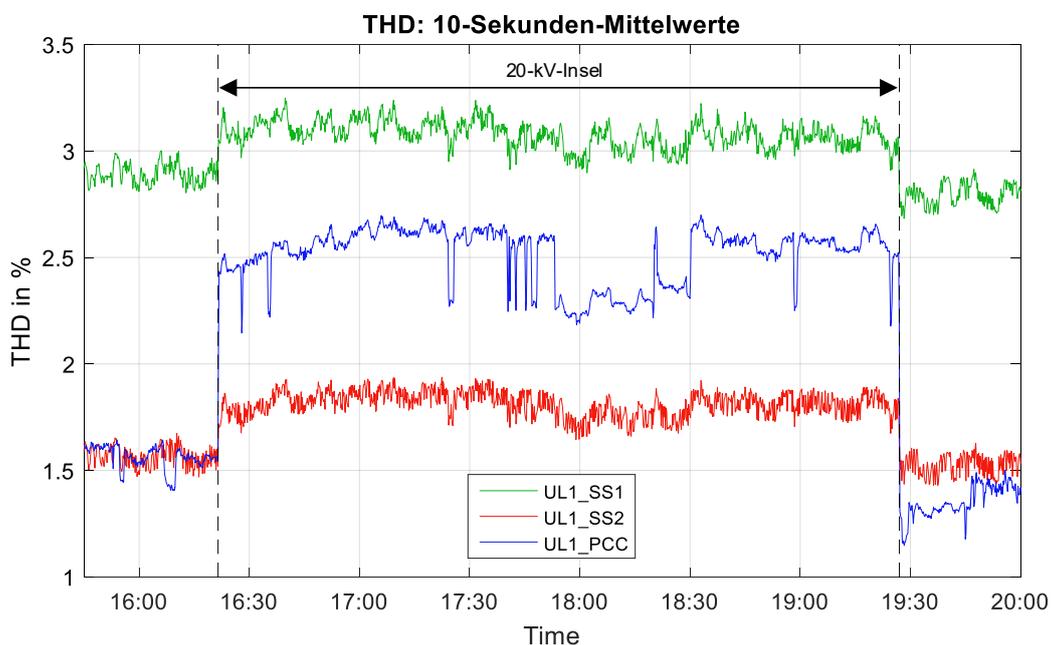


Abbildung 4.16: THD-Werte der Spannungen (U_{L1}) an PCC, SS1 und SS2 während des 20-kV-Inselnetzbetriebes

Im Vergleich zum Normalbetrieb steigt der THD-Wert während des 20-kV-Inselbetriebes an den Messpunkten SS1 und SS2 um ca. 10 % an. Dieser Anstieg des THD-Wertes ist auf die verringerte Kurzschlussleistung (um ebenfalls 10 %) an den Messpunkten SS1 und SS2 im Inselnetzbetrieb zurückzuführen.

Am Messpunkt PCC steigt der THD-Wert während des 20-kV-Inselnetzbetriebes um 60 % bis 70 % an. Im Vergleich zum Normalbetrieb ist die Kurzschlussleistung am Messpunkt PCC in diesem Betriebszustand um mehr als die Hälfte kleiner. Daher ist diese erhöhte Oberschwingungs-Gesamtverzerrung durchaus plausibel.

4.2.4 Zusammenfassung und Erkenntnisse

- Im Vergleich zum Normalbetrieb sind sowohl im 10,5-kV- als auch im 20-kV-Inselnetzbetrieb die Kurzschlussleistungen an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2 kleiner, da sich durch den Schaltzustand die Impedanz ändert. Während beiden Inselnetzbetrieben steigt der THD-Wert an den Messpunkten SS1 und SS2 im gleichen Ausmaß, wie die Kurzschlussleistung sinkt.
- Im 10,5-kV-Inselnetzbetrieb sind am Messpunkt PCC nur die Oberschwingungsquellen vom öffentlichen Netz und von der 20-kV-Seite des Industrienetzes wirksam. An den Messpunkten SS1 und SS2 liefern ausschließlich die Oberschwingungsquellen von der 10,5-kV-Seite des Industrienetzes einen Beitrag.
- Im 20-kV-Inselnetzbetrieb sind an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2 ausschließlich die Oberschwingungsquellen vom Industrienetz (10,5-kV- und 20-kV-Seite) wirksam.
- Am Messpunkt PCC sinkt der THD-Wert im 10,5-kV-Inselnetzbetrieb, während er im 20-kV-Inselnetzbetrieb deutlich ansteigt. Einerseits fallen im 10,5-kV-Inselnetzbetrieb die großen Oberschwingungsquellen des Industrienetzes weg. Andererseits sind im 20-kV-Inselnetzbetrieb ausschließlich die Oberschwingungsquellen vom gesamten Werk wirksam.

5 Analyse der Oberschwingungsemission

Die Definitionen und Zusammenhänge zur Beurteilung der Oberschwingungsemission wurden bereits im allgemeinen Teil dieser Arbeit beschrieben. In diesem Kapitel erfolgt eine Anwendung der beschriebenen Zusammenhänge mit Hilfe von gemessenen und berechneten Werten, die im Zuge der Vor-Ort-Messungen im Industrienetz ermittelt wurden.

5.1 Allgemeines

Die in der technischen Broschüre [3] von CIGRE/CIREC JWG C4.109 vorgestellte Methode wird im Rahmen dieser Arbeit angewendet und die Ergebnisse analysiert.

Für die Beurteilung der Oberschwingungsemission wird, wie bereits in Kapitel 2.6 gezeigt, das Ersatzschaltbild in Abbildung 5.1 verwendet. Der Bewertungspunkt ist hier der Messpunkt PCC und die betrachtete Anlage das Industrienetz.

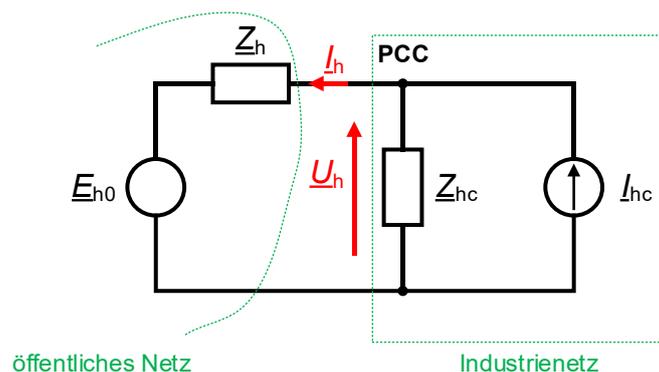


Abbildung 5.1: Ersatzschaltbild zur Definition von Oberschwingungs-Emissionspegeln
Quelle: In Anlehnung an [3]

Die Grundlage dieser Analyse sind die gemessenen und berechneten Parameter am Messpunkt PCC, an dem die zeitlichen Verläufe der Phasenspannungen (L1, L2 und L3) und der Ströme (L1 und L3) gemessen wurden. Für diese Untersuchung werden lediglich die Größen der Phase L1 betrachtet. Bei den erforderlichen Parametern handelt es sich um komplexe Größen mit einer Amplitude und einem Phasenwinkel.

Die beiden gemessenen Zeitverläufe (Strom und Spannung) wurden für die beiden ausgewählten Zeitpunkte einer FFT mit einer Fensterbreite von 10 Grundschwingungsperioden unterworfen. Das Ergebnis sind die Zeiger der Oberschwingungsspannung $\underline{U}_{hL1,PCC}$ und des Oberschwingungsstromes $\underline{I}_{hL1,PCC}$.

Die Oberschwingungsimpedanzen des öffentlichen Netzes $\underline{Z}_{h,PCC}$ sowie des Industrienetzes $\underline{Z}_{hc,PCC}$ wurden mit Hilfe der Netzberechnungssoftware PowerFactory von DigSILENT berechnet. Die Oberschwingungsimpedanzen wurden bereits in Kapitel 3.4 beschrieben.

Für die weiteren Darstellungen und Berechnungen werden die Größen folgendermaßen bezeichnet:

- $\underline{U}_h \triangleq \underline{U}_{hL1,PCC}$
- $\underline{I}_h \triangleq \underline{I}_{hL1,PCC}$
- $\underline{Z}_h \triangleq \underline{Z}_{h,PCC}$
- $\underline{Z}_{hc} \triangleq \underline{Z}_{hc,PCC}$

Zum einen wird dadurch die Schreibweise erleichtert und zum anderen besteht dadurch eine Korrespondenz zu den ursprünglichen Größen in der technischen Broschüre (CIGRE/CIRED JWG C4.109).

Anmerkung: Der Strom I_{L1} am Messpunkt PCC wurde so gemessen, dass die Wirkleistung in Richtung Industrienetz positiv gezählt wird. Das heißt, der Pfeil des Stromes I_h würde in Abbildung 5.1 nach rechts zeigen. Um die Konformität mit der technischen Broschüre beizubehalten, wurde der Strom für die Berechnungen um 180° gedreht.

Anmerkung: Die in diesem Kapitel dargestellten Zeiger sind auf den Winkel der Oberschwingungsspannung $\underline{U}_{hL1,PCC}$ (bzw. \underline{U}_h) bezogen. Das heißt, der Spannungszeiger \underline{U}_h hat immer einen korrigierten Winkel von 0° (siehe Kapitel 3.5.4.2).

Im Speziellen werden die **5. Oberschwingung** und die **11. Oberschwingung** am Messpunkt **PCC** (Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Netz) untersucht, wobei es sich hier um Oberschwingungen im Gegensystem handelt, siehe Tabelle 2.1.

In Abbildung 5.2 ist der Verlauf der Beträge von \underline{U}_h und \underline{E}_{hc} der 5. Oberschwingung über den Beobachtungszeitraum von zwei Wochen dargestellt. Dabei handelt es sich um 10-Minuten-Mittelwerte. Für die Darstellung von $|\underline{E}_{hc}|$ wurden die 10-Minuten-Mittelwerte des Stromes $|\underline{I}_h|$ mit dem Betrag der Oberschwingungsimpedanz des Netzes $|\underline{Z}_h|$ multipliziert, wie es laut Formel (2-18) allgemein für die Zeiger beschrieben ist.



Abbildung 5.2: Verlauf der Beträge von \underline{U}_h und \underline{E}_{hc} der 5. Oberschwingung über zwei Wochen

Ein auffälliges Merkmal in dieser Abbildung sind die schwankenden Differenzen zwischen den beiden Kurven über den gesamten Verlauf hinweg. Die Differenzen nehmen tagsüber zu während sie nachts näher zusammenliegen. Dieses Verhalten soll für den rot eingekreisten Bereich, der in Abbildung 5.3 vergrößert dargestellt ist, näher untersucht werden. In dieser Abbildung sind die zu untersuchenden Zeitpunkte „Nacht“ und „Tag“ hervorgehoben. In der vergrößerten Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass die Kurven nachts näher zusammenliegen und tagsüber eine größere Differenz aufweisen.

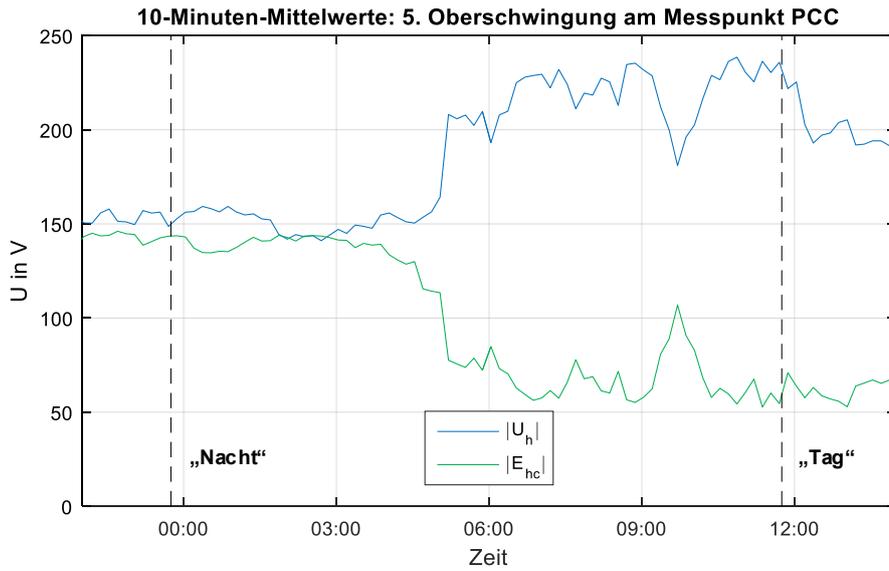


Abbildung 5.3: Verlauf der Beträge von \underline{U}_h und \underline{E}_{hc} der 5. Oberschwingung; Nacht und Tag

In der Abbildung 5.4 sind die Beträge der gemessenen Oberschwingungsspannung \underline{U}_h und des berechneten Oberschwingungs-Emissionspegels \underline{E}_{hc} der 11. Oberschwingung über zwei Wochen zu sehen. Der rot markierte Bereich ist in der Abbildung 5.5 vergrößert dargestellt.

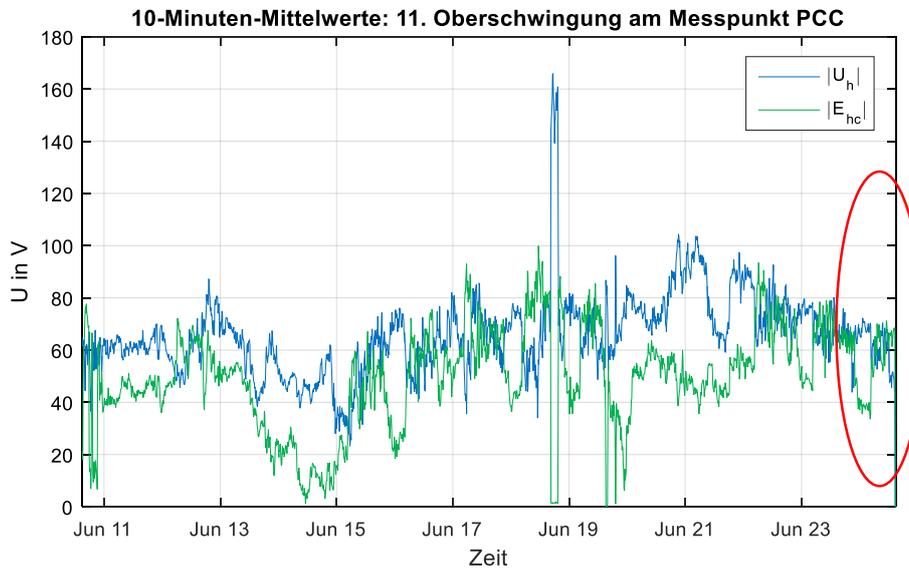


Abbildung 5.4: Verlauf der Beträge von \underline{U}_h und \underline{E}_{hc} der 11. Oberschwingung über zwei Wochen

Die beiden Kurven in Abbildung 5.5 weisen in der Nacht eine größere Differenz auf und liegen tagsüber näher zusammen. Im Vergleich zur 5. Oberschwingung (Abbildung 5.3) ist das umgekehrt der Fall.

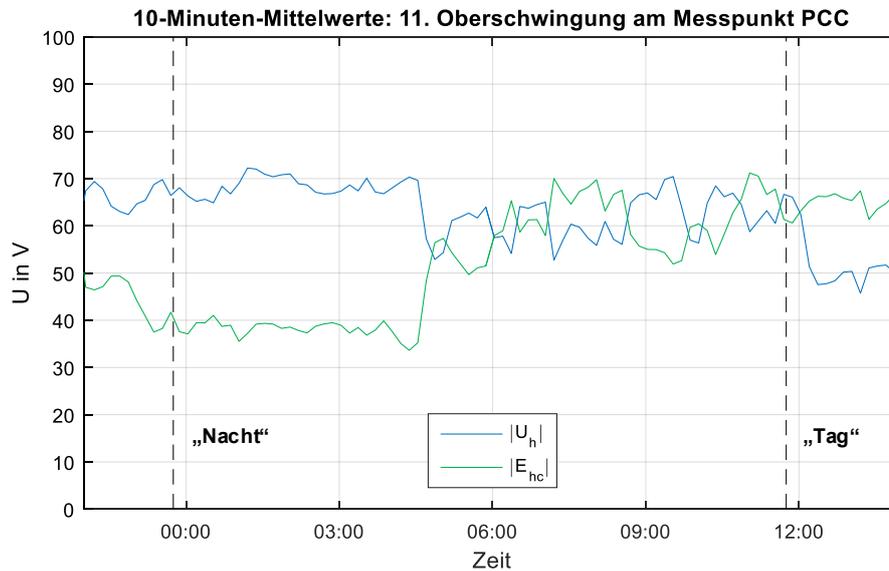


Abbildung 5.5: Verlauf der Beträge von \underline{U}_h und \underline{E}_{hc} der 11. Oberschwingung; Nacht und Tag

Die Untersuchung wird somit auf zwei verschiedene Zeitpunkte während des Beobachtungszeitraumes fokussiert. Dabei handelt es sich um einen Zeitpunkt am Tag und um einen Zeitpunkt in der Nacht. Die beiden Zeitpunkte sind in der Tabelle 5.1 angegeben.

Tabelle 5.1: Ausgewählte Zeitpunkte für die OS-Analyse

| Zeitpunkt | Datum | Uhrzeit |
|-----------|------------|----------|
| Nacht | 23.06.2020 | 23:45:00 |
| Tag | 24.06.2020 | 11:45:00 |

Für die beiden Zeitpunkte „Nacht“ und „Tag“ werden die Zeiger aller relevanten Größen in Zeigerdiagrammen dargestellt und analysiert.

5.2 Betriebszustand

Das Industrienetz wurde während der beiden Zeitpunkte „Nacht“ und „Tag“ (siehe Tabelle 5.1) im Betriebszustand 2 (siehe Tabelle 3.1) betrieben. Es bestand eine Anbindung an das öffentliche Netz und der Synchrongenerator DT4 war außer Betrieb. Die beiden großen Verbraucher PM8 und RB4 waren zu diesen Zeitpunkten im Normalbetrieb (siehe Abbildung 3.2). Somit sind die Leistungen sowohl der Erzeuger als auch der Verbraucher am Tag und in der Nacht gleich.

In Abbildung 5.6 sind die Stromzeiger der 5. Oberschwingung von zwei Verbrauchern und zwei Erzeugern zu sehen. Die Ergebnisse stammen aus den Messdaten der Messtation 2 (SS1 und SS2). Die zwei Verbraucher sind die bereits genannte Papiermaschine (PM8) und der Laugenverbrennungskessel (RB4). Bei den Erzeugern handelt es sich um die beiden größten Synchrongeneratoren (DT5 und DT7) im Industrienetz. Die Phasenwinkel wurden bereits korrigiert, das heißt, die Stromzeiger sind bezogen auf den Winkel der Phasenspannung \underline{U}_{L1} mit 0° .

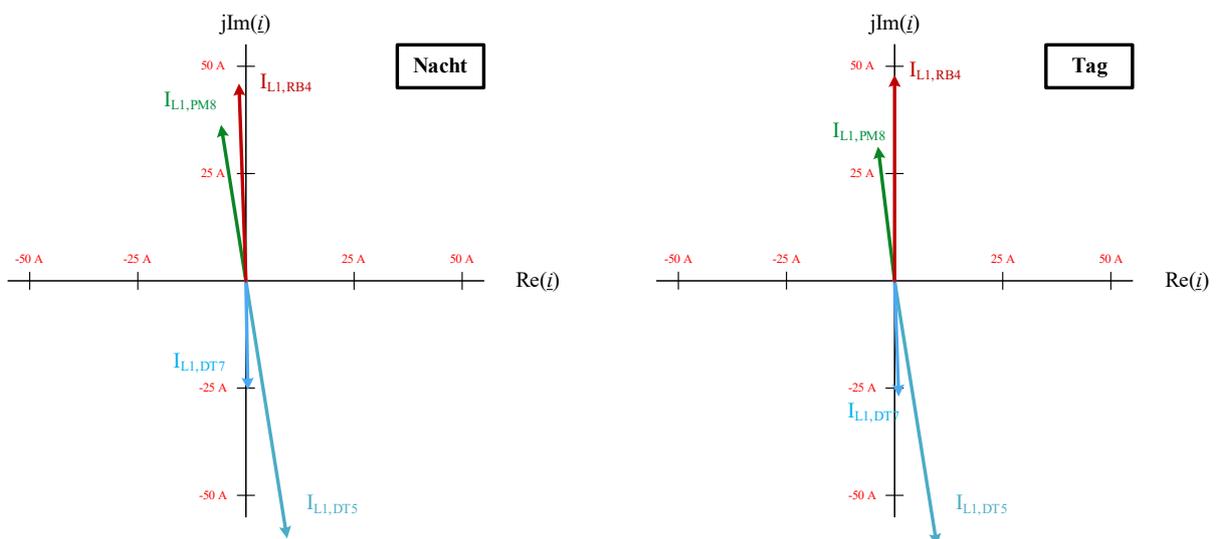


Abbildung 5.6: Stromzeiger der 5. Oberschwingung von Verbraucher (PM8 und RB4) und Erzeuger (DT5 und DT7); Nacht vs. Tag

In diesem Zeigerdiagramm ist ersichtlich, dass die Stromzeiger der Verbraucher PM8 und RB4 in die gleiche Richtung stehen. Sie haben evtl. gleiche Umrichter, die zu den ähnlichen Winkeln führen. Die Stromzeiger der Erzeuger DT5 und DT7 stehen auch nahezu in die gleiche Richtung, jedoch entgegengesetzt zu den Verbrauchern. Sie kompensieren einen großen Anteil der 5. Oberschwingung, den die Verbraucher PM8 und RB4 erzeugen. Um einen resultierenden Strom der 5. Oberschwingung zu ermitteln, müssten alle Abgänge der betrachteten Sammelschienen gemessen und ausgewertet werden. Das gleiche gilt natürlich auch für alle anderen Oberschwingungen. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Stromzeiger der 5. Oberschwingung sowohl in der Nacht als auch am Tag von der gleichen Größenordnung sind.

5.3 Tabellen der gemessenen und berechneten Oberschwingungen

Im Folgenden werden die Tabellen zur Auswertung der Oberschwingungsemission für die 5. und die 11. Oberschwingung gezeigt. Es sind zum einen die gegebenen Größen (Tabelle 5.2 und Tabelle 5.4) und zum anderen die daraus berechneten Größen (Tabelle 5.3 und Tabelle 5.5) aufgelistet.

5.3.1 Tabellen zur Auswertung der 5. Oberschwingung

Tabelle 5.2: Gegebene Größen; 5. Oberschwingung

| Zeitpunkt | h | Z_h | | Z_{hc} | | U_h | | I_h | |
|-----------|---|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|----------|
| | | Ω | $^\circ$ | Ω | $^\circ$ | V | $^\circ$ | A | $^\circ$ |
| Nacht | 5 | 10,63 | 88 | 11,12 | 86 | 155 | 0 | 13,2 | -51 |
| Tag | | | | | | 212 | 0 | 7,6 | -55 |

Tabelle 5.3: Berechnete Größen; 5. Oberschwingung

| Zeitpunkt | h | I_{hc} | | E_{hc} | | E_{h0} | | I_h' | | I_h'' | |
|-----------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|---------|----------|
| | | A | $^\circ$ | V | $^\circ$ | V | $^\circ$ | A | $^\circ$ | A | $^\circ$ |
| Nacht | 5 | 25,9 | -69 | 141 | 36 | 93 | -64 | 13,2 | -70 | 4,3 | 29 |
| Tag | | 25,9 | -77 | 81 | 33 | 151 | -17 | 13,2 | -78 | 6,9 | 76 |

5.3.2 Tabellen zur Auswertung der 11. Oberschwingung

Tabelle 5.4: Gegebene Größen; 11. Oberschwingung

| Zeitpunkt | h | Z_h | | Z_{hc} | | U_h | | I_h | |
|-----------|----|----------|----------|----------|----------|-------|----------|-------|----------|
| | | Ω | $^\circ$ | Ω | $^\circ$ | V | $^\circ$ | A | $^\circ$ |
| Nacht | 11 | 24,78 | 89 | 26,48 | 85 | 67 | 0 | 1,44 | -85 |
| Tag | | | | | | 63 | 0 | 2,46 | -122 |

Tabelle 5.5: Berechnete Größen; 11. Oberschwingung

| Zeitpunkt | h | I_{hc} | | E_{hc} | | E_{h0} | | I_h' | | I_h'' | |
|-----------|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|---------|----------|
| | | A | $^\circ$ | V | $^\circ$ | V | $^\circ$ | A | $^\circ$ | A | $^\circ$ |
| Nacht | 11 | 3,95 | -85 | 36 | 3,8 | 31 | -4,4 | 2 | -87 | 0,6 | 89 |
| Tag | | 4,58 | -104 | 61 | -33 | 36 | 70 | 2,4 | -106 | 0,7 | 163 |

5.4 Berechnungsbeispiel

In diesem Abschnitt wird für die berechneten Größen jeweils ein Berechnungsbeispiel angeführt. Dafür werden die in Tabelle 5.2 gegebenen Werte der 5. Oberschwingung ($h = 5$), Zeitpunkt „Tag“, herangezogen. Die benötigten Formeln wurden bereits in Kapitel 2.6 angegeben. In den Berechnungen werden die komplexen Größen in Exponentialform angegeben. Für die imaginäre Einheit wird, wie in der Elektrotechnik üblich, der Buchstabe j verwendet.

5.4.1 Berechnung von \underline{E}_{hc}

Zur Berechnung des Oberschwingungs-Emissionspegels \underline{E}_{hc} wird die Formel (2-18) verwendet. Dabei werden die aus Simulation erhaltene Oberschwingungsimpedanz des öffentlichen Netzes \underline{Z}_h und der Zeiger des gemessenen Oberschwingungsstromes \underline{I}_h eingesetzt.

$$\underline{E}_{hc} = \underline{Z}_h \cdot \underline{I}_h = 10,63 \Omega e^{j88^\circ} \cdot 7,6 A e^{-j55^\circ} = 80,79 V e^{-j33^\circ} \cong \mathbf{81 V e^{-j33^\circ}} \quad (5-1)$$

5.4.2 Berechnung von \underline{E}_{h0}

Die Hintergrund-Oberschwingungsspannung \underline{E}_{h0} kann durch Umformung von Formel (2-18) ermittelt werden. Dafür werden die gemessene Oberschwingungsspannung \underline{U}_h und der durch die Berechnung (5-1) erhaltene Oberschwingungs-Emissionspegel \underline{E}_{hc} in die Formel (5-2) eingesetzt.

$$\underline{E}_{hc} = \underline{U}_h - \underline{E}_{h0} \Leftrightarrow \underline{E}_{h0} = \underline{U}_h - \underline{E}_{hc} \quad (5-2)$$

$$\underline{E}_{h0} = \underline{U}_h - \underline{E}_{hc} = 212 V e^{j0^\circ} - 80,79 V e^{-j33^\circ} = 150,8 V e^{-j16,9^\circ} \cong \mathbf{151 V e^{-j17^\circ}} \quad (5-3)$$

5.4.3 Berechnung von \underline{I}_{hc}

Der Zeiger \underline{I}_{hc} , der die vorhandenen Oberschwingungsquellen im Industrienetz repräsentiert, kann mit Hilfe von Formel (2-22) berechnet werden. Es werden die durch Messung erhaltenen Größen \underline{U}_h und \underline{I}_h , sowie die durch Simulation erhaltene Oberschwingungsimpedanz des Industrienetzes \underline{Z}_{hc} eingesetzt.

$$\underline{I}_{hc} = \underline{I}_h + \frac{\underline{U}_h}{\underline{Z}_{hc}} = 7,6 A e^{-j55^\circ} + \frac{212 V e^{j0^\circ}}{11,12 \Omega e^{j86^\circ}} = 25,87 A e^{-j77,3^\circ} \cong \mathbf{25,9 A e^{-j77^\circ}} \quad (5-4)$$

5.4.4 Berechnung der Komponenten \underline{I}_h' und \underline{I}_h''

In Formel (2-21) ist zu sehen, dass der Strom \underline{I}_h aus den Komponenten \underline{I}_h' und \underline{I}_h'' zusammengesetzt ist. Für die Berechnung von \underline{I}_h' werden der Strom \underline{I}_{hc} aus Berechnung (5-4) sowie die durch Simulation erhaltenen Oberschwingungsimpedanzen \underline{Z}_h und \underline{Z}_{hc} , in Formel (2-19) eingesetzt.

$$\underline{I}_h' = \underline{I}_{hc} \cdot \frac{\underline{Z}_{hc}}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_{hc}} = 25,87 \text{ A } e^{-j77,3^\circ} \cdot \frac{11,12 \text{ } \Omega \text{ } e^{j86^\circ}}{10,63 \text{ } \Omega \text{ } e^{j88^\circ} + 11,12 \text{ } \Omega \text{ } e^{j86^\circ}} = 13,22 \text{ A } e^{-j78,3^\circ} \quad (5-5)$$

$$\cong 13,2 \text{ A } e^{-j78^\circ}$$

Für die Berechnung von \underline{I}_h'' werden die Hintergrund-Oberschwingungsspannung \underline{E}_{h0} aus Berechnung (5-3) sowie die Oberschwingungsimpedanzen \underline{Z}_h und \underline{Z}_{hc} , in Formel (2-20) eingesetzt.

$$\underline{I}_h'' = -\frac{\underline{E}_{h0}}{\underline{Z}_h + \underline{Z}_{hc}} = -\frac{150,8 \text{ V } e^{-j16,9^\circ}}{10,63 \text{ } \Omega \text{ } e^{j88^\circ} + 11,12 \text{ } \Omega \text{ } e^{j86^\circ}} = 6,93 \text{ A } e^{j76,1^\circ} \cong 6,9 \text{ A } e^{j76^\circ} \quad (5-6)$$

5.5 Ergebnisse der 5. Oberschwingung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Oberschwingungsemission für die 5. Oberschwingung präsentiert.

In der Abbildung 5.7 sind die Zeiger der 5. Oberschwingung für die ausgewählten Zeitpunkte „Nacht“ (links) und „Tag“ (rechts) zu sehen. Es sind die Zeiger für die gemessenen Größen (\underline{U}_h , \underline{I}_h) sowie die daraus berechneten Größen (\underline{E}_{hc} , \underline{E}_{h0} und \underline{I}_{hc}) dargestellt. Die Werte von allen dargestellten Zeigern sind in der Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 zu finden.

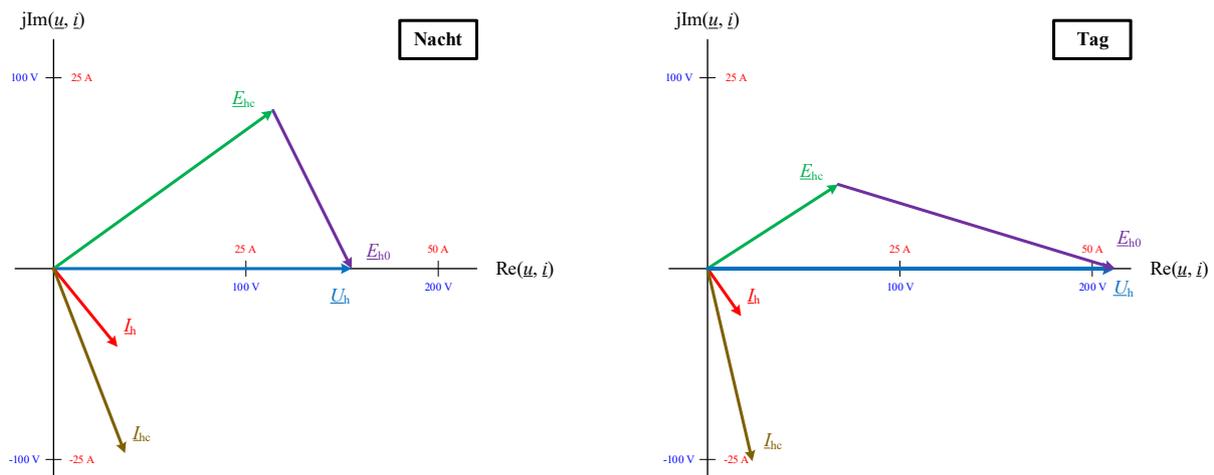


Abbildung 5.7: Zeigerdiagramme für die 5. Oberschwingung; Emissionspegel

Der aus der Messung kommende Spannungszeiger \underline{U}_h ist in der Nacht kleiner als am Tag. Für den Zeiger des Oberschwingungs-Emissionspegels \underline{E}_{hc} ist es umgekehrt der Fall.

Der berechnete Stromzeiger \underline{I}_{hc} , der die vorhandenen Oberschwingungsquellen im Industrienetz repräsentiert, ist in der Nacht und am Tag gleich (Betrag und Winkel). Das bedeutet, dass sowohl in der Nacht als auch am Tag dieselben Oberschwingungserzeuger im Industrienetz vorhanden sind.

Der Beitrag vom öffentlichen Netz hingegen ist in der Nacht und am Tag unterschiedlich groß, da der Zeiger der berechneten Hintergrund-Oberschwingungsspannung \underline{E}_{h0} am Tag deutlich größer ist als in der Nacht. Ein Grund dafür könnte sein, dass einige Anlagen im öffentlichen Netz nur am Tag in Betrieb sind. Das bedeutet, dass tagsüber die Emission von anderen Verursachern im Netz deutlich größer ist als in der Nacht.

Es ist außerdem ersichtlich, dass der Zeiger des gemessenen Oberschwingungsstromes \underline{I}_h in der Nacht größer ist als am Tag. In der Abbildung 5.8 ist die Zusammensetzung des gemessenen Stromes \underline{I}_h aus den berechneten Komponenten \underline{I}_h' und \underline{I}_h'' dargestellt.

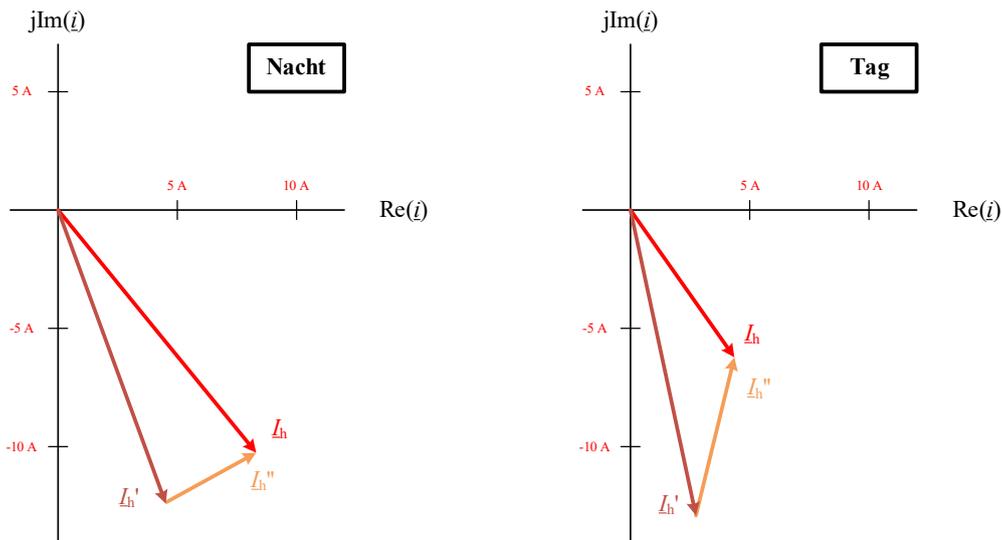


Abbildung 5.8: Zeigerdiagramme für die 5. Oberschwingung; Zusammensetzung von I_h

Der Betrag des gemessenen Stromzeigers I_h ändert sich stark, obwohl die Emission vom Werk tagsüber und nachts gleich bleibt. Der Betrag der Komponente I_h' ist beide Male 13,2 A, der Betrag von I_h ist hingegen am Tag 7,6 A und in der Nacht 13,2 A.

Der Zeiger I_h' ist auch in diesem Diagramm sowohl tagsüber als auch nachts verhältnismäßig gleich groß. Es ist außerdem zu erkennen, dass der Beitrag des Industrienetzes (Zeiger I_h') an beiden Zeitpunkten dominant ist.

Der Zeiger der zweiten Komponente I_h'' ist am Tag und in der Nacht unterschiedlich. Am Tag ist der Betrag dieses Zeigers größer als in der Nacht und hat zudem einen anderen relativen Winkel. Wie bereits erwähnt, reflektiert diese Komponente die Wechselwirkung zwischen den vorhandenen Oberschwingungsquellen im öffentlichen Netz und der Oberschwingungsimpedanz des Industrienetzes.

Die Winkel der beiden berechneten Komponenten I_h' und I_h'' haben einen großen Einfluss auf den resultierenden Stromzeiger I_h . Sie können sowohl zu einer Vergrößerung des gemessenen Oberschwingungsstromes I_h als auch zu einer Verringerung führen.

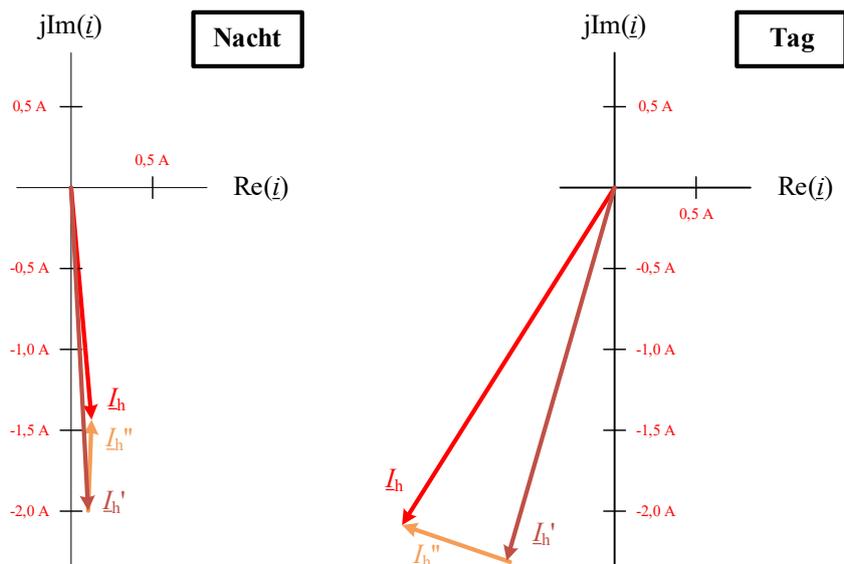


Abbildung 5.10: Zeigerdiagramme für die 11. Oberschwingung; Zusammensetzung von I_h

Die beiden Komponenten I_h' und I_h'' sind am Tag und in der Nacht vom Betrag her jeweils annähernd gleich groß. Es sind aber deutliche Unterschiede der relativen Winkeln erkennbar.

Durch die Zusammensetzung der beiden Komponenten wird der resultierende Stromzeiger I_h auf der einen Seite am Tag größer und auf der anderen Seite in der Nacht kleiner.

Der Beitrag der Oberschwingungsquellen aus dem Industrienetz (Komponente I_h') ist auch für die 11. Oberschwingung dominant.

5.7 Zusammenfassung und Erkenntnisse

- Die Leistungen der Erzeuger und der Verbraucher des Industrienetzes sind sowohl am Tag als auch in der Nacht gleich, was bedeutet, dass im Industrienetz nahezu dieselben Oberschwingungserzeuger am Tag und in der Nacht vorhanden sind.
- Tagsüber ist der Beitrag von den Oberschwingungsquellen der 5. Oberschwingung im öffentlichen Netz deutlich größer als in der Nacht. Es sind am Tag zusätzliche Verbraucher im Netz in Betrieb (z. B. andere Industriebetriebe), die einen Beitrag zur Oberschwingungsemission leisten und somit den Emissionspegel erhöhen können. Es ist aber auch zu beachten, dass Oberschwingungsspannungen oder -ströme, die von anderen Anlagen erzeugt werden, nicht unbedingt in Phase sein müssen [23].
- Der Beitrag der Oberschwingungsquellen im Industrienetz ist im Vergleich zum Beitrag der Oberschwingungsquellen im öffentlichen Netz dominant. Der Betrag von I_h' ist sowohl für die 5. Oberschwingung als auch für die 11. Oberschwingung verhältnismäßig größer als der Betrag von I_h'' . Dies gilt für die beiden untersuchten Zeitpunkte „Nacht“ und „Tag“.
- Der Betrag des gemessenen Stromzeiger I_h ändert sich stark, obwohl die Emission vom Werk tagsüber und nachts gleich bleibt. Diese Aussage gilt sowohl für die 5. Oberschwingung als auch für die 11. Oberschwingung. Das öffentliche Netz spielt offensichtlich eine große Rolle in Bezug auf die Ergebnisse am Messpunkt PCC.
- Die Ströme, die an der Übergabestelle zum öffentlichen Netz gemessen werden, sind nicht unbedingt aussagekräftig für das, was sich im Industrienetz abspielt. Bei der Untersuchung der Oberschwingungsemission müssen die einzelnen Komponenten des gemessenen Stromzeigers I_h berücksichtigt werden. Eine alleinige Strommessung am Verknüpfungspunkt (PCC) ist für die Bewertung der Oberschwingungsemission im Industrienetz nicht zielführend. Das heißt, I_h' und I_h'' müssen auch untersucht werden, anstatt der alleinigen Untersuchung von I_h .
- Die Oberschwingungen im öffentlichen Netz können andere Winkel als die Oberschwingungen im Industrienetz haben, was zu einer Verringerung oder Vergrößerung der Oberschwingungsemission am Messpunkt zur Folge hat. Die Phasenwinkel der einzelnen Komponenten I_h' und I_h'' spielen eine große Rolle für den gemessenen Strom I_h . Durch die Überlagerung der beiden Komponenten kann es am Messpunkt PCC (Strom I_h) ganz unterschiedliche Ergebnisse geben. Dabei kann aber keine qualitative Aussage bzgl. der Oberschwingungsemission im Industrienetz getroffen werden.

- Durch die vorhandene Eigenerzeugung der Synchrongeneratoren im Werk ist eine kleine Impedanz des Industrienetzes vorhanden (im Vergleich, wenn keine Synchrongeneratoren vorhanden wären).
- Der Ansatz, dass durch die Strommessung am Verknüpfungspunkt PCC ein Wert für die Oberschwingungsemission des Industrienetzes erhalten wird, ist mit Vorsicht zu genießen, wenn die Impedanz vom Industrienetz vergleichsweise klein ist. In diesem Fall ist sie nahezu gleich groß wie die Netzimpedanz.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Oberschwingungs-Spannungspegel (u_h in %) sowie der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung (THD_u in %) an relevanten Netzpunkten im Industrienetz des Papier- und Zellstoffwerkes Mondi Frantschach GmbH. Zum einen werden die Ergebnisse mit Grenzwerten in den entsprechenden Normen gegenübergestellt. Zum anderen wird das Verhalten der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung bei unterschiedlichen Betriebszuständen (Inselnetzbetrieb) untersucht. Ein weiteres Ziel ist die Analyse der Oberschwingungsemission am Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Netz (PCC) in Anlehnung an die technische Broschüre von CIGRE/CIRED JWG C4.109 [3].

Für die Umsetzung der Ziele wurden im Industrienetz Vor-Ort-Messungen über einen Beobachtungszeitraum von zwei Wochen durchgeführt. Die Messungen erfolgten an einem Verknüpfungspunkt zum öffentlichen Netz (Messstation 1, PCC) und an den anlageninternen Anschlusspunkten (Messstation 2, SS1 und SS2). Es wurden dabei die zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung gemessen, gespeichert und anschließend mit der Entwicklungsumgebung MATLAB ausgewertet. Des Weiteren wurden die Kurzschlussleistungen sowie die Oberschwingungsimpedanzen an den Messpunkten mit der Netzberechnungssoftware PowerFactory von DlgSILENT berechnet.

Die Untersuchung der Oberschwingungs-Spannungspegel bis zur 40. Oberschwingung sowie der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung erfolgt an den Messpunkten PCC, SS1 und SS2. In den Balkendiagrammen werden die Ergebnisse mit den Grenzwerten in den dafür bestimmten Normen gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass an allen untersuchten Messpunkten die charakteristischen Oberschwingungen von Sechspuls-Brückenschaltungen (Ordnung $6n \pm 1$) dominant sind.

Bei der wochenweisen Untersuchung der Oberschwingungs-Spannungspegel wurde gezeigt, dass alle 95%-Quantile der ermittelten Oberschwingungs-Spannungspegel und Oberschwingungs-Gesamtverzerrung innerhalb der festgelegten Grenzen der für die Messpunkte vorgesehenen Normen liegen. Für den Messpunkt PCC wurden die Pegel mit den Werten in der Norm EN 61000-2-12 und EN 50160 verglichen. Die Pegel der Messpunkte SS1 und SS2 wurden mit den Werten in der Norm EN 61000-2-4 (Klasse 2 und Klasse 3) gegenübergestellt. Die Oberschwingungs-Spannungspegel von Woche 1 sind i. A. kleiner als die von Woche 2, liegen aber noch immer deutlich unter den jeweiligen Grenzwerten. Der Grund dafür ist ein länger andauernder Stillstand von großen Oberschwingungsverursachern in der Woche 1. In Woche 2 waren diese wieder im Normalbetrieb. Die Oberschwingungs-Spannungspegel und die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung am Messpunkt SS1 sind generell größer als die des Messpunktes SS2. Dies ist auf die unterschiedliche Aufteilung der Lasten auf die beiden Sammelschienen SS1 und SS2 zurückzuführen. Während des Beobachtungszeitraumes waren die dominanten Oberschwingungsquellen an SS1 angeschlossen, was die höheren Pegel zur Folge hat.

Das Industrienetz wurde im Laufe des Beobachtungszeitraumes teilweise im Inselnetz betrieben. Einerseits gibt es die Variante 10,5-kV-Inselnetzbetrieb, wo nur die 10,5-kV-Seite des Werks im Inselnetzbetrieb ist und die 20-kV-Seite vom öffentlichen Netz versorgt wird. Andererseits gibt es die Variante 20-kV-Inselnetzbetrieb, wo das gesamte Industrienetz im Inselnetzbetrieb ist und vom öffentlichen Netz getrennt ist. In beiden Varianten des Inselnetzbetriebes sind die Kurzschlussleistungen an den untersuchten Messpunkten PCC, SS1 und SS2 kleiner als im Normalbetrieb. Bei beiden Varianten des Inselnetzbetriebes steigt die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung an den Messpunkten SS1 und SS2 im annähernd gleichen Ausmaß wie die Kurzschlussleistung an diesen Messpunkten sinkt. Am Messpunkt PCC hingegen ist ein unterschiedliches Verhalten erkennbar. Im 10,5-kV-Inselnetzbetrieb sinkt der Wert für die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung während dieser im 20-kV-Inselnetzbetrieb stark ansteigt. Durch die Schaltzustände im 10,5-kV-Inselnetzbetrieb fallen die wesentlichen Oberschwingungsverursacher vom Industrienetz weg und es verbleiben die Oberschwingungsquellen vom öffentlichen Netz und von der 20-kV-Seite des Werks. Im 20-kV-Inselnetzbetrieb sind die gesamten Oberschwingungsquellen vom Werk wirksam und die Oberschwingungsquellen vom öffentlichen Netz fallen weg.

In Anlehnung an die Methode von CIGRE/CIRED JWG C4.109 [3] wird die Oberschwingungsemission am Messpunkt PCC, der als Verknüpfungspunkt zwischen öffentlichem Netz und Industrienetz definiert ist, untersucht. Die Grundlage dafür sind die aus der Messung und Netzberechnung stammenden Größen \underline{U}_h , \underline{I}_h , \underline{Z}_h und \underline{Z}_{hc} . Mithilfe dieser Parameter werden dann die Größen \underline{E}_{hc} , \underline{E}_{h0} , \underline{I}_{hc} , \underline{I}_h' und \underline{I}_h'' berechnet. Bei der Gegenüberstellung der beiden Kurven \underline{U}_h und \underline{E}_{hc} für die 5. Oberschwingung und die 11. Oberschwingung ist tagsüber und nachts ein unterschiedliches Verhalten festzustellen. Die Differenzen der beiden Kurven sind für die 5. Oberschwingung am Tag größer als in der Nacht. Für die 11. Oberschwingung ist das umgekehrt der Fall, wo in der Nacht eine größere Differenz erkennbar ist. Die Analyse der Oberschwingungsemission wird daher speziell auf einen Zeitpunkt am Tag sowie einen Zeitpunkt in der Nacht fokussiert. Für diese beiden Zeitpunkte werden die Zeiger der 5. Oberschwingung und der 11. Oberschwingung untersucht.

Im Industrienetz sind am Tag sowie in der Nacht die gleichen Oberschwingungserzeuger wirksam, was durch die beiden Zeiger \underline{I}_{hc} und \underline{I}_h' veranschaulicht wird. Durch die Gegenüberstellung der Stromzeiger der 5. Oberschwingung von zwei großen Verbrauchern im Industrienetz (PM8 und RB4) kann diese Aussage bestätigt werden. Der Beitrag der Oberschwingungsquellen im Industrienetz ist im Vergleich zum Beitrag der Oberschwingungsquellen im öffentlichen Netz dominant, was durch eine Gegenüberstellung der beiden Zeiger \underline{I}_h' und \underline{I}_h'' zu sehen ist.

Am Tag ist der Beitrag des öffentlichen Netzes auf die Oberschwingungsemission der 5. Oberschwingung größer als in der Nacht. Hier ist der Hintergrund-Emissionspegel \underline{E}_{h0} am Tag deutlich größer als in der Nacht. Tagsüber sind zusätzliche Verbraucher im öffentlichen Netz in Betrieb (z. B. andere Industriebetriebe) und leisten somit einen Beitrag zur Oberschwingungsemission.

Die Oberschwingungen im öffentlichen Netz können generell andere Winkel als die Oberschwingungen im Industrienetz haben. Die Oberschwingungen am Verknüpfungspunkt (PCC) können durch die Überlagerung der Einzelwirkungen insgesamt vergrößert oder verkleinert werden. Der gemessene Zeiger des Oberschwingungsstromes I_h ist am Tag und in der Nacht unterschiedlich groß, obwohl im Industrienetz annähernd dieselben Oberschwingungsquellen wirksam sind. Eine Aufteilung des gemessenen Stromzeigers I_h in die beiden Komponenten I_h' und I_h'' bietet weitere Einblicke.

Die Komponente I_h' , die im Einklang mit den vorhandenen Oberschwingungsquellen im Industrienetz steht, ist tagsüber und in der Nacht annähernd gleich groß. Die Komponente I_h'' , die die Wechselwirkung zwischen den Oberschwingungsquellen im öffentlichen Netz und der Oberschwingungsimpedanz Z_{hc} des Industrienetzes reflektiert, weist durchaus unterschiedliche Beträge und Winkel auf. Durch die Überlagerung der beiden Komponenten kann der am Messpunkt PCC gemessene Stromzeiger I_h ganz unterschiedliche Ergebnisse liefern. Eine alleinige Strommessung am Messpunkt PCC liefert daher keine zielführende Bewertung der Oberschwingungsemission im Industrienetz, wenn die Einzelwirkungen nicht untersucht werden. Daher ist die Untersuchung der einzelnen Komponenten I_h' und I_h'' empfehlenswert. Inwiefern sich die Oberschwingungsquellen des öffentlichen Netzes und des Industrienetzes überlagern, bedarf einer weiteren Untersuchung.

Durch die vorhandene Eigenerzeugung im Industrienetz ist wegen der höheren Kurzschlussleistung eine kleinere Netzimpedanz vorhanden (im Vergleich ohne Eigenerzeugung). Die Oberschwingungsimpedanz des Industrienetzes ist bis zu einer Frequenz von 550 Hz (11. Oberschwingung) annähernd in der gleichen Größenordnung wie die Oberschwingungsimpedanz des öffentlichen Netzes. Dies sollte bei weiteren Untersuchungen nicht außer Acht gelassen werden.

Die gemessenen Stromzeiger der Erzeuger (DT5 und DT7) zeigen für die 5. Oberschwingung in die entgegengesetzte Richtung wie die Verbraucher (PM8 und RB4). Das führt dazu, dass sie einen großen Anteil der 5. Oberschwingung, den die Verbraucher erzeugen, kompensieren. Um einen resultierenden Strom der 5. Oberschwingung (oder jeder anderen Oberschwingungsordnung) zu erhalten, müssten alle Abgänge der betrachteten Sammelschiene (alle Erzeuger, Verbraucher und vorhandene Kompensationsanlagen) gemessen und ausgewertet werden. Somit könnte untersucht werden, welche Oberschwingungen im Industrienetz kompensiert werden und welche ins öffentliche Netz rückwirken.

7 Literaturverzeichnis

- [1] H. Renner and M. Sakulin, "Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit," Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2008.
- [2] "Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen," ÖVE/ÖNORM EN 50160, no. 2011-03-01, 2011.
- [3] "Review of Disturbance Emission Assessment Techniques," CIGRE JWG C4.109, 2011.
- [4] H. Renner, *Beitrag zur Problematik der Oberschwingungsimpedanz- und Oberschwingungsemissionsermittlung in elektrischen Energieversorgungsnetzen*. DBV-Verlag, 1995.
- [5] F. C. De La Rosa, *Harmonics, power systems and smart grids: Second edition*. CRC Press, 2015.
- [6] A. Kamenka, "Sechs Themen rund um Oberschwingungen und die Netzqualität in Stromversorgungsnetzen," *Whitepaper der Schaffner Grup.*, 2014.
- [7] G. Höck, "'Dirty Power' - Oberschwingungen durch nichtlineare Verbraucher," 2006. https://www.gossenmetrawatt.com/gmc/resources/allg/fachartikel/fa-pq-160315-d_dirty-power.pdf (accessed Feb. 01, 2021).
- [8] D. Oeding and B. R. Oswald, *Elektrische Kraftwerke und Netze*, 8. Auflage. Springer, 2016.
- [9] L. Fickert and H. Renner, "Elektrische Energiesysteme 1," Institut für Elektrische Anlagen, Technische Universität Graz, 2008.
- [10] R. Schürhuber, "Elektrische Energiesysteme 1 - Modaltransformationen in der elektrischen Energietechnik," Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Technische Universität Graz, 2018.
- [11] J. Arrillaga and N. R. Watson, *Power System Harmonics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [12] D. Chapman, "Leitfaden Netzqualität: Oberschwingungen - Ursachen und Auswirkungen," 2002. Accessed: Feb. 01, 2021. [Online]. Available: www.kupferinstitut.de.
- [13] H. Bacher, "Elektrische Maschinen für die Energietechnik," Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen, Technische Universität Graz, 2017.
- [14] "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-7: Prüf- und Messverfahren – Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten," ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-7, no. 2010-02-01, 2010.
- [15] M. Meyer, *Signalverarbeitung*. 2017.

- [16] M. Werner, *Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB®*. 2012.
- [17] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Zeitdiskrete Signalverarbeitung*. 2015.
- [18] E. O. Brigham, *The fast fourier transform and its applications*. Prentice-Hall, 1988.
- [19] "Network modelling for harmonic studies," CIGRE JWG C4/B4.38, 2019.
- [20] "Guide for assessing the network harmonic impedance," CIGRE WG CC-02 (CIGRE 36.05/CIRE2), 1996.
- [21] "IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Welcome." <https://www.electropedia.org/> (accessed Apr. 04, 2021).
- [22] "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 2-4: Umgebungsbedingungen – Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen in Industrieanlagen," *ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-4*, no. 2003-07-01, 2003.
- [23] "Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems," *IEC/TR 61000-3.6*, no. Edition 2.0, 2008.
- [24] "Homepage | IEC." <https://www.iec.ch/homepage> (accessed Feb. 12, 2021).
- [25] "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 4-30: Prüf- und Messverfahren – Verfahren zur Messung der Spannungsqualität," *ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-30*, no. 2016-02-01, 2016.
- [26] "Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) Teil 2-12: Umgebungsbedingungen – Verträglichkeitspegel für niederfrequente leitungsgeführte Störgrößen und Signalübertragung in öffentlichen Mittelspannungsnetzen," *ÖVE/ÖNORM EN 61000-2-12*, no. 2004-03-01, 2004.
- [27] W. Renhart, "Ergänzende Unterlagen zur Vorlesung Grundlagen der Elektrotechnik (437.201) für Elektrotechnik-Studierende," Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik, Technische Universität Graz, 2017.
- [28] M. Marinescu and N. Marinescu, *Elektrotechnik für Studium und Praxis*. 2020.
- [29] "Homepage | Mondi Frantschach." <https://www.mondigroup.com/en/home/> (accessed Feb. 01, 2021).
- [30] Mondi Group, "Frantschach SEAT-Bericht 2018," 2018. <https://www.mondigroup.com>.
- [31] "Nachhaltigkeitsbericht 2016/2017." https://www.kelag.at/files/pageflip/Nachhaltigkeitsbericht_2017/index.html#p=6.
- [32] "Frantschach-Sankt Gertraud – Wikipedia." https://de.wikipedia.org/wiki/Frantschach-Sankt_Gertraud (accessed Feb. 23, 2021).
- [33] "DEWE-302x." <https://ccc.dewetron.com/pg/dewe-302x> (accessed Feb. 25, 2021).
- [34] "DEWE-2600." <https://ccc.dewetron.com/pr/dewe-2600> (accessed Feb. 25, 2021).

- [35] "DEWETRON Training Manual," Version 1.4.
- [36] "Wechselstromzange Fluke I5S | Fluke." <https://www.fluke.com/de-at/produkt/zubehoer/strommesszangen/fluke-i5s#> (accessed Feb. 25, 2021).
- [37] K. Heuck and K.-D. Dettmann, *Elektrische Energieversorgung*, 9. Auflage. Springer, 2013.
- [38] "DAQx / HSI / PAD Modules." <https://ccc.dewetron.com/pg/daqx-hsi-pad-modules> (accessed Feb. 25, 2021).

8 Anhang

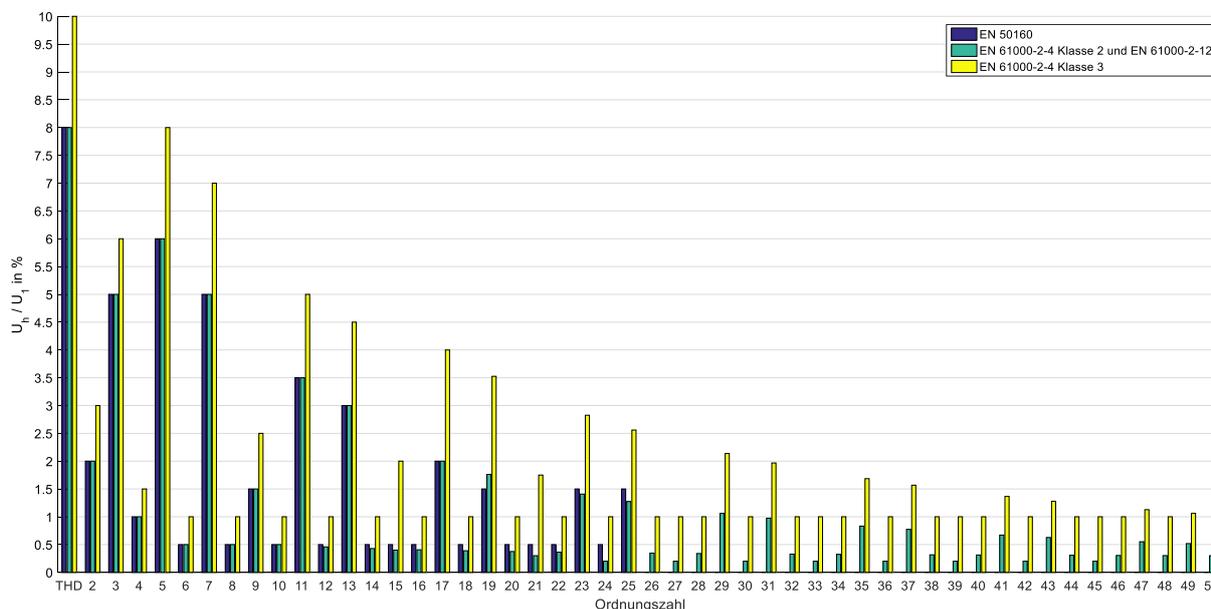


Abbildung A - 1: Grafische Übersicht der Grenzwerte einzelner Oberschwingungsspannungen von den entsprechenden Normen (Die Werte sind aus den Normen [2], [22] und [26] zu entnehmen)

Tabelle A - 1: Werte einzelner Oberschwingungsspannungen an der Übergabestelle bis zur 25. Ordnung in Prozent der Grundschwingungsspannung U_1 (Quelle: EN 50160 [2], Tabelle 4)

| Ungerade Harmonische | | | | Gerade Harmonische | |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
| Keine Vielfache von 3 | | Vielfache von 3 | | Ordnung h | Relative Spannungsamplitude U_h |
| Ordnung h | Relative Spannungsamplitude U_h | Ordnung h | Relative Spannungsamplitude U_h | | |
| 5 | 6,0 % | 3 | 5,0 % ^a | 2 | 2,0 % |
| 7 | 5,0 % | 9 | 1,5 % | 4 | 1,0 % |
| 11 | 3,5 % | 15 | 0,5 % | 6 bis 24 | 0,5 % |
| 13 | 3,0 % | 21 | 0,5 % | | |
| 17 | 2,0 % | | | | |
| 19 | 1,5 % | | | | |
| 23 | 1,5 % | | | | |
| 25 | 1,5 % | | | | |

ANMERKUNG Für die Oberschwingungen oberhalb der 25. Ordnung werden keine Werte angegeben, da sie gewöhnlich niedrig, allerdings wegen Resonanzerscheinungen weitgehend unvorhersehbar sind.

^a Der Wert für die Oberschwingung dritter Ordnung kann in Abhängigkeit von der Netzauslegung deutlich niedriger sein.

Tabelle A - 2: Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen – Oberschwingungsanteile der Spannung; Ungeradzahlige Oberschwingungen, keine Vielfache von 3 (Quelle: EN 61000-2-4 [22], Tabelle 2)

| Ordnung <i>h</i> | Klasse 1 U_h % | Klasse 2 U_h % | Klasse 3 U_h % |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 5 | 3 | 6 | 8 |
| 7 | 3 | 5 | 7 |
| 11 | 3 | 3,5 | 5 |
| 13 | 3 | 3 | 4,5 |
| 17 | 2 | 2 | 4 |
| $17 < h \leq 49$ | $2,27 \times (17/h) - 0,27$ | $2,27 \times (17/h) - 0,27$ | $4,5 \times (17/h) - 0,5$ |

Tabelle A - 3: Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen – Oberschwingungsanteile der Spannung; Ungeradzahlige Oberschwingungen, Vielfache von 3 (Quelle: EN 61000-2-4 [22], Tabelle 3)

| Ordnung <i>h</i> | Klasse 1 U_h % | Klasse 2 U_h % | Klasse 3 U_h % |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 3 | 3 | 5 | 6 |
| 9 | 1,5 | 1,5 | 2,5 |
| 15 | 0,3 | 0,4 | 2 |
| 21 | 0,2 | 0,3 | 1,75 |
| $21 < h \leq 45$ | 0,2 | 0,2 | 1 |

Tabelle A - 4: Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen – Oberschwingungsanteile der Spannung; Geradzahlige Oberschwingungen (Quelle: EN 61000-2-4 [22], Tabelle 4)

| Ordnung <i>h</i> | Klasse 1 U_h % | Klasse 2 U_h % | Klasse 3 U_h % |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2 | 2 | 2 | 3 |
| 4 | 1 | 1 | 1,5 |
| 6 | 0,5 | 0,5 | 1 |
| 8 | 0,5 | 0,5 | 1 |
| 10 | 0,5 | 0,5 | 1 |
| $10 < h \leq 50$ | $0,25 \times (10/h) + 0,25$ | $0,25 \times (10/h) + 0,25$ | 1 |

Tabelle A - 5: Verträglichkeitspegel für die Gesamtverzerrung (Quelle: EN 61000-2-4 [22], Tabelle 5)

| | Klasse 1 | Klasse 2 | Klasse 3 |
|----------------------------------|----------|----------|----------|
| Gesamtverzerrungsfakt oder (THD) | 5 % | 8 % | 10 % |

Tabelle A - 6: Verträglichkeitspegel für einzelne Oberschwingungsanteile der Spannung in Mittelspannungs-Elektrizitätsversorgungsnetzen (Quelle: EN 61000-2-12 [26], Tabelle 1)

| Ungeradzahlige Oberschwingungen, keine Vielfachen von 3 | | Ungeradzahlige Oberschwingungen, Vielfache von 3 | | Geradzahlige Oberschwingungen | |
|---|-----------------------------|--|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Oberschwingungsordnung | Oberschwingungsspannung | Oberschwingungsordnung | Oberschwingungsspannung | Oberschwingungsordnung | Oberschwingungsspannung |
| h | % | h | % | h | % |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,4 | 6 | 0,5 |
| 13 | 3 | 21 | 0,3 | 8 | 0,5 |
| $17 \leq h \leq 49$ | $2,27 \times (17/h) - 0,27$ | $21 < h \leq 45$ | 0,2 | $10 \leq h \leq 50$ | $0,25 \times (10/h) + 0,25$ |

Tabelle A - 7: Spezifikationen des Moduls „DAQP-HV“ [38]

| DAQP-HV | |
|---------------------------|--|
| Input ranges | ± 20 V, ± 50 V, ± 100 V, ± 200 V, ± 400 V, ± 800 V, ± 1400 V |
| DC accuracy | ± 0.05 % of reading ± 40 mV |
| 20 V and 50 V | ± 0.05 % of reading ± 0.05 % of range |
| 100 V to 1400 V | |
| Gain linearity | 0,03 % |
| Gain drift range | Typically 20 ppm/ $^{\circ}$ K (max. 50 ppm/ $^{\circ}$ K) |
| Offset drift | |
| 20 V to 100 V | typical 0.5 mV/ $^{\circ}$ K max. 4 mV/ $^{\circ}$ K |
| 200 V to 1400 V | typical 5 ppm/ $^{\circ}$ K max. 20 ppm of Range/ $^{\circ}$ K |
| Long term stability | 100 ppm/sqrt (1000 hrs) |
| Input resistance | 10 MOhm |
| -3 dB Bandwidth | 300 kHz ⁽¹⁾ |
| Filter selection | Push button or software |
| Filter (lowpass) | 10 Hz, 30 Hz, 100 Hz, 300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz, 30 kHz, 100 kHz |
| Filter characteristics | 10 Hz to 100 kHz: Butterworth or Bessel 40 dB/dec (2nd order; ± 1.5 dB @ 10) 300 kHz: Bessel 60 dB/dec (3rd order; 0 to -3 dB @ 300kHz) |
| Typical SFDR and SNR | |
| | 300 kHz 100 kHz 10 kHz |
| | SFDR SNR SFDR SNR SFDR SNR |
| 50 V | 98 76 101 81 dB 108 90 dB |
| 200 V | 98 84 101 89 dB 108 91 dB |
| 1400 V | 98 86 102 91 dB 107 92 dB |
| Typical CMRR | >80 dB @ 50 Hz 70 dB @ 400 Hz 60 dB @ 1 kHz 48 dB @ 10 kHz |
| Isolation voltage | Line to Ground 1.4 kVrms Line to Line 1.8 kVrms |
| Protection | CAT III 600 CAT IV 300 |
| Surge (1,2/50) | ± 4000 V |
| Burst (5 kHz) | ± 4000 V |
| Output voltage | ± 5 V |
| Output resistance | <10 Ohm |
| Output current | 5 mA |
| Output protection | Short to ground for 10 sec. |
| Power supply | ± 9 V _{DC} ± 1 % |
| Power consumption | 0.7 W |
| Power On default settings | Software programmable |
| Interface | RS-485 |

⁽¹⁾ 300 kHz exclusively for Bessel filter characteristic

Tabelle A - 8: Spezifikationen des Moduls „DAQP-DMM“ [38]

| DAQP-DMM | |
|---|---|
| Input ranges | ±10, ±40, ±100, ±200, ±400, ±1000 V |
| Range selection | Push button or software |
| DC accuracy | 0.1 % of reading ±0.1 % of range |
| Gain linearity | Better than ±0.03 % |
| Gain drift | Typ. 20 ppm/°K, max. 40 ppm/°K |
| Input resistance | 10 MOhm (±0.1 %) |
| Bandwidth (-3 dB ±1.5 dB @ f ₀) | Typical 20 kHz Typical 25 kHz 30 kHz |
| Filters (lowpass) | 10 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 3 kHz (±1.5 dB @ f ₀) |
| Filter selection | Push button or software |
| Filter characteristics | Butterworth |
| @ 0.01, 0.1, 1, 3 kHz | 40 dB / decade (12 dB / octave) |
| @ 30 kHz | 100 dB / decade (30 dB / octave) |
| Typ. SNR @ max. bandwidth | |
| 10 V range | 60 dB |
| 100 V range | 76 dB |
| 1000 V range | 81 dB |
| Typical CMRR | 73 dB @ 0 Hz 70 dB @ 50 Hz 57 dB @ 400 Hz |
| Isolation voltage | 1.5 kV _{RMS} |
| Output voltage | ±5 V |
| Output resistance | < 10 Ohm |
| Output current | Max. 5 mA |
| Output protection | Continuous short to ground |
| RS-485 interface | Yes |
| Power supply voltage | ±9 V _{DC} (±10 %) |
| Power consumption | Typical 0.65 W |

Tabelle A - 9: Spezifikationen des Moduls „DAQP-LV“ [38]

| DAQP-LV | |
|--|--|
| Input ranges unipolar and bipolar | 10 mV, 20 mV, 50 mV, 100 mV, 200 mV, 500 mV, 1 V, 2.5 V, 5 V, 10 V, 25 V, 50 V |
| Push button selectable ranges | 10 mV, 50 mV, 200 mV, 1 V, 5 V, 10 V, 50 V |
| Rated input voltage | 33 V _{RMS} ¹ , 46.7 V _{PEAK} , 70 V _{DC} according to EN-61010-1 and EN-61010-2-30 |
| DC accuracy | Range Accuracy |
| Bipolar | 10 mV to 50 mV ±0.02 % of reading ±40 µV 100 mV to 50 V ±0.02 % of reading ±0.05 % of range |
| Unipolar | 10 mV to 50 mV ±0.04 % of reading ±40 µV 100 mV to 50 V ±0.04 % of reading ±0.05 % of range |
| Input coupling | DC or AC software selectable (1.5 Hz standard, custom on request down to 0.01 Hz) |
| Gain linearity | 0.01 % of full scale |
| Gain drift range | Typically 10 ppm/°K (max. 20 ppm/°K) |
| Offset drift | Uni- and bipolar |
| 10 mV to 200 mV | 3 µV/°K |
| 500 mV to 50 V | 10 ppm of Range/°K |
| Long term stability | 100 ppm/sqrt (1000 hrs) |
| Input resistance | 1 MOhm |
| Bandwidth (-3 dB) | 300 kHz |
| Filter selection | Push button or software |
| Filters (low pass) | 10 Hz, 30 Hz, 100 Hz, 300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz, 30 kHz, 100 kHz |
| Filter characteristics | 10 Hz to 100 kHz: Butterworth or Bessel 40 dB/dec (2nd order; ±1.5 dB @ f ₀) 300 kHz: Bessel 60 dB/dec (3rd order; 0 to -3 dB @ 300kHz) |
| Typical SFDR and SNR: | 300 kHz bandwidth 100 kHz bandwidth 10 kHz bandwidth |
| 20 mV | SFDR SNR SFDR SNR SFDR SNR |
| 1 V | 100 dB 72 dB 98 dB 76 dB 97 dB 84 dB |
| 50 V | 102 dB 82 dB 99 dB 93 dB 97 dB 96 dB |
| Typical CMRR | 10 mV to 1 V range: 2.5 V to 50 V range: >100 dB @ 50 Hz 90 dB @ 50 Hz >100 dB @ 1 kHz 65 dB @ 1 kHz 83 dB @ 10 kHz 55 dB @ 10 kHz |
| Input overvoltage protection | 350 V _{DC} |
| Isolation voltage | 1 kV _{RMS} ¹⁾ |
| Sensor supply | ±9 V (±1 %), 12 V (±5 %), 200 mA resettable fuse protected ²⁾ |
| Output voltage | ±5 V |
| Output resistance | <10 Ohm |
| Maximum output current | 5 mA |
| Output protection | Short to ground for 10 sec. |
| Power On default settings | Software programable |
| Power supply | ±9 V _{DC} ±1 % |
| Power consumption | 0.8 W without sensor supply |
| RS-485 interface | Yes |
| TEDS | Hardware support for TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) |
| Supported TEDS chips | DS2406, DS2430A, DS2432, DS2433, DS2431 |
| Supported MSI | MSI-V-ACC; MSI-V-RTD; MSI-V-CH-50 |
| ¹⁾ Although the rated input voltage is 33 V _{RMS} , 46.7 V _{PEAK} or 70 V _{DC} according to EN-61010-1 and EN-61010-2-30, the galvanic isolation has been tested with 1 kV _{RMS} for 1 min. | |
| ²⁾ Overall current should not exceed DEWE-30-xx maximum power. | |

Tabelle A - 10: Spezifikationen der Strommesszange FLUKE i5s [36]

| Spezifikationen | | |
|-----------------------------------|--|-----------------|
| Nennstrombereich | 5 A | |
| Kontinuierlicher Strombereich | 10 mA bis 6 A | |
| Maximaler zerstörungsfreier Strom | 70 A | |
| Niedrigster messbarer Strom | 10 mA | |
| Grundgenauigkeit | | 48 Hz bis 65 Hz |
| | 10 mA bis 1 A | 1 % + 5 mA |
| | 1 A bis 5 A | 1 % |
| Nutzbarer Frequenzbereich | 40 Hz bis 5 kHz | |
| Ausgangspegel | 400 mV/A | |
| Eingangslastimpedanz | > 1 MΩ parallel bis zu 47 pF | |
| Crestfaktor | ≤ 3, addieren Sie 0,7 % zur Ungenauigkeit | |
| Sicherheitspezifikationen | | |
| Sicherheit | CAT III 600 V gemäß IEC/EN 61010-1, Verschmutzungsgrad 2 | |
| Maximal zulässige Spannung | 600 V AC | |
| Mechanische und allgemeine Daten | | |
| Gewährleistung | 1 Jahr | |
| Maximaler Leiterdurchmesser | 15 mm | |
| Länge des Ausgangskabels | 2,5 m | |
| BNC-Adapter | Ja | |
| BNC/4-mm-Adapter enthalten | Nein | |

Tabelle A - 11: Kanal Setup von Messstation 1 und Messstation 2

| | Kanal | Messkarte | Name | Einh. | Messgröße primärseitig | Übersetzung Wandler | Bereich in V | Messung mit | |
|----------------------------|---------|-----------|----------|-------|------------------------|---------------------|--------------|-------------|----------|
| Messstation 1 DEWE-3020 | 0 | DAQP-DMM | UL1_PCC | kV | Spannung | 20000 V / 100 V | 100 | direkt | |
| | 1 | DAQP-DMM | UL2_PCC | kV | Spannung | 20000 V / 100 V | 100 | direkt | |
| | 2 | DAQP-DMM | UL3_PCC | kV | Spannung | 20000 V / 100 V | 100 | direkt | |
| | 3 | - | - | - | - | - | - | - | |
| | 4 | DAQP-LV | IL1_PCC | A | Strom | 600 A / 5 A | 2,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 5 | DAQP-LV | IL3_PCC | A | Strom | 600 A / 5 A | 2,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 6 | DAQP-LV | IL1_HOLZ | A | Strom | 100 A / 5 A | 5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 7 | DAQP-LV | IL3_HOLZ | A | Strom | 100 A / 5 A | 5 | Stromzange | 400 mV/A |
| Messstation 2 DEWE-2600 | 0 | DAQP-HV | UL1_SS1 | kV | Spannung | 10000 V / 100 V | 100 | - | - |
| | 1 | DAQP-HV | UL3_SS1 | kV | Spannung | 10000 V / 100 V | 100 | - | - |
| | 2 | DAQP-HV | UL1_SS2 | kV | Spannung | 10000 V / 100 V | 100 | - | - |
| | 3 | DAQP-HV | UL3_SS2 | kV | Spannung | 10000 V / 100 V | 100 | - | - |
| | 4 | DAQP-LV | IL1_RT2 | A | Strom | 500 A / 5 A | 0,5 | Shunt | 0,1 Ω |
| | 5 | DAQP-LV | IL3_RT2 | A | Strom | 500 A / 5 A | 0,5 | Shunt | 0,1 Ω |
| | 6 | DAQP-LV | IL1_RT1 | A | Strom | 500 A / 5 A | 0,5 | Shunt | 0,1 Ω |
| | 7 | DAQP-LV | IL3_RT1 | A | Strom | 500 A / 5 A | 0,5 | Shunt | 0,1 Ω |
| | 8 | DAQP-LV | IL1_PM8 | A | Strom | 800 A / 5 A | 2,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 9 | DAQP-LV | IL3_PM8 | A | Strom | 800 A / 5 A | 2,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 10 | DAQP-LV | IL1_RB4 | A | Strom | 500 A / 1 A | 0,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 11 | DAQP-LV | IL3_RB4 | A | Strom | 500 A / 1 A | 0,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 12 | DAQP-LV | IL1_DT5 | A | Strom | 2000 A / 1 A | 0,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 13 | DAQP-LV | IL3_DT5 | A | Strom | 2000 A / 1 A | 0,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| | 14 | DAQP-LV | IL1_DT7 | A | Strom | 2500 A / 1 A | 0,5 | Stromzange | 400 mV/A |
| 15 | DAQP-LV | IL3_DT7 | A | Strom | 2500 A / 1 A | 0,5 | Stromzange | 400 mV/A | |