

Beiträge aus der Elektrotechnik

Matthias Klatt

**Höherfrequente Emissionen von einphasigen,
pulsweitenmodulierten Photovoltaikwechselrichtern
im öffentlichen Niederspannungsnetz**

 VOGT

Dresden 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet
at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2020

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Höherfrequente Emissionen von einphasigen, pulsweitenmodulierten
Photovoltaikwechselrichtern im öffentlichen Niederspannungsnetz“ von
Matthias Klatt überein.

© Jörg Vogt Verlag 2021
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-043-8

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

Technische Universität Dresden

**Höherfrequente Emissionen von einphasigen,
pulsweitenmodulierten Photovoltaikwechselrichtern
im öffentlichen Niederspannungsnetz**

Matthias Klatt

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann	Tag der mündlichen Prüfung:	04.11.2019
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner	Tag der Einreichung:	01.06.2020
	Prof. Dr.-Ing. Johanna Myrzik	Tag der Disputation:	23.11.2020
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Steffen Bernet		

„Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem.“

'Ockhams Rasiermesser', ein Grundprinzip wissenschaftlicher Arbeit.
Geprägt durch und benannt nach Wilhelm von Ockham (1288 - 1347).
Formulierung 1654 durch Johannes Clausberg (1622 - 1665).

Deckblatt: Spektrogramm der Spannung am Anschlusspunkt einer Photovoltaikanlage in einem öffentlichen Niederspannungsnetz, 3 Tage im November 2011 (Zeitachse nach schräg rechts oben), Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 24 kHz (Frequenzachse nach schräg rechts unten), 200 Hz Bandbreite, logarithmische Skalierung des Effektivwertes, ausgeprägte Maxima bei 8 kHz und 16 kHz während des Tageslichts.

Kurzfassung

Die Photovoltaik ist einer der wesentlichen Träger der *Energiewende* in Deutschland. Zur Wandlung des Gleichstroms aus den Solarzellen in netzfrequenten Wechselstrom werden moderne, selbstgeführte Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis eingesetzt. Insbesondere bei privaten Dachanlagen mit kleinen Leistungen sind die Wechselrichter meist einphasig ausgeführt. Diese Geräte verwenden zur Erzeugung der Wechselspannung eine Pulsweitenmodulation. Neben der gewünschten Grundschwingung erzeugt die Pulsweitenmodulation prinzipbedingt auch höherfrequente Emissionen im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz. Diese werden auch als Supraharmonische bezeichnet. Damit alle Geräte im europäischen Verbundnetz unbeeinträchtigt voneinander funktionieren können, müssen ihre Emissionen begrenzt und ihre Störfestigkeit gegenüber den Emissionen anderer Geräte hinreichend groß sein. Für den Frequenzbereich unterhalb von 2 kHz existiert dazu ein umfangreiches, normatives Rahmenwerk. Im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz fehlen bisher allgemeingültige Emissionsgrenzwerte, an deren Entwicklung in Normungsgremien aktiv gearbeitet wird. Bisher fehlt jedoch ein geeignetes Modell, um das höherfrequente Emissionsverhalten derartiger Geräte zu beschreiben.

In der vorliegenden Arbeit wird die Modellierung der höherfrequenten Emissionen von Photovoltaikwechselrichtern auf Basis einer Ersatzschaltung aus Spannungsquelle und Reihenimpedanz vorgestellt, welche als Helmholtzäquivalent bezeichnet wird. Dadurch wird eine besonders einfache und anschauliche Möglichkeit gegeben, um das höherfrequente Emissionsverhalten von einphasigen Photovoltaikwechselrichtern am Niederspannungsnetz zu simulieren. Dies geschieht mit dem Ziel, die zukünftige Abstimmung von Emissionsgrenzwerte zu unterstützen.

In dieser Arbeit wird das Emissionsverhalten von zwei Wechselrichtern ausführlich analysiert. An ihrem Beispiel wird gezeigt, dass alle Parameter des Helmholtzäquivalents für einzelne Emissionsbänder vollständig durch Messung des Emissionsverhaltens bei geeigneter Variation der elektrischen Umgebungsbedingungen bestimmbar sind. Die durchgeführten Validierungsmessungen zeigen, dass diese linearisierten und vereinfachten Modelle im realen Netz typische Fehler besser als $\pm 5\%$ erreichen.

Die Gültigkeit des Modellansatzes für den Parallelbetrieb mehrerer Wechselrichter wird durch numerische und analytische Untersuchungen belegt. Zudem wird erläutert, wie damit die im Netz beobachteten Schwebungen höherfrequenter Emissionen qualitativ und quantitativ beschrieben werden können. Es wird gezeigt, wie die Spannung am Anschlusspunkt von den Impedanzverhältnissen und der Anzahl parallel betriebener Wechselrichter abhängt. Daraus wird ein Satz von Bedingungen abgeleitet. Bei deren Erfüllung wird eine wählbare höherfrequente Spannung am Anschlusspunkt des Wechselrichters, beispielsweise zukünftig ein normativer Grenzwert, im Netz bei einer beliebigen Anzahl von Wechselrichtern an einem beliebigen Anschlusspunkt mit hoher Wahrscheinlichkeit unterschritten wird. Die in dieser Arbeit am Beispiel von Photovoltaikwechselrichtern beschriebenen Ergebnisse lassen sich auf alle einphasigen, selbstgeführten, hart schaltenden, pulsweitenmodulierten Stromrichter mit Spannungszwischenkreis und fester Trägerfrequenz übertragen.

Abstract

Photovoltaics is one of the main components of the *Energiewende* in Germany. To convert the direct current of the solar cells into an alternating current, modern self-commutated voltage-source inverters are used. Especially in private roof installations with lower installed power, inverters usually use a single phase connection. These devices use pulse-width modulation to generate the alternating voltage. This voltage, in addition to the desired fundamental component, also contains voltage and current distortions around integer multiples of the double carrier frequency. These higher-frequency emissions are located in the frequency range between 2 and 150 kHz and are also referred to as supraharmonics. In order for all devices in the trans-european power system to function without interference, their emissions must be limited and their immunity regarding emissions from other devices must be sufficiently high. For the frequency range below 2 kHz, a comprehensive standardization framework exists. In the frequency range between 2 and 150 kHz there are no general emission limits yet. Several standardization committees are actively working on the development of such emission limits. So far, however, there is no suitable model to describe the higher-frequency emission behavior of such devices.

In this work the modelling of the higher-frequency emission of photovoltaic inverters on the basis of a Thévenin equivalent is presented. Such an equivalent circuit consists of a voltage source and a series impedance. This approach provides a particularly simple way to simulate the higher-frequency emission behavior of single-phase photovoltaic inverters connected to the low-voltage grid. This is done with the aim of supporting the future coordination of emission limits.

The emission behavior of two inverters is analysed in detail. For these examples it is shown that all parameters of the Thévenin equivalent for individual emission bands can be determined through observation of the emissions during variation of the electrical ambient conditions. The performed validation measurements show that such linearized and simplified models achieve typical errors better than $\pm 5\%$ in most operating points.

The validity of the model approach for parallel operation of several inverters is proven through numerical and analytical investigations. Furthermore, it is explained how the model can be used to qualitatively and quantitatively describe the beating of higher-frequency emissions observed in the grid. The dependency of the higher-frequency voltages at the point of connection on the impedance ratios and the number of inverters operated in parallel is shown. From this, a set of conditions is derived. If these conditions are met, a selectable higher-frequency voltage at the point of connection of the inverter, for example a future normative emission limit, is most likely to be undercut in the grid at any location for any number of inverters. The results obtained in this thesis, using photovoltaic inverters as an example class of power converters, can be transferred to all single-phase, self-commutated, hard switching, pulse-width modulated voltage source converters with fixed carrier frequency.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist in den Jahren von 2014 bis 2020 im Rahmen meiner Tätigkeit am Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik an der Technischen Universität Dresden entstanden.

Ich möchte mich herzlichst bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Peter Schegner für die Möglichkeit der Bearbeitung des Themas, sowie die kritischen und fruchtbaren Diskussionen bedanken. Diese haben sehr zum Erfolg der vorliegenden Dissertation beigetragen. Zudem danke ich Dr.-Ing. habil. Jan Meyer für die fortwährende Unterstützung bei der Bearbeitung.

Mein besonderer Dank gilt Robert Wolf, der mir mit einer unendlichen Geduld das tiefere Verständnis der Signaltheorie im Allgemeinen, und der diskreten Fouriertransformation im Speziellen vermittelt hat. Weiter gilt er meinem Kollegen Max Domagk für die Motivation und unermüdliche Diskussionsbereitschaft zu fachlichen, formellen und persönlichen Fragen, welche während der Bearbeitung aufkamen. Ich möchte mich auch bei Hendrik Fehr bedanken, der mir bei allen Fragen zur Leistungselektronik zur Seite stand. Ich danke auch Robert Stiegler, dessen Impedanzmessgerät und die damit gemessenen Impedanzen eine wesentliche Grundlage meiner Arbeit sind. Ich danke zudem Christian Jäschke, dem meine unablässigen Fragen zu mathematischen Konventionen und Notationen nie zu viel wurden.

Der größte Dank geht an Sandra, welche mir viel Kraft, Motivation und Zeit für die Bearbeitung des Themas, sowie zwei tolle Kinder geschenkt hat. Ebenso gilt der Dank meiner Familie, die unermüdlich an den Erfolg geglaubt und mich dabei aktiv unterstützt hat.

Ich möchte mich auch bei allen aktuellen und vergangenen Kollegen am IEEH für die gute Zusammenarbeit und die angeregten Gespräche über mögliche Anwendungsgebiete der Forschungsergebnisse bedanken.

Und zu guter Letzt bin ich der Mathematik dankbar, dass sie es mir mit den Gleichungen (9.57) und (A.114) gestattete, in guter Tradition der Elektroenergietechnik, an ein paar Stellen scheinbar willkürlich $\pm 120^\circ$ und $\sqrt{3}$ in das Thema hineinstreuen zu können. Und dies gilt, obwohl es sich ausschließlich um eine einphasige Betrachtung handelt.

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	xiii
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	7
2.1 Begriffe	7
2.2 Entstehung	8
2.3 Interaktion und Beeinflussung	9
2.4 Ausbreitung und Modellierung	11
3 Normativer Rahmen	15
3.1 Aktueller Stand der Normung	15
3.2 Messverfahren	16
3.3 Schlussfolgerungen	23
4 Grundlagen der selbstgeführten Wechselrichter	25
4.1 Funktionsprinzip von Photovoltaikwechselrichtern	25
4.2 Analyse der Häufigkeit verschiedener Wechselrichterklassen	27
4.3 Leistungsaufnahme eines Wechselrichters	30
4.4 Leistungsabgabe eines Wechselrichters	31
4.5 Funktionsweise der Pulsweitenmodulation	34
4.6 Spektrum der Pulsweitenmodulation	38
5 Messverfahren und -technik	43
5.1 Verwendete Messtechnik	43
5.2 Messverfahren für Spannungen und Ströme	43
5.3 Messunsicherheit	45
5.4 Impedanzmessung	48
5.4.1 Aktive Messung	48
5.4.2 Passive Messung	49
6 Modellansatz	51
6.1 Vereinfachtes Wechselrichtermodell	51
6.2 Erweitertes Wechselrichtermodell	53
6.3 Potentielle Abhängigkeiten	55
6.3.1 Abhängigkeit von der Gleich- & Wechselspannung	55
6.3.2 Abhängigkeit von der Leistungsabgabe	56
6.3.3 Abhängigkeit von der Spannungsverzerrung	60
6.3.4 Abhängigkeit von der Netzfrequenz	62

6.4	Netzmodell	62
6.5	Gesamtmodell	63
7	Quantifizierung der Wechselrichtermodellparameter	65
7.1	Versuchsaufbau	66
7.2	Identifikation der dominierenden Emissionsbänder	67
7.3	Bestimmung der Quellenimpedanzen	68
7.4	Bestimmung der Quellenspannung	70
7.5	Berücksichtigung von Abhängigkeiten der Quellenspannung	71
7.5.1	Abhängigkeit von der Gleich- & Wechselspannung	72
7.5.2	Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung	77
7.5.3	Abhängigkeit von der Spannungsverzerrung	81
7.5.4	Abhängigkeit von der Netzfrequenz	84
7.6	Zusammenfassung der Modelle	85
7.6.1	Wechselrichter A	85
7.6.2	Wechselrichter B	85
8	Modellvalidierung	87
8.1	Validierung des Modells für den Wechselrichter A	87
8.1.1	Modellvalidierung im Labor	87
8.1.2	Modellvalidierung für ein baugleiches Gerät im Netz	91
8.2	Validierung des Modells für den Wechselrichter B	93
8.2.1	Modellvalidierung im Labor	93
8.2.2	Modellvalidierung für ein baugleiches Gerät im Netz	96
8.3	Validierungsmessungen anderer höherfrequenter Emissionsmodelle	98
9	Anwendung der entwickelten Modelle	99
9.1	Simulation der höherfrequenten Spannungen unter realistischen Netzbedingungen	99
9.1.1	Simulationsbedingungen	99
9.1.2	Simulationsergebnisse	103
9.1.3	Abhängigkeit vom Winkel der Quellenimpedanz	105
9.2	Analytische Berechnung der höherfrequenten Spannungen am Anschlusspunkt	106
9.3	Modellierung des Parallelbetriebs von Wechselrichtern	111
9.3.1	Effektivwertberechnung	113
9.3.2	Beschreibung von Schwebungen	115
9.3.3	Vergleich der Ergebnisse einer numerischen Zeitbereichssimulation mit den Ergebnissen des erweiterten Modells	119
9.4	Einfluss der Wechselrichteranzahl auf die höherfrequente Spannung am gemeinsamen Anschlusspunkt	123
9.4.1	Entwicklung des Spannungseffektivwertes	123
9.4.2	Maximum der Schwebung	124
9.4.3	Wechselrichteranzahl mit maximaler höherfrequenter Spannung	125
9.4.4	Klassifizierung des Quellenverhaltens	127

9.5	Bewertung der Ergebnisse	129
10	Zusammenfassung	133
	Literaturverzeichnis	137
	Anhang	149
A.1	Herleitungen	149
A.1.1	Umformung der Fourierreihe der Spannung an der H-Brücke	149
A.1.2	Grenzfall des Leerlaufs der höherfrequenten Spannungsquelle	158
A.1.3	Kreisgleichung für konstante Spannungen am Anschlusspunkt in Abhängigkeit von der Netzschleifenimpedanz	159
A.1.4	Entstehung einer Schwebung durch Überlagerung zweier sinusförmiger Signale	161
A.1.5	Effektivwert einer Summe von Funktionen	163
A.1.6	Stochastische Verteilung von Rauscheffektivwerten	164
A.2	Abtastverfahren	165
A.3	Normung	168
A.3.1	Allgemeine Bedingungen	168
A.3.2	Normative Koordination der elektromagnetischen Verträglichkeit	169
A.3.3	Gremien	172
A.3.4	Verträglichkeitspegel	173
A.4	Datenblattangaben	174
A.4.1	Versuchsstand	174
A.4.2	Messtechnik	175
A.4.3	Wechselrichter	177
A.4.4	Solarmodule	178
A.5	Messverfahren	179
A.5.1	Anti-Aliasing-Filter	179
A.5.2	Signalfilter	180
A.5.3	Bestimmung eines stationären Arbeitspunktes	184
A.5.4	Gruppierung	186
A.5.5	Fensterfunktion	190
A.6	Messunsicherheit	198
A.6.1	Systematische Messunsicherheit	198
A.6.2	Stochastische Messunsicherheit	202
A.6.3	Resultierende Messunsicherheit	204
A.7	Wandlermesssystem	206
A.8	Referenzshunt	208
A.9	Modellbildung	209
A.9.1	Abschätzung des Fehlers bei der Nachbildung eines Emissionsbandes durch eine einfrequente Größe	209
A.9.2	Abhängigkeit der Quellenimpedanz von der Leistungsabgabe	210
A.9.3	Charakteristischer Spannungsverlauf in öffentlichen Niederspannungs- netzen mit Wohnbebauung	212

A.10 Modellvalidierung	213
A.10.1 Wechselrichter A	213
A.10.2 Wechselrichter B	215
A.11 Anwendung	217
A.12 Ebenenfitting	218

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

i, u	Zeitverlauf des Stromes oder der Spannung
$\underline{I}(t), \underline{U}(t)$	rotierende und/oder amplitudenmodulierte Effektivwertzeiger
R	Resistanz
X	Reaktanz
\underline{Z}	Impedanz
f	Frequenz
$\omega = 2\pi \cdot f$	Kreisfrequenz
φ	Winkel
t	Zeit
μ	Erwartungswert
σ	Standardabweichung oder Streuparameter
B	Bandbreite
T	Periodendauer, zeitliche Länge eines Intervalls
T	Temperatur
M	Modulationsgrad
D	Tastverhältnis
$\Delta\chi$	absolute Abweichung
$\delta\chi$	relative Abweichung
WTHD0	normiertes gewichtetes Gesamt-Oberschwingungsverhältnis

Hochgestellte Indizes

χ^{Bm}	m -tes Emissionsband
$\chi^{(h)}$	Harmonische h -ter Ordnung
$\chi^{Bm(h)}$	Harmonische h -ter Ordnung des m -ten Emissionsbandes

Tiefgestellte Indizes

N	im Netz, eine Eigenschaft des Netzes
AB	an der Wechsellspannungsseite der H-Brücke
DCE	am Gleichspannungseingang
MPP	im Betriebspunkt mit maximaler Leistung
POC	am Anschlusspunkt
ZK	im Zwischenkreis
[χ]	χ -Prozent-Quantil
S	Abtast-
c	Träger- (carrier)
M	Mitten-
w	Wirkanteil
b	Blindanteil
l	Längsanteil
q	Queranteil
r	Bemessungswert
n	Nennwert
P	leistungsabhängig
U	spannungsabhängig
R	Rauschwert
PV	Photovoltaik, Solarzelle
T	Thermo-, Temperatur
L	Leerlauf-
K	Kurzschluss-
auff	Auflösung
filt	gefilterter Wert, das Filter betreffend
grenz	Grenzwert
mess	gemessener Wert
mod	modellierter Wert
Mod	Signalkonditionierungsmodule
org	Originalwert
pri	Primärwert, auf Primärseite
ref	Referenzwert, Referenzbetriebspunkt
Rog	Rogowskispule
sek	Sekundärwert, auf Sekundärseite
Sh	Shunt
sim	simulierter Wert
soll	Sollwert
WMS	Wandlermesssystem

Ausgewählte mathematische Symbole und Funktionen

\mathbb{N}^+	Menge der natürlichen Zahlen ohne Null
$\chi, \chi(t)$	Effektivwert, zeitlich veränderlicher Effektivwert
$\chi(t)$	Zeitverlauf
$\hat{\chi}$	Amplitude, Spitzenwert
j	imaginäre Einheit
$\underline{\chi}$	komplexe Zahl, ruhender Zeiger
$\underline{\chi}(t)$	rotierender Zeiger, analytische Funktion
$\underline{\chi}(t)$	rotierender Effektivwertzeiger
$\underline{\chi}^*$	konjugiert komplexes $\underline{\chi}$
$ \underline{\chi} $	Betrag von $\underline{\chi}$
$\angle \underline{\chi}$	Winkel, Phase, Argument von $\underline{\chi}$
$\operatorname{Re}(\underline{\chi})$	Realteil von $\underline{\chi}$
$\operatorname{Im}(\underline{\chi})$	Imaginärteil von $\underline{\chi}$
$\bar{\chi}$	Mittelwert von χ
$\underline{\chi}_1 \parallel \underline{\chi}_2$	Parallelschaltung von $\underline{\chi}_1$ mit $\underline{\chi}_2$
$\mathcal{F}\{\underline{\chi}\}$	Fouriertransformierte von $\underline{\chi}$
$\mathcal{H}\{\underline{\chi}\}$	Hilberttransformierte von $\underline{\chi}$
$J_\nu(\underline{\chi})$	Besselfunktion erster Gattung und ν -ter Ordnung von $\underline{\chi}$
$\max(\chi_1, \chi_2)$	größtes Element der Menge $\{\chi_1, \chi_2\}$
$\underline{\chi}_1 * \underline{\chi}_2$	Faltung von $\underline{\chi}_1$ mit $\underline{\chi}_2$
\mathbf{X}	Matrix

Abkürzungen

AC	Wechselspannung, Wechselstrom
ADW	Analog-Digital-Wandler
AAF	Anti-Aliasing-Filter
AWGR	additives, weißes, gaußsches Rauschen
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CISPR	Internationales Sonderkomitee für Funkstörungen
DC	Gleichspannung, Gleichstrom
DCE	Gleichspannungseingang
DFT	Diskrete Fouriertransformation oder Discrete Fourier Transform
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IEEH	Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik
ITU	Internationale Fernmeldeunion
LISN	Line Impedance Stabilization Network
μ C	Mikrocontroller
MCS	Mains Communication Systems
MPP	Betriebspunkt mit maximaler Leistung oder Maximum Power Point
PLC	Powerline Communication
PLL	Phasenregelschleife oder phase-locked loop
POC	Anschlusspunkt oder Point Of Connection
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PWM	Pulsweitenmodulation
P&O	Stören und Beobachten oder Perturb and Observe
PV SIM	Photovoltaiksimulator
SAR	Sukzessive Approximation oder Successive Approximation Register
SC	Unterkomitee
TC	Technisches Komitee
TUD	Technische Universität Dresden
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
WG	Arbeitsgruppe
WMO	Weltorganisation für Meteorologie

KAPITEL 1

Einleitung

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden und sich beschleunigenden globalen Erwärmung und dem Unfall im Kernkraftwerk Fukushima in Japan ist in Deutschland ein starker politischer Wille zu einem Umbau der Energieversorgung erwachsen. Die wesentlichen Ziele dieses Prozesses, welcher von der Bundesregierung als *Energiewende* bezeichnet wird, sind der Ausstieg aus der Kernenergietechnik und eine Reduktion der CO₂-Emissionen. Dies soll insbesondere durch einen Wechsel von konventionellen, thermischen Kraftwerken hin zu regenerativen Energien aus Sonne und Wind erreicht werden.

Zur regenerativen Elektroenergieerzeugung aus dem Sonnenlicht eignet sich der indirekte Weg über Sonnenwärmekraftwerke mit Dampfturbine oder der direkte Weg mittels Photovoltaik. Die Sonnenwärmekraftwerke können gegenüber der Photovoltaik höhere Wirkungsgrade erreichen, haben jedoch höhere Betriebskosten [1]. Zudem benötigen sie direkte Sonneneinstrahlung, um die notwendige Betriebstemperatur für den Dampferzeuger zu erreichen. Diese Kraftwerke lassen sich dementsprechend nur in Regionen mit hoher Sonnenscheindauer und -stärke wirtschaftlich betreiben. Sie eignen sich insbesondere für den Einsatz in Südeuropa und Nordafrika, wo sie bis 2030 6% des Weltenergiebedarfs decken könnten [2]. In Deutschland hat sich aufgrund der relativ geringen Spitzenglobalstrahlung und Anzahl Sonnenstunden pro Jahr die Photovoltaik gegenüber den Sonnenwärmekraftwerken durchgesetzt¹.

In Deutschland nimmt die Photovoltaik mit 21,1% der gesamten installierten Erzeugungslleistung und 40,7% der Leistung aus erneuerbaren Energien² im Jahr 2015 eine wesentliche Rolle ein [4]. Die Entwicklung und Herstellung von Geräten zur Nutzung von Photovoltaik ist in Deutschland ein wichtiger Industriezweig. Insgesamt waren in der Photovoltaikbranche im Jahr 2016 etwa 45'000 Personen in Deutschland beschäftigt [5], im Jahr 2011 waren es sogar über 110'000 Personen [6].

Um die Akzeptanz der Energiewende in der Bevölkerung zu erhöhen, soll insbesondere für Privatpersonen ein erhöhter Anreiz geschaffen werden, selbst Photovoltaikanlagen zu errichten und zu betreiben. Aus diesem Grund war die finanzielle Förderung solcher Anlagen im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes [7] abhängig von der Größe und dem Eigenverbrauch der Energie. Bis 2012 wurde die Förderung um etwa 50% erhöht, wenn mindestens 30% der erzeugten Energie selbst verbraucht wurde. Mittlerweile ist die Höhe der Förderung unabhängig vom Eigenverbrauch. Sie ist aber bei Anlagen auf Wohngebäuden bis 10 kW etwa 50% höher als bei Freifeldanlagen. Dadurch lohnt sich

¹ Es existiert lediglich ein Sonnenwärmekraftwerk in Deutschland als Demonstrationsanlage mit 1,5 MW Nennleistung, bekannt als *Solarturm Jülich* [3]. Die Inbetriebnahme war 2011.

² Installierte Erzeugungslleistung Deutschland gesamt 187,5 GW, davon regenerativ 97,4 GW, davon Photovoltaik 39,7 GW

die Investition auch weiterhin besonders für Privatpersonen mit eigenen Dachflächen, beispielsweise Einfamilienhäusern oder Garagen. Im Ergebnis waren im Jahr 2012 46,3% der installierten Photovoltaikleistung im Besitz von Einzelpersonen [8]. Eine gleichbleibende Besitzverteilung vorausgesetzt, kann davon ausgegangen werden, dass 2016 etwa 18 GW Photovoltaikleistung auf oder in der direkten Nähe zu Wohn- und Geschäftsgebäuden in Deutschland installiert waren. In [9] wird festgestellt, dass in den darin untersuchten Netzen Photovoltaikanlagen mit Anlagenleistungen <50 kW dominieren, welche sich überwiegend in Wohngebieten mit Einfamilienhäusern befinden. Auf Anfrage hat der Regionalnetzbetreiber, mit dem ein Forschungsprojekt aus [9] durchgeführt wurde, mitgeteilt, dass mittlerweile in jedem Niederspannungsnetz in der untersuchten Region mindestens eine Photovoltaikanlage zu finden ist.

Die Solarzellen der Photovoltaikanlagen erzeugen durch Ladungsträgertrennung an einem PN-Übergang elektrische Energie in Form einer Gleichspannung und eines Gleichstroms (DC). Dieser Gleichstrom wird durch einen Wechselrichter³ in einen Wechselstrom (AC) gewandelt und in das öffentliche Elektroenergieversorgungsnetz eingespeist. In der Vergangenheit wurden zur Wandlung von Gleich- in Wechselstrom einfache Rechteck- oder Trapezwechselrichter eingesetzt. Diese Wechselrichter erzeugen eine mit der Netzfrequenz alternierende Rechteckspannung. Die Grundschiwingung dieses Rechteckverlaufs entspricht etwa der Netzspannung und es kommt zum gewünschten Leistungsfluss. Dies wird auch als Blocktaktung bezeichnet. Die Schaltfrequenz der Leistungshalbleiter und die Schaltverluste sind bei diesem Vorgehen minimal. Diese Technologie weist an den Ausgangsklemmen der Leistungshalbleiter eine sehr große, niederfrequente Spannungsverzerrung auf, was zum Netz hin einen sehr großen Filteraufwand bedeutet.

Stattdessen werden heute selbstgeführte Wechselrichter mit Spannungszwischenkreis eingesetzt, wie sie in [10] beschrieben werden. Diese Wechselrichter arbeiten in der Regel mit einer Pulsweitenmodulation (PWM), bei der die Schaltsignale für die Leistungshalbleiter durch Vergleich eines Trägersignals mit einem Sollsignal erzeugt werden. Mit diesem Verfahren werden wesentlich geringere Stromverzerrungen erreicht. Dies reduziert die Kosten und die Baugröße der netzseitigen Filter gegenüber Wechselrichtern mit Blocktaktung signifikant. Der ins Netz gespeiste Wechselstrom des Wechselrichters enthält aber prinzipbedingt zusätzliche, höherfrequente Anteile. Diese Stromanteile, deren Frequenz bei ganzzahligen Vielfachen der Trägerfrequenz liegen, fließen ins Netz und durch andere Betriebsmittel und Geräte über den Neutralleiter und Erde zum Wechselrichter zurück. Die durchflossenen Geräte können dadurch vorübergehend oder dauerhaft in ihrer Funktion beeinträchtigt, beschädigt, beschleunigt gealtert oder zerstört werden [11]. Sie können auch für den Menschen störende Geräusche oder Helligkeitsschwankungen⁴ [12–14] emittieren. Die dominierende Frequenz dieser höherfrequenten Anteile von Wechselrichtern mit kleinen Leistungen für Photovoltaikinstallationen auf Wohngebäuden liegt heute typischerweise zwischen 15 und 20 kHz [15, 16]. Bei Wechselrichtern mit sehr großen Einheitenleistungen, meist über 100 kW,

³ Der Begriff Wechselrichter gilt für die mittlere Energieflussrichtung DC→AC. In umgekehrter Richtung wird das Gerät als Wechselrichter bezeichnet. Der allgemeine Überbegriff ist Stromrichter [10].

⁴ Lampen können wahrnehmbare Leuchtdichteschwankungen (Flicker) aufweisen, wenn sie mit einer höherfrequent verzerrten Versorgungsspannung betrieben werden.

kann sie auch im einstelligen Kilohertz-Bereich liegen [17]. Derartige Wechselrichter werden in großen, kommerziellen Solaranlagen eingesetzt und als Zentralwechselrichter bezeichnet.

Im Moment gibt es für die meisten Geräte noch keine Aussendungsgrenzwerte für Ströme oder Spannungen im Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 150 kHz. Aufgrund der bereits sehr hohen Durchdringung der Niederspannungsnetze und der häufig direkten Nähe der Wechselrichter zu anderen Haushaltsgeräten, ergibt sich hier ein dringender Bedarf nach angemessenen Grenzwerten. Dazu sind detaillierte Erkenntnisse über die Aussendungs- und Ausbreitungsmechanismen und insbesondere Möglichkeiten zur Berechnung mittels Modellen von großem Wert.

Ziele der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens für die Modellierung der höherfrequenten Emissionen von Photovoltaikwechselrichtern. Dies geschieht mit der Absicht, die Erkenntnisse bei der zukünftigen Entwicklung von normativen Verfahren zur Bewertung der höherfrequenten Netzzrückwirkung von diesen und ähnlichen Geräten zu nutzen.

Als einzelne Zielstellungen der Arbeit ergeben sich die folgenden Punkte:

- Entwicklung eines einfachen Ersatznetzwerks zur Berechnung der höherfrequenten Spannungen und Ströme am Anschlusspunkt einphasiger Photovoltaikwechselrichter
- Parametrierung des Ersatznetzwerks unabhängig von Kenntnissen über verwendete Topologie und ohne Eingriff in den Wechselrichter, Identifikation und Validierung der Modellparameter allein durch externe Anregung und Beobachtung (Backbox-Modell)
- Nachweis eines typischen Fehlers des Ersatznetzwerks bei der Berechnung der höherfrequenten Spannungen und Ströme besser als $\pm 10\%$ in öffentlichen Niederspannungsnetzen
- Entwicklung von Verfahren zur qualitativen und quantitativen Bewertung der höherfrequenten Spannungen am Anschlusspunkt von Wechselrichtern
- Nachweis der Anwendbarkeit des Modellansatzes auch im Parallelbetrieb mehrerer baugleicher, einphasiger Wechselrichter und Identifikation geeigneter Beschreibungsgrößen der resultierenden höherfrequenten Spannungsverzerrung
- Identifikation von Rahmenbedingungen an die Modellparameter, um eine Unterschreitung von Höchstwerten der höherfrequenten Spannungsverzerrung in öffentlichen Niederspannungsnetzen zuverlässig zu gewährleisten

Für die vorliegende Arbeit werden ausschließlich Photovoltaikwechselrichter verwendet. Der Modellansatz ist jedoch auch für andere, selbstgeführte Stromrichter anwendbar. Dies wird in [18, 19] am Beispiel eines Ladegleichrichters eines Elektrofahrzeugs gezeigt, auch im Parallelbetrieb mit einem Photovoltaikwechselrichter. Der Modellansatz ist schließlich dazu geeignet, die höherfrequente Verzerrung am Hausanschluss einer Installation mit Photovoltaik, Elektrofahrzeug und Haushaltslasten zu berechnen, wie sie exemplarisch im Einstrich-Netzschema [20, IEV: 601-02-04] im Bild 1.1 gezeigt sind.

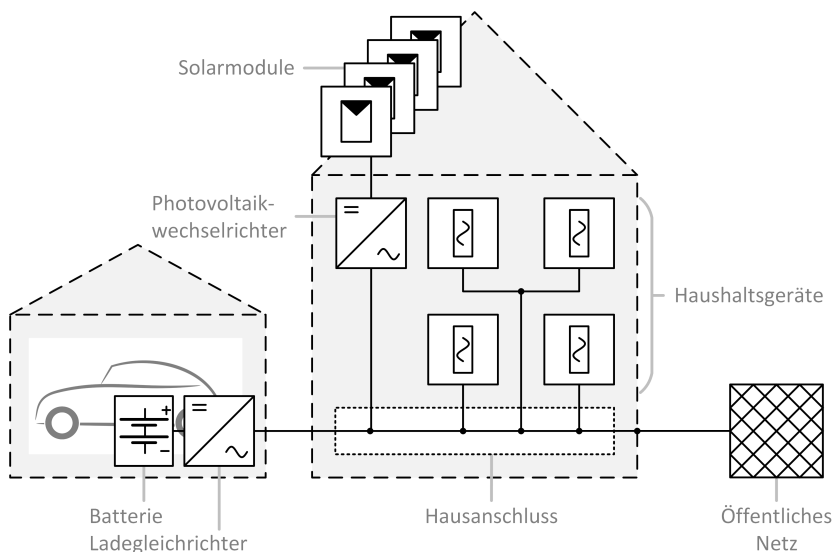


Bild 1.1: Einstrich-Netzschema eines Einfamilienhauses mit einer Photovoltaikanlage und einem Elektrofahrzeug, sowie verschiedenen Haushaltsgeräten

Struktur der Arbeit

Die Struktur dieser Arbeit ist im Bild 1.2 zusammengefasst. In der Darstellung wird dabei nach theoretischen und anwendungsorientierten Komponenten getrennt.

Im Kapitel 2 wird eine Übersicht des aktuellen Forschungsstandes zu höherfrequenten Spannungen und Strömen in öffentlichen Niederspannungsnetzen gegeben. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die vorhandenen Modellierungsansätze für Betriebsmittel und Geräte im Netz in diesem Frequenzbereich gelegt. Danach werden im Kapitel 3 relevante Teile des normativen Rahmens im Frequenzbereich zwischen 2 kHz und 150 kHz vorgestellt. Darin werden die in Normen beschriebenen Messverfahren erläutert und bezüglich ihrer Anwendbarkeit für das Forschungsziel bewertet. Im Kapitel 4 folgt eine Erläuterung zum Stand der Technik bei Photovoltaikwechselrichtern und die Funktionsweise der PWM wird erklärt. Es wird gezeigt, wie die höherfrequenten Anteile im Inneren des Wechselrichters entstehen und wie diese vereinfachend mit amplitudenmodulierten Effektivwertzeigern beschrieben werden können. Im Kapitel 5 wird das verwendete Messverfahren und die Messtechnik beschrieben, mit dem die Größen der höherfrequenten Spannungen und Ströme bestimmt werden. Zusätzlich wird der zu erwartende Messfehler quantifiziert. Im darauf folgenden Kapitel 6 wird der Modellansatz für die höherfrequenten Emissionen eines Wechselrichters vorgestellt. Darauf folgt eine theoretische Betrachtung möglicher Abhängigkeiten der höherfrequenten Spannung.

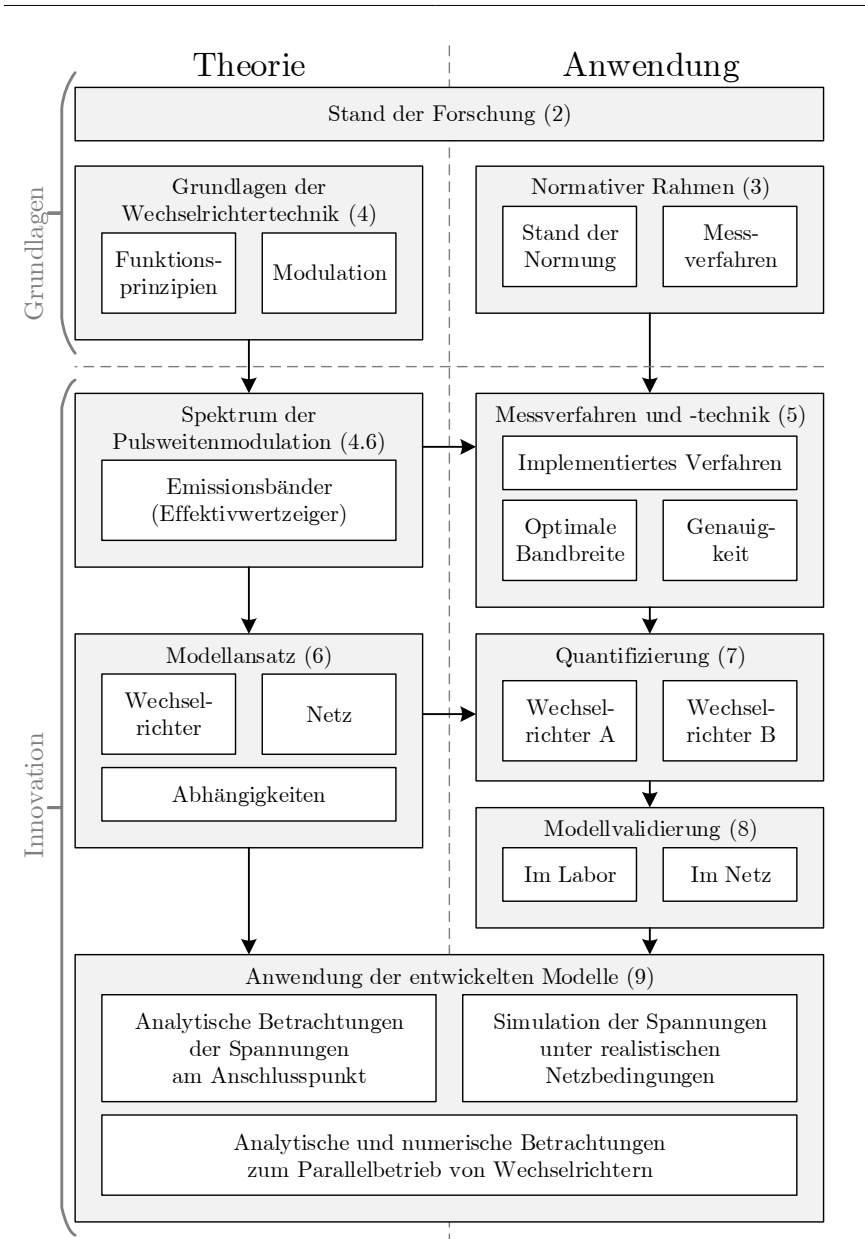


Bild 1.2: Überblick zur Struktur der Arbeit

Im Kapitel 7 werden die Modellparameter von zwei ausgewählten Wechselrichtern quantifiziert. Dabei wird die Stärke der verschiedenen Abhängigkeiten bewertet und die Modelle angemessen vereinfacht. Im Kapitel 8 werden die Fehler der parametrisierten Modelle unter realen Netzbedingungen ermittelt. Dies geschieht im ersten Schritt im Hausnetz des Instituts für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) an der Technischen Universität Dresden (TUD) für die selben Wechselrichter, welche für die Modellbildung verwendet werden. Im zweiten Schritt folgt das gleiche Vorgehen in privat betriebenen Anlagen für baugleiche Geräte.

Das Kapitel 9 zeigt die Ergebnisse verschiedener numerischer und analytischer Untersuchungen auf Basis des Modellansatzes. Es wird abgeleitet, wie die höherfrequenten Spannungsverzerrungen am Anschlusspunkt von Wechselrichtern durch Veränderung der Modellparameter innerhalb des Entwurfsprozesses des netzseitigen Filters vom Hersteller minimiert werden können. Darauf aufbauend wird ein grafisches Verfahren zur Ermittlung der höherfrequenten Spannung am Anschlusspunkt eines Wechselrichters in Abhängigkeit von der Netzschleifenimpedanz entwickelt. Schließlich wird mit dem vorgestellten Modell der Parallelbetrieb von mehreren Wechselrichtern am gleichen Anschlusspunkt untersucht und die Gültigkeit des Modells für diesen Fall gezeigt. Aus der Gleichung für die Entwicklung der Spannung in einem Emissionsband mit steigender Wechselrichteranzahl wird ein Satz von Bedingungen an die Modellparameter eines Wechselrichters hergeleitet. Bei Einhaltung dieser Bedingungen unterschreitet die höherfrequente Spannung am Anschlusspunkt einen wählbaren Grenzwert bei einer beliebigen Anzahl von Wechselrichtern. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse.

KAPITEL 2

Stand der Forschung

Das internationale Forschungsinteresse an Spannungs- und Stromverzerrungen im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz wurde durch eine zunehmende Zahl von Störungsberichten geweckt. Daher stammt ein erheblicher Teil der Erkenntnisse aus einzelnen Fallstudien, welche teilweise durch Kundenbeschwerden aufgrund von Funktionsstörungen oder Geräuscentwicklungen an Haushaltsgeräten, industriell genutzten Maschinen und elektronischen Energiezählern initiiert wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Komplexität des Niederspannungsnetzes aus der Perspektive einer möglichen Modellierung mit steigender Frequenz zunimmt. Die angeschlossenen Geräte beeinflussen die Impedanzverhältnisse und damit die Emissionen zunehmend stärker. Die Bedeutung der Netzbetriebsmittel nimmt entsprechend ab. Die starke Volatilität und große Diversität der im Niederspannungsnetz angeschlossenen Geräte, sowie ihr häufig nichtlineares Verhalten, machen eine umfassende Modellierung bisher unmöglich. Ein umfassendes Bild der zu erwartenden Pegel in öffentlichen Niederspannungsnetzen in diesem Frequenzbereich existiert bisher nicht.

Auch wenn die Ursachen der höherfrequenten Emissionen von selbstgeführten Stromrichtern an Universitäten gelehrt werden, so ist über ihr Verhalten im Niederspannungsnetz bisher wenig bekannt. Sie gehören als zeitvariante Systeme, welche mit einem Netz mit nichtlinearen Verbrauchern interagieren, zu den komplexesten Teilen des Themas. Vollständige Zeitbereichsmodelle der Stromrichter werden für die Filterdimensionierung innerhalb ihres Entwurfsprozesses beim Hersteller verwendet. Es existiert bisher aber kein geeigneter Ansatz, um Modelle dieser Geräte ohne derartig tiefgreifende Kenntnisse erstellen zu können.

Die wesentlichen, bisherigen Erkenntnisse zu höherfrequenten Emissionen werden in diesem Kapitel vorgestellt. Dies erfolgt thematisch getrennt nach den Teilaspekten Entstehung, Ausbreitung, Störbeeinflussung und Modellierung. Ein sehr umfassender Überblick über die verschiedenen Forschungsteilgebiete und offenen Fragestellungen zu höherfrequenten Emissionen wird in [21] gegeben.

2.1 Begriffe

Für Spannungen und Ströme im Frequenzbereich zwischen 2 und 150 kHz hat sich bis heute kein in Wissenschaft und Technik allgemein anerkannter Begriff durchgesetzt. Bezogen auf die Betriebsfrequenz des Netz ist dieser Frequenzbereich relativ hoch, weshalb die Bezeichnung als *hochfrequent* geeignet erscheint. Dies kollidiert jedoch mit der Definition der Internationalen Fernmeldeunion (ITU), welche den betreffenden Frequenzbereich als *Niederfrequenz* bezeichnet. Der Begriff *Hochfrequenz* bezieht sich laut ITU auf den Kurzwellenbereich zwischen 3 und 30 MHz.