

# Abschlussbericht

**zum Teilvorhaben:**

**Entwurf, Aufbau, Inbetriebnahme und Einsatz eines  
Niederspannungs-Mittelfrequenz-Messstromgenerators zur  
Netzanalyse**

**des**

**Verbundvorhabens:**

**Entwicklung und Bau einer mobilen Versuchseinrichtung zur  
Erprobung von Spannungsqualitäts-Optimierungsstrategien in  
Niederspannungsnetzen**

**Lehrstuhl für Leistungselektronik**

**Prof. Dr.-Ing. Friedrich W. Fuchs**

**MSc. Sandro Günter**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 0325377B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## Abchlussbericht

Zuwendungsempfänger:

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Förderkennzeichen:

0325377B

Vorhabenbezeichnung:

**Entwurf, Aufbau, Inbetriebnahme und Einsatz eines Niederspannungs-Mittelfrequenz-Messstromgenerators zur Netzanalyse**

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2012 – 31.12.2015

### Inhalt

- I. Kurzdarstellung**
  - 1. Aufgabenstellung**
  - 2. Voraussetzungen**
  - 3. Planung und Ablauf des Vorhabens**
  - 4. Vorheriger Stand der Wissenschaft und Technik**
  - 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**
- II. Eingehende Darstellung**
  - 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse**
  - 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**
  - 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**
  - 4. Nutzen und Verwendbarkeit der Ergebnisse**
  - 5. Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt anderer Stellen**
  - 6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses**
- III. Anlage 1: Erfolgskontrollbericht**
  - 1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen**
  - 2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse, Erfahrungen**
  - 3. Fortschritt des Verwertungsplans**
    - **Erfindungen/Schutzrechte**
    - **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**
    - **Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende**
    - **Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**
  - 4. Arbeiten ohne Lösung**
  - 5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**
  - 6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

# I. Kurzdarstellung

## 1. Aufgabenstellung

Das Zusammenwirken von Erzeugungsanlagen aus regenerativer Energie in konzentrierter Form mit dem elektrischen Netz ist bisher wenig untersucht worden und gilt derzeit als schwer beherrschbar im Vergleich zur Einspeisung aus konventionellen Großkraftwerken. Darüber hinaus liegen derzeit nur unzureichende Kenntnisse zum Netzverhalten vor, um die normativen Vorgaben für Netzzrückwirkungen von Windenergieanlagen und zur Erreichung der Systemdienstleistungen sicher festzulegen. Um die Belastbarkeit der Netze mit dezentralen erneuerbare Energie-Anlagen (DER) sicher bestimmen zu können, um geeignete zukünftige Steuer- und Regelungsstrategien zu entwickeln und eine Grundlage für die Festlegung von Richtlinien zu Netzzrückwirkungen und zu Systemdienstleistungen zu schaffen, insgesamt und auch eine bessere Ausnutzung der Netze zu schaffen, soll das Verhalten der Netze genauer ermittelt werden.

Für die Analyse des Netzes, insbesondere der Netzimpedanz in Betrag und Phase, die als Grundlage für die Bestimmung der Spannungsverzerrung im Netzzweig dient, sowie zur Erprobung der Aktiv-Filterung, soll ein Niederspannungs-Mittelfrequenz-Messstromgenerator verwendet werden. Der NS/MF-MS-Generator wird direkt oder über eine Messschaltung zu Messzwecken an das zu untersuchende Niederspannungs-Netz angeschlossen.

Die Spezifikationen der in diesem Projektteil aufzubauenden Geräte sind in Tabelle 1 aufgelistet. Diese wurden während des Projektverlaufes leicht angepasst. So wurde der maximal mögliche Strom von 60 A auf 50 A reduziert, um noch einen 63A-CEE-Stecker nutzen zu können.

Tabelle 1: Spezifikationen

Parameter	Wert
Frequenz	0,1...30 Hz + 70...10'000 Hz
Strom	0...50 A bis 1 kHz, darüber abfallen
Phase bei Harmonischen	0...360° einstellbar
Sequenzen	Mit-, Gegen-, Nullsystem
Volumen	Mobiles Gerät, max. 1,5 m <sup>3</sup>
Anzahl	2

## 2. Voraussetzungen

Da derartige speziell steuerbare und leistungsmäßig geeignet ausgelegte Niederspannungs-Mittelfrequenz-Messstrom-Generatoren nach Kenntnis der Verfasser nicht durch Kauf erhältlich sind, sollte ein solcher in diesem Projekt entsprechend den gestellten Anforderungen entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Dies sollte auf der Basis eines bereits entwickelten Mittelfrequenz-Messstromgenerators erster Version erfolgen [kno09]. Die Neuentwicklung sollte eine höhere Leistung und erheblich erweiterten Steuermöglichkeiten aufweisen und wieder für den mobilen Betrieb geeignet sein. Mit dem erstellten Messstromgenerator sollten Netz-Messungen durchgeführt werden.

### a. Planung und Ablauf des Vorhabens

In der ersten Phase des Vorhabens sollten zwei mobile Messstromgeneratoren entwickelt, aufgebaut und in Betrieb genommen werden.

In der zweiten Phase sollten mit den erstellten Geräten Messungen in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der Fachhochschule Kiel durchgeführt werden.

Der ursprüngliche Zeitplan (siehe Abb. 1) konnte dabei aus verschiedenen Gründen nicht eingehalten werden. Das Projekt wurde deshalb um ein Jahr verlängert bei Kostenneutralität. Die einzelnen Arbeitspakete wurden durchgeführt, wobei Messungen nur in reduziertem Umfang möglich waren.

		4.Q.11	1.Q.12	2.Q.12	3.Q.12	4.Q.12	1.Q.13	2.Q.13	3.Q.13	4.Q.13	1.Q.14	2.Q.14	3.Q.14
1	Konzept												
2	Beschaffung												
3	Entwicklung												
4	Bau												
5	Inbetriebnahme												
6	Betreuung												
7	Messungen mit der FH Kiel												
8	Verbesserungsvorschläge technischer Richtlinien												
9	Abschlussbericht												
10	Abstimmung mit Partnern												

Abb. 1: Zeitplan laut Projektantrag

### b. Vorheriger Stand der Wissenschaft und Technik

Aus der Literatur sind diverse Verfahren zur Bestimmung der frequenzabhängigen Netzimpedanz bekannt [rob97]. Die Verfahren beruhen im Grunde darauf das Netz auf

eine bestimmte Art anzuregen und das Verhalten des Netzes bezüglich dieser Anregung zu beobachten. So haben sich die Verfahren, welche einen bekannten Strom ins Netz einspeisen und die Spannung am Netzverküpfungspunkt messen, als die genauesten herausgestellt. In diesem Projekt wurde die Einspeisung eines monofrequenten Stroms als beste Möglichkeit der Impedanzbestimmung gewählt, auch weil diese zudem als einzige auch eine Aktiv-Filterung von bereits im Netz vorhandenen harmonischen Spannungen ermöglicht.

### c. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Wichtigster und engster Partner war die Fachhochschule Kiel, Prof. Hinrichs und Mitarbeiter, die für die Entwicklung der Messtechnik und die Messungen im zweiten Teil des Verbundprojektes verantwortlich waren. In diesem Projekt waren auch diverse Firmen involviert, die alle eng zusammengearbeitet haben.

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Die zur Verfügung gestellten Mittel wurden verwendet um zwei Messstromgeneratoren zu schaffen, von denen einer in Abb. 2 dargestellt ist. Sie wurden und werden vom Projektpartner der Fachhochschule Kiel wie auch von der CAU zu Messzwecken verwendet.



Abb. 2: Fotos des Frequenzumrichters im Rollwagen  
(rechts ohne Seitenteile und Dach)

Die Leistungselektronik und Steuerelektronik des in Abb. 2 gezeigte Rollwagen ist Kernstück des Messstromgenerators. Sie wird über einen 63A-CEE-Stecker an das zu analysierende Niederspannungsnetz angeschlossen.

Als Beispiel für eine Messung ist in Abb. 3 Verlauf der Netzimpedanz über der Messfrequenz gezeigt, der mit einem der Geräte aus diesem Projekt aufgenommen wurde. Hier zeigt sich schon die ungewöhnliche Form des Verlaufes. Die üblicherweise zugrunde gelegte R-L-Ersatzschaltung für das Netz würde einen linearen Impedanzverlauf hervorrufen, der gemessene zeigt insbesondere einen nichtlinearen Verlauf und eine Spitze (Resonanz). Weitere Netzmessungen und tieferegehende Analysen sind Bestandteil des Projektteils der FH Kiel und in deren Ergebnissen zu finden.

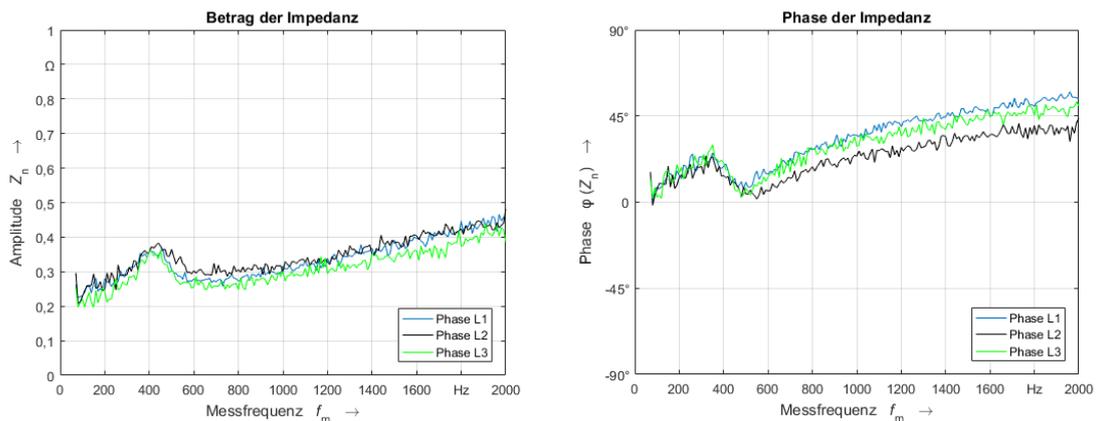


Abb. 3: Beispielhafter Impedanzverlauf im Lehrstuhllabor an 16A-Laborbuchsen

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Das Projekt wurde im gegebenen finanziellen Rahmen abgewickelt. Hauptpositionen waren die Personalkosten vorwiegend eines wissenschaftlichen Mitarbeiters zur Entwicklung des Messstromgenerators und zum anderen die Bauteile für den Messstromgenerator.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Da weder Frequenzumrichter, die den nötigen Anforderungen dieses Projektes genügen, noch spezielle Messgeräte käuflich zu erwerben waren und sind, ist die Notwendigkeit der Eigenentwicklung gegeben.

Darüber hinaus sind die Ergebnisse des Gesamtvorhabens von allgemeinem öffentlichem Interesse und die Erforschung ist daher nicht durch private Unternehmen durchzuführen.

## 4. Nutzen und Verwendbarkeit der Ergebnisse

Ergebnis dieses Teilvorhabens ist ein mobiler Messstromgenerator, davon zwei gleiche Geräte, zur Messung der frequenzabhängigen Netzimpedanz und zur Erprobung von Aktiv-Filter-Strategien im Niederspannungsnetz. Diese Geräte wurden gemäß der Spezifikation erstellt und erfüllen diese und sind in vollem Umfang für den vorgesehenen Einsatz verwendbar.

Für die Ergebnisse der durchgeführten Messungen, welche mit den erstellten Geräten durchgeführt wurden, ist der Bericht der Partner der Fachhochschule Kiel bzw. der Bericht des Gesamtvorhabens heranzuziehen.

## **5. Während der Durchführung bekanntgewordener Fortschritte anderer Stellen**

Ein ehemals käuflich zu erwerbendes Gerät der Firma Haag wird nicht mehr weiter vertrieben. Ein anderes Gerät der Firma sabaKMT [sebaKMT] ist zwar käuflich zu erwerben, kann jedoch lediglich bis zur 10. Harmonischen messen, da es lediglich einen Stromimpuls ins Netz einspeist und daraus das komplette Spektrum berechnet. Ebenso können damit keine Versuche zur Filterung von Harmonischen Spannungen im Netz vorgenommen werden.

Andere Forschungseinrichtungen, welche ähnliche Ziele verfolgen, messen zum Teil mit ungenaueren Verfahren oder nur im Mittelspannungsnetz, wie z.B. die Universität der Bundeswehr in Hamburg. [jor10]

## **6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses**

Teile der Ergebnisse aus diesem Projektteil Messstromgenerator wurden bereits auf diversen Fachkonferenzen veröffentlicht [jes15, gue13, gue14, gue15, gue15\_2]. Weitere Veröffentlichungen sind geplant. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sollen in aller Tiefe mit zusätzlichen weiteren Analysen zu Messtromgeneratoren in einer Dissertationsschrift von Herrn Günter veröffentlicht werden.

Kiel, der 20.05.2016

Prof. Dr.-Ing. Friedrich W. Fuchs

### III. Literatur

- [kno09] A. Knop and F. W. Fuchs, "High frequency grid impedance analysis by current injection," *Industrial Electronics*, 2009. IECON '09. 35th Annual Conference of IEEE, Porto, 2009, pp. 536-541
- [rob97] A. Robert et al., "Guide for assessing the network harmonic impedance," *Electricity Distribution. Part 1: Contributions. CIRED. 14th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ. No. 438)*, 1997, pp. 3/1-310 vol.2
- [sebaKMT] <http://www.sebakmt.com/de/produkte/elektrizitaet/netzqualitaet-impedanz/nim-1000.html> (Stand: 03.05.2016)
- [jor10] M. Jordan, H. Langkowski, T. D. Thanh and D. Schulz, "Frequency dependent grid-impedance determination with pulse-width-modulation-signals," 2011 7th International Conference-Workshop Compatibility and Power Electronics (CPE), Tallinn, 2011, pp. 131-136
- [jes15] L. Jessen, S. Guenter, F. W. Fuchs, M. Gottschalk and H. J. Hinrichs, "Measurement results and performance analysis of the grid impedance in different low voltage grids for a wide frequency band to support grid integration of renewables," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 1960-1967
- [gue13] S. Guenter, F. W. Fuchs, H.-J. Hinrichs, „A Method to Measure the Network Harmonic Impedance“, PCIM Europe 2013, Nürnberg, 2013
- [gue14] S. Guenter and F. W. Fuchs, "Switching time prediction for digital hysteresis control for high frequency current in grid impedance measurement application," *Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe)*, 2014 16th European Conference on, Lappeenranta, 2014, pp. 1-8
- [gue15] S. Guenter and F. W. Fuchs, "Current Routing in Neutral Voltage Level of Hysteresis Current Controlled Three-Level Active Neutral Point Clamped Inverter for Low Fundamental," PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management; Proceedings of, Nuremberg, Germany, 2015, pp. 1-7
- [gue15\_2] S. Guenter and F. W. Fuchs, "Analytical semiconductor loss calculation of hysteresis current controlled 2-level and 3-level ANPC inverters in grid impedance measurement and active filter applications," *Industrial Electronics Society, IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE, Yokohama*, 2015, pp. 003916-003921

## IV. Anlage 1: Erfolgskontrollbericht

### 1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die Messungen, welche mit den in diesem Teilvorhaben erstellt wurden, tragen dazu bei die Einspeisung aus Erneuerbaren Energien zu verbessern, indem die Messergebnisse bei der Normung zur Aktiv-Filter-Funktionalität von netzgebundenen Niederspannungswechselrichtern verwendet werden und die Ergebnisse den Netzbetreibern bei Planung und Betrieb der Niederspannungsnetze helfen.

### 2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse, Erfahrungen

#### Auslegung

Der Entwurf des Messtromgenerators mit den genannten Anforderungen erbrachte eine Vielzahl von Erkenntnissen, die in die erstellten, in Betrieb genommenen und laufenden Geräte eingeflossen ist. Einige seien hier kurz dargestellt.

Neu und herausfordernd war insbesondere die Forderung nach untersynchroner Einspeisung. Um die gewünschten Messspannungen im Netz zu erhalten, ergeben sich die in Abb. 4 dargestellten Zwischenkreisspannungen. Es ist zu sehen, dass im Bereich um 50 Hz große Schwankungen auftreten würden, die nicht toleriert werden können. Dieser Bereich wurde dementsprechend ausgeschlossen.

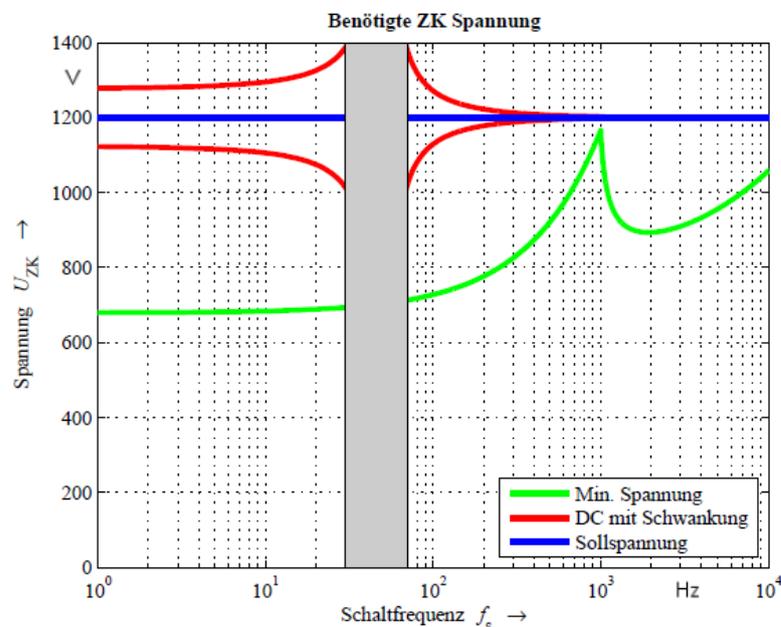


Abb. 4: Auslegung der Zwischenkreisspannung,  
 grün: minimale ZK-Spannung um Strom einzuprägen, blau: Sollspannung,  
 rot: Sollspannung + Schwankung durch Stromeinprägung  
 grau unterlegt: Bereich in dem keine Messung erfolgen soll

Zur bestmöglichen Symmetrierung der Zwischenkreisspannung bei diesen speziellen Anforderungen mit hoher Schwankung der Zwischenkreisspannung wurde als Schaltung die Dreituen- Active-Neutral-Point-Clamped-Schaltung (ANPC) gewählt. Sie erfordert eine spezielle Ansteuerung.

Wie in der vorhergehenden Arbeit von Knop wurde entschieden eine Hysteresestromregelung zu verwenden um die nötige Schaltfrequenz zur Erzeugung der hohen Grundschwingungsfrequenzen so gering wie möglich zu halten. Der Zusammenhang zwischen Schaltfrequenz und Hysteresebandbreite ist in Abb. 5 dargestellt.

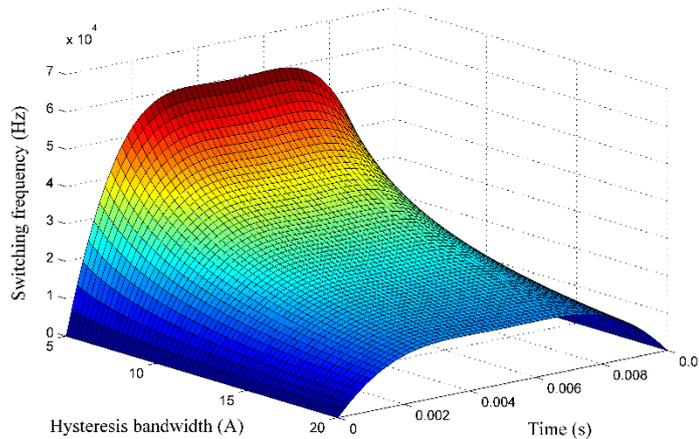


Abb. 5: Zusammenhang von Hysteresebreite und Schaltfrequenz

Die Daten der Umrichter als Messstromgeneratoren sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tab. 2: Auslegungsparameter

Parameter	Wert
Drosselinduktivität $L_f$	0,5 mH
Zwischenkreiskapazität $C_{ZK}$	1,5 mF
Hysteresebreite	5 A
Mittlere Schaltfrequenz	33 kHz
Sollzwischenkreisspannung	1200V

### Aufbau

Der Umrichter-Leistungsteil ist nach einer 3-level Active Neutral Point Clamped (ANPC) Topologie aus IGBTs mit 1200V Sperrspannung onzipiert, siehe Schaltbild Abb. 6.

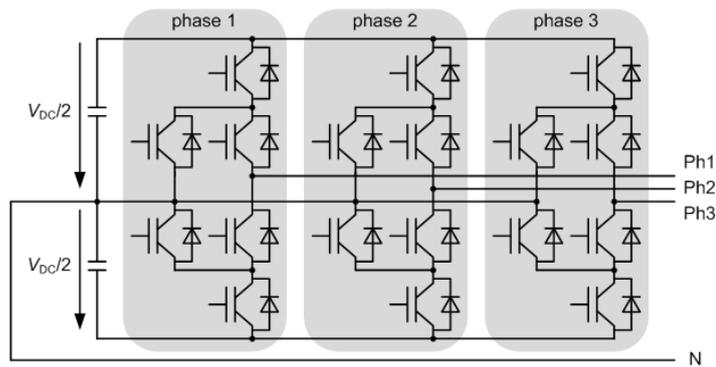


Abb. 6: ANPC-Umrichtertopologie

In Abb. 7 ist der Aufbau des Gerätes mit Leistungsteil und Steuerung schematisch gezeigt.

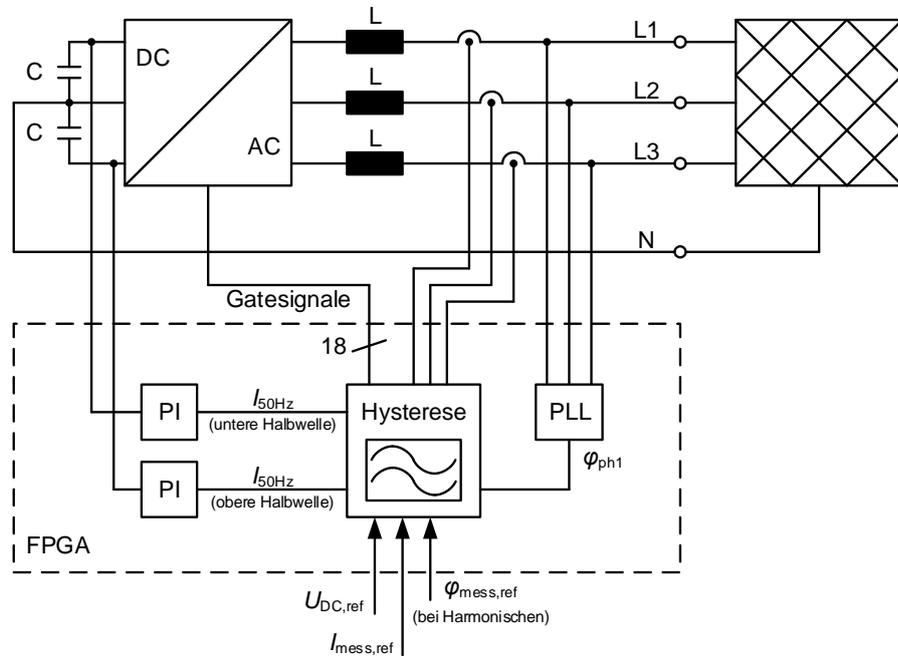


Abb. 7: Schema des Aufbaus des Messstromgenerators

Der Aufbau beinhaltet zudem ein Bandpassfilter, welches auf 50 Hz abgestimmt ist und den Messstrom daran hindert in die Netzteile der Versorgungsspannung zu fließen.

Der Umrichter ist wassergekühlt, um die vergleichsweise hohe Verlustleistung aufgrund des hohen Stroms und der hohen Schaltfrequenz abführen zu können, siehe Abb. 8.

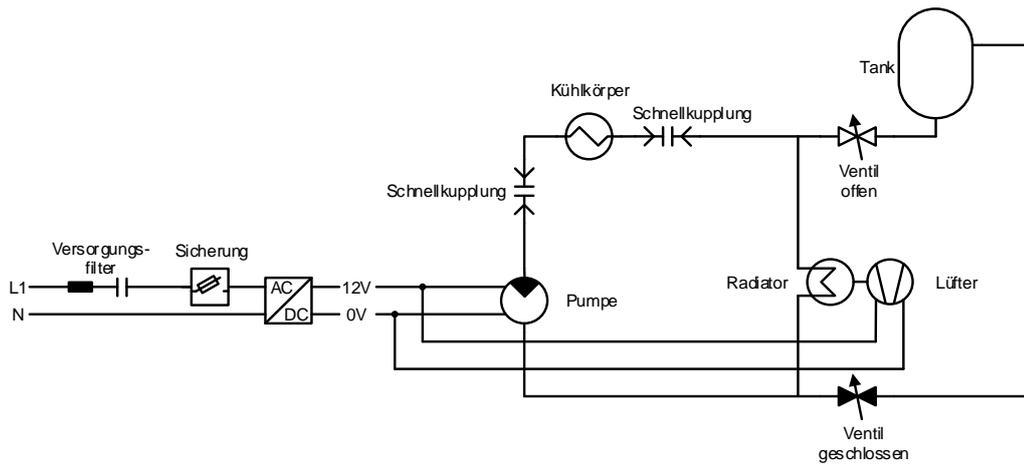


Abb. 8: Schema des Wasserkühlkreislaufs

Der Umrichter ist in einem Rollwagen untergebracht, um in verschiedenen Anschluss-  
punkten, vorgesehen im Norden Deutschlands, im Niederspannungsnetz messen zu  
können.

Da die Genauigkeit der für den Betrieb erforderlichen internen Strom- und  
Spannungssensoren nicht ausreicht, um die Netzimpedanz genau genug zu bestimmen,  
wird für die Messungen spezielle von den Projektpartnern der Fachhochschule Kiel  
angeschafftes Equipment verwendet.

**Funktion**

Der Messstromgenerator wird über eine serielle Schnittstelle angesteuert und verfügt  
über ein LCD Display, über welches aktuelle Statusmeldungen angezeigt werden.

Die Geräte erzeugen mittels Hysteresestromregelung einen frequenzvariablen Strom,  
welcher ins Niederspannungsnetz gespeist wird. In Abb. 9 ist beispielhaft ein Strom als  
7. Harmonische mit 0° Phasenverschiebung zur Spannung und 30 A effektiver Amplitude  
abgebildet. Die konstante Breite des Stroms aufgrund der Hysteresestromregelung ist  
dabei gut zu erkennen.

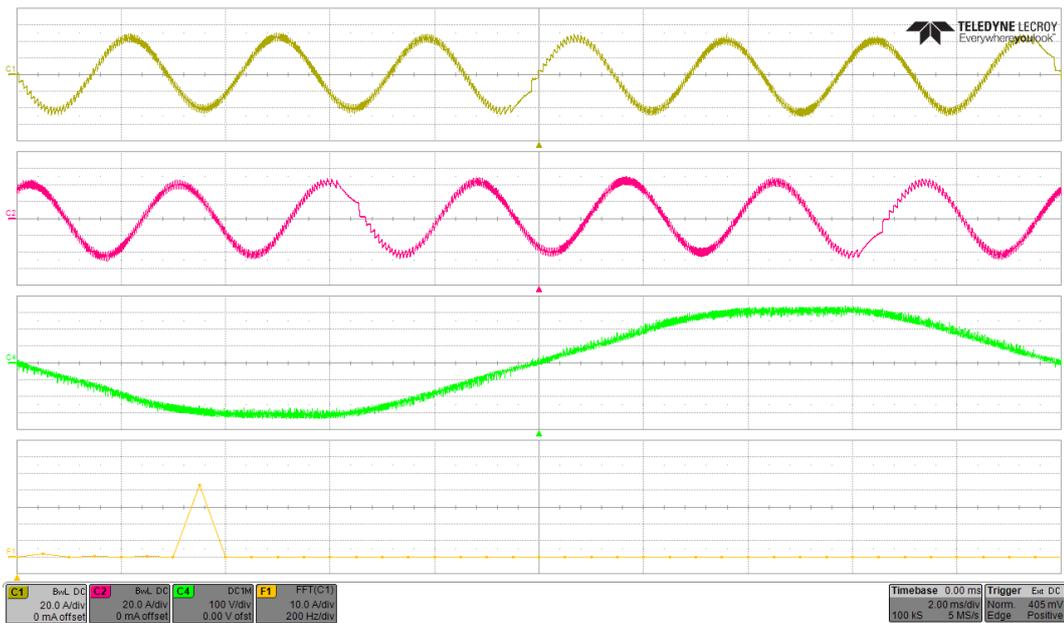


Abb. 9: Beispielhafter Verlauf der Ströme des Messstromgenerators (7. Harmonische,  $0^\circ$ ), beige: Strom Phase L1, magenta: Strom Phase L2, grün: Spannung Phase L1 zu Neutral, gelb: FFT des Strom der Phase L1

### 3. Fortschritt des Verwertungsplans

#### Erfindungen/Schutzrechte

Es wurden im Rahmen dieses Teilvorhabens keinerlei Schutzrechte beantragt.

#### Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Da dieses Projekt, wie zuvor erwähnt, von allgemeinem Interesse ist und dies auch einer der Förderungsgründe war sowie keine Aussicht auf ein Produkt größerer Stückzahl besteht, sind die Ergebnisse wirtschaftlich nicht verwertbar.

#### Wissenschaftlich-technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die erstellten beiden Geräte entsprechen voll den Anforderungen und sind im Mesbetrieb. Mit den in diesem Teilvorhaben erstellten Geräten wurden und werden Messungen von den Projektpartnern durchgeführt. Für die Verwertung der Messergebnisse ist der Abschlussbericht der Partner heranzuziehen.

#### Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Es könnte von Interesse sein ein Folgeprojekt anzuschließen, um mehr Zeit für weitere Messungen zu haben.

### 4. Arbeiten ohne Lösung

Es ist zur Zeit noch nicht möglich den Messstromgenerator einphasig ans Netz anzuschließen. Dafür wären lediglich geringe Modifikationen nötig, ist aber nach Absprache mit den Partnern nicht mehr nötig.

## **5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**

Mögliche Nutzer der Geräte sind Netzbetreiber und somit die SH Netz AG, welche sich bereits in dem Projekt engagieren. Somit ist eine Präsentation nicht nötig. Präsentationen der Ergebnisse in Normungsgremien und Fachkreisen sind erfolgt und werden erfolgen weiterhin durch die industriellen Projektpartner.

## **6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgaben konnten bei diesem Teilvorhaben eingehalten werden.

Der Zeitplan (siehe Abb. 1) dagegen konnte nicht eingehalten werden. Das Projekt musste kostenneutral um ein Jahr verlängert werden. Dies hat verschiedene Gründe. Die Untersuchungen zum Entwurf des Messtromgenerators, siehe auch den Abschnitt III.2, und Erarbeitung von speziellen Methoden und der Aufwand, sie in das Gerät zu bringen, waren erheblich umfangreicher als bei Projektbeginn geplant. Zudem erforderte aber auch die Implementierung der Steuerung im dafür vorgesehenen FPGA einen erheblichen zeitlichen Aufwand, höher als erwartet. Die Geräte konnten aber gegen Ende des Projektzeitraums vollständig fertiggestellt werden und es wurden im Projekt erfolgreich Messungen und Analysen durchgeführt.

Da das Messprogramm noch nicht abgearbeitet wurde, werden die Messungen von der Fachhochschule Kiel über den Projektzeitraum hinaus fortgeführt.