

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences

Erfassung und Auswertung von Oberschwingungen an Erzeugungseinheiten gemäß IEC 61400-21

Bachelorarbeit zur Erlangung des
akademischen Grades Bachelor of Science

Studiengang: Umwelttechnik – Nachhaltiger Energieeinsatz
vorgelegt von: Thomas Kaluza
Matr.-Nr.: 1902457
Abgabe : 19.07.2012

Erstgutachter: Prof. Dr. Heiner Kühle (HAW)
Zweitgutachter: Dipl. Ing. (FH) Rainer Klosse
WindGuard Certification GmbH, Varel

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	IV
FORMELVERZEICHNIS.....	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VIII
SYMBOLDEFINITION	IX
1. EINLEITUNG.....	1
2. VERWENDETE RICHTLINIEN UND NORMEN	3
2.1 IEC 61400-21	3
2.2 Technische Richtlinie Teil 3	3
2.3 IEC 61000-4-7	3
3. NETZRÜCKWIRKUNGEN	5
3.1 Klassifizierungen von Netzurückwirkungen	5
3.2 Oberschwingungen und Total Harmonic Distortion	6
3.3 Zwischenharmonische	6
3.4 Anteile höherer Frequenzen	6
4. OBERSCHWINGUNGEN	7
4.1 Oberschwingungsursachen bei Erzeugungseinheiten	7
4.1.1 Drehstrombrückenschaltung.....	7
4.1.2 Selbstgeführte Stromrichter	9
4.1.3 Umrichter.....	10
4.1.4 Pulsweitenmodulation	11
4.2 Auswirkungen von Oberschwingungen, Zwischenharmonischen	11
und hochfrequenten Anteilen	11
4.2.1 Oberschwingungen.....	12
4.2.2 Zwischenharmonischen	12
4.2.3 Anteile höherer Frequenzen	12

4.3	Erfassung von Oberschwingungen.....	13
4.3.1	Messgrößen	13
4.3.2	Spannungen	13
4.3.3	Ströme	14
4.3.5	Messintervalle	15
5.	ANFORDERUNGEN AN DIE MESSEINRICHTUNGEN	16
5.1	Messumformer	17
5.2	A/D-Wandler	17
5.3	Tiefpassfilter.....	17
5.4	Unterschiede zwischen IEC und TR3	17
6.	AUFBAU DES MESSSYSTEMS.....	19
6.1	Messumformer	19
6.1.2	Spannungsmessung	19
6.1.3	Strommessung.....	20
6.2	A/D-Wandler	20
6.3	Test-Controller	21
6.4	Computer	21
7.	AUSWERTEVERFAHREN.....	23
7.1	IEC Vorgaben zu den Auswerteverfahren.....	23
7.1.1	Wirkleistungsberechnung.....	23
7.1.2	Diskrete Fourier Transformation.....	23
7.1.3	Frequenzauflösung	24
7.1.4	Gruppierung.....	24
7.1.6	Ausgabe	26
7.2	Matlab	27
7.2.1	Umsetzung der Vorgaben.....	27

7.2.2	Resampling	30
7.2.3	Diskrete Fourier Transformation	30
7.2.4	Gruppierung.....	34
7.2.5	Ausgabe	38
8.	VALIDIERUNG DER OBERSCHWINGUNGS-AUSWERTUNG	39
8.1	Signalgenerator	39
8.2	Überprüfung der Reproduzierbarkeit	40
8.3	Abweichungen der Grundschiwingung.....	41
8.4	Gruppierung der Oberschwiwingungen	43
8.4.1	THD Gruppierung.....	46
8.5	Gruppierung der Zwischenharmonischen	47
8.6	Gruppierung der Anteile höhere Frequenzen	50
8.7	Einfluss des Resampling	52
8.8	Auswertung von realen Messreihen	54
9.	FAZIT UND AUSBLICK	57
10.	ZUSAMMENFASSUNG	59
	LITERATURVERZEICHNIS	60
	ANHANG	63

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Kategorisieren der Netzurückwirkungen entsprechend der Frequenz. Blume et al 1999, S. 143	5
Abb. 2: Schaltbild einer Drehstrombrückenschaltung aus Thyristoren. Schlabbach, Mombauer 2008, S.125	8
Abb. 3: Schaltbild einer Drehstrombrückenschaltung. Blume et al 1999, S. 66.	8
Abb. 4: Aufbau einer zwölfpulsigen Drehstrombrückenschaltung. Schlabbach; Mombauer 2008, S. 128.	9
Abb. 5: Schaltbild eines dreiphasigen IGBT-Umrichters. Schulz , S.107.....	10
Abb. 6: Schematischer Aufbau des Messsystems nach IEC 61400-21. IEC21 2008, S.20	16
Abb. 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit den Hauptkomponenten. Verändert nach. Schulz 2004, S.177.	19
Abb. 8: Gruppierung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen. IEC4-7, S.20.	24
Abb. 9: Gruppierung der Anteile höherer Frequenzen nach IEC 61400-4-7 2000, S.29.	26
Abb. 10: Schematischer Programmablauf der Oberschwingungsauswertung.	28
Abb. 11: Darstellung der Ausgangsdaten für die Auswertung.....	29
Abb. 12: Struktureller Aufbau der Wirkleistungsberechnung.	29
Abb. 13: Schematischer Ablauf der Signalverarbeitung innerhalb der Messkette. Werner 2012, S. 56.	30
Abb. 14: Schematischer Programmablauf des Skriptes macheFFT.m	33
Abb. 15: Schematischer Ablauf der Oberschwingungsgruppierung.	35
Abb. 16: Programmablauf des Skripts gruppriereZHA2.m entsprechend der Netzfrequenz. ..	36
Abb. 17: Schematischer Programmablauf der HF-Gruppierung durch Skript gruppriereHF.m. .	37
Abb. 18: Musterdaten zur Auswertung des Matlab-Skriptes.	40
Abb. 19: Abhängigkeit der Abweichung von der Höhe des relativen Stromes.....	42
Abb. 20: Frequenzspektren des Eingangssignals.	43
Abb. 21: Untergruppen der Oberschwingungsanteile bis zur 50 Harmonischen.	44
Abb. 22: Oben: Frequenzspektrum des gesamten Frequenzbereichs mit Grundschwingungsanteil. Unten: Vergrößerter Bereich mit den zwischenharmonischen Frequenzanteilen.....	48
Abb. 23: Untergruppe der 5. und 7. Zwischenharmonischen.....	49

Abb. 24: Abweichung der Amplituden der eingestellten Frequenz.....	51
Abb. 25: Untergruppen der höherfrequenten Anteile.	52
Abb. 26: Hochfrequente Anteile nach Berechnung ohne Resampling.	53
Abb. 27: Signalverzerrung an einem Hausanschluss.....	54
Abb. 28: Frequenzspektrum der analysierten Netzspannung.	55
Abb. 29: Oberschwingungsanteile der realen Messreihe.	56

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: IEC-Vorgaben der Genauigkeitsklassen. IEC 21, S.21	16
Tab. 2: Unterschiede der Genauigkeitsanforderungen zwischen IEC und FGW TR3.	18
Tab. 3: Signaleigenschaften zur Validierung der Abweichungen	41
Tab. 4: Signalparameter zur Überprüfung der Oberschwingungsgruppierung.	43
Tab. 5: Quelldaten aus der FFT durch das Skript macheFFT.m.	45
Tab. 6: Gegenüberstellung der theoretischen mit den durch die FFT und Matlab berechneten Ergebnisse.	46
Tab. 7: Vergleich der ermittelten Gesamtoberschwingungsverzerrung.	46
Tab. 8: Signalparameter der zwischenharmonischen Anteile.	47
Tab. 9: Quelldaten aus der FFT durch das Skript macheFFT.m.	49
Tab. 10: Gegenüberstellung der theoretischen mit den Ergebnissen der Gruppierung.	50
Tab. 11: Signalparameter der Grundschwingung und den Anteilen höherer Frequenzen.	50
Tab. 12: Signalparameter mit abweichender Samplerrate f_s	53

FORMELVERZEICHNIS

(1) Blume et al, S. 67.....	9
(2).....	13
(7).....	14
(8).....	14
(9).....	14
(10).....	14
(12).....	21
(13) IEC 4-7, 2002, S.24.....	24
(14) IEC 4-7, 2002, S. 8.....	25
(15) IEC 4-7 2002, S. 28.....	25
(16) IEC 4-7 2000, S. 26.....	25
(17).....	25
(18).....	25
(19) IEC4-7, 2000, S. 29.....	26
(20).....	31
(21).....	31
(22).....	31
(23).....	31
(24).....	32
(25).....	32
(26).....	37
(27).....	37

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BDEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik Im
DIN	und VDE
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EnWG	Energie-Wirtschafts-Gesetz
EZA	Erzeugungsanlage: Eine oder mehrere EZE einschließlich allen zum Anschluss und Betrieb erforderlichen elektrischen Einrichtungen
EZE	Erzeugungseinheit: Einzelne Einheit zur Erzeugung von elektrischer Energie
FGW	Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien e.V.
FGW TR3	Technische Richtlinie für Erzeugungseinheiten und –anlagen, Teil 3
IEC	International Electrotechnical Commission
IEC21	die Norm IEC 61400-21:2008 Edition 2
IEC4-7	die Norm IEC 61000-4-7:2002
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (deutsch: Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode)
m-Files	Abfolgen von Befehlen und Funktionen der numerischen Berechnungs- und Simulationssoftware MATLAB [®]
PVA	Photovoltaikanlage(n)
Skript	siehe m-Files
THD	Total Harmonic Distortion, gesamt Oberschwingungsverzerrung Beschreibt das Verhältnis des Effektivwertes der Oberschwingung zum Effektivwert der Grundschiwingung
VDN	Verband der Netzbetreiber – VDN – e.V. beim VDEW
WEA	Windenergieanlage(n)
ZÄHW	Züricher Hochschule für angewandte Wissenschaften

SYMBOLDEFINITION

A	Auflösung
b	Bandmitte
f_{FFT}	Abtastrate der FFT
$f_{\text{H},1}$	Frequenz der Grundschiwingung
$f_{\text{H},h}$	Oberschwingungsfrequenz
f_{Netz}	Frequenz der Grundschiwingung des Energieversorgungsnetzes
f_{max}	Maximalfrequenz, die betrachtet wird
f_s	Samplerate/Abtastrate
h_n	Oberschwingungsordnung n-ter Ordnung (h_1 entspricht der Grundschiwingung)
I	Strom
I_h	in eine Untergruppe eingruppiertes effektiver Oberschwingungsstrom
I_n	Bemessungsstrom der EZE
I_b	Bemessungsstrom für den Messbereich
i	Strom (Momentanwert)
k	Ordnungszahl (der Spektrallinie)
N_{IEC}	Anzahl der <u>Perioden</u> der Netzfrequenz innerhalb der Fensterbreite
N_{W}	Anzahl der <u>Samples</u> innerhalb des betrachteten FFT-Fensters
P	Wirkleistung
P_{ges}	Gesamtwirkleistung der EZE
P_n	Nennwirkleistung der EZE
T_{600}	Gesamtdauer einer Messreihe (hier 600 Sekunden)
U	Spannung
U_n	Nennspannung der EZE
u	Spannung (Momentanwert)
Δ	Differenz

Liste der Indizes:

Δ	Dreieckschaltung
y	Sternschaltung
max	Maximalwert
\wedge	Scheitelwert

1. EINLEITUNG

Aufgrund des stetigen Ausbaus der Stromerzeugung aus regenerativen Quellen innerhalb der letzten Jahrzehnte (vgl. BMU 2012, S. 3ff), stellt der Transport der dezentral erzeugten elektrischen Energie eine Herausforderung an die Energieversorgungsnetze dar. Die für eine konventionelle, zentralisierte Energieerzeugung ausgelegten Netze machen einen Netzausbau nicht nur notwendig (vgl. DENA 2005, S.7f.), sondern dieser wird auch vom Gesetzgeber forciert (vgl. NABEG 2011, S.2). Neben dem Transport gewinnt der konstruktionsbedingte Einsatz von Leistungselektronik bei der Netzankopplung von Windenergie- oder Photovoltaikanlagen zunehmend an Bedeutung. Diese Leistungselektronik beeinflusst das Stromversorgungsnetz in Form von Netzurückwirkungen, zu denen die Oberschwingungen gehören.

Zur Sicherstellung der Netzqualität orientieren sich die verantwortlichen Übertragungsnetzbetreiber an den geltenden Richtlinien (vgl. BDEW 2008, S.8) und stellen für den Anschluss von Energieerzeugungsanlagen (EZA) technische Anschlussbedingungen auf, um Beeinträchtigungen zu vermeiden.

Um Simulationsrechnungen über das Verhalten von EZA am Energieversorgungsnetz durchzuführen, müssen die elektrischen Eigenschaften vom Hersteller der Erzeugungseinheiten (EZE) in Einheitenzertifikaten nachgewiesen werden. Diese Zertifikate beruhen auf den messtechnisch erworbenen Grundlagen, die nach anerkannten Methoden erfasst werden. Die WindGuard Certification GmbH wird zukünftig als akkreditierte Messinstitution die elektrischen Eigenschaften von EZE erfassen.

Diese Arbeit beschreibt einen Ausschnitt aus der Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten. Den Ausgangspunkt bildet der modulare Aufbau eines Messsystems, das mit seinen Komponenten den Anforderungen der geltenden Richtlinien entsprechen soll. Die Elektrotechnik und weiterführend die Bereiche Elektronik und Messtechnik bilden die Grundlage, um die zu erfassenden Messgrößen einzuschätzen sowie die entsprechenden Komponenten auszuwählen.

Zu diesem Zweck ist eingangs die Betrachtung der Richtlinien und Normen wie die IEC Anforderungen und die national angewendeten Richtlinien notwendig. Das darauf folgende Kapitel zu Netzurückwirkungen untergliedert diese in Oberschwingungen,

Zwischenharmonische und Anteile höherer Frequenzen. Im Weiteren wird auf Ursachen für Oberschwingungen und deren Auswirkungen auf das Energieversorgungsnetz eingegangen. Es werden die Messgrößen sowie der Aufbau und die Konfiguration der geforderten messtechnischen Komponenten beschrieben.

Darauf aufbauend wird die Auswertung der Messgrößen sowie die Umsetzung der normativ vorgegebenen Verfahren durch ein dafür entwickeltes Matlab-Programm verarbeitet. Die einzelnen Unterfunktionen des geschriebenen Programms werden in einer anschließenden Validierung mit generierten Messwerten bekannter Größe auf ihre Funktion geprüft.

Abschließend werden Verbesserungen im Programmablauf formuliert und ein Einblick in die weiteren Entwicklungsschritte der Hard- und Software für die Erfassung und Auswertung von Oberschwingungen an Erzeugungseinheiten gemäß IEC 61400-21 gegeben.

2. VERWENDETE RICHTLINIEN UND NORMEN

Die Regelwerke der *Fördergesellschaft Windenergie und andere erneuerbare Energien* (FGW) bestehen aus den Technischen Richtlinien Teil 3, Teil 4 und Teil 8 und sind von dem Verband der Netzbetreiber und dem Gesetzgeber anerkannt. Sie beschreiben die notwendigen Verfahren zur Zertifizierung von EZE und EZA. In diesen Bereich fallen sowohl Windenergie-, Photovoltaik- und Biogasanlagen.

2.1 IEC 61400-21

Die IEC 61400-21 bildet die Grundlage für die Technische Richtlinie Teil 3 und wird von der International Electrotechnical Commission herausgegeben. Sie ist Bestandteil einer Normenreihe, die mit dem Ziel der Vereinheitlichung von Mess- und Bewertungsverfahren im Bereich der Windenergie ausgearbeitet wurde. Im Verlaufe dieser Arbeit werden die Vorgaben der IEC genutzt, um die beschriebenen Auswerteverfahren und das entsprechende Messsystem zu entwickeln. Die durchgeführten Messungen zur Ermittlung der elektrischen Parameter sind nach IEC 61400-21 Editionen 2.0 vom August 2008 (IEC 21) vorzunehmen.

2.2 Technische Richtlinie Teil 3

Auf Grundlage der IEC21 wird die Technische Richtlinie für Erzeugungseinheiten und –anlagen (TR3) von der *Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien* (FGW) erarbeitet. Die TR3 hat zum Ziel, vereinheitlichte Messverfahren nach dem neuesten Stand der Technik anzugeben, die national von allen Beteiligten (Planung, Finanzierung, Herstellung, Zertifizierung und Betrieb von EZE) anerkannt werden. Zusätzlich wird bei den Messverfahren nach TR3, der Parallelbetrieb mehrerer netzgekoppelter EZE berücksichtigt.

2.3 IEC 61000-4-7

Im weiteren Verlauf der Auswertung, wird von der IEC21 auf die IEC 61000-4-7: Edition 2 vom Dezember 2000 (IEC4-7) verwiesen, die die Messung von Oberschwingungen, zwischenharmonische Schwingungen und Anteile höherer Frequenzen (EMV) in

Energieversorgungsnetzen zum Inhalt hat und sich detailliert mit den Analyseverfahren und der Darstellung auseinandersetzt.

3. NETZRÜCKWIRKUNGEN

Unter Netzurückwirkungen fallen alle leitungsgebundenen Störgrößen auf das Energieversorgungsnetz, die zur Veränderung der vier Kenngrößen Spannungsamplitude, Spannungs- und Stromform sowie der Netzfrequenz führen (vgl. Gasch 2011, S. 497ff).

3.1 Klassifizierungen von Netzurückwirkungen

Für die Bewertung der Netzverträglichkeit von Interesse und von der IEC21 und darauf aufbauend der TR3 betrachtete Größen sind:

- Flicker
- schnelle Spannungsänderungen (transiente Überspannung)
- Oberschwingungen, Zwischenharmonische
- Spannungsunsymmetrien

Zur besseren Übersicht lassen sich die Störgrößen entsprechend ihrer Frequenzen wie in Abbildung 1 einordnen. Der Amplitudenverlauf spiegelt dabei die möglichen Störgrößen der bezogen auf die Amplitude der Grundschwingung wider.

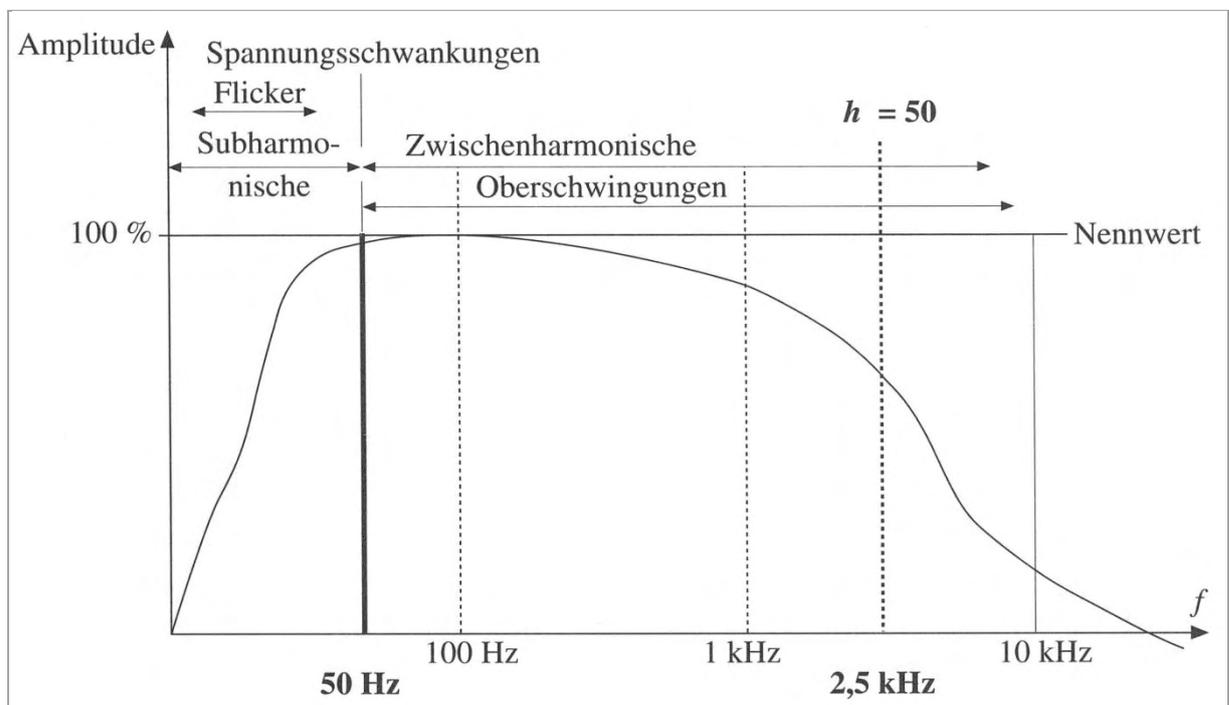


Abb. 1: Kategorisieren der Netzurückwirkungen entsprechend der Frequenz. Blume et al 1999, S. 143.

Der für die Betrachtung von Netzurückwirkungen maßgebliche Frequenzbereich reicht dabei von Frequenzen nahe der Gleichanteile ($f = 0$ Hz) bis in den Bereich von $f \approx 10$ kHz. Zu den betrachteten Oberschwingungen beinhaltet diese Arbeit aufgrund des sich überschneidenden Frequenzbereiches (siehe Abbildung 1) sowie gleicher Analyse- und ähnlicher Auswerteverfahren (siehe Kapitel 9) auch die Zwischenharmonischen und die Anteile höherer Frequenzen (vgl. Blume 1999 et al, S.14f.).

3.2 Oberschwingungen und Total Harmonic Distortion

Als Oberschwingungen werden sinusförmige, ganzzahlige Vielfache der Grundschwingung bezeichnet, die dieser überlagert sind. Diese Grundschwingung entspricht der Netznennfrequenz des Energieversorgungsnetzes und berücksichtigt in der unter Kapitel 9 beschriebenen numerischen Auswertung 50 und 60 Hz-Versorgungsnetze.

Der entsprechend der IEC21 betrachtete Frequenzbereich der Oberschwingung liegt zwischen der Grundschwingung und der 50. Oberschwingung (vgl. IEC21 2008, S. 15)

Aus den ermittelten Oberschwingungen wird die Gesamtoberschwingungsverzerrung (THD) abgeleitet. Diese beschreibt das Verhältnis des Effektivwertes der Summe aller Oberschwingungsanteile zum Effektivwert des Grundschwingungsanteils. Dieses Verhältnis dient zur weiteren Bewertung von Störeinflüssen auf das Energieversorgungsnetz (vgl. Blume et al 1999, S.78).

3.3 Zwischenharmonische

Zwischenharmonische sind sinusförmige Schwingungen, deren Frequenzen kein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz sind. Für die Auswertung und Gruppierung (siehe Kapitel 9.1.3) wird innerhalb der IEC21 auf die IEC4-7 verwiesen, wonach sich der betrachtete Frequenzbereich von 50 Hz bis 2 kHz erstreckt.

3.4 Anteile höherer Frequenzen

Frequenzanteile oberhalb der Zwischenharmonischen werden bis zu einer maximalen Frequenz von 9 kHz betrachtet, woraus sich für die Oberschwingungsauswertung nach IEC21 eine Bandbreite von 50 Hz bis 9 kHz ergibt.

4. OBERSCHWINGUNGEN

Im Rahmen dieses Kapitels werden sowohl einzelne Ursachen von Oberschwingungen und deren Auswirkungen betrachtet und die entsprechenden Messgrößen beschrieben.

4.1 Oberschwingungsursachen bei Erzeugungseinheiten

Während die ersten Windenergieanlagen direkt an das Energieversorgungsnetz angekoppelt wurden (Dänisches Konzept) und somit starr an die Netzfrequenz gekoppelt waren, sind die heutigen Anlagenkonzepte drehzahlvariabel konstruiert. Möglich wurde diese Abkopplung der Generator Drehzahl von der Netzfrequenz durch den Einsatz von Umrichtern die somit einen Betrieb der Windenergieanlage mit der optimalen Auslegungsschnelllaufzahl erlaubt (vgl. Schlabbach; Mombauer 2008, S.152ff).

Während sich NetZRückwirkungen bei direkt einspeisenden Asynchronmaschinen hauptsächlich im niederfrequenten Bereich durch Flicker darstellen, treten Oberschwingungen temporär bei Aufschaltvorgängen an das Netz auf (vgl. Klosse et al 1997, S.35ff). Durch Leistungselektronik bei modernen Windenergieanlagen mit Vollumrichtern und Gleichstromzwischenkreis oder Asynchronmaschinen mit Direktumrichter sind auch im quasi-stationären Betrieb Oberschwingungen möglich. Auch der Einsatz von Leistungselektronik bei Photovoltaikanlagen in Form von Wechselrichtern zur Ankopplung der Gleichspannungsebene an das Energieversorgungsnetz ist als Störaussender anzusehen (vgl. Schulz 2004, S.163ff) und entsprechend in der FGW TR3 einbezogen.

Oberschwingungen und Zwischenharmonische treten bei periodischen Störeinflüssen auf. Zur Beschreibung der Ursachen von Oberschwingungen durch Umrichter werden in Kapitel 4.1 die internen Schaltvorgänge näher betrachtet.

4.1.1 Drehstrombrückenschaltung

Eine in industriellen Anwendungen häufig anzutreffende Gleichrichterschaltung ist die Drehstrombrückenschaltung. Am Beispiel eines sechspulsigen Aufbaus (siehe Abbildung 2) werden die Schaltvorgänge beschrieben.

entsprechend um 120° versetzt. Dieser Stromverlauf i_R fließt auch in der Drehstromseite und stellt eine periodische Verzerrung der Sinusform dar. Abhängig von der Pulszahl p , die die Anzahl der Kommutierungen je Periode angibt, gehorchen die erzeugten Ordnungen der Oberschwingungen der Gleichung 1.

$$h = n \cdot p \pm 1 \quad (1)$$

Mit $n = 1, 2, 3, \dots$ und $p = 6$ ergeben sich für die Schaltung in Abbildung 2 ganzzahlige Oberschwingungen der Ordnung $h = 5, 7, 11, 13, \dots$

Es ist möglich, zwei sechspulsige Drehstrombrückenschaltungen wie in Abbildung 4 über Transformatoren mit unterschiedlichen Schaltgruppen zu verschalten.

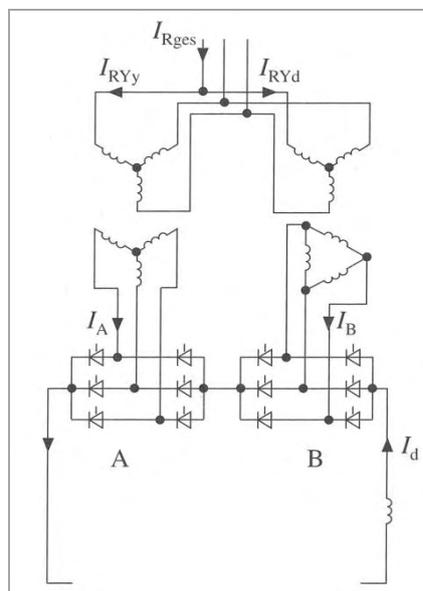


Abb. 4: Aufbau einer zwölfpulsigen Drehstrombrückenschaltung. Schlabbach; Mombauer 2008, S. 128.

Durch den resultierenden Phasenversatz der Oberschwingungen ist es möglich, diese zu reduzieren. An der idealen Drehstrombrücke würden entsprechend der Gleichung 1 nur ganzzahlige Oberschwingungen mit den Ordnungen $h = 11, 13, 23, 25 \dots$ auftreten (vgl. Schlabbach; Mombauer 2008, S.129).

4.1.2 Selbstgeführte Stromrichter

Bei selbstgeführten Stromrichtern wird die Kommutierung nicht über das Drehstromnetz synchronisiert, sondern es werden die Schaltvorgänge durch Steuersignale vorgegeben.

Aufgrund der größeren Pulsigkeit, die durch höhere Schaltfrequenzen erreicht wird, und das Steuerverfahren, welches die Schaltzeitpunkte steuert, weisen selbstgeführte Stromrichter einen geringeren Anteil von Oberschwingungen auf. Da die Frequenz der Schaltvorgänge nicht synchron zur Netzfrequenz verlaufen muss, treten bei diesem Stromrichtertyp auch zwischenharmonische Oberschwingungsanteile auf (vgl. Schlabbach; Mombauer 2008; S. 131).

4.1.3 Umrichter

In modernen drehzahlvariablen Erzeugungseinheiten werden überwiegend IGBT-Wechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis angewendet (siehe Abbildung 5). Da diese Transistoren gegenüber Thyristoren höhere Ströme und mit größeren Frequenzen schalten können, ermöglicht dies eine bessere Anpassung von Windenergieanlagen großer Leistung bei der Netzankopplung. Die möglichen, an das Energieversorgungsnetz übertragenen Oberschwingungen sind abhängig vom Anlagentyp (vgl. Schulz 2004, S.107).

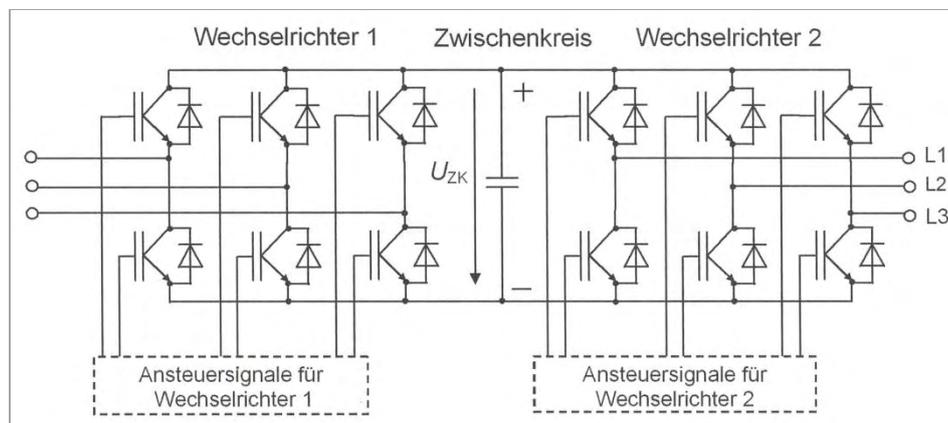


Abb. 5: Schaltbild eines dreiphasigen IGBT-Umrichters. Schulz , S.107.

Synchronmaschinen mit Vollumrichter

Bei diesem Anlagentyp wird die gesamte eingespeiste Leistung über den netzseitigen Wechselrichter geführt. Die erzeugten Oberschwingungen sind abhängig von der Höhe der Pulsfrequenz des Wechselrichters.

Doppelt gespeiste Asynchronmaschinen

Dieser Generatortyp erzeugt sowohl Oberschwingungen als auch Zwischenharmonischen. Durch den netzseitigen Wechselrichter werden entsprechend der Pulszahl Oberschwingungen erzeugt. Aufgrund der direkten Netzanbindung des Stators werden durch den rotorseitigen Wechselrichter Zwischenharmonischen in Abhängigkeit der Generatordrehzahl an den Stator übertragen und eingespeist (vgl. Schulz 2004, S.179).

4.1.4 Pulsweitenmodulation

Die Pulsweitenmodulation ist ein Steuerverfahren für selbstgeführte Um- und Wechselrichter. Dieses bei Erzeugungseinheiten häufig angewendete Verfahren bildet durch die Pulsung der Gleichspannung aus dem Zwischenkreis (Umrichtern) oder der DC-Quelle (PV-Module) die einzuspeisende Spannungsform nach. Die Annäherung an die ideale Sinusform und damit der Anteil von Oberschwingungen sind abhängig von der Schaltfrequenz. Da sich diese aufgrund von steigenden Halbleiterverlusten nicht beliebig erhöhen lässt, treten Oberschwingungen und Zwischenharmonischen auf. Werden Wechselrichter mit PWM-Verfahren im Teillastbereich betrieben ist eine Erhöhung der Oberschwingungsanteile zu beobachten (vgl. Schlabbach; Mombauer 2008, S.136ff).

Hochfrequente Anteile werden bei allen Schaltungsarten mit steilflankigen Stromverläufen und Einschwingvorgänge erzeugt. Die dadurch entstehende elektromagnetische Störabstrahlung wird leitungsgebunden übertragen und abgestrahlt. In Wechselrichtern wird deshalb die Ausgangsspannung mit Netzfiltern geglättet umso die elektromagnetische Verträglichkeit zu verbessern. Der hochfrequente Anteil hat gegenüber den niederfrequenten Oberschwingungen und Zwischenharmonischen einen geringen Anteil (vgl. Schulz 2004, S.45).

4.2 Auswirkungen von Oberschwingungen, Zwischenharmonischen und hochfrequenten Anteilen

Hohe Störpegel können zu unterschiedlicher Beeinflussung und Belastungen von Betriebsmitteln führen, die an das Energieversorgungsnetz angeschlossen sind.

4.2.1 Oberschwingungen

Durch hohe Oberschwingungspegel kann es bei Betriebsmitteln die zur Synchronisation den Nulldurchgang der Versorgungsspannung nutzen zu Störungen kommen. Hier sei als Beispiel die unter Kapitel 4.1.1 beschriebene Drehstrombrückenschaltung angeführt. Auch sind Beeinträchtigungen von Elektromotoren möglich, da Oberschwingungen Gegenmomente erzeugen können, die der Drehbewegung des Rotors entgegenwirken (vgl. Schlabbach, Mombauer 2008, S.211).

4.2.2 Zwischenharmonischen

Bei der Betrachtung von Zwischenharmonischen als Störgröße werden an dieser Stelle nur Tonfrequenzrundsteueranlagen erwähnt. Diese werden zur Übertragung von Steuer- oder Alarmierungssignalen über das Energieversorgungsnetz genutzt. Die verwendeten Übertragungsfrequenzen liegen zwischen den Oberschwingungen in dem Bereich von $110 \text{ Hz} \leq f \leq 3.000 \text{ Hz}$ und können durch die Zwischenharmonischen beeinflusst werden (vgl. Schlabbach; Mombauer 2008, S.205).

4.2.3 Anteile höherer Frequenzen

Die Einkopplung von hochfrequenten Störpegeln beeinträchtigt hauptsächlich die Funktion von Betriebsmitteln deren Arbeitsfrequenzen nahe der Störfrequenz oder niedrigem Energieniveau liegen. Dies können Geräte aus der Nachrichtentechnik, Mess-, Steuer- oder Regeleinrichtungen sein. Allgemein lässt sich aussagen, dass Oberschwingungen auf Betriebsmittel mit kapazitiven oder induktiven Eigenschaften aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Blindwiderstände eine Spannungs- oder Strombelastungen hervorrufen (vgl. Kloss 1996, S. 33ff).

4.3 Erfassung von Oberschwingungen

Die für die Auswertung notwendigen Messungen werden im Dauerbetrieb vorgenommen und berücksichtigen nicht Schalthandlungen wie das Einschalten der EZE.

4.3.1 Messgrößen

Die Oberschwingungsanteile leiten sich indirekt aus den analogen Signalen des zeitabhängigen Strom- und Spannungsverlaufs ab. Entsprechend werden die drei Phasenmomentanströme und –spannungen zwischen Phase und Nullleiter an den Netzanschlüssen der EZE gemessen (vgl. IEC21 2008, S.23).

4.3.2 Spannungen

Ausgehend von einer Messung auf Niederspannungsebene mit einem Effektivwert der Spannung von

$$U_n = U_\Delta = 690 \text{ V} \quad (2)$$

ergibt sich für die maximal zu erwartenden Momentanwerte der Spannungen nach Umsetzung in die Sternschaltung

$$\hat{u}_y = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}} * \sqrt{2} = 563,38 \text{ V}. \quad (3)$$

Um Spannungsspitzen zu berücksichtigen wird die Bemessungsspannung zusätzlich um 20 % höher ausgelegt. Somit werden die Messbereichseingänge des Messsystems nach

$$\hat{u}_n = \hat{u}_y * 1,2 \cong 676,06 \text{ V} \quad (4)$$

ausgelegt. Es wird jedoch berücksichtigt, dass die momentanen Werte der Außenleiterspannungen entsprechend

$$\hat{u}_{12} = \hat{u}_{23} = \hat{u}_{31} = U_n * \sqrt{2} \cong 976 \text{ V} \quad (5)$$

an den Anschlussklemmen abgreifbar sind.

4.3.3 Ströme

Analog zur Spannungsmessung sind die Ströme zu erfassen. Für die erste Abschätzung wird von einer Windenergieanlage mit einer Nennleistung $P_N = 2 \text{ MW}$ ausgegangen.

Aus dem Zusammenhang der Drehstrom-Wirkleistung, mit den zusammengesetzten Wirkleistungen der drei Stränge

$$P_{ges} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (6)$$

mit

$$P_i = U_{y,i} * I_i * \cos\varphi_i \quad (7)$$

und unter Annahme eines symmetrischen Verschiebungsfaktors mit $\cos\varphi = 1$ mit einer symmetrischen Last sind die größten zu erwartenden Ströme

$$P_{ges} = 3 * U_{y,i} * I_i. \quad (8)$$

Für die Effektivwerte der Leiterströme gilt nach Umformung Anmerkung

$$I_i = \frac{P_n}{3 * \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}} = \frac{2 * 10^6 \text{ W}}{3 * \frac{690 \text{ V}}{\sqrt{3}}} = 1673,48 \text{ A}, \quad (9)$$

wonach sich für die Auslegung theoretische Phasenmomentanströme von

$$\hat{i}_y = I_i * \sqrt{2} \cong 2366,66 \text{ A} \quad (10)$$

ergeben. Um Stromspitzen zu berücksichtigen wird die Bemessungsspannung zusätzlich um 20 % höher ausgelegt. Somit wird der Messbereich für die Phasenmomentanströme mit

$$\hat{i}_b = \hat{i}_y * 1,2 \cong 2840 \text{ A} \quad (11)$$

ausgelegt.

4.3.4 Messpunkte

Die Messpunkte der EZE müssen an den drei Phasen des Netzanschlusses der EZE liegen. Verfügt die EZE über einen eingebauten Transformator liegt es im Ermessen des EZE-Herstellers, ob nieder- oder höherspannungsseitig gemessen wird (vgl. IEC21 2008, S. 19).

Der Hersteller entscheidet mit der Wahl des Messpunktes, ob der Maschinentransformator Bestandteil der EZE nach FGW TR3 ist.

Für den Fall, dass es sich bei der EZE um eine PV-Einheit (idR ein Wechselrichter) handelt, können die PV-Module gegen eine Gleichstromquelle ersetzt werden (vgl. FGW TR3 2009, S. 12).

4.3.5 Messintervalle

Für eine nach IEC 21 konforme Berechnung der Oberschwingungen ist eine Erfassung der in Kapitel 4.3.1 genannten Messgrößen in vorgegebenen Zeitintervallen nötig. Entsprechend jeder Wirkleistungsklasse (siehe Kapitel 7.1) sind mindestens neun 10-Minuten Messreihen notwendig.

5. ANFORDERUNGEN AN DIE MESSEINRICHTUNGEN

Der schematische Aufbau des Messsystems wird durch die IEC 21 wie in Abbildung 6 beschrieben. Dabei berücksichtigt der dargestellte Aufbau auch Anemometer, die zur Flickerauswertung notwendig sind. Diese sind nicht Inhalt dieser Arbeit.

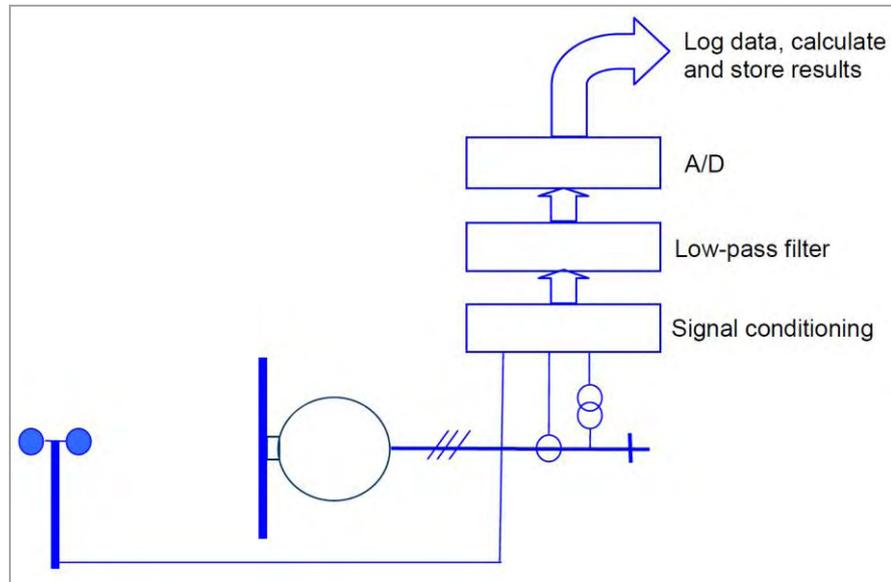


Abb. 6: Schematischer Aufbau des Messsystems nach IEC 61400-21. IEC21 2008, S.20.

Die geforderten Genauigkeitsklassen an die in Tabelle 1 dargestellten Komponenten der Messeinrichtung sind abhängig von den Messgrößen (siehe Tabelle 1).

Tab. 1: IEC-Vorgaben der Genauigkeitsklassen. IEC 21, S.21

Equipment	Required accuracy
Voltage transformers	Class 1,0
Current transformers	Class 1,0
Anemometer	$\pm 0,5$ m/s
Filter + A/ D converter + data acquisition system	1% of full scale

5.1 Messumformer

Zur Anpassung der Messgrößen (siehe Kapitel 4.3.1) an den Eingangsbereich der A/D-Wandler oder zur Überführung von Stromsignalen in Spannungssignale sind in Abhängigkeit der verwendeten A/D-Wandler Messumformer notwendig. Sowohl zur Spannungs- als auch Strommessung ist die Genauigkeitsklasse 1,0 vorgeschrieben. Dies entspricht 1 % des Messbereichsendwertes der verwendeten Spannungs- bzw. Stromwandler (vgl. Parthier 2011, S. 85).

5.2 A/D-Wandler

Die Vorgaben der IEC21 bezüglich der verwendeten A/D-Wandler beschreiben die Mindestanforderungen an die Auflösung mit 12 bit.

Um die zu beurteilenden Frequenzanteile bis 9 kHz (siehe Kapitel 3.4) nach der Digitalisierung reproduzieren zu können, wird eine Abtastrate von 20 kHz gefordert, womit die IEC dem Shannon-Nyquist-Theorem für sinusförmige Signale folgt (vgl. IEC21 2008, S.20f).

5.3 Tiefpassfilter

Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen des zeitlichen Signalverlaufs durch Frequenzanteile oberhalb der zu bewertenden Frequenz sind Tiefpassfilter (Anti-Aliasing-Filter) vorgesehen (vgl. IEC21 2008, S. 20). Aussagen über eine geforderte Filterordnung werden nicht gemacht.

5.4 Unterschiede zwischen IEC und TR3

Die TR3 weicht bei der Dokumentation der Messergebnisse sowie den Messunsicherheiten der verwendeten Messgeräte von der IEC21 und IEC4-7 ab. Da für das weitere Zertifizierungsverfahren von EZA Messungen nach TR3 gefordert werden, werden diese angewendet. Die Unterschiede sind in der Tabelle 2 abgebildet.

Tab. 2: Unterschiede der Genauigkeitsanforderungen zwischen IEC und FGW TR3.

	IEC 61400-21 / IEC 61000-4-7	FGW TR3
Dokumentation der Oberschwingungsströme	$I_n \geq 0,1 \% I_n$	Alle
Messunsicherheit der Strommessung	5 % des Messwertes bis 0,15 % des Nennstrombereich des Messgerätes	$< 1 \% I_n$
Messtechnische Auflösung der Oberschwingungsanteile	keine Angaben	$\leq 0,05 \% I_n$

6. AUFBAU DES MESSSYSTEMS

Die Beschreibung des Aufbaus beschäftigt sich mit den verwendeten Komponenten im Hinblick auf die im Kapitel 5 genannten Anforderungen sowie deren technischen Eigenschaften und Funktionen innerhalb des Messsystems. Der schematische Aufbau des Messsystems ist in Abbildung 7 am Beispiel einer drehzahlvariablen Windenergieanlage mit Synchrongenerator und Umrichter dargestellt.

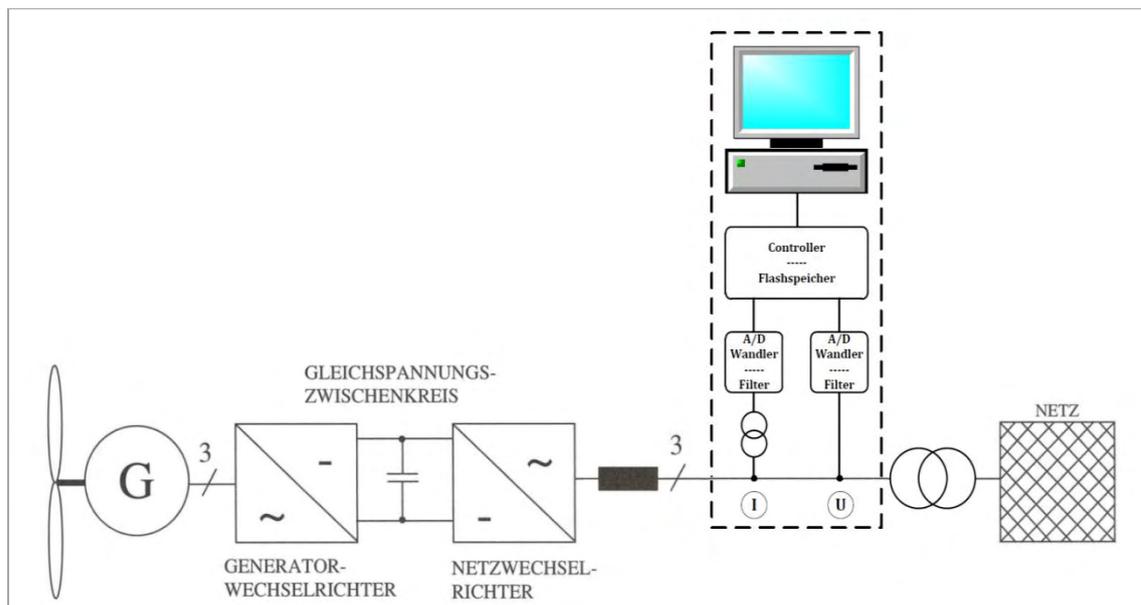


Abb. 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus mit den Hauptkomponente
Verändert nach. Schulz 2004, S.177.

6.1 Messumformer

Die zur Umwandlung und Anpassung der primären Messgrößen notwendigen Komponenten werden im Folgenden beschrieben.

6.1.2 Spannungsmessung

Aufgrund der Spannungsfestigkeit und des einstellbaren Messbereichs des verwendeten A/D-Wandlers bis ± 1200 V (siehe Datenblatt 1, S. A 45ff) ist bei diesem Aufbau keine weitere Signalanpassung notwendig (siehe Abbildung 7). Die Betrachtung der geforderten Genauigkeitsklasse der Wandler gemäß Tabelle 2 entfällt somit.

6.1.3 Strommessung

Die Aufzeichnung der Stromverläufe macht eine Umwandlung in ein für die A/D-Wandler erfassbares Spannungssignal notwendig. Übliche Messkampagnen erstrecken sich auf wenige Wochen. Das Öffnen der stromführenden Leiter ist in der Regel aufwendig. Damit ist die Verwendung von Stromwandlern, die das Öffnen von stromführenden Leitern nicht voraussetzen, notwendig.

Rogowskispulen lassen sich öffnen und bieten eine messbare Ausgangsspannung. Zusätzlich besitzen Rogowskispulen im Gegensatz zu anderen Wandlertypen die stationär eingesetzt werden eine höhere Bandbreite, um hohe Frequenzen zu erfassen. Da Rogowskispulen konstruktionsbedingt keine Gleichströme erfassen können, ist es möglich, geringe Wechselströme darzustellen, die hohen Gleichströmen überlagert sind.

Der Messbereich des verwendeten Typs ist in den Stufen 30 A, 300 A und 3000 A (Effektivwerte) skalierbar und ermöglicht damit die Erfassung der unter Kapitel 4.3.1 ermittelten Messgrößen.

Entsprechend des eingestellten Messbereichs ergeben sich die Empfindlichkeiten von $100 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$, $10 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$ und $1 \frac{\text{mV}}{\text{A}}$. Die daraus resultierende Ausgangsspannung beträgt somit in allen drei Messbereichen $3 V_{\text{eff}}$.

Die Anforderungen bezogen auf die Messunsicherheit bei der Stromerfassung wird eingehalten (siehe Tabelle 1). Der Hersteller gibt hier 1 % des Messwertes für die Grundschiwingung an (siehe Anhang, S. A48, Datenblatt 2-1). Genauigkeitsangaben für den höheren Frequenzbereich sind auch bei anderen Herstellern nicht zu erhalten.

6.2 A/D-Wandler

Die A/D-Wandler sind Bestandteil einer Reihe von integrierten Schaltungen innerhalb der verwendeten Messmodule von Gantner Instruments® (siehe Anhang, S. A 45ff, Datenblatt 1).

Die Messmodule erreichen bei einer Auflösung von 24 Bit eine Summenabtastrate von $f_{s,\text{sum}} = 200 \text{ kHz}$.

Bei maximal vier zur Verfügung stehenden Kanälen je Modul ergibt sich daraus die größtmögliche Abtastrate mit

$$f_{a,max} = \frac{f_{a,sum}}{\text{Kanalanzahl}} = \frac{200 \text{ kHz}}{4} = 50 \text{ kHz}. \quad (12)$$

Der unter 5.3 beschriebene Tiefpassfilter ist innerhalb der Messmodule als digitaler Filter 4. Ordnung realisiert und ist durch die Konfigurationssoftware *test.commander* entsprechend der Vorgaben umgesetzt.

Neben der Digitalisierung der analogen Eingangssignale durch die integrierten A/D-Wandler und Bereitstellung von digitalen Filterfunktionen stellen die Messmodule eine RS-485 Schnittstelle bereit. Durch dieses Bussystem wird die Anbindung zusätzlicher Module zur Erfassung weiterer Signale ermöglicht.

6.3 Test-Controller

Die Datenübertragung zwischen den Messmodulen und der Datenspeicherung am Computer, wird über einen Test-Controller sichergestellt (siehe Anhang, S. A 50ff, Datenblatt 3). Dieser ist moduleseitig durch die RS-485-Schnittstelle und PC-seitig durch eine Ethernetverbindung verbunden. Darüber hinaus synchronisiert der Test-Controller die angeschlossenen A/D-Wandler, um so eine phasensynchrone Messung der Messgrößen zu gewährleisten. Die von den Messmodulen kommenden Daten werden kontinuierlich in einen Ringspeicher abgelegt und für die Speicherung durch den Computer bereitgestellt.

6.4 Computer

Für die Speicherung der digitalisierten Messgrößen mittels eines Computers werden durch die IEC21 oder FGW TR3 keine Vorgaben gegeben. Hierbei muss eine zuverlässige Datenübertragung von den A/D-Wandlern zum Computer mit ausreichender Bandbreite und die anschließende Datenspeicherung auf einem geeigneten Datenträger gewährleistet sein. Die Aufgaben des Computers während der Messung beschränken sich auf die Speicherung der von dem Test-Controller bereitgestellten Messdaten. Dazu werden die Daten durch ein Programm kontinuierlich aus dem Ringspeicher des Test-

Controllers gelesen und in zuvor festgelegten Intervallen (siehe Kapitel 4.3.5) auf dem Computer gespeichert. Die anschließende Auswertung der Daten findet nicht zur Laufzeit der Messung statt.

7. AUSWERTEVERFAHREN

Im Folgenden werden die in der IEC21 und IEC4-7 genannten Auswertungsverfahren sowie die darauf aufbauende Umsetzung mit Matlab beschrieben. Anzumerken ist, dass die bei der Auswertung verwendeten Programme und Algorithmen nicht zur Laufzeit der Signalaufzeichnung angewendet werden. Die Messung und Auswertung sind aufgrund der begrenzenden Rechenleistung des Computers zeitlich getrennte Vorgänge.

7.1 IEC Vorgaben zu den Auswerteverfahren

Aufgrund der Auswirkungen von Stromüberschwingungen an den Netzimpedanzen werden diese im Gegensatz zu den Spannungsüberschwingungen detaillierter behandelt (vgl. Kloss 1996, S.33ff). Die Auswertung der Spannungsüberschwingungen beschränkt sich auf die unter Kapitel 7.1.3 beschriebene THD-Gruppierung.

7.1.1 Wirkleistungsberechnung

Die natürlich bedingten schwankenden Windgeschwindigkeiten haben Leistungsschwankungen zur Folge. Infolgedessen wird die abgegebene Gesamtwirkleistung im Zuge der IEC Auswertungen in unterschiedliche Leistungsklassen klassifiziert (Power-Bins). Diese Power-Bins beinhalten die gesamte Leistungsbandbreite von 0 % bis 100 % P_n der EZE.

7.1.2 Diskrete Fourier Transformation

Aus dem Zusammenhang der Fourier-Reihe ergibt sich, dass sich jede nicht sinusförmige, periodische Funktion durch eine unendliche Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen darstellen lässt (vgl. Schulz 2004, S. 195ff). Dementsprechend ist zur Auswertung der erfassten Spannungs- und Stromverläufe die Fourier-Analyse vorgesehen. Da es sich bei den aufgezeichneten Messreihen um eine endliche Anzahl diskreter Messwerte handelt, wird zur Darstellung der Messsignale im Frequenzspektrum die Diskrete Fourier Transformation (DFT) angewendet. Für die weitere Verarbeitung der einzelnen Frequenzspektren ist im Anschluss der DFT über die Breite jeder 10-Minuten Messreihe der arithmetische Mittelwert der einzelnen Frequenzbandmaxima zu bilden (vgl. IEC21 2008, S. 28).

7.1.3 Frequenzauflösung

Die Frequenzauflösung Δf beschreibt die Breite der einzelnen Spektralanteile. Aus den beschriebenen Vorgaben für die Gruppierungen (siehe Kapitel 7.1.4) ergibt sich für den Spektralbereich eine Frequenzauflösung von $\Delta f = 5$ Hz.

7.1.4 Gruppierung

Eine Gruppierung der Oberschwingungsanteile wird angewendet, weil die Amplituden im Stromnetz nicht gleichbleibend sind. Diese ungleichmäßigen Amplituden haben die Verteilung der Anteile auf die Seitenbänder des Frequenzspektrums der DFT zur Folge (vgl. IEC21 2008, S. 27). Infolgedessen werden die Seitenbänder durch die Untergruppierung einer Oberschwingungsordnung beziehungsweise einer Zwischenharmonischen zugeordnet (siehe Abbildung 8).

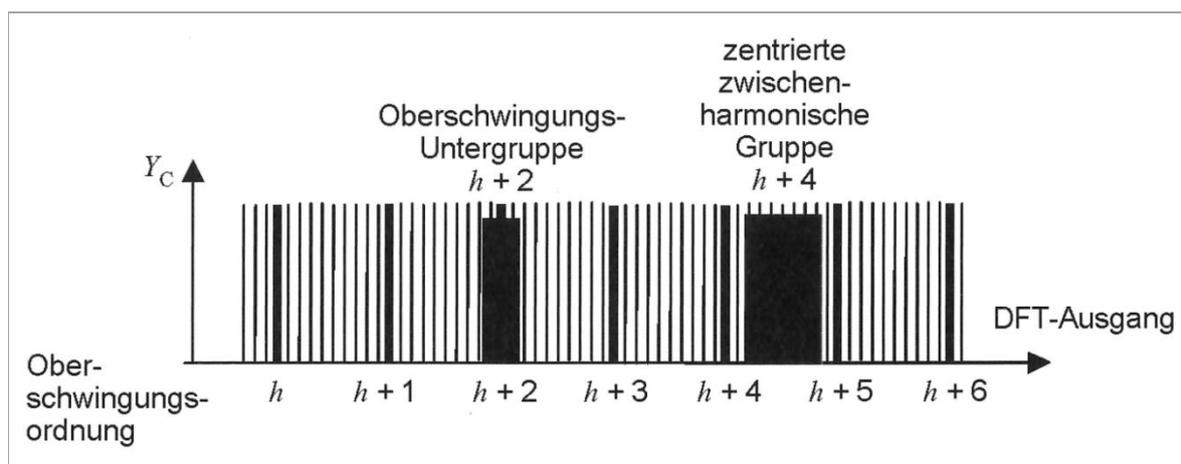


Abb. 8: Gruppierung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen. IEC4-7, S.20.

Oberschwingungen

Die Gruppierung der Oberschwingungsanteile bis zur 50. Harmonischen folgt der IEC4-7-Vorgabe mit der Gleichung

$$Y_{sg,h}^2 = \sum_{k=-1}^1 Y_{c,(N_{IEC} \cdot h) + k}^2 \quad (13)$$

Wobei $Y_{sg,h}$ den Effektivwert einer Oberschwingungsgruppe der Ordnung h (Strom oder Spannung) und $Y_{c,k}$ den Effektivwert eines spektralen 5 Hz-Anteils darstellt, der sich aus der Amplitude c_k des Frequenzanteils mit

$$Y_{c,k} = \frac{c_k}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

gemäß IEC 61000-4-7 bildet.

Gesamtoberschwingungsverzerrung

Die Gesamtoberschwingungsverzerrungen (THD) sind nach

$$THC = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_n} * 100 \quad (15)$$

aus den eingruppierten Anteilen der Effektivwerte der Oberschwingungsströme I_h abzuleiten. Die Gleichung 15 ist in dieser Form der IEC 21 entnommen, die für die Total Harmonic Distortion sowohl die Bezeichnung THC und THD verwendet.

Zwischenharmonische

Zur Ermittlung der Zwischenharmonischen sind die spektralen Anteile als Untergruppen bis 2 kHz nach der IEC4-7 gemäß Gleichung 16 anzugeben.

$$C_{n+0.5g}^2 = \sum_{k=2}^8 c_{10n+i}^2 \quad (16)$$

Ist die Erzeugungseinheit an ein 60 Hz-Netz gekoppelt, ist anstelle des Terms

$$c_{10n+i}^2 \quad (17)$$

welcher 10 Netzperioden innerhalb des zu bewertenden DFT-Fensters berücksichtigt mit

$$c_{12n+i}^2 \quad (18)$$

und entsprechend 12 Netzperioden zu rechnen.

Anteile höherer Frequenzen

Oberhalb von 2 kHz werden die Frequenzanteile bis 9 kHz gemäß IEC4-7 untergruppiert (vgl. IEC4-7 2000, S29).

$$C_b = \sqrt{\sum_{f=b-90}^{b+100 \text{ Hz}} S^2(f)} \tag{19}$$

Dabei entspricht C_b dem Effektivwert des ausgewerteten Frequenzbandes, welches ausgehend von der Bandmitte b , aus den benachbarten Amplituden der Frequenzanteile $S(f)$ nach Gleichung 19 summiert wird, wodurch sich eine Bandbreite von 195 Hz ergibt (siehe Abbildung 9).

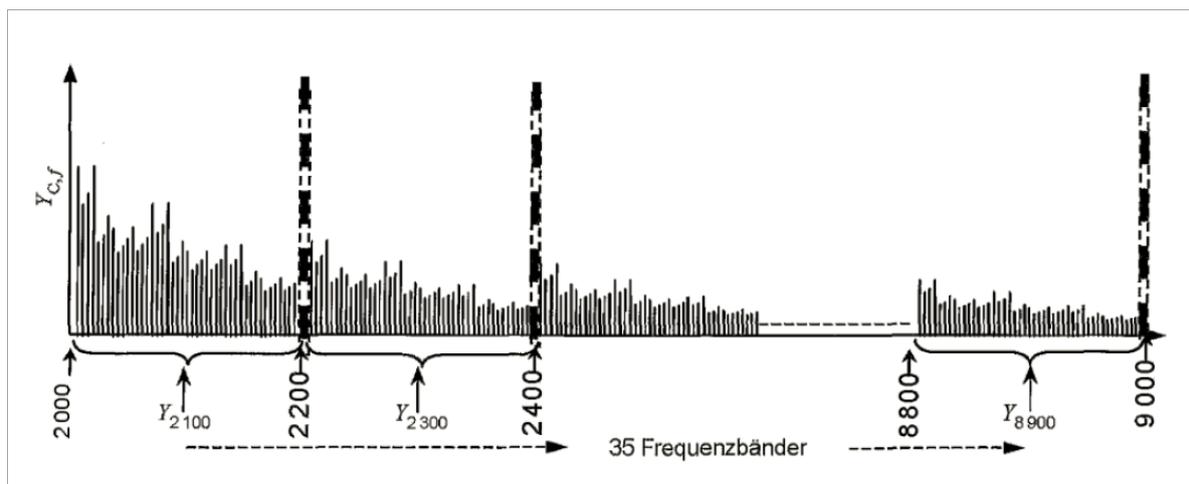


Abb. 9: Gruppierung der Anteile höherer Frequenzen nach IEC 61400-4-7 2000, S.29.

7.1.6 Ausgabe

Zusätzlich zu den Berechnungen wird auch die Dokumentation der erfassten Oberschwingungen vorgegeben, um die Auswertung für das weitere Verfahren der Zertifizierung von EZE und EZA zu vereinheitlichen. Die FGW TR3 schreibt hierbei die notwendigen Inhalte der Prüfberichte vor.

Im Prüfbericht sind die Maxima der ermittelten Untergruppen (Oberschwingungen, Zwischenharmonische und Anteile höherer Frequenzen) auf zwei Nachkommastellen anzugeben.

7.2 Matlab

Sowohl die Berechnungsverfahren, wie auch die Vielzahl der aufgenommenen Messreihen erfordern eine Auswertung am Computer. Die händische Berechnung ist aufgrund der Datenmenge nicht möglich. Die Auswertung am Computer ermöglicht die Stapelverarbeitung großer Datenmengen. Ständig wiederkehrende Berechnungen gleichen Musters können auf diese Weise automatisiert abgearbeitet werden. Das Computerprogramm Matlab wird für die numerische Berechnung genutzt und verfügt über implementierte Bibliotheksfunktionen, die den Programmieraufwand reduzieren können. Der Programmablauf und die Nutzung von Funktionen sowie der Syntax verhalten sich in Matlab ähnlich klassischer Programmiersprachen wie C/C++. Die Befehlszeilen werden auch in Matlab zeilenweise abgearbeitet.

7.2.1 Umsetzung der Vorgaben

Quellcode: siehe Anhang Seite A 23, OS_Auswertung.m

Im Folgenden werden der Ablauf der geschriebenen Skripte und damit die Umsetzung der unter Kapitel 7.1 genannten Vorgaben beschrieben. Einen Überblick über den Programmablauf des Hauptprogramms `OS_Auswertung.m` zur Oberschwingungsauswertung einer Messreihe gibt Abbildung 10.



Abb. 10: Schematischer Programmablauf der Oberschwingungsauswertung.

Den Ausgangspunkt bilden die vom Messsystem erfassten 10-Minuten-Messreihen, die anschließend durch die Messwerterfassungssoftware in Form von *Structures* auf dem Computer gespeichert werden. Diese in Abbildung 11 dargestellten *Structures* enthalten die Wertematrizen für die Variablen (Zeitstempel, Phasenströme und Phasenspannungen).

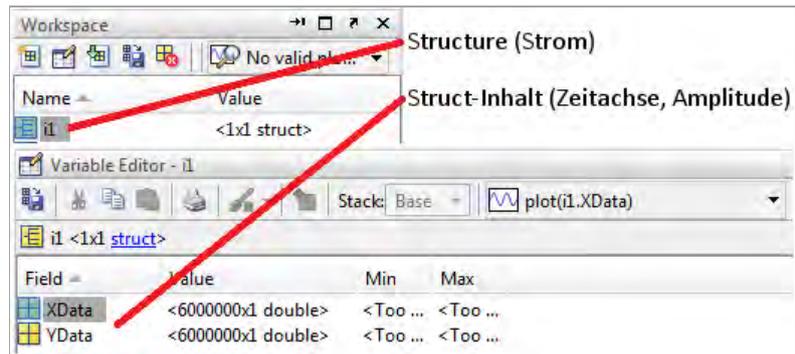


Abb. 11: Darstellung der Ausgangsdaten für die Auswertung.

Berechnung und Klassifizierung der Wirkleistungen

Quellcode: siehe Anhang Seite A 7, batchDir_mean_Power.m

Zur getrennten Auswertung der Messreihen entsprechend der geforderten Klassifizierung in Power Bins (siehe Kapitel 7.1) wird eingangs die Gesamtwirkleistung aus den Strom- und Spannungsverläufen ermittelt. Die Abbildung 12 veranschaulicht den Ablauf des für diesen Zweck geschriebenen Matlab-Skripts.

Wirkleistungsberechnung und Klassifizierung



Abb. 12: Struktureller Aufbau der Wirkleistungsberechnung.

Manuelle Sortierung der Wirkleistungsklassen

Die von dem Skript erstellte Textdatei ermöglicht es dem Nutzer einen Überblick über die gesammelten Daten und den dazugehörigen Wirkleistungen zu erhalten.

Für den weiteren Verlauf der Auswertung ist es sinnvoll, die Messreihen der den Leistungsklassen entsprechenden Verzeichnisse zuzuordnen. Dieser Vorgang kann derzeit nur manuell vom Nutzer durchgeführt werden und ist nicht automatisiert.

7.2.2 Resampling

Quellcode: siehe Anhang Seite A 31, neuAbtast.m

Für das weitere Verfahren ist vor der Auswertung durch die folgende FFT eine Anpassung der Abtastrate in Abhängigkeit der Netzfrequenz notwendig (siehe Kapitel 7.2.3). Durch diese Neuabtastung mit dem Verfahren der linearen Interpolation werden der originalen Messreihe zusätzliche Samples hinzugefügt (Stützstellen).

Umgesetzt wird dieses als Resampling bezeichnete Verfahren durch die eigens hierfür geschriebene Funktion neuAbtast.m innerhalb des Hauptprogramms.

7.2.3 Diskrete Fourier Transformation

Quellcode: siehe Anhang Seite A 32, macheFFT.m

Wie im Kapitel 7.1.2 beschrieben sieht die IEC21 zur Bestimmung der Frequenzanteile die DFT vor. Die sogenannte *schnelle-Fourier-Transformation* (FFT), die hier angewendet wird, reduziert den Rechenaufwand und ist eine effiziente Methode die DFT zu berechnen und damit die Rechenlast des Computers zu reduzieren. Der FFT-Algorithmus ist als Funktion in Matlab implementiert.

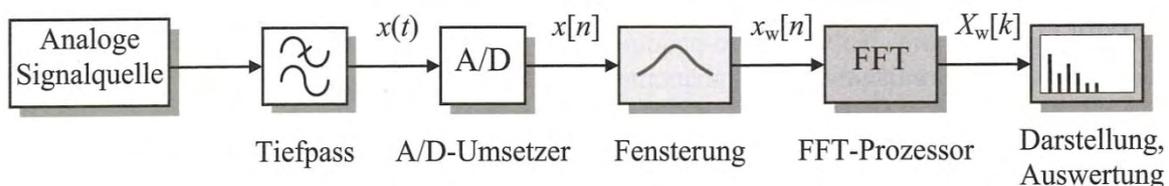


Abb. 13: Schematischer Ablauf der Signalverarbeitung innerhalb der Messkette. Werner 2012, S. 56.

Die FFT-Funktion arbeitet blockorientiert die Werte des diskreten Eingangssignals $x[n]$ ab, und berechnet im Verlauf eines geschriebenen Skriptes aus diesen ausgeschnittenen Teilfolgen $x_w[n]$ (Fenster) die Amplituden des Frequenzspektrums $X_w[k]$ für diesen Ausschnitt. Die notwendige Fensterbreite für die Ausschnitte gibt hier die IEC21 entsprechend der Netzfrequenz mit 10 beziehungsweise 12 Netzperioden vor.

Eine weitere Voraussetzung für die korrekten Ergebnisse der DFT bildet die Sampleanzahl innerhalb des zu bewertenden Fensters. Der FFT-Algorithmus verlangt hier eine Sampleanzahl von $N_w = 2^n$ Samples innerhalb des Bewertungsfensters. Aus diesem Zusammenhang ergibt sich bei einer Netzfrequenz von 50 Hz für die Fensterbreite mit

$$T_{W,50} = N_{IEC} * f_{Netz} \quad (20)$$

$$T_{W,50} = 10 * 0,02 \text{ s} = 0,2 \text{ s} \quad (21)$$

und einer selbst gewählten Sampleanzahl von $N_w = 2^{13}$ eine notwendige Abtastrate für die FFT von

$$f_{FFT} = \frac{2^{13}}{T_{W,50}} = \frac{4096}{0,2 \text{ s}} = 20480 \text{ Hz}. \quad (22)$$

Da diese Abtastrate des Messsystems konstruktiv bedingt nicht auf die Frequenz f_{FFT} einstellbar ist, macht dies ein Resampling der Messreihen wie in Kapitel 7.2.3 beschrieben notwendig.

Das Abtasttheorem nach

$$f_{FFT} \geq 2 * f_{max} \quad (23)$$

mit der höchsten zu bewertenden Frequenz von $f_{max} = 9 \text{ kHz}$ wird somit bei der gewählten Sampleanzahl N_w für die DFT eingehalten (vgl. Werner 2012, S. 56f).

Frequenzbänder und -auflösung

Die geforderte Frequenzauflösung Δf und damit die Breite der einzelnen Frequenzbänder ergibt sich aus der Abtastrate f_{FFT} und der Sampleanzahl innerhalb des DFT-Fensters mit

$$\Delta f = \frac{f_{FFT}}{N_W} = \frac{20480 \text{ Hz}}{4096} = 5 \text{ Hz.} \quad (24)$$

Die Realisierung der DFT, der Fensterung sowie die unter Kapitel 7.1.2 geforderte Mittelwertbildung sind innerhalb des Skriptes `makeFFT.m` umgesetzt.

Innerhalb der betrachteten Messreihe wird das FFT-Fenster blockweise über die Eingangssignale „geschoben“. Damit ergibt sich für jede Messreihe eine größtmögliche Anzahl Frequenzspektren von

$$N_{FFT} = \frac{f_{FFT} * T_{600}}{N_W} = \frac{20480 \frac{1}{s} * 600 \text{ s}}{4096} = 3000, \quad (25)$$

was den Rechenaufwand der Auswertung widerspiegelt. Die Ermittlung der arithmetischen Mittelwerte jedes Frequenzbandes schließt die Umsetzung der FFT in diesem Matlab-Skript ab und bedient damit die beschriebenen IEC21-Vorgaben aus Kapitel 7.1.2.

Die Ausgabe des Matlab-Skriptes `makeFFT.m` ist eine Wertematrix, die die Mittelwerte des Amplitudenspektrums zum Inhalt hat. Dieses Amplitudenspektrum deckt die Bandbreite von $0 \leq f \leq f_{FFT}$ mit einer Bandbreite der Einzelspektren mit $\Delta f = 5 \text{ Hz}$ ab.

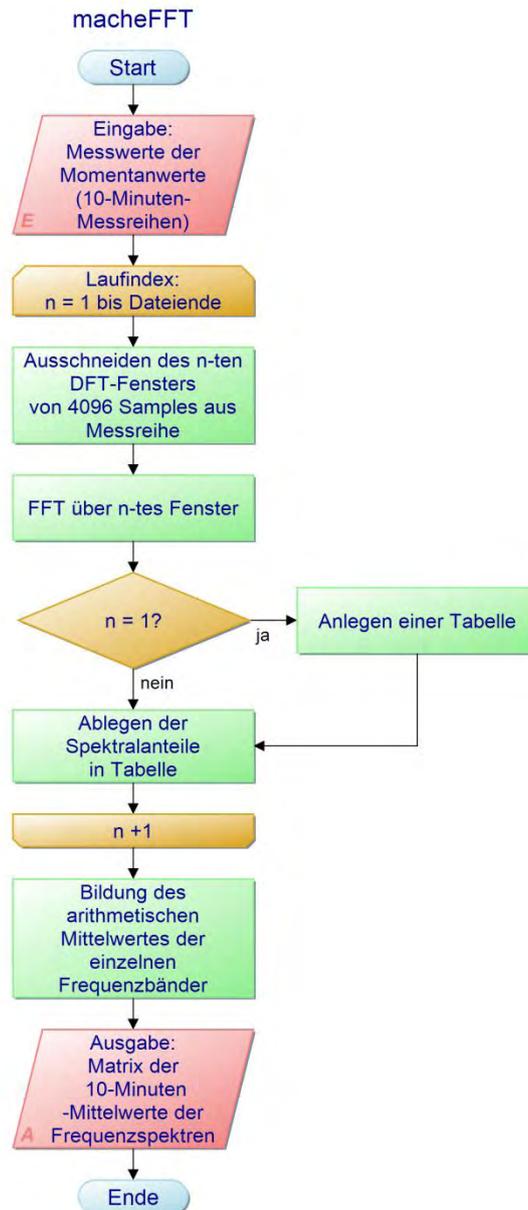


Abb. 14: Schematischer Programmablauf des Skriptes macheFFT.m

Der in der Abbildung 14 dargestellte Programmablauf beschreibt die Auswertung einer 10-Minuten-Messreihe. Aufgrund der IEC21-Forderung nach mindestens neun dieser Messreihen, ist die Ausführung des Skriptes macheFFT.m im rufenden Hauptprogramm OS_Auswertung.m als Schleife realisiert. Diese Schleife wiederholt sich entsprechend der Anzahl der Messreihen, die sich innerhalb des ursprünglich gewählten Verzeichnisses befinden.

7.2.4 Gruppierung

Die geschriebenen Skripte zur Gruppierung dienen der Zusammenfassung der einzelnen Frequenzbänder zu Untergruppen, entsprechend der zu bewertenden Frequenzbereiche wie in Kapitel 7.1.4 beschrieben.

Oberschwingungen

Quellcode: siehe Anhang Seite A 34, gruppierereOS.m

Dieses Matlab-Skript bildet aus den durch `makeFFT.m` erzeugten Frequenzspektren Oberschwingungsuntergruppen der Ordnung $h_1 \dots h_{50}$. Hierzu werden gemäß Gleichung 13 die Effektivwerte zu jeder Harmonischen sowie die beiden anliegenden Frequenzbänder geometrisch summiert als Effektivwert der Untergruppe ausgegeben.

Die Oberschwingungsgesamtverzerrung (Total Harmonic Distortion) wird aus den Untergruppen der Oberschwingungen gebildet (siehe Gleichung 15). Aus diesem Grund ist die Berechnung der THD, wie in Abbildung 15 zu sehen, im Anschluss an die Gruppierung realisiert.

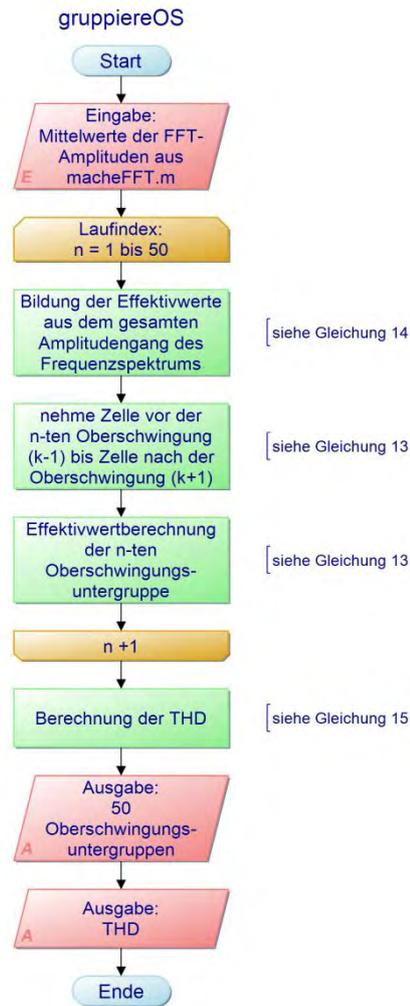


Abb. 15: Schematischer Ablauf der Oberschwingungsgruppierung.

Zwischenharmonische

Quellcode: siehe Anhang Seite 37, gruppiereZHA2.m

Die Berechnung der Zwischenharmonischen unterscheidet sich im Wesentlichen nur durch die Anzahl der spektralen Anteile. Diese resultiert aus den restlichen spektralen Anteilen zwischen den Oberschwingungs-Untergruppen wie in Abbildung 8 dargestellt.

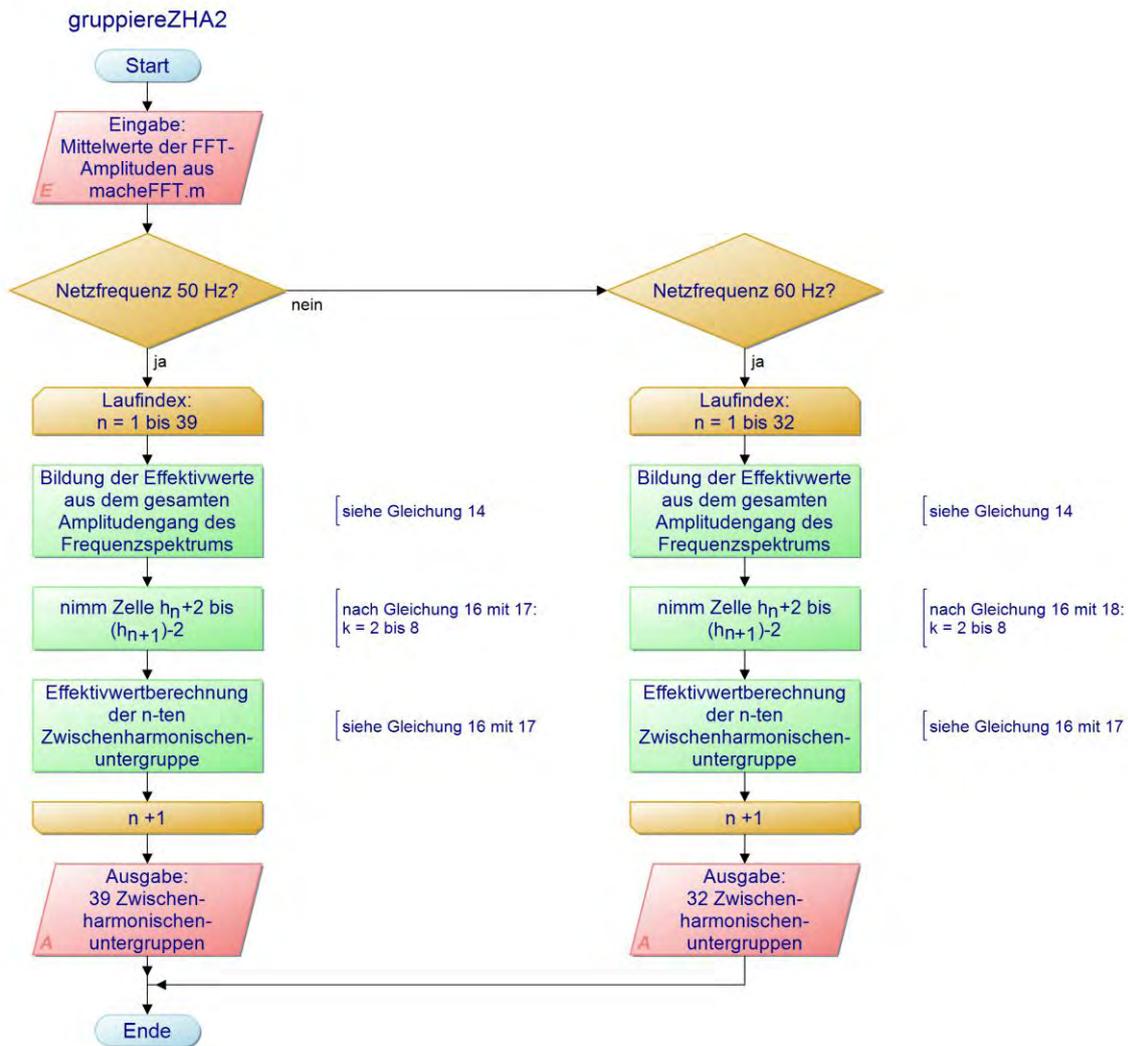


Abb. 16: Programmablauf des Skripts `gruppierereZHA2.m` entsprechend der Netzfrequenz.

Im Unterschied zur Oberschwingungsgruppierung, ändert sich bei der Gruppierung der Zwischenharmonischen die Anzahl der Untergruppen in Abhängigkeit zur Netzfrequenz. Aufgrund der Bandbreite der Grundschwingung von bis zu 2 kHz ergeben sich für ein 50 Hz-Netz 39 Untergruppen und für ein 60 Hz-Versorgungsnetz 32 Untergruppen. Entsprechend wird dies im Programmablauf, wie in Abbildung 16 zu sehen, berücksichtigt.

Anteile höherer Frequenzen

Quellcode: siehe Anhang Seite A 39, `gruppierereHF.m`

Entgegen der in Kapitel 7.1.4 genannten formalen Vorgaben zur Bildung der Untergruppen wird in dem Quellcode mit

$$Y_{B,b} = \sqrt{\sum_{f=b-95}^{b+100 \text{ Hz}} Y_{C,f}^2} \quad (26)$$

gerechnet (vgl. DKE -DIN EN 61000-4-7 2009, S. 29). Gleichung 19 sieht eine Summierung der Frequenzanteile mit

$$\sum_{b-90}^{b+100} \quad (27)$$

vor, was zur Folge hat, dass die Untergruppen-Bandbreite nur 195 Hz beträgt. Die Umsetzung der Summierung wird wie bei der Oberschwingungs- und Zwischenharmonischen-Gruppierung durch eine Schleife umgesetzt (siehe Abbildung 17).



Abb. 17: Schematischer Programmablauf der HF-Gruppierung durch Skript gruppierenHF.m.

Die Anzahl der Schleifendurchgänge ist abhängig von den geforderten Untergruppen, die bei den Anteilen höherer Frequenzen 35 beträgt (siehe Abbildung 9).

7.2.5 Ausgabe

Quellcode: siehe Anhang Seite A 23, OS_Auswertung.m

Die Ausgabewerte der zuvor beschriebenen Programmabschnitte werden nach den Berechnungen in ein finales *Structure* geschrieben und im Matlab-Format gespeichert.

Zur Visualisierung der Ausgabewerte werden die matlab-internen Diagrammfunktionen genutzt. Da diese wie alle Matlab-Operationen im Quellcode geschrieben werden, können diese umfangreich ausfallen, werden hier aber nicht weiter beschrieben.

8. VALIDIERUNG DER OBERSCHWINGUNGS-AUSWERTUNG

Nach den zuvor betrachteten Auswertungsverfahren und der Beschreibung der Umsetzung dieser in Matlab, wird die Funktion des Programms anhand von Messreihen überprüft. Da bis zum Abschluss dieser Arbeit die Aufzeichnung von Messreihen an einer Erzeugungseinheit nicht möglich ist, wird zu diesem Zweck ein Matlab-Skript geschrieben, welches Musterdaten generiert. Die Funktion der Komponenten der Messkette kann im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

8.1 Signalgenerator

Quellcode des Sinusgenerators: siehe Anhang Seite A 41ff, OS_val_gen_sin, macheOS.m

Zur Beurteilung der unterschiedlichen Gruppierungsverfahren wird mit einem Matlab-Skript eine zeitdiskrete Grundschwingung nach Gleichung

$$y_k(t_n) = a_k * \sin(2 * \pi * f_k * t_n) \quad (28)$$

erzeugt. Wobei $k = 1 \dots 7$ für die frei gewählte Anzahl der Frequenzanteile f_k mit den entsprechenden Amplituden a_k steht. Die diskreten Zeitschritte t_n sind gegeben durch

$$t_n = n * T_s, \quad (29)$$

wobei $T_s = f^{-1}$ des Abtastintervalls ist und n von 0 bis von $\frac{T_{600}}{T_s} - 1$ läuft. T_{600} ist das Messintervall und entspricht der Dauer von 10 Minuten. Durch Addition nach

$$y_{os}(t_n) = \sum_{k=1}^7 y_k(t_n) \quad (30)$$

wird die resultierende Oberschwingungsbelastete Amplitude y_{os} erzeugt und als Wertematrix für die folgenden Auswertungen gespeichert. Somit ist es möglich mit unterschiedlichen Frequenz- und Amplitudenparametern die gewünschten Oberschwingungen zu erzeugen.

Wenn nicht anders angegeben, wird für die gesamte Validierungsreihe eine einheitliche Amplitude der Spannungen und Ströme von $\sqrt{2}$ gewählt. Die Ausgabe der gruppierten Stromanteile in $\frac{I}{I_n}$ [%] folgt den Vorgaben der FGW TR3.

8.2 Überprüfung der Reproduzierbarkeit

Betrachtet wird die Wiederholbarkeit der FFT-Realisierung durch das Matlab-Skript `makeFFT.m`. Hierzu durchläuft eine identische Messreihe reihenweise das Hauptprogramm `OS_Auswertung.m`, wodurch festgestellt wird, ob sich zur Laufzeit des Programms Parameter ändern und die Ausgabe an die nachfolgenden Funktionen beeinflussen. Da diese Ausgabematrix der FFT die Grundlage für die anschließenden Gruppierungen bildet, werden diese Gruppierungsverfahren später betrachtet.

Bei den erzeugten Signalen handelt es sich um ein ideales Drehstromsystem aus Sinusschwingungen mit einer Frequenz von 50 Hz (siehe Abbildung 18). Die Signalformen der Ströme sind nicht überschwingungsbelastet. Die dadurch zu erwartende geringere Anzahl von möglichen Spektralanteilen soll die Übersicht verbessern und dadurch die Auswertung vereinfachen.

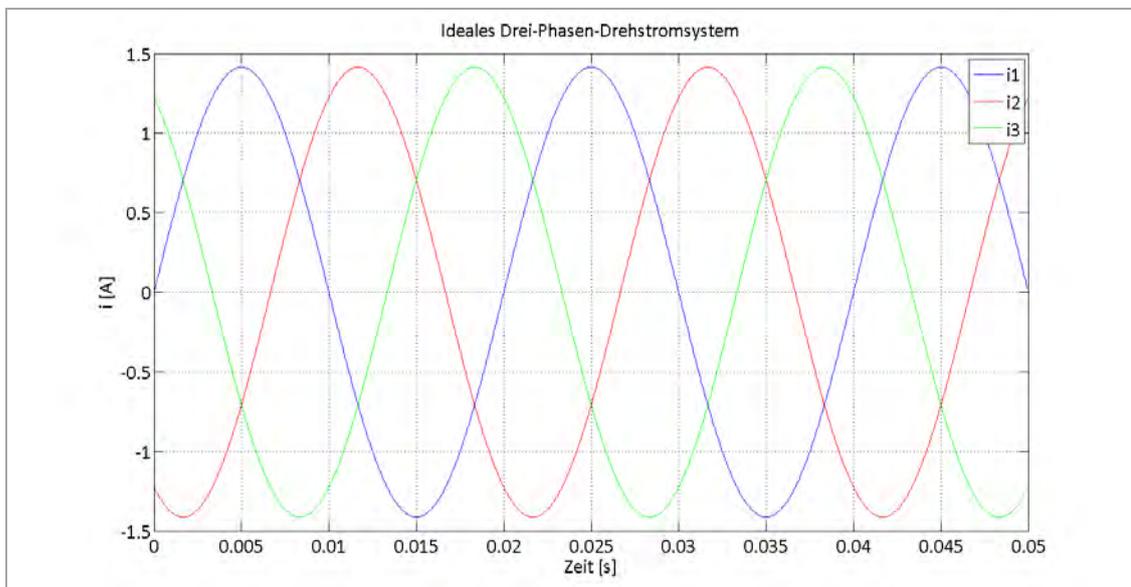


Abb. 18: Musterdaten zur Auswertung des Matlab-Skriptes.

Durchführung und Ergebnisse

Ausgabedatei und Berechnungen: Anhang CD, ... \val_data\kapitel_8.2

Nach fünfmaligem Durchlaufen der Eingangssignale werden die Amplituden jedes zuvor ermittelten spektralen Anteils auf Abweichungen untersucht.

Innerhalb des darstellbaren Wertebereichs von Microsoft Excel sind keine Abweichungen zu den einzelnen Durchläufen festzustellen. Es wird somit angenommen, dass aus gespeicherten Messreihen zukünftig die produzierten Ergebnisse wiederholt rekonstruiert werden können.

8.3 Abweichungen der Grundschiwingung

Ausgabedatei und Berechnung: Anhang CD, ... \val_data\kapitel_8.3

Zur Erfassung von Abweichungen der Berechnungsergebnisse des Matlab-Skriptes OS_Auswertung.m zur eingestellten Nennamplitude der Datenreihe werden fünf unterschiedliche Signale generiert.

Tab. 3: Signaleigenschaften zur Validierung der Abweichungen

	f [Hz]	f _s [kHz]	I/I _n [%]
Datenreihe #1	50	20	0
Datenreihe #2			10
Datenreihe #3			25
Datenreihe #4			50
Datenreihe #5			100

Die gemeinsame Abtastrate von 20 kHz mit der die Daten generiert werden entspricht dabei ebenso wie die Struktur einem realen Datensatz. Wie in Kapitel 8.2 ist die Signalform einem Drehstromsystem nachempfunden, unterscheidet sich jedoch in den Amplituden der einzelnen Signale (siehe Tabelle 3). Hierdurch soll ermittelt werden, ob und in welcher Höhe sich die Abweichungen mit der Höhe der Amplitude ändern.

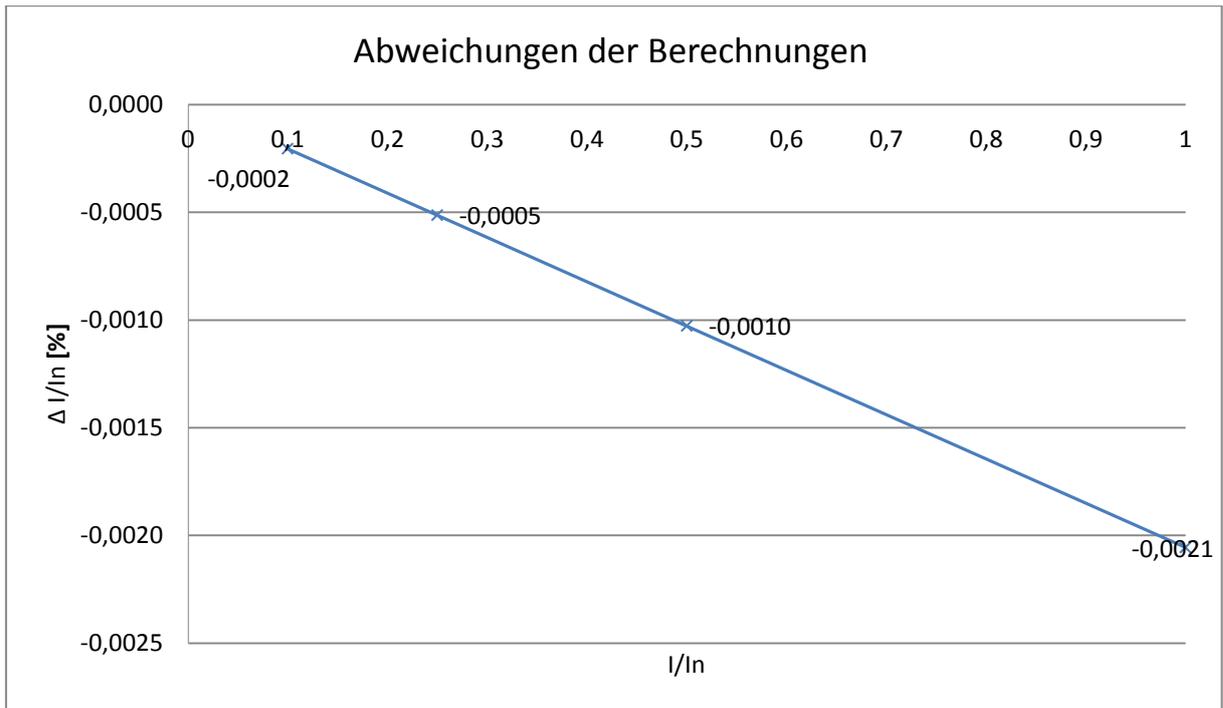


Abb. 19: Abhängigkeit der Abweichung von der Höhe des relativen Stromes.

Zu erkennen ist in Abbildung 19, dass die von Matlab ermittelten Amplituden mit steigendem relativem Strom linear bis zum Maximum bei $I/I_n = 1$ abweicht. Aufgrund der von der FGW TR3 geforderten Messauflösung (vgl. FGWTR3, S. 17) von $\leq 0,05$ % des Nennstroms werden diese Abweichungen vernachlässigt.

Die Verarbeitung von Datenreihen mit der Amplitude von 0 A (siehe Datenreihe #1, Tabelle 3) wird nach eine Fehlermeldung von Matlab abgebrochen. Da bei realen Messreihen aufgrund von stochastischen Signalen keine Messreihen mit einer Amplitude von 0 A zu erwarten sind, ist davon auszugehen, dass dieser Fehler bei realen Messreihen nicht auftritt.

8.4 Gruppierung der Oberschwingungen

Ausgabedatei und Berechnung: Anhang CD, ... \val_data\kapitel_8.4

Mit Harmonischen der 5. und 7. Ordnung und den zugehörigen Seitenspektren wird die Funktion `gruppiereOS.m` überprüft.

Tab. 4: Signalparameter zur Überprüfung der Oberschwingungsgruppierung.

	Grundschwingung	Oberschwingungskomponenten					
fs [Hz]	f1 [Hz]	f2 [Hz]	f3 [Hz]	f4 [Hz]	f5 [Hz]	f6 [Hz]	f7 [Hz]
20000	50	245	250	255	345	350	355
I/In [%]	100	1	1	1	0,5	0,5	0,5

Die Höhe der relativen Ströme ist zur besseren Vergleichbarkeit bei der folgenden visuellen Auswertung des Amplitudengangs, für das jeweilige Frequenzband einheitlich gewählt.

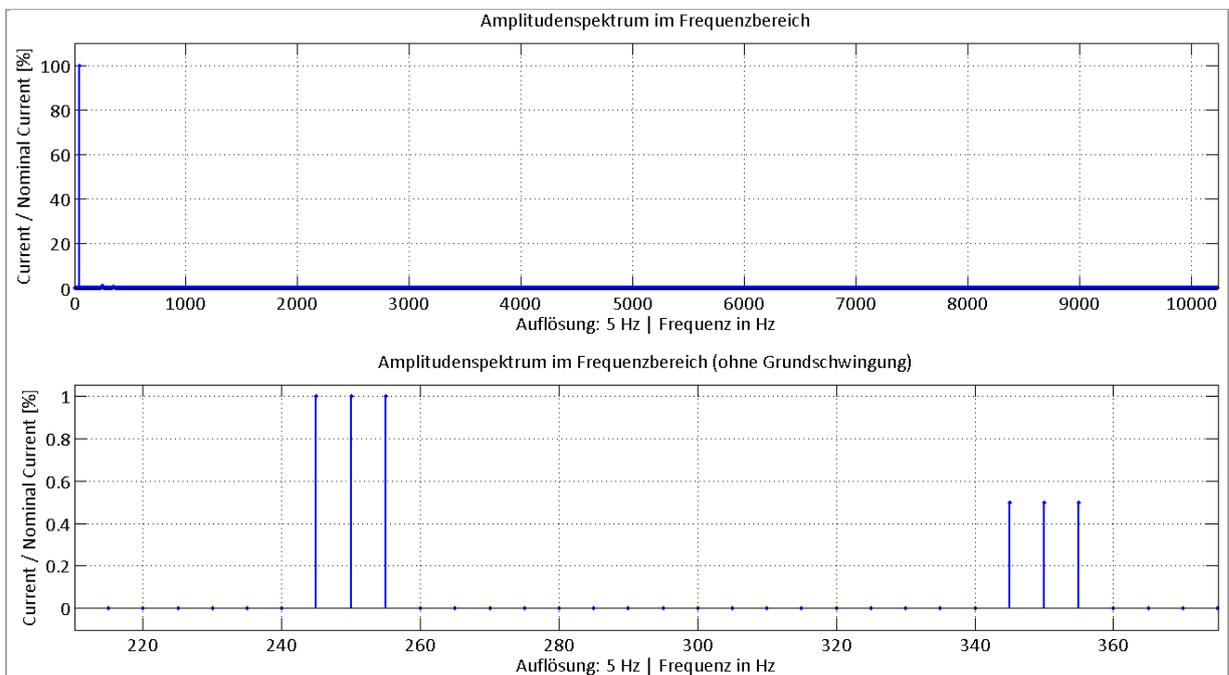


Abb. 20: Frequenzspektren des Eingangssignals.

Die Darstellung des Amplitudengangs in Abbildung 20 oben zeigt deutlich die Grundfrequenz des Stromsignals mit einem relativen Anteil von nahezu 100%. Die Anteile der drei Oberschwingungen gleicher Amplitude entsprechen mit 1 % und 0,5 % ebenfalls den in Tabelle 4 dargestellten Eigenschaften des ausgewerteten Eingangssignals.

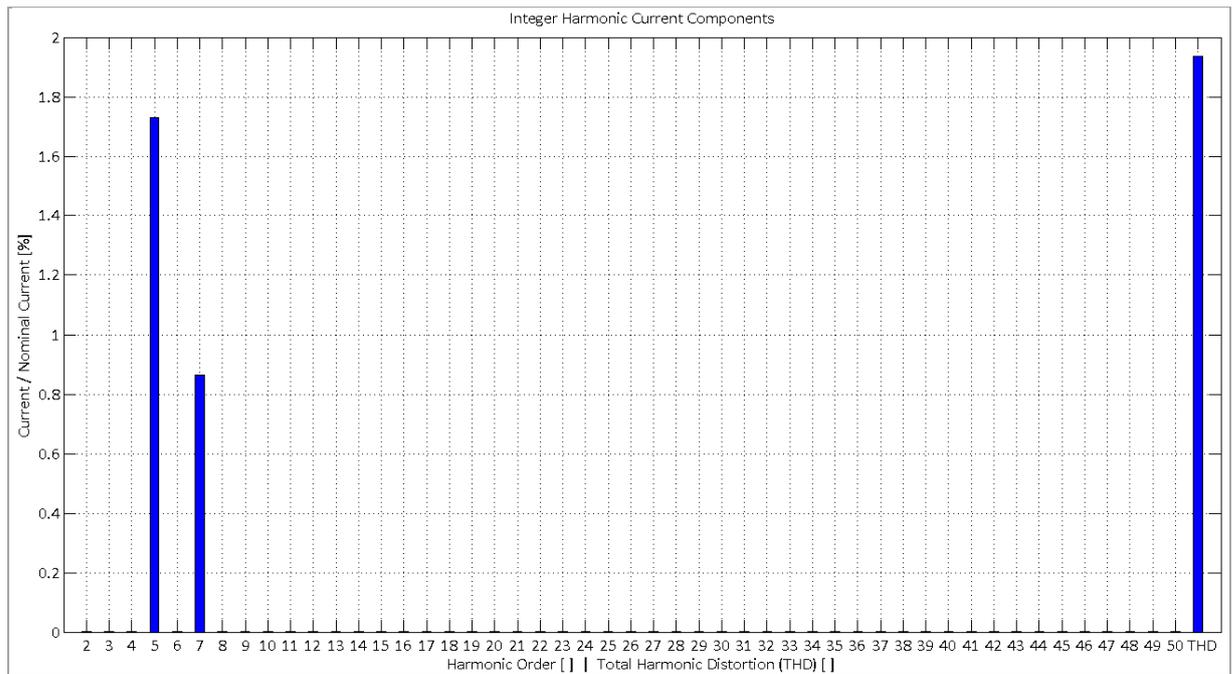


Abb. 21: Untergruppen der Oberschwingungsanteile bis zur 50 Harmonischen.

Die einwandfreie Zusammenfassung der spektralen Anteile der 5. und 7. Harmonischen ist in Abbildung 21 zu erkennen. Grundlage des dargestellten Diagramms sind die gruppierten Effektivwerte $Y_{c,k}$ der 5 Hz breiten Spektralanteile wie sie in Abbildung 20 (unten) dargestellt sind. Zur Überprüfung werden die zugrundeliegenden genauen Werte aus der Ausgabematrix der Matlab-Funktion `makeFFT.m` entnommen. Tabelle 5 zeigt diese Werte als nicht normierte Amplituden i und deren Anteile i/I_n .

Tab. 5: Quelldaten aus der FFT durch das Skript `makeFFT.m`.

	Grundschwingung	Oberschwingungskomponenten					
fs [Hz]	f1 [Hz]	f2 [Hz]	f3 [Hz]	f4 [Hz]	f5 [Hz]	f6 [Hz]	f7 [Hz]
20000	50	245	250	255	345	350	355
i [A]	1,41418	0,01414	0,01413	0,01413	0,00706	0,00706	0,00706
I/In [%]	99,99794	0,99951	0,99949	0,99947	0,49951	0,49950	0,49948

Mit Gleichung 14 ergeben sich mit den Amplituden $c_k = i$ die Effektivwerte der einzelnen Ströme gemäß

$$Y_{c,k} = \frac{i_i}{\sqrt{2}} \quad (31)$$

und weiterführend die Effektivwerte des Oberschwingungsuntergruppe $Y_{sg,h}$ der 5. Oberschwingungsordnung mit

$$Y_{sg,5} = 0,01731 \text{ A.} \quad (32)$$

Durch Normierung nach $I_{h,i}/I_n$ mit $I_{h,5} = Y_{sg,5}$ und dem Nennstroms $I_n = 1 \text{ A}$, erhält man nach abschließender Prozentbildung den mit zwei Nachkommastellen zu rundenden (vgl. FGW-TR3, S. 25) Oberschwingungsanteil

$$\frac{I_{h,5}}{I_n} = 1,73 \%. \quad (33)$$

Analog zu der vorangegangenen Berechnung ist der Oberschwingungsanteil der 7. Harmonischen zu ermitteln. Dies führt zusammen mit den theoretischen Nennwerten der Oberschwingungsanteile, die sich aus den Signalparametern der Tabelle 4 ergeben, zu der im Folgenden gezeigten Gegenüberstellung:

Tab. 6: Gegenüberstellung der theoretischen mit den durch Matlab berechneten Ergebnissen.

	Oberschwingungsanteile	
	$I_{h,5}$ [% I_n]	$I_{h,7}$ [% I_n]
mit Matlab	1,73116	0,86515
theoretisch	1,73205	0,86603
$\Delta I/I_n$ [% I_n]	-0,00089	-0,00087

Der Wertebereich in Tabelle 6 ist zur besseren Darstellung verändert worden, da die Unterschiede innerhalb der FGW-TR3 geforderten Auflösung nicht darstellbar sind (vgl. FGWTR3, S. 17).

8.4.1 THD Gruppierung

Ausgabedatei und Berechnung: Anhang CD, ... \val_data\kapitel_8.4

Da die Gesamtoberschwingungsverzerrung aus den gruppierten Oberschwingungsanteilen gebildet wird, ist diese zur besseren Übersicht in das Diagramm übernommen worden (siehe Abbildung 21). Zur quantitativen Überprüfung werden die Effektivwerte dieser Oberschwingungsstromanteile aus der Tabelle 4 abgeleitet. Aus der folgenden IEC-konformen Berechnung gemäß Gleichung 15, ergibt sich für die Gesamtoberschwingungsverzerrung THD folgende Gegenüberstellung (siehe Tabelle 7).

Tab. 7: Vergleich der ermittelten Gesamtoberschwingungsverzerrung.

	THD [% I_n]
mit Matlab	1,93531
theoretisch	1,93649
Δ THD	-0,00119

Auch die Abweichung der THD-Berechnung mit Matlab ist nicht mit der FGW-konformen Auflösung nachweisbar, aus diesem Grunde wurde in Tabelle 7 der Darstellungsbereich auf fünf Nachkommastellen erweitert.

8.5 Gruppierung der Zwischenharmonischen

Ausgabedatei und Berechnung: Anhang CD, ... \val_data\kapitel_8.5

Im Folgenden wird die Funktion `gruppierereZH.m` und damit die Gruppierung der Zwischenharmonischen überprüft.

Tab. 8: Signalparameter der zwischenharmonischen Anteile

	Grundschwingung	Zwischenharmonische Komponenten					
f_s [Hz]	f1 [Hz]	f2 [Hz]	f3 [Hz]	f4 [Hz]	f5 [Hz]	f6 [Hz]	f7 [Hz]
20000	50	260	265	290	760	765	790
I/In [%]	100	1	1	1	0,5	0,5	0,5

Die frei gewählten Frequenzen der Stromanteile sind über den Bereich der 5. und 7. Zwischenharmonischen verteilt (siehe Tabelle 8). Somit sind keine weiteren Frequenzanteile in anderen Frequenzbändern zu erwarten.

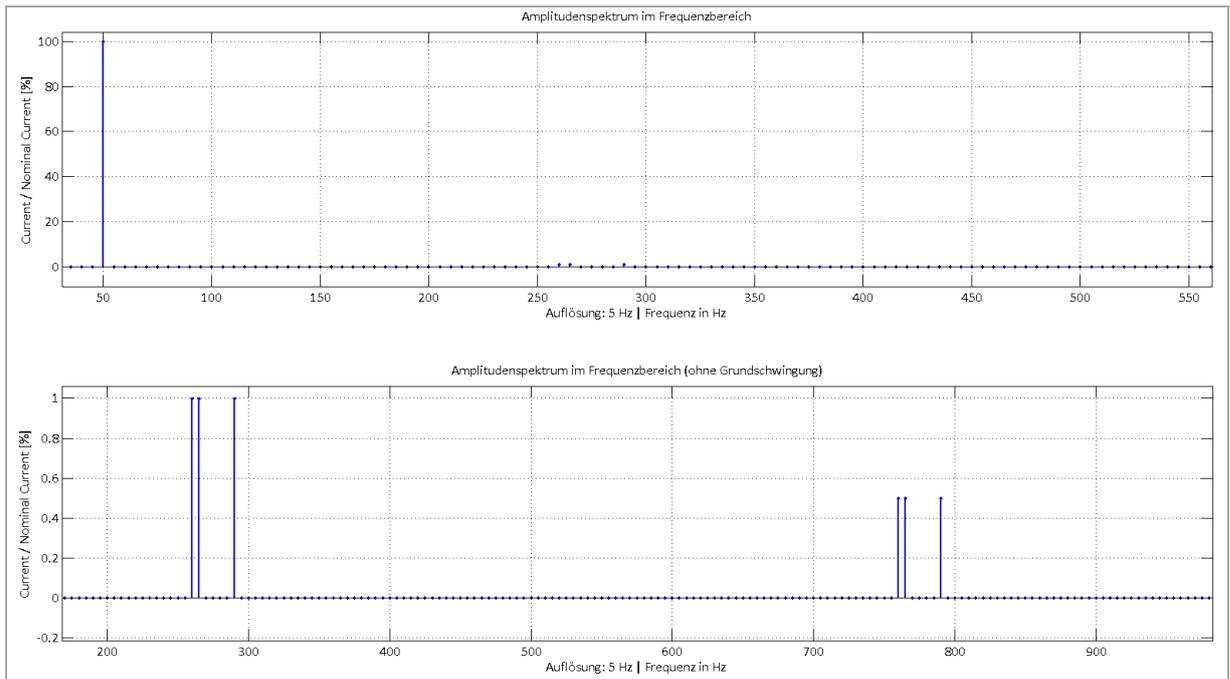


Abb. 22: Oben: Frequenzspektrum des gesamten Frequenzbereichs mit Grundschwingungsanteil.
Unten: Vergrößerter Bereich mit den zwischenharmonischen Frequenzanteilen.

Die gewählten Parameter der erzeugten Signale aus Tabelle 8 werden durch das Frequenzspektrum in Abbildung 22 sowohl in der Frequenz und der Amplitude bestätigt. Zu sehen sind drei Anteile mit jeweils $1 A_{\text{eff}}$ im Bereich um 250 Hz sowie drei Anteile im Bereich 750 Hz. Die anschließende Gruppierung durch die Matlab-Funktion `gruppiereZH.m` wird in Abbildung 23 dargestellt. Sie fasst die jeweiligen spektralen Anteile erwartungsgemäß zur Untergruppe der 5. und 7. Zwischenharmonischen zusammen.

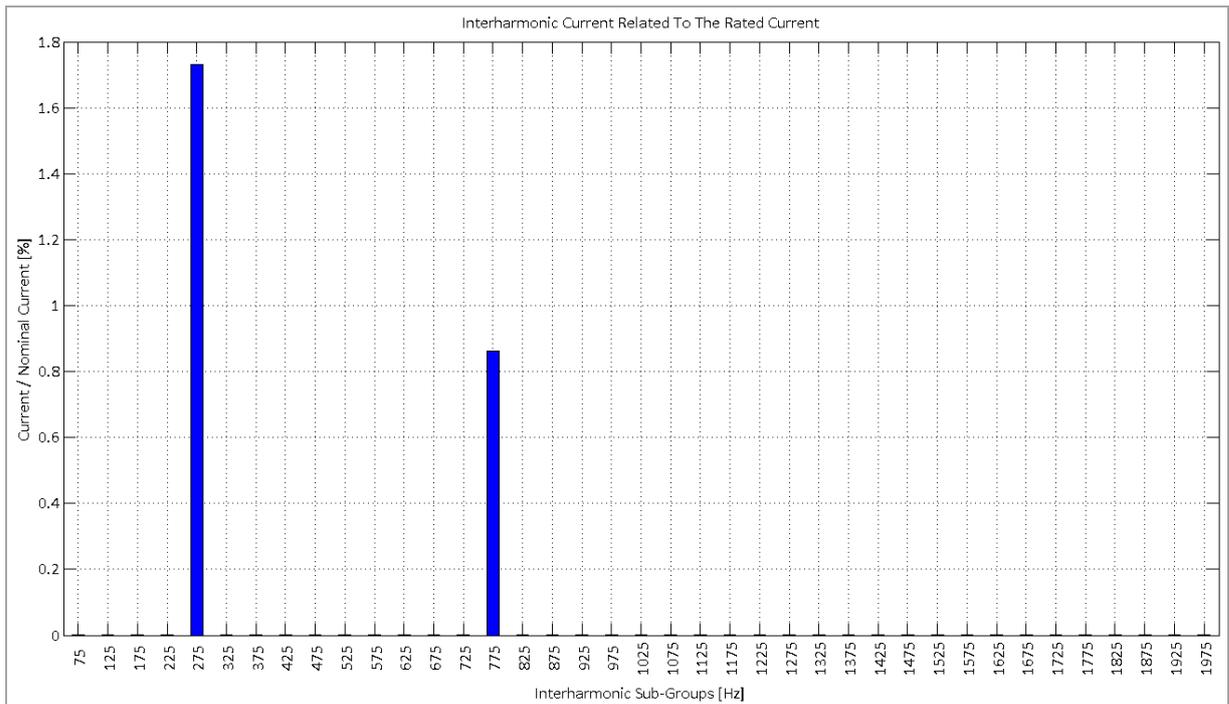


Abb. 23: Untergruppe der 5. und 7. Zwischenharmonischen.

Zur Bewertung der dargestellten Untergruppen werden analog zu Kapitel 8.4 die Amplituden der erzeugten Spektralen Anteile (siehe Abbildung 22) verwendet. Hierzu werden nach händischer Berechnung der Effektivwerte der Zwischenharmonischen Untergruppen diese mit den zugrundeliegenden Werten der Abbildung 23 verglichen. Tabelle 9 zeigt die nicht normierten Amplituden i der spektralen Anteile und deren Anteile am Nennstrom.

Tab. 9: Quelldaten aus der FFT durch das Skript macheFFT.m.

	Grundschwingung	Zwischenharmonische Komponenten					
fs [Hz]	f1 [Hz]	f2 [Hz]	f3 [Hz]	f4 [Hz]	f5 [Hz]	f6 [Hz]	f7 [Hz]
20000	50	260	265	290	760	765	790
i [A]	1,41418	0,01413	0,01413	0,01413	0,00704	0,00704	0,00703
i/I_n [%]	99,99794	0,99944	0,99942	0,99931	0,49763	0,49760	0,49744

Wie zuvor bei der Oberschwingungsauswertung wird die Gruppierung der zwischenharmonischen Anteile durch Matlab mit den händischen Berechnungen nach den IEC-Vorgaben (siehe Gleichung 16) verglichen. Die Differenzen sind der Tabelle 10 zu entnehmen.

Tab. 10: Gegenüberstellung der theoretischen mit den Ergebnissen der Matlab-Gruppierung.

	Zwischenharmonische	
	$I_{zh,5}$ [% I_n]	$I_{zh,7}$ [% I_n]
mit Matlab	1,73100	0,86179
theoretisch	1,73205	0,86603
$\Delta I/I_n$ [% I_n]	-0,00105	-0,00423

In Bezug auf die Validierung der Oberschwingungsgruppierung ist hier eine Erhöhung der Abweichungen, bei der 7. Zwischenharmonischen festzustellen, die sich aber unter den Auflösungsanforderungen der FGW TR3 befinden.

8.6 Gruppierung der Anteile höhere Frequenzen

Ausgabedatei und Berechnungen: Anhang CD, ... \val_data\val_HF\kapitel_8.6

Um die korrekte Gruppierung der höheren Frequenzen zu überprüfen wird entsprechend Tabelle 11 eine überschwingungsbelastete Netzfrequenz f_1 generiert. Die Oberschwingungskomponenten liegen gemäß der IEC-Gruppierung (siehe Kapitel 7.1.4) innerhalb der Bandmitte 2100 kHz und 7500 kHz.

Tab. 11: Signalparameter der Grundschwingung und den Anteilen höherer Frequenzen.

f_s [Hz]	Grundschwingung	Komponenten höherer Frequenzen					
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_3 [Hz]	f_4 [Hz]	f_5 [Hz]	f_6 [Hz]	f_7 [Hz]
20000	50	2010	2100	2195	7405	7500	7505
I/I_n [%]	100	1	1	1	0,5	0,5	0,5

Die Auswertung der Amplitudenverläufe der FFT zeigt deutliche Abweichungen von den erwarteten Amplituden, die sich aus Tabelle 11 ergeben. Die Abbildung 24 zeigt links und rechts neben den eingestellten Bandmitten von 2100 Hz beziehungsweise 7500 Hz Seitenspektren die nicht im generierten Signal vorhanden sind.

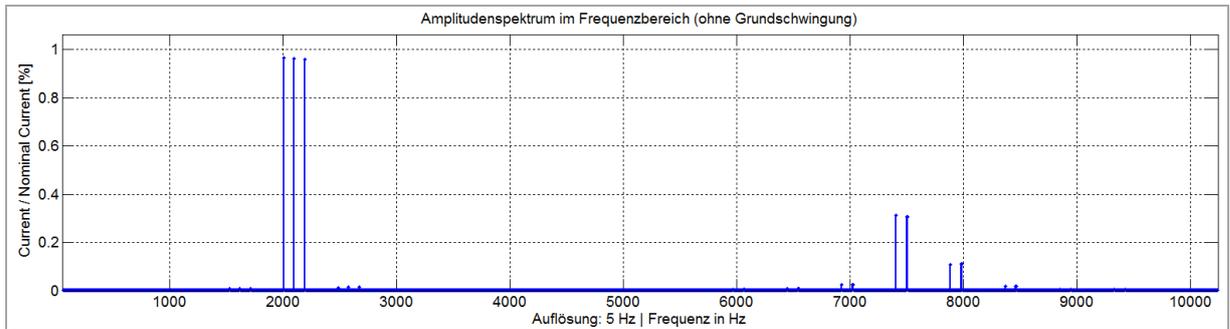


Abb. 24: Abweichung der Amplituden der eingestellten Frequenz.

Zusätzlich weichen die dargestellten Amplituden von den Amplituden der generierten Datenreihen ab. Die Überprüfung der gruppierten höherfrequenten Anteile zeigt in dem Bereich von 7900 Hz entsprechend des Amplitudenspektrums erhöhte Frequenzanteile. Diese Hochfrequenzpegel können zu Fehlinterpretationen führen, da sie sich im geforderten Auflösungsbereich der Dokumentation befinden (vgl. FGW TR3 2011, S. 17).

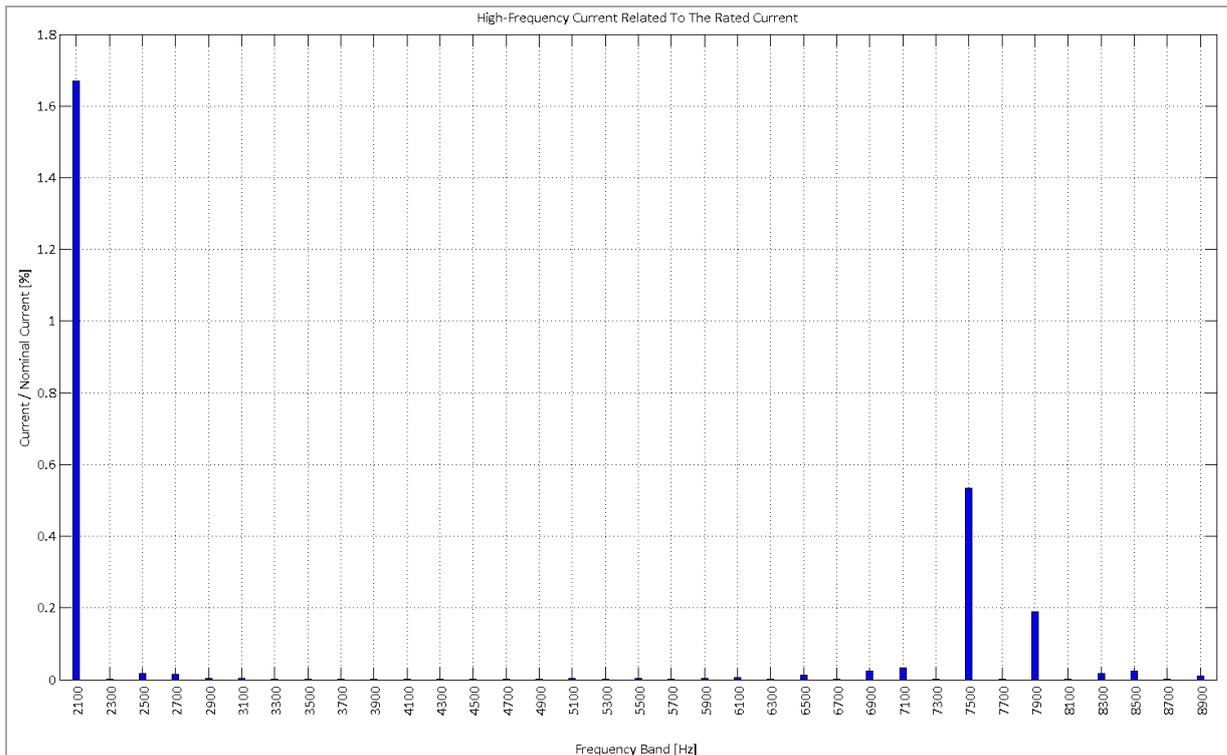


Abb. 25: Untergruppen der höherfrequenten Anteile.

Als mögliche Ursache für dieses Verhalten kommt das Resampling innerhalb der Funktion `neuAbtast.m` in Frage (siehe Kapitel 7.2.2 und 7.2.3), da dieses durch die angewendete lineare Interpolation zwischen den Stützstellen die originale Signalform verändert.

8.7 Einfluss des Resampling

Ausgabedatei und Berechnung: Anhang CD, ...\va_data\va_HF\kapitel_8.7

Um festzustellen, ob die Funktion `neuAbtast.m` wie in Kapitel 8.6 vermutet für die Abweichungen verantwortlich ist, wird eine zusätzliche Datenreihe mit einer Abtastrate von 20480 kHz generiert (siehe Tabelle 12). Alle weiteren Parameter decken sich mit der Datenreihe aus 8.6.

Tab. 12: Signalparameter mit abweichender Samplerrate f_s .

	Grundschiwingung	Komponenten höherer Frequenzen					
f_s [Hz]	f1 [Hz]	f2 [Hz]	f3 [Hz]	f4 [Hz]	f5 [Hz]	f6 [Hz]	f7 [Hz]
20480	50	2010	2100	2195	7405	7500	7505
I/In [%]	100	1	1	1	0,5	0,5	0,5

Während der folgenden Laufzeit des Skriptes `OS_Auswertung.m` wird die Funktion `neuAbtast.m` nicht genutzt. Da die Datenreihe mit einer Abtastrate $f_s = 20480$ kHz den Konventionen des FFT-Algorithmus von Matlab entspricht, ist es möglich, diese direkt, ohne Resampling, zu verarbeiten (siehe Kapitel 7.2.4).

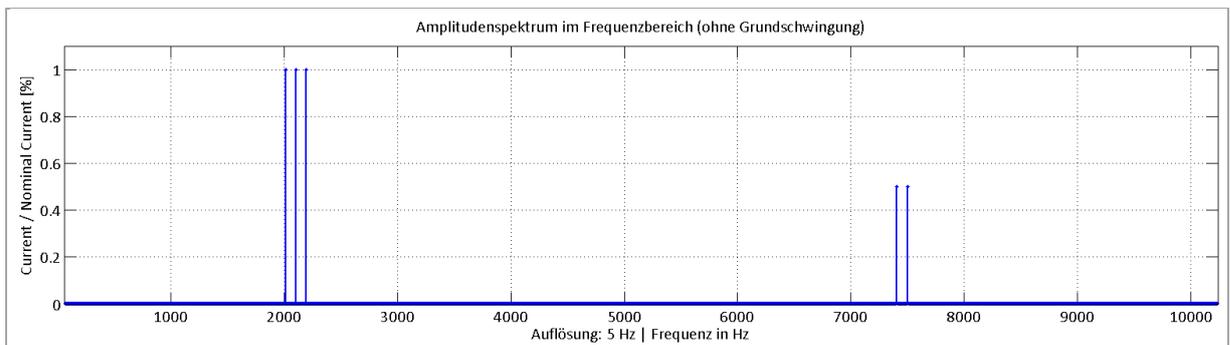


Abb. 26: Hochfrequente Anteile nach Berechnung ohne Resampling.

Wie in Abbildung 26 zu sehen sind die Störpegel nach den Berechnungen ohne Resampling nicht mehr erkennbar. Die ermittelten Differenzen zwischen den generierten Eingangsdaten und den entsprechenden Frequenzen im Amplitudenspektrum liegen mit 10^{-11} % I_n weit außerhalb der FGW-TR3 Vorgabe für die Darstellungsauflösung.

8.8 Auswertung von realen Messreihen

Ausgabedatei: Anhang CD, ... \val_data\kapitel_8.8

Der Programmdurchlauf mit aufgezeichneten Messreihen des Messsystems bildet den Abschluss der Validierung. Der Ablauf dient dem Programmierer als Nachweis der fehlerfreien Funktion der geschriebenen Programms `OS_Auswertung.m` mit komplexeren Signalen als der zuvor erzeugten ideellen Drehstromsysteme. Die gewonnenen Daten können nicht als Grundlage für Bewertungen herangezogen werden, da keine weiteren Informationen für die Netzsituation zum Zeitpunkt der Messung dokumentiert sind und es sich um einen Testaufbau mit verminderter Abtastrate gehandelt hat.

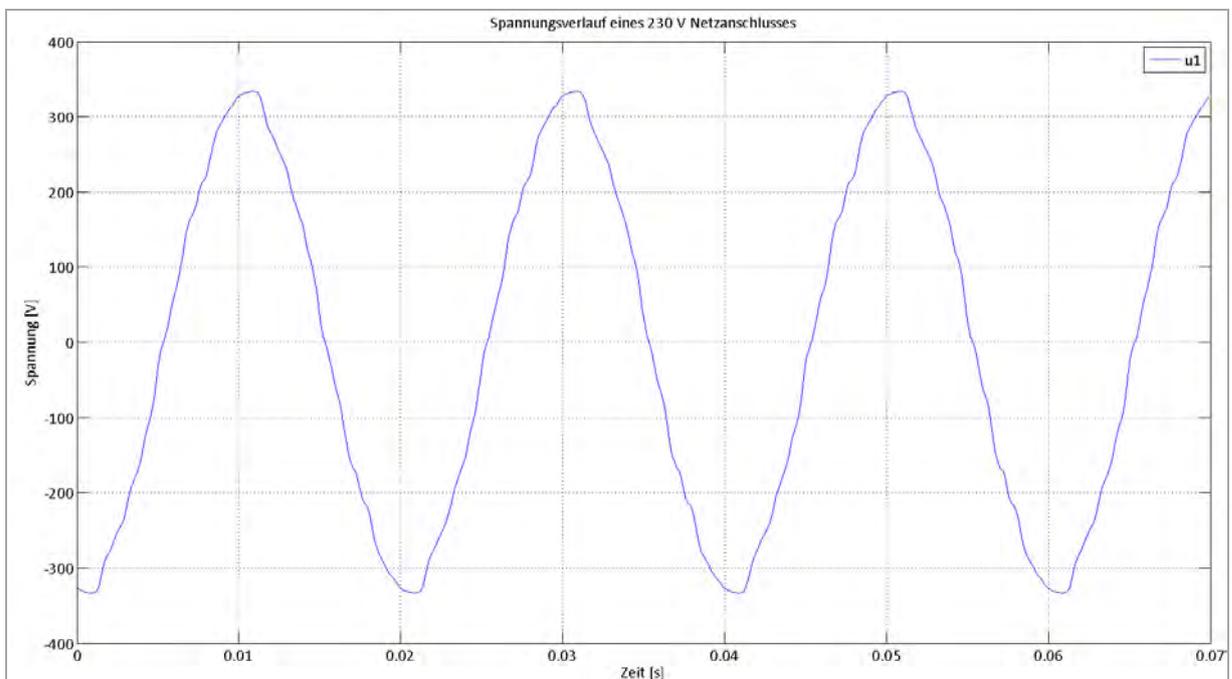


Abb. 27: Signalverzerrung an einem Hausanschluss.

Die Quelle der Messreihe ist eine nicht kalibrierte Spannungsaufzeichnung eines einphasigen Netzanschlusses mit einer Nennspannung $U_n = 230 \text{ V}_{\text{eff}}$ und der Netzfrequenz $f_{\text{Netz}} = 50 \text{ Hz}$. Ein Ausschnitt aus der Messreihe zeigt die Abweichung der Signalform der Spannung u von der idealen Sinusform (siehe Abbildung 27).

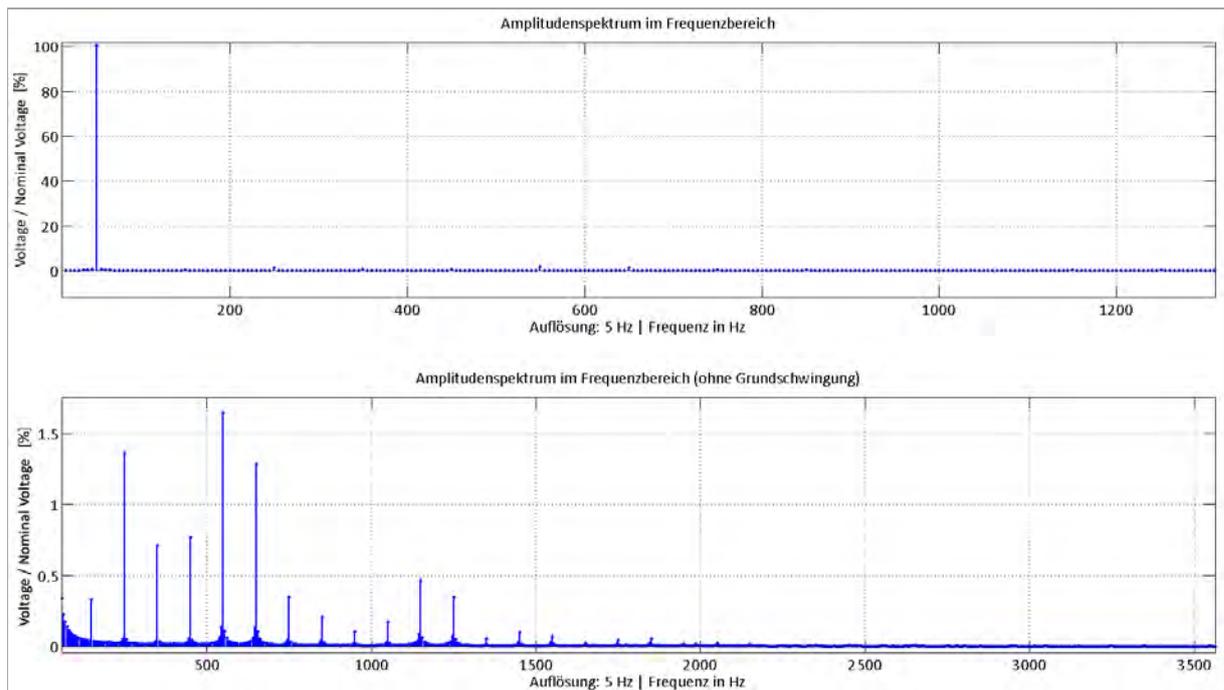


Abb. 28: Frequenzspektrum der analysierten Netzspannung.

Das Frequenzspektrum als Ausgabe der Funktion `makeFFT.m` liefert Peaks im Bereich der 5., 7., 11., und 13. Harmonischen, was sich mit den erzeugten Oberschwingungsanteilen der unter 4.1 erläuterten Verursachern deckt.

Die seitlichen Spektralanteile der Hauptpeaks sind Hinweise auf das Leckphänomen, welches auftritt wenn ein Frequenzanteil des Messsignals sich zwischen zwei benachbarten 5 Hz-Spektralanteilen befindet. Hierdurch teilt sich die Energie auf nebenliegende Spektralanteile auf (vgl. Werner, 2012, S. 66). Diesem Phänomen wird mit der unter Kapitel 7.1.4 beschriebenen Gruppierungsverfahren begegnet, die die Seitenbänder eines zu bestimmenden Frequenzbereichs mit einbezieht und somit die Untergruppen bildet (siehe Abbildung 29).

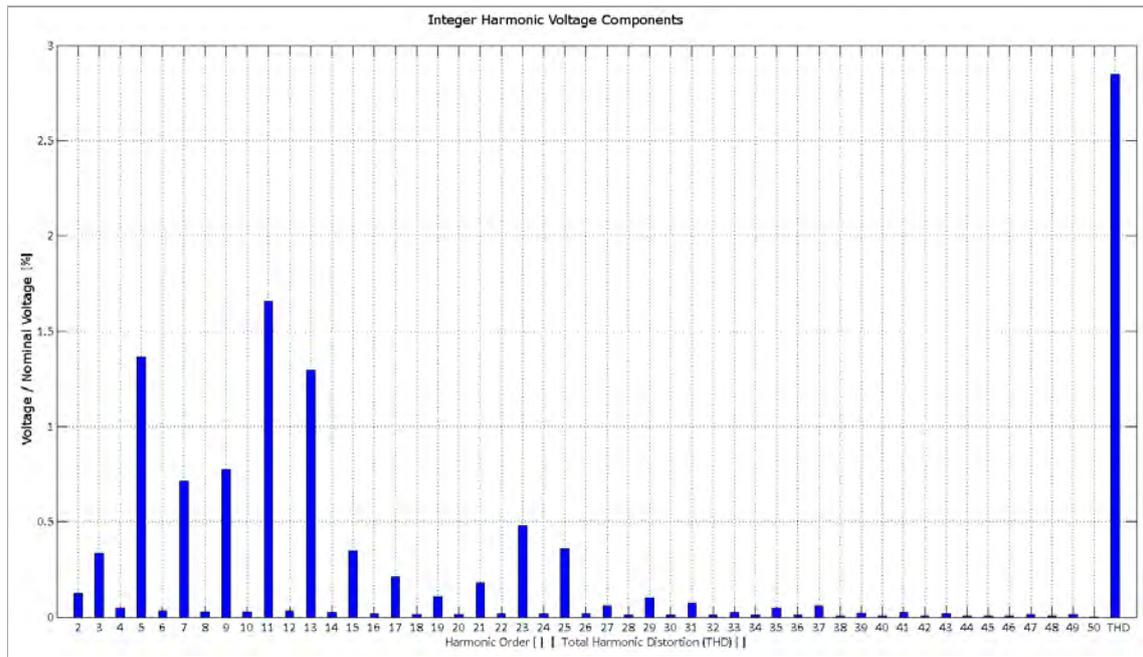


Abb. 29: Oberschwingungsanteile der realen Messreihe.

Die während des Programmdurchlaufs erzeugten Tabellen mit den FGW TR3-konformen Datensätzen werden abschließend gespeichert und sind hier beispielhaft in dem Anhang angefügten Musterprüfbericht eingefügt (siehe Anhang S. A 1-A5 f). Die hierbei gewählte Leistungsklasse (Spalte) von 100 [% P_n] ist hierbei beispielhaft gewählt.

9. FAZIT UND AUSBLICK

Das Ziel zu Beginn dieser Arbeit war es, den im Praxissemester begonnenen Aufbau eines Messsystems abzuschließen, um die elektrischen Parameter von Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen und anderen Erzeugungseinheiten erfassen zu können. Durch die Verwendung der Software Matlab™ und ein dafür geschriebenes Programm sollte es im Anschluss möglich sein, die von dem Messsystem aufgezeichneten Messreihen auszuwerten. Ferner sollten die erfassten Oberschwingungen gemäß der angewendeten Richtlinien und Normen dargestellt und dokumentiert werden, um somit einen weiteren Baustein für die zukünftige Messung gemäß FGW TR3 darzustellen. Zu den Herausforderungen gehörte es, ein modulares Messsystem aufzubauen, welches auf unterschiedliche Einheitentypen angewendet werden kann, um nicht nur den Anforderungen der Richtlinien, sondern auch kundenspezifischen Fragestellungen mittels Erweiterungen zu genügen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist das auswertende Programm in der Lage, die Daten aus den vorgegebenen 10-Minuten-Messreihen einzulesen und die durch die IEC vorgegebenen Gruppierungsverfahren anzuwenden. Das Programm kann abschließend sowohl durch Diagramme und durch unterschiedliche Tabellenformate die zur Dokumentation der Oberschwingungen notwendigen Informationen bereitstellen. Im Rahmen der Validierung konnten diese Funktionen mit einem hierfür geschriebenen generierten Datenreihen und anhand einer realen Messreihe bestätigt werden (siehe Kapitel 8).

Im Zuge der Validierung stellte sich heraus, dass das Resampling der Messreihe zu Störpegeln außerhalb des betrachteten Frequenzbereichs führt, welches eine Fehlinterpretation der Frequenzanteile zur Folge haben kann.

Außerdem sei noch gesagt, dass der Testcontroller nicht die zur Erfassung von Oberschwingungen notwendige Abtastrate in dem geforderten Messaufbau erreicht. Diese Einschränkung lässt sich auf die verwendete Software des Geräteherstellers zurückführen. Diese Einschränkung hat zur Folge, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Messungen im Rahmen der IEC-Anforderungen an Erzeugungseinheiten vorgenommen werden können.

Zusätzlich schränken begrenzte Leitungslängen den Einsatzbereich zwischen den einzelnen Messmodulen und dem Controller ein, da auch hier die erforderlichen Abtastraten zur Oberschwingungsauswertung nicht erreicht werden können.

Im Rahmen der Akkreditierung der Messung von elektrischen Eigenschaften nach FGW TR3 sind weitere Überprüfungen notwendig, die im Zuge dieser Arbeit aufgrund des vorgegebenen Zeitrahmens nicht durchgeführt werden können. Dazu gehört eine zeitnahe Überarbeitung der Hardware des Messsystems, um den vollen Leistungsumfang dieser auszuschöpfen, damit bevorstehende Messkampagnen durchgeführt werden können.

Hierzu ist eine Überarbeitung der Software des Testcontrollers notwendig, um die Datenspeicherung bei hohen Abtastraten zu gewährleisten.

Die zukünftige Programmentwicklung in Matlab hat ihren Schwerpunkt in der Suche nach anderen Interpolationsverfahren, um das durch das Resampling verursachte Verhalten zu beheben und damit die Funktion des Matlab-Skriptes `neuAbtast.m` sicherzustellen. Zusätzlich macht das hohe Datenaufkommen während üblicher Messkampagnen eine automatisierte Datensortierung gemäß den Wirkleistungsklassifikationen (siehe Kapitel 7.1.1) notwendig.

Bei zukünftigen Entwicklungen von Matlab Programmen oder der Erweiterung dieser müssen die bereits realisierten Module der einzelnen Auswertungsverfahren und deren Ein- und Ausgabegrößen berücksichtigt werden. Nur so fügen sich zukünftig die einzelnen Programmstrukturen zu einer übersichtlichen Auswertung aller für die Bewertung der Netzverträglichkeit von Erzeugungseinheiten notwendigen Größen zusammen.

10. ZUSAMMENFASSUNG

Einheitenzertifikate weisen die elektrischen Eigenschaften von Energieerzeugungseinheiten wie Windenergie- oder Photovoltaikanlagen und deren Verhalten am Energieversorgungsnetz nach. Sie sind Bestandteil von Planungsunterlagen und Genehmigungsverfahren. Zu diesen elektrischen Eigenschaften zählen die Netzurückwirkungen, die als Störgrößen bezeichnet werden.

Die verwendeten Richtlinien und Normen geben hierbei die einheitlichen Verfahren und Methoden vor, um diese Störgrößen aufzuzeichnen, auszuwerten und einheitlich zu dokumentieren.

Die Entwicklung des beschriebenen Messsystems gemäß der IEC-Normen und der Richtlinie der FGW beinhaltet unterschiedliche technische Themengebiete. Die Basis bilden dabei die Elektrotechnik und weiterführend die Bereiche Elektronik und Messtechnik, um die zu erfassenden Messgrößen einzuschätzen sowie die entsprechenden Komponenten auszuwählen. Die Umsetzung der Vorgaben durch die anschließende Entwicklung eines Auswertungsprogramms mit Matlab, wird durch Programmierkenntnisse erleichtert.

Diese Programmierung der Auswertungssoftware wird in der folgenden Entwicklung einen großen Teil einnehmen, da die hier beschriebene Oberschwingungsauswertung nur ein Bestandteil der Netzverträglichkeitsmessung nach FGW TR3 darstellt.

Aufgrund der Programmierung der Auswertungen im Hause WindGuard Certification GmbH, können Änderungen der normativen Vorgaben sowie kundenspezifische Anforderungen unmittelbar im Programmcode umgesetzt werden und bieten so einen Wettbewerbsvorteil.

Weitere Validierungen der gesamten Messkette bieten die Möglichkeit, alle Funktionen des Messsystems zu überprüfen, um mit den gesammelten Erkenntnissen zukünftige Messkampagnen zuverlässig zu absolvieren. Die darauffolgend anstehenden Messkampagnen bieten einerseits die Möglichkeit, das Messsystem im realen Betrieb zu überprüfen und belegen andererseits die Funktion für die bevorstehende Akkreditierung.

LITERATURVERZEICHNIS

BLUME, D. ET AL (1999): Spannungsqualität in elektrischen Netzen – Ursachen, Messung, Bewertung von Netzrückgewinnungen und Verbesserung der Spannungsqualität, Berlin und Offenbach: VDE-Verlag.

DKE – DEUTSCHE KOMMISSION ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK IM DIN UND VDE (2009): DIN EN 61000-4-7-Elektromagnetische Verträglichkeit – Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten, Berlin: VDE-Verlag.

FGW E.V. - FÖRDERGESELLSCHAFT WINDENERGIE UND ANDERE ERNEUERBARE ENERGIEN (2009): Technische Richtlinien für Erzeugungseinheiten und – anlagen Teil 3 – Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und Anlagen am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz, Revision 22, Berlin.

GASCH, R.; TWELE, J. (HRSG.) (2011): Windkraftanlagen - Grundlagen, Entwurf, Planung und Betrieb, 7. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

HOSEMANN, G. (2001): Elektrische Energienetze – Band 3, 30. Auflage, Berlin: Springer-Verlag.

KLOSS, A. (1996): Oberschwingungen - Netzrückwirkungen der Leistungselektronik, 2. Auflage, Berlin und Offenbach: VDE-Verlag.

KLOSSE, R. ET AL (1997): Flickererzeugung durch Windenergieanlagen, in: DEWI Magazin, Nr.10, Februar 1997, S. 30-38.

KLOSSE, R. (1994): Elektrische Netzrückgewinnungen von Windkraftanlagen, in DEWI Magazin, Nr.5, August 1994, S. 23-34.

PARTHIER, R. (2011): Messtechnik – Grundlagen und Anwendung der elektrischen Messtechnik für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure, 6. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

SCHLABBACH, J.; MOMBAUER, W. (2008): Power Quality – Entstehung und Bewertung von Netzrückgewinnungen; Netzanschluss erneuerbarer Energiequellen, Berlin und Offenbach: VDE Verlag.

SCHULZ, D. (2004): Netzurückwirkungen – Theorie, Simulation, Messung und Bewertung, Berlin und Offenbach: VDE-Verlag.

(IEC 4-7) THE INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2002): International Standard IEC 61000-4-7 - Electromagnetic Compatibility Part 4-7: Testing and measurement techniques – general guide on harmonics and interharmonics measurement and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, Genf.

(IEC 21) THE INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (2008): International Standard IEC 61400-21 Edition 2.0 2008 – Wind turbines-Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, Genf.

WERNER, M. (2012): Digitale Signalverarbeitung mit MATLAB® - Grundkurs mit 16 ausführlichen Versuchen, 5. Auflage, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.

INTERNETQUELLEN

(BMU) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2012): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2011. In: www.bmu.de; Stand 8. März 2012.
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2011_bf.pdf
(letzter Aufruf am 23.05.2012)

(BDEW BUNDESVERBAND DER ENERGIE- UND WASSERWIRTSCHAFT) (2008): Technische Richtlinie- Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz vom Juni 2008.
[http://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/\\$file/BD_EW_RL_EA-am-MS-Netz_Juni_2008_end.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/A2A0475F2FAE8F44C12578300047C92F/$file/BD_EW_RL_EA-am-MS-Netz_Juni_2008_end.pdf)
(letzter Aufruf 23.05.2012)

(DENA) DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH vom 23. Februar 2005
http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/Energiedienstleistungen/Dokumente/dena_netzstudie_I_zusammenfassung.pdf
(letzter Aufruf 23.05.2012)

(NABEG) AUSZUG AUS DEM NETZAUSBAUBESCHLEUNIGUNGSGESETZ ÜBERTRAGUNGSNETZ vom 28. Juli 2011. <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/nabeg/gesamt.pdf>
(letzter Aufruf am 23.05.2012)

(VDN) VERBAND DER NETZBETREIBER –E.V. BEIM VDEW: TransmissionsCode 2007 – Netz – und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber vom August 2007.
<http://www.vde.com/de/fnn/dokumente/documents/transmissioncode2007.pdf>
(letzter Aufruf am 23.05.2012)

(ZHAW) ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN: Kapitel 3, DFT und FFT.
<https://home.zhaw.ch/~rumc/dsv1/unterlagen/dsv1kap3dftfft.pdf>
(letzter Aufruf am 22.06.2012)

ANHANG

INHALTSVERZEICHNIS ANHANG

Prüfbericht: Oberschwingungen A 1

Prüfbericht: Zwischenharmonische..... A 3

Prüfbericht: Anteile höhere Frquenzen A 5

Programmablaufplan: batchDir_mean_power.m A 6

Quellcode: batchDir_mean_power.m A 7

Programmablaufplan: listeAlleDateienImVerzeichnisAuf.m2..... A 8

Quellcode: listeAlleDateienImVerzeichnisAuf.m A 9

Programmablaufplan: mittel_wirk_p.m..... A 10

Quellcode: mittel_wirk_p.m A 11

Programmablaufplan: calc_phase_f.m A 12

Quellcode: calc_phase_f.m A 14

Programmablaufplan: effect.m..... A 15

Quellcode: effect.m A 16

Programmablaufplan: std_avrg.m..... A 18

Quellcode: std_avrg.m..... A 19

Programmablaufplan: OS_Auswertung.m..... A 21

Quellcode: OS-Auswertung.m A 23

Quellcode: freqZaehler.m A 28

Quellcode: neuAbtast.m A 31

Quellcode: macheFFT.m..... A 32

Quellcode: gruppiereOS.m A 34