



Masterarbeit

Ermittlung und Analyse von Fehlerstromsignaturen von Photovoltaik-Systemen bei Lichtbogenereignissen mit Hilfe eines frequenzsensitiven Differenzstrommonitors und Evaluierung des Detektionspotentials mit Hilfe von Machine Learning-basierten Algorithmen

Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen

Prof. Dr.-Ing. R. Mallwitz

Bearbeiter : W. Dirksen
Betreuer : M. Sc. P. Hauenschild
Eingereicht am : 20. Dezember 2022



Braunschweig, den 20.06.2022

MASTERARBEIT

für Frau Wiebke Dirksen

Thema: „Ermittlung und Analyse von Fehlerstromsignaturen von Photovoltaik-Systemen bei Lichtbogenereignissen mit Hilfe eines frequenzsensitiven Differenzstrommonitors und Evaluierung des Detektionspotentials mit Hilfe von Machine Learning-basierten Algorithmen“

Photovoltaik-Generatoren (PV-Generatoren) sind seit vielen Jahren Bestandteil der elektrischen Energieerzeugung in Deutschland und weltweit. Die PV-Anlagen enthalten Schutzsysteme, wie generelle Fehlerstromschutzbeschaltungen und Überspannungsschutz. Weitere Schutzsysteme, wie beispielsweise eine gleichspannungsseitige Lichtbogenerkennung zur Vermeidung von Anlagenschäden und Bränden ist bisher lediglich in der amerikanischen UL1699B-Norm gefordert, also in Europa in der Regel nicht verbaut.

Die Firma Doepke Schaltgeräte GmbH hat einen neuartigen Differenzstrommonitor (RCM) entwickelt, welcher Differenzströme in Abhängigkeit ihrer Frequenz ermitteln kann. Die Firma Twingz Development GmbH hat dafür zwei Machine Learning Algorithmen entwickelt, welche, in Kombination mit einem Leistungsmonitoring, Abweichungen und Muster in den Differenzströmen erkennen sollen. Aus diesem Produkt ist das Industrieprojekt PV-DiStAnS 1.0 und das Nachfolgeprojekt PV-DiStAnS 2.0 hervorgegangen, welches in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) das frequenzabhängige Verhalten des Differenzstroms von PV-Generatoren untersucht. Ziel des PV-DiStAnS 2.0-Projekts ist die Erkennung von kritischen Zuständen und Fehlern, des PV-Generators während des laufenden Betriebs. Dadurch soll die Anlagenlebensdauer, -zuverlässigkeit und -sicherheit erhöht werden. Einerseits können so effizientere und frühzeitige Wartungseinsätze (Predictive Maintenance) gefahren werden, was die Betriebskosten von PV-Anlagen reduziert. Andererseits kann die PV-Anlage durch die verbesserte Fehlererkennung sicherer werden und so die Versicherbarkeit steigern.

Die Masterarbeit soll die Ableitstromcharakteristik von Lichtbögen bei unterschiedlichen Einflussfaktoren experimentell untersuchen. Dafür ist die Planung und der Bau eines Lichtbogengenerators erforderlich, der sich an die amerikanische Norm UL 1699B orientieren kann, also auch hohe Lichtbogenströme generieren können soll. Die zu untersuchenden möglichen Einflussfaktoren können sein:

- Einflüsse des Wechselrichters
 - MPP-Tracking
 - Verschattungsmanagement
 - DC-Filter
 -
- Topologie und äußere Einflüsse
 - Leitungsimpedanz
 - Erdkapazitäten
 - Einstrahlung

Im Rahmen der Masterarbeit sollen daraus Testszenarien bestimmt werden. Der Lichtbogengenerator soll dann in einer Power Hardware in the Loop (PHIL)-Umgebung getestet werden. Dort können dann auch die verschiedenen möglichen Einflussfaktoren simuliert werden. Der entsprechende Aufbau und die Simulation der Einflussfaktoren muss im Rahmen der Masterarbeit geplant und in Betrieb genommen werden. Der grundsätzliche Aufbau ist in **Abbildung 1** schematisch dargestellt. Gemessen wird der Ableitstrom sowohl mit frequenzsensitiven Differenzstrommonitoren (RCMs), als auch mit einem Frequenzanalysator, welcher unter anderem auch höhere Frequenzen erfassen kann.

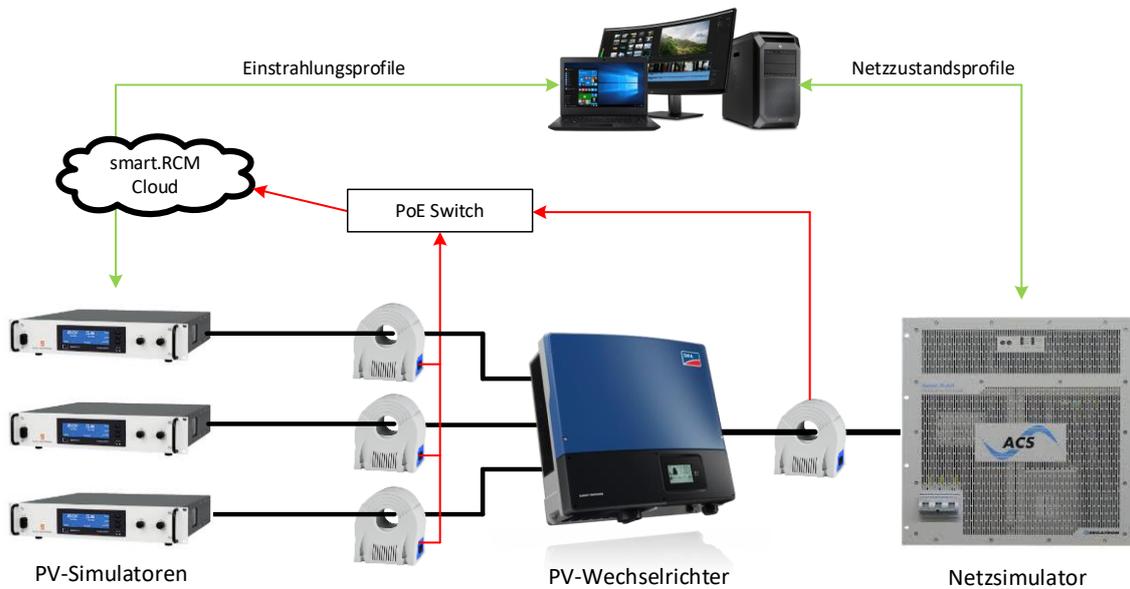


Abbildung 1: Beispielhafter Laboraufbau

Ziel der Arbeit ist die Beantwortung der drei Fragen:

1. Wie wirken sich Lichtbögen auf den DC-seitigen Ableitstrom eines PV-Systems aus?
2. Sind Lichtbögen über ein DC-seitiges Ableitstrom-Monitoring erkennbar?
3. Welche Faktoren beeinflussen den durch ein Lichtbogenereignis hervorgerufenen Fehlerstrom?

Die Bearbeitungszeit der Masterarbeit beträgt sechs Monate.

Prof. Dr.-Ing. R. Mallwitz

Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt zu haben. Die verwendete Literatur und sonstige Hilfsmittel sind vollständig angegeben.

Die Textfassung muss nach den angegebenen Richtlinien zur Ausarbeitung erfolgen. Zur Durchführung obiger Arbeit ist das Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen bereit, institutseigenes Know-How zur Verfügung zu stellen, an dessen weiterer Geheimhaltung ein berechtigtes Interesse besteht. Voraussetzung hierfür ist die durch die nachfolgende Unterschrift des Verfassers anerkannte Verpflichtung des Verfassers, eine Veröffentlichung und/oder Verwertung des Gegenstandes obiger Arbeit oder aber Teilen hiervon nur im Rahmen einer vorherigen schriftlichen Vereinbarung mit dem Institutsleiter vorzunehmen. Die einzureichenden Exemplare sowie die verwendeten Unterlagen bleiben Eigentum des Instituts für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen.

Oldenburg, den 19. Dezember 2022

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XI
Kurzfassung	XIII
Abstract	XV
1 Einführung	1
1.1 Ziel der Arbeit	2
1.2 Struktur dieser Arbeit	2
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Lichtbogen: Physikalische Grundlagen und Frequenzverhalten	4
2.2 Vorhandene Ansätze zur Lichtbogendetektion	5
2.3 Elektromagnetische Störgrößen	7
2.4 Typischer Aufbau einer PV-Anlage	7
3 Methodik	9
3.1 Entwicklung eines Lichtbogengenerators	9
3.2 Entwicklung des Power Hardware in the Loop-Teststands	11
3.3 Messsensorik des Differenzstrommonitors	13
3.4 Einsatz der Messsensorik im PHiL-Teststand	14
3.5 Datenanalyse mit Hilfe von Machine Learning Algorithmen	15
3.5.1 Mustererkennung	16
3.5.2 Zustandsvorhersage	17
3.6 Untersuchung von ausgewählten Einflussfaktoren auf die Lichtbogencharakteristik	18
3.7 Untersuchung der Detektionsfähigkeit des betrachteten Analysesystems	20
4 Auswirkung der untersuchten Faktoren auf die Lichtbogencharakteristik	22
4.1 Verarbeitung der Messwerte	23
4.2 Versuch 1: LDS für unterschiedliche Leiter-Leiter-Kapazitäten	25
4.3 Versuch 2: LDS für unterschiedliche Lichtbogenströme	25
4.4 Versuch 3: LDS für unterschiedliche DC-Spannungen	28
4.5 Versuch 4: LDS für unterschiedliche Ableitkapazitäten an der DC-Quelle	29
4.6 Versuch 5: LDS für verschiedene Orte der Ableitkapazität an der DC-Quelle	29

4.7	Versuch 6: LDS für unterschiedliche Leitungsinduktivitäten	29
4.8	Versuch 7: LDS für unterschiedliche Y-Filterkondensatoren im Umrichter	33
4.9	Versuch 8: LDS für den zusätzlichen Widerstand im Hin- bzw. Rückleiter	33
4.10	Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchsszenarien im PHiL-Teststand	33
5	Detektionspotential des Analysystems	39
5.1	Detektionspotential des Lichtbogenereignisses durch den Differenzstrommonitor	39
5.2	Detektionspotential des Lichtbogenereignisses durch die Machine Learning Algorithmen	42
5.2.1	Lichtbogenereignis 1	42
5.2.2	Lichtbogenereignis 2	44
5.3	Zusammenfassung des Detektionspotentials des Analysystems	46
6	Fazit und Ausblick	47
	Literatur	49
A	Anhang	52
A.1	Frequenzgang des eingesetzten RCMs	53
A.2	Gerätelisten	55
A.3	Programm zum Lesen, Modifizieren und Ausgeben der Einstrahlungsdaten	57
A.4	Inhalt der CD-ROM	63

Tabellenverzeichnis

3.1	Leitungsimpedanzen im PHiL-Teststand	12
3.2	Mit dem Dewesoft-Messsystem gemessene Größen	15
3.3	Beschreibung der analysierten Einflussfaktoren nach Versuchsnummer	20
3.4	Versuche am PHiL-Teststand	20
4.1	Prozentuale Änderung der normierten Leistung für die jeweiligen Versuchsvarianten b-d bezogen auf die entsprechende Versuchsvariante a	36
5.1	Differenz im DC-Differenzstrom im Bereich von $f = 13$ kHz bis 19 kHz während des Lichtbogens für die einzelnen Versuche	40
5.2	Anomaliefaktor vor und während des Lichtbogenereignisses eins um 12:03:15 Uhr für verschiedene Frequenzen f	43
5.3	Rekonstruktionsfehler vor und während des Lichtbogenereignisses 1 um 12:03:16 Uhr für verschiedene Frequenzen f	44
5.4	Anomaliefaktor vor und während des Lichtbogenereignisses 2 um 13:04:10 Uhr für verschiedene Frequenzen f	45
5.5	Rekonstruktionsfehler vor und während des Lichtbogenereignisses 2 um 13:04:10 Uhr für verschiedene Frequenzen f	45
A.1	Verwendete Geräte im Lichtbogengenerator	55
A.2	Verwendete Geräte im PHiL-Teststand	55
A.3	Verwendete Messgeräte im PHiL-Teststand	56

Abbildungsverzeichnis

2.1	Örtlicher Verlauf der Lichtbogenspannung zwischen Anode und Kathode	5
2.2	$1/f^2$ -Rauschen des Lichtbogens im Leistungsdichtespektrum	6
2.3	Prinzipieller Aufbau eines einphasigen EMV-Filters	7
2.4	Prinzipieller Aufbau einer PV-Anlage mit vorhandenen Parasitärkapazitäten	8
3.1	Innenansicht auf den Lichtbogengenerator ohne Deckel	10
3.2	Aufbau des Lichtbogengenerators	10
3.3	Labora Aufbau für Störlichtbogentests an einer emulierten PV-Anlage mit einem String und einem MPP-Tracking gemäß UL 1699B	11
3.4	Schaltplan des PHiL-Teststands	12
3.5	Aufbau des PHiL-Teststands im Labor	13
3.6	Messpunkte im PHiL-Teststand	14
3.7	Schematische Anordnung der Schichten des Autoencoders	17
3.8	Schematische Darstellung des Datenverarbeitungsprozesses des State-Estimator-Modells	19
3.9	Einstrahlungsprofile für den PHiL-Teststand	21
4.1	Das Hann-Fenster in der zeitlichen und spektralen Darstellung	23
4.2	Leistungsdichtespektren für den Versuch 2b bei $I_{DC+} = 7,5$ A für den normalen Betrieb und das Lichtbogenereignis der jeweiligen Ströme	24
4.3	Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche Leiter-Leiter-Kapazitäten	26
4.4	Normierte Leistungsdichtespektren des AC-Differenzstroms der drei Messreihen für Versuch 1a	26
4.5	Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche Lichtbogenströme	27
4.6	Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche DC-Spannungen	28
4.7	Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche Generator(+)-Erdpotential-Kapazitäten	30
4.8	Normierte Leistungsdichtespektren für eine 1 nF-Kapazität zwischen dem Plus- bzw. dem Minuspol der DC-Quelle und dem Erdpotential	31
4.9	Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche Leitungsinduktivitäten $L_{1,2}$	32
4.10	Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche Umrichter-Filterkapazitäten C_V	34
4.11	Normierte Leistungsdichtespektren für den Widerstand R_{Poti} im Hin- bzw. im Rückleiter	35

4.12	Schematische Darstellung der parasitären Kapazitäten gegen das Erdpotential in einer PV-Anlage	37
5.1	Vor, während und nach vier Lichtbogenereignissen im DC-Differenzstrom von dem RCM gemessener Strom $I_{DC,Diff}$ für Frequenzen $f > 10$ kHz	40
5.2	Vor, während und nach vier Lichtbogenereignissen im DC-Differenzstrom von dem RCM gemessener Strom I_{DC+} für verschiedene Frequenzen f	41
5.3	Verlauf der Lichtbogenspannung und des Lichtbogenstroms während des Lichtbogenereignisses eins und zwei	42
5.4	Zeitlicher Verlauf des Laststroms I_{DC+} für das Lichtbogenereignis 1	43
5.5	Zeitlicher Verlauf des Laststroms I_{DC+} für das Lichtbogenereignis 2	45

Abkürzungsverzeichnis

AC Wechselstrom

DC Gleichstrom

FFT schnelle Fourier-Transformation

LDS Leistungsdichtespektrum

MPP Punkt maximaler Leistung

PHiL Power Hardware in the Loop

PoE Power over Ethernet

PV Photovoltaik

RCM Differenzstrommonitor

SCPI Standard Commands for Programmable Instruments

Kurzfassung

Diese Masterarbeit untersucht serielle Lichtbogenereignisse in Hinblick auf ihre Charakteristik im Differenzstrom auf der Gleichspannungs- und auf der Wechselspannungsseite einer Photovoltaik-Anlage, sowie auf dessen DC-Laststrom. Dabei wird ein Lichtbogengenerator und ein Power Hardware in the Loop-Teststand entwickelt, in dem der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Lichtbogencharakteristik untersucht wird. Weiterhin wird die Erkennbarkeit von Lichtbogenereignissen mit Hilfe eines frequenzsensitiven Differenzstrommonitors im DC-Laststrom und DC-Differenzstrom in diesem Teststand analysiert. Die damit gemessenen Daten dienen als Eingangsdaten für Machine Learning Algorithmen, deren Fähigkeit zur Detektion von Lichtbögen betrachtet wird.

Die untersuchten Faktoren wirken sich auf die spektrale Rauschleistung des Lichtbogens im Laststrom aus. Im Gleichstrom (DC)-Differenzstrom erhöht sich die Stromamplitude im Bereich der Taktfrequenz des Wechselrichters während des Lichtbogens. Die Stromänderung wird vom Differenzstrommonitor im Laststrom gemessen und vom Machine Learning Algorithmus „Mustererkennung“ als Anomalie detektiert.

Stichwörter zu dieser Arbeit:

- Störlichtbogen
- Lichtbogendetektion
- Photovoltaik
- Differenzstrom
- Machine Learning Algorithmen

Abstract

This master thesis investigates serial arcing events with regard to their characteristics in the differential current on the DC and AC sides of a photovoltaic system, as well as its DC load current. An arc generator and a power hardware in the loop test bench are developed, in which the influence of different factors on the arc characteristics is investigated. Furthermore, the detectability of arcing events is analysed with the help of a frequency-sensitive differential current monitor in the DC load current and DC differential current in this test bench. These measured data serve as input data for machine learning algorithms, whose ability to detect electric arcs will be examined.

The investigated factors affect the spectral noise power of the arc in the load current. In the DC differential current, the current amplitude increases in the range of the inverter's switching frequency during the arc. The current change is measured by the differential current monitor in the load current and detected as an anomaly by the machine learning algorithm "pattern recognition".

Keywords:

- electric arc
- arc detection
- photovoltaic
- differential current
- machine learning algorithms

1 Einführung

Moderne Photovoltaik (PV)-Anlagen in Deutschland enthalten Schutzsysteme zur Erfassung und Beherrschung klassischer Fehlerszenarien. Dazu zählen Kurz- oder Erdschlüsse, welche sich hauptsächlich auf die Wechselstrom (AC)-Seite des Systems konzentrieren. Weitere Schutzsysteme, insbesondere auf der DC-Seite, wie eine DC-seitige Lichtbogenerkennung zur Vermeidung von Anlagenschäden und Bränden, sind in Europa nicht erforderlich. Stand 2012 sind jedoch etwa ein Fünftel aller Versicherungsschäden auf Feuer zurückzuführen [23], wobei von 1,3 Mio. PV-Anlagen lediglich 210 Brände durch Lichtbögen ausgelöst worden sind (Stand 2013) [21, S. 51]. Auch wenn diese Zahlen nicht aktuell sind, zeigen sie deutlich, dass ein einzelner Brand, beispielsweise auf einem landwirtschaftlichen Betrieb, einen erheblichen Schaden verursachen kann. Es ist von Interesse für Versicherer und Anlagenbetreiber, die häufig durch Lichtbögen ausgelösten Brände zu vermeiden, auch weil Versicherer immer häufiger nicht gewillt sind, risikoreiche Anlagen zu versichern, sodass diese nicht errichtet werden.

Serielle oder parallele Lichtbögen können durch Schäden an der Kabelisolierung oder erhöhte Kontaktwiderstände hervorgerufen werden, die durch korrodierte oder fehlerhafte Kontakte, Tierverschleiß oder aufgescheuerte Kabel entstehen. Die Temperatur im Inneren des Lichtbogens kann sich innerhalb kurzer Zeit auf mehrere Tausend Grad Celsius aufheizen und dabei benachbarte Materialien entzünden und große Schäden verursachen [21, S. 49 f.]. DC-Lichtbögen brennen bei ausreichendem Strom und Spannung bis zu mehreren Minuten stabil [21, S. 41], da sie, im Gegensatz zum Wechselstrom, über keinen Nulldurchgang verfügen, in dem sie sich selbst löschen. Während des Lichtbogenereignisses wird ein $1/f$ -Stromrauschen im DC-Leistungspfad erzeugt, was viele bisherige Systeme zur Detektion nutzen [25, 13].

Bisher ist lediglich in den USA und Kanada im National Electric Code (NEC 690.11) für PV-Anlagen ab 80 VDC eine Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung vorgeschrieben [16]. In der zugehörigen Prüfnorm UL 1699B sind Abschaltzeiten von maximal 2,5 s und eine maximale Energie des Lichtbogens von 750 J bei unterschiedlichen Lichtbogenströmen und Systemspannungen, unterschiedlichen Lichtbogenlängen, unterschiedlichen Impedanzen und unterschiedlichen Orten festgelegt. Innerhalb dieser Zeit muss demnach ein Lichtbogen erkannt und sicher abgeschaltet werden. Das Wiedereinschalten darf nicht automatisiert

erfolgen, sondern erst, nachdem der Fehler vor Ort inspiziert und behoben worden ist. [22] Eine fehlerhafte Erkennung kann dabei, durch die u. U. lange Abschaltdauer einen hohen ökonomischen Schaden verursachen. Zudem muss eine Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtung nur bei den in der UL 1699B geforderten Strömen und Impedanzen sicher auslösen, um die normativen Vorgaben zu erfüllen. Bei abweichenden Bedingungen und bedingt durch äußere Einflüsse kann es also sein, dass ein Lichtbogen nicht, oder nicht schnell genug erkannt und abgeschaltet wird. In der Praxis variiert die Impedanz der Module und Leitungen durch die vielen Aufbaumöglichkeiten und Variationen in der Anlagengröße von der Norm.

1.1 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es festzustellen, ob und wie sich ein Störlichtbogen im DC-Kreis einer PV-Anlage auf den AC- und DC-seitigen Differenzstrom bemerkbar macht, wie einzelne Faktoren dieses Differenzstromverhalten beeinflussen und in welcher Weise die Ableitstromcharakteristik des Lichtbogens von einem marktüblichen Differenzstrommonitor (RCM) erfasst wird. Dafür ist ein Lichtbogengenerator sowie ein Power Hardware in the Loop (PHiL)-Teststand zu entwickeln. Für diesen Teststand, welcher eine PV-Anlage nachbilden soll, sind Messdaten für das Training von Machine Learning Algorithmen zu generieren, welche hinsichtlich der Detektionsfähigkeit von Lichtbögen auszuwerten sind.

Diese Masterarbeit ist Teil des Projekts PV-DiStAnS 2.0, welches die Potentiale eines, von der Firma Doepke Schaltgeräte GmbH entwickelten frequenzsensitiven RCMs untersucht, dessen Messwerte mit Hilfe von Machine Learning Algorithmen ausgewertet werden. Für die Entwicklung der Algorithmen ist dabei die Firma Twingz Development GmbH zuständig.

1.2 Struktur dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschreibt zunächst die theoretischen Grundlagen, auf die die Ausarbeitung der Methodik der Lichtbogenanalyse aufbaut. Es werden die physikalischen Grundlagen und das Frequenzverhalten des Lichtbogens in Kapitel 2 beschrieben, auf welchem bisherige Ansätze zur Lichtbogendetektion beruhen. Die Detektion wird durch elektromagnetische Störgrößen beeinträchtigt, für deren Einkopplungsorte der typische Aufbau einer PV-Anlage dargestellt ist.

In Kapitel 3 wird auf die Entwicklung der Testumgebung und die darin durchgeführten Versuche eingegangen. Entwickelt wird ein Lichtbogengenerator sowie ein PHiL-Teststand, der eine reale PV-Anlage nachbilden soll. In den Teststand wird ein Messsystem integriert sowie

die RCMs der Firma Doepke, deren Messdaten mit den in diesem Kapitel erläuterten Machine Learning Algorithmen ausgewertet werden. Weiterhin wird beschrieben, auf welche Weise der Effekt ausgewählter Faktoren auf die Lichtbogencharakteristik und das Detektionspotential des Analysesystems untersucht werden.

Auf die Ergebnisse und Auswertung der Einflussfaktoren wird in Kapitel 4 eingegangen. Dabei wird die Rauschleistung im DC-Laststrom sowie in dem DC- und AC- Differenzstrom betrachtet.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Untersuchung des Detektionspotentials des Analysesystems, bestehend aus den RCM-Messdaten und den Machine Learning Algorithmen, präsentiert und ausgewertet.

Anschließend folgt das Fazit zu dieser Arbeit sowie ein Ausblick auf mögliche Folgeuntersuchungen zur Lichtbogendetektion mit dem Analysesystem.

2 Theoretische Grundlagen

Diese Arbeit baut auf Grundlagen der Physik von Lichtbögen auf, aus welcher die im weiteren Verlauf untersuchten Einflussgrößen abgeleitet sind. Zudem wird das Frequenzverhalten des Lichtbogens beschrieben, welches für dessen Erkennung durch entsprechende Sensorik von Bedeutung ist. In Abschnitt 2.2 werden bisherige Ansätze für die Lichtbogendetektion dargestellt. Diese Detektion wird durch innere und äußere Störgrößen beeinflusst (Abschnitt 2.3), die sich an unterschiedlichen Orten in eine PV-Anlage einkoppeln können. Neben dem typischen Aufbau einer PV-Anlage werden mögliche Orte für die kapazitive Einkopplung von Störgrößen in Abschnitt 2.4 beschrieben.

2.1 Lichtbogen: Physikalische Grundlagen und Frequenzverhalten

Lichtbögen können zwischen zwei Elektroden mit ausreichend großer Potentialdifferenz durch Gasentladung entstehen. Lässt beispielsweise der Anpressdruck zwischen zwei Kontakten nach, führt das zu einem erhöhten Übergangswiderstand und die Kontaktfläche nimmt ab. In der Folge steigt die Stromdichte an und führt zu einem Schmelzen und Sieden des Elektrodenmaterials. Das verbleibende Metall explodiert und bildet einen Metaldampf-Lichtbogen, welcher sich binnen wenigen Millisekunden auf mehrere Tausend Grad Celsius aufheizt. Bei ausreichend hohem Strom und Spannung bildet sich durch die hohe Temperatur ein leitfähiges Plasma aus dem Stickstoff der Luft. [3, 21]

Die Lichtbogenspannung lässt sich in drei Bereiche unterteilen (siehe **Abbildung 2.1**). Im Kathodenfallraum werden die Elektroden durch thermische Emission, Feldemission oder Thermo-Feldemission von der Kathode emittiert. Aufgrund von Ionisierungsprozessen finden sich in der Raumladungszone vor der Kathode positive Ionen. Die entstehende Kathodenfallspannung U_K ist im Wesentlichen abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und dem Material der Kathode. Der mittlere Bereich ist die Bogensäule, die von dem leitfähigen Plasma gebildet wird. Der Spannungsabfall ist proportional zur Bogenlänge und abhängig von der Temperaturverteilung im Plasma. Der dritte Bereich ist der Anodenfallraum. Die

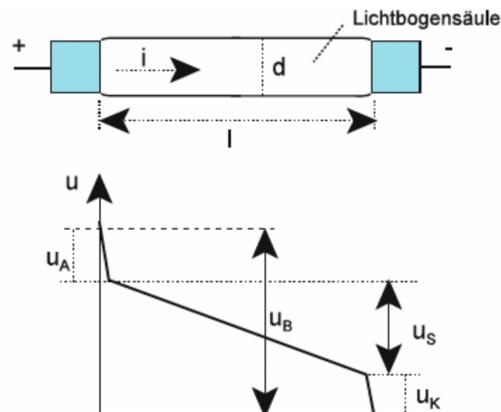


Abbildung 2.1: Örtlicher Verlauf der Lichtbogenspannung U_B bestehend aus der Anodenspannung U_A , der Säulenspannung U_S und der Kathodenspannung U_K [5, S. 543]

Anode wirkt für die Elektronen als passiver Kollektor. [25]

Der Lichtbogen ist somit abhängig von

- dem Elektrodenmaterial,
- der Kontaktfläche,
- dem Lichtbogenstrom und der Lichtbogenspannung sowie
- der Länge des Lichtbogens.

Der vom Lichtbogen erzeugte Strom fluktuiert aufgrund von Materialabspregungen, stochastisch auftretender Ionisationsprozesse und Korrosionsbildung an den Elektroden. Dabei erzeugt ein Lichtbogen ein $1/f^2$ -Rauschen im Leistungsdichtespektrum (LDS) (siehe **Abbildung 2.2**). [3]

2.2 Vorhandene Ansätze zur Lichtbogendetektion

Für die Detektion von Lichtbögen gibt es verschiedene Methoden basierend auf

- das Spektrum,
- Statistiken,
- einem Modell oder
- Machine Learning Algorithmen.

Häufig zur Erkennung herangezogen wird das vom Lichtbogen erzeugte Rauschen, indem das Spektrum des DC-Laststromkreises untersucht wird.

Viele Systeme nutzen eine schnelle Fourier-Transformation (FFT) zum Vergleich der Ampli-

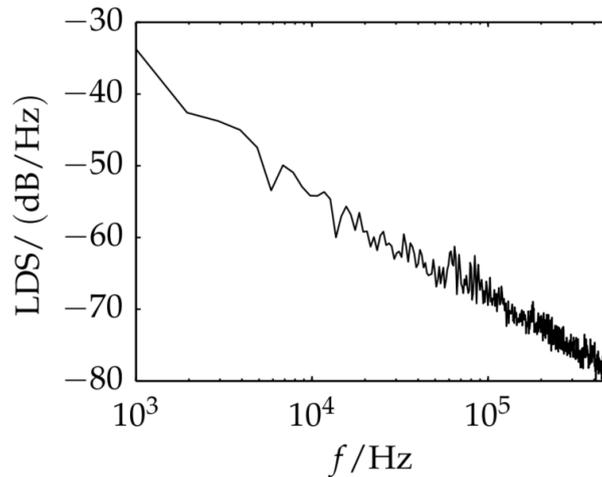


Abbildung 2.2: $1/f^2$ -Rauschen des Lichtbogens im LDS [25, S. 70]

tude und des Leistungsspektrums vor und während des Lichtbogens in einem Frequenzbereich von 1 kHz bis 100 kHz. Ein von C. Oberhauser und Texas Instruments eingereichtes Patent nutzt das mit Hilfe einer FFT berechnete LDS, um ein Lichtbogenereignis erkennen zu können [18]. Die Kurzzeit-Fourier-Transformation betrachtet zusätzlich den Zeitbereich, wobei dabei ein Kompromiss zwischen zeitlicher und spektraler Auflösung geschaffen werden muss. Mit einer Wavelet-Transformation kann die zeitliche Auflösung an die Frequenzkomponenten angepasst werden. [10].

Bei den statistischen Ansätzen können Mittelwert, Standardabweichung, Effektivwert, Entropie und Extremwerte des Eingangssignals betrachtet werden. In [8] von E. Giske et. al. wird die Häufigkeit von Maximalwerten der AC-Anteile des DC-Stromes zur Detektion herangezogen. Das Systemverhalten und das Lichtbogenverhalten können auch in einem Modell simuliert werden, welches dann mit dem tatsächlichen Signal verglichen wird. Dieser Ansatz kann als Basis für das Machine Learning genutzt werden. Die eingesetzten Modelle sind beispielsweise die sogenannte Support Vector Machine oder künstliche neuronale Netze (siehe [12]).

Allen Ansätzen ist gemein, dass zur Erfassung der durch den Lichtbogen erzeugte hochfrequente Anteil des DC-Stroms analysiert wird. Weitere Ansätze nutzen die thermische Energie, ultraviolettes Licht oder elektromagnetische Strahlung, wofür unter Umständen aufwändige Messsysteme zum Einsatz kommen. [14] Auch akustische Signale können zur Detektion herangezogen werden [15]. Die Ableitstromcharakteristik eines Lichtbogens ist bisher kaum erforscht. Entsprechende Detektionsansätze sind ebenfalls neuartig.

2.3 Elektromagnetische Störgrößen

Eine generelle Herausforderung bei der Detektion von Störlichtbögen in PV-Anlagen ist die Unterscheidung des tatsächlich von einem Lichtbogen verursachten Signals von äußeren Störeinflüssen. Diese Störungen können sich galvanisch, kapazitiv, induktiv oder über elektromagnetische Strahlung einkoppeln. In einem Wechselrichter werden so beispielsweise Schalthandlungen auf der AC-Seite durch die hohen Spannungs- und Stromänderungen auf die DC-Seite übertragen. Funksignale, die beispielsweise von einem Flughafenradar ausgesandt werden, können sich ebenfalls einkoppeln und zu einer erhöhten Amplitude bei der entsprechenden Frequenz führen. Bedingt durch parasitäre Kapazitäten und Induktivitäten wirken sich diese Störgrößen im Schaltkreis aus. Dabei kann es zu einer Dämpfung, aber auch zu einer Überhöhung an Resonanzstellen kommen.

Weiterhin zu unterscheiden sind symmetrische und asymmetrische Störungen entlang einer Leitung, welche auch als Gegentakt- bzw. Gleichtaktstörungen bezeichnet werden. Symmetrische Störströme wirken sich im Laststromkreis aus, asymmetrische Störströme werden über parasitäre Kapazitäten über den Schutzleiter abgeleitet. Zur Begrenzung dieser Ströme werden Tiefpassfilter eingesetzt, die diese Ströme herausfiltern. In **Abbildung 2.3** ist solch eine Filterschaltung skizziert. Diese setzt sich zusammen aus einer stromkompensierten Drossel L zur Reduktion von Gleichtaktstörströmen sowie X-Kondensatoren C_X zur Dämpfung von Gleichtaktspannungen und Y-Kondensatoren C_Y zur Dämpfung von Gegentaktspannungen. [20]

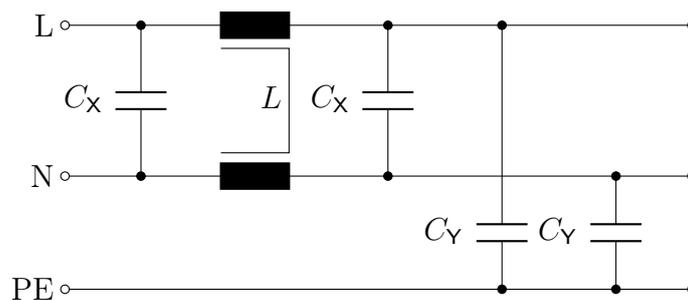


Abbildung 2.3: Prinzipieller Aufbau eines einphasigen EMV-Filters

2.4 Typischer Aufbau einer PV-Anlage

In einem Wechselrichter sind EMV-Filter sowohl auf der DC- als auch auf der AC-Seite integriert. Der prinzipielle Aufbau einer PV-Anlage ist in **Abbildung 2.4** dargestellt. Im PV-Wechselrichter befindet sich zudem ein Hochsetzsteller, welcher über eine in definierten

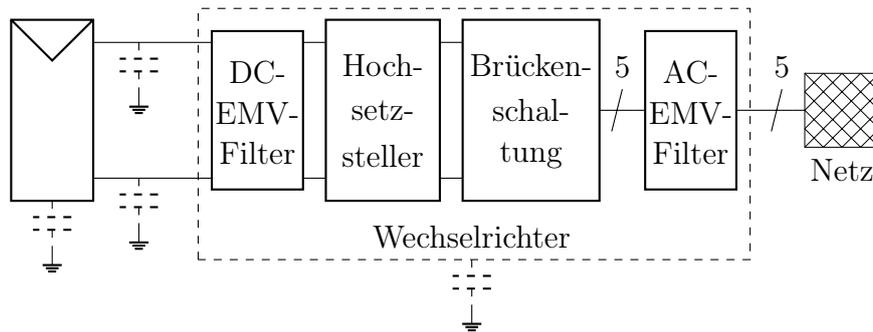


Abbildung 2.4: Prinzipieller Aufbau einer PV-Anlage mit vorhandenen Parasitärkapazitäten

Abständen ausgeführte Spannungsanpassung den Punkt maximaler Leistung (MPP) am PV-Generator einstellt. Die vom PV-Generator erzeugte Gleichspannung wird über eine aktive Brückenschaltung in eine Wechselspannung umgerichtet und die entsprechende Leistung ins Netz gespeist. Elektromagnetische Störungen durch die Taktfrequenz der Halbleiterschalter können durch die EMV-Filter, durch einen veränderten Aufbau sowie durch eine optimierte Ansteuerung der Leistungsschalter verringert werden, lassen sich aber nicht ganz vermeiden. Parasitäre Kapazitäten gegen das Erdpotential sind in einer PV-Anlage an vielen Stellen zu finden. Sie entstehen bei unterschiedlichen Potenzialen zwischen leitenden Materialien. So sind zwischen dem Solarmodul und dem Erdpotential, zwischen den Leitungen und dem Erdpotential und am Wechselrichter parasitäre Kapazitäten zu finden, die je nach Anlagenspannung, Geometrie und Montage der Anlage, Topologie und Wetter variieren und Leckströme im Schutzleiter hervorrufen. Die Parasitärkapazitäten sind in Abbildung 2.4 eingezeichnet.

3 Methodik

Der Störlichtbogen wird in einem PHiL-Teststand untersucht. Dafür wird ein Lichtbogengenerator entwickelt, welcher durch das Auseinanderbewegen zweier Kupferelektroden einen Lichtbogen erzeugt. Zudem wird ein PHiL-Teststand geplant und aufgebaut, der eine PV-Anlage simuliert. Dort wird der Lichtbogengenerator seriell und wechselrichternah integriert. Untersucht werden zum Einen der Einfluss ausgewählter Faktoren auf die Lichtbogencharakteristik im Laststrom sowie in den DC- und AC-seitigen Differenzströmen. Zum Anderen wird die Detektionsfähigkeit von Störlichtbögen des RCMs sowie der Machine Learning Algorithmen analysiert.

3.1 Entwicklung eines Lichtbogengenerators

Der Aufbau des Lichtbogengenerators ist in **Abbildung 3.1** dargestellt. Der Lichtbogengenerator besteht aus einem manuell verstellbaren Lineartisch, auf welchem die Elektroden befestigt werden können (A). Zwischen dem Lineartisch und den Elektroden befindet sich ein 30 mm dickes Isolationsmaterial. Die Elektroden bestehen aus je ca. 100 mm langen Rundstäben aus Kupfer mit einem Durchmesser von $d = 6$ mm. Mit Hilfe einer digitalen Positionsanzeige lässt sich der Abstand zwischen den Elektroden von außen in 100 μ m-Schritten ablesen (B). Im Gehäuse des Lichtbogengenerators befindet sich ein DC-Schaltrelais Q_1 (C), welches durch Betätigen eines nach außen geführten Schalters S (D) die Lichtbogenstrecke Q_2 kurzschließen kann. Zudem sind noch zwei Messleitungen (E) für die Spannungsmessung des Lichtbogens montiert. Das Gehäuse verfügt über einen transparenten Deckel, welcher aus Sicherheitsgründen mit einer Tönungsfolie abgedeckt ist. Der Lichtbogen bleibt auf diese Weise weiterhin mit geschlossenem Deckel erkennbar.

Die Parallelschaltung von der Lichtbogenstrecke und dem Schaltrelais ist in **Abbildung 3.2** skizziert. Das DC-Schaltrelais Q_1 kann mit dem Schalter S eingeschaltet werden, um die Lichtbogenstrecke Q_2 kurzzuschließen. In **Tabelle A.1** sind die im Lichtbogengenerator verbauten Teile gelistet.

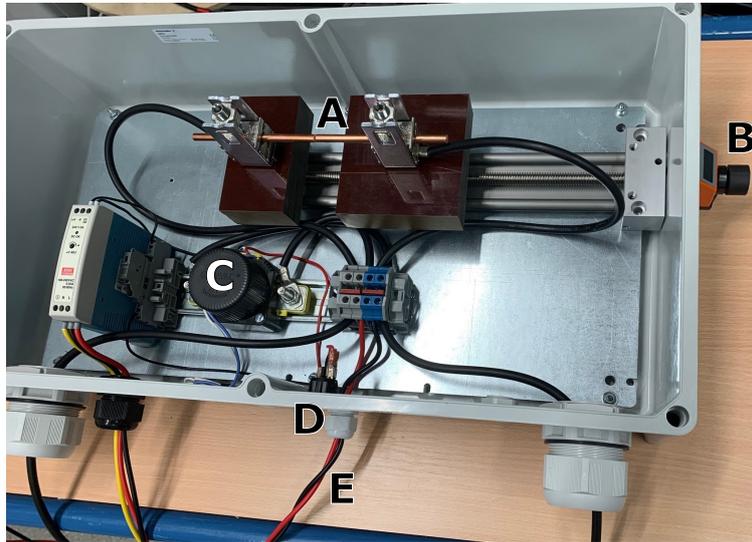


Abbildung 3.1: Draufsicht auf den Lichtbogengenerator ohne Deckel (A: Elektroden, B: Positionsanzeiger, C: Schaltrelais, D: externer Schalter, E: Messleitung)

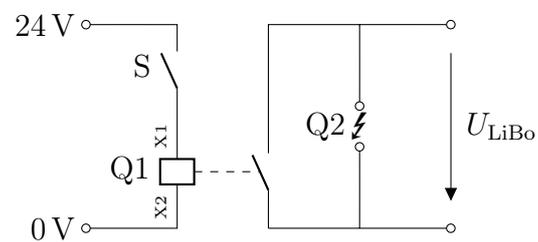


Abbildung 3.2: Aufbau des Lichtbogengenerators

3.2 Entwicklung des Power Hardware in the Loop-Teststands

Die Nachbildung der PV-Anlage ist angelehnt an die UL 1699B. In dieser Norm sind für den Laboraufbau Werte für die Leitungs- und Modulimpedanznachbildung vorgegeben. Sie hängen von der Anlagentopologie, der Wechselrichterart und der Anzahl an MPP-Trackern ab. In **Abbildung 3.3** ist der geforderte Laboraufbau für eine nachzubildende PV-Anlage mit einem String und einem MPP-Tracker abgebildet. Als Leitungslänge werden dabei 80 m angenommen.

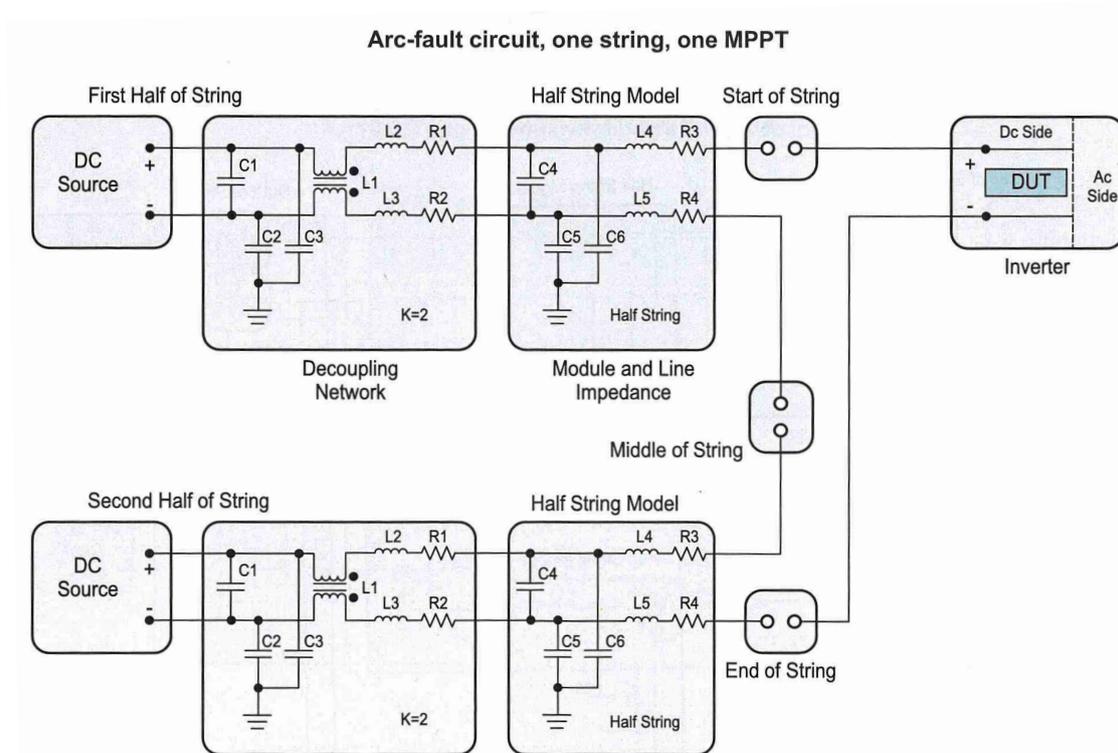


Abbildung 3.3: Laboraufbau für Störlichtbogentests an einer emulierten PV-Anlage mit einem String und einem MPP-Tracking gemäß UL 1699B [22, S. 35]

Die Leitungsimpedanzen des Versuchsaufbaus sind an die UL 1699B angelehnt, wobei das Entkopplungsnetzwerk vernachlässigt wird. Zudem wird der Einfluss des Lichtbogenortes im PHiL-Teststand nicht untersucht, sodass nur eine DC-Quelle und ein gesamtes Strangmodell verwendet wird. Der Aufbau des PHiL-Teststands ist in **Abbildung 3.4** skizziert. Er besteht aus einem Netzsimulator, welcher ein starres 400 V-Netz bereitstellt, einem 15 kW-Wechselrichter und einer DC-Quelle, die den PV-Generator simuliert. Eine genauere Beschreibung der Geräte ist in **Tabelle A.2 auf Seite 55** dargestellt.

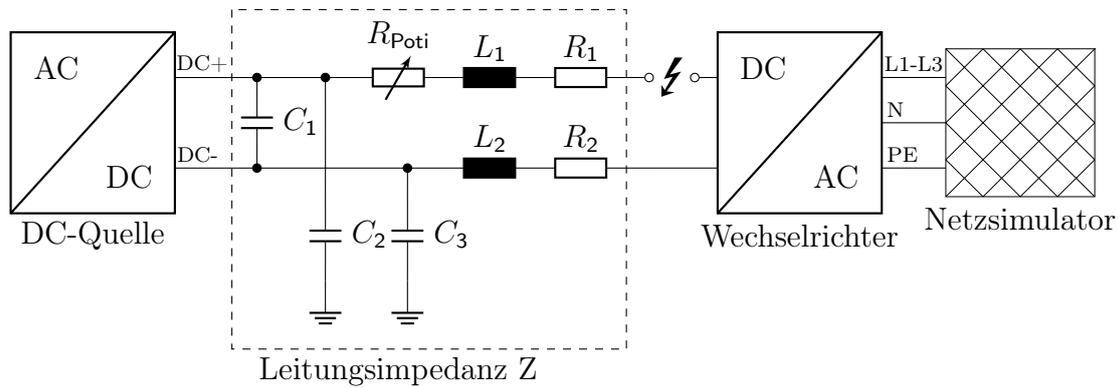


Abbildung 3.4: Schaltplan des PHiL-Teststands

Die Leitungsinduktivität wird durch das Aufwickeln einer eines Solarkabels mit einem Querschnitt von $A = 6 \text{ mm}^2$ erzeugt. Damit stabile Lichtbögen erzeugt werden können, ist ein variabel einstellbarer Leistungswiderstand R_{Poti} in den Strompfad integriert, welcher ebenfalls eine Induktivität aufweist, die den Wert für die Induktivität L_1 erhöht. In **Tabelle 3.1** sind die gemessenen Werte der elektrischen Größen der Leitungen sowie die nach UL 1699B geforderten Werte dargestellt. Diese Werte sind mit einem Impedanzmessgerät bei 1 kHz gemessen worden.

Tabelle 3.1: Leitungsimpedanzen im PHiL-Teststand [22, S. 33f.]

Elektrische Größe	Wert	Wert nach UL 1699B
L_1	58,4 μH	50 μH
L_2	45,1 μH	50 μH
$R_1 + R_{\text{Poti}}$	1,2 Ω	max. 1 Ω
R_2	0,3 Ω	max. 1 Ω
C_1	0,8 nF	150 nF, 10 μF
C_2	0,7 nF	1 nF
C_3	0,41 nF	1 nF

Die unsymmetrischen Werte von L_1 und L_2 sowie R_1 und R_2 sind auf den einstellbaren zusätzlichen Lastwiderstand zurückzuführen. Die Leiter-Leiter-Kapazität C_1 ist wesentlich kleiner als in der Norm gefordert, da im Testaufbau keine zusätzliche Kapazität eingebaut wird. Durch ein fehlendes Entkopplungsnetzwerk ist die Ausgangskapazität der DC-Quelle parallel zu C_1 vorhanden. Die Auswirkung einer Vergrößerung dieser Kapazität auf die untersuchten Stromverläufe wird deshalb untersucht. Der Lichtbogen wird wechselrichternah

auf der, ans positive Potential angeschlossenen Leitung (DC+) seriell erzeugt.

In **Abbildung 3.5** ist der Aufbau des PHIL-Teststands im Labor zu sehen. Neben der DC-Quelle (F), dem Wechselrichter (A) und dem Netzsimulator (D) sind die Leitungsinduktivität $L_{1,2}$ (C), der zusätzliche Widerstand R_{Poti} (G), der Lichtbogengenerator (E) und das Dewesoft-Messsystem (B) zu erkennen, auf welches in Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird.

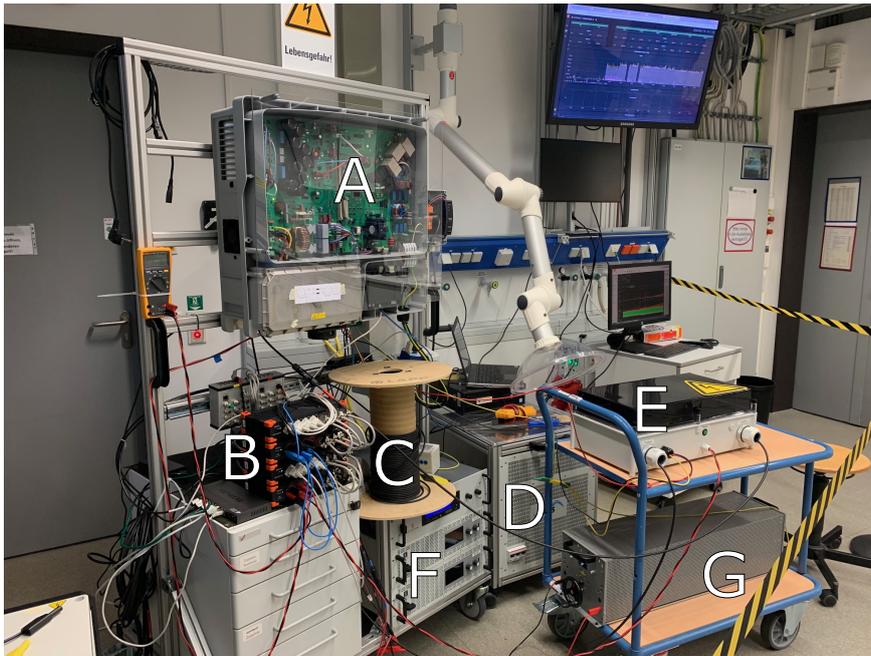


Abbildung 3.5: Aufbau des PHIL-Teststands im Labor (A: Wechselrichter, B: Dewesoft-Messsystem, C: Leitungsinduktivität, D: Netzsimulator, E: Lichtbogengenerator, F: DC-Quelle und G: zusätzlicher Widerstand)

3.3 Messsensorik des Differenzstrommonitors

Der Differenzstrommonitor DCTR B-X Hz 035-PoE der Firma Doepke ist vom Typ B+, also allstromsensitiv. Er erkennt sowohl AC-Differenzströme, als auch pulsierende und glatte DC-Differenzströme. Mit Hilfe von sechs analogen Filtern können verschiedene Frequenzbereiche überwacht werden, welche sich teilweise überlappen. Die Frequenzbereiche umfassen:

- 50 Hz bis 60 Hz,
- <100 Hz,
- 150 Hz bis 180 Hz,
- 100 Hz bis 1000 Hz,
- >1 kHz und

- >10 kHz.

Zudem werden der DC-Differenzstrom und der AC-Differenzstrom bis 100 kHz erfasst. Eine genaue Darstellung der Frequenzgänge findet sich im Anhang im Abschnitt A.1 auf Seite 53. Die Strommessbereiche des RCMs für den AC- und DC-Strom sind:

- AC-Messbereiche: 0,3 A, 1 A, 3 A, 10 A und 30 A und
- DC-Messbereiche: 0,3 A und 3 A.

Dabei beträgt die Messgenauigkeit $\pm 5\%$. Gemessen werden jeweils die Effektivwerte, welche mit einem Modbus-TCP-Protokoll über eine Power over Ethernet (PoE)-Schnittstelle und ein Gateway kontinuierlich in eine Cloud geladen werden. Der Effektivwert des Differenzstroms setzt sich zusammen aus dem Ableitstrom sowie dem durch einen Fehler verursachten Strom, der über den Schutzleiter abgeleitet wird. Dabei gilt folgender Zusammenhang:

$$I_{\text{Diff}} = \sqrt{I_{\text{Ableit}}^2 + I_{\text{Fehler}}^2}$$

Die Auswertung sollte also zwischen Ableit- und Fehlerstrom möglichst gut unterscheiden können. [6, 7]

3.4 Einsatz der Messsensorik im PHIL-Teststand

In den Laboraufbau sind Strom- und Spannungsmessgeräte zur messtechnischen Erfassung des Lichtbogenereignisses eingefügt (siehe **Abbildung 3.6**). Sie werden mit einem SIRIUS Messsystem der Firma Dewesoft mit einer Abtastfrequenz von 1 MHz aufgenommen. In

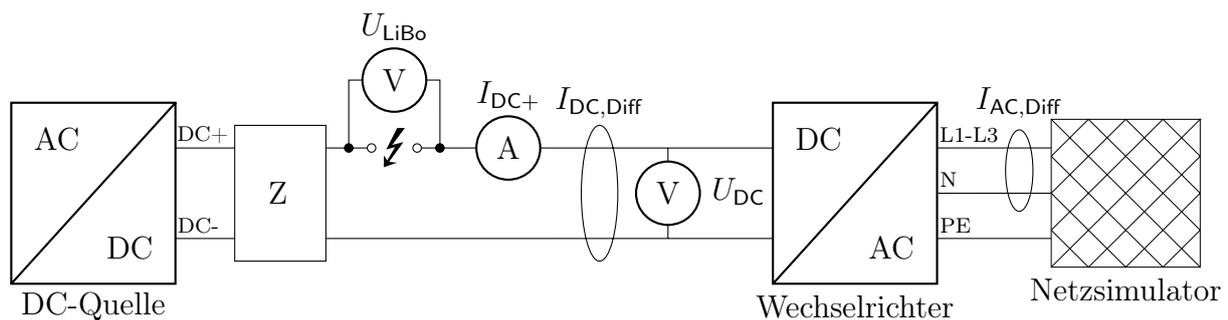


Abbildung 3.6: Messpunkte im PHIL-Teststand

Tabelle 3.2 sind die Messgrößen gelistet.

Die RCMs messen den Differenzstrom zwischen den beiden DC-Leitungen des Wechselrichters $I_{\text{DC,Diff}}$ und auf der AC-Seite den Differenzstrom zwischen den drei Phasen und dem Neu-

Tabelle 3.2: Mit dem Dewesoft-Messsystem gemessene Größen

Bezeichnung	Beschreibung
U_{DC}	DC-Spannung am Wechselrichter
U_{LiBo}	Spannungsfall über dem Lichtbogen
I_{DC+}	Strom durch den Hinleiter, wechselrichternah gemessen
$I_{DC,Diff}$	Differenzstrom der DC-Seite
$I_{AC,Diff}$	Differenzstrom zwischen den Phasen L1-L3 und dem Neutralleiter

tralleiter $I_{AC,Diff}$. Des Weiteren wird der DC-Laststrom mit einem RCM gemessen, wobei der Gleichanteil des Stromes aufgrund der Messbereichsgrenze von $I = 3\text{ A}$ nur für entsprechend geringere Ströme gemessen werden kann. Die drei RCMs sind in unmittelbarer Nähe zu den Stromwandlern I_{DC+} , $I_{DC,Diff}$ und $I_{AC,Diff}$ angebracht. Eine Übersicht über die eingesetzten Messgeräte befindet sich im Anhang in Tabelle A.3.

3.5 Datenanalyse mit Hilfe von Machine Learning Algorithmen

Die Analyse der von den RCMs erfassten Messdaten erfolgt online über Machine Learning Algorithmen. Solche Algorithmen werden häufig angewendet, wenn große Mengen an Daten analysiert werden sollen. Algorithmen werten diese durch Einbeziehen mathematischer Methoden aus. Im Gegensatz zur klassischen Programmierung wird beim Machine Learning das Modell nicht selbst erstellt. Stattdessen wird lediglich eine geeignete Methode und die Eingangsdaten ausgewählt. Die Erstellung des Modells erfolgt dann durch das Anlernen des Algorithmus. Das Trainieren des Algorithmus kann in drei Kategorien unterteilt werden:

- überwachtes Lernen (engl.: *supervised learning*),
- unüberwachtes Lernen (engl.: *unsupervised learning*) und
- verstärkendes Lernen (engl.: *reinforcement learning*).

Beim **supervised learning** sind die Eingangs- und zugehörigen Ausgangsdaten bekannt. Der Algorithmus berechnet anhand der Eingangsdaten, welche in einem Vektor zusammengefasst sind, Ausgangsdaten, die dann vom Nutzer eingeordnet werden. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die reCaptcha-Anwendung, bei der in einer Bilderauswahl diejenigen Bilder angeklickt werden müssen, welche ein vorgegebenes Objekt enthalten. [26, S. 20 ff.]

Im Gegensatz dazu steht das **unsupervised learning**, bei dem die zugehörigen Ausgangs-

daten nicht bekannt sind. Der Algorithmus wird ausschließlich anhand der Eingangsdaten trainiert. Dabei steht häufig die Erkennung von Mustern und Beziehungen im Vordergrund. Diese können durchaus abstrakt und für den Menschen nicht nachvollziehbar sein. Das unsupervised learning wird von der Firma twingz in dem bereits in Kapitel 1.1 erwähnten PV-DiStAnS 2.0-Projekt in zwei verschiedenen Methoden verwendet. Diese werden in den folgenden beiden Unterkapiteln näher erläutert. [26, S. 20 ff.]

Das **reinforcement learning** macht sich das Prinzip von Belohnung und Bestrafung zu nutze. In den, in dieser Arbeit angewandten Machine Learning Algorithmen wird diese Kategorie nicht eingesetzt. [26, S. 20 ff.]

Im Folgenden werden die von der Firma Twingz entwickelten Algorithmen „Mustererkennung“ und „Zustandsvorhersage“ kurz beschrieben. Die Entwicklung dieser Algorithmen ist nicht Teil der Arbeit. Zum Verständnis der von den Algorithmen berechneten Ergebnisse ist deren Wirkungsweise jedoch essentiell.

3.5.1 Mustererkennung

Die Mustererkennung eignet sich für Daten die sich regelmäßig wiederholen, wie die Differenzstromcharakteristik einer Fabrik, welche sich werktäglich ähnelt und u. A. durch die Frequenzumrichter der elektrischen Maschinen beeinflusst wird. Dabei wird für einen bestimmten Zeitraum eines Tages das entsprechende Muster des betrachteten Signals erfasst und mit den Mustern des gleichen Zeitraums an anderen Tagen verglichen. Kommt dieses Muster häufig vor, kann es als Normalzustand betrachtet werden. Eine Anomalie hingegen wird erkannt, wenn dieses Muster nur selten auftritt. Dies wird in Form eines Anomaliefaktors (engl.: *anomaly factor*) angegeben, welcher Werte zwischen 0 (keine Anomalie) und 1 (hohe Anomalie) annehmen kann. Die Aussagekraft des Anomaliefaktors hängt stark davon ab, wie ähnlich sich die Muster sind. Sind die Muster insgesamt sehr verschieden, fällt eine Bewertung eines abweichenden Musters schwieriger. Dieser Umstand ist in einem separaten Wert für die Zuverlässigkeit des Anomaliefaktors berücksichtigt (engl.: *reliability score*). Ein dritter Faktor, der Gesundheitswert (engl.: *health score*), wird für die Bewertung des Trainingszustandes des Mustererkennungs-Algorithmus verwendet. Der Zuverlässigkeits- und der Gesundheitswert können ebenfalls Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei ein hoher Wert für eine hohe Zuverlässigkeit der Anomalieerkennung bzw. ein gut trainiertes Modell steht. [2, S. 4]

3.5.2 Zustandsvorhersage

Das Ziel des Zustandsvorhersage-Algorithmus ist, neben einer weiteren Form der Anomalieerkennung, die Identifikation und Vorhersage von bestimmten Zuständen. Diese werden mit Hilfe des Autoencoders berechnet.

In der Literatur wird der Autoencoder häufig mit Hilfe der Bildkomprimierung beschrieben. Dabei bestehen die Eingangsdaten aus den Bildinformationen, wie Größe, Farbe und Helligkeit. Diese werden dann über eine oder mehrere Schichten encodiert. Diese Schichten werden Convolutional Layer genannt. Dabei werden die verschiedenen Eingangsdaten über mathematische Gewichtungen und Funktionen miteinander verknüpft, sodass die Daten von Schicht zu Schicht immer weiter komprimiert und in ihrer Dimension reduziert werden. Soll die originale Bilddatei wieder hergestellt werden, wird der umgekehrte Weg gegangen. Dabei decodieren die Convolutional Layer die komprimierten Daten, sodass am Ausgang die rekonstruierten Eingangsdaten, also das rekonstruierte Bild, wieder herauskommt. Die schematische Anordnung dieser Schichten ist in **Abbildung 3.7** dargestellt.

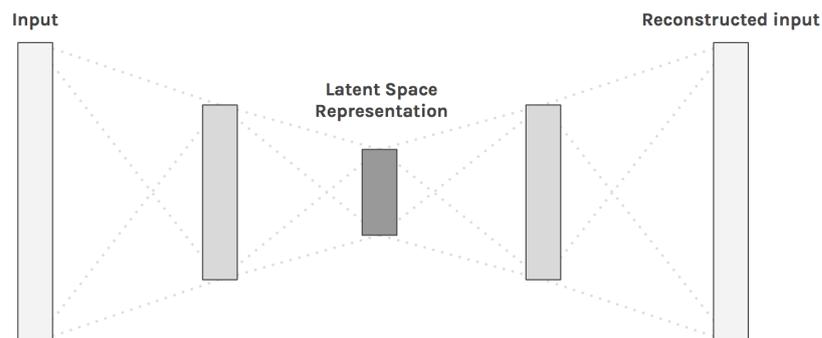


Abbildung 3.7: Schematische Anordnung der Schichten des Autoencoders [1]

In der Mitte der Abbildung 3.7 befindet sich der Flaschenhals des Autoencoders: Der latente Raum (engl.: *latent space*). In diesem Raum sind die Eingangsdaten maximal kompakt zusammengefasst. Diese komprimierten Punkte sind jedoch zunächst nicht sinnvoll im Raum angeordnet. Gibt es beispielsweise ein Bild von einem Schäferhund und einem Dackel, aus denen nun ein Bild aus dem latenten Raum heraus rekonstruiert werden soll, welches einen Schäferhund-Dackel zeigen soll, ist die naheliegende Methode, dafür einen Punkt im latenten Raum zu wählen, welcher zwischen den Punkten für das Schäferhund- und das Dackelbild liegt. Dafür muss der latente Raum jedoch aufgeräumt werden. Punkte die ähnlich sind, sollen näher beieinander liegen als Punkte, die sich weniger ähnlich sind. Um möglichst jeden Punkt im Raum zuordnen zu können, existiert mit dem Variational Autoencoder eine Erweiterung des Autoencoders. Dieser nimmt die abstrakten Punkte im latenten Raum als normalverteilt

an, welche einen Mittelwert und eine Standardabweichung aufweisen. Jedem Punkt im Raum ist so ein Zustand mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zuordenbar. Dies ermöglicht es, aus dem latenten Raum zufällige, neue Daten für Zustände zu generieren. Andersherum kann den Eingangsdaten ein Zustand zugeordnet werden, welcher noch abstrakt ist. Um weitere Informationen über die Zustände herauszufinden, wie die Häufigkeit eines Zustandes, wird eine Zuordnung in Cluster mit dem sogenannten k-Means-Algorithmus durchgeführt, der hier nicht näher erläutert werden soll.

Die Encodierung und Decodierung der Daten ist verlustbehaftet. Dieser Verlust wird durch den Vergleich aus Eingangs- und Ausgangsdaten im Rekonstruktionsfehler (engl.: *reconstruction error*) dargestellt. Berechnet werden kann dieser Fehler beispielsweise mit der Methode der Summe der kleinsten Fehlerquadrate. Das Training des Modells erfolgt, indem die Eingangsdaten auch an den Ausgang übergeben werden. Das Modell optimiert sich dann solange, bis ein ausreichend niedriger Rekonstruktionsfehler erreicht ist. Ist das Modell trainiert, deutet ein hoher Rekonstruktionsfehler auf eine Anomalie hin, da ein solcher Datensatz bisher nicht vom Modell erfasst worden ist. Dies ist in **Abbildung 3.8** für den Trainings- (a) und den trainierten Zustand (b) schematisch dargestellt. Nachdem die Eingangsdaten, die jeweils etwa eine Minute darstellen, bereinigt worden sind, werden sie als Eingang in den Encoder, wie auch in den Decoder gegeben und ein mittlerer Rekonstruktionsfehler berechnet. Dieser wird im trainierten Modell als relativer Rekonstruktionsfehler, bezogen auf den mittleren Rekonstruktionsfehler, aus dem Training ausgegeben. [2, 17, 26]

In der Abbildung 3.8 ist für den Trainingsprozess in a die Clusterbildung des latenten Raums mit dem k-Means-Algorithmus zu erkennen. Die daraus hervorgehenden Cluster werden anschließend in leicht darstellbare Zahlenwerte transformiert. Das trainierte Modell nutzt dann diese Klassifizierung zur Vorhersage des aktuellen Zustandes. [2]

3.6 Untersuchung von ausgewählten Einflussfaktoren auf die Lichtbogencharakteristik

An der DC-Quelle werden zunächst konstante Spannungs- und Stromwerte eingestellt und der Wechselrichter wird im Konstantspannungsmodus betrieben. Der verwendete Wechselrichter verfügt über ein MPP-Tracking sowie ein Verschattungsmanagement, welches sicherstellt, dass der Wechselrichter stets die maximal verfügbare Leistung des PV-Generators abrufen. Da dabei jedoch kurzfristig die Leistung der PV-Anlage variiert wird, würde es die Ergebnisse der Versuche beeinträchtigen.

Im PHiL-Teststand werden die Auswirkungen von acht Einflussfaktoren auf die AC- und

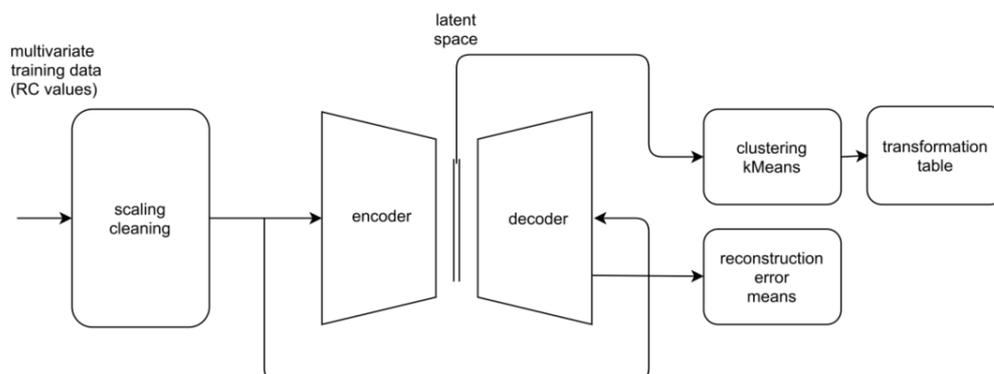
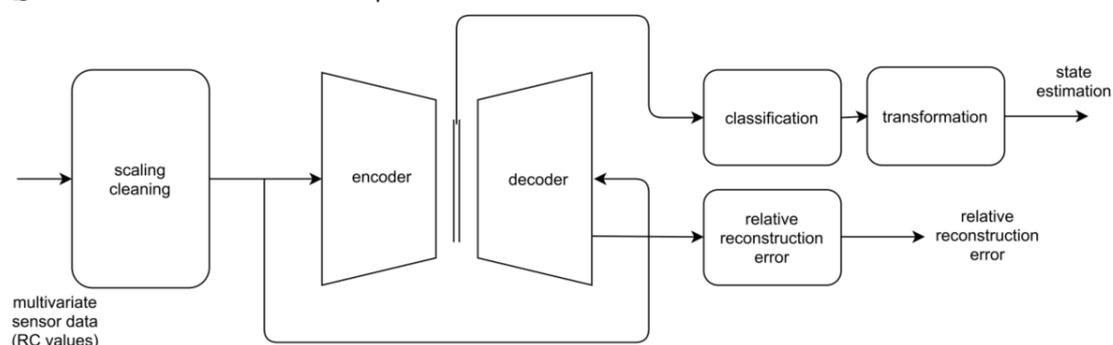
a State Estimation **Training** Pipeline**b** State Estimation **Prediction** Pipeline

Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Datenverarbeitungsprozesses des State-Estimator-Modells: a) Prinzipielle Datenverarbeitung während des Trainings, b) Prinzipielle Datenverarbeitung im trainierten Zustand [2]

DC-seitigen Differenzstromcharakteristiken untersucht. Diese sind in **Tabelle 3.3** aufgelistet.

In **Tabelle 3.4** sind für die Versuchsnummern die jeweils geänderten Werte dargestellt. Dabei wird jedes Szenario bei ca. $l = 1$ mm Elektrodenabstand, $I_{DC+} = 7,5$ A Lichtbogenstrom und $U_{DC} = 400$ V Konstantspannung am Wechselrichter jeweils drei Mal wiederholt, wobei in Versuch 2 und 3 der Lichtbogenstrom, bzw. die DC-Spannung entsprechend anzupassen ist. Der Versuch 1 wird durchgeführt, um festzustellen, ob die deutliche Abweichung vom Normwert von C_1 in **Abbildung 3.4** signifikant für die Ableitstromcharakteristik ist (siehe **Tabelle 3.1**). Diese Teilversuche sind bei $I_{DC+} = 5$ A durchgeführt worden. Die Herstellung von einem Millimeter Abstand zwischen den Elektroden wird manuell durch die Handkurbel am Lichtbogengenerator erreicht. Die Dauer, bis dieser Abstand eingestellt ist, variiert und soll deshalb nicht in die Auswertung der Ergebnisse einfließen. Deshalb wird das Lichtbogenergebnis erst etwa $t = 250$ ms nach der Zündung betrachtet.

Tabelle 3.3: Beschreibung der analysierten Einflussfaktoren nach Versuchsnummer

Versuch	Beschreibung
V1	Kapazität zwischen Hin- und Rückleiter C_{LL}
V2	Lichtbogenstrom I_{DC+}
V3	DC-Spannung U_{DC}
V4	Kapazität zwischen dem Pluspol des PV-Generators und dem Erdpotential $C_{G+,E}$
V5	Kapazität zwischen dem Minuspol des PV-Generators und dem Erdpotential $C_{G-,E}$
V6	Leitungsimpedanzen im DC-Leistungspfad $L_{1,2}$
V7	DC-seitig verbaute Y-Kondensatoren C_Y im Wechselrichter
V8	Platzierung des zusätzlichen Widerstands R_{Poti} in der DC+, bzw. in der DC- Leitung

Tabelle 3.4: Versuche am PHiL-Teststand

Versuch	a	b	c	d
V1	$C_{LL} = 0 \mu\text{F}$	$C_{LL} = 22 \mu\text{F}$	-	-
V2	$I_{DC+} = 5 \text{ A}$	$I_{DC+} = 7,5 \text{ A}$	$I_{DC+} = 10 \text{ A}$	$I_{DC+} = 15 \text{ A}$
V3	$U_{DC} = 400 \text{ V}$	$U_{DC} = 790 \text{ V}$	-	-
V4	$C_{G+,E} = 0 \text{ nF}$	$C_{G+,E} = 0,11 \text{ nF}$	$C_{G+,E} = 1 \text{ nF}$	$C_{G+,E} = 10 \text{ nF}$
V5	$C_{G+,E} = 1 \text{ nF}$	$C_{G-,E} = 1 \text{ nF}$	-	-
V6	$L_{1,2} - 18,8 \mu\text{H}$	$L_{1,2} + 0 \mu\text{H}$	$L_{1,2} + 26 \mu\text{H}$	-
V7	$C_Y = 0 \text{ nF}$	$C_Y = 1 \text{ nF}$	-	-
V8	$R_{Poti} +$	$R_{Poti} -$	-	-

3.7 Untersuchung der Detektionsfähigkeit des betrachteten Analysesystems

Zum Training und der Bewertung der Machine Learning Algorithmen werden mittels Standard Commands for Programmable Instruments (SCPI)-Befehlen die gemessenen Strom- und Spannungswerte eines Wechselrichters in einer PV-Anlage an die DC-Quelle übergeben (siehe A.3). Die DC-Leistungsdaten stammen vom 06.10., 07.10. und 09.10.22 von einem Wechselrichter, an dem im PV-DiStAnS 2.0-Projekt Langzeit-Feldmessungen durchgeführt

werden und liegen in fünfminütiger Auflösung vor. Diese Strom- und Spannungswerte sind für den Teststand auf einen maximalen Strom von $I_{DC+} = 15 \text{ A}$ und eine maximale Spannung von $U_{DC} = 790 \text{ V}$ skaliert und zeitlich auf die Hälfte der Zeit komprimiert, sodass alle 2,5 s ein neuer Wert an die DC-Quelle übergeben wird. So kann das Einstrahlungsprofil innerhalb eines Arbeitstages simuliert werden. Als Orientierung sind dabei die Angaben der UL 1699B herangezogen worden, welche für den minimalen Lichtbogenstrom maximal $I_{DC+} = 14 \text{ V}$ und für die Leerlaufspannung maximal $U_{DC} = 790 \text{ V}$ vorgegeben. In **Abbildung 3.9** sind diese Verläufe für drei verschiedene Tage abgebildet, wo jedoch die zeitliche Komprimierung nicht berücksichtigt ist. Der Strom ist dabei in rot und die Spannung in blau dargestellt.

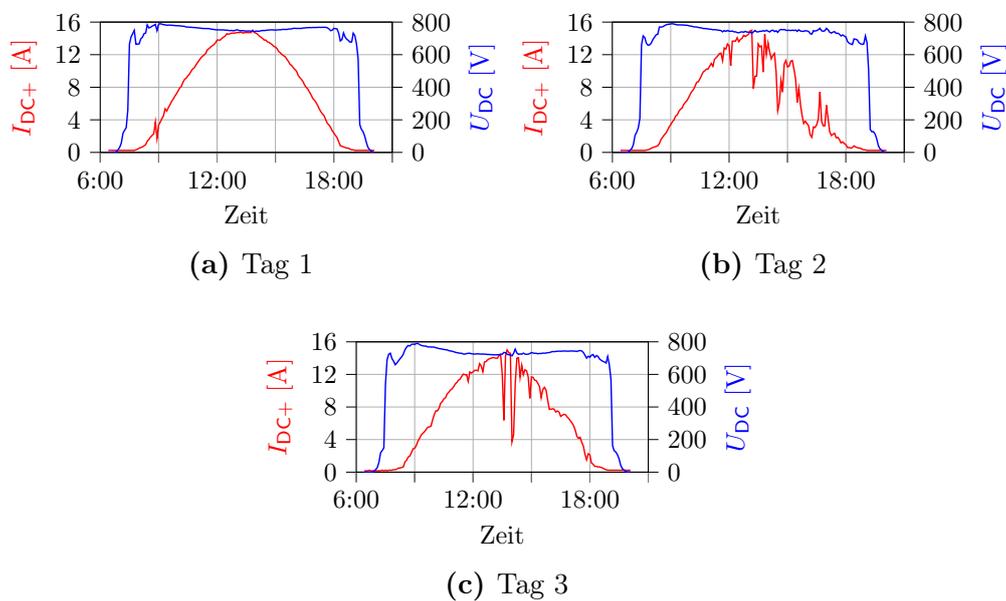


Abbildung 3.9: Einstrahlungsprofile für den PHiL-Teststand

Der zeitliche Verlauf des Stroms am 06.10.22 (Abbildung 3.9a) deutet auf einen sonnigen Tag hin, da nur wenige Stromeinbrüche zu erkennen sind. An Tag zwei und drei (Abbildungen 3.9b und 3.9c) sind hingegen Einbrüche im Stromverlauf erkennbar, welche z. B. durch Bewölkung hervorgerufen sein können.

4 Auswirkung der untersuchten Faktoren auf die Lichtbogencharakteristik

Für die Bewertung der im Labor aufgezeichneten Messdaten, wird im Folgenden die Methode des Leistungsdichtespektrums verwendet. Diese Methode stellt die Leistung des jeweils betrachteten Stroms im Frequenzspektrum dar. Die Berechnung des LDS erfolgt über das Welch-Verfahren unter Nutzung des Python-Pakets `SciPy`. Die darin enthaltene Funktion `signal.welch` unterteilt das zeitabhängige, gemessene Signal in Segmente, für die mit einer FFT das Spektrum berechnet wird. [19]

Da das gemessene Signal endlich ist, wird dieses periodisch erweitert. Es kann dabei zu Fehlern kommen, wenn die Länge der Signalsequenz, die betrachtet wird, nicht einem Vielfachen der Periodendauer entspricht, was bei unbekanntenen Signalen oder bedingt durch Rauscheffekte nur schwer zu vermeiden ist. Die Start- und Endwerte sind nicht gleich, sodass es zu einer Unstetigkeit am Ende des betrachteten Zeitfensters kommt. Diese Unstetigkeit verursacht Projektionen auf das gesamte Spektrum. Es kommt zu einem „Verlaufen“ des Frequenzspektrums (engl.: *leakage*). Verringert werden kann der Fehler durch die Multiplikation mit einer Fensterfunktion.

Eine Fensterfunktion ist eine gewichtete Funktion, mit der das Spektrum des Signals gefaltet wird, welche die Unstetigkeit am Rande des betrachteten Signalfensters durch die periodische Fortsetzung reduzieren sollen. Häufig verwendet wird das Hann-Fenster, welches in **Abbildung 4.1 auf der nächsten Seite** zu sehen ist. Die Zeitfunktion entspricht der \cos^2 -Funktion, welche im LDS eine breitbandige Verstärkung der Mittenfrequenz und stärker gedämpfte Nebenkeulen hervorruft. Dies führt zu einer geringeren Frequenzselektivität und einer Verringerung des Leakage-Effekts. Bei der `signal.welch`-Funktion wird das Hann-Fenster standardmäßig verwendet. [9, 19, 11, S. 249 ff.]

Um zu verhindern, dass bei der Verwendung von Fensterfunktionen die Signalinformationen an den Rändern minimiert werden, können die Signalfenster überlappend gewählt werden.

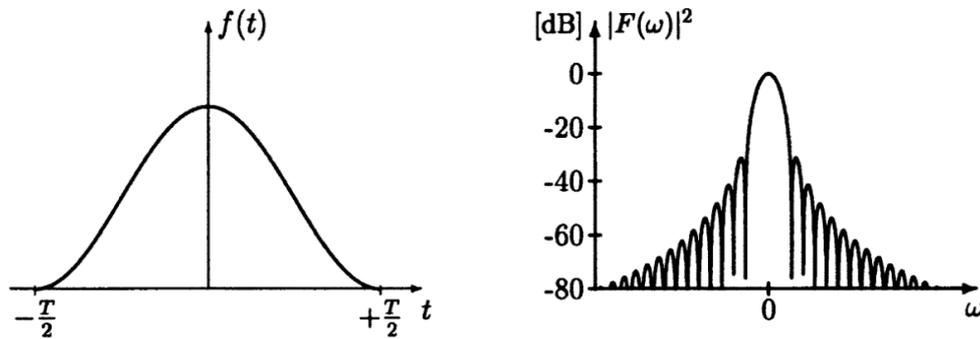


Abbildung 4.1: Das Hann-Fenster in der zeitlichen (links) und spektralen Darstellung (rechts) [4, S. 90]

Der Default-Wert der Überlappung beträgt bei dem Welch-Verfahren 50%. Die Ergebnisse der einzelnen Sequenzen werden anschließend gemittelt. [24, 19]

4.1 Verarbeitung der Messwerte

Gegenübergestellt werden jeweils für einen Zeitraum von drei Sekunden die Zeitreihe mit dem Lichtbogenereignis und die Zeitreihe vor dem Lichtbogenereignis, ohne Berücksichtigung des Zündvorgangs. Im zeitlichen Verlauf ist das Lichtbogenereignis nicht vom normalen Betrieb unterscheidbar. Zur anschaulicheren Darstellung werden die Zeitreihen mit Hilfe der Welch-Methode in LDS-Verläufe in Abhängigkeit von der Frequenz umgerechnet. Dabei werden jeweils 2048 Werte als Segment zusammengefasst. Daraus ergibt sich bei der verwendeten Abtastrate von $f = 1$ MHz alle 488,3 Hz ein Datenpunkt im LDS.

In **Abbildung 4.2** ist das LDS für den Versuch 2b während des normalen Betriebs (rot) und während des Lichtbogenereignisses (blau) im Laststrom I_{DC+} (Abbildung 4.2a), im DC-Differenzstrom $I_{DC,Diff}$ (Abbildung 4.2b) und im AC-Differenzstrom $I_{AC,Diff}$ (Abbildung 4.2c) zu sehen. Die Effektivwerte der gemessenen Ströme sind $I_{DC+} = 7,50$ A, $I_{DC,Diff} = 23$ mA und $I_{AC,Diff} = 34$ mA. Die Amplitude des LDS während des normalen Betriebs und während des Lichtbogenereignisses ist im Laststrom höher als in den Differenzströmen auf der AC- bzw. DC-Seite. Zu erkennen sind weiterhin Resonanzstellen im Aufbau. Im Laststrom sind bei $f = 16$ kHz sowie dessen harmonischen Oberwellen, Peaks zu erkennen, die auf eine Taktfrequenz des Wechselrichters von ebendiesen 16 kHz und entsprechend ausgelegte Filter schließen lassen. Eine Abweichung des LDS während des Lichtbogens lässt sich vor allem im Laststrom, aber auch im DC-Differenzstrom bei 16 kHz erkennen. Die Verläufe der LDS der Differenzströme im normalen Betrieb und während des Lichtbogenereignisses sind ähnlich. Um die Änderung des LDS während des Lichtbogenereignisses besser sichtbar zu machen,

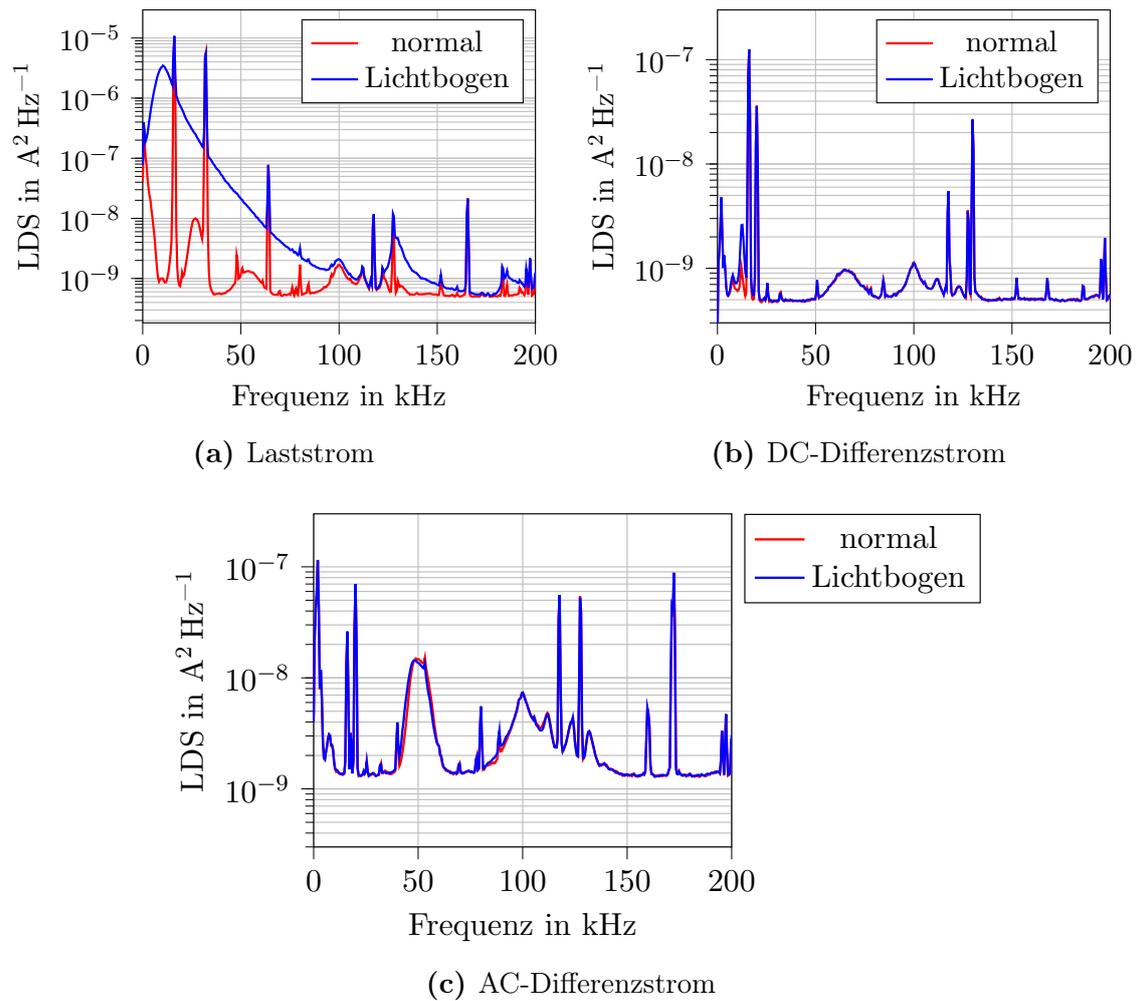


Abbildung 4.2: LDS für den Versuch 2b bei $I_{\text{DC}+} = 7,5 \text{ A}$ für den normalen Betrieb (rot) und das Lichtbogenereignis (rot) der jeweiligen Ströme

sind in den folgenden Unterkapiteln die LDS des Lichtbogenereignisses $\text{LDS}_{\text{Lichtbogen}}$ für den Laststrom, für den DC-Differenzstrom und für den AC-Differenzstrom normiert auf das jeweilige LDS des normalen Betriebs $\text{LDS}_{\text{normal}}$ dargestellt (siehe **Gleichung 4.1**).

$$\text{LDS}_{\text{Norm}} = \frac{\text{LDS}_{\text{Lichtbogen}}}{\text{LDS}_{\text{normal}}} \quad (4.1)$$

4.2 Versuch 1: LDS für unterschiedliche Leiter-Leiter-Kapazitäten

In **Abbildung 4.3** sind für den DC-Laststrom (4.3a), den DC-Differenzstrom (4.3b) und den AC-Differenzstrom (4.3c) die normierten LDS für den Versuch 1 dargestellt. Dabei ist zwischen Plus- und Minuspol der DC-Quelle eine zusätzliche Kapazität von $C_{\text{LL}} = 22 \mu\text{F}$ (blau) eingebaut. Der Laststrom zeigt eine über tausendfache Erhöhung des LDSs für niedrige Frequenzen. Diese Vergrößerung nimmt bei höheren Frequenzen exponentiell ab, wobei das normierte LDS für Frequenzen $f > 100 \text{ kHz}$ gegen den Wert eins konjugiert. Bei $f = 129 \text{ kHz}$ ist erneut eine Erhöhung um den Faktor elf sichtbar sowie eine Verdopplung bei $f = 185 \text{ kHz}$. Im DC-Differenzstrom ist eine Erhöhung des normierten LDSs um den Faktor drei bei $f = 16 \text{ kHz}$ zu sehen. Im AC-Differenzstrom sind etwa bei $f = 35 \text{ kHz}$ bis 55 kHz und $f = 170 \text{ kHz}$ Abweichungen bis etwa 30% erkennbar. Die Graphen für die eingebaute zusätzliche Kapazität und für die nicht eingebaute Kapazität haben einen ähnlichen Verlauf. Die Abweichung bei $f = 35 \text{ kHz}$ bis 55 kHz befindet sich im Gegensatz zu den anderen Abweichungen in einem Frequenzbereich. In **Abbildung 4.4** sind deshalb die LDS der drei Versuchswiederholungen dargestellt. Dieser Abbildung kann entnommen werden, dass bei $f = 170 \text{ kHz}$ eine feste Resonanzstelle ist, die während des Lichtbogenereignisses eine Verstärkung des Stroms bewirkt. Die Messreihe 1 (rot) weist bei Frequenzen bis 110 kHz einen deutlich anderen Verlauf als Messreihe 2 (blau) und Messreihe 3 (grün) auf. Dies lässt auf eine stochastische Charakteristik schließen.

4.3 Versuch 2: LDS für unterschiedliche Lichtbogenströme

Für Versuch 2 sind die normierten LDS für Lichtbogenströme von $I_{\text{DC}+} = 5 \text{ A}$ (rot), $I_{\text{DC}+} = 7,5 \text{ A}$ (blau), $I_{\text{DC}+} = 10 \text{ A}$ (grün) und $I_{\text{DC}+} = 15 \text{ A}$ (orange) in **Abbildung 4.5** dargestellt. Die LDS -Änderung im Laststrom in **Abbildung 4.5a** weist einen ähnlichen Verlauf wie

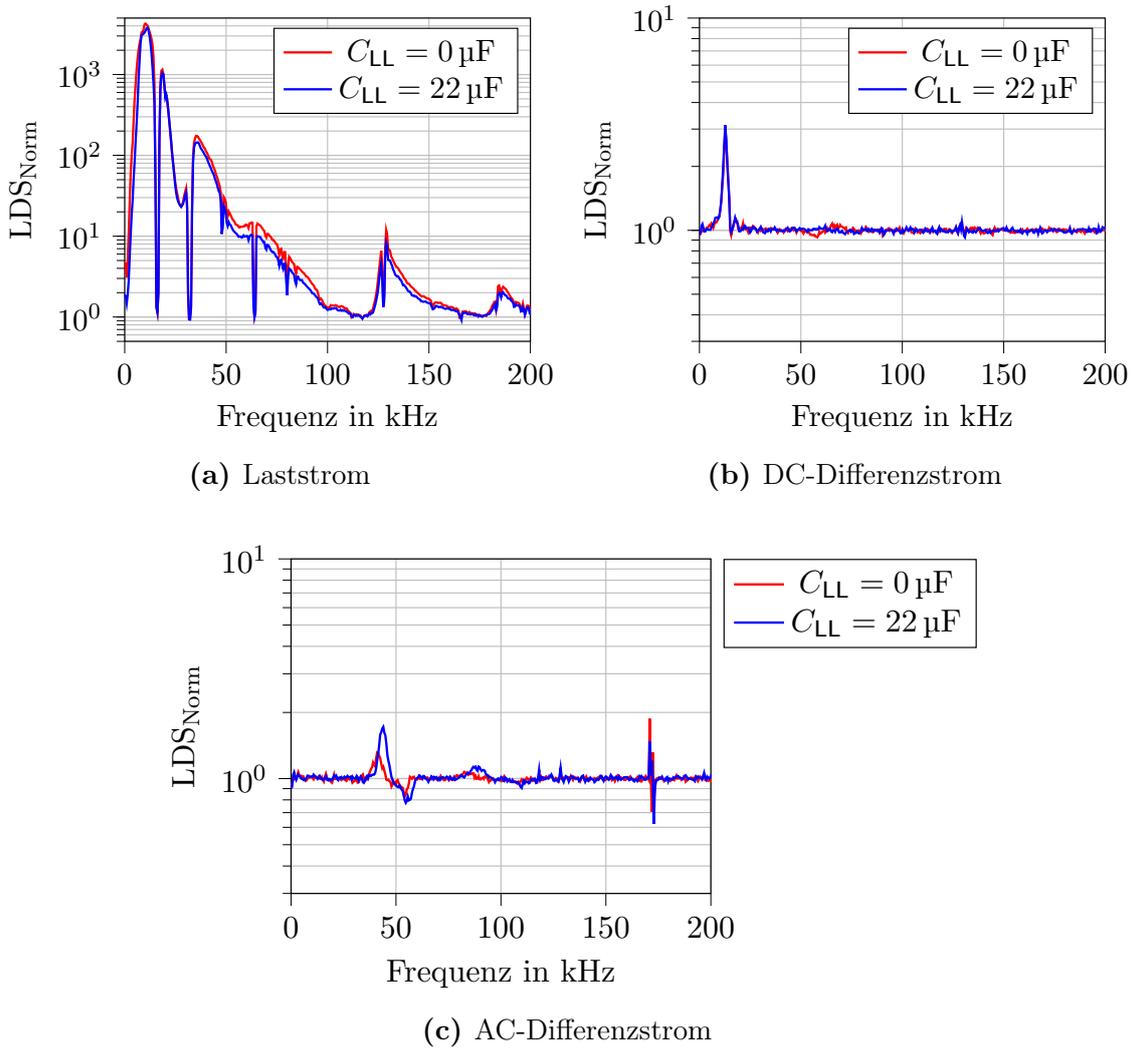


Abbildung 4.3: Normierte LDS für unterschiedliche Leiter-Leiter-Kapazitäten C_{LL}

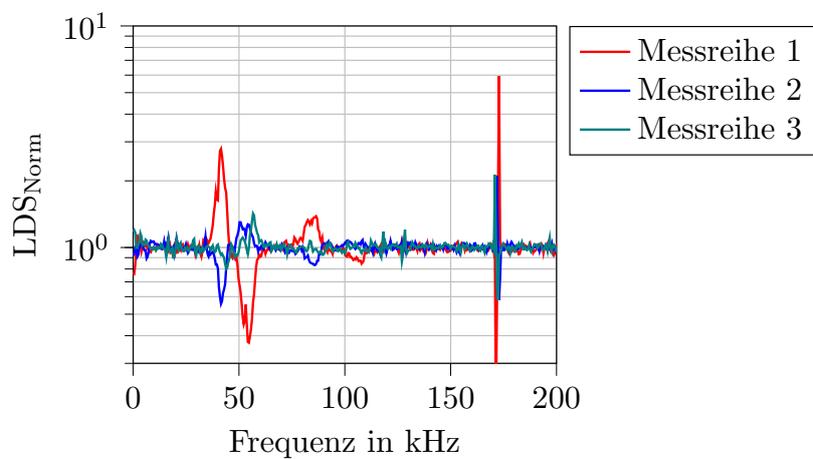


Abbildung 4.4: Normierte LDS des AC-Differenzstroms der drei Messreihen für Versuch 1a

in Abbildung 4.3a auf. Bei größeren Strömen ist die Veränderung des LDSs insgesamt jedoch geringer. Diese Verringerung der Abweichung ist auch im LDS des DC- und des AC-Differenzstroms zu sehen (Abbildungen 4.5b und 4.5c). Bei $f = 16$ kHz ist für $I_{DC+} = 5$ A eine Verdreifachung und für $I_{DC+} = 7,5$ A eine Verdopplung der LDSs-Änderung im DC-Differenzstrom zu beobachten. Für größere Ströme ist diese Veränderung geringer bis nicht mehr sichtbar. Im AC-Differenzstrom ist im Bereich zwischen $f = 35$ kHz bis 70 kHz eine rauschartige Veränderung ähnlich wie in Versuch 1 in Abbildung 4.3c zu sehen. Bei $f = 170$ kHz ist ebenfalls eine Stromerhöhung auszumachen.

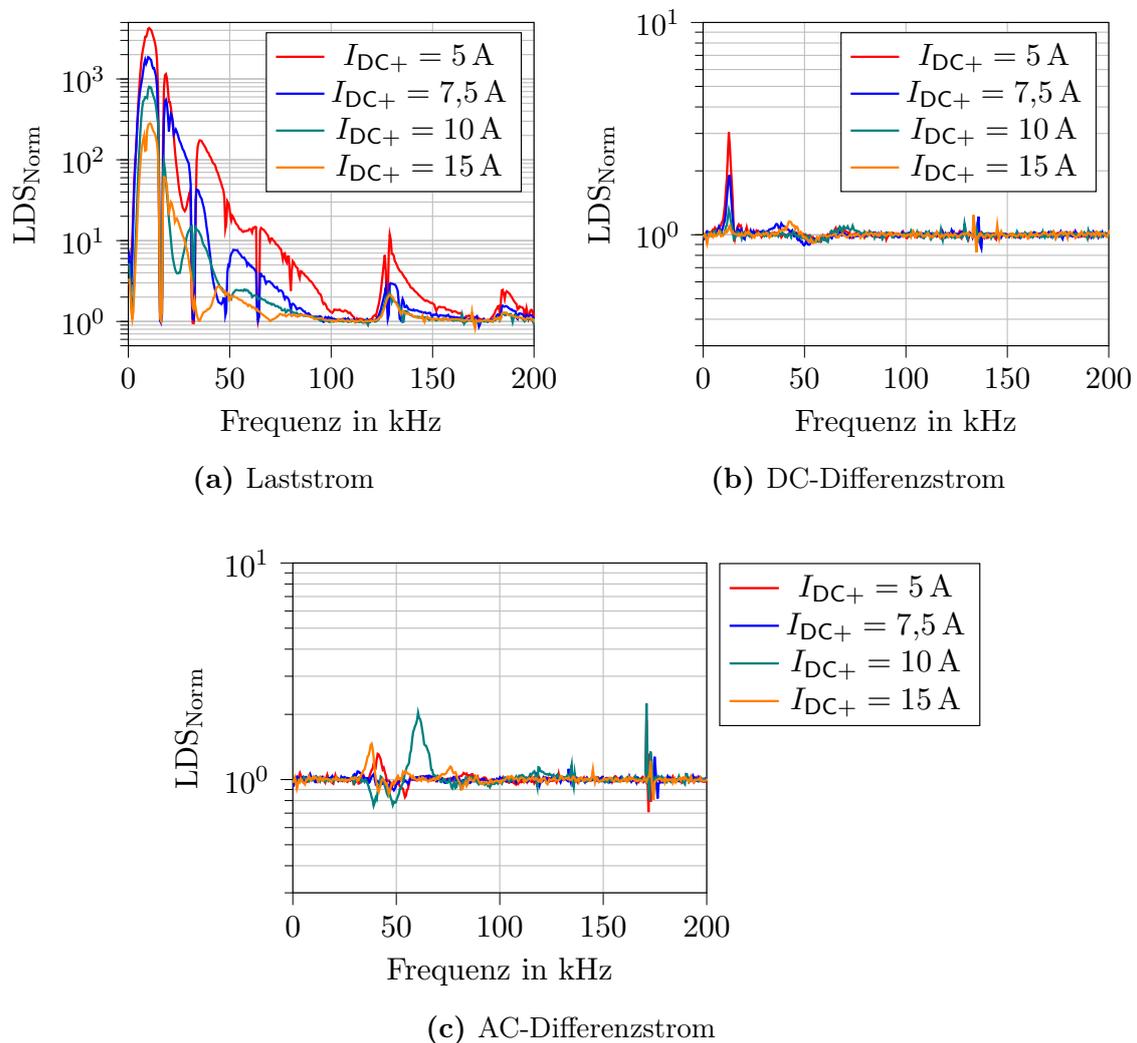


Abbildung 4.5: Normierte LDS für unterschiedliche Lichtbogenströme I_{DC+}

4.4 Versuch 3: LDS für unterschiedliche DC-Spannungen

In **Abbildung 4.6** sind die LDSs-Änderungen für eine DC-Spannung am Wechselrichter von $U_{DC} = 400\text{ V}$ (rot) bzw. $U_{DC} = 790\text{ V}$ (blau) abgebildet.

Das normierte LDS für $U_{DC} = 400\text{ V}$ ist dasselbe wie in **Abbildung 4.5** für $I_{DC+} = 7,5\text{ A}$. Im Vergleich dazu ist die Änderung des LDS für $U_{DC} = 790\text{ V}$ im Laststrom (**Abbildung 4.6a**) geringer. Im DC-Differenzstrom in **Abbildung 4.6b** ist bei $f = 16\text{ kHz}$ eine weniger ausgeprägte Veränderung sichtbar. Im AC-Differenzstrom sind im Bereich um $f = 50\text{ kHz}$ und bei $f = 175\text{ kHz}$ für $U_{DC} = 400\text{ V}$ bzw. $f = 171\text{ kHz}$ für $U_{DC} = 790\text{ V}$ Veränderungen im normierten LDS des Differenzstroms sichtbar.

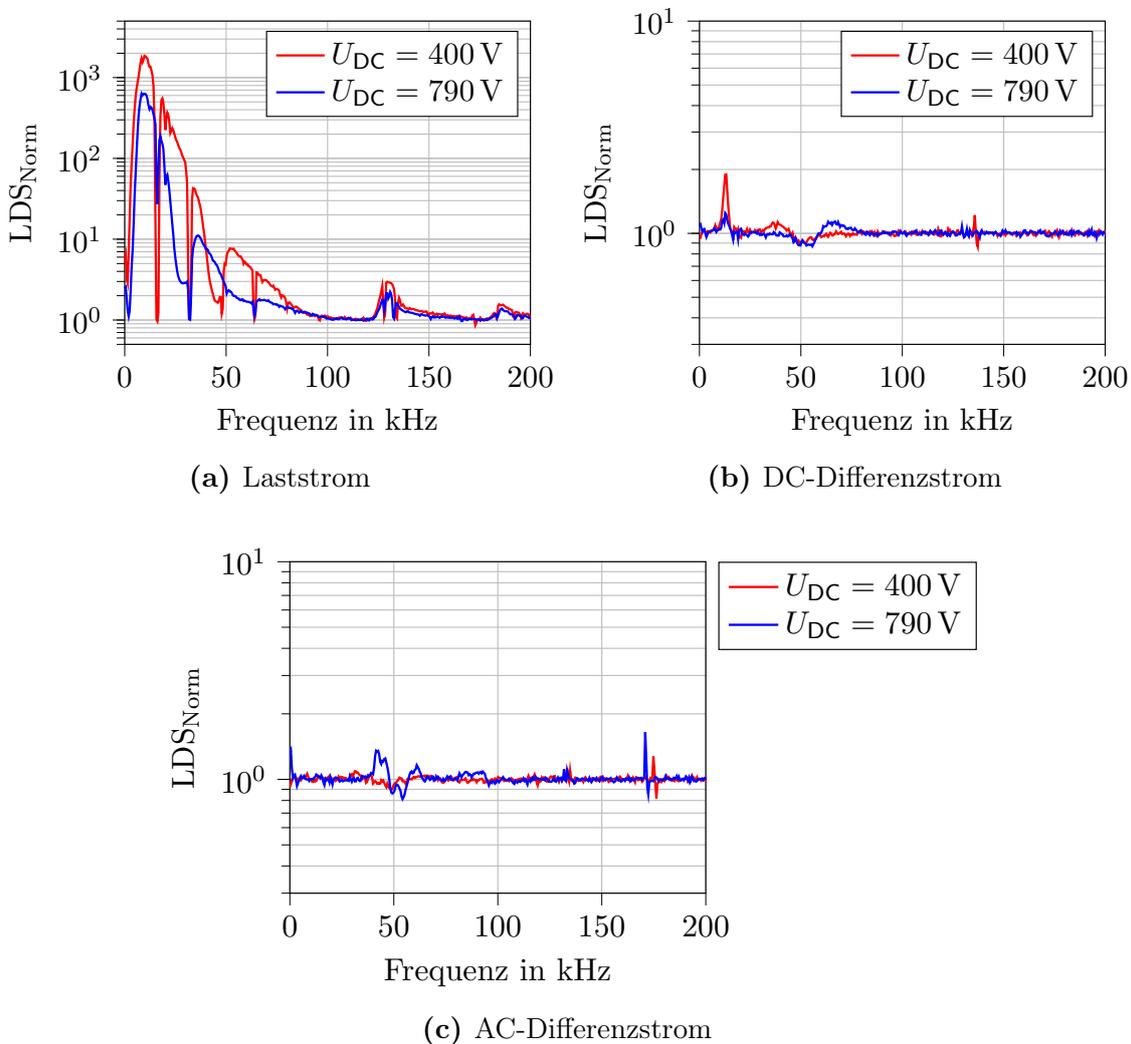


Abbildung 4.6: Normierte LDS für unterschiedliche DC-Spannungen U_{DC}

4.5 Versuch 4: LDS für unterschiedliche Ableitkapazitäten an der DC-Quelle

Die Ergebnisse von Versuch 4, bei dem eine veränderbare Kapazität C_{G+E} zwischen dem Pluspol der DC-Quelle und dem Erdpotential angeschlossen worden ist, sind in **Abbildung 4.7 auf der nächsten Seite** dargestellt. Der Wert für C_{G+E} beträgt dabei $C_{G+E} = 0$ nF (rot), $C_{G+E} = 0,11$ nF (blau), $C_{G+E} = 1$ nF (grün) bzw. $C_{G+E} = 10$ nF (orange).

Die Messwerte für $C_{G+E} = 0$ nF entsprechen denen aus Versuch 2 für $I_{DC+} = 7,5$ A. Die Änderung des normierten LDSs im Laststrom in **Abbildung 4.7a** beträgt beim Hinzufügen von C_{G+E} das 500- bis 700-fache, während er ohne die zusätzliche Kapazität beim 2000-fachen liegt. Für $C_{G+E} = 0,11$ nF ist die Änderung des normierten LDSs ähnlich zu den Spektren für $C_{G+E} = 1$ nF bzw. $C_{G+E} = 10$ nF. Im DC-Differenzstrom ist der Peak bei $f = 16$ kHz weniger ausgeprägt, wenn eine zusätzliche Kapazität zugeschaltet wird. Im AC-Differenzstrom ist im Frequenzbereich zwischen $f = 30$ kHz bis 80 kHz eine Änderung sichtbar sowie bei $f = 170$ kHz.

4.6 Versuch 5: LDS für verschiedene Orte der Ableitkapazität an der DC-Quelle

In **Abbildung 4.8** sind die LDS-Änderungen für einen Vergleich des Ortes einer Kapazität $C_{GE} = 1$ nF dargestellt (Versuch 5). Der Verlauf des normierten LDS für $C_{G+E} = 1$ nF entspricht dem Verlauf aus Versuch 4. Der rote Graph zeigt jeweils die Spektrumsänderung, wenn die Kapazität C_{G+E} zwischen dem Pluspol der DC-Quelle und dem Erdpotential verschaltet ist und der blaue Graph stellt die Spektrumsänderung bei einer Kapazität C_{G-E} zwischen dem Minuspol der DC-Quelle und dem Erdpotential dar.

Im Laststrom (**Abbildung 4.8a**), im DC-Differenzstrom (**Abbildung 4.8b**) und im AC-Differenzstrom (**Abbildung 4.8c**) ist die Änderung des LDS während des Lichtbogenereignisses für C_{G-E} jeweils größer.

4.7 Versuch 6: LDS für unterschiedliche Leitungsinduktivitäten

Die Auswirkung der Änderung der Leitungsinduktivität $L_{1,2}$ der Leiter DC+ und DC- auf das normierte LDS in Versuch 6 ist in **Abbildung 4.9 auf Seite 32** zu sehen. Dabei

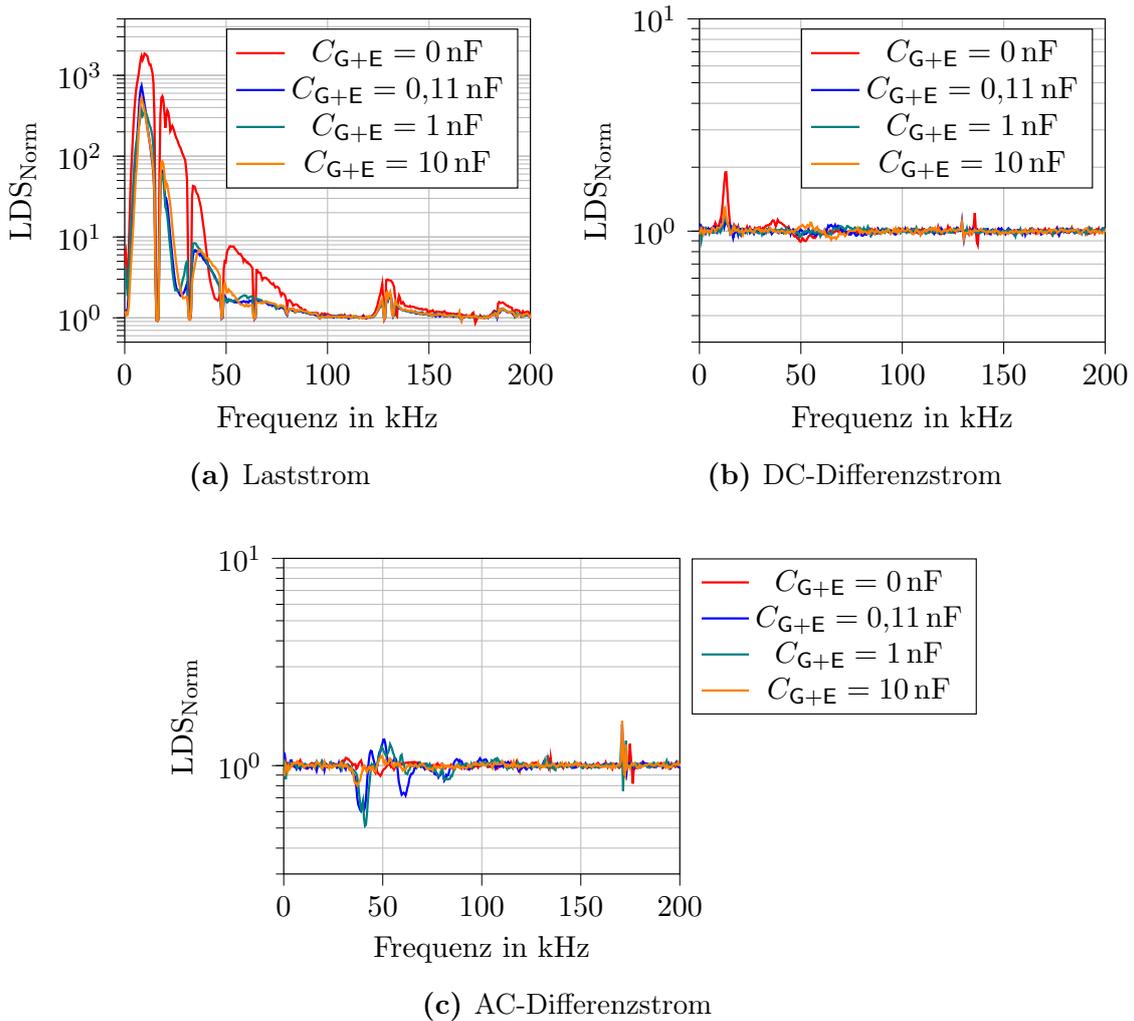


Abbildung 4.7: Normierte LDS für unterschiedliche Generator(+)-Erdpotential-Kapazitäten C_{G+E}

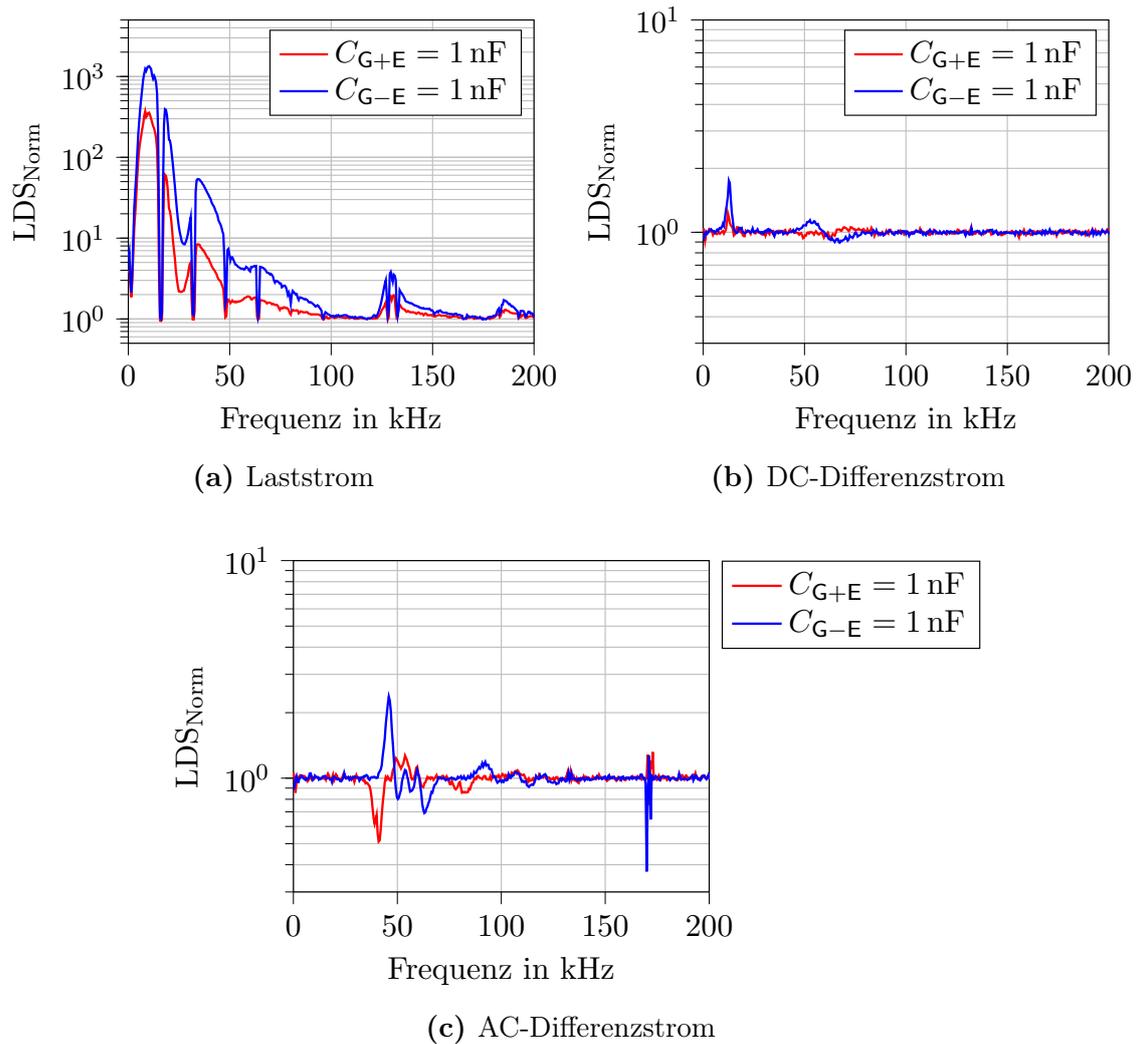


Abbildung 4.8: Normierte LDS für eine 1 nF-Kapazität zwischen dem Plus- (C_{G+E}) bzw. dem Minuspol (C_{G-E}) der DC-Quelle und dem Erdpotential

ist die um $L_{1,2} = 18,8 \mu\text{H}$ verringerte Leitungsinduktivität in rot, die nicht veränderte Leitungsinduktivität in blau (entspricht Versuch 2b) und die um $L_{1,2} = 26,0 \mu\text{H}$ vergrößerte Leitungsinduktivität in grün dargestellt.

Eine größere Leitungsinduktivität bewirkt in diesem Fall eine geringere LDS-Änderung im Laststrom und im DC-Differenzstrom bei $f = 16 \text{ kHz}$. Im AC-Differenzstrom ist in der Abbildung 4.9c für eine geringe Leitungsinduktivität zwischen $f = 30 \text{ kHz}$ bis 80 kHz die höchste Abweichung zu erkennen. Bei $f = 170 \text{ kHz}$ ist die Abweichung bei allen drei Versuchsszenarien ähnlich ausgeprägt.

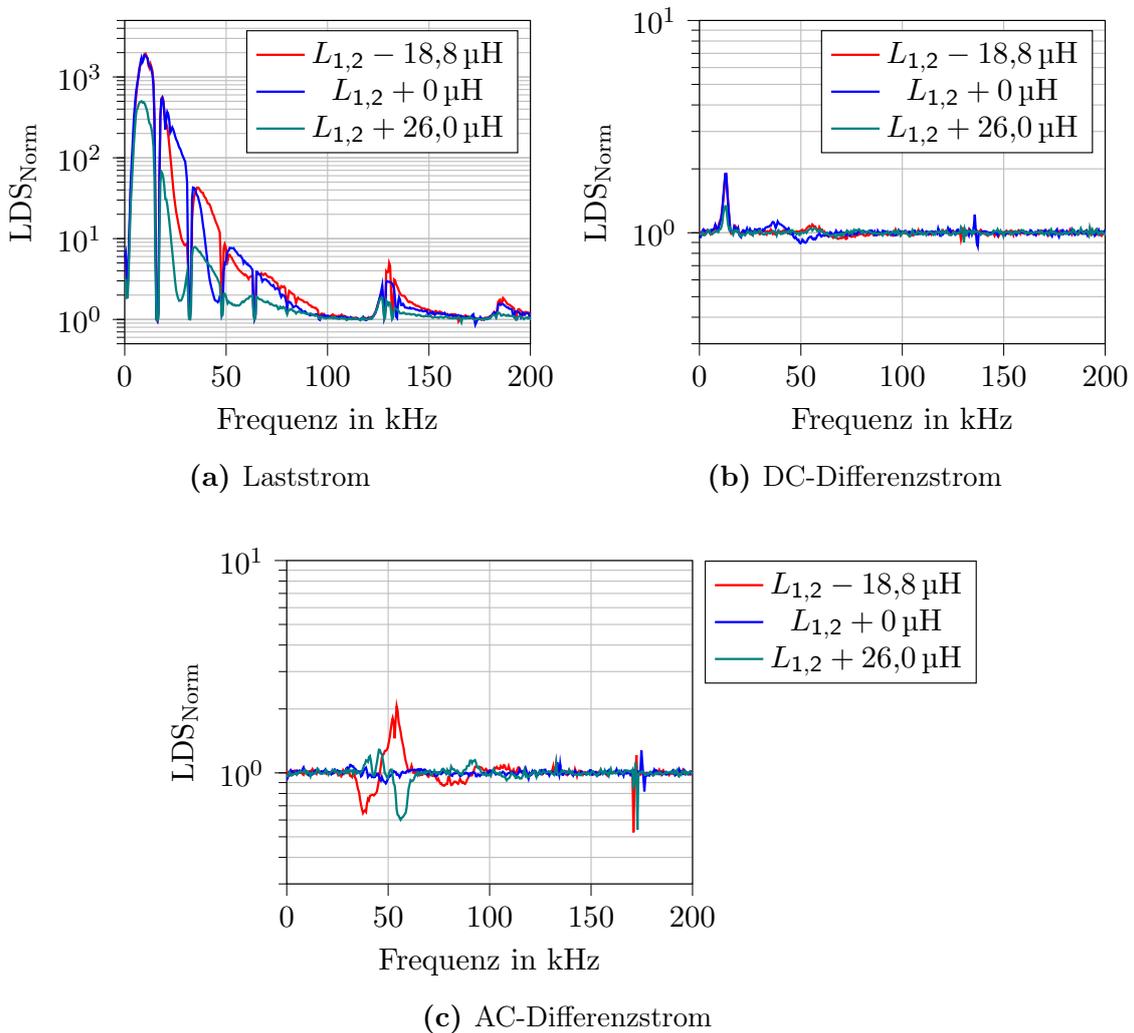


Abbildung 4.9: Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche Leitungsinduktivitäten $L_{1,2}$

4.8 Versuch 7: LDS für unterschiedliche Y-Filterkondensatoren im Umrichter

In **Abbildung 4.10** ist die Auswirkung fehlender Y-Kondensatoren C_Y im DC-seitigen EMV-Filter des Wechselrichters zu sehen (rot). Der EMV-Filter mit $C_Y = 1 \text{ nF}$ ist in blau dargestellt. Dessen Verlauf entspricht dem Versuchsszenario 2b.

Im Laststrom (**Abbildung 4.10a**) ist die Amplitude der LDS-Änderung bei fehlenden Y-Kondensatoren etwas geringer, während sie sich im DC-Differenzstrom (**Abbildung 4.10b**) kaum von dem Spektrum der eingebauten Kondensatoren unterscheidet. Im AC-Differenzstrom ist jedoch eine deutliche Änderung des normierten LDS zwischen $f = 30 \text{ kHz}$ bis 100 kHz zu sehen.

4.9 Versuch 8: LDS für den zusätzlichen Widerstand im Hin- bzw. Rückleiter

Fügt man den zusätzlichen Widerstand R_{Poti} nicht in die DC+ Leitung ein, wo sich auch der Lichtbogengenerator befindet, sondern integriert diesen seriell in die DC- Leitung, ergeben sich die in **Abbildung 4.11** in blau dargestellten Verläufe des normierten LDS für die unterschiedlichen Ströme. In rot ist zum Vergleich das bei gleichen Bedingungen gemessene normierte LDS, wenn R_{Poti} seriell in DC+ angeschlossen ist (entspricht Versuchsszenario 2b). Im Laststrompfad (**Abbildung 4.11a**) ist die Abweichung der beiden Graphen vor allem bei Frequenzen bis etwa $f = 40 \text{ kHz}$ gering. Im DC-Differenzstrom fällt die Änderung des LDS bei $f = 16 \text{ kHz}$ für R_{Poti} im DC- Strompfad deutlich größer aus als für R_{Poti} im DC+ Strompfad. Im LDS des AC-Differenzstroms ist der Stromverlauf ähnlich dem in Versuch 7 mit den entfernten Y-Kondensatoren. Diese sind nach dem Versuch 7 wieder von vorne auf die Platine des Wechselrichters gelötet worden.

4.10 Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Versuchsszenarien im PHIL-Teststand

Zu erkennen ist, dass der Lichtbogen das in der Literatur beschriebene $1/f^2$ -Rauschen im Laststrom verursacht, welches im Bereich bis $f = 100 \text{ kHz}$ besonders sichtbar ist. Im DC-Differenzstrom erzeugt der Lichtbogen eine Erhöhung der spektralen Leistung bei $f = 16 \text{ kHz}$, was der Taktfrequenz des Wechselrichters entspricht. Im AC-Differenzstrom ist im Bereich

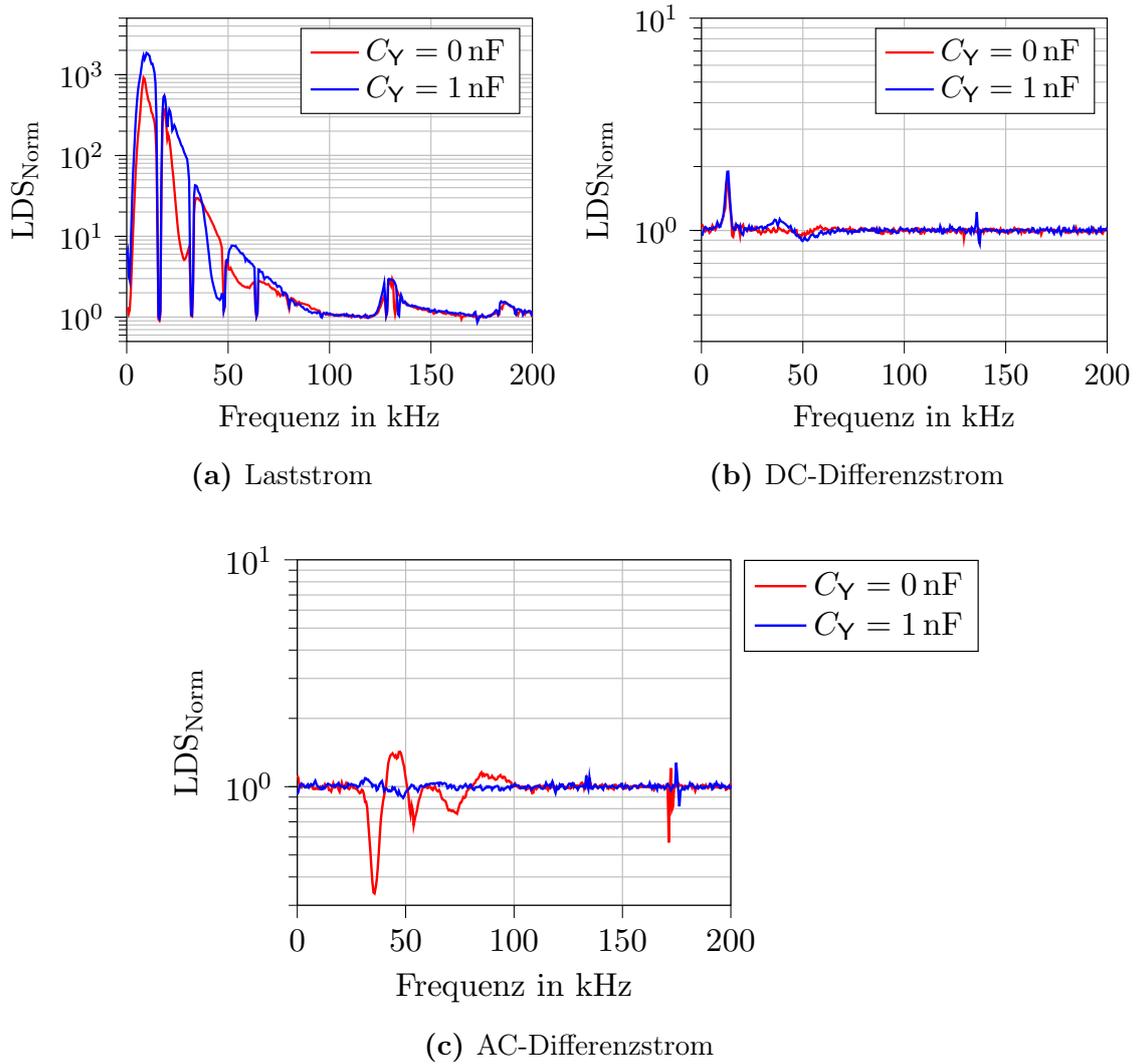


Abbildung 4.10: Normierte Leistungsdichtespektren für unterschiedliche Umrichter-Filterkapazitäten C_Y

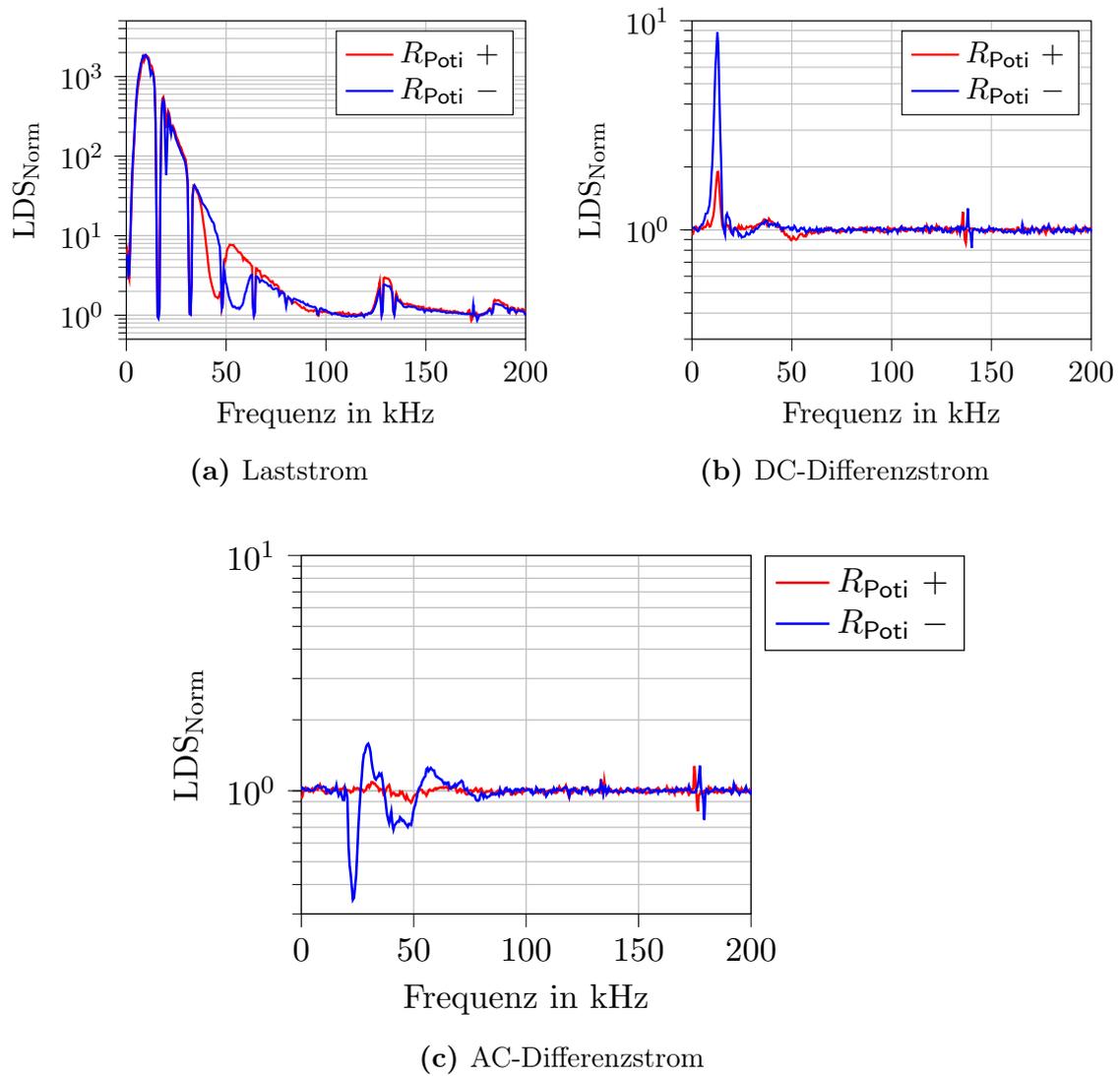


Abbildung 4.11: Normierte Leistungsdichtespektren für den Widerstand R_{Poti} im Hin- bzw. im Rückleiter

von $f = 30$ kHz bis 100 kHz eine Änderung wahrzunehmen, welche stochastischer Natur ist, was die Darstellung der einzelnen Messreihen für Versuchsszenario 1a in Abbildung 4.4 auf Seite 26 darlegt. Neben diesem Rauschen besteht eine Resonanzstelle bei $f = 170$ kHz, die durch im Labor verwendete Geräte mit entsprechender Taktfrequenz verursacht sein könnte und in einer realen Anlage u. U. verschoben oder nicht vorhanden ist. Im AC-Differenzstrom ist folglich eine Änderung im LDS während des Lichtbogenereignisses sichtbar, aber nicht eindeutig definierbar.

Um die untersuchten Faktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf den Lichtbogenstrom und den Differenzstrom zu untersuchen, werden zur Bewertung die jeweilige spektrale Leistung im Laststromkreis für den Bereich von $f = 0$ kHz bis 100 kHz herangezogen. Dies wird berechnet durch die Integration des LDS über den genannten Frequenzbereich. Für den DC-Differenzstrom wird dies für einen Frequenzbereich von $f = 13$ kHz bis 19 kHz durchgeführt. Der AC-Differenzstrom wird aufgrund des Rauschverhaltens nicht näher hinsichtlich der Auswirkungen der Einflussfaktoren untersucht. Die Leistungswerte der Versuchsvarianten b, c und d aus Tabelle 3.4 auf Seite 20 werden jeweils auf die Variante a normiert und mit dem Faktor 100 multipliziert, um eine Angabe in Prozent tätigen zu können.

In **Tabelle 4.1** sind für den Laststrom (4.1a) und den DC-Differenzstrom (4.1b) die erwähnten Verhältnisse der Leistungen für die einzelnen Versuche aus Tabelle 3.4 auf Seite 20 dargestellt.

Tabelle 4.1: Prozentuale Änderung der normierten Leistung für die jeweiligen Versuchsvarianten b-d bezogen auf die entsprechende Versuchsvariante a

(a) Laststrom				(b) DC-Differenzstrom			
Versuch	b/a	c/a	d/a	Versuch	b/a	c/a	d/a
V1	79 %	-	-	V1	100 %	-	-
V2	49 %	17 %	7 %	V2	89 %	79 %	77 %
V3	32 %	-	-	V3	89 %	-	-
V4	20 %	17 %	17 %	V4	87 %	88 %	88 %
V5	388 %	-	-	V5	109 %	-	-
V6	107 %	27 %	-	V6	100 %	91 %	-
V7	271 %	-	-	V7	106 %	-	-
V8	97 %	-	-	V8	169 %	-	-

Zunächst fällt auf, dass die Abweichungen im DC-Differenzstrom geringer sind als im Laststrom. Für den betrachteten Versuchsaufbau haben die untersuchten Faktoren auf den DC-Differenzstrom somit wenig Einfluss. Im Laststrom sind jedoch große Änderungen sicht-

bar. Zu beachten ist hierbei auch, dass ein größerer Frequenzbereich betrachtet worden ist.

Für die weitere Analyse der Einflussfaktoren auf die Lichtbogencharakteristik in einer PV-Anlage wird das in **Abbildung 4.12** dargestellte vereinfachte Ersatzschaltbild des Versuchsaufbaus herangezogen.

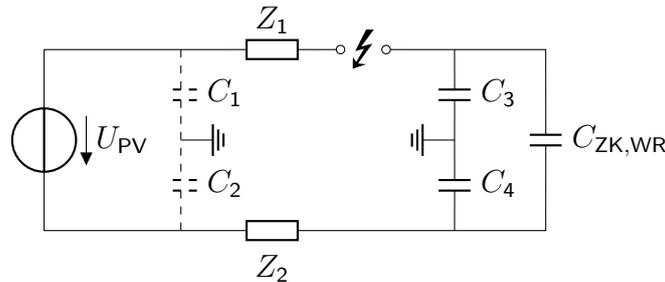


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der parasitären Kapazitäten gegen das Erdpotential in einer PV-Anlage

Auf der linken Seite befindet sich die DC-Quelle. Über die Leitungsimpedanzen Z_1 und Z_2 sowie den Lichtbogengenerator ist diese mit dem Wechselrichter verbunden, der in Form seiner großen Zwischenkreiskapazität $C_{ZK,WR}$ sowie der Y-Kondensatoren C_3 und C_4 dargestellt ist. Generatornah sind zudem die parasitären Kapazitäten C_1 und C_2 gegen das Erdpotential eingezeichnet, die aufgrund der Leitung sowie des PV-Generators vorhanden sind.

In **Versuch 1** ist die Leiter-Leiter-Kapazität C_{LL} variiert worden. Im normierten LDS in **Abbildung 4.3a** auf Seite 26 ist keine signifikante Abweichung zwischen den beiden Versuchsszenarien erkennbar. Die Leistung im Bereich zwischen $f = 0$ kHz bis 100 kHz weist jedoch eine Verringerung um 21 % für die größere Leiter-Leiter-Kapazität auf. Wie sehr sich die Ausgangskapazität der DC-Quelle auf das Ergebnis auswirkt, ist unklar.

Die Erhöhung des Lichtbogenstroms in **Versuch 2** bewirkt eine deutliche Verringerung in der Leistung auf nur noch 7 % für $I_{DC+} = 15$ A im Vergleich zu $I_{DC+} = 5$ A. Dies ist auch im normierten Leistungsdichtespektrum sichtbar (vgl. **Abbildung 4.5a**). Die Rauschleistung des Lichtbogens sinkt bei steigendem Strom aufgrund eines höher ionisierten Plasmas (vgl. [3]). Eine Erhöhung der Lichtbogenspannung in **Versuch 3** bewirkt eine Reduktion um 32 % in der normierten Leistung im Vergleich zur geringeren Spannung, wobei die erhöhte Spannung, die an den Kapazitäten C_1 bis C_4 anliegt, eine erhöhte kapazitive Dämpfung der Rauschleistung bedingen kann.

In **Versuch 4** ist die Kapazität C_{G+E} zwischen dem Pluspol der DC-Quelle und dem Erdpotential variiert worden. Dabei ist erst für die Szenarien b bis d die Kapazität C_{G+E} eingebaut worden. Dies hat die normierte Leistung auf 80 % reduziert. Eine weitere Erhöhung der

Kapazität hat aber, wie auch im normierten LDS in Abbildung 4.7a auf Seite 30 zu sehen, keine signifikante Auswirkung.

Der Ort dieser Kapazität hat einen hohen Einfluss auf die normierte Leistung im Laststrom (**Versuch 5**). Ist diese Kapazität an den Minuspol der DC-Quelle angeschlossen, führt dies zu einer Erhöhung der normierten spektralen Leistung um fast das Vierfache im Vergleich zum Anschluss an den Pluspol der DC-Quelle. Dies lässt darauf schließen, dass sich der Ort des Lichtbogens in einer PV-Anlage auf die Rauschleistung der am Wechselrichter gemessenen Ströme auswirkt, da sich die Gesamtimpedanz der Anlage dadurch ändert. Deshalb ist der Lichtbogenort in der UL 1699B berücksichtigt.

Der unsymmetrische Aufbau wird auch in **Versuch 8** betrachtet, wo der veränderbare Widerstand R_{Poti} in den DC- Strompfad integriert wird. Dies hat auf die normierte Leistung nur wenig Einfluss. Im DC-Differenzstrom bewirkt die Platzierung des Widerstands im DC-Strompfad jedoch eine Erhöhung um 69 %. Die Erhöhung des realen Anteils von Z_2 scheint die Ableitung des Stromes über den Schutzleiter zu begünstigen, wobei dies im Laststromsensor, welcher in den DC+ Strompfad integriert ist, nicht sichtbar ist. Der Strom durch die DC-Leitung muss folglich geringer geworden sein. Diese Theorie muss durch weitere Messungen bestätigt werden.

Die Variation der Leitungsinduktivität (**Versuch 6**) hat im Versuchsszenario b wenig Einfluss auf die normierte Leistung. Bei weiterer Vergrößerung der Induktivität in Versuchsszenario c verringert sich die Leistung auf 27 % im Vergleich zur geringsten, betrachteten Leitungsinduktivität. Eine entsprechend große Induktivität dämpft die Stromänderung in der Leitung. Die Verwendung von Y-Filterkondensatoren im Wechselrichter haben eine Erhöhung der normierten Leistung um 271 % bewirkt (**Versuch 7**). Für den kapazitiven Blindwiderstand X_C gilt $X_C = \frac{1}{j\omega C}$. Die größere Zwischenkreiskapazität $C_{\text{ZK,WR}}$ des Wechselrichters bewirkt somit eine geringere kapazitive Dämpfung des Lichtbogenrauschens.

5 Detektionspotential des Analysesystems

Das Analysesystem besteht aus dem Differenzstrommonitor der Firma Doepke, dessen Messdaten von den Machine Learning Algorithmen der Firma Twingz ausgewertet werden. Folglich wird zunächst das Detektionspotential der RCMs im Laststrom I_{DC+} und im DC-Differenzstrom $I_{DC,Diff}$ analysiert. In Abschnitt 5.2 werden die, aus den Messdaten von den Machine Learning Algorithmen generierten Bewertungen der Lichtbogenereignisse inspiziert. Das Detektionspotential des Analysesystems wird in Abschnitt 5.3 ausgewertet.

5.1 Detektionspotential des Lichtbogenereignisses durch den Differenzstrommonitor

Die Laborversuche haben gezeigt, dass im DC-Differenzstrom bei $f = 16$ kHz eine Abweichung während des Lichtbogens im Leistungsdichtespektrum zu erkennen ist. In **Tabelle 5.1 auf der nächsten Seite** ist die Stromdifferenz des DC-Differenzstroms für den Frequenzbereich von $f = 13$ kHz bis 19 kHz während des Lichtbogens im Vergleich zum normalen Betrieb dargestellt. Die Differenz beträgt $\Delta I_{DC,Diff} = 284$ mA bis 318 mA.

Im RCM der Firma Doepke werden die $f = 16$ kHz mit Hilfe eines Bandpassfilters mit einem Frequenzbereich von $f = 10$ kHz bis 100 kHz gemessen. In dem Frequenzbereich beträgt die Stromdifferenz zwischen Lichtbogenereignis und normalem Betrieb entsprechend der Messdaten des DeweSoft-Systems $\Delta I_{DC,Diff} = 26$ mA bis 27 mA.

In **Abbildung 5.1** ist der vom RCM gemessene Stromverlauf $I_{DC,Diff}$ für den DC-Differenzstrom dieses Frequenzbandes dargestellt. Um 13:11 Uhr, zweimal um 13:13 Uhr und um 13:14 Uhr wurde jeweils für $t = 4$ s bis 8 s ein Lichtbogen gemäß dem Versuchsszenario V1a gezogen. Im dargestellten Stromverlauf ist dies nicht sichtbar.

Ein weiterer Differenzstrommonitor misst den Laststrom I_{DC+} . Dessen gemessene Werte sind in **Abbildung 5.2** dargestellt. Ab einer Frequenz von $f = 150$ Hz (rot) ist ein Stromanstieg für die vier Lichtbogenereignisse zwischen 13:11 Uhr bis 13:15 Uhr zu erkennen. Auch im

Tabelle 5.1: Differenz im DC-Differenzstrom im Bereich von $f = 13$ kHz bis 19 kHz während des Lichtbogens für die einzelnen Versuche

Versuch	a	b	c	d
V1	297 mA	299 mA		
V2	297 mA	305 mA	284 mA	287 mA
V3	305 mA	286 mA		
V4	305 mA	296 mA	300 mA	292 mA
V5	300 mA	300 mA		
V6	301 mA	305 mA	292 mA	
V7	296 mA	305 mA		
V8	305 mA	318 mA		

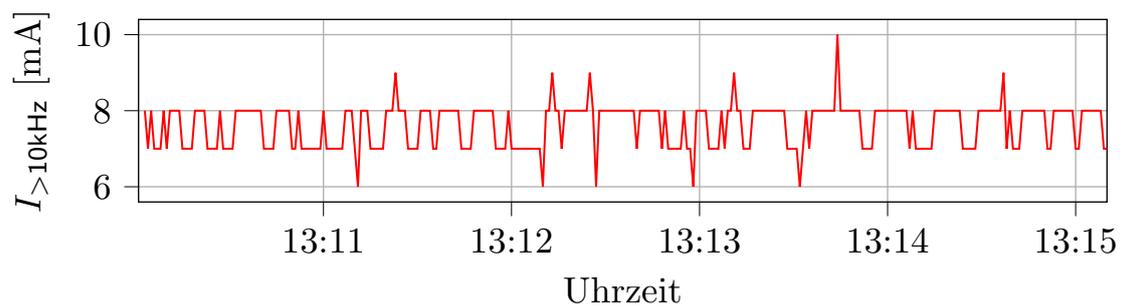


Abbildung 5.1: Vor, während und nach vier Lichtbogenereignissen im DC-Differenzstrom von dem RCM gemessener Strom $I_{\text{DC,Diff}}$ für Frequenzen $f > 10$ kHz

Frequenzband von $f = 0,1 \text{ kHz}$ bis 1 kHz (blau) ist eine Änderung sichtbar. Wesentlich höher ist dieser Stromanstieg im Frequenzband von $f > 1 \text{ kHz}$ (grün). Dort beträgt er ca. $\Delta I_{DC+} = 100 \text{ mA}$. Im Frequenzband $f > 10 \text{ kHz}$ (orange) wird noch etwa die Hälfte dieser Änderung gemessen.

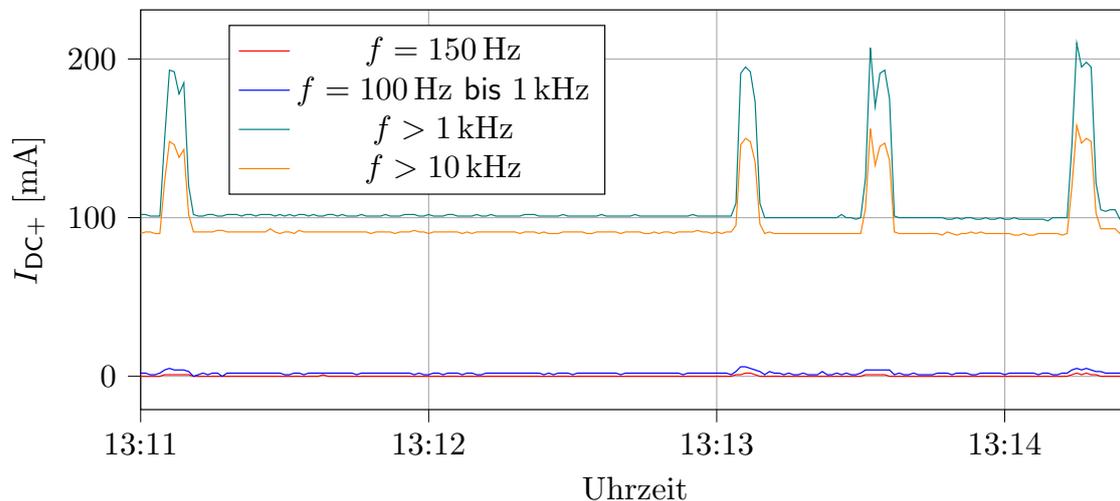


Abbildung 5.2: Vor, während und nach vier Lichtbogenereignissen im DC-Differenzstrom von dem RCM gemessener Strom I_{DC+} für verschiedene Frequenzen f

Mit dem DeweSoft-Messsystem konnte im Bereich $f = 1 \text{ kHz}$ bis 100 kHz eine Differenz von $\Delta I_{DC+} = 154 \text{ mA}$ (Versuch 2d) bis $\Delta I_{DC+} = 731 \text{ mA}$ (Versuch 1b) während des Lichtbogens gemessen werden. Im Frequenzbereich $f = 10 \text{ kHz}$ bis 100 kHz beträgt die Differenz $\Delta I_{DC+} = 126 \text{ mA}$ (Versuch 2d) bis $\Delta I_{DC+} = 633 \text{ mA}$ (Versuch 1b).

Die im Laborteststand erzeugten Störlichtbögen können vom RCM lediglich im Leistungspfad erkannt werden. In Versuch 1a wird ein maximaler Strom $I_{DC+} = 210 \text{ mA}$ im Frequenzband von $f = 1 \text{ kHz}$ bis 100 kHz gemessen. Das DeweSoft-Messsystem hat für Frequenzen von $f = 1 \text{ kHz}$ bis 100 kHz in Versuchsszenario 1a eine Erhöhung von $I_{DC+} = 622 \text{ mA}$ auf $I_{DC+} = 1233 \text{ mA}$ erfasst.

Eine mögliche Ursache, dass die vom RCM gemessene Amplitude geringer ist, als die Amplitude des vom DeweSoft gemessenen Signals, ist die geringere Abtastfrequenz des RCMs, wodurch weniger Messwerte während des Lichtbogens zur Verfügung stehen. Zudem beträgt der kleinste Messbereich $I = 300 \text{ mA}$ und die Messgenauigkeit ist ebenfalls geringer als die des DeweSoft-Messsystems. Im RCM werden die Messdaten jede Sekunde zu einem Effektivwert zusammengefasst, welcher in mA-Schritten angegeben wird, was eine weitere Mittelung der Daten bewirkt. Nicht bekannt ist die Sprungantwort des RCMs, sodass eine Änderung im gemessenen Stroms durch vorhandene Induktivitäten im RCM gedämpft wird. Ein längeres Brennen des Lichtbogens könnte demnach auch im DC-Differenzstrom gemessen werden.

5.2 Detektionspotential des Lichtbogenerignisses durch die Machine Learning Algorithmen

Am 13.12.2022 ist um 12:03:16 Uhr und um 13:04:10 Uhr jeweils ein Lichtbogen generiert worden. Das Erzeugen eines stabil brennenden Lichtbogens für mehrere Sekunden war bei dem eingeschalteten MPP-Tracking nicht möglich. In **Abbildung 5.3** sind die zeitlichen Verläufe für die Lichtbogenspannung U_{LiBo} (blau) und den Lichtbogenstrom $I_{\text{DC+}}$ (rot) zu der jeweiligen Uhrzeit dargestellt. In **Abbildung 5.3a** brennt der Lichtbogen um 12:03:16 Uhr mehrere Millisekunden während die Kontakte auseinander gebracht werden sowie wenn sie wieder zusammengeführt werden. In **Abbildung 5.3b** brennt der Lichtbogen um 13:04:10 Uhr etwas länger als um 12:03:16 Uhr.

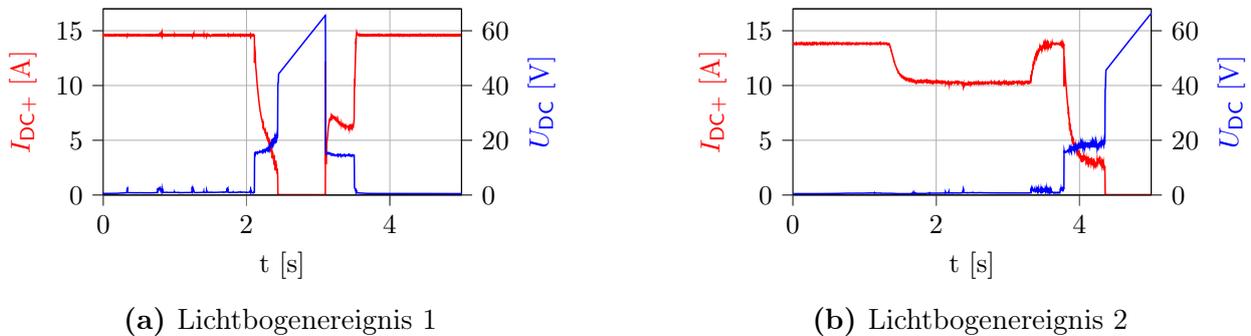


Abbildung 5.3: Verlauf der Lichtbogenspannung U_{LiBo} (blau) und des Lichtbogenstromes $I_{\text{DC+}}$ während des Lichtbogenerignisses eins (a) und zwei (b)

Wie im vorherigen Abschnitt zur Detektionsfähigkeit des RCMs gezeigt, wird das Lichtbogenerignis durch den RCM lediglich im Laststrompfad erkannt. Im Ableitstrom auf der DC-Seite erkennen die Algorithmen keine Störlichtbögen.

5.2.1 Lichtbogenerignis 1

Im Laststrom $I_{\text{DC+}} = 14,5 \text{ A}$ wird für das Lichtbogenerignis 1 um 12:03 Uhr von Sekunde 13 bis Sekunde 19 der in **Abbildung 5.4** dargestellte Verlauf in den AC-Frequenzbereichen des RCMs gemessen. In Sekunde 16 ist eine Erhöhung des Stroms in den Frequenzbändern $f > 1 \text{ kHz}$ (lila) und $f > 10 \text{ kHz}$ (cyan) identifizierbar. In **Abbildung 5.2** ist diese Erhöhung stärker ausgeprägt, wobei dort der Lichtbogen länger gebrannt hat. Eine Sekunde nach dem Lichtbogenerignis steigt der Strom in den Frequenzen $f = 50 \text{ Hz}$ (rot), $f < 100 \text{ Hz}$ (blau), $f = 150 \text{ Hz}$ (grün) und $f = 0,1 \text{ kHz bis } 1 \text{ kHz}$ (orange). Dem Verlauf der Lichtbogenspannung U_{LiBo} in **Abbildung 5.3a** ist zu entnehmen, dass die Kontakte um 12:03:16 Uhr auseinander gebracht werden, während sie um 12:03:17 Uhr wieder zusammengeführt werden.

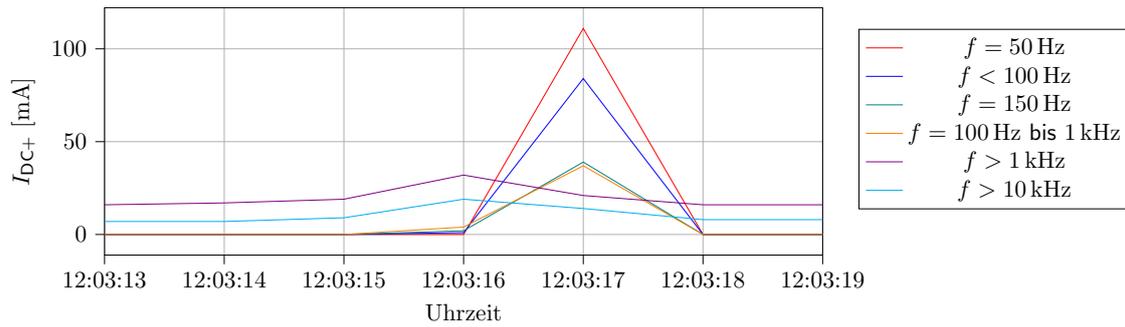


Abbildung 5.4: Zeitlicher Verlauf des Laststroms I_{DC+} für das Lichtbogenereignis 1

Der **Anomaliefaktor** der Mustererkennung wird alle $t = 5$ s berechnet und ein Anomaliefaktor zwischen 0 und 1 ausgegeben, welcher die Häufigkeit des vorhandenen Musters beschreibt. Dabei bedeutet ein hoher Anomaliefaktor eine hohe Abweichung vom Normalzustand. Für das Lichtbogenereignis um 12:03:16 Uhr werden die in **Tabelle 5.2** gelisteten Werte ausgegeben.

Tabelle 5.2: Anomaliefaktor vor und während des Lichtbogenereignisses eins um 12:03:15 Uhr für verschiedene Frequenzen f

Frequenz f	Anomaliefaktor vor 12:03:15 Uhr	Anomaliefaktor nach 12:03:15 Uhr
AC	0,03	0,11
50 Hz	0,00	0,99
<100 Hz	0,00	0,94
150 Hz	0,01	0,88
0,1 kHz bis 1 kHz	0,30	0,82
>1 kHz	0,03	0,18
>10 kHz	0,01	0,35

In den unteren Frequenzen bis $f < 1$ kHz ist der Anomaliefaktor besonders hoch. Der Algorithmus erkennt die erneute Verbindung der Elektroden besonders gut. Das Trennen der Elektroden eine Sekunde zuvor wird in den oberen beiden Frequenzbereichen weniger ausgeprägt erkannt.

Der Rekonstruktionsfehler kann Werte zwischen 0 und 100 annehmen, wobei ein hoher Wert eine hohe Abweichung vom Normalzustand bedeutet. Die **Zustandsvorhersage** berechnet jede Minute einen neuen Rekonstruktionsfehler, was die Genauigkeit der Erkennung beeinträchtigt. Für die vom RCM gemessenen AC-Anteile des Laststroms I_{DC+} sind die jeweils berechneten Rekonstruktionsfehler vor und nach 12:03 Uhr, also vor und nach dem Lichtbogenereignis

dargestellt. Bei $f = 50$ Hz ist eine deutliche Erhöhung des Rekonstruktionsfehlers zu erkennen. Die Zustandsbewertung gibt den Zustand 3 aus.

Tabelle 5.3: Rekonstruktionsfehler vor und während des Lichtbogenereignisses 1 um 12:03:16 Uhr für verschiedene Frequenzen f

Frequenz f	Rekonstruktionsfehler vor 12:03 Uhr	Rekonstruktionsfehler nach 12:03 Uhr
AC	10,26	4,47
50 Hz	4,38	48,77
<100 Hz	8,08	3,48
150 Hz	6,25	3,45
0,1 kHz bis 1 kHz	5,85	1,65
>1 kHz	8,13	7,20
>10 kHz	12,20	13,17

5.2.2 Lichtbogenereignis 2

Die Elektroden des Lichtbogenereignisses 2 um 13:04:10 Uhr sind, im Vergleich zum Lichtbogenereignis eins, für einen längeren Zeitraum getrennt. Der Zeitverlauf des Laststroms $I_{DC+} = 13,9$ A für die vom RCM gemessenen Frequenzen f ist in **Abbildung 5.5** dargestellt. Um 13:04:10 Uhr ist in den Frequenzbereichen $f = 150$ Hz (grün), $f = 0,1$ kHz bis 1 kHz (orange), $f > 1$ kHz (lila) und $f > 10$ kHz (cyan) eine Erhöhung der Stromamplitude festzustellen, welche eine Sekunde später stark absinkt. Für $f < 100$ Hz (blau) ist zu diesem Zeitpunkt eine kurzzeitige Erhöhung gemessen worden. Keine Stromerhöhung zum Zeitpunkt des Lichtbogens ist für $f = 50$ Hz (rot) auszumachen.

In **Tabelle 5.4** ist der Rekonstruktionsfehler für die vom RCM erfassten Frequenzbereiche vor und nach dem Lichtbogenereignis um 13:04:10 Uhr gelistet. Eine Anomalie ist im Vergleich zu dem Lichtbogenereignis 1 schlechter ausgeprägt. Vor allem für die Frequenzen $f < 100$ Hz und $f > 10$ kHz wird mit den Anomaliefaktoren 0,49 bzw. 0,47 eine erhöhte Abweichung vom Normalzustand angezeigt.

Der Rekonstruktionsfehler des Lichtbogenereignisses 2 ist in **Tabelle 5.4** für die entsprechenden Frequenzbereiche dargestellt. Er bleibt auch während des Lichtbogenereignisses gering und der in Lichtbogenereignis 1 erhöhte Wert für $f = 50$ Hz ist hier nicht zu erkennen. Die Zustandsvorhersage gibt den Wert 1 aus.

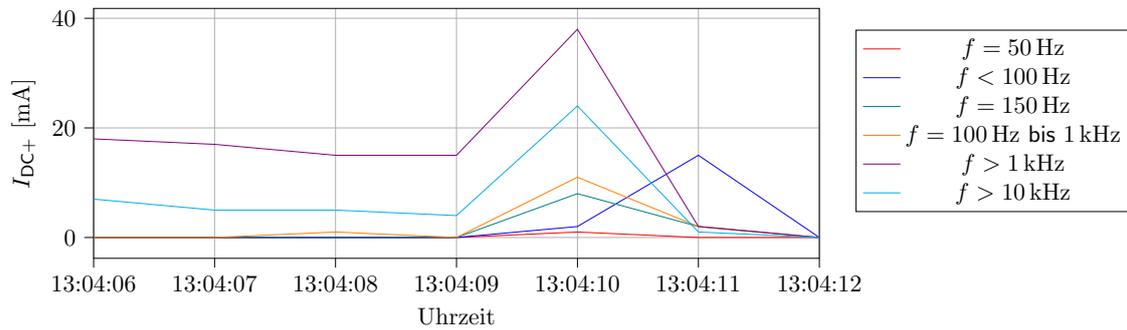


Abbildung 5.5: Zeitlicher Verlauf des Laststroms I_{DC+} für das Lichtbogenereignis 2

Tabelle 5.4: Anomaliefaktor vor und während des Lichtbogenereignisses 2 um 13:04:10 Uhr für verschiedene Frequenzen f

Frequenz f	Anomaliefaktor vor 13:04:10 Uhr	Anomaliefaktor nach 13:04:10 Uhr
AC	0,03	0,20
50 Hz	0,00	0,00
<100 Hz	0,15	0,49
150 Hz	0,00	0,13
0,1 kHz bis 1 kHz	0,13	0,24
>1 kHz	0,03	0,26
>10 kHz	0,07	0,47

Tabelle 5.5: Rekonstruktionsfehler vor und während des Lichtbogenereignisses 2 um 13:04:10 Uhr für verschiedene Frequenzen f

Frequenz f	Rekonstruktionsfehler vor 13:04 Uhr	Rekonstruktionsfehler nach 13:04 Uhr
AC	0,50	3,65
50 Hz	1,25	1,06
<100 Hz	0,04	2,31
150 Hz	1,48	1,32
0,1 kHz bis 1 kHz	0,41	1,84
>1 kHz	1,63	8,51
>10 kHz	0,36	8,88

5.3 Zusammenfassung des Detektionspotentials des Analysesystems

Schnelle Stromänderungen werden vom RCM gedämpft. Im Laststrom wird der Lichtbogen insbesondere von den Hochpassfiltern $f > 1 \text{ kHz}$ und $f > 10 \text{ kHz}$ erfasst, sofern der Lichtbogen mehrere Sekunden brennt, wobei der Frequenzbereich des RCMs bis $f = 100 \text{ kHz}$ für die Detektion der Rauschleistung des Lichtbogens ausreichend ist. Bei eingeschaltetem MPP-Tracking wird der Lichtbogen vorzeitig gelöscht, da der MPP-Tracker links und rechts vom Arbeitspunkt auf der Leistungskennlinie des PV-Generators entlangfährt, um das Leistungsmaximum zu erfassen. Der PV-Generator wird jedoch von einer DC-Quelle nachgestellt. Diese kann als ideale Spannungsquelle angesehen werden, die über keinen inneren Widerstand verfügt. Eine Erhöhung der Spannung durch das MPP-Tracking führt zu einem Einbruch des Stroms. Diesem Verhalten wird durch den Einsatz des zusätzlichen Widerstands R_{Poti} im PHIL-Teststand entgegengewirkt, kann dies aber nicht verhindern.

Das Lichtbogenereignis 1 ruft im Laststrom in den Frequenzbereichen $f > 1 \text{ kHz}$ und $f > 10 \text{ kHz}$ eine Stromerhöhung hervor, die vom Anomaliefaktor erkannt wird. Dies lässt vermuten, dass ein länger brennender Lichtbogen, und die damit einhergehende deutlichere Erhöhung der Stromamplitude gemäß Abbildung 5.2 auf Seite 41, einen größeren Anomaliefaktor bewirkt. Der Rekonstruktionsfehler wird über einen Zeitraum von $t = 60 \text{ s}$ berechnet. Entsprechend schwächer ist das Lichtbogenereignis vom Algorithmus identifiziert worden. Die Zustände für die beiden Lichtbogenereignisse unterscheiden sich (Zustand 3, bzw. Zustand 1). Dem Lichtbogen kann folglich kein einheitlicher Zustand zugeordnet werden.

Die Amplitudenänderung ist im DC-Differenzstrom im Frequenzbereich $f > 10 \text{ kHz}$ weniger ausgeprägt. Vom RCM wird diese Stromerhöhung nicht erfasst. Entsprechend können die Machine Learning Algorithmen keine Abweichung vom normalen Betriebszustand ausmachen.

6 Fazit und Ausblick

Ziel der Masterarbeit war es, die Charakteristik von DC-seitigen Störlichtbögen im Differenzstrom zu untersuchen. Dafür ist ein Lichtbogengenerator sowie ein PHiL-Teststand zur Emulation einer PV-Anlage entwickelt worden. Es wurden Einflussfaktoren betrachtet und die Detektionsfähigkeit durch einen Differenzstrommonitor und Machine Learning Algorithmen ausgewertet.

Die Störlichtbögen konnten im Laborteststand für die Taktfrequenz $f = 16$ kHz des Wechselrichters im DC-Differenzstrom gemessen werden. Bis auf die Variation des Widerstands der Leitung in Versuch 8, haben die untersuchten Faktoren auf die Rauschleistung des Lichtbogens im Laststrom einen Einfluss, nicht aber auf die Rauschleistung des DC-Differenzstroms. Auf die Rauschleistungscharakteristik im AC-Differenzstrom konnte kein belastbarer und auf reale PV-Anlagen übertragbarer Rückschluss auf das Lichtbogenereignis getroffen werden.

Das Lichtbogenereignis konnte vor allem für Frequenzen $f > 1$ kHz vom RCM im Leistungspfad erkannt werden. Im DC-Differenzstrom hat der RCM keine erkennbare Änderung in der Stromamplitude für $f > 10$ kHz gemessen. Die Analyse der Machine Learning Algorithmen wurde durch das eingeschaltete MPP-Tracking im Wechselrichter erschwert. Diese Spannungsanpassung führte zu einem automatischen Löschen des Lichtbogenstroms aufgrund des idealen Verhaltens der DC-Quelle. Obwohl der Lichtbogen weniger als $t = 1$ s brennen konnte, ist eine Anomalie im Laststrompfad festgestellt worden.

Eine Schwachstelle des Versuchsaufbaus ist das MPP-Tracking in Verbindung mit der DC-Quelle. Die kurzen Lichtbogenereignisse erschweren die Detektion durch das Analysesystem. Zur Validierung des Testaufbaus sind weitere Tests an einer realen Anlage geplant, wo im Rahmen des PV-DiStAnS 2.0-Projekts bereits eine Langzeitmessung mit RCMs durchgeführt werden. Diese konnten aufgrund der geringen solaren Einstrahlung im Spätherbst noch nicht durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Versuche an der realen PV-Anlage können dann zur Validierung des im Labor nachgestellten Aufbaus herangezogen werden. Zudem können die Orte des Lichtbogens variiert werden, um dessen Einfluss auf die Rauschleistung im Laststrom und Differenzstrom auf der DC-Seite zu ermitteln. Interessant ist weiterhin die Analyse des DC-Differenzstroms für andere Wechselrichter, welche sich im Aufbau und in der Taktfrequenz vom hier eingesetzten Wechselrichter unterscheiden.

Für länger brennende Lichtbögen kann die Detektionsfähigkeit der RCM weiter analysiert werden, wobei die Sprungantwort des Messgeräts bei verschiedenen Frequenzen ermittelt werden kann. Um die Detektion im DC-Differenzstrom zu verbessern, kann ein weiterer Bandpassfilter integriert werden, welcher auf die Taktfrequenz des Wechselrichters eingestellt ist. Zudem kann die Berechnung des Effektivwertes beschleunigt werden.

Weitere Lichtbogentests in dem PHiL-Teststand sind geplant, bei denen das MPP-Tracking am Wechselrichter ausgeschaltet wird, sodass der Lichtbogen mehrere Sekunden lang brennen kann. Dies führt dazu, dass mehr Messdaten in die Berechnung des Anomaliefaktors und der Mustererkennung einfließen, wodurch dessen Detektionsfähigkeit verbessert werden kann. Dabei ist ein Kompromiss zu finden zwischen Dauer des Lichtbogens und Schnelligkeit sowie Genauigkeit der Detektion, um Schäden an der Anlage zu verhindern. Des Weiteren sind die Algorithmen hinsichtlich möglicher Fehldetektionen, z. B. bei Schaltvorgängen, zu prüfen.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Versuche konnten zeigen, dass eine Erkennung von Störlichtbögen im Laststrom sowie im DC-Differenzstrom zur Verhinderung von Brandschäden an PV-Anlagen grundsätzlich möglich ist. Im Folgeprojekt PV-DiStAnS 3.0 ist eine Verbesserung des Lichtbogengenerators geplant. Dieser soll automatisch mit einer einstellbaren Geschwindigkeit einen immer gleichartigen Lichtbogen erzeugen können. So kann das Zündverhalten des Lichtbogens ebenfalls hinsichtlich der erzeugten Rauschcharakteristik im DC-Laststrom und im DC-Differenzstrom wissenschaftlich untersucht werden.

Literatur

- [1] *Autoencoders — Deep Learning bits #1 | HackerNoon*. Adresse: <https://hackernoon.com/autoencoders-deep-learning-bits-1-11731e200694> (besucht am 17. 11. 2022).
- [2] H. Behrends, D. Millinger, W. Weihs-Sedivy, A. Javornik, G. Roolfs und S. Geißendörfer, „Analysis of Residual Current Flows in Inverter Based Energy Systems Using Machine Learning Approaches,“ *Energies*, Jg. 15, Nr. 2, S. 582, 2022. DOI: 10.3390/en15020582.
- [3] S. Bieniek, *Impedanzspektroskopie an Photovoltaikanlagen: Systemanalyse zur Erkennung und Klassifizierung von Lichtbögen: Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2012* (Berichte aus dem Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik). Berlin: Mensch-und-Buch-Verl., 2012, Bd. 41, ISBN: 9783863872427.
- [4] T. Butz, *Fouriertransformation für Fußgänger* (Springer eBook Collection Life Science and Basic Disciplines), 2., durchgesehene Auflage. Wiesbaden und s.l.: Vieweg+Teubner Verlag, 2000. DOI: 10.1007/978-3-663-01160-6.
- [5] V. Crastan, *Elektrische Energieversorgung 1: Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik*, 4. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, ISBN: 9783662459850. Adresse: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflucht-1582380>.
- [6] Doepke Schaltgeräte GmbH, *Datenblatt: Differenzstrommonitore DCTR B-X Hz 035-PoE*, 2022. Adresse: https://www.doepke.de/uploads/tx_doepkeproducts/datenblatt/doepke_09344937_dbl_de.pdf (besucht am 04. 10. 2022).
- [7] Doepke Schaltgeräte GmbH, *Technische Information: Differenzstrommonitore DCTR B-X Hz-PoE – Frequenzgänge*, 2020. Adresse: https://www.doepke.de/uploads/tx_doepkeproducts/informationmaterial/web/doepke_3930301_frequenzgaenge_dctr_web_de.pdf (besucht am 14. 10. 2022).
- [8] E. T. Gisske, J. K. Hastings, B. Pahl, B. T. Pier und J. C. Zuercher, „Direct Current Arc Fault Circuit Interrupter, Direct Current Arc Fault Detector, Noise Blanking Circuit For A Direct Current Arc Fault Circuit Interrupter, And Method of Detecting Arc Faults,“ 2011. Adresse: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=US020110141644A1> (besucht am 28. 11. 2022).
- [9] F. J. Harris, „On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform,“ *Proceedings of the IEEE*, Jg. 66, Nr. 1, S. 51–83, 1978. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837.
- [10] Y. I. Kim, „Apparatus And Method For Detecting Arc In Photovoltaic System By Wavelet Transform,“ 2020. Adresse: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?action=bibdat&docid=KR000102166323B1&zd=1#zd> (besucht am 28. 11. 2022).

- [11] B. Klingen, *Fouriertransformation für Ingenieur- und Naturwissenschaften* (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering). Berlin, Heidelberg und s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2001. DOI: 10.1007/978-3-642-56775-9.
- [12] M. Leidy und W. Williams, „Arc Fault Detection By Accumulation Of Machine Learning Classifications In A Circuit Breaker,“ 2022. Adresse: <https://depatismet.dpma.de/DepatisNet/depatismet?action=bibdat&docid=US020220247163A1> (besucht am 28.11.2022).
- [13] S. Lu, B. T. Phung und D. Zhang, „A comprehensive review on DC arc faults and their diagnosis methods in photovoltaic systems,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 89, S. 88–98, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.010.
- [14] S. Lu, B. T. Phung und D. Zhang, „A comprehensive review on DC arc faults and their diagnosis methods in photovoltaic systems,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 89, S. 88–98, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.010. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300996>.
- [15] C. Merz, „Verfahren zum Detektieren von und Detektionsvorrichtung für Lichtbögen in einer Photovoltaikanlage,“ 2016. Adresse: <https://depatismet.dpma.de/DepatisNet/depatismet?action=bibdat&docid=EP000002996157A1> (besucht am 28.11.2022).
- [16] National Fire Protection Association, *NFPA 70: National Electrical Code*, 2020.
- [17] C. N. Nguyen und O. Zeigermann, *Machine Learning – kurz & gut: Eine Einführung mit Python, Pandas und kit-Learn* (kurz & gut), 2. Auflage. Heidelberg: O’Reilly, 2021, ISBN: 9783960105114. Adresse: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6577402>.
- [18] C. A. Oberhauser, „Technique For Arc Detection In Photovoltaic Systems And Other Systems,“ 2012. Adresse: <https://depatismet.dpma.de/DepatisNet/depatismet?action=bibdat&docid=US020120316804A1> (besucht am 28.11.2022).
- [19] *SciPy documentation*. Adresse: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.welch.html?highlight=welch> (besucht am 06.12.2022).
- [20] J. Specovius, *Grundkurs Leistungselektronik: Bauelemente, Schaltungen und Systeme* (Springer eBook Collection), 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-30399-0.
- [21] TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, Hrsg., *Bewertung des Brandrisikos in Photovoltaik-Anlagen und Erstellung von Sicherheitskonzepten zur Risikominimierung*, Köln, 2015. Adresse: <http://www.pv-brandsicherheit.de/46/> (besucht am 21.06.2022).
- [22] Underwriters Laboratory Inc., *Photovoltaic (PV) DC Arc-Fault Circuit Protection*, Northbrook, 2021.
- [23] S. Warentest, „Photovoltaikversicherung: Mindestschutz: Diese Leistungen sollte die Police enthalten,“ *Stiftung Warentest*, 14.02.2017. Adresse: <https://www.test.de/Photovoltaikversicherung-Guten-Schutz-gibt-es-fuer-unter-100-Euro-im-Jahr-5138152-5138160/> (besucht am 12.04.2022).

- [24] P. Welch, „The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms,“ *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, Jg. 15, Nr. 2, S. 70–73, 1967. DOI: 10.1109/TAU.1967.1161901.
- [25] M. Wendl, „Lokalisierung von Störlichtbögen im Photovoltaiksystem,“ de, Diss., Ilmenau, Feb. 2019, ISBN: 978-3-86360-201-7. Adresse: <http://uri.gbv.de/document/gvk:ppn:720080177>.
- [26] P. Wilmott, *Grundkurs Machine Learning*, 1. Auflage. Bonn: Rheinwerk Verlag, 2020, ISBN: 9783836276009. Adresse: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6383000>.

A Anhang

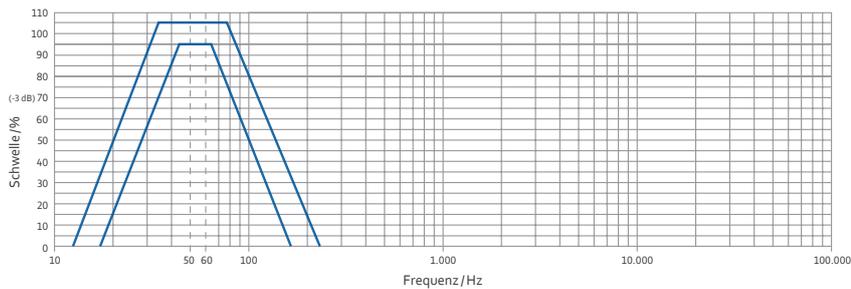
A.1 Frequenzgang des eingesetzten RCMs

Doepke

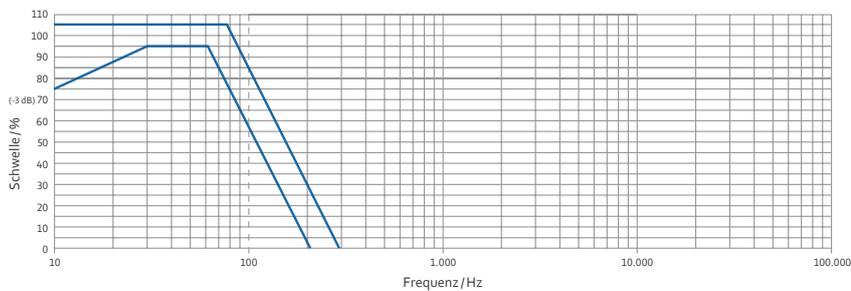
TECHNISCHE INFORMATION

Differenzstrommonitore DCTR B-X Hz-PoE – Frequenzgänge

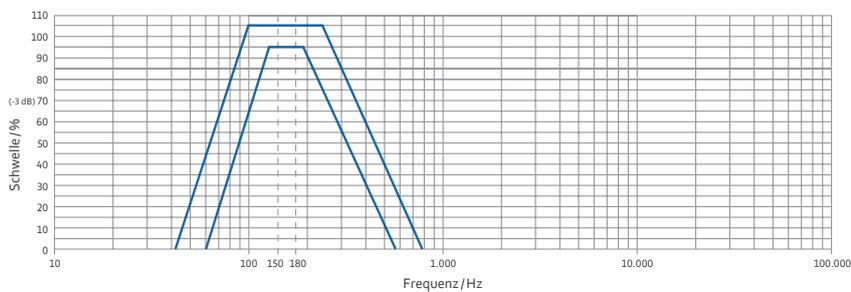
Der DCTR B-X Hz-PoE hat einen Erfassungsbereich bis 100 kHz. Dieser ist in sechs Frequenzbänder aufgeteilt, die mit der Software DCTR-Manager ausgewertet werden können. Erreicht wird dies durch Einsatz verschiedener analoger Filter. Es ist zu beachten, dass diese keine unendlich gute Trennschärfe haben. Das bedeutet, dass sich benachbarte Frequenzbereiche überschneiden können. Eine Frequenz von z. B. 50 Hz kann mit einem Anteil von bis zu 20 % auch im 150-180-Hz-Bereich angezeigt werden. Diese Tatsache ist bei der Bewertung zu berücksichtigen. Es sei nochmal darauf hingewiesen, dass es sich aus diesem Grund beim DCTR B-X Hz-PoE nicht um ein Messgerät handelt, sondern um einen Differenzstrommonitor (RCM) nach DIN EN 62020.



▲ Frequenzgang 50–60 Hz (Bandpass)



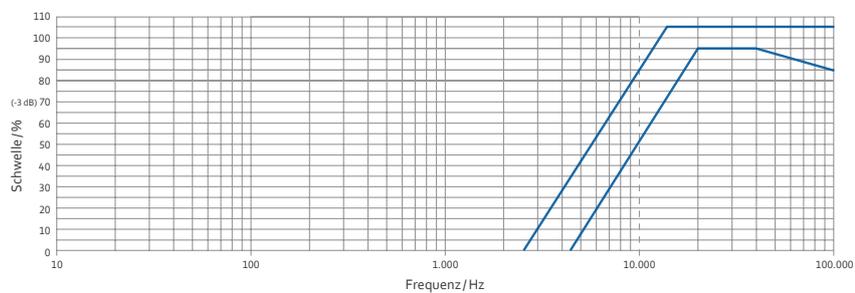
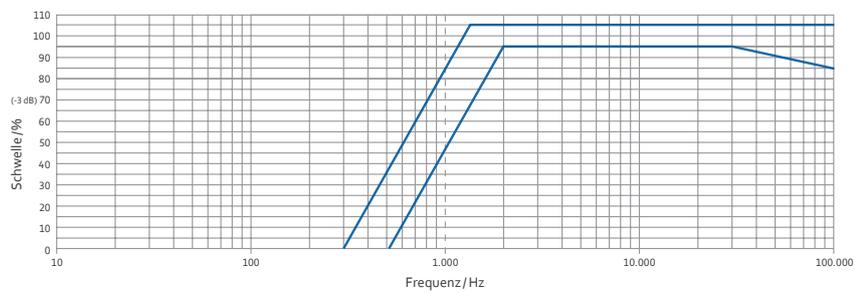
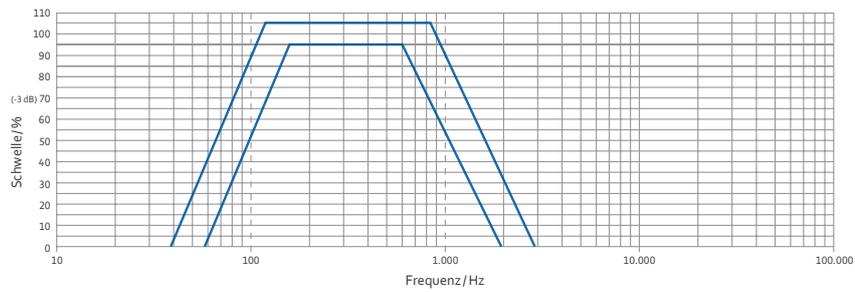
▲ Frequenzgang < 100 Hz (Tiefpass/-3 db)



▲ Frequenzgang 150 – 180 Hz (Bandpass)

TECHNISCHE INFORMATION | Differenzstrommonitore DCTR B-X Hz-PoE – Frequenzgänge

Doepke



A.2 Gerätelisten

Tabelle A.1: Verwendete Geräte im Lichtbogengenerator

Gerätetyp	Hersteller	Bezeichnung	Seriennummer
DC-Schaltrelais	GIGAVAC	GX11CBB	1041
Kupfer Rundstab	RCT	RCT-RS-1843	-
Linearmodul	igus GmbH	drylin SLW-1040	-
Digitale Positionsanzeige	SIKO GmbH	DE04	DE04-0405

Tabelle A.2: Verwendete Geräte im PHiL-Teststand

Gerätetyp	Hersteller	Bezeichnung	Seriennummer
DC-Quelle	Delta Elektronik	SM1500-CP-30	10295743
Netzsimulator	Regatron	TopCon TC.ACS	200859251
Wechselrichter	SMA	STP 15000TL-30	1901276683
Potentiometer	Fritzlen	SZZPL800X85-10	2282663

Tabelle A.3: Verwendete Messgeräte im PHiL-Teststand

Gerätetyp	Hersteller	Bezeichnung	Seriennummer	Messgröße
RCM	Doepke	DCTR B-X Hz 035-PoE	F1740860028	$I_{DC,+}$
RCM	Doepke	DCTR B-X Hz 035-PoE	000055	$I_{DC,Diff}$
RCM	Doepke	DCTR B-X Hz 035-PoE	000056	$I_{AC,Diff}$
Gateway	Kunbus	RevPi Core 3+	51348	-
Messsystem	DEWESoft	SIRIUS modular	DB19000598 DB17019954	$I_{DC}, I_{DC,Diff}, I_{AC,Diff}$ U_{DC}, U_{LiBo}
Stromwandler	LEM	IT 60-S Ultrastab	8200260010	$I_{DC,+}$
Stromwandler	LEM	IT 60-S Ultrastab	8200260009	$I_{DC,Diff}$
Stromwandler	LEM	IT 200-S Ultrastab	8181880029	$I_{AC,Diff}$
LCR Meter	KEYSIGHT	U1733C	MY58280023	$R_1 + R_{Poti}, R_2,$ L_1, L_2, C_1, C_2, C_3


```

39
40
41 def dcpowervalues(datafile, vmax, imax):
42     # reads and cleans csv data
43     dcPower = pd.read_csv(datafile, sep=',', header=0,
44                           names=['Type', 'Current', 'Time'], usecols=[5,
45                               8, 9],
46                               skiprows=3, skipfooter=0, engine='python',
47                               parse_dates=['Time'])
48
49     # Make new column with voltage (currently is appended to list)
50     u_DC = []
51     for i in range(0, len(dcPower['Time'])):
52         if dcPower['Type'][i] == 'u_DC':
53             u_DC.append(dcPower['Current'][i])
54     dcPower.drop(dcPower[dcPower.Type == 'u_DC'].index, inplace=True)
55     dcPower['Voltage'] = u_DC
56     dcPower.drop('Type', axis=1, inplace=True)
57
58     # Adapt current and voltage
59     factor = vmax / max(dcPower.Voltage)
60     dcPower.Voltage = dcPower.Voltage * factor
61     factor = imax / max(dcPower.Current)
62     dcPower.Current = dcPower.Current * factor
63
64     return dcPower
65
66 # %% read csv data
67
68 dcPowerDay1 = dcpowervalues(datafiles[0], vmax, imax)
69 dcPowerDay2 = dcpowervalues(datafiles[1], vmax, imax)
70 dcPowerDay3 = dcpowervalues(datafiles[2], vmax, imax)
71
72 daychar = [dcPowerDay1, dcPowerDay2, dcPowerDay3]
73 dcPower = daychar[setday]
74
75 # %% SCPI-Stuff
76 SUPPLY_PORT = 8462           # Fixed
77 BUFFER_SIZE = 128           # max msg size
78 TIMEOUT_SECONDS = 10        # return error if we don't hear from supply within
79 # 10 sec
80 MAX_VOLT = 10                # default, will get overwritten later

```

```
81 MAX_CUR = 10                # default, will get overwritten later
82 validSrcList = ["front", "web", "seq", "eth", "slot1", "slot2", "slot3",
83                "slot4", "loc", "rem"]
84
85 if useDCsource is True:
86     # set up socket with TCP/IP-Protocol (SOCK_STREAM)
87     supplySocket = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
88     supplySocket.connect((SUPPLY_IP, SUPPLY_PORT)) # connect socket
89     supplySocket.settimeout(TIMEOUT_SECONDS)
90
91 # %% Function Definitions for SCPI
92
93
94 def sendAndReceiveCommand(msg):
95     msg = msg + "\n"
96     supplySocket.sendall(msg.encode("UTF-8"))
97     return supplySocket.recv(BUFFER_SIZE).decode("UTF-8").rstrip()
98
99
100 # set value without receiving a response
101 def sendCommand(msg):
102     msg = msg + "\n"
103     supplySocket.sendall(msg.encode("UTF-8"))
104
105
106 def setRemoteShutdownState(state):
107     if state:
108         sendCommand("SYST:RSD 1")
109     else:
110         sendCommand("SYST:RSD 0")
111
112
113 def setVoltage(volt):
114     retval = 0
115     if volt > 0 and volt <= MAX_VOLT:
116         sendCommand("SOUR:VOLT {0}".format(volt))
117     else:
118         print("setVoltage is not possible")
119         retval = -1
120     return retval
121
122
123 def setCurrent(cur):
```

```
124     retval = 0
125     if cur > 0 and cur <= MAX_CUR:
126         sendCommand("SOUR:CUR {0}".format(cur))
127     else:
128         print("setCurrent is not possible")
129         retval = -1
130     return retval
131
132
133 def readVoltage():
134     return sendAndReceiveCommand("SOUR:VOLT?")
135
136
137 def readCurrent():
138     return sendAndReceiveCommand("SOUR:CUR?")
139
140
141 def setProgSourceV(src):
142     retval = 0
143     if src in validSrcList:
144         sendCommand("SYST:REM:CV {0}".format(src))
145     else:
146         print("setProgSourceV is not possible")
147         retval = -1
148     return retval
149
150
151 def setProgSourceI(src):
152     retval = 0
153     if src.lower() in validSrcList:
154         sendCommand("SYST:REM:CC {0}".format(src))
155     else:
156         print("setProgSourceI is not possible")
157         retval = -1
158     return retval
159
160
161 def setVoltageLimit(vlimit, onoff):
162     retval = 0
163     if vlimit > 0 and vlimit <= MAX_VOLT:
164         sendCommand("SYST:LIM:VOLT {},{}".format(vlimit, onoff))
165     else:
166         print("setVoltageLimit is not possible")
```

```
167         retval = -1
168     return retval
169
170
171 def setCurrentLimit(climit, onoff):
172     retval = 0
173     if climit > 0 and climit <= MAX_CUR:
174         sendCommand("SYST:LIM:CUR {},{}".format(climit, onoff))
175     else:
176         print("setCurrentLimit is not possible")
177         retval = -1
178     return retval
179
180
181 def readVoltageLimit():
182     return sendAndReceiveCommand("SYST:LIM:VOLT?")
183
184
185 def readCurrentLimit():
186     return sendAndReceiveCommand("SYST:LIM:CUR?")
187
188
189 def setOutputState(state):
190     if state:
191         sendCommand("OUTPUT 1")
192
193     else:
194         sendCommand("OUTPUT 0")
195
196
197 def closeSocket():
198     supplySocket.close()
199
200 # %% Data exchange with source
201
202
203 if useDCsource is True:
204     if __name__ == "__main__":
205         print(sendAndReceiveCommand("*IDN?")) # read identification
206         string
207         MAX_VOLT = float(sendAndReceiveCommand("SOUR:VOLT:MAX?"))
208         MAX_CUR = float(sendAndReceiveCommand("SOUR:CUR:MAX?"))
```

```

209     print(MAX_VOLT, MAX_CUR)
210
211     setProgSourceV("eth")
212     setProgSourceI("eth")
213
214     setVoltageLimit(vlimit, setlimits)
215     setCurrentLimit(climit, setlimits)
216     print("Voltage limit [V]: {}".format(readVoltageLimit()))
217     print("Current limit [A]: {}".format(readCurrentLimit()))
218
219     i = 0
220     retValues = {'retCurrent': [], 'retVoltage': []}
221
222     while i < len(dcPower.Time):
223         setVoltage(dcPower.Voltage[i])
224         setCurrent(dcPower.Current[i])
225         retValues['retCurrent'].append(float(readCurrent()))
226         retValues['retVoltage'].append(float(readVoltage()))
227         i += 1
228         time.sleep(step*60)
229
230     setRemoteShutdownState(0)    # RSD Enabled = supply off/disabled
231     closeSocket()
232
233     # save returned data
234     dcPower['retVoltage'] = retValues['retVoltage']
235     dcPower['retCurrent'] = retValues['retCurrent']
236     dcPower = dcPower.reindex(columns=['Time', 'Current', 'retCurrent'
237                                     ,
238                                     'Voltage', 'retVoltage'])
239
240     # for reinsurance:
241     print("The maximum returned voltage is {} V".
242           format(dcPower.retVoltage.max()))
243     print("The maximum returned current is {} A".
244           format(dcPower.retCurrent.max()))
245
246     if saveDat:
247         dcPowerDay1.to_csv(datfile1, sep=' ', columns=["Current", "Voltage"],
248                       header=["Strom", "Spannung"], index_label="Index")
249         dcPowerDay2.to_csv(datfile2, sep=' ', columns=["Current", "Voltage"],
250                       header=["Strom", "Spannung"], index_label="Index")

```

```
251     dcPowerDay3.to_csv(datfile3, sep=' ', columns=["Current", "Voltage"],
252                       header=["Strom", "Spannung"], index_label="Index")
```

A.4 Inhalt der CD-ROM

Zusammen mit der Masterarbeit wird eine CD-ROM abgegeben. Diese enthält folgenden Inhalt:

- Masterarbeit im pdf-Format
- Quelltext und Objekte der mit \LaTeX erstellten Masterarbeit
- Bilder, nach Kapitel geordnet
- Python-Skript zur Ansteuerung der DC-Quelle `einstrahlung.py` inklusive der dafür verwendeten `.csv`-Dateien mit realen Leistungsdaten eines PV-Wechselrichters