

# **DETEKTION VON STROMSCHWACHEN STÖRLICHTBÖGEN IN NIEDERSPANNUNGSSCHALTANLAGEN**

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik der  
Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs  
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Peter Müller**

aus Schwäbisch Gmünd

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Steffen Großmann

Tag der mündlichen Prüfung: 25.02.2014

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der  
Universität Stuttgart

**2014**

**Detektion von stromschwachen Störlichtbögen in  
Niederspannungsschaltanlagen**

Copyright © 2015 by Peter Müller. Alle Rechte vorbehalten.

**D93 (Dissertation Universität Stuttgart)**

Printed by Druckerei Hohlweg, 70182 Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-00-048762-0

# Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als akademischer Mitarbeiter am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt daher Herrn Professor Stefan Tenbohlen, für die Betreuung dieser Arbeit und seiner stets fundierten und wertvollen Unterstützung. Ebenso danke ich Herrn Professor Steffen Großmann für die Mitberichterschaft und die wertvollen Hinweise zur Arbeit.

Danken möchte ich auch den Mitarbeitern der Siemens AG, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Michael Anheuser und Herrn Dr.-Ing. Reinhard Maier. Ihre Unterstützung und Hilfe bei technischen Fragen waren ein wichtiger Baustein dieser Arbeit.

Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Köhler vom Hochspannungslabor des IEH gilt mein besonderer Dank, da er jederzeit für meine Fragen zur Verfügung stand und mich mit wertvollen Tipps während meiner gesamten Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter begleitet hat. Ich danke auch dem technischen Personal und den Büromitarbeitern des IEH für ihre Unterstützung bei bürokratischen Problemen und bei der tatkräftigen Unterstützung zur Erstellung verschiedenster Messapparaturen. Nicht zuletzt danke ich meinen wissenschaftlichen Kollegen, insbesondere Anne, Simon, Jens und Dennis, für die Diskussionsfreudigkeit, die mir immer wieder neue Sichtweisen auf das Thema ermöglicht hat und die das Arbeiten in einem kollegialen Umfeld sehr angenehm machten.

Dank geht auch an die Studentinnen und Studenten, die im Rahmen ihrer Studien- und Diplomarbeiten an dieser wissenschaftlichen Arbeit beteiligt waren.

Meinen Eltern gilt mein Dank dafür, dass sie mich ermutigt haben meinen eigenen Weg zu gehen und ich jederzeit auf ihre Unterstützung vertrauen konnte. Ebenso danke ich meiner Partnerin Betty für ihre liebevolle Unterstützung auch in schwierigen Phasen des Schreibprozesses.

Peter Müller

Stuttgart, den 07.08.2014

*Technik ist immer fortschrittlich, das ist ihr angeboren,  
sie hat zu entwerfen, was war.*

[Theodor Heuss, 1884-1963]

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen.....</b>	<b>7</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>8</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Einleitung und Ziel der Arbeit .....</b>	<b>13</b>
1.1 Schaltanlagen im Niederspannungsnetz.....	13
1.2 Fehlerarten in Schaltanlagen .....	16
1.3 Stand der Technik.....	20
1.3.1 Sicherungen und Leistungsschalter.....	20
1.3.2 Arc Fault Circuit Interrupter (AFCI) .....	23
1.3.3 Optische Lichtbogendetektion .....	25
1.4 Ziel der Arbeit .....	27
<b>2 Grundlagen zu Störlichtbögen in Schaltanlagen.....</b>	<b>31</b>
2.1 Grundlagen der Gasentladung.....	31
2.1.1 Elektronenaustritt aus Metallen.....	32
2.1.2 Gasentladungsarten .....	32
2.1.3 Aufbau der Lichtbogensäule .....	33
2.1.4 Die Lichtbogenkennlinien.....	34
2.2 Eigenschaften des Wechselstromlichtbogens .....	36
2.2.1 Das Zünden des Lichtbogens .....	36
2.2.2 Erlöschen des Lichtbogens.....	38
2.3 Lichtbogenfehler in Niederspannungsschaltanlagen .....	38
<b>3 Versuchsaufbau zur Erzeugung von Lichtbögen .....</b>	<b>43</b>
3.1 Messaufbau zur Nachbildung einer Schaltanlage .....	45
3.2 Parallele Lichtbogenfehler .....	48
3.2.1 Lichtbogenzündung.....	49
3.2.2 Zündung mit Metallfilm- und Kohleschichtwiderständen.....	53
3.2.3 Reproduzierbarkeit der Lichtbogenzündung.....	56
3.3 Serieller Lichtbogenfehler.....	57
3.3.1 Besonderheiten des seriellen Lichtbogens .....	57
3.3.2 Nachbildung einer seriellen Fehlerstelle.....	58

3.3.3	Feuchtigkeit in Sammelschienenkontakten.....	63
3.3.4	Auswirkungen des Lichtbogens auf die Sammelschiene.....	64
<b>4</b>	<b>Merkmale von stromschwachen Lichtbögen im Zeit- und Frequenzbereich .....</b>	<b>65</b>
4.1.	Charakteristische Lichtbogenmerkmale im Zeitbereich .....	65
4.1.1	Steiler Stromanstieg durch den Zündvorgang.....	65
4.1.2	Variierender Zündzeitpunkt .....	66
4.1.3	Löschflanke .....	69
4.2	Lichtbogenmerkmale im Frequenzspektrum .....	70
4.2.1	Frequenzspektren von seriellen und parallelen Lichtbögen.....	70
4.2.2	Einfluss des Lichtbogen auf das Stromspektrum.....	72
4.3	Verbraucher im Netz und ihr Einfluss auf den Lichtbogen .....	73
4.3.1	Einfluss von induktiven Lasten auf das Frequenzspektrum .....	74
4.3.2	Kapazitive Lasten und ihr Einfluss auf das Frequenzspektrum.....	79
4.3.3	Netzurückwirkungen durch Lasten mit Pulsweitenmodulation.....	82
<b>5</b>	<b>Auswertealgorithmen zur Fehlerdetektion.....</b>	<b>85</b>
5.1	Lichtbogenerkennung im Zeitbereich .....	85
5.1.1	Detektion über steile Stromflanken.....	85
5.1.2	Vergleich von Integralen über eine Halbwelle .....	93
5.1.3	Vergleich von normierten Halbwellenintegralen.....	99
5.2	Auswertung im Frequenzbereich .....	106
5.2.1	Integral über das Frequenzspektrum .....	106
5.2.2	Spektralanalyse ohne ungeradzahlige Harmonische.....	108
5.3	Grenzen der Lichtbogendetektion in Schaltanlagen .....	116
5.3.1	Verhältnis von Lichtbogenstrom zu Gesamtstrom .....	116
5.3.2	Selektivität.....	117
5.4	Zusammenfassung der Auswerteverfahren .....	119
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>123</b>
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	123
6.2	Ausblick auf weitere Arbeiten .....	126
<b>Anhang A</b>	<b>.....</b>	<b>128</b>
<b>Anhang B</b>	<b>.....</b>	<b>129</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>.....</b>	<b>135</b>

# Abkürzungen und Formelzeichen

$A_N$	N-te Fläche
$AFCI$	<u>A</u> rc <u>F</u> ault <u>C</u> ircuit <u>I</u> nterrupter
$C_i$	Kapazität
$EMV$	Elektromagnetische Verträglichkeit
$f_a$	Abtastfrequenz
$FFT$	Fast Fourier Transformation
$FI$	Fehlerstromschutzschalter
$I_K$	Kurzschlussstrom
$I_{Last}$	Laststrom
$I_{Lichtbogen}$	Strom über den Lichtbogen
$I_N$	Nennstrom
$k_T$	Tastkopfverhältnis
$N$	Anzahl der Samples (Messpunkte)
$PTSK$	Partiell Typgeprüfte Schaltanlagenkombination
$SF_6$	Schwefelhexafluorid
$\Delta t$	Anstiegszeit des wiederzündenden Lichtbogens
$t_i$	Lückzeit der Stromlücke
$t_{mess}$	Zeitdauer des aufgezeichneten Signals
$u_a$	Anodenfallspannung
$u_k$	Kathodenfallspannung
$u_s$	Säulenspannung
$U_z$	Wiederzündspannung
$\Delta U$	Spannungsdifferenz
$X_L$	Induktive Last

## Kurzfassung

Durch den steigenden Bedarf nach hoher Verfügbarkeit von Schaltanlagen und durch neue Auswertemöglichkeiten, ist der Schutz vor stromschwachen Störlichtbögen, bei denen Fehlerströme im Bereich des Nennstromes der Anlage fließen, wieder mehr in den Fokus der Forschung gerückt. Diese Arbeit befasst sich mit den Möglichkeiten zur Detektion der genannten stromschwachen Störlichtbögen.

In einem ersten Schritt werden stromschwache Störlichtbögen definiert und ihre Auswirkungen auf den Schaltanlagenbetrieb diskutiert. Es kann in Schaltanlagen grundsätzlich zwischen seriellen und parallelen Störlichtbögen unterschieden werden. Beide Fehlerfälle haben unterschiedliche Ursachen und münden in einem Störlichtbogen. Serielle Störlichtbögen in Sammelschienen können durch eine Schraubverbindung mit erhöhtem Kontaktwiderstand nachgebildet werden. Parallele Fehler treten zwischen benachbarten Sammelschienen, oder spannungsführenden und geerdeten Teilen der Schaltanlage auf. Aufgrund der geringen Spannung können diese nicht selbständig in Luft zünden, sondern benötigen eine Fremdschicht oder ein niederohmigen Widerstand, der den Lichtbogen zündet.

Mithilfe eines variablen Messaufbaus werden serielle und parallele Störlichtbögen bis 400 A Lichtbogenstrom erzeugt und die Stromverläufe über mehrere Perioden aufgezeichnet. Je nach Art des Lichtbogens (seriell oder parallel) ergeben sich dabei charakteristische Verläufe. Parallele Lichtbögen weisen eine ausgeprägte Stromlücke auf, welche aufgrund der längeren Schlagweite und der damit verbundenen schnelleren Abkühlung des Plasmakanals entsteht. Serielle Lichtbögen können aufgrund der geringen Schlagweite Brücken aus geschmolzenem Kupfer bilden, welche für eine oder mehrere Halbwellen den Strom trägt und so die Lichtbogenzündung verhindert. Der Stromverlauf weist unregelmäßige Stromlücken durch Erlöschen und Wiederzünden des Lichtbogens auf.

Die charakteristische Veränderung des Stromverlaufes durch den Lichtbogen lassen sowohl im Zeitbereich, als auch im Frequenzspektrum der gemessenen Ströme Merkmale erkennen, die in ihrer Kombination nur bei einem Lichtbogenfehler auftreten. Im Zeitbereich sind dies vor allem der stochastisch schwankende Zündzeitpunkt und die dadurch ebenfalls schwankende Lichtbogenenergie pro Halbwelle. Im Frequenzbereich zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Werte des Amplitudendichtespektrums im Frequenzbereich unter 10 kHz. Die breitbandige Erhöhung der Amplituden unabhängig von den

## *KURZFASSUNG*

Harmonischen der Grundfrequenz ist typisch für Lichtbögen und tritt bei gewöhnlichen Verbrauchern nicht auf.

Die gewonnenen Erkenntnisse über die charakteristischen Merkmale von Lichtbögen fließen in vier verschiedene Detektionsverfahren ein. Jedes Verfahren kann unabhängig einen Lichtbogen erkennen. Um jedoch eine Fehlauslösung zu vermeiden, wird die Kombination von mindestens 3 Verfahren empfohlen. Erst wenn 3 Verfahren einen Fehler signalisieren, darf eine Notabschaltung der Anlage in Betracht gezogen werden.

Mit Hilfe der Detektion von stromschwachen Störlichtbögen kann eine erhöhte Betriebssicherheit gewährleistet werden. Auch bisher nur schwer, oder sehr spät zu entdeckende Fehler wie überhitzende Sammelschienenverbindungen können nun schon beim ersten Zünden eines Lichtbogens detektiert werden, ohne dass der Lichtbogen seine zerstörerische Wirkung entfalten kann.

## Abstract

Due to the increasing request for highly reliable energy distribution systems and supported by new analyzing methods, protection against low current arc faults became a scope of science. This thesis is dealing with all aspects regarding detection against low current arc faults in low voltage switchgear.

In a first step, low current arc faults are being defined and their influence on switchgear operation discussed. Series and parallel arc faults are the two existing failure modes. Both arc faults have different root causes, however both result in a destructive arc fault. One reason for a series arc fault can be a loose screw rivet connection with increased contact resistance. Parallel arc faults appear between two adjusting phases or between energized and grounded parts of the switchgear. The low voltage prevents an arc ignition in air. Therefore, the parallel arc needs a surface or any low ohmic resistive material as an igniter.

An adjustable measurement setup series and parallel arcs up to 400 A could be measured during several periods. Characteristic shapes could be found for each of the two arcing modes (series and parallel). Parallel arcs have current interruption after arc extinguishing at current zero. Reasons are the longer arc gap and faster cooling of the arc plasma. Series arc faults can form bridges of molten copper due to the small gap between conducting parts. Those copper bridges are able to carry current for one or more half cycles and therefore prevent arc re-ignition. The arc current shows irregular arc extinguishing and re-ignition.

Arcing has a characteristic influence on the current shape in the time, as well as in the frequency domain. The combination of these characteristics is unique for arc faults and therefore can be used to detect these failures. In the time domain these characteristics are mainly the stochastically changing moment of arc ignition at each half cycle. Also, the resulting energy of each half cycle is varying. In the frequency domain, increased amplitudes in the spectra up to 10 kHz are visible. Because the increased amplitudes are not in correlation with the harmonics of the basic frequency, this characteristic is different from most common loads.

Four different methods for arc detection could be formed out of the gained knowledge about arc characteristics. Each method is independently able to detect an arc fault. However, it is recommended to always use the combined results of at least three methods to indicate an arc. Only if three methods could detect an arc, it is safe to recommend an emergency shutdown of the switchgear.

## *ABSTRACT*

Due to arc fault detection of low voltage switchgear, increased safety in power distribution is possible. Even failures with a low possibility of detection, such as series arc faults due to broken busbar, can be detected reliably. The arc is not able to fully develop its destructive power anymore.

### **Keywords**

Arc fault detection, low current arc fault, series arc fault, parallel arc fault, artificial arc, pattern recognition, switch gear, low voltage, bus bar, frequency domain analysis, odd-ordered harmonics,

*ABSTRACT*

# 1 Einleitung und Ziel der Arbeit

Die zuverlässige Versorgung mit Energie ist in Industrieländern von enormer Bedeutung. Sowohl private Haushalte als auch die Industrie sind auf die Versorgung mit elektrischer Energie mit geringer Störanfälligkeit angewiesen. Sind in den Haushalten die Schäden durch Stromausfälle noch eher klein, so ist im Industriesektor der Schaden umso größer. Durch den hohen Automatisierungsgrad bedeutet ein Ausfall der elektrischen Energieversorgung oftmals einen Stillstand der kompletten Produktion. Dies verursacht zusätzliche Kosten und verringert die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit eines Betriebes. Ziel eines jeden Energieversorgungsunternehmens muss es daher sein, eine möglichst ausfallsichere Energieübertragung von der Erzeugung bis zum Verbraucher zu gewährleisten.

Bei der elektrischen Energieversorgung spielt neben der Übertragung der Energie der Anschluss von Verbrauchern an das Netz eine große Rolle. Dieser wird vor Ort durch Schaltanlagen hergestellt. Insbesondere in der Niederspannungsebene bilden Schaltanlagen das letzte Glied in der Verteilungskette vor dem Verbraucher. Sie besitzen in der Regel eine Vielzahl von Abgängen, an denen einzelne Lasten wie Maschinen oder Gebäudestromnetze dreiphasig angeschlossen sind. Da sich Störungen meist nicht nur auf einen einzelnen Abgang auswirken, hat die Zuverlässigkeit von Schaltanlagen einen großen Einfluss auf die Energieversorgung aller angeschlossenen Verbraucher.

## 1.1 Schaltanlagen im Niederspannungsnetz

Ein großer Teil der elektrischen Verbraucher besteht aus Geräten, die an das 400-V-Niederspannungsnetz angeschlossen sind. Um Verbraucher mit hoher Leistung betreiben zu können, werden größere Lasten, wie elektrische Motoren und leistungsstarke Maschinen mit dreiphasiger Spannungsversorgung betrieben. Kleinere elektrische Verbraucher und die elektrische Gebäudeverkabelung werden meist einphasig betrieben. Alle Verbraucher werden zentral an ein Sammelschienenensystem angeschlossen. Zusammen mit den Schaltern und der Leittechnik bilden die Sammelschienen in gekapselter Form die Schaltanlage. (siehe Abbildung 1).

## 1.1 SCHALTANLAGEN IM NIEDERSPANNUNGSNETZ



Abbildung 1: 400-V-Niederspannungsschaltanlage SIVACON vom Hersteller Siemens.

Niederspannungsschaltanlagen sind meist in Schaltfelder aufgeteilt. Im ersten Schaltfeld befindet sich der Leistungsschalter, der die Anlage vom übergeordneten Stromnetz trennen kann. Er dient gleichzeitig als Kurzschlusschutz, um die Anlage und das übergeordnete Netz vor Überlastung im Fehlerfall zu schützen. Je nach Schutzkonzept und angeschlossenen Verbrauchern sind die Sicherungseinrichtungen im Leistungsschalter der Schaltanlage die letzten Schutzinstanzen, die sowohl bei einem Fehler in der Schaltanlage, als auch bei einem Fehler auf Lastseite den Strom trennen können. In manchen Anlagen werden zusätzlich zum Leistungsschalter einzelne Verbraucher mit Schmelzsicherungen abgesichert. Bei einer hohen Anzahl angeschlossener Verbraucher wird die Schaltanlage in einzelne Schaltfelder unterteilt, die wiederum einzeln abgesichert sein können. Die Anlage ist auf diese Weise beliebig erweiterbar. An jedem Schaltfeld können eine unterschiedliche Anzahl und verschiedene Arten von Verbrauchern angeschlossen sein. Der prinzipielle Aufbau einer Schaltanlage mit 2 Schaltfeldern ist in Abbildung 2 beispielhaft dargestellt. Der Leistungsschalter im ersten Feld verbindet die Anlage mit dem Stromnetz. Von der Hauptsammelschiene (oben) gehen einzelne Untersammelschienen ab (im Beispiel 2), an welche die Verbraucher per Kabel angeschlossen werden. Die Anlage kann mehrere Schaltfelder (hier 2) mit einer unterschiedlichen Anzahl von Verbrauchern haben und auch erweitert werden (grauer Bereich rechts).

## 1.1 SCHALTANLAGEN IM NIEDERSPANNUNGSNETZ

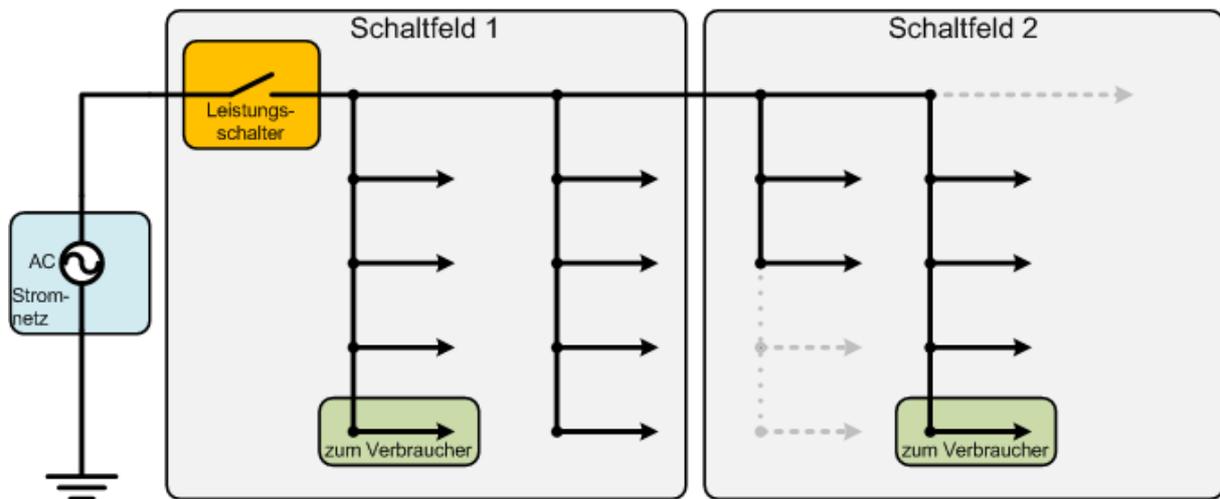


Abbildung 2: Prinzipielle Darstellungen des Aufbaus einer Schaltanlage.

### Auslegung einer Schaltanlage

Die Dimensionierung der Schaltanlage hängt hauptsächlich vom zu tragenden Nennstrom und vom Einsatzort ab. Im Industriebereich werden von verschiedenen Anbietern Schaltanlagen mit Bemessungsströmen für Sammelschienen bis zu 7400 A angeboten [Stand Feb. 2013]. Begrenzendes Element ist jedoch das Schaltvermögen des Leistungsschalters. Je nach Hersteller können diese derzeit bis zu 6300 A dreiphasig schalten [Siemens 3WL: Offene Leistungsschalter, Stand Feb. 2013]. Die unterste Spannungsebene im Netz beträgt in Europa 230 V (Sternspannung, zwischen Außenleiter und Sternpunkt), bzw. 400 V (verkettete Spannung, zwischen zwei Außenleitern). Aufgrund der geringen Nennspannung kann die Niederspannungsschaltanlage als rein luftisolierte Schaltanlage betrieben werden. Es sind keine zusätzlichen Isolierungen der meist aus blankem Kupfer bestehenden Sammelschienen notwendig. Zudem können die Abstände zwischen den einzelnen Außenleitern und geerdeten Teilen klein gewählt werden. Übliche Mindestabstände sind beispielsweise 20 mm [Balzer 1992]. Dadurch können Schaltanlagen der Niederspannung sehr kompakt gebaut werden, was zu geringerem Platzbedarf und kleineren Materialkosten führt. Gleichzeitig erhöht sich jedoch das Problem der Abführung von Abwärme und immer kleiner werdender Sicherheitsabstände. Verkleinerte Abstände zwischen rein luftisolierten, spannungsführenden Bauteilen bedeuten ein höheres Risiko durch Fremdkörper, Verschmutzung oder Fehlbedienung einen Kurzschluss oder Störlichtbogen auszulösen.

### Betriebssicherheit

Niederspannungsschaltanlagen sind in nahezu jedem Gebäude mit erhöhtem Strombedarf verbaut. Sie bieten die Möglichkeit neue Verbraucherstränge problemlos an das vorhandene Netz anzuschließen, sowie den Strom sicher trennen und bieten durch ihre geschirmte Bauweise guten Schutz vor Berührung und Beschädigung. In großen Büro- und Wohngebäuden können Schaltanlagen

## 1.2 FEHLERARTEN IN SCHALTANLAGEN

zum Anschluss der Beleuchtung, der Klimatisierung und der Stromversorgung in den einzelnen Räumen Anwendung finden. In Fabrikanlagen werden an Schaltanlagen einzelne Maschinen oder ganze Produktionsstraßen angeschlossen, deren Stromverbrauch mehrere hundert Ampere betragen kann. Im IT-Bereich werden Server mit hohem Leistungsbedarf über Niederspannungsschaltanlagen versorgt. Ganze Rechenzentren hängen von einer zuverlässigen Stromversorgung durch die Schaltanlage ab. Insbesondere sensible Bereiche, wie Krankenhäuser, Flughäfen, Notfallsysteme jeder Art, Einrichtungen der Infrastruktur und des öffentlichen Lebens sind abhängig von einer störsicheren Stromversorgung. Unerkannte Fehler in Schaltanlagen, die zu einem Stromausfall führen, können Folgeprobleme nach sich ziehen, bei denen letztlich Menschenleben in Gefahr geraten, die vom eigentlichen Stromausfall gar nicht betroffen sind. Die durch einen Lichtbogen zerstörte Schaltanlage kann auch in ihrer Umgebung durch heiße Gase und geschmolzenes Metall Menschenleben gefährden.

Solche Szenarien gilt es durch eine sichere Versorgung der Endverbraucher mit elektrischer Energie zu verhindern. Obwohl Niederspannungsschaltanlagen das scheinbar kleinste Glied in der Kette der Energieversorgung darstellen, trifft ein Ausfall dieser den Verbraucher unmittelbarer, als der Ausfall eines Betriebsmittels einer übergeordneten Spannungsebene, welche oft redundant ausgeführt sind.

## 1.2 Fehlerarten in Schaltanlagen

Die in Schaltanlagen auftretenden Fehlerarten lassen sich prinzipiell nach ihren auftretenden Fehlerströmen sortieren. Es werden hier in absteigender Stromstärke die verschiedenen Fehlertypen betrachtet.

### **Kurzschluss und Erdschluss**

Die bedeutendsten Ursachen für gravierende Schäden an einer Schaltanlage stellen der Kurzschluss und der Erdschluss dar. Unter einem Kurzschluss versteht man eine niederohmige Verbindung zwischen spannungsführenden Teilen der Anlage untereinander (Leiter-Leiter-Fehler). Beim Erdschluss spricht man von einer niederohmigen Verbindung zwischen unter Spannung stehenden Teilen und geerdeten Komponenten der Schaltanlage (Leiter-Erde-Fehler). Diese Fehlerfälle können verschiedene Ursachen haben. Zu den häufigsten Auslösern gehören:

- Montagefehler (Falsche Verdrahtung oder falscher Einbau von Komponenten)
- Fehlbedienung (Einschalten auf eine geerdete Sammelschiene oder einen fehlerhaften Verbraucher)

## 1.2 FEHLERARTEN IN SCHALTANLAGEN

- Wartungsarbeiten (fallengelassenes Werkzeug, Drahtstücke, Berührung von spannungsführenden Teilen, etc.)

Der bei Kurz- und Erdschlüssen fließende Strom beträgt ein Vielfaches des Nennstromes und kann je nach Netzimpedanz und Fehlerort im Bereich der Kurzschlussleistung des Versorgungsnetzes liegen. Die meisten Schutzeinrichtungen konzentrieren sich daher auf die Erkennung von Überströmen, bei denen ein Vielfaches (je nach Schutzcharakteristik, siehe Kapitel 1.3.1) des angegebenen Nennstromes überschritten wird. Bei einem Kurzschluss nicht rechtzeitig die Stromversorgung unterbrochen, kann durch die starke Erhitzung Kupfer schmelzen und sogar verdampfen. Dies führt im schlimmsten Fall zu einem Lichtbogen, der durch seine schlagartige Zündung eine Druckwelle auslöst und die Anlage schwer beschädigt.

### **Überstrom**

Eine weitere Gefahr besteht in der Überlastung der Schaltanlage durch einen zu hohen Stromfluss, für den die stromführenden Komponenten nicht ausgelegt sind. Dies geschieht, wenn zu viele Verbraucher oder Verbraucher mit zu hoher Stromaufnahme angeschlossen werden. Die Folge ist eine Erwärmung durch die ohmschen Verluste in den Leitungen, Sammelschienen und Schaltern. Dabei können Isolationen und andere Kunststoffteile beschädigt werden und letztlich zu einem Kurzschluss führen. Der Überstromschutz ist daher ein Schutz vor thermischer Überlastung. Er löst nicht im Kurzzeitbereich aus, da besonders beim Anlauf von Maschinen der Nennstrom einer Anlage kurzzeitig überschritten werden kann. Da die Erwärmung von Leitungen und Sammelschienen erst über einen längeren Zeitraum eine Gefährdung des sicheren Betriebes darstellt, löst der Überstromschutz erst im Bereich von einigen Sekunden bis Minuten aus [siehe Kapitel 1.3 Stand der Technik].

### **Stromschwacher Störlichtbogenfehler**

Als stromschwacher Störlichtbogen wird ein Lichtbogen bezeichnet, bei dem der Gesamtstrom, der über den Lichtbogen fließt, im Bereich des Nennstroms der Anlage, bzw. der verwendeten Schutzeinrichtungen liegt. Da der Fehlerstrom nicht deutlich größer ist als der Nennstrom, löst der Kurzschlusschutz nicht aus. Ist der Gesamtstrom der Schaltanlage durch den Lichtbogenstrom nicht zusätzlich angestiegen (beispielsweise bei parallelen Fehlern), so löst noch nicht einmal der Überstromschutz aus (siehe Abbildung 3). Stromschwache Störlichtbögen stellen daher einen Fehlerfall dar, der bisher nicht oder unzureichend von den bekannten Schutzeinrichtungen abgedeckt wird.

## 1.2 FEHLERARTEN IN SCHALTANLAGEN

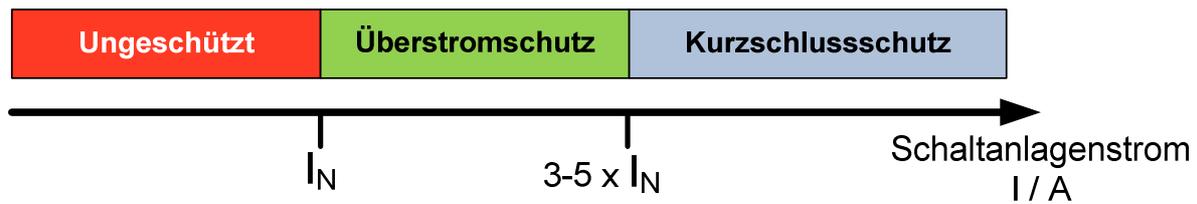


Abbildung 3: Stromschwache Störlichtbögen liegen im Bereich unterhalb des Nennstromes  $I_N$  der Schaltanlage.

Mögliche Ursachen für stromschwache Lichtbögen sind:

- Fehlerhafte Verbindungen in Sammelschienen (lockere Schraubenverbindungen, Bruch, starke Fremdschichtbildung auf Kontaktstellen)
- Fremdkörper (Kleintiere wie Ratten oder Schlangen, lose Bauteile, Müll)
- Verschmutzte Isolation (durch Staub, Spinnweben, Salzablagerungen oder Kondenswasser auf den Halterungen der Sammelschienen)

Waren Maßnahmen zum Schutz vor stromschwachen Lichtbögen in der Vergangenheit aufgrund der geringen Auftretswahrscheinlichkeit eher uninteressant, so finden sie inzwischen in Folge geänderter Rahmenbedingungen größere Beachtung. Neuentwicklungen der Schaltanlagentechnik zielen auf immer kleinere und kompaktere Anlage und Schalter ab. Diese kommen mit weniger Aufstellungsraum aus und haben geringere Materialkosten. Dies bringt jedoch auch mit sich, dass der Bauraum und damit die Abstände zwischen spannungsführenden und geerdeten Komponenten immer kleiner werden. Dadurch können Verunreinigungen und Fremdkörper schneller zu einer Überbrückung der Isolationsstrecke kommen, als bei Anlagen mit großen Isolationsabständen. Bei Anlagen mit hohen Nennströmen und kompakten Abmessungen, ist zudem das Abführen von Abwärme ein zunehmendes Problem. Die durch die Leitungsverluste entstehende Abwärme kann nicht ausreichend abgeführt werden und verringert dadurch das Schaltvermögen der Leistungsschalter. Zudem wird die Bildung von Fremdschichten auf Kontaktstellen begünstigt. Dies alles erhöht die Gefahr von Fehlern mit Störlichtbögen innerhalb einer Schaltanlage. Um trotzdem die Versorgungssicherheit immer weiter erhöhen zu können, soll vermehrt der Schutz vor stromschwachen Störlichtbögen in das Schutzkonzept von Schaltanlagen mit eingebunden werden.

Die Forschung im Bereich stromschwacher Störlichtbögen in Schaltanlagen ist bisher nur in engen Grenzen durchgeführt worden [Beck 2006]. In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt oft auf der Abschaltung von Kurzschlüssen und Schaltlichtbögen [Gammon 1999, Rempel 1987]. Erst mit dem Aufkommen der AFCI's (Arc Fault Circuit Interrupter, siehe Kapitel 1.3.2) in den USA kam auch wieder Bewegung in die Untersuchung von Lichtbögen mit geringeren

## 1.2 FEHLERARTEN IN SCHALTANLAGEN

Strömen [Gregory 1998]. Dementsprechend gab es bisher nur wenige Veröffentlichungen im Bereich stromschwacher Fehler und diese konzentrieren sich hauptsächlich auf Störlichtbögen in Kabeln und Hausinstallationen [Fuller 1985, Shea 2008].

### Statistische Zahlen zu Lichtbogenfehler

Zu Stromausfällen aufgrund von Störlichtbögen gibt es keine genauen statistischen Angaben. Meldepflichtig und somit dokumentiert sind lediglich Unfälle mit Personenschaden. Diese entstehen oft durch Betriebsfehler oder Kurzschlüsse aufgrund unsachgemäßer Bedienung von an der Anlage arbeitendem Personal (siehe Abbildung 4).

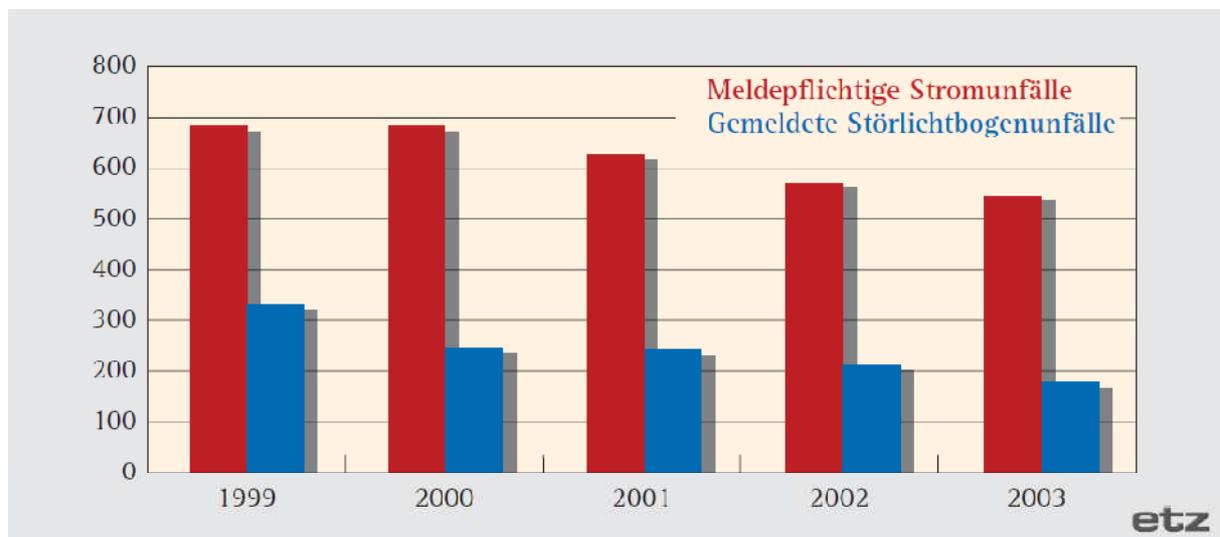


Abbildung 4: Stromunfälle im Bereich der Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE). [Schumacher 2005]

Erfahrungswerte gibt es nur von den Herstellern selbst, die jedoch keine Zahlen veröffentlichen. Es muss daher von einer unbekanntem Zahl von Störlichtbögen ausgegangen werden, so dass das wahre Ausmaß dieses Fehlerfalles nicht zu beziffern ist.

In Unfall- und Fehlerstatistiken tauchen stromschwache Störlichtbögen nicht auf. Da es ohnehin nach einem Lichtbogen und der dadurch bedingten Zerstörung in einer Anlage schwierig ist die Fehlerursache zu ermitteln, wurden stromschwache Störlichtbögen bisher nicht gesondert erfasst. Es ist auch nicht auszuschließen, dass einige Fehler in einem stromschwachen Lichtbogen ihren Ursprung hatten und sich erst danach, auch aufgrund ungenügender Fehlererkennungsmöglichkeiten, zu einem Kurzschlusslichtbogen entwickelt haben. Statistiken lassen keinen Rückschluss darauf zu, ob ein stromstarker Störlichtbogen zuvor möglicherweise ein sich verschlimmernder stromschwacher Fehler war. Es ist ebenfalls anzunehmen, dass einige stromschwache Fehler gar nicht erkannt werden, da Stromverläufe in

## 1.3 STAND DER TECHNIK

Niederspannungsschaltanlagen sehr selten aufgezeichnet werden. Sind in der Hochspannungstechnik Monitoringsysteme mit Datenloggern bereits weit verbreitet, so werden sie in der Niederspannungstechnik nur in Sonderanwendungen eingesetzt. Erlischt daher der Lichtbogen von selbst wieder ohne vorher eine Betriebsunterbrechung ausgelöst zu haben, wird sein Auftreten eventuell erst bei der nächsten Anlagenwartung bemerkt. [Dahmouni 1999] beschäftigt sich ausführlich mit der Brandentstehung in Schaltanlagen und verwendet dabei Daten von Versicherungsunternehmen, kann jedoch auch nicht zwischen stromschwachen und stromstarken Lichtbögen unterscheiden.

### 1.3 Stand der Technik

Ein spezieller Schutz zur Detektion von stromschwachen Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen ist derzeit noch nicht auf dem Markt erhältlich. Die momentan in Schaltanlagen eingesetzten Sicherheitsschaltungen bestehen noch immer fast ausschließlich aus Schmelzsicherungen und Leistungsschaltern. Diese bewährten und seit Jahrzehnten überall verwendeten Konzepte schließen den Schutz vor einem stromschwachen Störlichtbogen nicht ein. Ihr Auslösebereich konzentriert sich ausschließlich auf den Bereich oberhalb des Nennstromes der Anlage. Unterhalb dieser Schwelle wird kein Fehler erkannt. Es werden im Folgenden die gängigen Sicherungsarten vorgestellt, sowie einige Konzepte aus neuerer Zeit. Es haben sich in den letzten Jahren weitere Lichtbogenschutzkonzepte etabliert, die mit Hilfe einer intelligenten Messwertanalyse einen Störlichtbogen erkennen sollen. Als Indikatoren werden sowohl optische Signale als auch Strommessungen verwendet.

#### 1.3.1 Sicherungen und Leistungsschalter

*„Schmelzsicherungen und Sicherungsautomaten sind allgemein bekannte Bauteile des Überstromschutzes. In ihrer prinzipiellen Funktionsweise unterscheiden sich Bauteile für Wohngebäude und Industrieanwendungen kaum. Günstige Produktionskosten, hohe Störfestigkeit und einfache Handhabung haben sie zu den weitverbreitetsten Schutzkonzepten in der Energieverteilung gemacht.“ [Lindmayer 1987].*

#### **Schmelzsicherung**

Die Schmelzsicherung ist die älteste noch verwendete Sicherung gegen Kurzschlüsse und Überbeanspruchung und gilt als eine der zuverlässigsten Schutztechniken. Im Bereich der Hauptverteilung von Niederspannungsnetzen wird üblicherweise die NH-Sicherung eingesetzt (Niederspannung-Hochleistungssicherung). Da sie keine verschleißanfälligen mechanischen Komponenten enthält ist sie wartungsfrei und funktioniert auch noch nach vielen Jahren zuverlässig. Neuere Untersuchungen zeigen jedoch, dass im Zuge der immer kompakteren Bauweise der Schaltgerätekombinationen, inzwischen sehr

### 1.3 STAND DER TECHNIK

viel stärker thermisch belastet werden als in der Vergangenheit. Dies führt zu einer beschleunigten Alterung. [Kühnel 2013] befasst sich mit den Auswirkungen der erhöhten Temperatur auf die Betriebsparameter der Schmelzsicherung.

Schmelzsicherungen werden beim Ansprechen irreversibel zerstört und können nicht per Hand ausgelöst werden. Wie in Abbildung 5 zu sehen, wird bei einem zu hohen Strom die Lotbrücke in der Mitte der Sicherung so weit erhitzt, dass diese aufschmilzt und so eine physikalische Unterbrechung im Stromkreis entsteht. Sie kann deshalb nur einmal verwendet werden. Die Sandfüllung dient dabei als Löschmedium für den Lichtbogen.

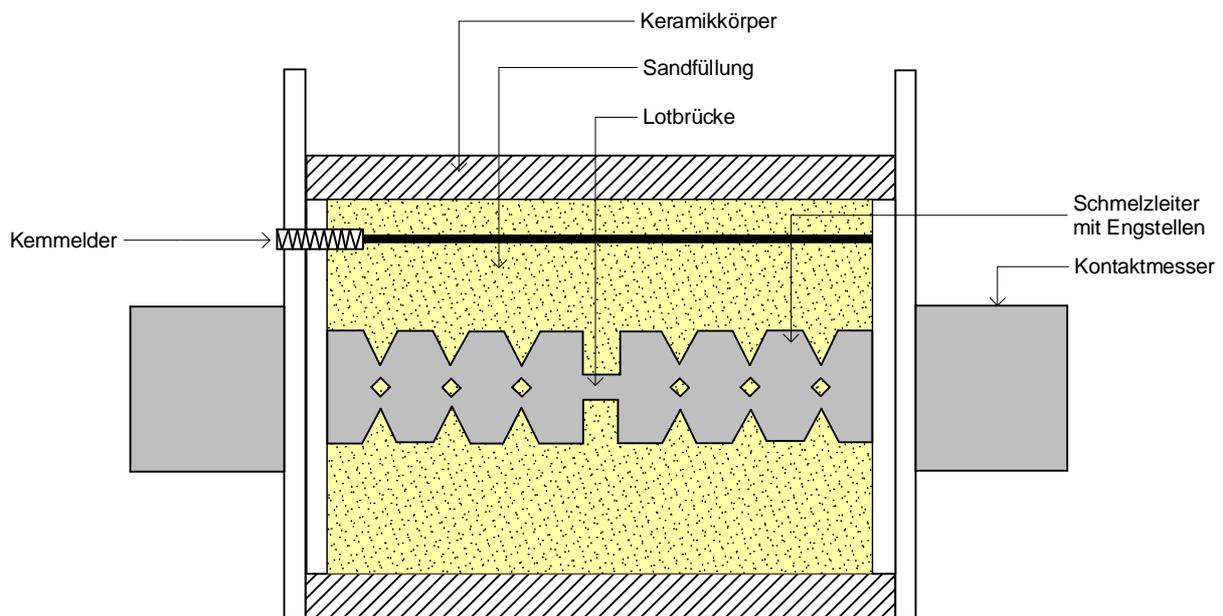


Abbildung 5: Schnitt durch eine NH-Schmelzsicherung. Die Unterbrechung des Stromkreises erfolgt durch thermische Überlastung (Aufschmelzen) der Lotbrücke.

Schmelzsicherungen sind weit verbreitet und werden auch in neuen Anlagen weiter eingebaut. Durch ihre hohe Ausfallsicherheit und der rein thermischen Auslösung bieten sie bei Überstrom oder Kurzschluss in Kombination mit Leistungsschaltern eine Möglichkeit zur selektiven Abschaltung von Fehlern [Siemens 2010].

Der Nennstrom, der durch eine Schmelzsicherung theoretisch dauerhaft geführt werden kann, ist auf der Sicherung ausgedruckt. Da die realen Einbaubedingungen von den Prüfbedingungen abweichen können (thermische Beanspruchung, [Kühnel 2013]), ist der Strom, der tatsächlich dauerhaft geführt werden kann, niedriger anzunehmen. Der Nennstrom kann in üblichen Bauformen bis zu 1,6 kA betragen. Das Schaltvermögen beträgt dann bei 250 V AC maximal 25 kA. Ströme, die über dem Nennstrom liegen, werden nach einer

### 1.3 STAND DER TECHNIK

bestimmten Zeit abgeschaltet (VDE 0100-410: 1997). Weitere Eigenschaften regelt die Norm (DIN EN 60269-1; VDE 0636-1:2010-03).

#### **Leistungs- und Leitungsschalter**

*„Der Leitungs- oder auch Leistungsschalter ist im Gegensatz zur Schmelzsicherung ein zerstörungsfreier Schutz. Nach Auslösung aufgrund von Überstrom oder Kurzschluss kann er wiederverwendet werden. Der Leistungsschalter ist in den unterschiedlichsten Baugrößen und Leistungsspektren erhältlich“ [Lindmayer 1987] (siehe Abbildung 6).*



*Abbildung 6: Leistungsschalter für Nennströme von 40 A (links) bis zu 6300 A (rechts hinten) [Siemens 2013].*

Der Vorteil des Leistungsschalters liegt in der Wiederverwendbarkeit nach Ansprechen und in seiner schnellen Reaktionszeit bei Kurzschlussströmen. Nachteil ist die fehlende Erkennung von Fehlern innerhalb seines Nennstrombereiches. Der Leistungsschalter untersucht den Strom nicht aktiv nach Fehlermerkmalen, sondern löst beim Überschreiten von eingestellten Grenzwerten aus. Dies kann entweder im Kurzzeitbereich durch einen steilen Stromanstieg ( $di/dt$ , magnetischer Auslöser) geschehen, oder im Langzeitbereich durch kontinuierliche Überschreitung des Nennstrombereiches (thermischer Auslöser). Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, Leistungsschalter modular mit Schutzsystemen zu erweitern, beispielsweise Differentialschutz, Überspannungsschutz, etc. Ein Schutz vor Lichtbögen mit Strömen unterhalb des Nennstromes ist derzeit noch nicht erhältlich.

Leitungsschutzschalter werden neben ihrem Bemessungsstrom auch durch ihre Auslösecharakteristik beschrieben. Diese werden in alphabetischer Reihenfolge durch Großbuchstaben gekennzeichnet. Beispielhaft sind in Abbildung 7 die Charakteristiken B, C und D zu sehen, welche der Reihe nach Standard, hohe Einschaltströme und hohe induktive Last entsprechen. Die Auslösecharakteristik kann in einem Zeit/Strom-Diagramm dargestellt werden. Dabei stellt die Y-

### 1.3 STAND DER TECHNIK

Achse die Zeit bis zur Auslösung des Schalters dar. Die X-Achse zeigt den Strom durch den Schalter an, meist bezogen auf den Nennstrom. Es kann so für einen bestimmten Strom die Zeit abgelesen werden, die benötigt wird bis der Schalter den Stromkreis trennt. Alle Punkte rechts und oberhalb der Auslösekennlinie sind vom Leistungsschalter geschützt. Im Kurzzeitbereich erfolgt magnetische Auslösung, im Langzeitbereich ( $>10$  s) thermische Auslösung. Alle Punkte links der Kurve sind nicht geschützt, da entweder der Strom zu gering ist, oder der Schutz nicht schnell genug anspricht. Der Mindestauslösestrom in diesem Beispiel beträgt  $1,13 \times I_N$ .

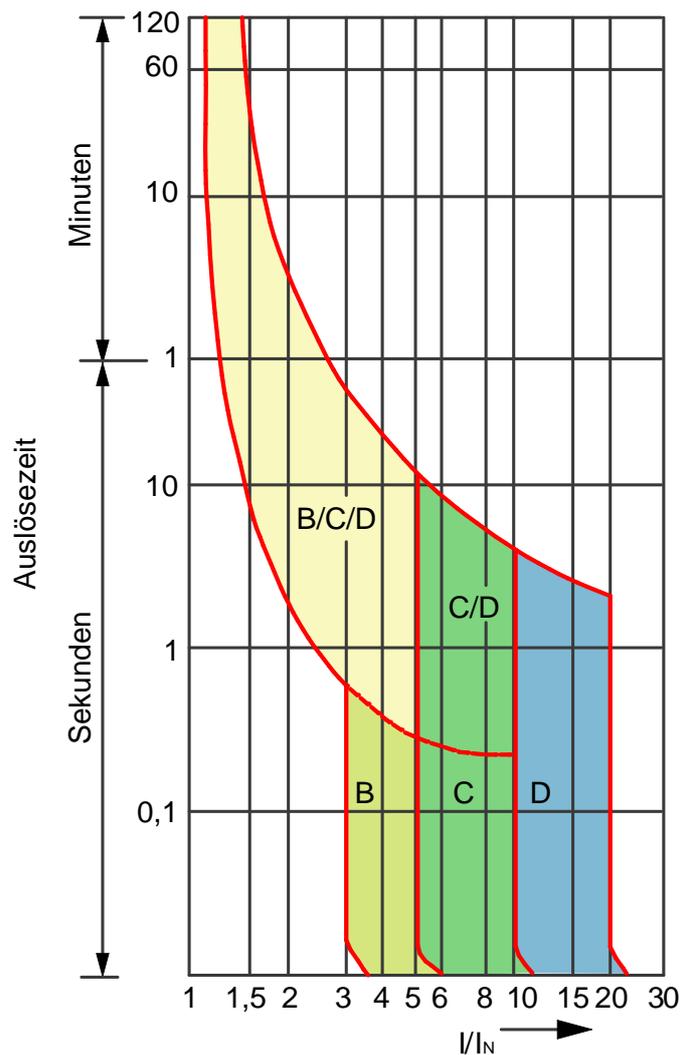


Abbildung 7: Auslösekennlinien eines Leistungsschalters mit unterschiedlicher Charakteristik (B, C, D).

#### 1.3.2 Arc Fault Circuit Interrupter (AFCI)

Beim Schutz von Wohnhäusern gegen Lichtbögen hat sich insbesondere in den USA der AFCI durchgesetzt (Abbildung 8). Seine Hauptaufgabe besteht darin, einen durch beschädigte Kabel hervorgerufenen Lichtbogen zu erkennen und sicher abzuschalten. Dieser kann zum Beispiel beim Beschädigen einer Leitung durch Knicken, Abscheren, Anbohren oder Ähnlichem ausgelöst werden [Parise

### 1.3 STAND DER TECHNIK

2011]. Da viele Häuser dort traditionell aus Holz gebaut werden, ist ein Schutz vor Kabelbränden in der Hausinstallation besonders wichtig. Ein unbemerkter Kabelbrand in einer Holzwand würde ansonsten schnell zu einem Hausbrand führen. Der AFCI wird ähnlich dem FI (Fehlerstromschutzschalter) in die Hausinstallation integriert und ist in den USA für Bad und Schlafzimmer vorgeschrieben.



Abbildung 8: AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter) von Siemens

Der AFCI arbeitet nach dem Prinzip der Strommessung (Abbildung 9). Der zu schützende Stromkreis wird durch den Schalter geschleift. Der Verbraucherstrom wird gemessen und auf Merkmale hin untersucht, die so nur bei einem Lichtbogen auftreten. Zumeist werden dabei charakteristische hochfrequente Anteile im gemessenen Strom ausgewertet. Überschreiten diese einen voreingestellten Wert, löst der AFCI aus und trennt den Stromkreis. Da Verbraucher, wie beispielsweise bürstenkommutierte Elektromotoren, ähnliche Merkmale im Stromverlauf verursachen können, wie die zur Lichtbogendetektion herangezogenen, kann es vereinzelt zu Fehlauflösungen kommen [Restrepo 2007]. Je nach Hersteller können auch weitere Erkennungsalgorithmen verwendet werden, die die Betriebssicherheit erhöhen sollen. Zahlreiche Veröffentlichungen haben sich in den letzten Jahren mit dem AFCI beschäftigt [Wafer 2005].

## 1.3 STAND DER TECHNIK

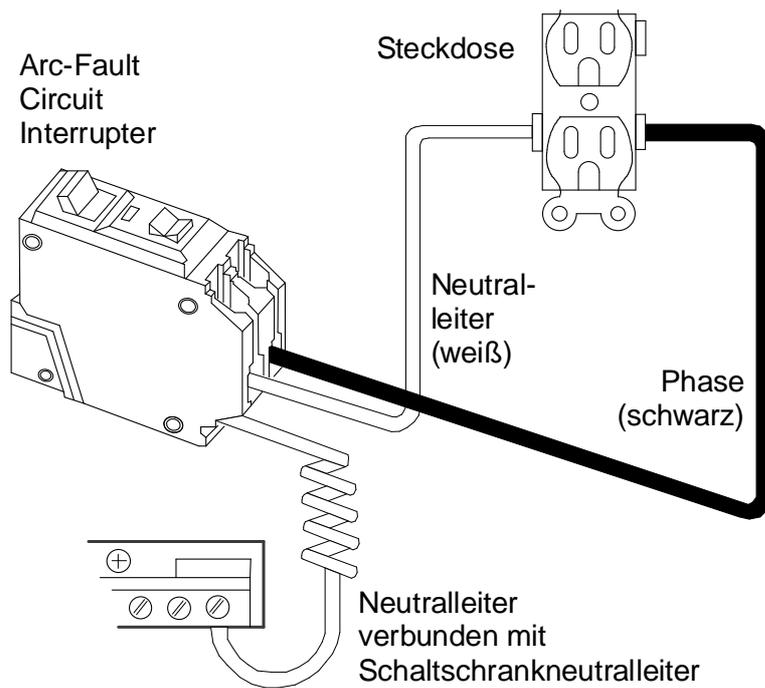


Abbildung 9:  
Funktionsschema des AFCI  
[GE 2001].

Da der AFCI auch serielle Lichtbögen erkennen muss (durchtrennte Leitung), ist sein Einsatzgebiet ähnlich dem eines Schutzes vor stromschwachen Störlichtbögen in Schaltanlagen. Es wird beim AFCI jedoch davon ausgegangen, dass ein Lichtbogen aus einem beschädigten Kabel in einer Hausinstallation hervorgeht, was die Zünd- und Brenneigenschaften eines Lichtbogens stark beeinflusst. Zudem soll ein Lichtbogen bei im Hausbereich üblichem Nennstrom von 16 A erkannt werden. Ein Lichtbogen hat laut [Shea 2010] in diesem Strombereich andere Brenneigenschaften als ein Lichtbogen in einer Schaltanlage, in der deutlich höhere Lichtbogenströme auftreten können. Insbesondere hochfrequente Stromanteile, welche beim AFCI als Detektionsmerkmal verwendet werden, nehmen mit zunehmender Lichtbogenstromstärke ab [Shea 2011]. Deshalb sind auch die Lichtbogendetektionsverfahren des AFCI nicht automatisch für die Erkennung von Lichtbögen in Schaltanlagen anwendbar.

### 1.3.3 Optische Lichtbogendetektion

Eine Möglichkeit zur schnellen Erkennung von Störlichtbögen ist die Erkennung eines Lichtbogens aufgrund seines emittierten Lichts. Als Beispiel kann das Schutzsystem Arcon [Könen 2003, Esser 2009] dienen, welches auf einer optischen Erfassung von Lichtbogenfehlern mittels Lichtwellenleiter basiert. Das emittierte Licht des Lichtbogens koppelt in einen in der Schaltanlage verlegten blanken Lichtwellenleiter ein. Optische Sensoren in der Auswerteeinheit erkennen insbesondere die durch den Lichtbogen emittierte hohen UV-Anteil im Licht und lösen einen Kurzschließer aus. Der Kurzschließer wird eingesetzt, um eine möglichst schnelle Lichtbogenlöschung

### 1.3 STAND DER TECHNIK

zu erreichen, da das Ansteuern des Leistungsschalters zu lange dauern würde. Durch das Kurzschließen des Stromkreises vor der Fehlerstelle fließt über diese kein Strom mehr und der Lichtbogen erlischt. Der über den Kurzschließer fließende Kurzschlussstrom wird vom Leistungsschalter abgeschaltet, ohne dass bis dahin ein Lichtbogen brennt. Die Kombination aus Erfassungseinheit und Kurzschließer erlaubt es, einen auftretenden Störlichtbogen nach 2 ms abzuschalten [Schumacher 2005]. In (Abbildung 10) ist schematisch der Aufbau einer optischen Lichtbogendetektion der Firma Eaton-Möller dargestellt. Die Master-Einheit (1 ARC-EM) wertet die durch die Slave Einheiten (2 ARC-EL3) übermittelten Daten aus und gibt das Signal zum Kurzschließen an das Löschgerät (5 ARC-AT). Die linienförmigen Lichtsensoren (3 ARS-SL), in Form von blanken Lichtwellenleitern, werden entlang der zu schützenden Sammelschienen verlegt und an die Slave-Einheiten angeschlossen.

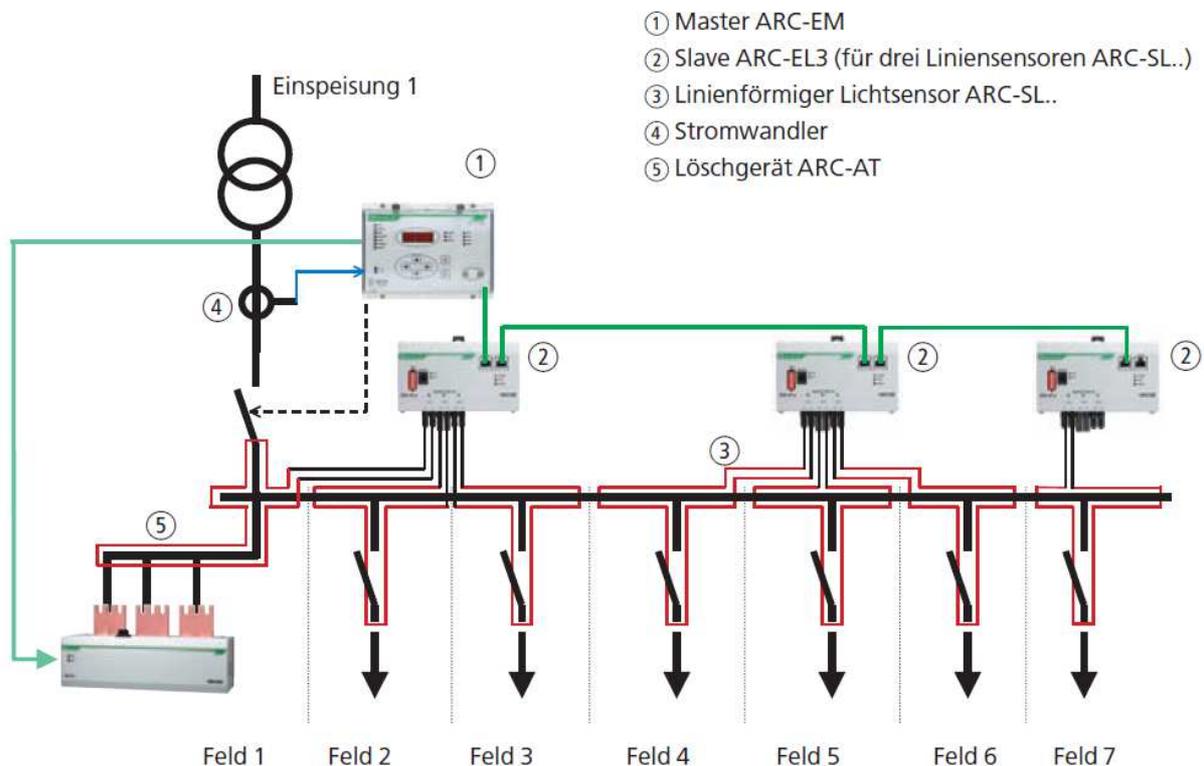


Abbildung 10: Schutzkonzept der Lichtbogenerkennung durch das System Arcon. Rot sind die Lichtwellenleiter dargestellt, die an allen Sammelschienen in den verschiedenen Feldern verlegt sind. [Esser 2009]

Vorteile des Verfahrens:

- Da nur die optischen Merkmale eines Lichtbogens ausgewertet werden, ist die Wahrscheinlichkeit einer Fehlalarmierung im Verhältnis zu Verfahren der Lichtbogenerkennung über Merkmale im Stromverlauf geringer.

## 1.4 ZIEL DER ARBEIT

- Der Schutz umfasst den kompletten Strombereich der Schaltanlage. Auch stromschwache Störlichtbögen können erkannt werden, sofern sie im Bereich eines verlegten Lichtwellenleiters brennen.
- Im System Arcon ist die Erkennung des Lichtbogens mit einem Kurzschließer gekoppelt. Dieser löst nach Ansprechen des Schutzes einen massiven Kurzschluss aller drei Leiter aus. So wird zum einen der Lichtbogen gelöscht und zum anderen eine schnelle Abschaltung des Fehlers durch vorgelagerte Schutzgeräte gewährleistet.

Nachteile der optischen Lichtbogendetektion sind:

- Für einen kompletten Schutz der Anlage müssen die Lichtwellenleiter so verlegt werden, dass es keine „blinden Stellen“ in der Anlage gibt. Es muss immer eine direkte Sichtlinie zwischen einem möglichen Lichtbogen und dem Lichtwellenleiter geben. Daher müssen sehr viele Lichtwellenleiter verlegt werden.
- Jeder verlegte Lichtwellenleiter muss an eine Auswerteeinheit angeschlossen werden. Jede Auswerteeinheit kann nur eine begrenzte Anzahl von Leitern auswerten. Für große Schaltanlagen mit vielen Feldern werden sehr viele Auswerteeinheiten benötigt.
- Die Installation des Schutzes ist aufwändig, zeitintensiv und erfordert erfahrene Fachkräfte. Insbesondere bei einer Nachrüstung können dabei hohe Arbeitskosten entstehen.
- Der Preis für die Komponenten des optischen Störlichtbogenschutz ist aufgrund seiner Komplexität und des benötigten Schaltungsaufwandes sehr hoch. Er eignet sich daher nicht für den Massenmarkt sondern nur für Spezialanwendungen.
- Die Schaltanlage muss lichtdicht sein. Von außen eindringendes Fremdlicht kann sonst zu Fehlauflösungen führen.

## 1.4 Ziel der Arbeit

Derzeit sind Niederspannungsanlagen nur unzureichend vor stromschwachen Störlichtbögen geschützt. Störlichtbögen, die nicht zu einer Überschreitung des Nennstromes der Anlage führen, werden nicht, oder zu spät erkannt. Diesen „blinden Flecken“ im Anlagenschutz gilt es zu schließen. Der Einsatzbereich eines Schutzes vor stromschwachen Störlichtbögen liegt unterhalb des Nennstromes und damit links der Auslösekennlinie eines Leistungsschalters (siehe Abbildung 11). Das Ziel dieser Arbeit ist daher die Erarbeitung eines Konzeptes zum besseren Schutz von Schaltanlagen vor stromschwachen Störlichtbögen, die im Bereich unterhalb des Nennstromes einer Schaltanlage liegen.

## 1.4 ZIEL DER ARBEIT

Dazu soll zunächst der stromschwache Störlichtbogen mit einem Messaufbau im Labor nachgebildet werden. Sowohl serielle als auch parallele Lichtbögen sollen mittels möglichst realistischer Fehlernachbildungen reproduzierbar erzeugt werden. Durch Messung der Lichtbogenströme sollen mögliche vorhandene Muster, die einen Lichtbogen von einem Verbraucher am Netz unterscheiden, im Zeit- und Frequenzbereich untersucht werden. Die Auswertung konzentriert sich auf den Lichtbogenstrom. Die Auswirkungen des Lichtbogens auf die Betriebsspannung werden nur am Rande untersucht. Da bei der betrachteten Niederspannungsversorgung von einem starren Netz mit eingepprägter Spannung ausgegangen werden kann, ist ein nennenswerter Einfluss des Lichtbogens auf die Versorgungsspannung nicht zu erwarten.

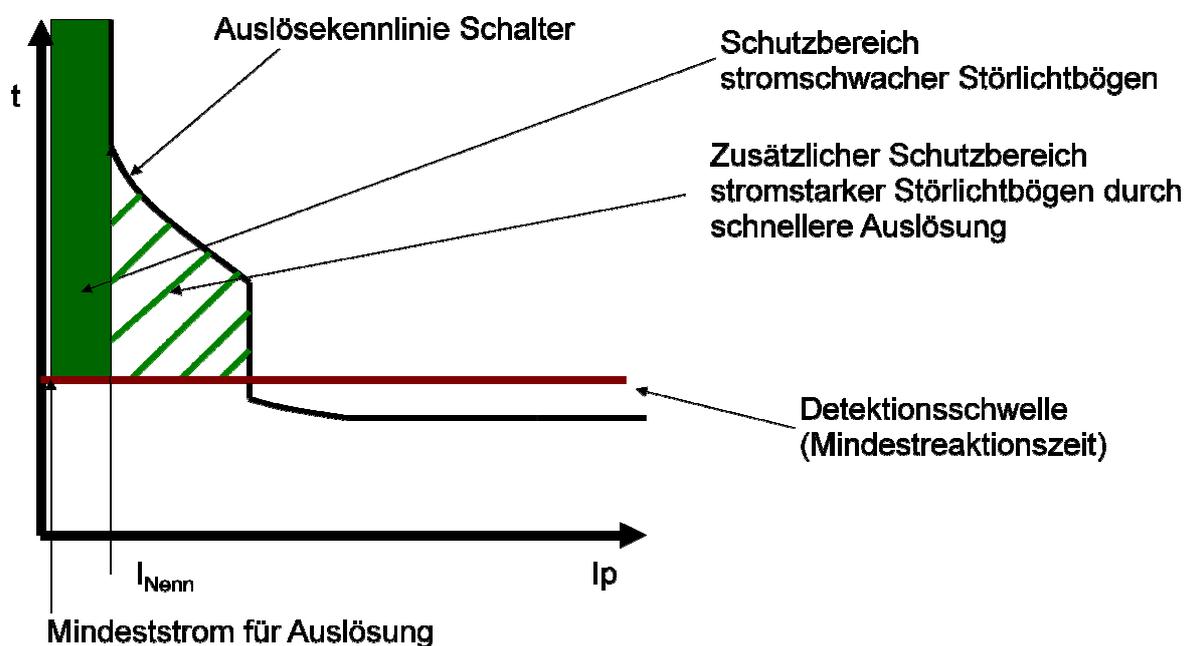


Abbildung 11: Schutzbereich vor stromschwachen Störlichtbögen [Fischer 2008].

Mit Hilfe der charakteristischen Lichtbogenmerkmale sollen Algorithmen erarbeitet werden, mit denen ein gemessener Stromverlauf auf das Vorhandensein eines Störlichtbogens hin untersucht werden kann. Die Algorithmen untersuchen den Strom sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich auf jeweils ein Lichtbogenkriterium. Die Verfahren werden als Matlab-Programme realisiert, in die ein gemessener Stromverlauf eingelesen werden kann.

### Struktur der Arbeit

In **Kapitel 2** werden die Grundlagen zu Lichtbögen im Allgemeinen, sowie die Besonderheiten des Wechsellspannungslichtbogens beschrieben. Zudem wird auf den bisherigen Stand zum Schutz vor Lichtbogenfehlern in Schaltanlagen eingegangen.

## 1.4 ZIEL DER ARBEIT

**Kapitel 3** beschreibt den Messaufbau zur Erzeugung von parallelen und seriellen Lichtbogenfehlern und dabei beobachtete Erscheinungsformen.

Die gemessenen Stromverläufe der Lichtbögen werden in **Kapitel 4** ausgewertet. Sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich lassen sich charakteristische Merkmale von Störlichtbögen definiert. Im Frequenzbereich sind zudem Unterschiede zwischen den Spektren von Verbraucherströmen und Lichtbogenströmen beschrieben.

**Kapitel 5** enthält die Auswertalgorithmen zur Erkennung von stromschwachen Störlichtbögen. Nachdem im vorangehenden Kapitel Charakteristiken für Lichtbögen definiert wurden, werden diese nun genutzt, um über verschiedene Auswerteverfahren einen Lichtbogen zu erkennen. Ebenso werden die Grenzen, in denen ein Lichtbogen sicher erkannt werden kann, aufgezeigt.

Eine kurze Zusammenfassung und ein Ausblick in **Kapitel 6** schließen die Arbeit ab.

## 1.4 ZIEL DER ARBEIT

## 2 Grundlagen zu Störlichtbögen in Schaltanlagen

Der Wechselstromlichtbogen ist ein seit langem bekanntes und untersuchtes Phänomen. Einer der Hauptgründe sich in der Energieversorgung zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf die Wechselspannung zu konzentrieren war die bessere Beherrschung von Schaltvorgängen aufgrund der natürlichen Nulldurchgänge, die im zeitlichen Verlauf des Stromes auftreten [Heuck 2002]. Ein Wechselstromlichtbogen kann daher im Gegensatz zum Gleichstromlichtbogen durch einen Schalter deutlich einfacher gelöscht werden.

Man kann grundsätzlich zwischen Schaltlichtbogen und Störlichtbogen unterscheiden. Der Schaltlichtbogen tritt beim Trennen oder Verbinden von elektrischen Kontakten auf. Der Störlichtbogen tritt bei ungewollter Kontaktierung unterschiedlicher Potentiale und bei beschädigten Verbindungen auf. Beide Lichtbögen müssen für eine sichere Wechselstromtechnik beherrscht werden. Es wurden daher schon zu Beginn der Elektrifizierung Ende des 19. Jahrhunderts Untersuchungen zu Wechselstromlichtbögen angestellt, weshalb er als gut erforscht gilt. Im Niederspannungsbereich wurde hauptsächlich der Schaltlichtbogen untersucht, sowie in den letzten Jahrzehnten der stromstarke, durch einen Kurzschluss ausgelöste Störlichtbogen.

In diesem Kapitel soll auf die Grundlagen der Gasentladung und des Wechselstromlichtbogens eingegangen werden. Es werden Begriffe zum Verständnis der Bogenentladung, auch Lichtbogen genannt, erklärt.

### 2.1 Grundlagen der Gasentladung

Die zur Gasentladung gehörenden Themengebiete der Atomphysik, der Gaskinetik, der Plasmaphysik und der thermodynamischen Wechselwirkung von Plasma und Festkörper werden hier aufgrund ihres Umfangs nicht ausführlich behandelt. Umfangreiche Literatur zu diesen Themen ist weit verbreitet. Die hier vorgestellten Grundlagen wurden hauptsächlich aus dem Standardwerk zur Lichtbogenphysik von Werner Rieder entnommen [Rieder 1967].

Weitere Grundlagen zum Lichtbogen lassen sich der allgemeinen Plasmaforschung [Nasser 1971] und der Schaltgeräteforschung entnehmen. Hier sind in den letzten 50 Jahren die meisten Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Lichtbogenverhaltens entstanden. Hervorzuheben sind hierbei die grundlegenden Arbeiten von Ragnar Holm, welche die physikalischen Eigenschaften elektrischer Kontakte beschreiben. Wegweisend waren hierbei vor allem die Arbeiten zum elektrischen Engewiderstand, welche zum

## 2.1 GRUNDLAGEN DER GASENTLADUNG

Verständnis der Lichtbogenbildung bei schlechten elektrischen Verbindungen und sich öffnenden Kontakten beigetragen haben [Holm 1941], [Holm 1958]. Zusammenfassungen zum Thema elektrischer Kontakte und Schaltvorgängen sind unter anderem von [Vinaricky 1993] und [Schröder 1993] verfügbar. In den folgenden Unterkapiteln werden einige grundlegende physikalische Prozesse der Lichtbogenbildung beschrieben.

### 2.1.1 Elektronenaustritt aus Metallen

*“Jede Gasentladung ist Teil eines Stromkreises, der in der Regel durch metallische Leiter geschlossen wird. Der Stromübergang vom Metall in den Gasraum findet an den Oberflächen der Elektroden statt.“* [Rieder 1967]

Die Elektronenemission aus der Elektrodenoberfläche kann entweder über Thermoemission oder aber über Feldemission erfolgen. Die Feldemission benötigt hohe Feldstärken an der Elektrodenoberfläche, die bei den hier betrachteten Spannungsebenen nicht auftreten. Lediglich die Mikrofeldstärke aufgrund der Oberflächenrauheit kann hoch genug sein um geringe Feldemission zuzulassen. Die Austrittsarbeit kann zudem durch Oberflächenschichten wie Oxide und Salze wirksam herabgesetzt werden. Die Thermoemission tritt bei Temperaturen auf, die durch das heiße Plasma des Lichtbogens und durch den Kathodenfall (siehe 2.1.3) erreicht werden können. Dabei hängt die Austrittsarbeit stark vom Elektrodenmaterial ab. Hierzu wurden in verschiedenen Quellen Daten veröffentlicht [Vinaricky 2001].

### 2.1.2 Gasentladungsarten

Die Art einer elektrischen Entladung wird abhängig von der Stromstärke in Dunkelentladung, Glimmentladung und Bogenentladung (Lichtbogen) eingeteilt. Aufgrund der hohen Stromstärken in der Schaltanlage infolge der Nähe zur Einspeisung tritt bei parallelen Störlichtbögen immer eine Bogenentladung auf. Dabei variiert die Bogenspannung je nach Höhe des Lichtbogenstromes (siehe Abbildung 12). Die Brennspannung variiert zudem je nach Art des Elektrodenmaterials. Die in Schaltanlagen verwendeten Kupfersammelschienen haben ohne Berücksichtigung von Fremdschichten eine Mindestbrennspannung von 12-13 V und einen Mindeststrom von 0,4 A [Vinaricky 2001].

## 2.1 GRUNDLAGEN DER GASENTLADUNG

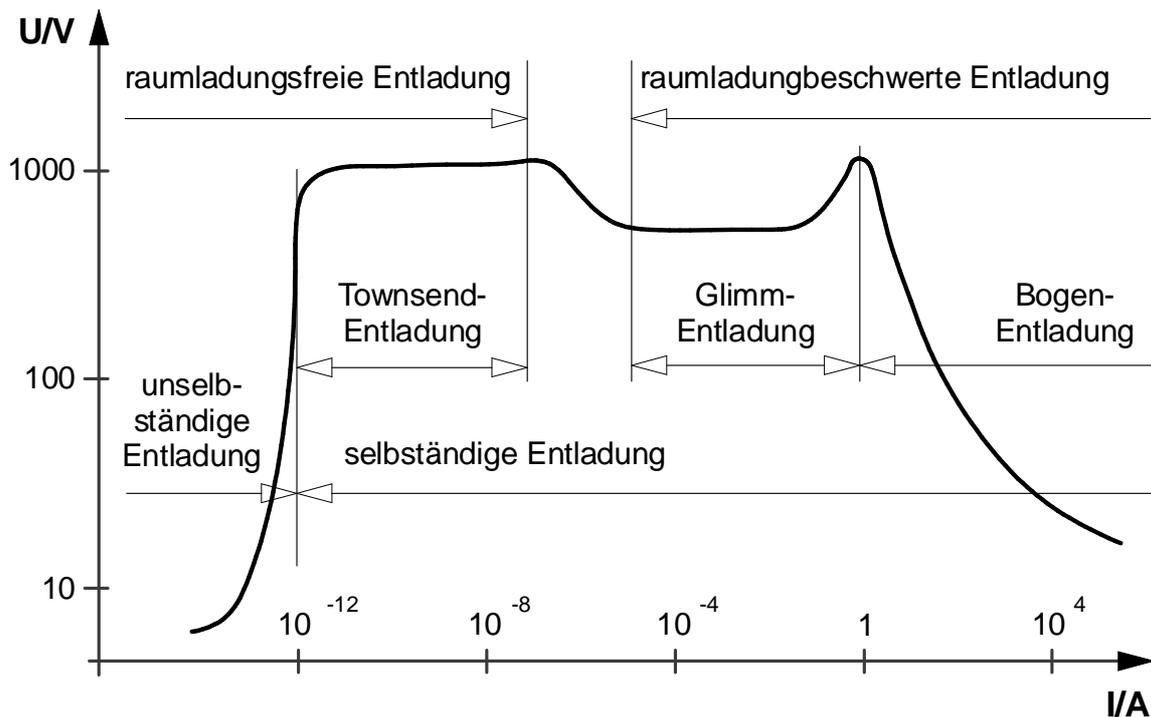


Abbildung 12: Strom-Spannungs-Charakteristik der verschiedenen Gasentladungsbereiche [Küchler 2004].

Bei den Bogenentladungen wird zwischen selbständigen und unselbständigen Entladungen unterschieden. Dies hängt davon ab, ob die Entladung sich selbst aufrecht erhält oder ob sie aufgrund des fehlenden Ladungsträgernachschubs wieder erlischt. Da sich die Entladungen in einer Schaltanlage durch die vorherrschenden Potentialunterschiede und die durch das Netz zugeführte Energie selbst erhalten, kann grundsätzlich von selbständigen Entladungen ausgegangen werden.

Bei der Bogenentladung werden im Gegensatz zu Entladungsformen mit geringeren Strömen die Ladungsträger nicht mehr durch Stoßionisation erzeugt, sondern durch die hohen Temperaturen an der Kathode, sowie den Folgen eines thermischen Gleichgewichts im Plasma [Rieder 1967]. Diese Mechanismen setzen eine Mindeststromstärke von ca. einem Ampere bei einer Entladung in Luft voraus.

### 2.1.3 Aufbau der Lichtbogensäule

Der zwischen zwei Elektroden brennende Lichtbogen kann, wie in Abbildung 13 gezeigt, in drei Bereiche unterteilt werden. Den größten Teil des Lichtbogens macht die Bogensäule, auch Plasma genannt, aus. Die Säule besteht aus heißem und zum größten Teil ionisiertem Gas. In ihr ist die Feldstärke nahezu konstant und abhängig von der Zusammensetzung des Gasgemisches, dem Druck und den Kühlbedingungen. Sie kann näherungsweise für frei brennende Lichtbögen

## 2.1 GRUNDLAGEN DER GASENTLADUNG

mit  $2 \times 10^3$  V/m angenommen werden [Lindmayer 1987]. Das elektrische Feld im Plasma verursacht eine Driftbewegung der Ladungsträger und ermöglicht so den Transport des Stromes.

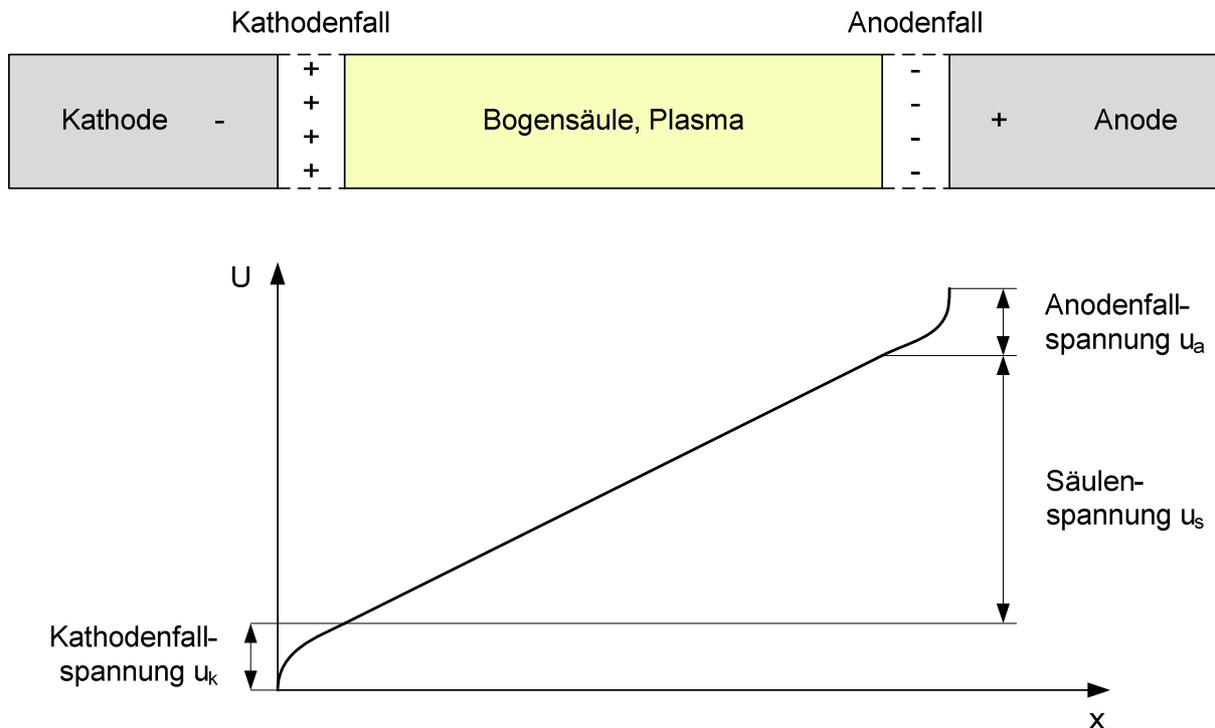


Abbildung 13: Schematischer Aufbau des Lichtbogens zwischen zwei Elektroden. Kennlinie der Lichtbogenspannung zwischen Kathode und Anode

An den Elektroden entstehen aufgrund der Abwanderung von Ladungsträgern Zonen mit entsprechender Raumladung. Diese Zonen werden vor der Kathode mit negativem Potential „Kathodenfall“ und vor der Anode mit positivem Potential „Anodenfall“ genannt. Die Beschleunigung der positiven Ionen im Kathodenfall verursacht nach dem Stoß mit der Kathode eine Erhitzung, was zur Thermoemission von Elektronen führt. Bei Metallen mit geringer Siedetemperatur wie beispielsweise Kupfer, können vor der Kathode Brennflecken mit Stromdichten von bis zu  $10^{11}$  A/m<sup>2</sup> auftreten [Lindmayer 1987]. Die Ausdehnung von Kathodenfall und Anodenfall hängt von dem verwendeten Elektrodenmaterial ab. Die Werte für Kathoden- und Anodenfall liegen jeweils meist über 10 V. Dies führt dazu, dass zumindest für Kupferelektroden die Mindestbrennspannung eines Lichtbogens auch in diesem Spannungsbereich liegt.

### 2.1.4 Die Lichtbogenkennlinien

Ein stehender, kontinuierlich brennender Lichtbogen ist bei Gleichspannung mit einem ohmschen Widerstand vergleichbar. Unterschiede bestehen aber in der Kennlinie, die beim Lichtbogen keinen linearen Zusammenhang zwischen

## 2.1 GRUNDLAGEN DER GASENTLADUNG

Strom und Spannung aufweist, wie es beim ohmschen Widerstand der Fall ist. Die  $U/I$  Kennlinie des Lichtbogens flacht mit zunehmender Stromstärke stark ab. Je größer der Strom, desto größer wird auch die Temperatur des Lichtbogens. Dadurch steigt die Leitfähigkeit und es fällt eine geringe Brennspannung zwischen den Lichtbogenelektroden ab. Bei weiter steigendem Strom nähert sich die Brennspannung einem stationären Wert an, der unter anderem vom Elektrodenabstand und dem Elektrodenmaterial abhängt. Die Kennlinie wird darum auch stationäre Lichtbogenkennlinie genannt. In Abbildung 14 ist die Lichtbogenkennlinie für 3 unterschiedliche Lichtbogenlängen dargestellt. Die empirische Formel zur Bestimmung der stationären Lichtbogenkennlinie geht auf [Ayrton 1902] zurück.

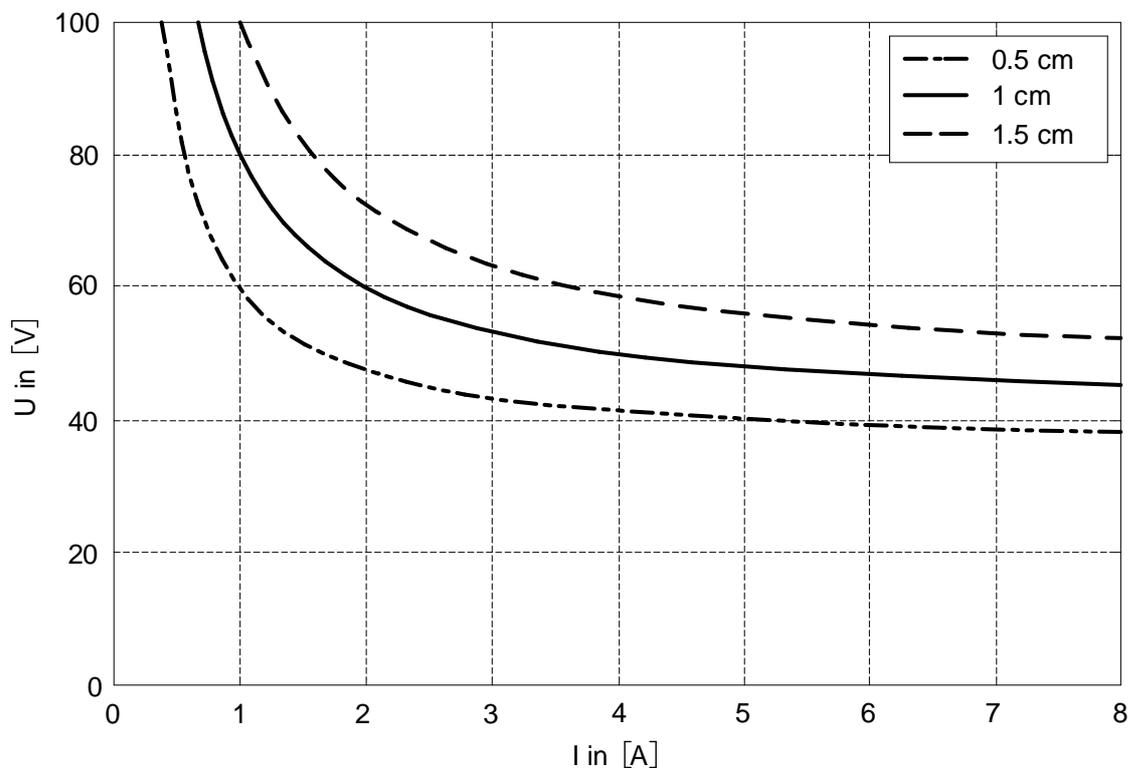


Abbildung 14: Stationäre Lichtbogenkennlinie mit unterschiedlichen Lichtbogenlängen (0,5 – 1,5 cm) nach Ayrton-Gleichung [Crastan 2012].

Bei Wechselspannung wird die Lichtbogenkennlinie hingegen dynamisch (siehe Abbildung 15). Durch die sinusförmige Versorgungsspannung ändert sich auch die  $U/I$  Kennlinie des Lichtbogens mit der ansteigenden und abfallenden Spannung. Besonders kurz vor und nach dem Nulldurchgang zeigen sich Abweichungen zur stationären Lichtbogenkennlinie. Es kann ein gewisser Hystereseeffekt beobachtet werden. Das Erlöschen des Lichtbogens im Nulldurchgang spiegelt sich in der  $U/I$  Kennlinie im Ursprung wieder.

## 2.2 EIGENSCHAFTEN DES WECHSELSTROMLICHTBOGENS

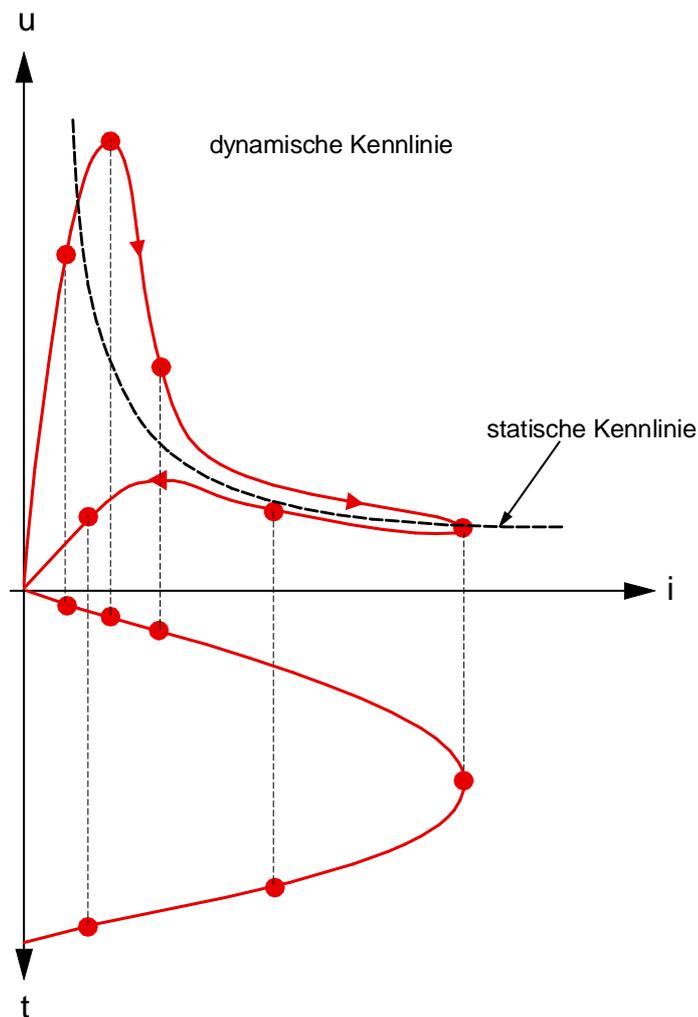


Abbildung 15: Dynamische Lichtbogenkennlinie bei Wechselspannung [Crastan 2012].

Die einfachste Möglichkeit einen Wechselspannungslichtbogen schaltungstechnisch darzustellen besteht darin, einen zuschaltbaren Widerstand anzunehmen. Im durchgezündeten Zustand hat der Lichtbogen einen Widerstand der aus der Brennspannung zwischen den beiden Elektroden ermittelt werden kann. Die Brennspannung ist die Summe aus Anodenfall, Kathodenfall und Spannungsabfall der Bogensäule. Im erloschenen Zustand ist der Isolationswiderstand abhängig vom Abstand zwischen den Elektroden und den eventuell noch vorhandenen Ladungsträgern im Luftraum dazwischen. Er beträgt meist einige Megaohm.

## 2.2 Eigenschaften des Wechselstromlichtbogens

### 2.2.1 Das Zünden des Lichtbogens

Charakteristisch für den Lichtbogen ist, im Gegensatz zu anderen Verbrauchern, das Zünden nach dem Spannungsnulldurchgang (Flanke). Durch die

## 2.2 EIGENSCHAFTEN DES WECHSELSTROMLICHTBOGENS

lawinenartige Vermehrung von Ladungsträgern zwischen den Elektroden und dem Ausbilden eines Plasmakanals, wird ein sehr schneller Anstieg des Stromflusses ermöglicht. Der Lichtbogenstrom steigt von Null aus an und folgt dann der steigenden Spannung (siehe Abbildung 16). Dieser Zündvorgang läuft je nach Gasgemisch der Funkenstrecke und Feldstärke unterschiedlich schnell ab. Zudem spielt die Leitungsinduktivität der Stromversorgung eine Rolle (siehe Kapitel 4.1.1). Bei hohen Spannungen und mit dem Isoliermedium SF<sub>6</sub> können Durchschläge mit Anstiegszeiten von wenigen Nanosekunden erreicht werden. Durch die geringere Spannung und der Zündung in Luft sind die Anstiegszeiten des Stromes in Niederspannungsschaltanlagen wesentlich langsamer, wie Messungen in Kapitel 4.1.1 zeigen werden.

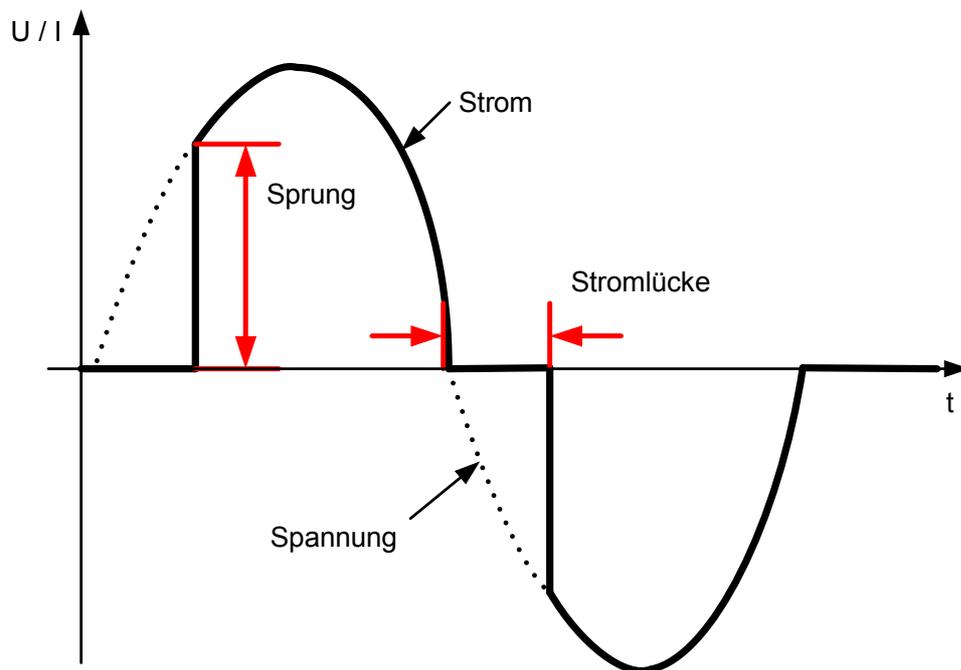


Abbildung 16: Zwei charakteristische Merkmale des Wechselspannungslichtbogens.

Die Zeit vom Stromnulldurchgang bis zur Zündung des Lichtbogens (Stromlücke) kann unterschiedlich lang sein. Sie hängt von den Vorbedingungen des Gasentladungsraumes ab. Nach [Rieder 1967] kann beim Wiedorzünden grundsätzlich zwischen kalter und heißer Kathode unterschieden werden:

### Wiedorzünden bei heißer Kathode

*„Emittiert die neue Kathode infolge hoher Resttemperatur [durch vorangegangene Lichtbögen] Thermoelektronen in großer Zahl, dann kann der Strom unter Umständen ohne Störung sofort nach dem betriebsfrequenten Nulldurchgang weiterfließen, da alle Voraussetzungen für den Aufbau eines kathodischen Bogenmechanismus schon beim Auftreten der normalen Brennspannung des Bogens gegeben sind.“ [Rieder, 1967]*

### **Wiederzünden bei kalter Kathode (erste Zündung)**

*„Bei den meisten Metallen wird die Elektrodentemperatur durch den Schmelzpunkt, jedenfalls aber durch den Siedepunkt, auf Werte beschränkt, bei welchen die Thermoelktronenemission zumindest zu gering ist, um ein ungestörtes Weiterbrennen des umgepolten Bogens zu gestatten. In diesen Fällen bedarf es einer Wiederzündspannung, die höher als die normale Brennspannung ist („Zündspitze“).“ [Rieder, 1967].*

Nach [Lindmayer 1987] ist der Siedepunkt von Kupfer so niedrig, dass die Thermoelktronenemission nicht ausreicht um den Lichtbogen ohne Unterbrechung weiterbrennen zu lassen. Durch das Abreißen des Lichtbogens bis zum Erreichen der Wiederzündspannung kommt es zu den bekannten Stromlücken. Die Wiederzündspannung hängt vom Elektrodenmaterial, von der Resttemperatur des Plasmas, der Netzfrequenz und von der möglichen Anstiegsgeschwindigkeit des Stroms ab, welcher wiederum für serielle Lichtbogenfehler von den angeschlossenen Verbrauchern abhängt.

### **2.2.2 Erlöschen des Lichtbogens**

Nach Überschreiten des Scheitelwertes nimmt der sinusförmige Strom kontinuierlich ab. Der Ladungsträgertransport durch den Plasmakanal wird weniger. Dadurch kühlt auch das Plasma selbst ab. Der Lichtbogen erlischt spätestens beim Erreichen des Spannungs- bzw. Stromnulldurchgangs. Das Plasma kann dann durch das fehlende elektrische Feld nicht mehr aufrecht erhalten werden und der Ladungsträgertransport bricht zusammen. Der Plasmakanal kühlt ab und der Stromfluss ist unterbrochen. Ist das Plasma und die Oberflächen der Lichtbogenfußpunkte sehr heiß, dann kann der Stromfluss durch Thermoemission noch einen Augenblick weitergeführt werden. Spätestens jedoch, wenn die Spannung die Polarität wechselt, ist auch hier der Stromfluss unterbrochen.

## **2.3 Lichtbogenfehler in Niederspannungsschaltanlagen**

Die Auswirkungen von Störlichtbögen auf Schaltanlagen wurden in vielen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht [Land 2003 /1]. Hauptaugenmerk ist dabei zumeist die Verbesserung des Personenschutzes und die Minimierung der schädlichen Auswirkungen eines Störlichtbogens. Dabei werden sowohl aktive als auch passive Maßnahmen vorangetrieben [Brechtken 2001].

### **Aktiver Störlichtbogenschutz**

Unter diesem Punkt sind alle Maßnahmen zu verstehen, die den Störlichtbogen aktiv verhindern sollen, bevor er überhaupt auftritt. Hierzu gehört beispielsweise, dass Sammelschienen isoliert werden. Dünne

## 2.3 LICHTBOGENFEHLER IN NIEDERSpannungSSCHALTANLAGEN

Kunststoffummantelungen verhindern, dass bei Berührung der Sammelschienen mit leitenden Fremdkörpern ein Kurzschluss entstehen kann. Größere Kriech- und Luftstrecken sowie erhöhter Schutz vor Verschmutzung sollen ebenso den Störlichtbogenschutz erhöhen. Der größte Nachteil von aktiver Störlichtbogenvermeidung liegt in den hohen Kosten im Verhältnis zum erwarteten Nutzen.

### **Passiver Störlichtbogenschutz**

Unter dem Überbegriff des passiven Schutzes werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die nicht die Entstehung eines Lichtbogens verhindern sollen, sondern seine Auswirkungen nach Auftreten des Fehlerfalles. Dazu gehört der mechanische Schutz, um die unmittelbaren Auswirkungen auf die Schaltanlage zu minimieren. Einzelne Felder der Schaltanlage werden so abgeschottet, dass ein Lichtbogen nicht auf andere Felder übergreifen kann. Durch Isolationsmaßnahmen wird die Lichtbogenwanderung unterbunden oder erschwert. Ebenso wird die Schaltanlage so ausgelegt, dass sie für eine gewisse Zeit den Auswirkungen des Lichtbogens (Hitze, Druck) standhalten kann, ohne außenstehende Personen zu gefährden. Zum passiven Störlichtbogenschutz zählen auch alle Schutzverfahren, die auf Druck, Licht, Temperatur, elektromagnetischer Strahlung oder charakteristischer Strommerkmale reagieren. Der in dieser Arbeit untersuchte Schutz vor stromschwachen Störlichtbögen zählt ebenfalls zu den passiven Schutzkonzepten.

### **Auswirkungen des Lichtbogens auf eine Schaltanlage**

Der Störlichtbogen und seine Begleiterscheinungen haben verschiedenste Auswirkungen auf die Schaltanlage und ihre Umgebung. Der Hauptschaden des Lichtbogens wird durch seine hohen Temperaturen hervorgerufen, die weit über dem Schmelzpunkt von gebräuchlichen Materialien in der Schaltanlagentechnik liegen. Hinzu kommt noch die hohe Wandergeschwindigkeit des Lichtbogens, wodurch er seine zerstörerische Wirkung auf die ganze Anlage ausbreiten kann. Die unmittelbaren Auswirkungen eines Lichtbogens sind:

- Plötzlicher Druckanstieg durch die schnelle Erhitzung des Lichtbogenplasmas. Die hohen Drücke innerhalb des Schaltanlagegehäuses können dieses sprengen und die Türen aufdrücken. So kann heißes Gas in die Umgebung kommen.
- Die hohen Temperaturen durch den Lichtbogen. Diese schmelzen Metalle und entzünden brennbare Materialien in der Schaltanlage, was auch nach Lichtbogenlöschung noch zu Bränden führen kann.
- Das Lichtbogenplasma strahlt sowohl im elektromagnetischen Bereich, als auch im optischen Bereich mit hoher Intensität. Einige Lichtbogenschutzverfahren machen sich dies zunutze.
- Der durch aufschmelzendes Material entstehende Metaldampf verteilt heißes Material in der gesamten Anlage und schlägt sich überall nieder.

## 2.3 LICHTBOGENFEHLER IN NIEDERSpannungSSCHALTANLAGEN

Selbst nicht unmittelbar vom Lichtbogen betroffene Anlagenteile können so in Mitleidenschaft gezogen werden.

- Der Lichtbogenwiderstand begrenzt den Lichtbogenstrom auf einen Wert unterhalb des theoretisch erreichbaren Kurzschlussstromes. Dies hat den Vorteil, dass der maximal mögliche Strom oft nicht erreicht wird und der Schaden geringer ist. Es kann aber auch vorkommen, dass Schutzrichtungen nicht auslösen, da der durch den Lichtbogenwiderstand begrenzte Strom unterhalb der Ansprechschwelle eines Lichtbogenschutzes liegt.

Die genannten Auswirkungen des Lichtbogens und ihr Einfluss auf die Anlage und ihre Umgebung wird von [Berger 2009] in Abbildung 17 zusammengefasst.

Zusätzlich können auch EMV-Probleme in der Steuerelektronik der Schaltanlage auftreten. Die Störaussendungen des Lichtbogen koppeln in die Datenleitungen der Schaltanlagenelektronik ein und verursachen dort Störungen in der Anlagensteuerung. In Mittelspannungsschaltanlagen wurden dazu bereits umfangreiche Untersuchungen gemacht [Burger 2011]

## 2.3 LICHTBOGENFEHLER IN NIEDERSpannungSSCHALTANLAGEN

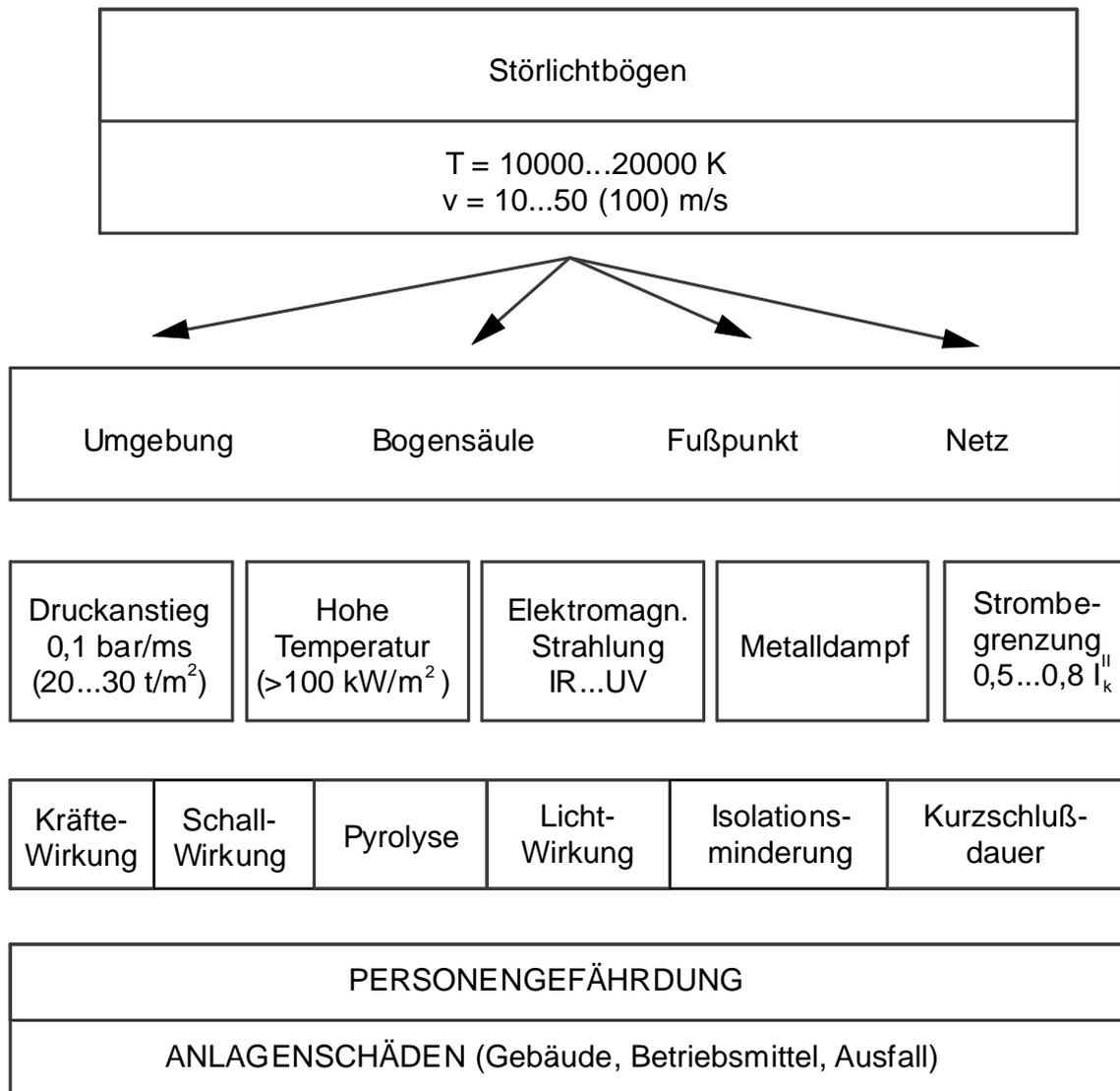


Abbildung 17: Auswirkungen von Störlichtbögen in elektrischen Schaltanlagen [Berger 2009]

## 2.3 LICHTBOGENFEHLER IN NIEDERSpannungSSCHALTANLAGEN

### 3 Versuchsaufbau zur Erzeugung von Lichtbögen

Zur Untersuchung der Eigenschaften eines Lichtbogens kann dieser sowohl simuliert, als auch in praktischen Versuchen nachgebildet werden. Insbesondere zur Untersuchung der dynamischen Eigenschaften des Lichtbogens und sein Verhalten bei veränderten Umgebungsbedingungen (Kontaktform und Material der Elektroden, Einfluss der Kühlung durch Löschbleche und Wandmaterialien, etc.) werden komplexe Simulationsmodelle erstellt. Durch die Vielzahl an theoretisch möglichen Parametern (siehe Abbildung 18), die einen Lichtbogen definieren, die Wechselwirkungen des Lichtbogens mit seiner Umgebung und die Störgrößen, die ein aussagekräftiges Ergebnis beeinflussen können, ist die Vorbereitung einer Simulation eine große Aufgabe. Eine große Anzahl von Veröffentlichungen und Dissertationen beschäftigen sich mit Teilaspekten von Lichtbögen, wie beispielsweise thermische Eigenschaften, Wechselwirkungen mit Oberflächen, oder elektromagnetischen Vorgängen im Plasma.

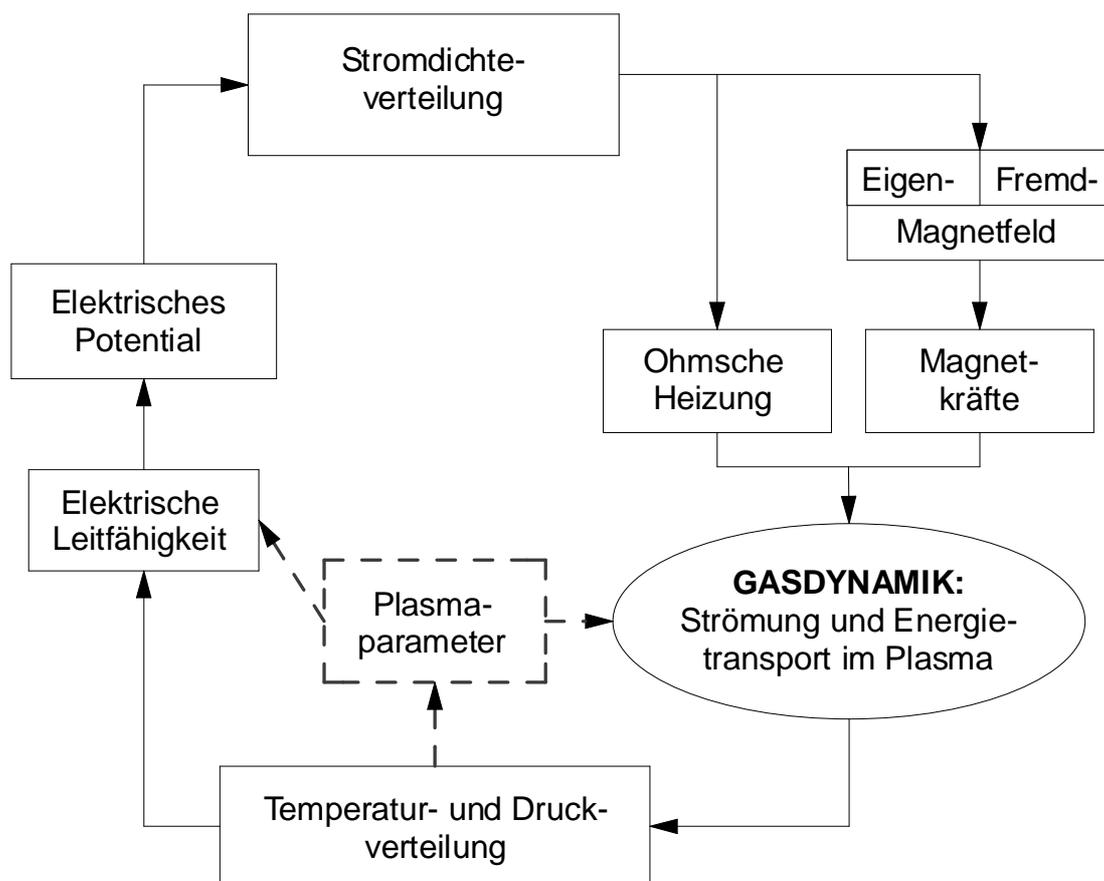


Abbildung 18: Gekoppelte physikalische Prozesse in der Säule eines Lichtbogens nach [Lindmayer 2009].

### 2.3 LICHTBOGENFEHLER IN NIEDERSPANNUNGSSCHALTANLAGEN

Einen Überblick über das weite Feld der Lichtbogensimulation und ihrer Einschränkungen und Vereinfachungen gibt [Lindmayer 2009]. Insbesondere durch die verschiedenen Wechselwirkungen beim Zünden und Brennen eines Lichtbogens, ist das Erstellen eines exakten Lichtbogenmodells sehr schwer umsetzbar [Kosse 2009].

Verfahren zur Erkennung von Störlichtbögen, die ausschließlich auf simulationsbasierten Lichtbogendaten beruhen, sind oft nur schwer mit der Realität vergleichbar [Zheng 2009]. Deshalb wurde in dieser Arbeit auf eine Simulation des Lichtbogens verzichtet und stattdessen der experimentelle Versuch vorgezogen. Dies hat den Vorteil, dass insbesondere stochastische Effekte, die speziell beim Zünden des Lichtbogens eine Rolle spielen, realistisch dargestellt werden können. Ebenso lassen sich aus Messungen deutlich mehr Informationen gewinnen als aus einer Simulation, in der alle Faktoren zuvor bekannt sein müssen. Die Messung hat den Nachteil, dass es Schwankungen in der Reproduzierbarkeit gibt. Parameter wie Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit, die einen Einfluss haben können, sind nur schwer reproduzierbar. Mit realitätsnahen Messungen könne jedoch relativ schnell erste Ergebnisse analysiert werden, ohne das Gesamtsystem erst komplett modellieren zu müssen.

Die beiden möglichen Brennarten des Lichtbogens, seriell und parallel, werden so realistisch wie möglich nachgebildet. Dabei müssen jedoch Vereinfachungen angenommen werden. Bisher sind stromschwache Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen, wie in Kapitel 1.2 erwähnt, nur unzureichend dokumentiert wurden. Einzig für gebrochenen Kabelverbindungen und beschädigte Isolierungen liegen umfangreiche Untersuchungen vor [Hetzmannseder 2001, Restrepo 2007]. Für parallele stromschwache Lichtbogenfehler in Schaltanlagen gibt es keine ausreichende Anzahl von Untersuchungen. Es gibt nur nichtveröffentlichte Erfahrungswerte der Hersteller. Jede Art von Fehlernachbildung muss daher unter dem Gesichtspunkt der vereinfachten Annahme von Ursachen für den Störlichtbogen und Umgebungsbedingungen der Fehlerstelle betrachtet werden.

Um genügend Lichtbogenmerkmale in einem gemessenen Stromverlauf darzustellen und um einem später zu definierenden Detektionsverfahren genügend Messdaten zur Verfügung zu stellen wird festgelegt, dass ein Lichtbogen möglichst 8-10 Halbwellen brennen sollte. So kann gewährleistet werden, dass genügen charakteristische Merkmale aufgezeichnet werden, um sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich eine Auswertung zu ermöglichen. Dementsprechend wird immer mindestens eine Zeitspanne von 100 ms des Lichtbogenstroms aufgezeichnet.

### 3.1 Messaufbau zur Nachbildung einer Schaltanlage

Für die Durchführung der Versuche steht keine reale Schaltanlage zur Verfügung. Dies ist auch nicht notwendig, da mit einfachen Mitteln die Bedingungen einer realen Schaltanlage nachgebildet werden können. Zur Vereinfachung wird die Schaltanlage auf ihre für einen Lichtbogenfehler wesentlichen Größen reduziert (siehe Abbildung 19). Dazu zählen die AC Spannungsversorgung, eine Impedanz ( $X_R$ ), welche die Quellenimpedanzen der Schaltanlage und die Lastimpedanzen repräsentiert, sowie die Funkenstrecke zur Simulation von seriellen und parallelen Fehlerfällen. Es werden zur Sicherheit und zum Schutz des Messaufbaus zwei NH-80-A-Sicherungen in Serie verwendet. Ihr niederohmiger Aufbau hat keinen Einfluss auf den Lichtbogenstrom. Durch die kurze Lichtbogenbrenndauer von ca. 100-200 ms schmelzen die Sicherungen nicht durch. Erst bei ungewollt längeren Lichtbogenbrenndauern lösen die Schmelzsicherungen aus. Die Funkenstrecke wird für serielle Lichtbögen gegen verschraubte Sammelschienen mit erhöhtem Übergangswiderstand ausgetauscht.

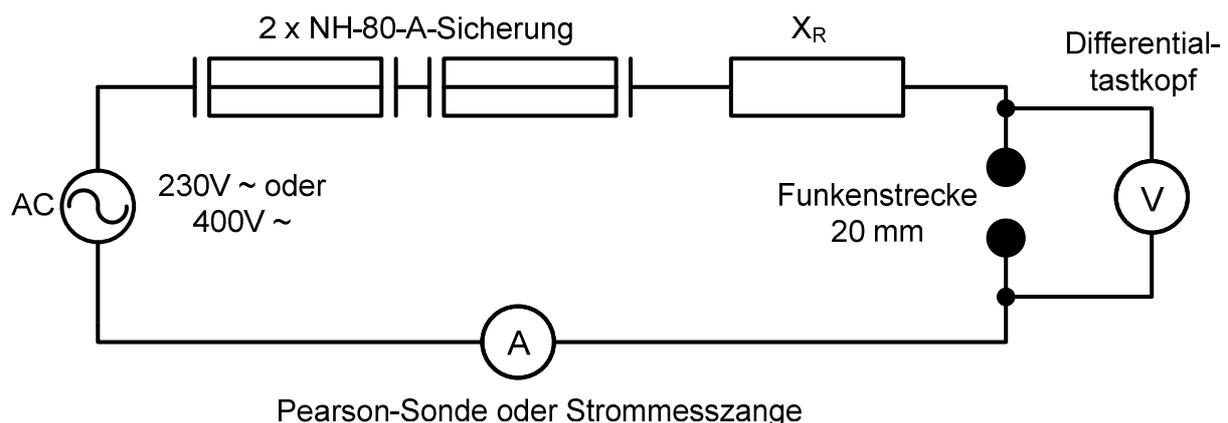


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Lichtbogenerzeugung.

Zur Spannungsversorgung wird die im Labor zur Verfügung stehende 50 Hz Netzspannung verwendet. An diese können Lasten 3-phasig mit bis zu 63 A angeschlossen werden. Somit können Erdschlüsse und Kurzschlüsse zwischen zwei Außenleitern simuliert werden.

Die im Labor eingebauten Sicherungen sind für bis zu 63 A ausgelegt. Die Leitungsschutzschalter haben eine L-Charakteristik für 16 A und eine K-Charakteristik für 32-63 A. Für den thermischen Schutz ist die Brenndauer des Lichtbogens zu kurz und für den magnetischen Schutz der Lichtbogenstrom zu klein. Die K-Charakteristik löst magnetisch erst beim 8-14 fachen Nennstrom aus, was für 63 A eine Ansprechschwelle von 504-882 A bedeutet. Die bei den Versuchen auftretenden Lichtbogenströme lagen durchweg unterhalb dieses Wertes.

### 3.1 MESSAUFBAU ZUR NACHBILDUNG EINER SCHALTANLAGE

Für die Lichtbogennachbildung wird der Messaufbau auf einer Platte aus Isoliermaterial montiert (siehe Abbildung 20). Sie trägt die Anschlussklemmen für den Anschluss der Stromversorgung, Schmelzsicherungen, Anschlüsse für Lasten und die Funkenstrecke zur Nachbildung des Fehlers. Die dargestellten Stromzangen wurden bei Versuchen mit Lastströmen unter 50 A durch eine Pearson-Sonde ersetzt.

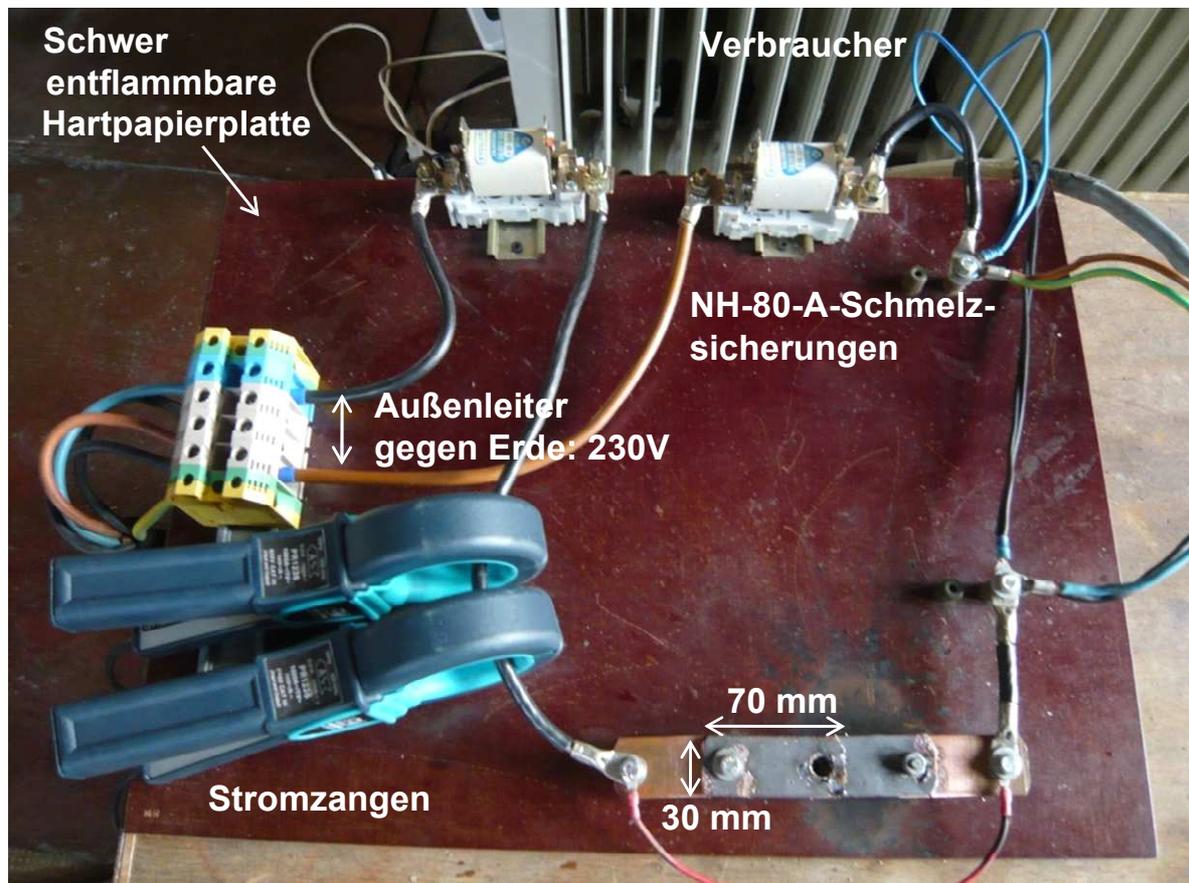


Abbildung 20: Messaufbau auf einer Platte montiert. Es sind verschiedene Arten von Verbrauchern anschließbar.

#### Ohmsche Lasten zur Strombegrenzung

Als Lasten werden je nach gewünschtem Lichtbogenstrom verschiedene ohmsche Verbraucher verwendet. Für kleinere Lichtbogenströme (bis 40 A) kommen zwei parallele Drahtwiderstände mit einer Maximallast von je 1 kW zum Einsatz. Kurzzeitig können diese ohne Beschädigung und ohne übermäßige Erwärmung auch höher beansprucht werden. In Versuchen mit höheren Lichtbogenströmen werden zumeist Ölradiatoren als Last verwendet. Diese ebenfalls ohmschen Verbraucher haben eine Leistungsaufnahme von 2-3 kW und zusammen einen Gesamtwiderstand von ca.  $3,6 \Omega$ . Zusätzlich wird ein Heizwiderstand von  $0,86 \Omega$  parallel geschaltet (siehe Abbildung 21). Durch Anschluss aller ohmschen Lasten kann bei einer Spannung von 230 V ein Laststrom von maximal 328 A fließen.

### 3.1 MESSAUFBAU ZUR NACHBILDUNG EINER SCHALTANLAGE

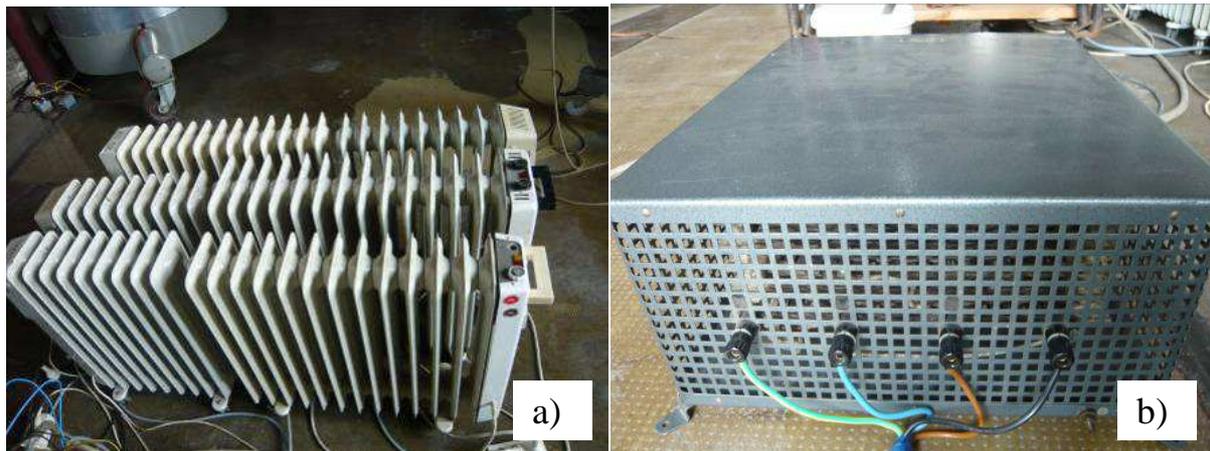


Abbildung 21: a) Ölradiatoren und b) Heizwiderstand bilden die ohmschen Lasten.

#### Lichtbogenelektroden

Für die Elektroden wurden zwei Kupferschienen gewählt mit einer Breite von 30 mm und eine Dicke von 3 mm. Der Abstand zwischen den blanken Schienen beträgt ca. 20 mm. Die Mindestabstände zwischen zwei blanken aktiven Bauteilen müssen für PTSK (Partiell typgeprüfte Schaltgerätekombinationen) mindestens 10 mm betragen [Siemens 1990]. Genauere Angaben über die Bemessung von Luft- und Kriechstrecken können DIN VDE 0110 Teil 2 entnommen werden. In den Untersuchungen von [Land 2003 /2] wurde auf Basis der Militärnorm MIL-S-16036 (Military Specification: Switchgear, Power, Naval Shipboard) ein Abstand von 38 mm für Lichtbögen zwischen zwei Außenleitern und 19 mm für Lichtbögen zwischen Außenleiter und Erde angegeben.

Auf beiden Schienen gibt es Schrauben zum Einspannen von Drahtwiderständen (siehe Abbildung 22), auf deren Verwendung in Kapitel 3.2.2 näher eingegangen wird. Die Schienen können auch gegen verschraubte Sammelschienen ausgetauscht werden um serielle Fehler zu simulieren.

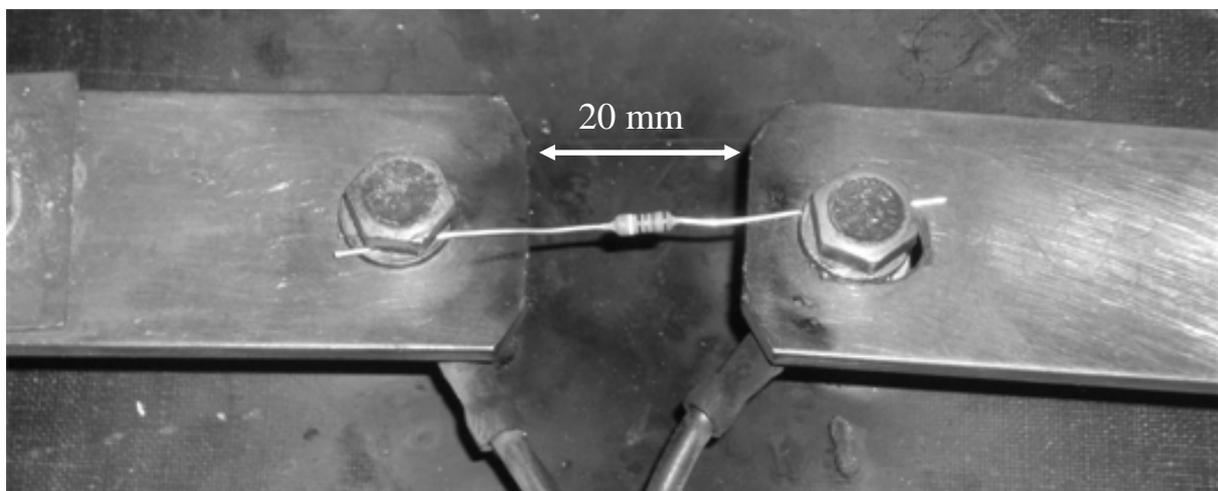


Abbildung 22: Sammelschienen mit Drahtwiderstand zur Zündung eines Lichtbogens.

## 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

### **Verwendete Strommessgeräte**

Zur Strommessung werden feldgebundene Messsysteme verwendet. Je nach Stromstärke kommen eine Pearson-Sonde oder eine Stromzange zum Einsatz.

#### **Pearson-Sonde:**

Die Pearson-Sonde hat ein Teilverhältnis von 1:10. Dadurch können auch kleine Ströme noch sehr hochauflösend gemessen werden. Der maximal messbare Strom ist jedoch auf 50 A begrenzt. Deshalb wird bei den meisten Messungen eine Stromzange verwendet.

#### **Stromzange LEM PR 1235:**

Die Stromzange hat den Vorteil, dass sie sich zum Messen eines Stromes durch einen Leiter öffnen lässt und der Leiter nicht erst durch das Messsystem durchgeschleift werden muss. Ihr Strommessbereich liegt zwischen 0,01 A und 1200 A. Dadurch ist sie für alle zu messenden Ströme geeignet. Ihr Übersetzungsverhältnis beträgt 1:1000. Der lineare Frequenzbereich ist auf 300 kHz begrenzt. Da sich die lichtbogenrelevanten Frequenzanteile innerhalb dieses Frequenzbereiches bewegen, ist die Bandbreite ausreichend.

### **Verwendetes Spannungsmessgerät**

Zur Messung der Brennspannung wird ein Differentialastkopf Model GE8100 der Firma Elditest Electronic verwendet. Dieser kann die Spannungsdifferenz an den Elektroden potentialfrei messen. Die Bandbreite beträgt bis zu 40 MHz und der Teilungsfaktor ist einstellbar zwischen 1:20 und 1:200. Die Forschung beschäftigt sich auch mit dem Thema des Spannungseinbruchs durch das Zünden des Lichtbogens. Dabei wird aber meist von stromstarken Lichtbögen, beziehungsweise von Kurzschlüssen ausgegangen. Insbesondere bei stromschwachen Lichtbögen und bei niederinduktiven Versorgungsnetzen ist jedoch kein großer Einfluss auf die Netzspannung zu erwarten. Die Lichtbogenspannung wird daher nicht in die Verfahren zur Fehlerdetektion einbezogen.

### **Messdatenerfassung**

Gemessen werden sowohl Strom, als auch Spannung über dem Lichtbogen im Zeitbereich. Die Messwerte werden mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Die vertikale Auflösung beträgt unabhängig vom verwendeten Gerätetyp 8 Bit. Aufgezeichnet wurden zwischen 100 und 200 ms mit 50.000 - 200.000 Samples.

## **3.2 Parallele Lichtbogenfehler**

Der parallele Fehler in einer Schaltanlage tritt zwischen zwei metallischen Leitern unterschiedlichen Potentials auf. Dies kann entweder zwischen Außenleiter und Außenleiter sein (direkt zwischen zwei parallelen

## 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

Sammelschienen), oder aber zwischen Außenleiter und geerdeten Teilen der Anlage (Sammelschiene mit Erdpotential, Gehäuse, geerdete Anschlüsse, ...).

### Spannungsdifferenz

Der Unterschied bei Lichtbögen zwischen zwei Außenleitern (hier L1 und L2) und Erdschlusslichtbögen besteht in der unterschiedlichen Spannungsdifferenz zwischen den beiden Lichtbogenfußpunkten (siehe Abbildung 23). Unterschiedliche  $\Delta U$  ergeben einen anderen Lichtbogenstrom  $I_{\text{Lichtbogen}}$ . Dementsprechend fällt für den Kurzschluss zwischen zwei Außenleitern der Lichtbogenstrom bei ansonsten gleichen Bedingungen größer aus. Der Lichtbogenstrom ist unabhängig von den Leiterströmen  $I_{\text{Last1}}$ ,  $I_{\text{Last2}}$  und  $I_{\text{Last3}}$ , addiert sich jedoch zu ihnen und ergibt einen um den Lichtbogenstrom höheren Gesamtstrom der Schaltanlage. In den durchgeführten Versuchen wurden beide Arten untersucht.

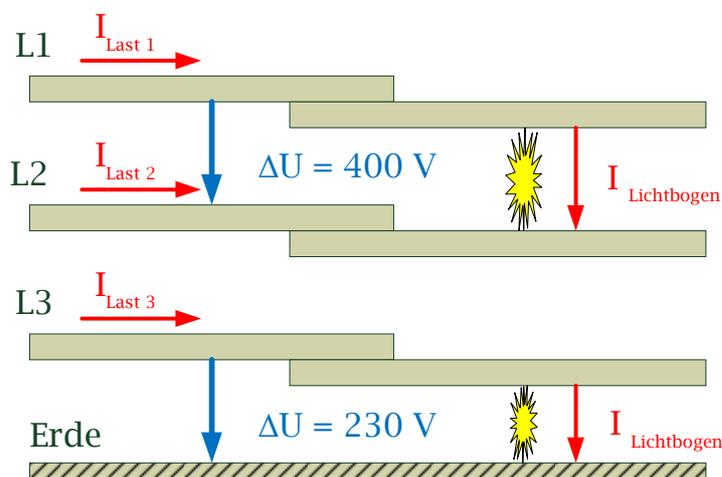


Abbildung 23: Lichtbogenfehler zwischen zwei Außenleitern (Kurzschluss) oder zwischen Außenleiter und Erde (Erdschluss)

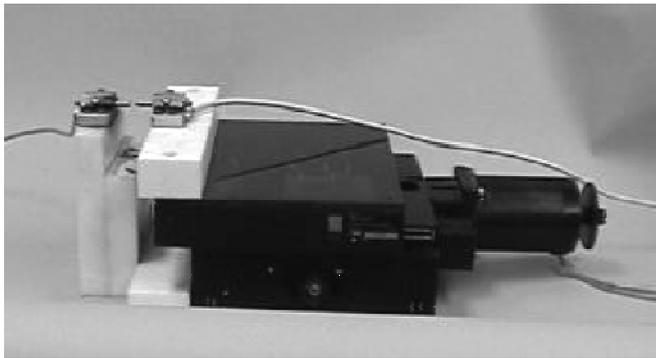
### 3.2.1 Lichtbogenzündung

Bei einem Potentialunterschied von 400 V bzw. 230 V und einem gewählten Elektrodenabstand von ca. 20 mm ist selbst bei extrem inhomogenem elektrischem Feld (z. B. Spitze-Spitze) keine selbständige Zündung des Lichtbogens möglich. Der Isolationswiderstand der Luft ist zu groß (siehe Grundlagen in Kapitel 2).

Bei jeder Untersuchung von Lichtbögen bei Niederspannung muss deshalb die Frage gestellt werden, wie der Lichtbogen zustande kommen soll. Hierbei gibt es unterschiedlichste Ansatzpunkte, die im Folgenden anhand von drei Beispielen erläutert werden. Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, stromschwache Störlichtbögen möglichst zuverlässig, einfach und realitätsnah generieren zu können. Dieses Ziel wurde sowohl bei seriellen als auch parallelen Lichtbögen erreicht und wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

### Lichtbogen durch Kontakttrennung

In einigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen [Nemir 2004] berühren sich die Spitzen zweier Elektroden zunächst. Nach Anlegen der Spannung werden die Spitzen mittels eines Schrittmotors (schwarzes Gehäuse in Abbildung 24) langsam voneinander getrennt, so dass zur Aufrechterhaltung des Stromflusses ein Lichtbogen entsteht. Der Lichtbogen wird zwischen den beiden Elektroden gezogen.



*Abbildung 24: Messaufbau zur Erzeugung eines gezogenen Lichtbogens [Nemir 2004].*

Der Nachteil dieses Verfahrens ist die durch das Auseinanderziehen der Spitzen ständig größer werdende Lichtbogenlänge, was dazu führt, dass der Lichtbogenwiderstand ansteigt. Es wird so eine zusätzliche Einflussgröße auf die Lichtbogeneigenschaften erzeugt, die in einem realen Fehlerfall in dieser Form nicht auftreten würde. Zudem bestimmt die Geschwindigkeit der Kontakttrennung, wie schnell der Lichtbogen abreißt. Wird der Kontaktabstand zu schnell vergrößert, kann der Lichtbogen nach einem Nulldurchgang möglicherweise nicht mehr zünden. Der Versuchsaufbau ähnelt eher der Trennung von Kontakten als einem möglichst realistischen Fehler in einer Schaltanlage. Zudem ist der Versuch nur für Lichtbogenströme mit wenigen Ampere geeignet. Bei höheren Strömen würden die Spitzen nach kurzer Zeit abschmelzen.

### Lichtbogen nach UL 1699 Standard

Im US-amerikanischen Raum hat die NEMA (National Electrical Manufacturers Association) durch die UL (Underwriter Laboratories) eine Prüfnorm (UL 1699 Arc-fault circuit-interrupters) entwickeln lassen um die dort eingesetzten AFCI's standardisiert zu testen [UL 1996]. Dazu wird ein vorkonditionierter Fehler in einem Kabel erzeugt. Die Kabelisolation zwischen zwei Leitern wird angeschnitten und durch Anlegen einer Hochspannung ein Pfad aus verbrannter Isolierung erzeugt. Diese karbonisierte, leitfähige Verbindung soll eine Alterung durch Kriechströme über einen längeren Zeitraum simulieren. Das so vorkonditionierte Kabel wird dann mit Netzspannung getestet, wodurch über dem verbrannten Pfad ein Lichtbogen entstehen kann.

Das sehr aufwändige Verfahren kommt zwar in seinem Endergebnis, einem Lichtbogen mit anschließendem Kabelbrand, sehr nah, jedoch ist auch der

## 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

Vorbereitungsaufwand groß. Insbesondere die Vorkonditionierung mittels Hochspannung erschwert die Erzeugung reproduzierbarer Ergebnisse. Da Lichtbögen in Schaltanlagen nicht primär durch beschädigte Kabelisolierung auftreten, kann der beschriebene Versuchsaufbau auch nicht direkt übernommen werden.

### Lichtbogenzündung bei Kurzschlussversuchen

Bei der Prüfung von Niederspannungsschaltanlagen werden Kurzschlussversuche durchgeführt. Damit sollen zum einen die Auswirkungen eines Lichtbogens auf die Anlage getestet werden (Personensicherheit), zum anderen kann auch geprüft werden, ob das verwendete Schaltgerät den Kurzschlussstrom sicher abschalten kann. Dieser kann bis zu 40 kA betragen. Zur Zündung des Lichtbogens werden die Sammelschienen aller drei Leiter mit einem Kupferdraht gemäß EN 60 439-1 Beiblatt 2 verbunden. Wird die Schaltanlage an die Spannungsversorgung angeschlossen, verursacht der Draht einen Kurzschluss. Durch den hohen Strom verdampft der Draht sofort und die heißen Kupferdämpfe ermöglichen das Zünden eines Lichtbogens über alle drei Außenleiter (siehe Abbildung 25).

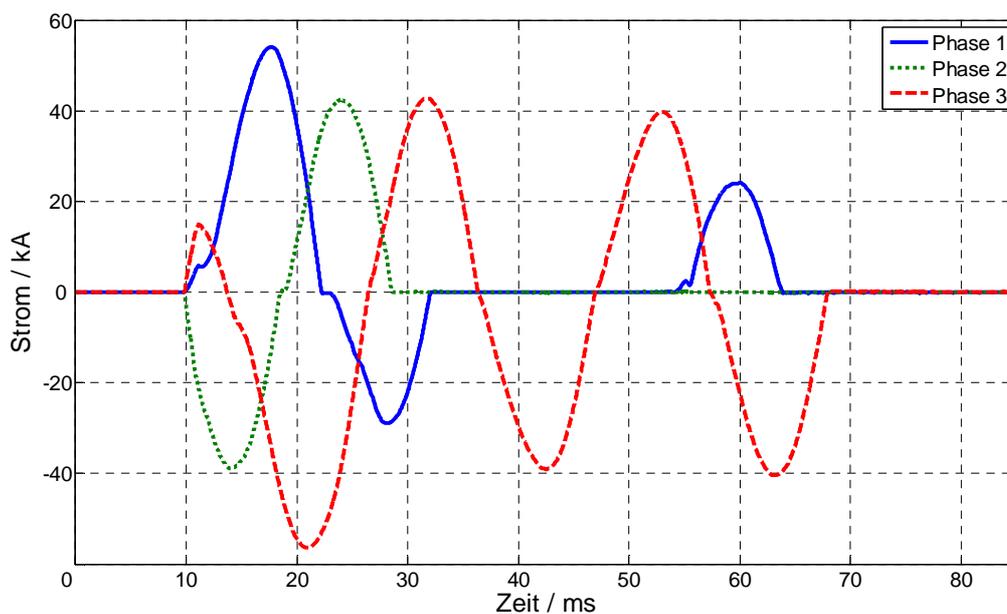


Abbildung 25: Kurzschluss über alle 3 Leiter bei einer Schaltanlagenprüfung. Zündung des Lichtbogens über einen Kupferdraht <sup>1</sup>.

Dieses Verfahren wird auch zum Zünden von stromschwachen Störlichtbögen getestet. Zwischen die beiden Kupferelektroden wird ein dünner Kupferdraht ( $\varnothing < 0,3 \text{ mm}$ ) gelegt. [Onderdonk 1994] befasst sich in seiner Veröffentlichung mit

<sup>1</sup> Die Messwerte wurden vom Siemens Schaltanlagenwerk in Leipzig zur Verfügung gestellt.

### 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

den Verhältnissen zwischen Drahtdicke und Schmelzstrom. Nach Anlegen der Spannung schmilzt der Draht an der Stelle seines größten Widerstandes durch, was zur Zündung eines Lichtbogens führt. Dieser brennt jedoch nur eine Halbwelle lang und kann nach dem Stromnulldurchgang nicht wieder zünden (Abbildung 26). Die Ursache ist die geringe erzeugte Hitze beim Durchbrennen des Drahtes und die geringe Menge an verdampftem Material. Der Plasmakanal wird nicht genügend aufgeheizt, wodurch der elektrische Widerstand des Plasmas zu hoch ist um nach dem Nulldurchgang die Wiederzündspannung erreichen zu können. Der Spannungsabfall über der Funkenstrecke ist zu groß. Zudem hat sich durch das Durchschmelzen und Verdampfen des dünnen Drahtes eine große Lücke zwischen den Elektroden gebildet. Beim nächsten Zündvorgang ist dann die Lücke zu groß und die Anzahl noch vorhandener ionisierter Teilchen zwischen den Elektroden zu gering, um erneut die Zündbedingungen zu erfüllen.

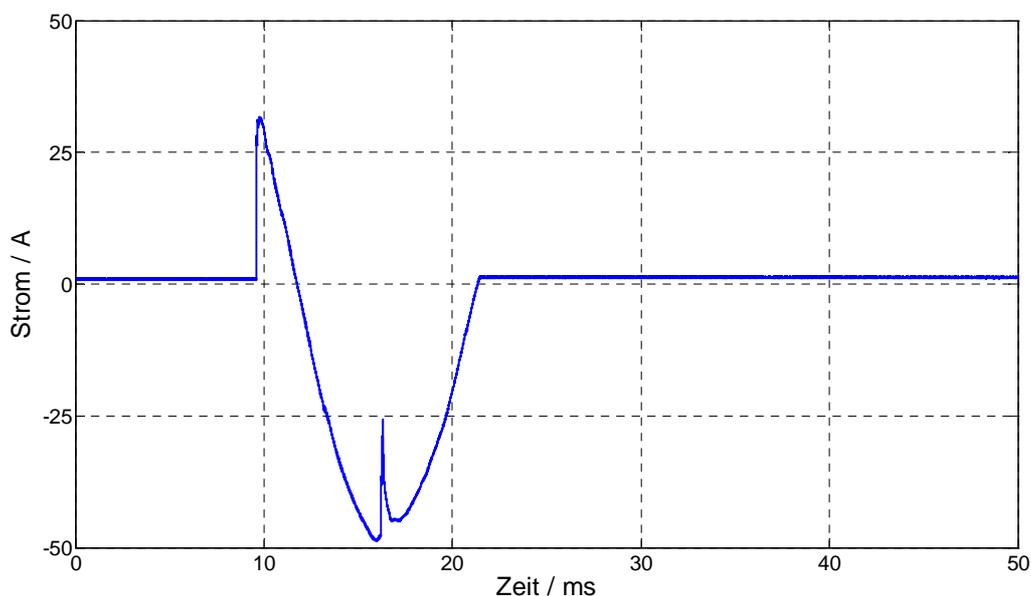


Abbildung 26: Stromverlauf bei Lichtbogenzündung durch einen dünnen Draht ( $\phi < 0,3 \text{ mm}$ ) [Müller 2007]

Ein neuer Versuch mit einem dickeren Draht ( $\phi > 0,5 \text{ mm}$ ) führt dazu, dass sich der Draht aufgrund des größeren Durchmessers nicht schnell genug erhitzt, so dass eine Halbwelle zum Durchschmelzen nicht ausreicht. Durch den geringen Widerstand des Drahtes wird aber ein Kurzschluss der Funkenstrecke erzeugt, den die vorgeschalteten Leitungsschutzschalter abschalten (siehe Abbildung 27). Ein über mehrere Halbwellen brennender Lichtbogen kann so nicht gezündet werden.

## 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

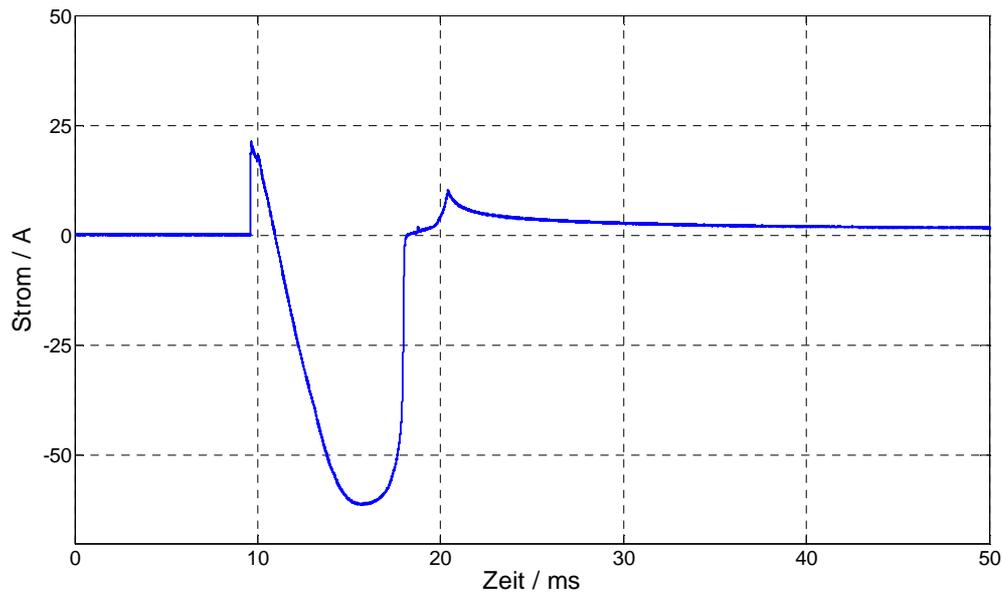


Abbildung 27: Stromverlauf bei Zündung mit einem Draht ( $\phi > 0,5 \text{ mm}$ ), LS-Schalter löst aus [Müller 2007]

Die Erkenntnis aus diesen Versuchen ist, dass für die Zündung eines stromschwachen Störlichtbogens ein Material gefunden werden muss, dessen elektrischer Widerstand groß genug ist, um vor dem Zünden des Lichtbogens den LS-Schalter nicht auslöst. Desweiteren muss beim Verdampfen des Materials so viel ionisiertes Gas erzeugt werden, dass nach dem Stromnulldurchgang noch genügend Plasma vorhanden ist, um die Wiederzündbedingungen zu erreichen.

### 3.2.2 Zündung mit Metallfilm- und Kohleschichtwiderständen

Im Falle des parallelen Lichtbogens wird davon ausgegangen, dass der Isolationswiderstand zwischen einem Außenleiter und Erde, bzw. zwischen zwei Außenleitern aufgrund eines Fremdkörpers oder verschmutzter Isolationsoberflächen stark verringert ist. So kann ein paralleler stromschwacher Störlichtbogen auftreten, obwohl die Luftisolationsstrecke zwischen zwei Sammelschienen oder einer Sammelschiene und geerdeten Teilen ausreichend ist. Der Lichtbogen zündet über die verminderte Isolationsfestigkeit der Kriechstrecke. Um diesen Effekt nachzubilden, wird ein ohmscher Widerstand genutzt, welcher einen definierten Widerstandswert entsprechend seiner Bauart hat. Dazu werden die Drahtenden des Widerstandes mittels Schrauben auf den Kupferelektroden fixiert (Abbildung 28). Die Elektroden werden so durch den Widerstand miteinander verbunden. Es kann ein Strom entsprechend dem gewählten Widerstandswert fließen.

### 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

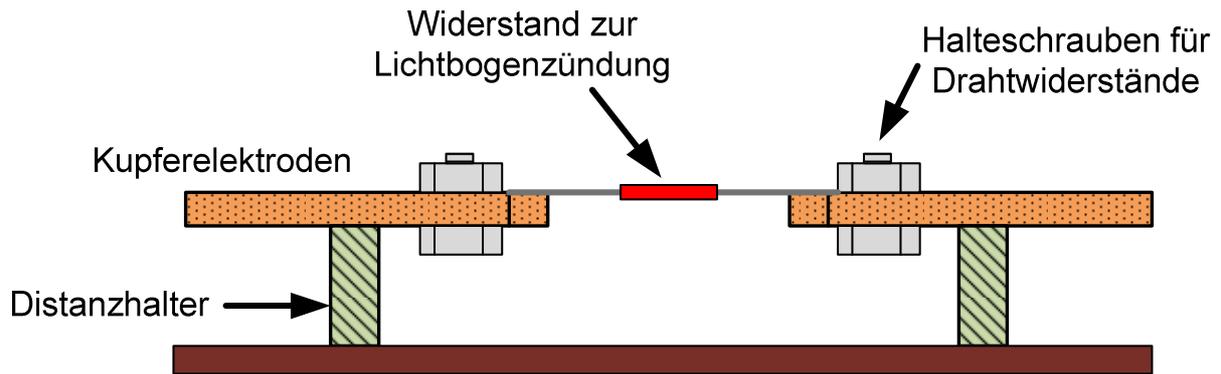


Abbildung 28: Sammelschienen im Abstand von ca. 20 mm zur Simulation eines parallelen Lichtbogenfehlers.

Aus den Versuchen mit Kupferdrähten hat sich gezeigt, dass der definierte Widerstand des Materials zwischen den beiden Elektroden entscheidend ist. Wird der Widerstand zu hoch gewählt, so fließt ein zu geringer Strom und es kommt nicht zu einer genügend starken Erhitzung um das leitfähige Material zu verbrennen. Ohne das Verbrennen des Widerstandbelages entsteht auch keine Luftstrecke, die von einem Lichtbogen überbrückt werden kann. Wird der Widerstand zu gering gewählt, so fließt ein zu hoher Strom. Dies kann entweder dazu führen dass Kurzschlusssicherungen ansprechen, oder aber dass das Widerstandsmaterial zu schnell punktuell erhitzt wird, was dazu führt, dass der Widerstand nur an der schwächsten Stelle (größter Energieumsatz) abbrennt und zu wenig heiße Gase erzeugt werden, um einen Lichtbogen nach dem Stromnulldurchgang wieder zu zünden. In einer Versuchsreihe wurde der Widerstandswert so lange erhöht, bis die Lichtbogenbrenndauer im Mittel ca. 100 ms betragen hat.

Zum Einsatz kamen sowohl Kohleschicht- als auch Metallfilmwiderstände. Letztlich ist die Bauart nicht ausschlaggebend für die Lichtbogenzündung, sondern die Leistung, für die der Widerstand ausgelegt ist. Für kleinere Lichtbogenströme im Bereich von 40-100 A ist ein einzelner Widerstand ausreichend. Der Widerstandswert sollte bei 1-4 k $\Omega$  liegen.

Für höhere Ströme hat sich gezeigt, dass ein einzelner Widerstand eine zu geringe Leistungsaufnahme besitzt. Der Widerstand zündet sehr schnell und erzeugt dann aber durch das Abbrennen nicht genügend heiße Gase um den Lichtbogen über mehrere Halbwellen zu tragen. Deshalb werden mehrere Widerstände parallel geschaltet, um die Leistungsaufnahme zu erhöhen. So kann erreicht werden, dass der Lichtbogen über mehrere Halbwellen wiederzündet. Der Gesamtwiderstand soll dabei im Bereich von 1-10 k $\Omega$  liegen.

Nach Anlegen der Spannung an den Versuchsaufbau in Abbildung 29 fließt zunächst nur der durch den Widerstand begrenzte Strom in Höhe von einigen Milliampere. Durch die hohe Spannung wird im Widerstand aber mehr Leistung

### 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

umgesetzt, als dieser abführen kann. Innerhalb weniger Sekunden erhitzt sich der Widerstand stark. Dies wird durch erste Rauchentwicklung sichtbar. Kurze Zeit später sind erste kleine Überschläge auf der Oberfläche des Widerstandes zu sehen. Das Material hat sich soweit erhitzt, dass es zu verdampfen beginnt. An einzelnen Stellen kann so bereits ein erster kleiner Lichtbogen auf der Oberfläche des Widerstandes zünden. Durch die Wechsellspannung erlöschen diese Bögen im Stromnulldurchgang wieder. Wenige Halbwellen später ist dann genug Material verdampft um einen Lichtbogen über die ganze Länge des Widerstandes zu zünden. Es entsteht ein Plasmakanal zwischen den beiden niederohmigen Drahtenden des Widerstandes. Dieser hat nun keine strombegrenzende Wirkung mehr. Der Lichtbogenstrom steigt rapide an und wird nur noch von der Impedanz des Messaufbaus begrenzt. In Abbildung 30 ist der eigentliche Lichtbogen zu sehen. Dieser ist so hell, dass der digitale Bildsensor der Kamera übersteuert und den Plasmakanal schwarz anzeigt. So kann er vom hellen Schein des umgebenden Gases unterschieden werden.

Der Lichtbogen erlischt, wenn nach mehreren Halbwellen die Drahtenden so weit abgeschmolzen sind, dass durch den entstehenden Abstand die Wiederverfestigung der Funkenstrecke schneller ansteigt als die wiederkehrende Spannung (Abbildung 31).

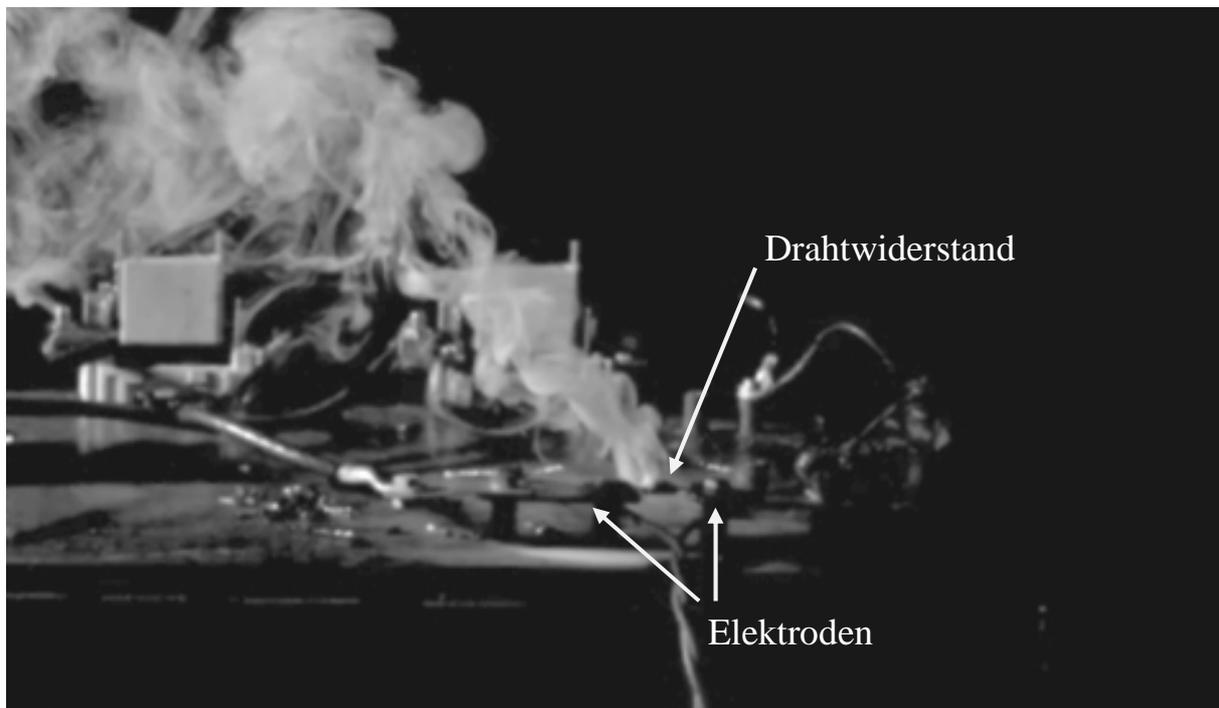


Abbildung 29: Rauchentwicklung beim Zünden eines Lichtbogens durch Überlasten des Drahtwiderstandes. Messaufbau wie in Abbildung 28.

## 3.2 PARALLELE LICHTBOGENFEHLER

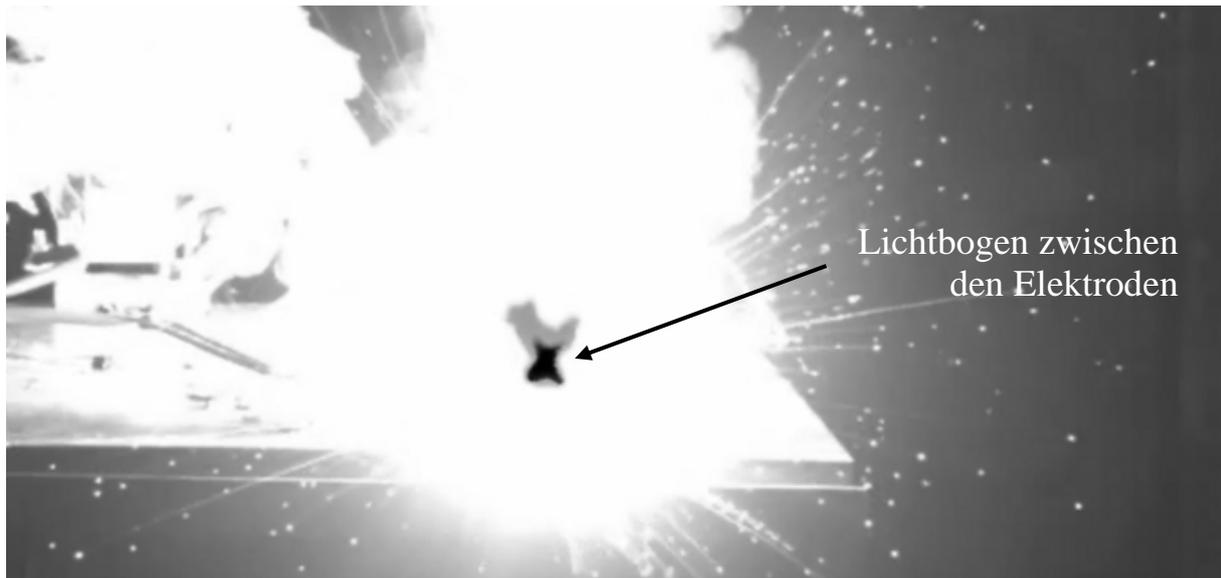


Abbildung 30: Zünden des Lichtbogens über dem Kohleschichtwiderstand. Das Übersteuern der Kamera macht den tatsächlichen Lichtbogen sichtbar.



Abbildung 31: Erlöschen des Lichtbogens nach ca. 100 ms.

### 3.2.3 Reproduzierbarkeit der Lichtbogenzündung

Die Zündung paralleler Lichtbögen mit Drahtwiderständen hat sich als sehr gut reproduzierbar erwiesen. Variationen gibt es hauptsächlich in der Brenndauer des Lichtbogens. Diese kann zwischen 80 und 140 ms schwanken. Die Stromamplitude hängt hauptsächlich vom begrenzenden Widerstand des Messaufbaus ab. Der Drahtwiderstand hat nach Zünden des Lichtbogens keinen Einfluss mehr auf den Gesamtstrom. Durch den gewählten Abstand der beiden Kupferelektroden von ca. 20 mm werden diese durch den Lichtbogen quasi nicht beschädigt. Lediglich Verrußung und geringe Ablagerungen durch den verbrennenden Widerstand sind zu beobachten. Nachdem die Reste des

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER

Drahtwiderstandes entfernt sind, kann sofort ein neuer Versuch gestartet werden.

## 3.3 Serieller Lichtbogenfehler

Serielle Lichtbogenfehler treten durch sich lösende Verbindungen, durch Kabelbruch oder durch Beschädigung aufgrund von Zugbelastung, Abscherung oder thermischer Überlastung auf. Ursachen dafür können schlechte Konstruktion, fehlerhafte Montage oder unzulässige Strombelastung der Verbindungen sein. Der serielle Lichtbogen stellt aufgrund einiger Eigenarten eine besondere Gefahr für die Schaltanlage dar, wie im Folgenden dargelegt wird.

### 3.3.1 Besonderheiten des seriellen Lichtbogens

Der Lichtbogenstrom eines seriellen Fehlers ist durch den an den Fehler angeschlossenen Verbraucher begrenzt. Er brennt nur solange der Verbraucher eingeschaltet ist. Der maximale Lichtbogenstrom  $I_{\text{Lichtbogen}}$  ist gleich dem Laststrom  $I_{\text{Last}}$  des Verbrauchers, bzw. wird durch den angeschlossenen Verbraucher begrenzt. Da der Lichtbogen nur innerhalb des Leiters auftritt, ist auch die Spannungsdifferenz  $\Delta U$  zwischen den Lichtbogenelektroden maximal 230 V. Ausgelöst wird der serielle Lichtbogen wie in Abbildung 32 dargestellt zum Beispiel durch eine sich lösende Sammelschienenverbindung. Das Nachlassen der Verbindungskraft kann zum einen durch falsche Montage verursacht werden. Zum anderen ist auch ein Kraftabbau in der Schraubenverbindung durch Relaxation in den Leiterwerkstoffen möglich. Die nachlassende Kontaktkraft führt zu einer Erhöhung des Übergangswiderstandes, welcher letztlich, im Zusammenspiel mit der Bildung von Fremdschichten auf den Kontakten, so weit ansteigen kann, dass ein Lichtbogen zündet.

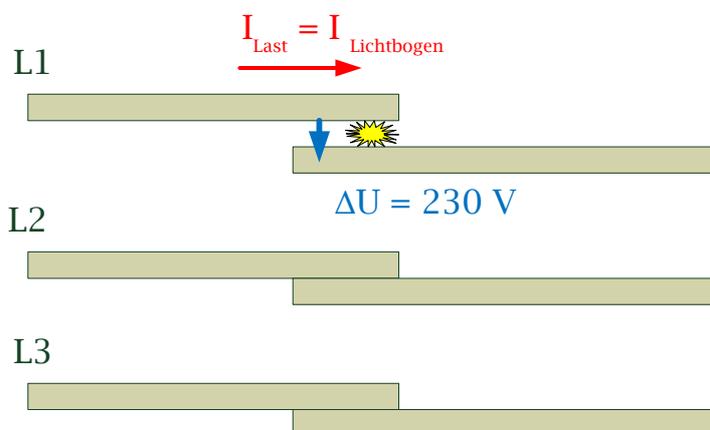


Abbildung 32: Serieller Lichtbogen in einer sich lösenden Sammelschienenverbindung.

Der serielle Lichtbogen stellt eine besondere Gefährdung für die Schaltanlage dar, da er durch den geringen Strom nicht von derzeit verfügbaren Sicherungen erkannt wird. Der Strom steigt durch den Fehler nicht über den Nennstrom der

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER

Anlage und überschreitet so auch nicht die Auslöseschwellen von Schmelzsicherungen und Leistungsschaltern. Der Fehler wird erst erkannt, wenn durch das schmelzende Kupfer der Sammelschiene und durch das heiße Plasma ein weiterer Leiter mit einem Lichtbogen verbunden wird und der serielle Fehler zum parallelen Fehler überschlägt. Erst dann kann ein vom angeschlossenen Verbraucher unabhängiger Strom fließen.

#### 3.3.2 Nachbildung einer seriellen Fehlerstelle

Die Nachbildung einer seriellen Fehlerstelle gestaltet sich schwierig, da der serielle stromschwache Lichtbogen Prinzip bedingt nur bei entsprechender Eignung der Fehlerstelle brennen kann. In den durchgeführten Versuchen wurde nicht versucht, die tatsächliche Alterung eines Hochstromkontaktes zu simulieren. Vielmehr ist es das Ziel, eine Sammelschienenverbindung zu simulieren, deren Kontaktwiderstand bereits so weit angestiegen ist, dass nach anlegen einer Spannung in kürzester Zeit ein Lichtbogen zündet.

#### Versuche mit verschraubten Kupferelektroden

Bei gut verschraubten Sammelschienen kann kein Lichtbogen auftreten, da es keinen Potentialunterschied gibt (Abbildung 33). Richtwerte für Anzugdrehmomente für Sammelschienen liefert die DIN VDE 43673-1 (Stromschienen-Bohrungen und -Verschraubungen; Stromschienen mit Rechteck-Querschnitt). Auch über einen längeren Zeitraum bleibt eine solche Verbindung ein gut leitender Übergang mit geringem Kontaktwiderstand [Blumenroth 2009]. Deshalb werden die ersten Versuche mit sehr locker (maximal handfest) angezogenen Verschraubungen durchgeführt, wie sie bei einer falschen Montage oder durch die Kraftwirkung von hohen Kurzschlussströmen auftreten können. Dabei hat sich gezeigt, dass der Übergangswiderstand erhöht ist und sich die Sammelschiene auch deutlich mehr erwärmt, als bei gut verschraubten Verbindungen. Die lokale Erwärmung der Kontaktstelle wird jedoch durch die Wärmekapazität der Sammelschiene begrenzt. Durch eine Schraubverbindung mit geringer Kontaktkraft kann bei den geringen hier verwendeten Lastströmen von maximal 400 A kurzfristig kein Lichtbogen entstehen. Durch die Erwärmung wird jedoch die Oxidation beschleunigt. Diese bildet an den erwärmten Kontaktstellen eine Oxidschicht, welche den Übergangswiderstand kontinuierlich erhöht [Sletbak 1992]. Bis sich jedoch ein Übergangswiderstand in der Sammelschienenverbindung gebildet hat, der groß genug ist, die Kontaktstelle über die Wärmekapazität der Sammelschienen hinaus zu erwärmen, können Jahre vergehen. Zudem haben Untersuchungen gezeigt, dass kritische Kontaktwiderstände nur in Verbindung mit Aluminiumsammelschienen auftreten können.

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER

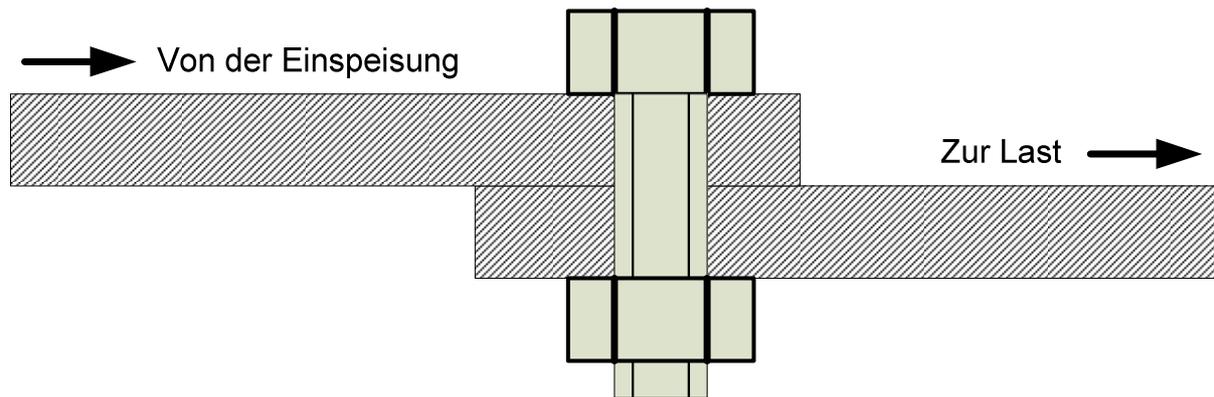


Abbildung 33: Verschraubter Sammelschienenkontakt als potentielle Fehlerstelle eines seriellen Lichtbogens.

#### **Sammelschienenverbindungen mit künstlich erhöhtem Kontaktwiderstand**

Um in diesem Versuchsaufbau einen Lichtbogen in einer Sammelschienenverbindung zu zünden, wird der Kontaktwiderstand künstlich erhöht. Dies wurde durch zwei Maßnahmen erzielt:

- Erhöhung des Fremdschichtwiderstandes auf der Kupfersammelschiene. Im Normalbetrieb werden Sammelschientemperaturen von 200 °C selten überschritten. Die bei diesen Temperaturen beschleunigte Oxidation der Kupferoberfläche führt zu Kupferoxidschichten von wenigen Moleküllagen, die bei einer Betriebsdauer von 20-30 Jahren der Schaltanlage nicht zu einem Ausfall führen. Deshalb wurde das Kupfer über 24 h auf 300 °C erhitzt. Bei diesen Temperaturen war eine deutlich ausgeprägte Kupferoxidschicht ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) zu sehen. Der entstehende Kontaktwiderstand beträgt 21 k $\Omega$ . Bei noch höheren Temperaturen (700 °C für 1 h) entsteht eine Verzunderung der Kupferoberfläche (Abbildung 34). Dies wird auch als Hochtemperaturkorrosion bezeichnet. Die entstehende grauschwarze CuO Schicht erzeugt je nach Schichtdicke einen Kontaktwiderstand zwischen zwei Sammelschienen von bis zu 50 k $\Omega$ .
- Verringertes Anzugsdrehmoment der Schraubenverbindung. Die oxidierten, bzw. verzundernten Sammelschienen wurden mit Schraube und Mutter verbunden. Durch Variieren des Anzugsdrehmoments kann dabei der Kontaktwiderstand eingestellt werden. Je höher das Drehmoment der Schraubenverbindung, desto geringer der Kontaktwiderstand. Dies liegt vor allem daran, dass beim Verschrauben die Verzunderung teilweise wieder aufgebrochen wird.

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER



Abbildung 34: Im Hochtemperaturofen verzünderte Sammelschienenverbindung.

Die beiden genannten Verfahren ermöglichen es, den Kontaktwiderstand der Sammelschienenverbindung variabel einzustellen. Mit zunehmendem Anzugdrehmoment sinkt der Kontaktwiderstand, wobei der stromführende Querschnitt der Kontaktpunkte klein bleibt (Mikrokontaktflächen, siehe Abbildung 35). Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein Übergangswiderstand von 1 - 5 k $\Omega$  eingestellt. Der stromführende Querschnitt ist auf einen Bruchteil reduziert, was dazu führt dass an dieser Stelle das Kupfer verdampft und ein Lichtbogen entsteht.

Oxidierter Sammelschienenverbindung

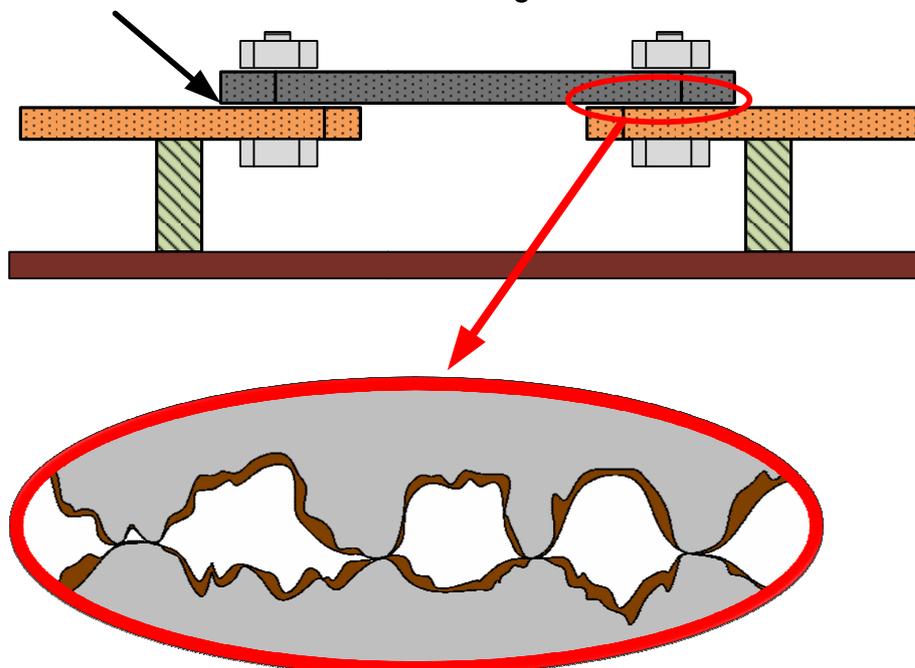


Abbildung 35: Schematische Darstellung der Mikrokontaktflächen einer oxidierten Sammelschienenverbindung.

Im Messaufbau in Abbildung 36 ist die Sammelschienenverbindung noch ohne Verbindungsschraube zu sehen.

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER

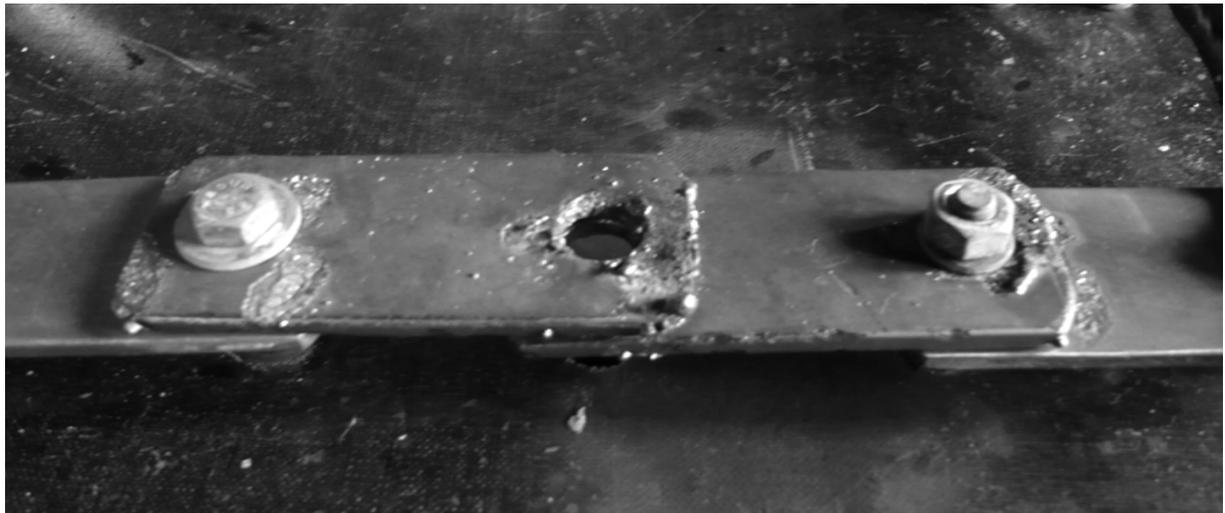


Abbildung 36: Messaufbau für serielle Fehlerfälle mit verzunderten Kontaktflächen.

Es soll der Zustand dargestellt werden, der kurz vor dem Auftreten des ersten Lichtbogendurchschlages vorherrscht. Die Verbindung ist durch fortschreitende Oxidation so hochohmig, dass der Strom nicht mehr ungehindert über die Verbindung fließen kann. Die Mikrokontakte erhitzen sich durch den Engwiderstand [Lindmayer 1987] und schmelzen auf. So entsteht ein Lichtbogen, der durch thermische Konvektion schnell an die Ränder der überlappenden Kontakte divergiert. In Abbildung 37 ist zu sehen, dass der Lichtbogen während der Brenndauer an verschiedenen Stellen und mit unterschiedlicher Intensität auftritt.

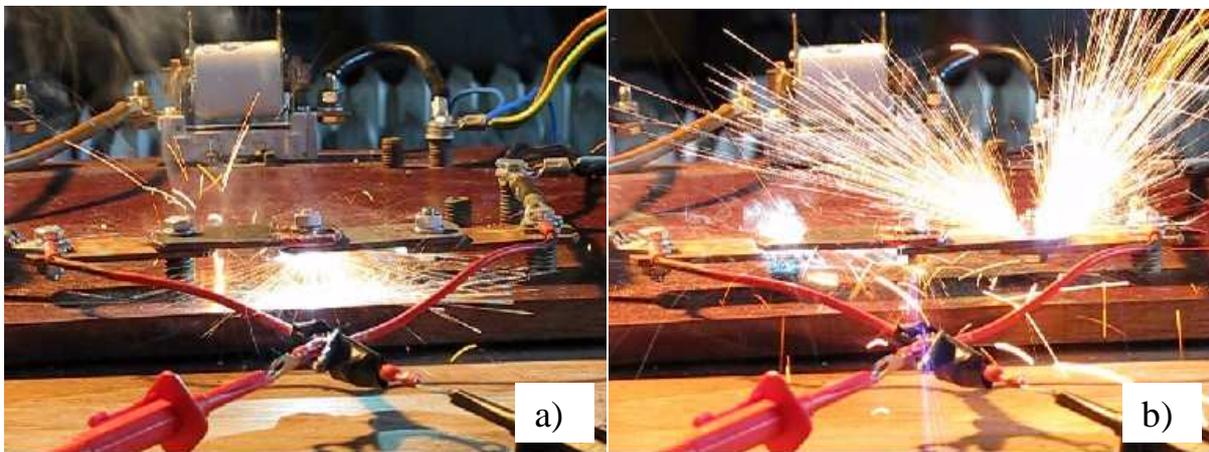
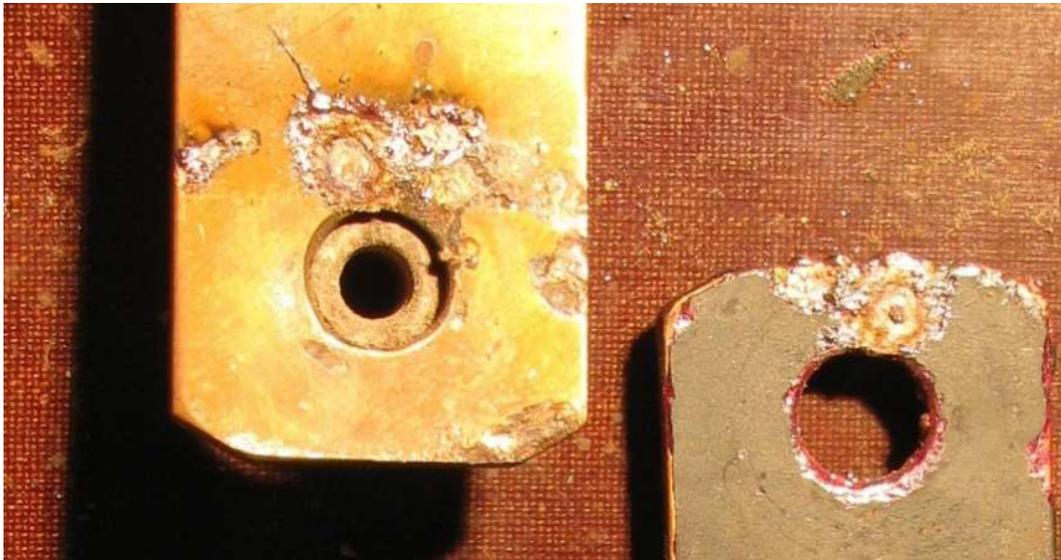


Abbildung 37: Serieller Lichtbogen durch oxidierte Kupferschienen a) Erstes Zünden des Lichtbogens b) Lichtbogen nach ca. 5 Halbwellen

Der wandernde Lichtbogenfußpunkt schmilzt dabei weiteres Material auf, das teilweise verdampft oder sich in Form von Tropfen an den Rändern der Kontaktfläche ablagert (Abbildung 38). Der wandernde Fußpunkt schmilzt bei längerer Lichtbogenbrenndauer die komplette Kontaktfläche. Dabei kann es vorkommen, dass ein wiedererstarteter Kupfertropfen eine gut leitende

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER

Verbindung erzeugt. Der Strom kann dann für einen Moment (meist eine Halbwelle) über diese leitfähige Verbindung fließen. Durch die große Stromdichte und den geringen Querschnitt des Kupfertropfens schmilzt er meist nach einer Halbwelle wieder auf und es bildet sich ein neuer Lichtbogen.



*Abbildung 38: Aufgeschmolzenes Kupfer auf überlappenden Sammelschienenverbindungen.*

Es wurde beobachtet, dass für das erneute Aufschmelzen des Kupfertropfens ein Mindeststrom benötigt wird. Bei Strömen unter 100 A zündete der Lichtbogen oft nur für eine Halbwelle. Dabei hat sich eine Kupferbrücke aus wiederverfestigter Schmelze gebildet, die nach dem Nulldurchgang nicht wieder aufgeschmolzen ist (siehe Abbildung 39). Die Erwärmung durch den geringen Querschnitt reichte für den Betrachtungszeitraum nicht aus um die Verbindung erneut aufzuschmelzen. Für Ströme über 100 A konnten sich leitfähige Kupferbrücken nur maximal ein bis zwei Halbwellen lang halten.

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER



Abbildung 39: Aufgeschmolzene Lichtbogenfußpunkte zwischen den überlappenden Kontaktflächen.

[Zhou 2008] hat untersucht, ob der in einer gebrochenen Sammelschiene brennende Lichtbogen akustisch durch Überwachung der Frequenzen auf der Sammelschiene detektiert werden kann. Dies ist praktikabel für einfache Anordnungen im Labor mit wenigen Verschraubungen. Die akustischen Signale werden jedoch durch Verschraubungen und Abzweigungen im Stromschienensystem gedämpft, so dass eine sichere Auswertung in realen Anordnungen nicht mehr möglich ist.

#### 3.3.3 Feuchtigkeit in Sammelschienenkontakten

Während der Versuche zur Erzeugung serieller Lichtbögen wurde auch der Einfluss von Feuchtigkeit auf schlecht leitende Kontaktverbindungen untersucht. Durch Betauung und Kondenswasserbildung in Schaltanlagen kann die Isolationsfähigkeit stark verringert werden. Ebenso kann in eine schlechte Kontaktverbindung eindringende Feuchtigkeit die Lichtbogenzündung begünstigen. In Versuchen wurde eine oxidierte Sammelschienenverbindung zusätzlich mit Wasser benetzt. Die dann entstehenden Lichtbögen sind deutlich heller und zündeten öfter nach jeder Halbwelle neu als ohne Wasser (Abbildung 40).

Das Wasser wirkt zwar als guter Leiter, kann aber aufgrund seiner geringen Verdampfungstemperatur den Strom nur sehr kurz tragen. Es ermöglicht einen sofortigen Stromfluss zwischen den Elektroden, wodurch der Lichtbogen schneller zündet und somit auch länger brennt.

### 3.3 SERIELLER LICHTBOGENFEHLER

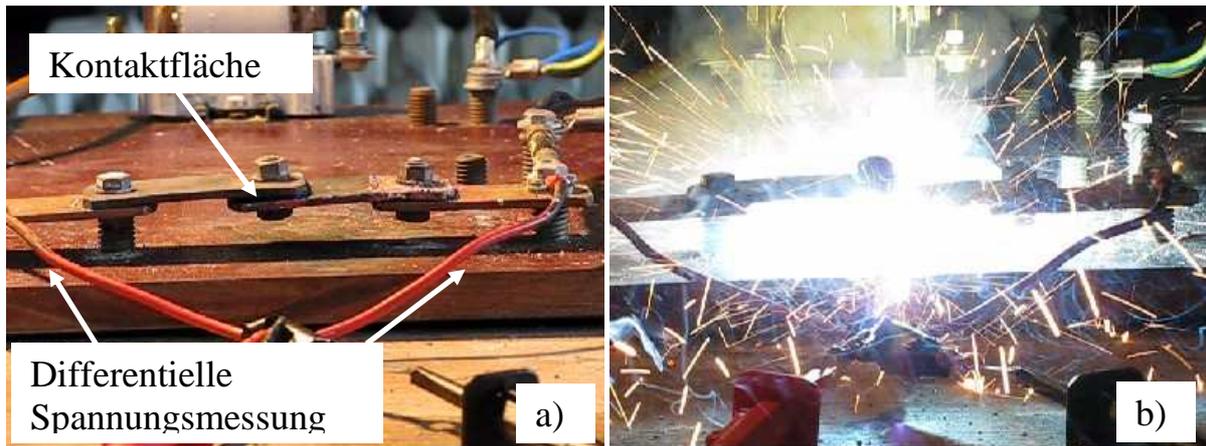


Abbildung 40: Serieller Lichtbogen durch oxidierte Kupferschienen mit Wasser auf der Kontaktfläche a) Messaufbau b) Mit brennendem Lichtbogen zwischen den Kontaktflächen

#### 3.3.4 Auswirkungen des Lichtbogens auf die Sammelschiene

Der serielle Lichtbogen brennt, im Gegensatz zum parallelen Lichtbogen, direkt zwischen den überlappenden Kupferelektroden. Daher kann das heiße Plasma auch direkt auf die Oberfläche einwirken. Die Folge sind neben starker Erwärmung auch Aufschmelzungen und Verdampfen von Kupfer. Die Elektroden sind nach dem Lichtbogenversuch deutlich verformt und Tropfen wiederverfestigten Kupfers zeigen die hohen Temperaturen, die durch den Lichtbogen entstanden sind (siehe a) und b) in Abbildung 41). Bei den durchgeführten Versuchen haben die Lichtbögen jeweils nur zwischen 0,1 und 2 s gebrannt. Würden die Lichtbögen noch länger brennen, könnten das geschmolzene Kupfer oder verbogene Sammelschienen einen Kurzschluss mit einem benachbarten Außenleiter oder geerdeten Schaltanlageanteilen verursachen.

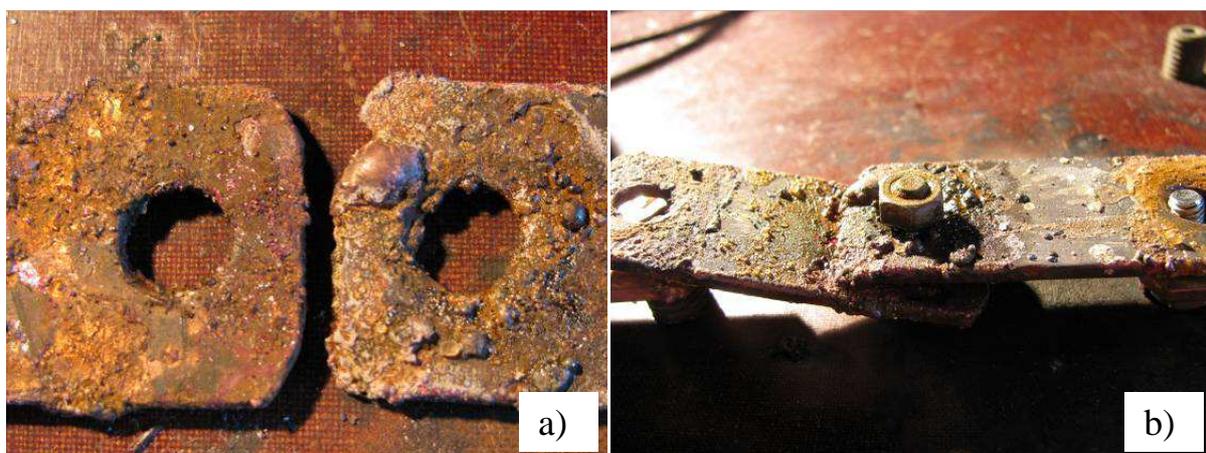


Abbildung 41: a) Aufschmelzungen auf den Oberflächen der Kupfersammelschienen b) Lose verschraubte Sammelschiene nach einem Lichtbogenversuch

## 4 Merkmale von stromschwachen Lichtbögen im Zeit- und Frequenzbereich

Die in diesem Kapitel dargestellten Stromverläufe wurden mit den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Messaufbau gemessen. Die Messungen wurden auf charakteristische Merkmale hin untersucht, welche darauf hindeuten, dass innerhalb der Schaltanlage ein stromschwacher Störlichtbogen brennt. Dabei sollen sowohl parallele als auch serielle Störlichtbogen anhand ihrer Merkmale auffindbar sein. In den folgenden Unterkapiteln werden Merkmale im Stromverlauf die auf einen Lichtbogenfehler hindeuten sowohl im Zeitbereich, als auch im Frequenzbereich aufgezeigt und bewertet. Ziel ist es eine Reihe von lichtbogenspezifischen Merkmalen zu identifizieren, die in ihrer Summe den Lichtbogen von ans Netz angeschlossenen Verbrauchern unterscheiden lassen.

### 4.1. Charakteristische Lichtbogenmerkmale im Zeitbereich

Die grundlegenden Eigenschaften eines Lichtbogens wurden bereits in Kapitel 2 behandelt. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die besonderen Detektionsmerkmale des stromschwachen Störlichtbogens für eine Auswertung im Zeitbereich. Die Beispielsignale wurden mit dem Messaufbau aus Kapitel 3 erzeugt.

#### 4.1.1 Steiler Stromanstieg durch den Zündvorgang

Nach dem Erreichen der Wiederzündspannung wird die Funkenstrecke zwischen den Elektroden durch die lawinenartige Vermehrung der Ladungsträger sehr schnell niederohmig. Der entstehende Plasmakanal weist ohmschen Charakter auf [Fisher 1970]. Die Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes wird durch die Impedanz des Netzes und der angeschlossenen Verbraucher begrenzt. Bei Lichtbögen in Schaltanlagen kann eine ausreichend geringe Netzimpedanz angenommen werden, so dass die Anstiegsgeschwindigkeit bei parallelen Lichtbögen durch das Netz kaum beeinflusst wird. Bei parallelen Fehlern ist zudem der Einfluss der angeschlossenen Verbraucher nicht maßgebend. Bei seriellen Fehlern beeinflusst die Summe aus Netzimpedanz und Lastimpedanz deutlich bemerkbar den Stromanstieg (siehe Kapitel 4.3).

Um den Einfluss der Lastimpedanz auf die Anstiegsgeschwindigkeit des Stromes zu minimieren, wurden für die durchgeführten Versuche zunächst nur ohmsche Lasten verwendet. Zur Bestimmung der Anstiegszeit wird der 10% Wert ( $t_1$ ) und der 90% Wert ( $t_2$ ) des Stromes bestimmt. Die Zeit zwischen diesen

## 4.1 CHARAKTERISTISCHE LICHTBOGENMERKMALE IM ZEITBEREICH

beiden Werten ergibt die Anstiegszeit  $\Delta t$  (siehe Abbildung 42). Dabei haben sich Zeiten zwischen 200 und 400  $\mu\text{s}$  ergeben.

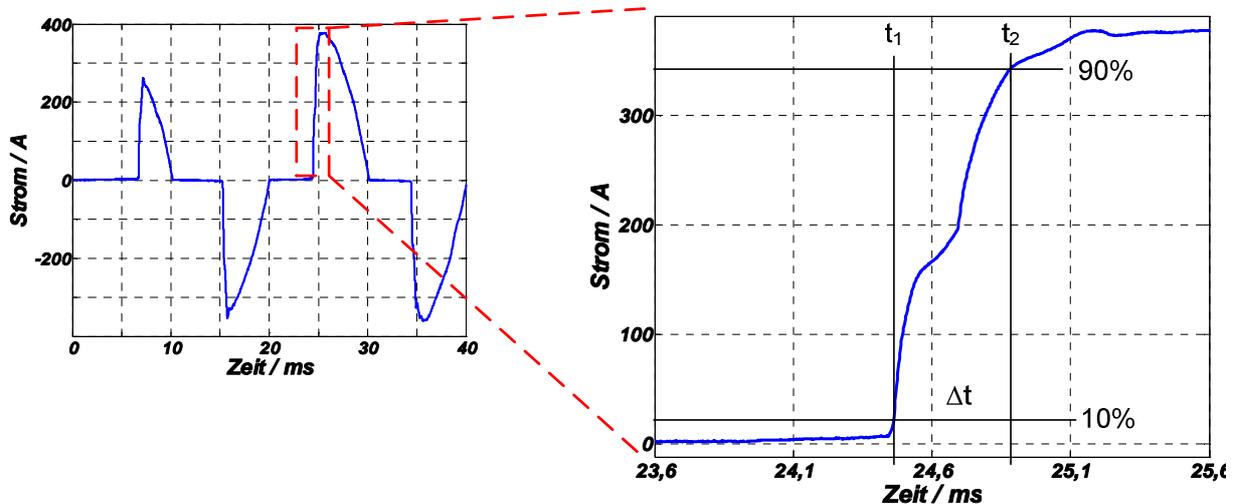


Abbildung 42: Anstiegsflanke eines wiederzündenden Lichtbogens.

Je später der Lichtbogen in der ansteigenden Halbwelle zündet, desto steiler und ausgeprägter ist die darauffolgende Anstiegsflanke. Dementsprechend ist die Anstiegsflanke bei einem kurz nach dem Nulldurchgang wiederzündenden Lichtbogen nur sehr kurz. Sie kann auch ganz ausfallen, wenn der Lichtbogen entweder im Nulldurchgang nicht erlischt, oder aber eine leitende Brücke aus geschmolzenem Kupfer den Strom nach dem Nulldurchgang trägt.

### 4.1.2 Variierender Zündzeitpunkt

Ein weiteres Merkmal des Lichtbogens ist der variierende Zeitpunkt des Wiederzündens. Durch die vielen Einflussgrößen auf den Zündprozess und auf die Lichtbogenfußpunkte, kommt es zu schwankenden Verzögerungszeiten der Lichtbogenzündung nach dem Stromnulldurchgang. Insbesondere durch den inhomogenen Aufbau der Funkenstrecke und der abbrennenden Elektroden, ist die Zeit bis zum Wiederzünden nie exakt dieselbe, wie bei der vorangegangenen Zündung. Dieser stochastisch streuende Zündzeitpunkt unterscheidet den Lichtbogen von den meisten anderen Verbrauchern, die ebenfalls steile Stromflanken aufweisen, wie beispielsweise Phasenanschnittsteuerungen.

Die Lückzeit ist die Zeit, die vom Stromnulldurchgang bis zum Wiederanstieg des Stromes vergeht. Sie beträgt in der Regel bis zu 5 ms, was der Zeit bis um erreichen des Scheitels der Halbwelle beträgt. Aufgrund der fallenden Feldstärke zwischen den Elektroden werden die Zündbedingungen danach bereits wieder schlechter. In seltenen Fällen haben Lichtbögen auch erst kurz nach dem Spannungsscheitel gezündet, was zu einer Lückzeit  $> 5$  ms führt. Die Lückzeit  $t_l$  variiert von Halbwelle zu Halbwelle, wie in Abbildung 43 dargestellt.

## 4.1 CHARAKTERISTISCHE LICHTBOGENMERKMALE IM ZEITBEREICH

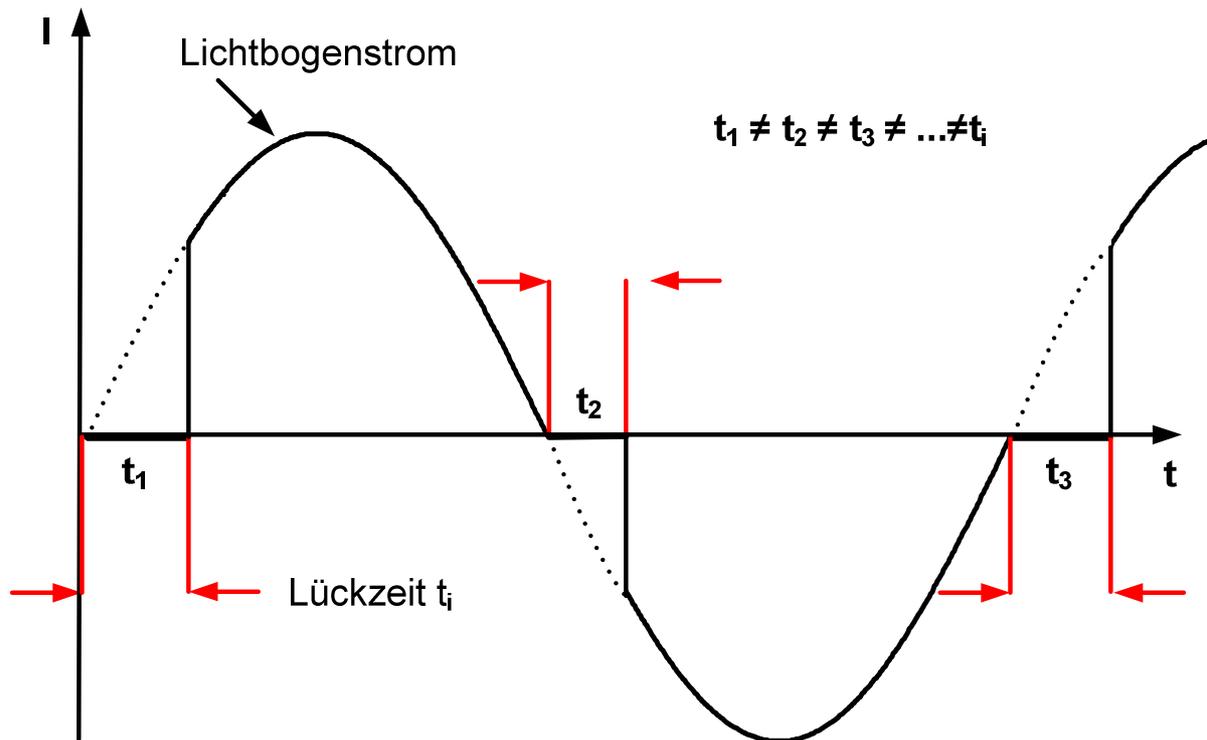


Abbildung 43: Variierende Lückzeit  $t_i$  vor jeder Halbwelle.

In Abbildung 44 ist der Strom eines parallelen Lichtbogens zu sehen. Deutlich ausgeprägt sind die Unterbrechungen im Stromfluss, durch das Erlöschen und Wiedertzünden des Lichtbogens. Das zudem regelmäßige Erlöschen nach jedem Nulldurchgang ist charakteristisch für Lichtbögen mit ausgeprägten Funkenstrecken. Die langen Lückzeiten entstehen unter anderem durch die größere Funkenstrecke, wodurch eine höhere Spannung zum Wiedertzünden benötigt wird. Trotz des scheinbar regelmäßigen Wiedertzündens des Lichtbogens in diesem Beispiel, schwankt der Zündzeitpunkt immer um einige hundert Mikrosekunden ( $t_1 - t_4$ ). Dies unterscheidet den Lichtbogen von getakteten Verbrauchern, die immer zum gleichen Zeitpunkt und in gleicher Länge eine Stromlücke aufweisen. Selbst wenn durch Änderungen der Ansteuerung des getakteten Verbrauchers eine Änderung im Zündzeitpunkt auftritt, so schwankt dieser nicht von Halbwelle zu Halbwelle in positiver wie negativer Richtung. Den Störlichtbogen kennzeichnet genau diese von Halbwelle zu Halbwelle schwankende Lückzeit.

## 4.1 CHARAKTERISTISCHE LICHTBOGENMERKMALE IM ZEITBEREICH

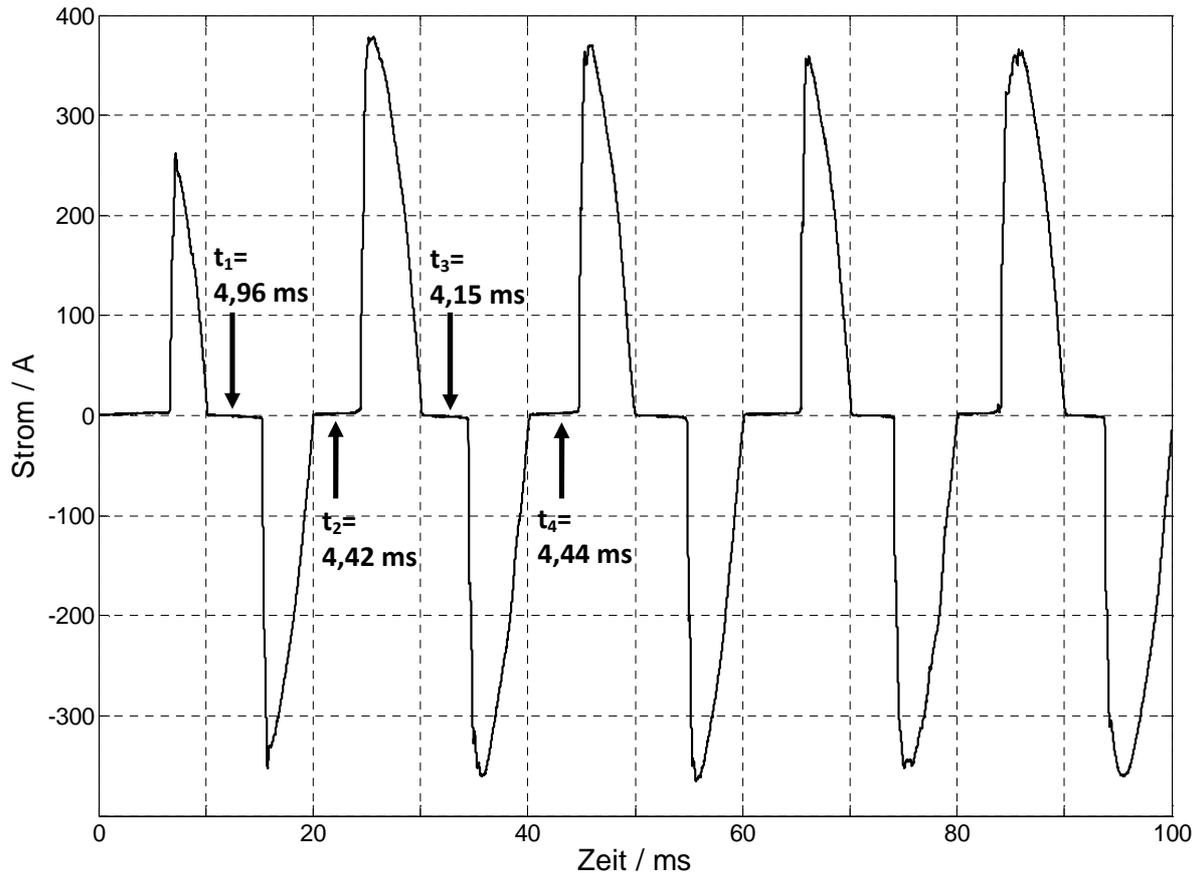


Abbildung 44: Strom eines parallelen Lichtbogens.

In Abbildung 45 ist zum Vergleich der Strom eines seriellen Lichtbogens zu sehen. Beim seriellen Störlichtbogen tritt die schwankende Stromlücke ebenso auf. Da hier jedoch geringere Abstände auftreten, brennt der Lichtbogen unbeständiger. Es kann vorkommen, dass der Lichtbogen nach dem Stromnulldurchgang sofort weiterbrennt, oder durch eine leitende Verbindung gar keine Lücke auftritt. Der Lichtbogen zündet allgemein schneller, da die Abstände zwischen den Elektroden geringer sind. Durch das mögliche Ausbleiben einer Stromlücke kann der Eindruck entstehen, dass der Lichtbogen erloschen und der Fehler beseitigt ist. Bei einer Lichtbogendetektion per Software muss deshalb dieser Umstand berücksichtigt werden. Ein Ausbleiben der Stromlücke kann auf einen seriellen Lichtbogen hindeuten. Je geringer der Strom über den Lichtbogen ist, desto eher kann eine Stromlücke auftreten, da der Plasmakanal weniger stark aufgeheizt ist.

## 4.1 CHARAKTERISTISCHE LICHTBOGENMERKMALE IM ZEITBEREICH

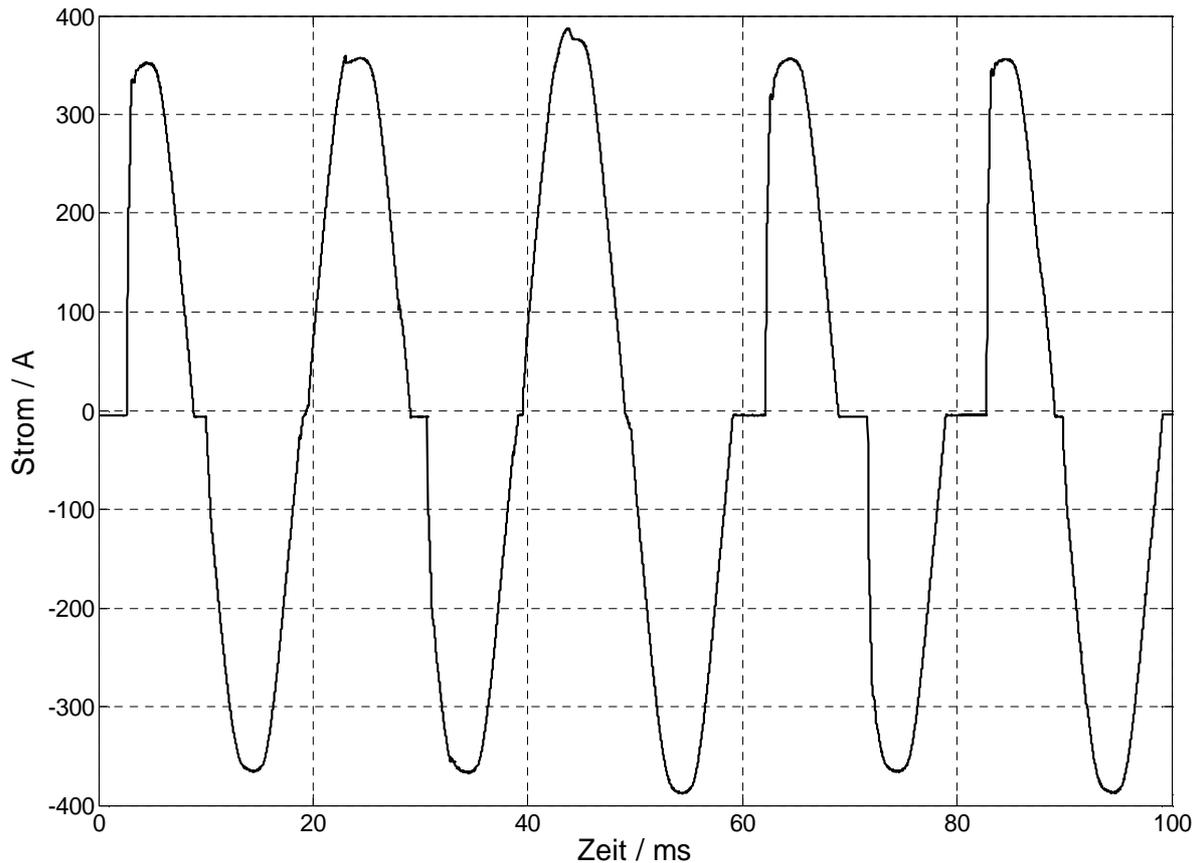


Abbildung 45: Strom eines seriellen Lichtbogens.

### 4.1.3 Löschflanke

In manchen Fällen sieht man, dass der Stromfluss bereits vor dem Erreichen des Nulldurchgangs abbricht. Dies kann geschehen, wenn der Plasmakanal, speziell bei geringen Lichtbogenströmen, nicht heiß genug ist. Der Stromfluss reißt dann beim Unterschreiten der Kathoden- und Anodenfallspannung (ca. 10-15 V) ab. Serielle und parallele Lichtbögen unterscheiden sich hierbei kaum. Die Löschflanke kann in beiden Fällen auftreten. Bei seriellen Fehlern tritt sie allerdings aufgrund des wesentlich kleineren Kontaktabstandes seltener auf. Der Plasmakanal bleibt hier länger bestehen.

Die Löschflanke ist, wie auch die steile Flanke beim Zünden des Lichtbogens, eine stochastische, nicht vorhersehbare Erscheinung. Dadurch unterscheidet sie sich von fast allen Verbrauchern. Im Gegensatz zur Zündflanke ist die Löschflanke jedoch wesentlich schwächer ausgeprägt. Sie tritt deutlich seltener auf und wird aufgrund ihrer geringen Flankenhöhe oft von anderen Störungen im Stromverlauf überlagert. Bei den meisten Messungen hat sich daher gezeigt, dass die Löschflanke außerhalb des Labors nicht als Erkennungsmerkmal für Störlichtbögen genutzt werden sollte.

### 4.2 Lichtbogenmerkmale im Frequenzspektrum

Zur besseren Erkennung von Lichtbögen werden auch im Frequenzspektrum charakteristische Merkmale gesucht. Die besonderen Eigenschaften des Lichtbogens haben sowohl beim Zünden als auch nach dem Stromnulldurchgang Auswirkungen auf das Frequenzspektrum des Stromes.

Zur Auswertung der gemessenen Stromverläufe im Frequenzbereich wurde die schnelle Fourier Transformation FFT (Fast Fourier Transformation) angewendet. Diese ermöglicht eine Auswertung der im Signal enthaltenen Frequenzinformationen. Bei der schnellen Fouriertransformation geht jedoch die Zeitinformation verloren. Es kann nicht mehr ermittelt werden, zu welchem Zeitpunkt welche Frequenzen aufgetreten sind. Die ermittelten Frequenzinformationen beziehen sich auf den gesamten gemessenen Zeitraum. Eine Möglichkeit zur zeitaufgelösten Frequenzbetrachtung bietet die Wavelet-Transformation. Diese ist jedoch mit einem deutlich höheren Rechenaufwand verbunden. Zudem hängt das Ergebnis stark von der Wahl des Mutterwavelets ab. Im Hinblick auf eine spätere Verwendung der Frequenzanalyse als schnelles Detektionswerkzeug zur Lichtbogenerkennung, wurde die Frequenzanalyse mittels Wavelets nicht weiter verfolgt. Stattdessen wurde die schnelle Fouriertransformation als Auswertemethode gewählt.

#### 4.2.1 Frequenzspektren von seriellen und parallelen Lichtbögen

Um die Frequenzspektren von seriellen und parallelen Störlichtbögen zu untersuchen, wurden die gemessenen Signale entsprechend der in Anhang B vorgestellten Verfahren verarbeitet.

Die in Abbildung 46 zu sehende Messung zeigt das Frequenzspektrum eines parallelen Störlichtbogens. Es sind sowohl die Y- als auch die X-Achse logarithmisch dargestellt. Der dargestellte Frequenzbereich wurde hier auf 15 kHz beschränkt. Da der verwendete 8-Bit A/D Wandler des Oszilloskops eine begrenzte Dynamik hat, liegt das Rauschniveau für diese Messung bereits bei 0,1 A. Messwerte über 15 kHz liegen daher im Bereich des Rauschens. Die höchste Amplitude in der Grafik ist die 50 Hz Grundfrequenz der Versorgungsspannung. Die maximale Amplitude im Zeitbereich beträgt ca. 280 A. Der zweite große Peak liegt bei 150 Hz, welches die 3. Harmonische der Grundfrequenz darstellt. Die Amplitude der 3. Harmonischen liegt hier bei ca. 40% der Amplitude der 1. Harmonischen (50 Hz). Dieser hohe Wert erklärt sich durch die lange Stromlücke nach dem Nulldurchgang. Diese könnte bereits als ein Indikator für einen Störlichtbogen dienen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Harmonischen der Grundfrequenz auch durch angeschlossene Verbraucher beeinflusst werden können.

## 4.2 LICHTBOGENMERKMALE IM FREQUENZSPEKTRUM

In Abbildung 46 haben die Frequenzen oberhalb der 3. Harmonischen eine um eine Dekade verringerte Amplitude. Das Amplitudendichtespektrum sinkt danach erst langsam ab bis die Amplituden bei ca. 1,5 kHz um 2 Dekaden unter der 3. Harmonischen liegen. Das Spektrum steigt danach wieder an und bildet eine weitere ausgeprägte Frequenzerhöhung um 2,5 kHz. Danach sinkt das Amplitudenspektrum wieder ab, bis es bei ca. 15 kHz in das Grundrauschen des Messgerätes übergeht.

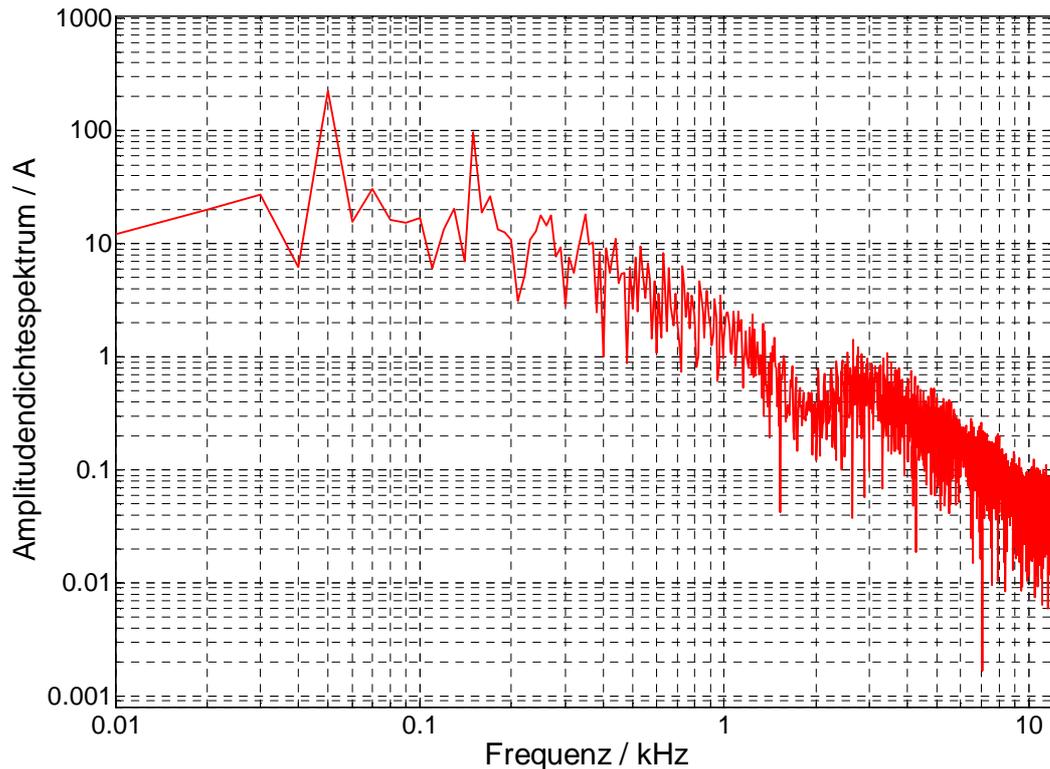


Abbildung 46: Frequenzspektrum des parallelen Störlichtbogens aus Abbildung 44.

Dieselbe Auswertung wurde auch mit einem seriellen Lichtbogen durchgeführt. Diese Art des Lichtbogens hat, wie bereits in Kapitel 4.1.1 erläutert, nicht immer so ausgeprägte Lichtbogenmerkmale wie ein paralleler Lichtbogen. Dies wirkt sich auch auf das Frequenzspektrum aus. Beim seriellen Lichtbogen in Abbildung 47 liegt die Amplitude der 50 Hz Netzfrequenz bei ca. 390 A. Dies ist deutlich höher als die Amplitude beim parallelen Lichtbogen, obwohl die Amplituden im Zeitbereich nahezu gleich hoch sind. Grund dafür sind die kürzeren Stromlücken, die zu einer größeren Ähnlichkeit des Messsignals mit der 50 Hz Netzfrequenz führen. Ansonsten zeigt sich prinzipiell dasselbe Bild wie beim parallelen Störlichtbogen. Auch hier dominiert wieder die Grundfrequenz bei 50 Hz. Die 3. Harmonische ist jedoch nicht so stark ausgeprägt. Dies liegt auch an den kürzeren Lückzeiten nach dem Stromnulldurchgang. Die leichte Erhöhung im Spektrum bei ca. 3 kHz fällt

## 4.2 LICHTBOGENMERKMALE IM FREQUENZSPEKTRUM

schwächer aus. Auch hier sind der Grund die kürzere Lückzeit und der dadurch kürzeren Wiederzündflanke.

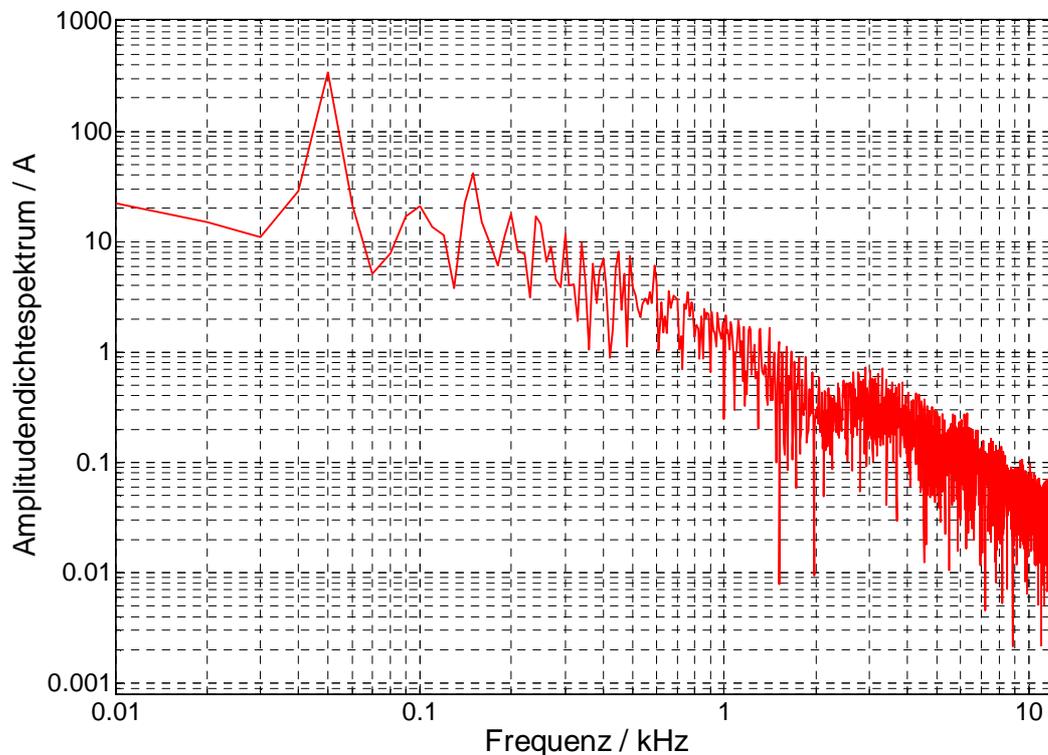


Abbildung 47: Frequenzspektrum des seriellen Störlichtbogens aus Abbildung 45.

### 4.2.2 Einfluss des Lichtbogen auf das Stromspektrum

Um die durch den Lichtbogen hervorgerufen Frequenzanteile quantitativ bewerten zu können, wird das Lichtbogenspektrum mit dem Spektrum des Laststromes ohne Störlichtbogen verglichen. Dazu werden im Messaufbau die Elektroden durch eine Kabelverbindung kurzgeschlossen. Der gemessene Strom besteht nur noch aus dem Laststrom über den Verbraucher (in Abbildung 48 schwarz). Alle enthaltenen Frequenzanteile kommen aus dem Versorgungsnetz, dem Messaufbau, oder werden durch die Umgebung in das Messsystem eingekoppelt. Diese externen Störgrößen sind für ungestörten und lichtbogenbehafteten Betrieb gleich. Der gemessene Strom hat eine etwas höhere Amplitude, da der Lichtbogenwiderstand wegfällt. Im Frequenzspektrum ist die 50 Hz Netzfrequenz am deutlichsten ausgeprägt. Weitere Spitzen gibt es bei der 9. und der 13. Harmonischen. Die Amplituden dieser Spitzen liegen bereits fast 2 Dekaden unterhalb der Amplitude der Netzfrequenz. Im Vergleich der beiden Spektren fällt der große Amplitudenunterschied im Frequenzbereich zwischen 50 Hz und 1 kHz auf. Hier haben die Spektren mit und ohne Lichtbogen 1,5-2 Dekaden Unterschied.

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

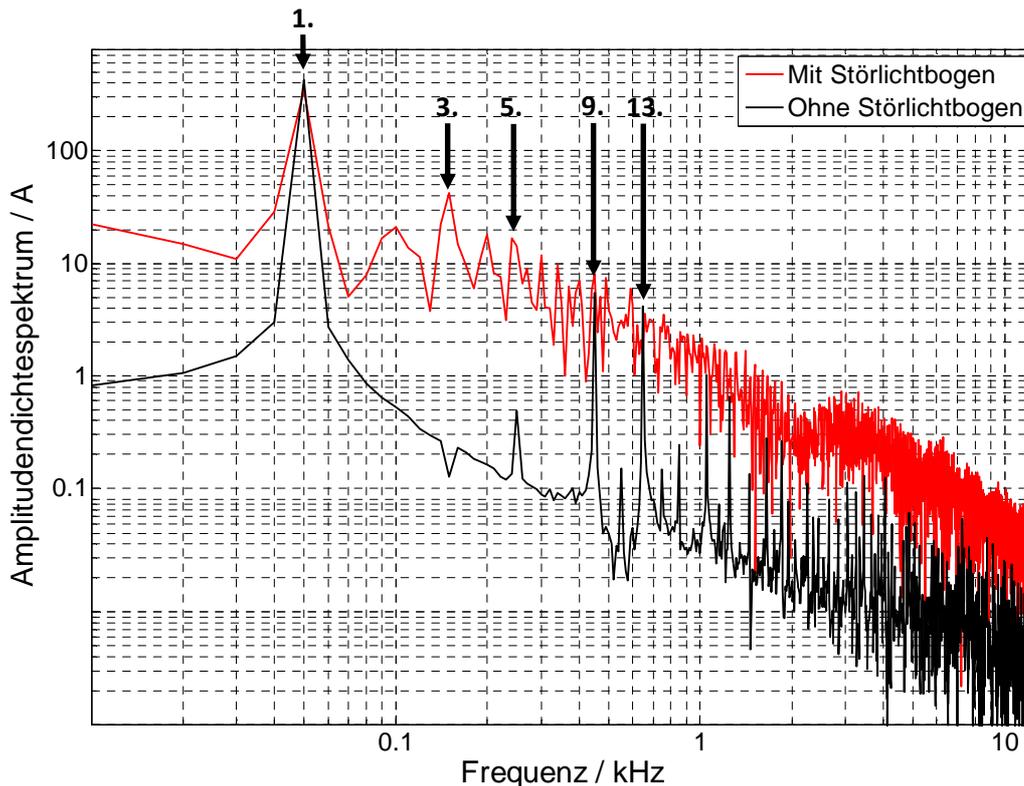


Abbildung 48: Vergleich des Laststroms eines ohmschen Verbrauchers mit (rot) und ohne (schwarz) seriellem Störlichtbogen.

Der Lichtbogen erzeugt durch seine Stromlücken und dem Wiederzünden eine breitbandige Anhebung im unteren Frequenzspektrum. Die Amplituden im Spektrum des Lichtbogenstromes liegen deutlich über dem im ungestörten Betrieb. Trotzdem gibt es auch im ungestörten Betrieb einzelne Frequenzen, deren Amplituden an das Spektrum im gestörten Betrieb heranreichen. Im Beispiel sind das die 9. und die 13. Harmonische. Es kann daher nicht festgestellt werden, dass das gesamte Frequenzspektrum im Falle eines Störlichtbogens über dem Spektrum des ungestörten Lastfalles liegt. Für eine spätere Erkennung mit Hilfe der Frequenzanalyse müssen insbesondere die Harmonischen der Netzfrequenz gesondert betrachtet werden.

### 4.3 Verbraucher im Netz und ihr Einfluss auf den Lichtbogen

Die bisher gemachten Untersuchungen haben Lichtbögen bei ohmscher Last angenommen. Diese verursachen keine Phasenverschiebung und vorhandene Frequenzanteile im Lichtbogen werden nicht gedämpft. Die Lichtbogenzündung hängt daher nur vom Verlauf der Spannung und dem Laststrom ab. Diese idealen Lasten kommen in Verbrauchernetzen nur selten vor. Reale Verbraucher belasten das Netz je nach ihrer Auslegung mit einer Vielzahl von Lastfällen, die

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

sowohl Phasenlage als auch die Form des Sinus verändern. Demensprechend wird auch das Zündverhalten des Lichtbogens verändert.

Mehrere Veröffentlichungen beschäftigen sich auch mit Verbrauchern, die ähnliche Merkmale wie ein Lichtbogenfehler aufweisen können. Besonders im US-amerikanischen Raum wurden hierzu Untersuchungen gemacht, da die eingesetzten AFCI immer wieder bei Verbrauchern mit lichtbogenähnlichen Stromverläufen einen Lichtbogen erkannt haben. Dies sind vor allem elektrische Verbraucher mit Elektromotoren wie beispielsweise Staubsauger, Haartrockner und andere Geräte mit Bürstenmotoren. Auch Dimmer können ähnliche Lastströme wie ein Störlichtbogen hervorrufen [Restrepo 2007].

Ein Verfahren zur Lichtbogendetektion muss bei unterschiedlichen Lastfällen weiterhin sicher die speziellen Merkmale eines Lichtbogens erkennen können und darf bei Verbrauchern mit lichtbogenähnlichen Eigenschaften nicht auslösen. In den folgenden Unterkapiteln werden zunächst induktive und kapazitive Lasten und ihr Einfluss auf den Lichtbogen betrachtet. Im letzten Unterkapitel werden anhand eines Beispiels die Auswirkungen eines pulsweitenmodulierten Verbrauchers auf die Detektierbarkeit eines Lichtbogenfehlers behandelt.

#### 4.3.1 Einfluss von induktiven Lasten auf das Frequenzspektrum

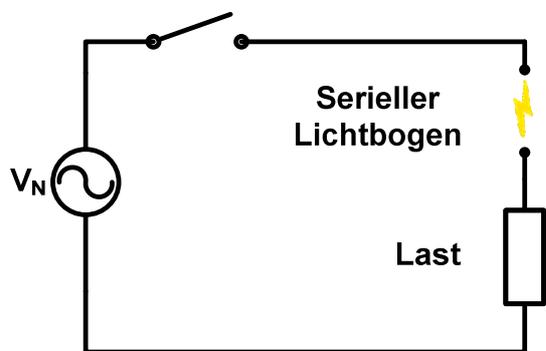
Induktive Lasten, wie beispielsweise Elektromotoren, kommen in Niederspannungsnetzen sehr häufig vor. Abhängig von ihrer Induktivität verursachen sie eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom. Mehrere Veröffentlichungen beschäftigen sich mit dem Einfluss der Phasenverschiebung auf den Wiederzündprozess des Lichtbogens nach dem Stromnulldurchgang. Dabei wird darauf hingewiesen, dass eine Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom dazu führen kann, dass der Lichtbogen im Stromnulldurchgang nicht oder nur sehr kurz erlischt [UL 1996, Müller 2011].

Um den Einfluss einer Induktivität auf den Lichtbogenstrom zu testen werden Messungen mit ohmschen und induktiven Lasten miteinander verglichen. Um eine rein induktive Last zu simulieren wurden mehrere in Serie geschaltete Spulen verwendet. Diese mussten in der Lage sein, einen Strom von mehreren hundert Ampere zu tragen. Die Induktivität durfte aber auch nicht zu groß sein, da sonst nicht genug Strom fließt um einen Lichtbogen zu zünden. Die verwendeten Spulen haben eine Gesamtinduktivität von 0,67 mH. Weitere Tests wurden mit Teilen einer Transformatorspule gemacht, die eine Gesamtinduktivität von 7,2 mH besitzt. Messungen haben jedoch gezeigt, dass es mit dieser Spule nicht möglich war einen seriellen Lichtbogen zu zünden. Die

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

Impedanz der Spule war so groß, dass der Laststrom nicht ausreichte den Lichtbogen aufrecht zu erhalten. Er erlosch bereits nach der ersten Halbwelle wieder.

Erste Tests werden mit einer ohmschen Last durchgeführt, um eine Referenzkurve zu erhalten mit der der Einfluss der induktiven Last später verglichen werden kann. Das Ersatzschaltbild des Messaufbaus ist in Abbildung 49 zu sehen. Der Lastwiderstand beträgt  $800\text{ m}\Omega$ . Der Strom des seriellen Lichtbogens wird zwischen dem Schalter und dem Lichtbogen gemessen. Da die Netzimpedanz deutlich kleiner ist als die in den Versuchen vorkommenden Lastimpedanzen, wird der Phasenwinkel zwischen Leerlaufspannung und Laststrom im Wesentlichen durch die Lastimpedanz bestimmt. Er beträgt hier nahezu Null.



R Abbildung 49: Schaltung zur Erzeugung eines seriellen Lichtbogens mit ohmscher Last.

Der gemessene Stromverlauf (siehe Abbildung 50) zeigt die typischen Lichtbogenmerkmale eines Wechselspannungslichtbogens, wie das Erlöschen im Nulldurchgang und der steile Stromanstieg beim Wiederezünden. Das resultierende Frequenzspektrum des Lichtbogens kann nun mit dem Spektrum bei induktiver Last verglichen werden.

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

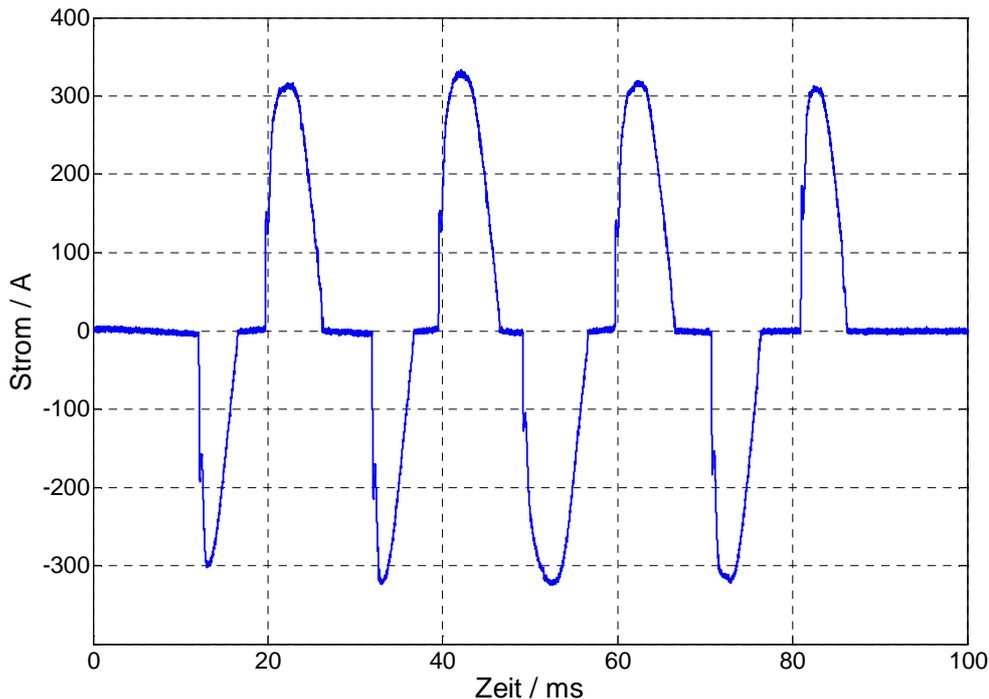


Abbildung 50: Stromverlauf eines seriellen Lichtbogens bei ohmscher Last.

Die in Abbildung 49 gezeigte ohmsche Last ( $R$ ) wird durch die aus Spulen (ca. 0,67 mH) bestehende induktive Last ( $X_L$ ) ersetzt (Abbildung 51). Es wird derselbe Test mit seriellen Lichtbogen durchgeführt um vergleichbare Messwerte zu erhalten. Der Strom wird wiederum zwischen dem Schalter und dem Lichtbogen gemessen

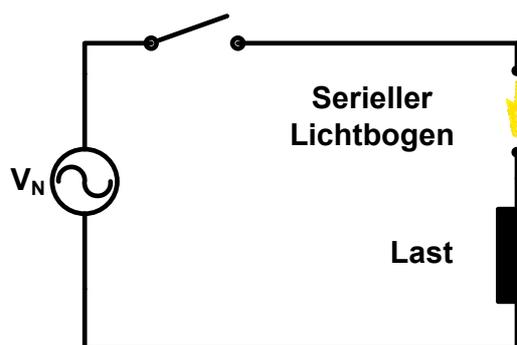


Abbildung 51: Schaltung zur Erzeugung eines seriellen Lichtbogens mit induktiver Last.

Aufgrund der geringeren Impedanz der Spule im Vergleich zur ohmschen Last ergibt sich ein höherer Gesamtstrom. Das Messergebnis in Abbildung 52 ähnelt ansonsten sehr dem aus Abbildung 50 für die ohmsche Last. Jedoch zeigt sich, dass aufgrund der höheren Stromstärke das Plasma heißer ist und die Wiederzündspannung deshalb schneller erreicht wird. Dadurch fallen die Stromlücken im Nulldurchgang kürzer aus. Ebenso wirkt sich hier auch die Phasenverschiebung aus, da dadurch die Wiederzündspannung schneller erreicht wird.

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

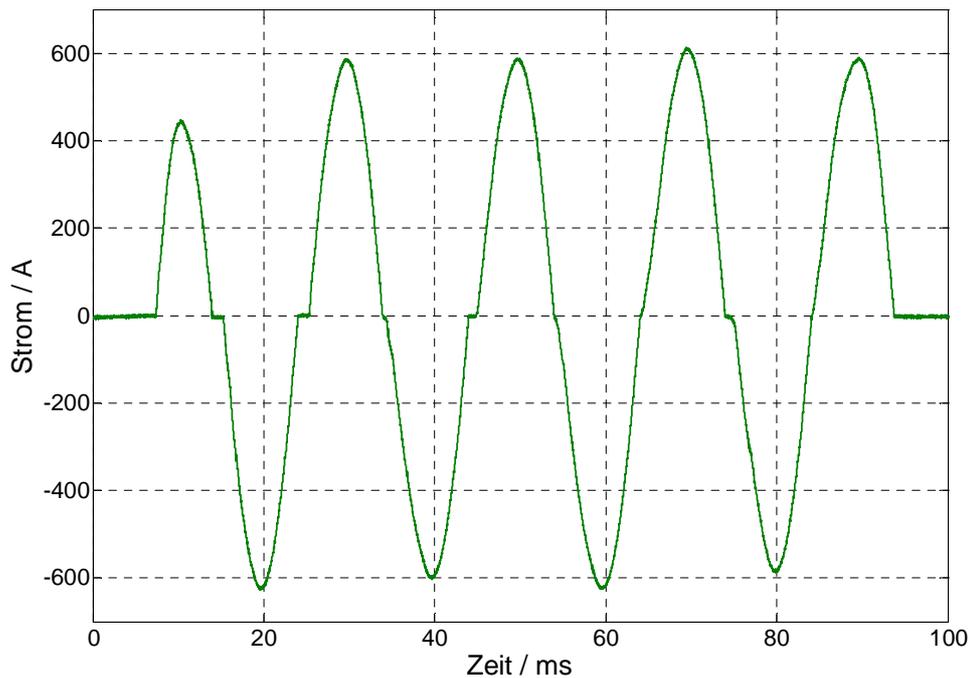


Abbildung 52: Strom eines seriellen Lichtbogens mit induktiver Last.

Im Frequenzspektrum zeigen sich Unterschiede zwischen induktiver und ohmscher Last. In Abbildung 53 ist zu sehen, dass die induktive Last einem Tiefpassfilter gleichkommt. Hochfrequente Signale werden gedämpft, was sich besonders beim schnellen Stromanstieg nach dem Wiederezünden bemerkbar macht. Hier fallen die Amplituden im Frequenzspektrum zwischen 1 kHz und 10 kHz deutlich kleiner aus. Obwohl die Amplitude der induktiven Last im Zeitbereich aufgrund des größeren Stromes höher ist, zeigt sich doch im niedrigen Frequenzbereich ( $< 1$  kHz) große Ähnlichkeit zur ohmschen Last. Hier ist das Amplitudendichtespektrum bei beiden Lastarten ähnlich hoch.

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

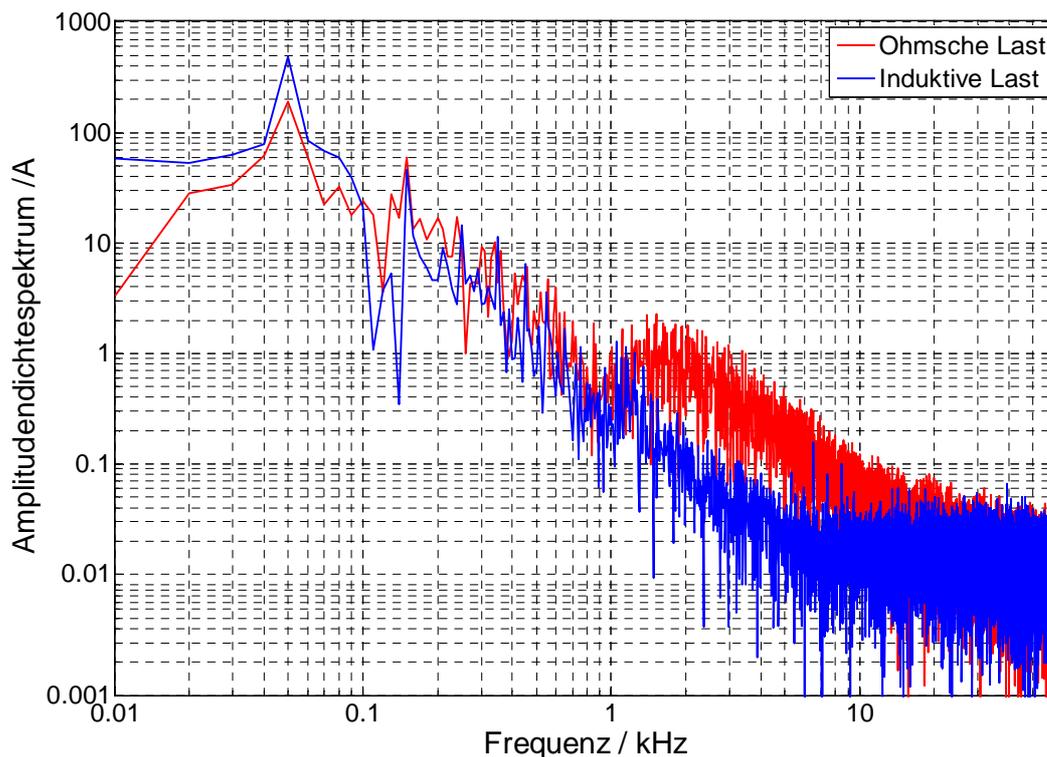


Abbildung 53: Frequenzspektrum eines seriellen Lichtbogens mit induktiver Last aus Abbildung 52, vergleichen mit dem Spektrum der ohmschen Last aus Abbildung 50.

Die Auswirkungen einer induktiven Last auf den Lichtbogenstrom im Zeitbereich werden in Abbildung 54 verdeutlicht. Bei ohmscher Last wird der sinusförmige Verlauf des Stromes kaum vom angeschlossenen Verbraucher beeinflusst. Strom und Spannung liegen in Phase, weshalb sie auch gleichzeitig den Stromnulldurchgang erreichen. Die Stromlücke ist ausgeprägt, da die Spannung nach dem Nulldurchgang erst wieder die Wiedertzündspannung  $U_z$  erreichen muss. Nach dem Durchzünden des Lichtbogens entsteht eine steile Stromflanke, deren Anstiegsgeschwindigkeit wiederum nicht vom Verbraucher beeinflusst wird.

Bei einer Last mit induktivem Anteil bewirkt die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung, dass nach dem Erlöschen des Lichtbogens im Stromnulldurchgang bereits wieder eine Spannung anliegt. So kann die Wiedertzündspannung  $U_z$  schneller erreicht werden und die Stromlücke fällt kürzer aus. Die induktive Last verlangsamt auch den Stromanstieg nach der Lichtbogenzündung, was besonders die hochfrequenten Anteile im Lichtbogenstrom reduziert.

## 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

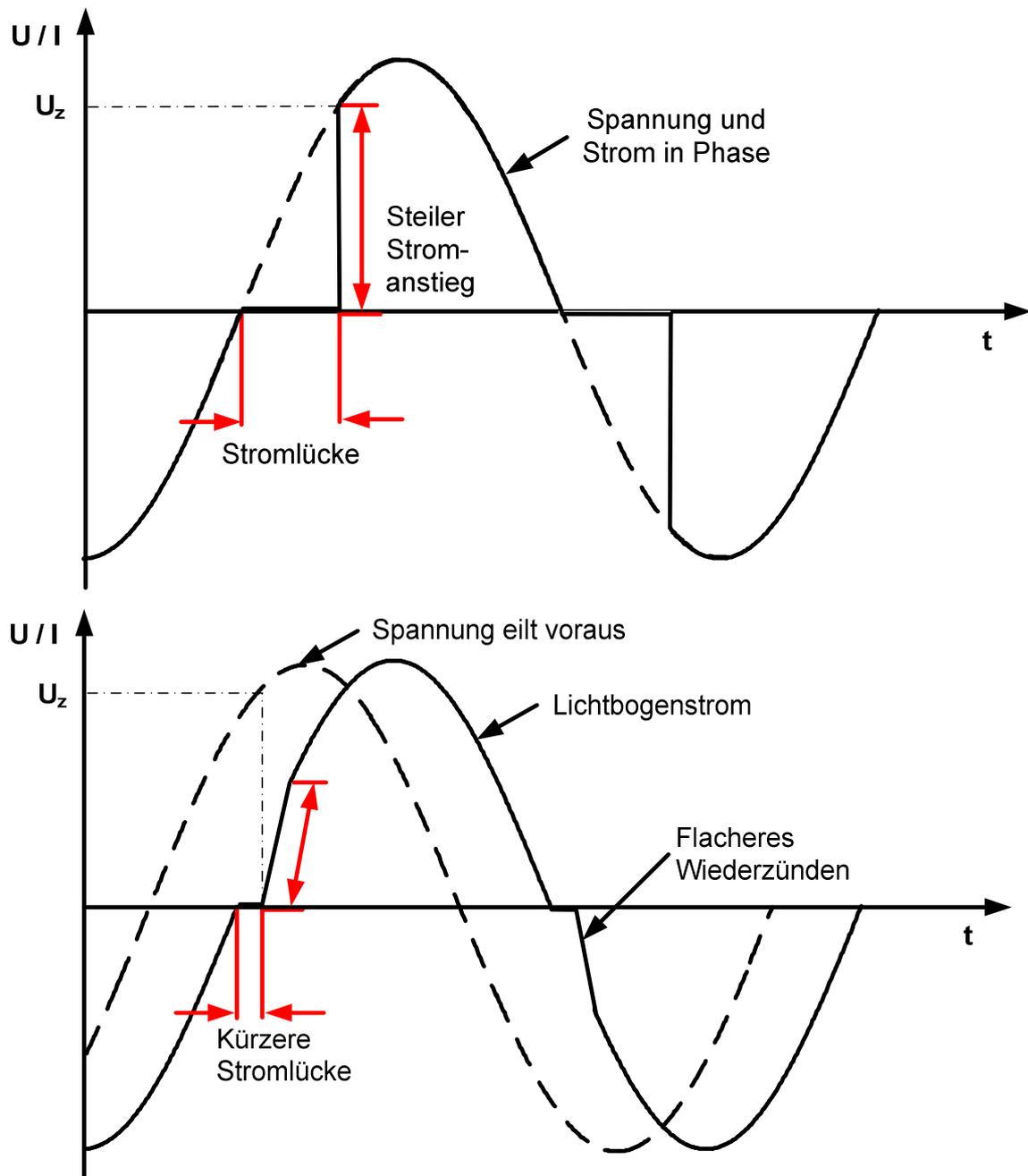


Abbildung 54: Vergleich der Auswirkungen von resistiver (oben) und induktiver (unten) Last auf den Lichtbogenstrom.

### 4.3.2 Kapazitive Lasten und ihr Einfluss auf das Frequenzspektrum

Kapazitive Lasten sind sehr viel seltener als ohmsche und induktive Lasten. Kapazitiv wirken in elektrischen Installationen hauptsächlich Kabel, Leuchtstoffröhren und Netzfilter. Zusätzlich werden große induktive Lasten oftmals mit Kondensatoren zur Blindleistungskompensation beschaltet.

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

Bei parallelen Lichtbogenfehlern haben alle angeschlossenen kapazitiven Lasten, die niederinduktiver als das Versorgungsnetz an die Fehlerstelle angebunden sind, einen Einfluss auf den Lichtbogenstrom. Sie speisen die transienten Zündvorgänge und reduzieren so die hochfrequenten Anteile, der Netzeinspeisung. Bei einer Messung des Lichtbogenstroms an der Netzeinspeisung ist dieser um den Strom aus angeschlossenen Kapazitäten reduziert. Die hochfrequenten Anteile des Lichtbogenstromes werden zum Teil von der Kapazität  $C_i$  gespeist.

Um den Einfluss einer Kapazität auf die lichtbogenspezifischen Eigenschaften zu untersuchen wird der Strom an zwei Stellen durch Stromzangen gemessen.  $I_1$  wird kurz nach dem Leistungsschalter gemessen. Der Abstand zwischen Einspeisung und Messaufbau zur Lichtbogenerzeugung beträgt ca. 15 Meter Kabel.  $I_2$  wird direkt vor den Elektroden gemessen, zwischen denen der serielle Störlichtbogen brennt. Eine Kapazität von  $C_i = 10 \mu\text{F}$  wird zwischen Stromzange eins und zwei angeschlossen. Die Last  $R$  begrenzt den Lichtbogenstrom, so dass kein Kurzschluss entsteht.  $I_2$  ist der gesamte durch den Lichtbogen fließende Strom, bestehend aus dem Netzstrom  $I_1$  und dem Strom aus der Kapazität  $I_C$ .

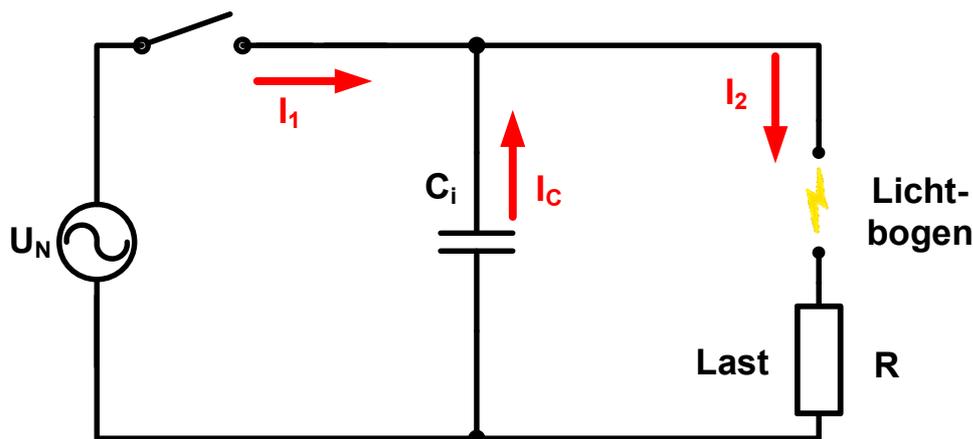


Abbildung 55: Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses einer Kapazität auf den Lichtbogenstrom.

Das Messergebnis zeigt im Zeitbereich nur minimale Unterschiede zwischen den beiden Stromverläufen (Abbildung 56). Der Strom durch den Lichtbogen (im Vordergrund rot) ist minimal höher und steiler als der Strom aus dem Versorgungsnetz (im Hintergrund schwarz). Der leichte Unterschied in der Amplitude entsteht durch den Strom durch die Kapazität  $I_C$ . Die Kapazität hat im Zeitbereich kaum Einfluss auf den Lichtbogenstrom. Dies war zu erwarten, da der durch den Lichtbogen fließende Strom zum allergrößten Teil aus dem speisenden Netz kommt. Die Kapazität ist zu klein, um einen nennenswerten Anteil zum Lichtbogenstrom beizutragen.

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

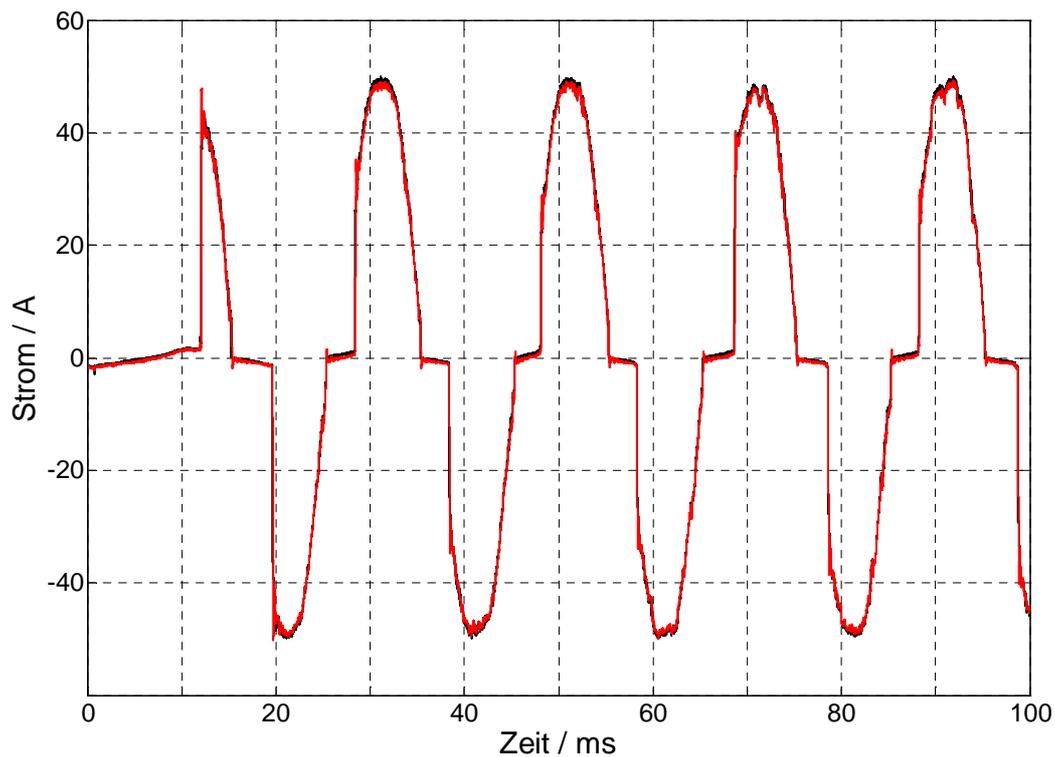


Abbildung 56: Störlichtbogenstrom  $I_2$  (roter Stromverlauf) direkt vor der Fehlerstelle und Netzstrom  $I_1$  (schwarzer Stromverlauf) an der Einspeisung.

In Abbildung 57 zeigt sich, dass die Unterschiede im Frequenzbereich nur oberhalb 10 kHz sichtbar werden. Die gemessenen Spektren der Ströme vor und nach der Kapazität  $I_C$  sind unterhalb 10 kHz nahezu gleich.

## 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

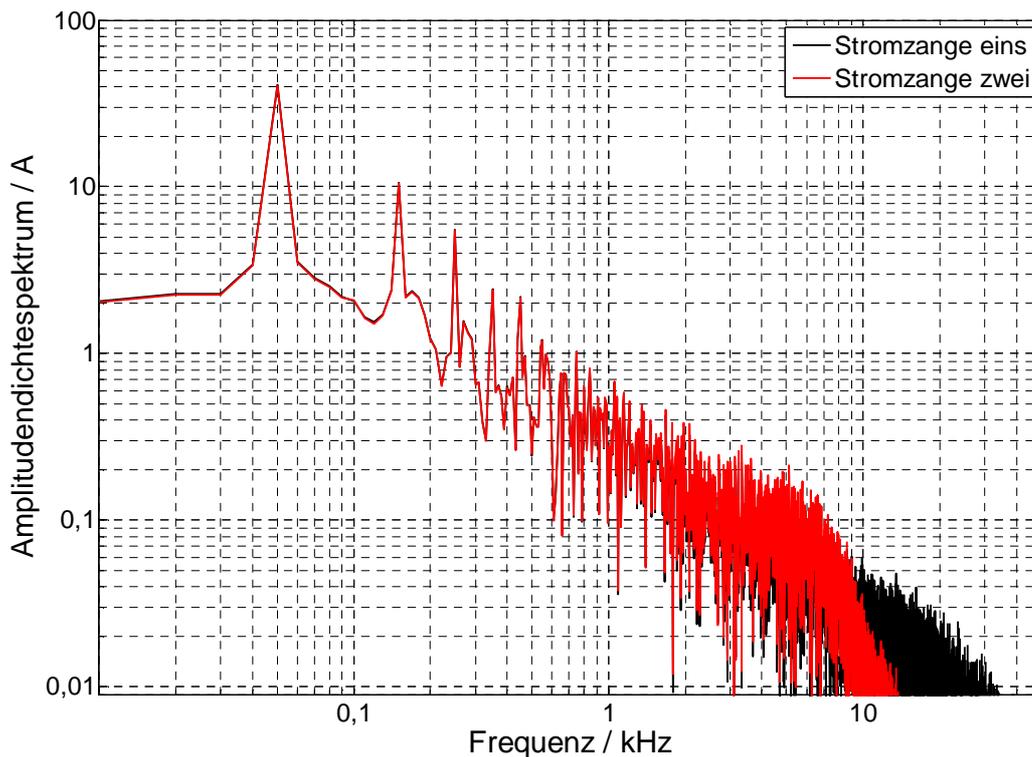


Abbildung 57: Frequenzspektrum von gemessenen Lichtbogenströmen vor (schwarz) und nach (rot) der Kapazität  $C_i$ .

Die gewählte Kapazität wirkt sich nur im Bereich oberhalb 10 kHz aus. 10  $\mu\text{F}$  stellt bereits eine recht hohe kapazitive Last dar. In den meisten Schaltanlagenkonfigurationen wird die kapazitive Last weit darunter liegen. Die Messung zeigt, dass selbst bei stromschwachen Störlichtbögen trotz Kapazitäten im Netz noch genügend lichtbogenspezifische Frequenzanteile an der Einspeisestelle gemessen werden können.

### 4.3.3 Netzurückwirkungen durch Lasten mit Pulsweitenmodulation

Die Pulsweitenmodulation (PWM) ist ein verbreitetes Verfahren zur Leistungssteuerung von Verbrauchern. Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist die Erzeugung von Oberschwingungen durch das fortlaufende Ein- und Ausschalten des Verbrauchers. Je nach Schaltfrequenz können so Frequenzmuster erzeugt werden, die denen eines Lichtbogens ähneln. Noch mehr Ähnlichkeiten mit einem Lichtbogenstrom haben Verbraucher mit Phasenanschnittsteuerung, wie beispielsweise Dimmer. Durch die angeschnittene Phase entsteht ein dem Lichtbogen sehr ähnlicher Stromverlauf. Je nach Verfahren (z.B. Pulsfolge- oder Phasenanschnittsteuerung), können die Auswirkungen auf den Stromverlauf unterschiedlich stark ausfallen. Die hier gewonnenen Ergebnisse lassen sich daher nicht verallgemeinern, bieten aber

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

einen Anhaltspunkt für die zu erwartenden Auswirkungen auf die Detektierbarkeit eines Lichtbogens anhand seiner Merkmale im Stromverlauf.

In Abbildung 58 ist der Stromverlauf eines anfahrens Aufzuges zu sehen. Neben den Stromlücken nahe dem Nulldurchgang weist die Messung auch steile Anstiegsflanken auf. Insbesondere in der Mitte der Halbwelle bricht der Strom auf nahezu Null ein und steigt dann wieder rasch auf seinen vorherigen Wert an. Diese Merkmale könnten im Zeitbereich als Lichtbogenmerkmale fehlinterpretiert werden.

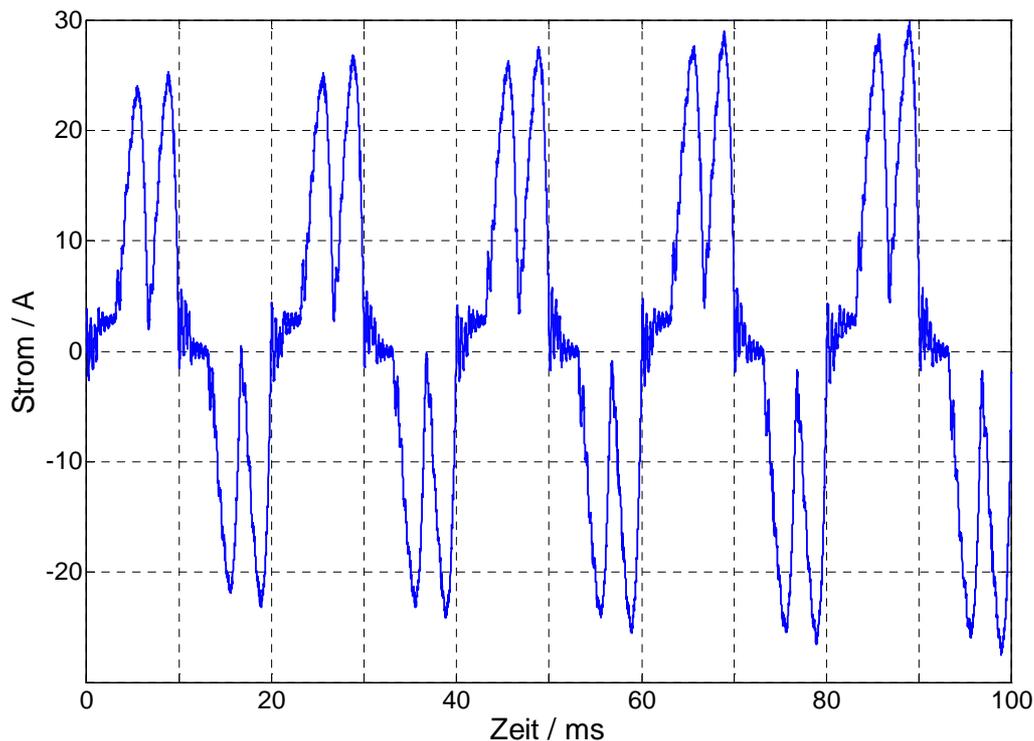


Abbildung 58: Strom eines anfahrens Aufzuges.

Im Frequenzspektrum in Abbildung 59 sind hohe Amplitudenwerte bei den Harmonischen der Grundfrequenz 50 Hz zu sehen. Besonders hohe Amplituden haben die 5. und 7. Harmonische. Bei ca. 2 kHz ist wiederum eine deutliche Anhebung des Spektrums zu sehen, welche durch die Motorsteuerung des Aufzuges verursacht wird. Auf die Netzurückwirkungen von Stromrichtern speziell im Frequenzbereich von 2 – 10 kHz geht [Krechla 1998] näher ein.

### 4.3 VERBRAUCHER IM NETZ UND IHR EINFLUSS AUF DEN LICHTBOGEN

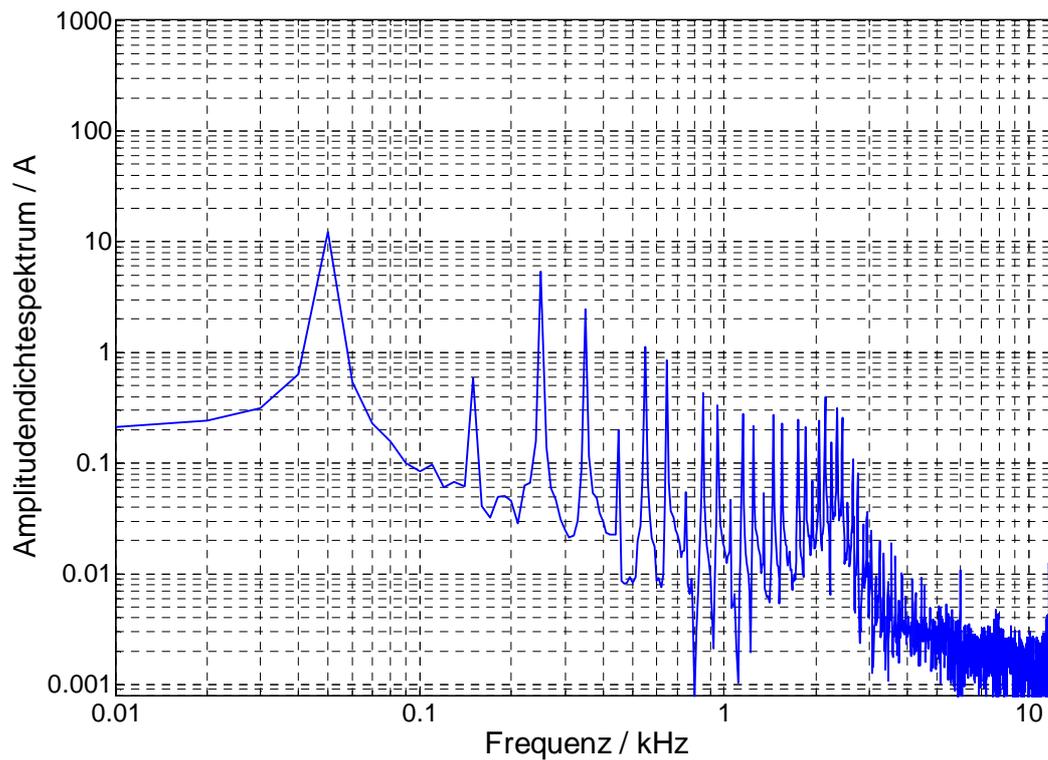


Abbildung 59: Frequenzspektrum des Stromverlaufs bei anfahrendem Aufzug aus Abbildung 58.

Das Beispiel des Aufzuges zeigt, dass lichtbogenähnliche Merkmale auch von Verbrauchern verursacht werden können. Insbesondere wenn nur ein einziges Lichtbogenmerkmal zur Detektion verwendet wird, könnte dadurch eine Fehlauslösung zustande kommen.

## 5 Auswertealgorithmen zur Fehlerdetektion

In den vorherigen Kapiteln wurden die Merkmale des stromschwachen Störlichtbogens beschrieben. Für eine automatisierte Störlichtbogenerkennung, müssen Programme entwickelt werden, die die Kriterien des Störlichtbogens eindeutig identifizieren können. Ansätze dazu gibt es in verschiedenen Veröffentlichungen, wie zum Beispiel von [Maroni 2001], [Gammon 2000] und [Meckler 2002]. [Sultan 1994] beschreibt ein Verfahren zur Erkennung von Freileitungsschäden mit Erdberührung, welches ähnliche Merkmale verwendet.

Dieses Kapitel befasst sich mit der Beschreibung von Auswertealgorithmen zur Fehlererkennung in gemessenen Stromverläufen. Es werden mehrere Verfahren beschrieben, die sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich Lichtbogenmerkmale erkennen können. Durch Vergleiche von Stromverläufen ohne Lichtbogen mit Störlichtbogenströmen wird die Selektivität der Verfahren gezeigt. Auch bei schwierigen Laststromverhältnissen, bei denen kaum mehr ein sinusförmiger Verlauf zu erkennen ist, konnten die Auswertealgorithmen den Störlichtbogen noch detektieren.

### 5.1 Lichtbogenerkennung im Zeitbereich

Die Auswertung im Zeitbereich ermöglicht es, Lichtbogenmerkmale in ihrer zeitlichen Abfolge zu bewerten. So kann das detektierte Ereignis in einen Zusammenhang zur Phasenlage gebracht werden, was eine Einordnung in gestörten oder ungestörten Betrieb erleichtert.

#### 5.1.1 Detektion über steile Stromflanken

Ein wesentliches Merkmal des Wechselstromlichtbogens ist wie bereits beschrieben der Stromnulldurchgang und das daraus resultierende Erlöschen des Lichtbogens. Das darauf folgende Wiederzünden der Lichtbogenstrecke ist durch das stochastische Verhalten ein Merkmal des Lichtbogens. Insbesondere bei parallelen Störlichtbögen sind die Stromflanken gut ausgeprägt und ergeben ein mit jeder Halbwelle wiederkehrendes Muster (siehe Abbildung 60).

Dieses Muster soll in einem ersten Verfahren zur Lichtbogendetektion genutzt werden. Die Auswertemethode muss selektiv genug sein, dass Peaks, die in regelmäßigen Abständen auftreten (Phasenanschnittsteuerung o. ä.) nicht fälschlicherweise als Lichtbogenzündungen interpretiert werden können. Dies würde geschehen, wenn nur steile Stromflanken detektiert würden. Ohne die Auswertung der Flankenabstände (siehe Kapitel 4.1.2) ist die Wahrscheinlichkeit einer Fehlauflösung gegeben.

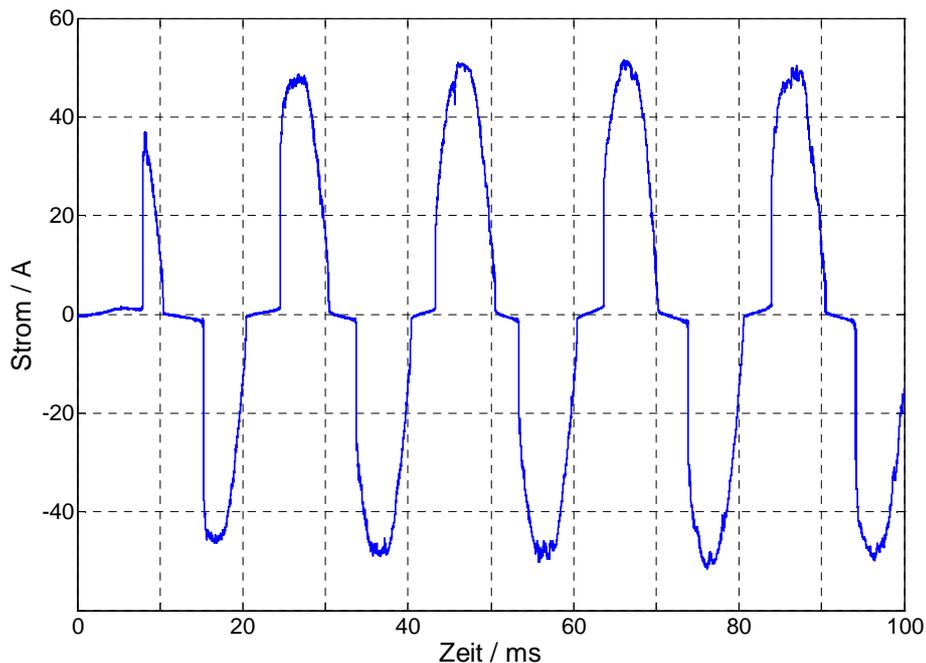


Abbildung 60: Steile Wiederzündflanken nach dem Stromnulldurchgang ergeben ein mit jeder Halbwelle wiederkehrendes Muster.

Um die Stromflanken zur Erkennung eines Lichtbogens zu benutzen, müssen diese zunächst durch Filterung des Ausgangssignals isoliert werden. Dazu muss vor allen Dingen die Netzfrequenz herausgefiltert werden. Anschließend kann mittels einer Maximalwerterkennung der jeweils höchste Peak einer Halbwelle bestimmt werden. Ein Zähler vergleicht die Zeit bis zum Auftreten des höchsten Peaks in der darauffolgenden Halbwelle. Schwankt die Zeit zweier aufeinander folgender Peaks nicht, so muss es sich um eine Störung durch einen Verbraucher oder durch äußere Einflüsse handeln. Nur wenn die Peaks um den Mittelwert von 10 ms schwanken, kann es sich um das Zünden eines Lichtbogens handeln.

### Signalfilterung

Im ungefilterten Zustand dominiert die Netzfrequenz das Signal. Die steilen Stromflanken des Wiederzündvorgangs werden nach Filterung durch einen Bandpass sichtbar und ergeben einzelne Peaks mit unterschiedlicher Amplitude und unterschiedlichen zeitlichen Abständen zueinander. Der Bandpass muss so abgestimmt sein, dass die Netzfrequenz gut gedämpft wird. Dabei soll aber ein möglichst hoher Anteil der Lichtbogenflanke bestehen bleiben. In Versuchen hat sich eine untere Grenzfrequenz von ca. 1 kHz bewährt. Die obere Grenzfrequenz wird so gewählt, dass die Zündflanken nicht gedämpft werden. Die 3 dB Grenzfrequenz wurde hier auf ca. 50 kHz gewählt (siehe Abbildung 61). Der analoge Filter wird in [Müller 2007] näher erläutert.

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

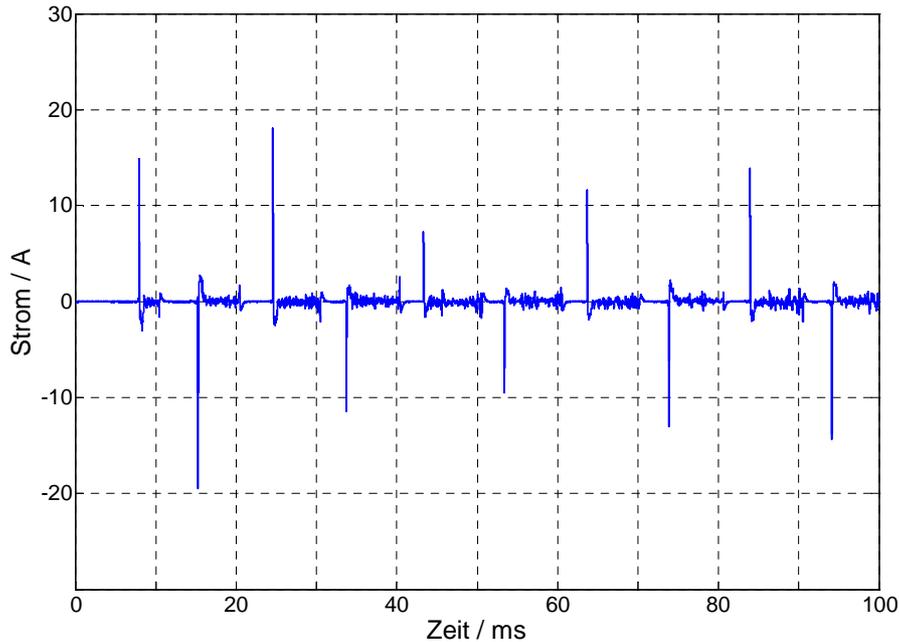


Abbildung 61: Störlichtbogenstrom nach Bandpassfilterung. Ungefiltert dominiert die 50 Hz Netzfrequenz (siehe Abbildung 60). Nach Filterung mittels Bandpass bleiben nur noch die steilen Zündvorgänge übrig.

Die im Folgenden beschriebenen Verfahren wurden in Matlab realisiert. Der analoge Filter wird hierbei durch digitale Filterverfahren ersetzt.

### Schwankungen der Zündzeitpunkte

Um die steile Anstiegsflanke einer jeweiligen Halbwelle zuordnen zu können, muss der Anfangs- und Endzeitpunkt der Halbwelle bekannt sein. Dies kann für ein einfaches sinusförmiges Signal der jeweilige Vorzeichenwechsel beim Nulldurchgang sein. Bei einem digitalisierten Signal werden dann die Werte genommen, zwischen denen das Vorzeichen wechselt. Bei bestimmten Signalen kann es jedoch vorkommen, dass der Nulldurchgang nicht genau zu bestimmen ist, da er mehrfach durchlaufen wird (in Abbildung 60 drei mal). Deshalb werden Schwellwerte eingeführt (blau gestrichelt). Erst das Überschreiten dieser Schwellwerte markiert den Nulldurchgang (rotes X). Vor der Bestimmung der Nulldurchgänge wird ein möglicher Gleichanteil im Signal herausgefiltert. Dann wird das Signal durch einen Tiefpass geglättet, um die Bestimmung des Nulldurchgangs zu vereinfachen.

Bei einfachen Signalen mit hohem Anteil an sinusförmigen Strom ist der Nulldurchgang der y-Achse des Stromes sehr exakt, er wird nur einmal durchlaufen. Die Schwellwerte werden daher nur für sehr verzerrte Signale benötigt.

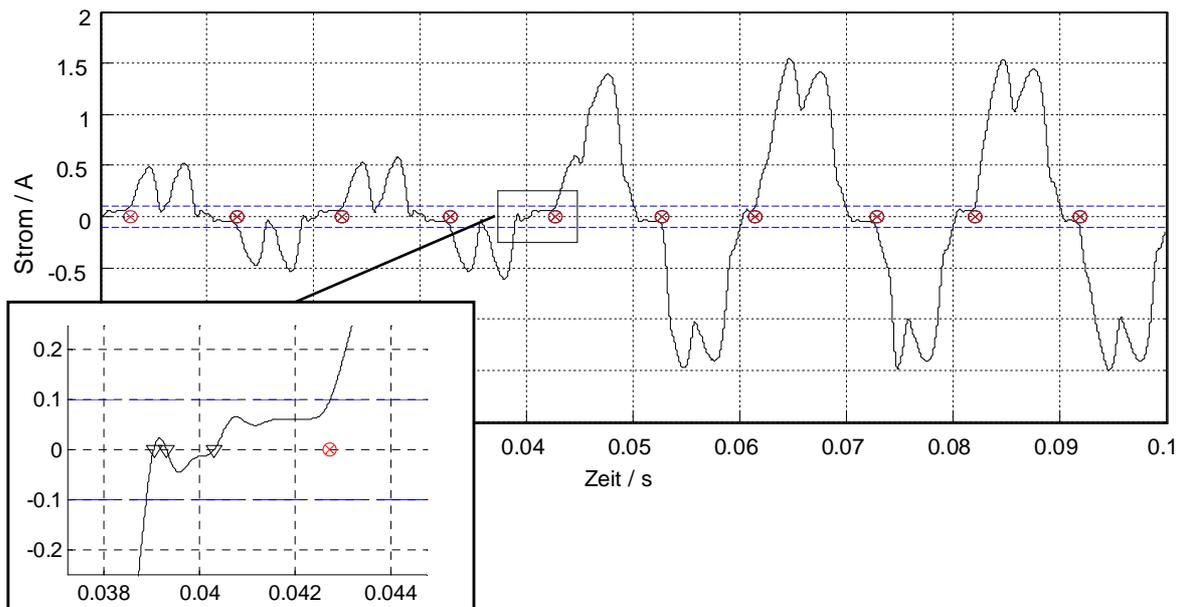


Abbildung 62: Bestimmung des Nulldurchgangs durch zwei Schwellwerte.

Durch die Bestimmung der Nulldurchgänge sind nun die Zeitpunkte bekannt, zwischen denen eine Halbwelle liegt. Nach der Signalfilterung wird der höchste Peak zwischen diesen beiden Werten ermittelt. Dieser steht für die Flanke mit der größten Amplitude im Durchlassbereich des Bandpasses. Es wird davon ausgegangen, dass Lichtbogenströme höhere Anstiegsflanken verursachen als etwaige Lastströme ähnlichen Flankenanstiegszeiten.

In [Müller, 2007] wurde nicht der jeweils höchste Peak je Halbwelle ermittelt, sondern jeder Peak oberhalb eines festgelegten Schwellwertes ausgewertet. Dies hatte den Nachteil, dass pro Halbwelle auch zwei oder mehr Spitzen oberhalb des Schwellwertes liegen konnten. In diesem Fall wäre nicht klar, welcher Peak zur Messung des Zeitabstandes verwendet werden soll. Das hier vorgestellte Verfahren behebt diesen Mangel.

Das Testsignal (Abbildung 63) besteht aus einem ohmschen Laststrom. Parallel zu diesem wird nach ca. 50 ms ein paralleler Störlichtbogen gezündet, der ca. 80 ms lang brennt und dann erlischt. Der Strom hat während der Lichtbogenbrenndauer die doppelte Amplitude. Die nachfolgenden Ergebnisse des Verfahrens können so besser mit den Amplituden des Laststromes eines ohmschen Verbrauchers, wie er vor und nach dem Lichtbogen auftritt, verglichen werden.

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

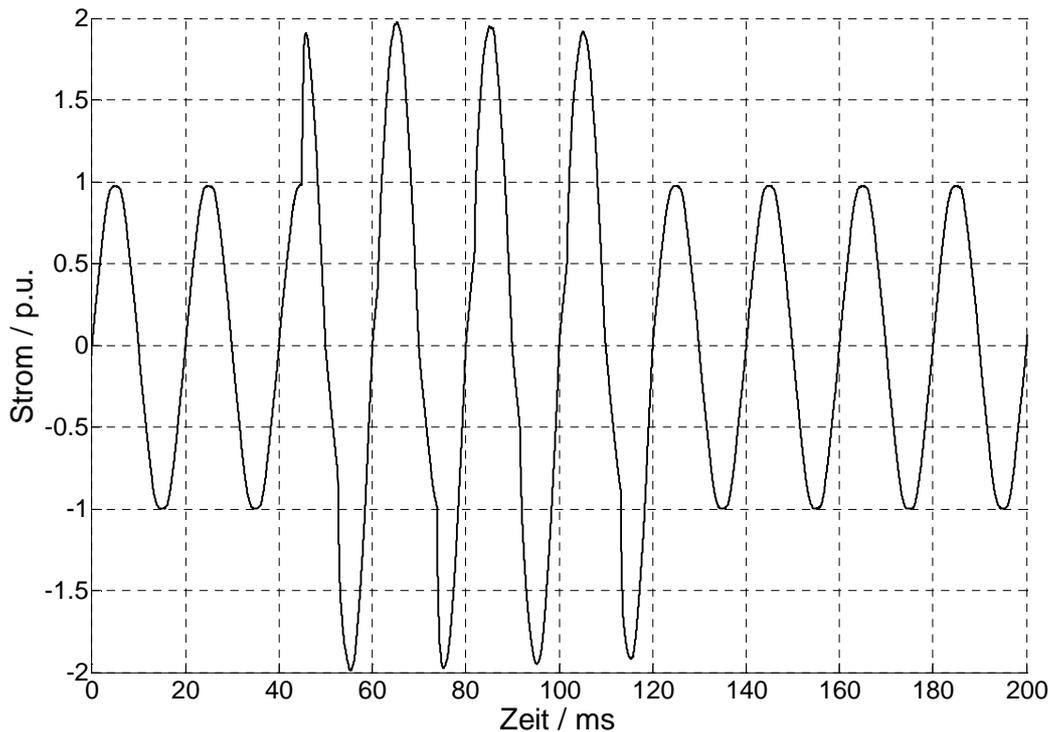


Abbildung 63: Resistiver Laststrom mit einem nach ca. 50 ms einsetzenden parallelen Lichtbogen.

Nach der Filterung des Signals wird anhand der festgelegten Start- und Endzeitpunkte jeder Halbwelle der jeweils maximale Peak detektiert (grün markiert). In Abbildung 64 ist zu sehen, dass auch im Bereich, in dem kein Lichtbogen brennt (0-40 ms und 120-200 ms), die maximalen Peaks bestimmt werden. Diese liegen jedoch unterhalb des Schwellwertes, weshalb der Zeitpunkt des höchsten Peaks nicht in die weitere Berechnung einbezogen wird. Der Schwellwert kann entweder einmal bei Inbetriebnahme des Detektionssystems festgelegt, oder aber dynamisch dem Rauschniveau nachgeführt werden.

Im hier vorgestellten Verfahren wurden feste Schwellwerte verwendet, die oberhalb des Rauschpegels liegen. Dadurch wird nur der Abstand zwischen den Markierung berechnet, die außerhalb des Rauschbereiches liegen.

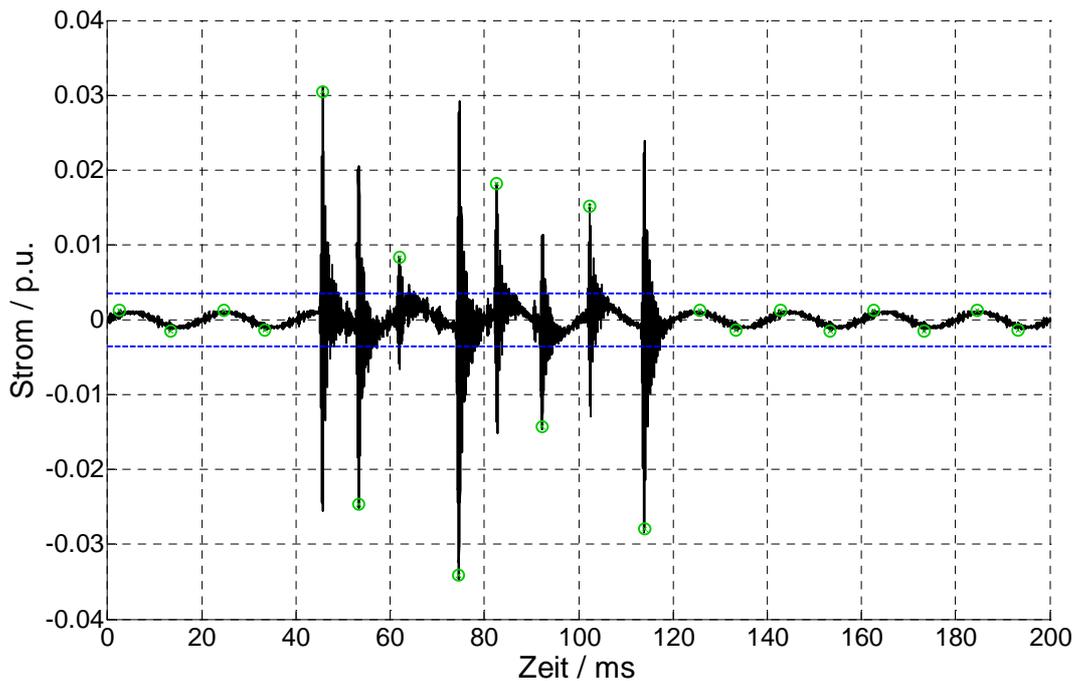


Abbildung 64: Ausgabe des mit Bandpass gefilterten Eingangstromverlaufs. Die Maximalwerte je Halbwelle sind grün markiert.

Der Abstand zwischen zwei Lichtbogenzündungen schwankt um die Dauer der Halbwellen von 10 ms. Würde der Lichtbogen immer zum gleichen Zeitpunkt zünden, wäre der Abstand zwischen zwei Lichtbogenflanken immer 10 ms. Für den Bereich ohne Flanken außerhalb der Schwellwerte wurde daher die Zeit auf 10 ms gelegt. So können Abweichungen von diesem Mittelwert besser dargestellt werden. In Abbildung 65 ist zu sehen, dass bis 40 ms keine Abweichung durch schwankende Zündflanken festgestellt wurde. Im Bereich zwischen 40 und 50 ms wird der erste Peak detektiert und dessen Zeitpunkt gespeichert. Nach der Erkennung des Peaks in der darauffolgenden Halbwelle, der ebenfalls außerhalb der Schwellwerte liegt, kann die Zeit zwischen den beiden Peaks berechnet und dargestellt werden.

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

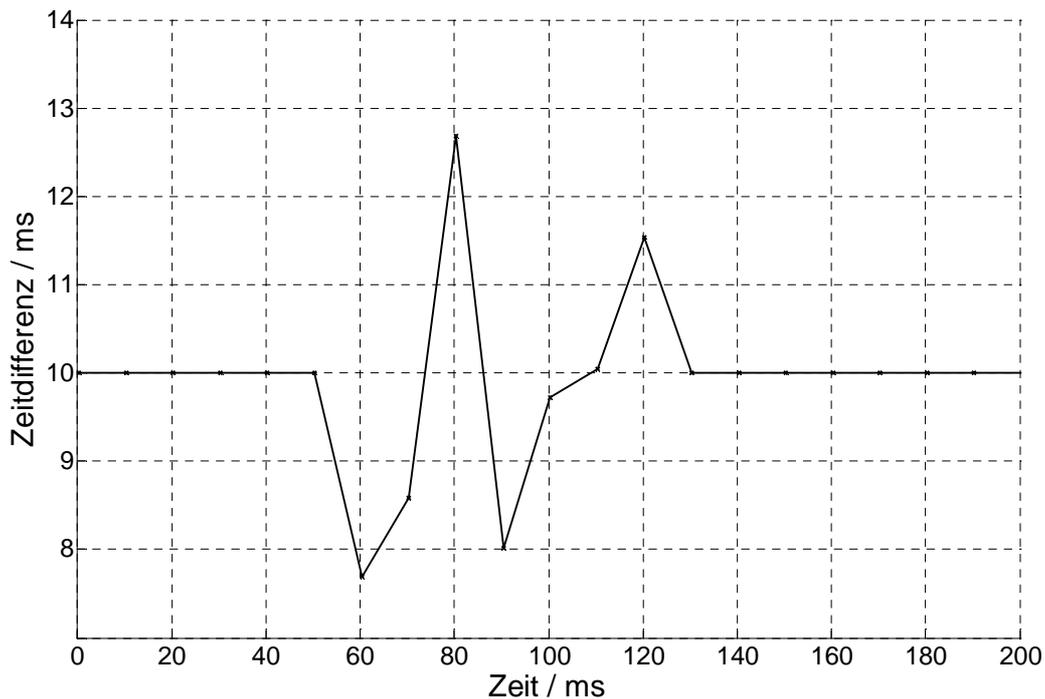


Abbildung 65: Berechnete Abstände der steilen Flanken eines Stromverlaufs.

### Aufbau der Auswertegrafiken im Zeitbereich

In den folgenden Beispielen ist für die Detektion im Zeitbereich die Amplitude jeweils auf eins normiert. So lassen sich die Stromverläufe und die Detektion der Lichtbogenmerkmale besser vergleichen. Die erste Kurve zeigt immer das Originalsignal. Im zweiten Panel sind die Stromnulldurchgänge markiert, mit denen Anfang und Ende einer Halbwelle bestimmt werden. Das dritte Panel zeigt das durch den Bandpass gefilterte Signal und die jeweils höchsten Peaks einer Halbwelle. Im vierten Panel schließlich, ist der Abstand eines Peaks zum vorhergehenden Peak berechnet und die Abweichung zur Periodendauer dargestellt. Die Kurve schlägt sowohl nach oben (Abstände zwischen Peaks  $> 10$  ms) als auch nach unten (Abstände zwischen Peaks  $< 10$  ms) aus. Als Kriterium für die Detektion eines Lichtbogens kann das mehrmalige Schwanken um den Mittelwert in Folge definiert werden. Für eine besonders sichere Detektion kann noch hinzu gefügt werden, dass mindestens je ein Wert grösser bzw. kleiner als 10 ms sein muss. Es dürfen nicht alle Werte kleiner oder grösser als 10 ms sein. Die Ausschläge müssen um den Mittelwert schwanken.

In Abbildung 66 wird der Gesamtstrom eines Schaltfeldes dargestellt. Bei einem Verbraucher tritt ein serieller Lichtbogen auf. Dieser Verbraucher wird im Beispiel erst nach der zweiten Halbwelle zugeschaltet, daher auch die Erhöhung der Gesamtamplitude. Die Lichtbogenmerkmale sind im Zeitbereich kaum mehr zu erkennen. Hier zeigen sich jedoch auch die Grenzen des Verfahrens. Zum

einen wird das Herausfiltern der Zündflanken schwieriger, je kleiner der Strom des lichtbogenbehafteten Verbrauchers im Verhältnis zum Gesamtstrom wird. Zum anderen stößt auch der im Matlab-Programm realisierte Filter an seine Grenzen. Ein mit diskreten Bauelementen realisierter Bandpass könnte hier bessere Ergebnisse liefern (siehe Beispiel in Abbildung 61). Dennoch kann das Auswerteverfahren Schwankungen zwischen den auftretenden Peaks feststellen. In einem Zeitraum von ca. 50 ms schwanken die Zündzeitpunkte mehrmals um über 2 ms in positive wie negative Richtung. Trotz schwieriger Bedingungen kann der Lichtbogen detektiert werden.

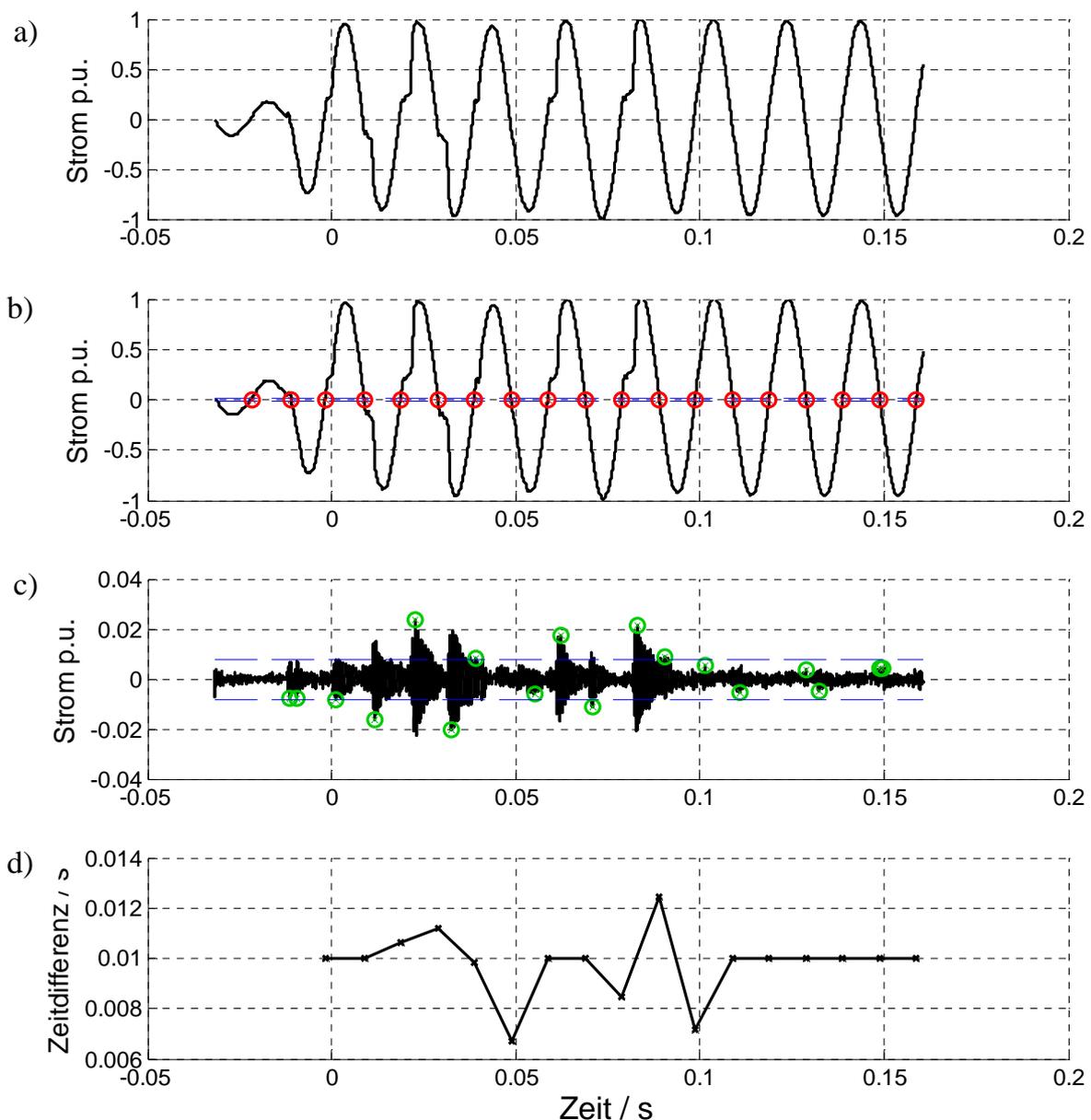


Abbildung 66: Stromverlauf eines seriellen Lichtbogens mit weiteren parallelen Lastströmen. a) Originalstromverlauf b) Bestimmung der Stromnulldurchgänge c) Mit Bandpass gefiltertes Signal d) Abstand zwischen den gemessenen Peaks

### Verbesserungsmöglichkeiten des Verfahrens

Bei der Berechnung der Abstände zwischen den Stromspitzen wird immer der Zeitpunkt des vorhergehenden Peaks als Referenzwert genommen. Es ist auch möglich, die Zeit des höchsten Peaks in Relation zum Beginn seiner Halbwelle zu berechnen. So ergibt sich bei jedem Peak oberhalb des Schwellwertes ein Wert ungleich Null. Bei periodischen Signalen, beispielsweise durch eine Phasenanschnittsteuerung, bleibt der Wert konstant oder ändert sich nur sehr langsam. Tritt ein Lichtbogen auf, dann schwankt der Wert je nach Zündzeitpunkt des Lichtbogens. Bei den in Schaltanlagen auftretenden Spannungen und Strömen zündet der Lichtbogen meist im ersten Teil der Halbwelle. Der Wert muss daher zwischen 0 und 5 ms schwanken.

Durch die unterschiedlichen Zündzeitpunkte und Zündbedingungen, haben auch die Peaks nach der Bandpassfilterung unterschiedliche Amplituden. Neben den Abständen können so auch die Amplituden der Peaks miteinander verglichen werden. Stochastisch schwankende Amplituden deuten eher auf einen Lichtbogen hin als konstante Amplituden (siehe Amplituden der Peaks in Abbildung 64).

Die in den Beispielen verwendeten Signale wurden mit einem in Matlab programmierten Bandpass gefiltert. Diese Form der Filterung liefert nicht das beste Ergebnis, da die Dynamik beschränkt ist. In Hardware realisierte Filter liefern ein wesentlich besseres Ergebnis. Die Stromanstiegsflanken können deutlich besser von der Netzfrequenz und anderen störenden Frequenzen getrennt werden. Für die hier vorgestellten Auswerteverfahren ist die Signalfilterung durch Matlab jedoch ausreichend.

### 5.1.2 Vergleich von Integralen über eine Halbwelle

Durch die Schwankungen im Zündzeitpunkt des Lichtbogens variiert auch das Integral über den Strom in jeder einzelnen Halbwelle des sinusförmigen Stromes. Bei ohmschen und induktive Verbrauchern ist der Unterschied zwischen  $A_n$  und  $A_{n+1}$  gering (Abbildung 67). Ausnahmen bilden Schaltvorgänge, bei denen sich von einer Halbwelle zur anderen die Lastverhältnisse ändern.

Tritt ein Lichtbogen auf, so variiert das Integral je Halbwelle während der Brenndauer stärker als bei einer Last. Jede Halbwelle hat einen anderen integrierten Strom, je nachdem, wann der Lichtbogen gezündet hat. Je später der Lichtbogen zündet, desto kleiner ist der Beitrag des Lichtbogenstromes zum Gesamtstrom und somit zum Gesamtintegral der Halbwelle. Das Stromintegral der Halbwelle wird dadurch kleiner als bei einem sinusförmigen Verbraucherstrom.

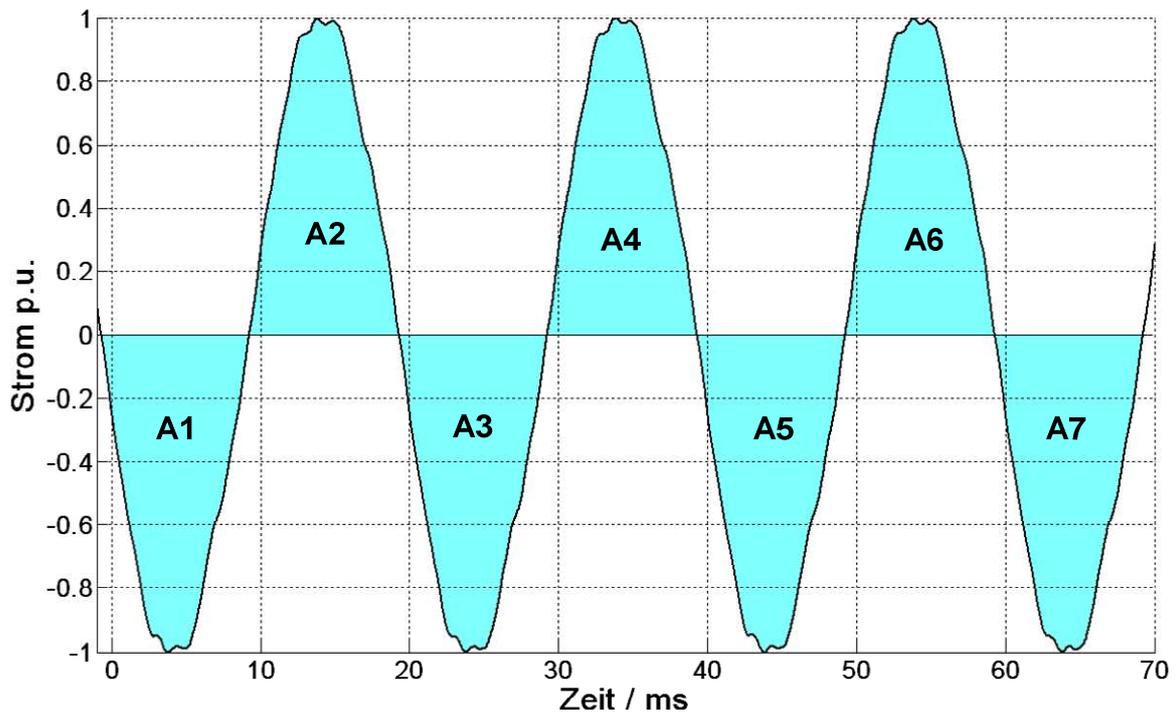


Abbildung 67: Bestimmung des Stromintegrals je Halbwelle (A1-A7).

Vergleicht man das Integral einer Halbwelle mit der vorangegangenen Halbwelle, so gibt es bei ohmschen und induktiven Verbrauchern nahezu keinen Unterschied. Selbst bei sich ändernden Lastverhältnissen ist der Betrag des Stromes von einer Halbwelle zur darauffolgenden gering. Ausnahmen bilden hierbei Schaltvorgänge, bei denen Lasten zu- oder abgeschaltet werden.

### Aufbau des Auswerteverfahrens

Wie beim Verfahren zur Schwankung des Zündzeitpunktes im vorherigen Abschnitt werden beim gemessenen Stromverlauf zunächst die Nulldurchgänge bestimmt. Die Messung wird so in einzelne Halbwellen aufgeteilt. Anschließend wird von jeder Halbwelle das Integral  $A$  des diskreten Stromsignals bestimmt. Das Integral wird durch Addition der einzelnen Amplitudenwerte, multipliziert mit der Abtastrate je Halbwelle errechnet. Da die Diskretisierung des Signals in immer gleichen Zeitabständen geschieht, ist die Zeitdauer für jedes Halbwellenintegral gleich lang:

$$A = \sum I_n \cdot t_A \quad I_n \text{ ist die Amplitude des diskreten Stromsignals}$$

In Abbildung 68 wird der Ablauf der Detektion eines Lichtbogens über die Änderung des Stromintegrals zwischen zwei Halbwellen dargestellt. Wie im vorangegangenen Kapitel wird zunächst der Stromnulldurchgang bestimmt, so dass der Stromverlauf in einzelne Halbwellen unterteilt werden kann (Panel b in Abbildung 68). Anschließend wird das Stromintegral durch Addition der Amplitudenwerte und Multiplikation mit der Samplingrate errechnet. Abbildung 68 c) stellt dieses Integral dar. Unterschiedliche Amplituden oder Halbwellen

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

erzeugen die Schwankungen der Integrale. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Unterschiede im Bereich von  $2-3 \times 10^{-5}$  liegen. Ein Lichtbogen sollte weit größere Unterschiede verursachen. Dass die gefundenen Schwankungen vernachlässigbar klein sind zeigt sich insbesondere im letzten Panel des Beispiels. Zum besseren Vergleich wurde hier, für die Differenz zwischen zwei Halbwellen, die gleiche Amplitudenskalierung gewählt wie bei den nachfolgenden Beispielen für dieses Verfahren.

## AUSWERTEALGORITHMEN ZUR FEHLERDETEKTION

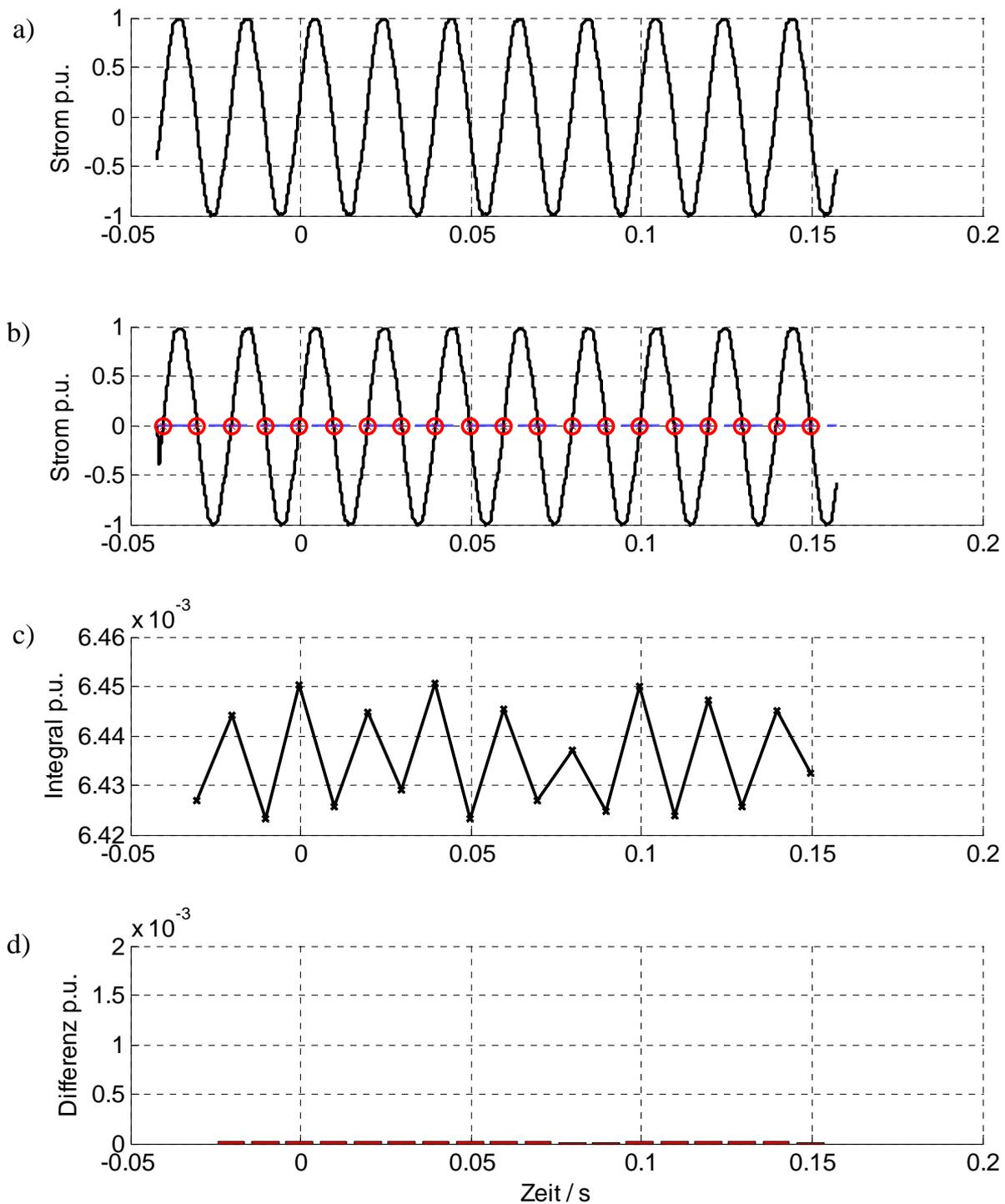


Abbildung 68: a) Verbraucherstrom von Laboren und Büros b) Ermittlung der Stromnulldurchgänge c) Integral über die Halbwellen d) Leichte Schwankungen von Halbwelle zu Halbwelle ( im Bereich von  $3 \times 10^{-5}$ ).

Anhand eines Stromverlaufes mit einsetzendem Lichtbogen soll nun gezeigt werden, wie das Verfahren einen Lichtbogen erkennt. In Abbildung 69 wird ein gemessener Stromverlauf mit seriellen Lichtbogen untersucht. Die Unterschiede der Integrale liegen jetzt im Bereich von  $0,5 \cdot 10^{-3}$ . Das Halbwellenintegral in Panel 3 zeigt einen deutlichen Sprung ab der dritten Halbwelle an. Dies liegt an der höheren Amplitude die möglich ist, weil der serielle Lichtbogen die

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

hochohmige Fehlerstelle überbrückt. Ähnliche Amplitudensprünge können auch durch zu- oder abschalten von Lasten verursacht werden. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der Auswertung von stochastisch verteilten Änderungen in Amplitude und Halbwellenintegral. Insbesondere unregelmäßig brennende Lichtbögen, die auch einzelne Halbwellen aussetzen können, werden durch dieses Verfahren erkannt. Im Beispiel aus Abbildung 69 tritt keine Stromunterbrechung auf. In einigen Halbwellen bilden sich jedoch leitfähige Brücken aus geschmolzenem Kupfer die die Fehlerstelle niederohmig überbrücken. Es zündet kein Lichtbogen. Die Änderung der Fläche in Panel 4 wurde mit dem selben Maßstab wie in Abbildung 68 skaliert. Es sind deutlich höhere Pegel als im vorherigen Beispiel zu erkennen.

Das Integral über der Halbwelle schwankt durch den unterschiedlichen Zündzeitpunkt des Lichtbogens. Sie kann aber auch durch eine Änderung der Amplitude, beispielsweise durch Zu- oder Abschalten eines Verbrauchers schwanken. Daher muss bei der Anwendung des Verfahrens darauf geachtet werden, dass einmalige Anstiege, wie durch einen Schaltvorgang, nicht als Fehler interpretiert werden. Erst mehrmalig auftretende Amplituden, die deutlich über denen des ungestörten Betriebes liegen, deuten auf einen Lichtbogen hin.

## AUSWERTEALGORITHMEN ZUR FEHLERDETEKTION

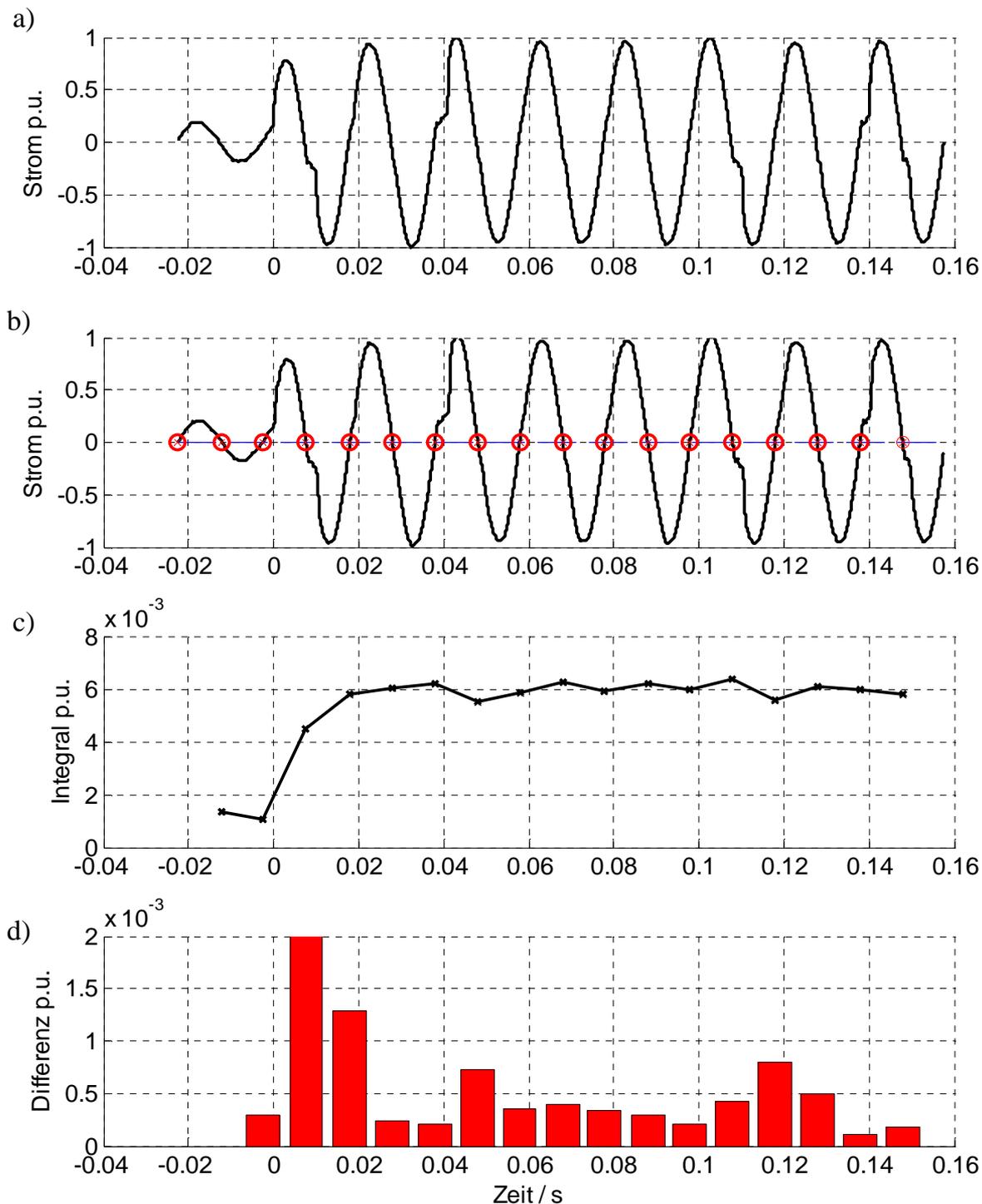


Abbildung 69: a) Netzlasten eines Büronetzes mit einsetzendem seriellen Lichtbogen b) Ermittlung der Stromnulldurchgänge c) Integral über die Halbwellen d) Schwankungen des Halbwellenintegrals im Bereich von  $0,3-1,2 \times 10^{-3}$ .

Noch deutlicher erkennt das Verfahren den parallelen Lichtbogen im Beispiel in Abbildung 70. Hier wirkt sich auch aus, dass der Lichtbogen für einzelne Halbwellen erlöschen kann. Speziell der parallele Lichtbogen, der eine zusätzliche Last darstellt, kann so gut erkannt werden.

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

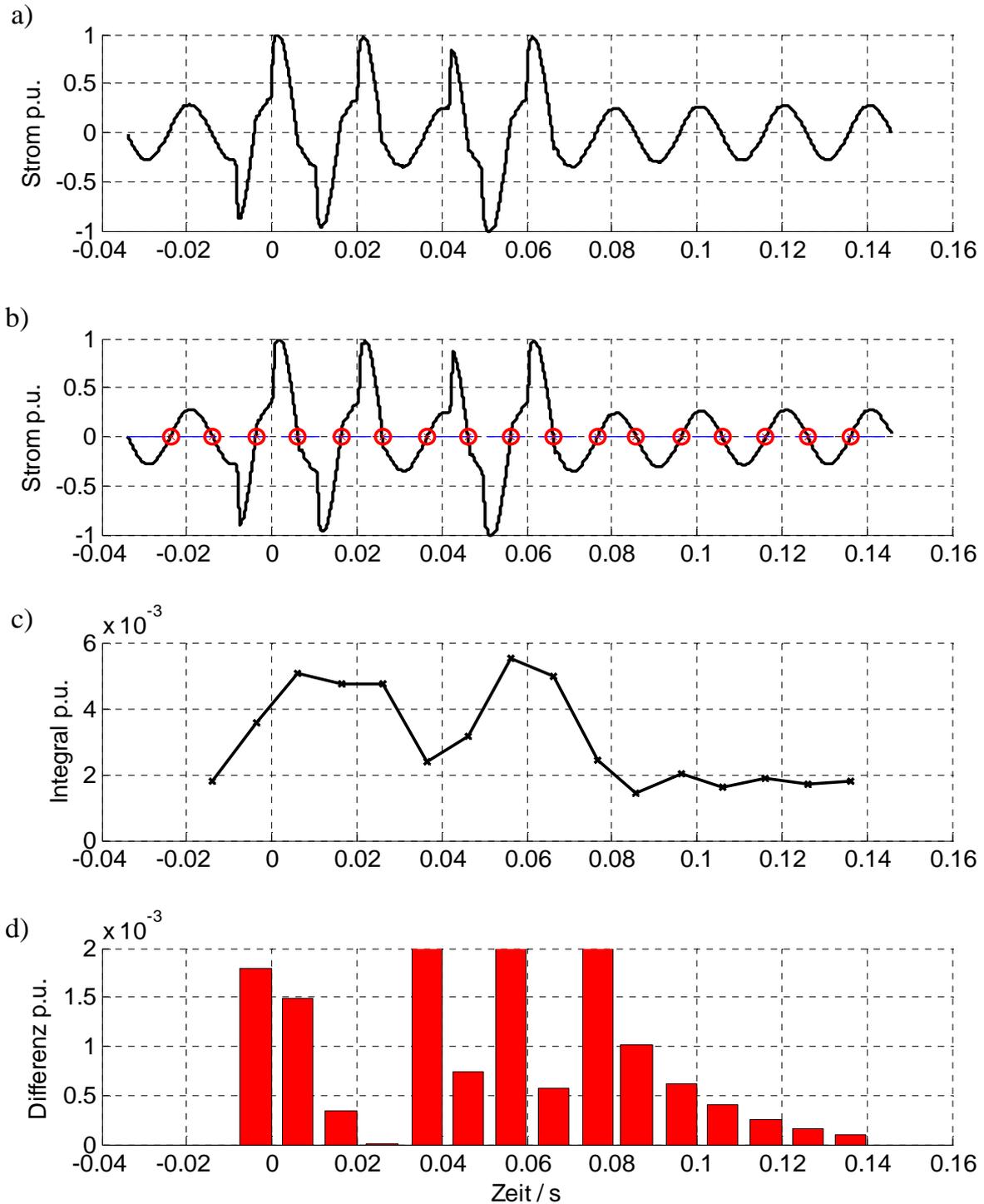


Abbildung 70: a) Laststrom von ohmschen Verbrauchern mit einsetzendem parallelen Störlichtbogen b) Ermittlung der Stromnulldurchgänge c) Integral über die Halbwellen d) Schwankungen des Halbwellenintegrals zum Teil weit über  $2 \times 10^{-3}$ .

### 5.1.3 Vergleich von normierten Halbwellenintegralen

Die Lichtbogendetektion durch Vergleich von Halbwellen hat in der im vorherigen Kapitel dargestellten Form einen Nachteil. Beim Vergleich einer Halbwellen ohne Lichtbogen und einer Halbwellen mit, treten große Unterschiede auf. Wird jedoch eine Halbwellen mit Lichtbogen mit einer darauffolgenden

Halbwelle ebenfalls mit Lichtbogen verglichen, so kann es in ungünstigen Fällen zu einem Unterschied von nahezu Null kommen. Zündet der Lichtbogen zweimal hintereinander zum (nahezu) gleichen Zeitpunkt, dann unterscheiden sich die berechneten Flächeninhalte kaum. Der Unterschied im Integral zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halbwellen ist dann wie bei Halbwellen ohne Lichtbogen nahezu Null. In Abbildung 70 sind in der 5. und 6. Halbwelle deutliche Verformungen aufgrund eines zündenden Lichtbogens zu erkennen. Trotzdem ist ihr Integral nahezu identisch weshalb der Unterschied, ähnlich wie im ungestörten Betrieb, nahezu Null ist. Zudem werden durch das einfache Integrieren der Halbwellen die Absolutwerte verglichen. Bei Lastschwankungen verändert sich durch die unterschiedliche Amplitude auch das Integral, unabhängig davon ob ein Lichtbogen brennt, oder nicht. Es lässt sich für diesen Fall nicht nachprüfen, ob die Änderung durch Lastschwankungen, oder durch fluktuierende Lichtbogenzündungen zustande kam.

Um den Einfluss eines Lichtbogens auf die Sinusform besser quantifizieren zu können, wird deshalb in einem neuen Verfahren das Integral über einer Halbwelle nicht mehr mit der vorangegangenen Halbwelle verglichen, sondern mit einer normierten, idealen Halbwelle. Durch den Vergleich mit einer idealen sinusförmigen Halbwelle lassen sich alle Veränderungen, die der Sinus durch einen Lichtbogen erfährt, deutlicher darstellen (siehe Abbildung 71).

Durch Ermittlung von  $I_{\max}$  zwischen zwei Stromnulldurchgängen wird der Verlauf einer idealen Sinushalbwelle berechnet.  $I_{\max}$  ist dabei der höchste Amplitudenwert einer Halbwelle. Dadurch ergibt sich ein maximal mögliches Halbwellenintegral für diese Amplitude  $A_{i\max}$  (rot schraffiert). Wird dieses Integral nun mit dem tatsächlich vorhandenen Integral  $A_i$  (blau) verglichen, so ergibt sich ein auf  $I_{\max}$  normierter Vergleichswert. Für einen ideal ohmschen Verbraucher mit rein sinusförmigem Strom ergibt sich ein Vergleichswert von 1. Das aus  $I_{\max}$  und der Sinusfunktion berechnete Integral entspricht auch der real vorhandenen Fläche. Bei realen Verbrauchern wird die Halbwellenfläche zwar nicht dem idealen Sinus entsprechen, jedoch sind die Änderungen von Halbwelle zu Halbwelle minimal.

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

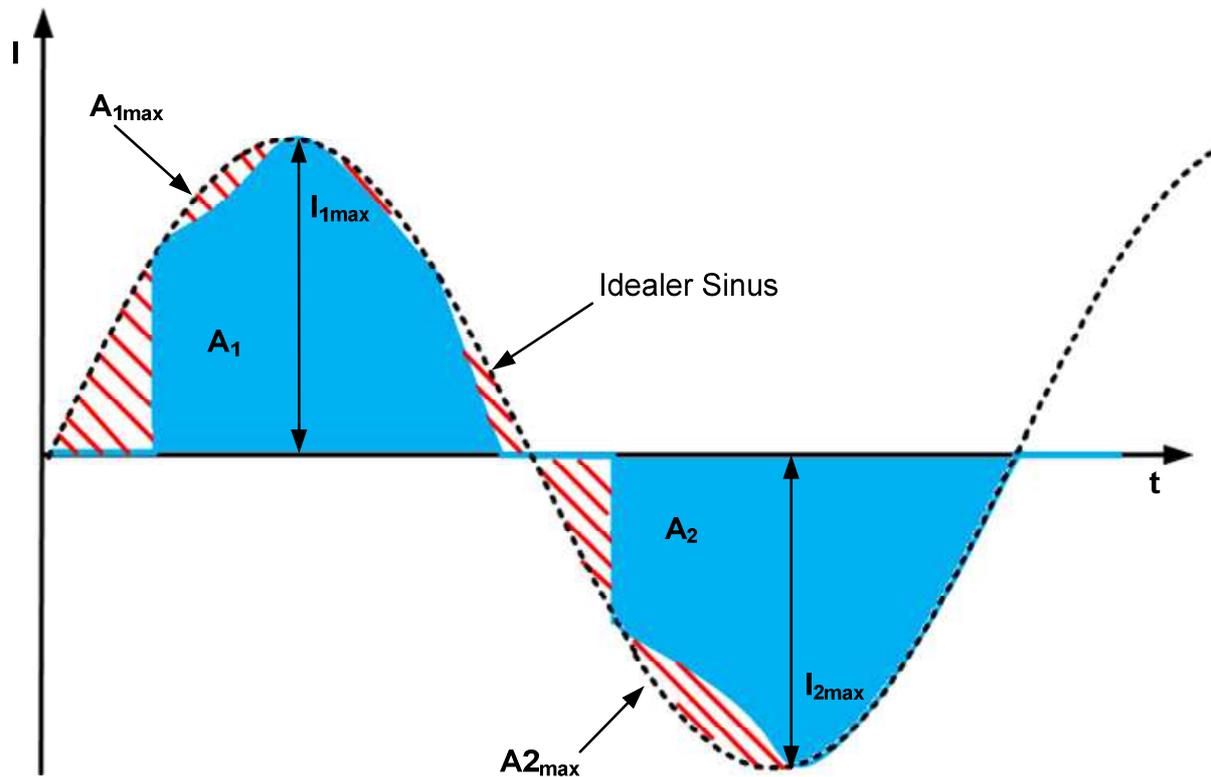


Abbildung 71: Reales Stromintegral zweier Lichtbogenhalbwellen ( $A_1$ ,  $A_2$ ) und maximales Integral bei idealem Sinus selber Amplitude ( $A_{1max}$ ,  $A_{2max}$ )

In Abbildung 72 ist ein realer Verbraucherstrom zu sehen, welcher deutlich verformt ist. Das Halbwellenintegral in Panel 3 zeigt, dass die reale Fläche der Halbwellen in etwa 92% der maximal möglichen Fläche bei idealem Sinusverlauf entspricht. Ebenso zeigt sich, dass die positiven Halbwellen etwas mehr vom idealen Sinus abweicht als die negativen Halbwellen. Dadurch entsteht das Sägezahnmuster. Im vierten Panel wird wiederum die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Halbwellenintegralen gebildet. Durch die unterschiedlich deformierten Halbwellen bleibt hier immer eine kleine Differenz von 1-2 % bestehen.

## AUSWERTEALGORITHMEN ZUR FEHLERDETEKTION

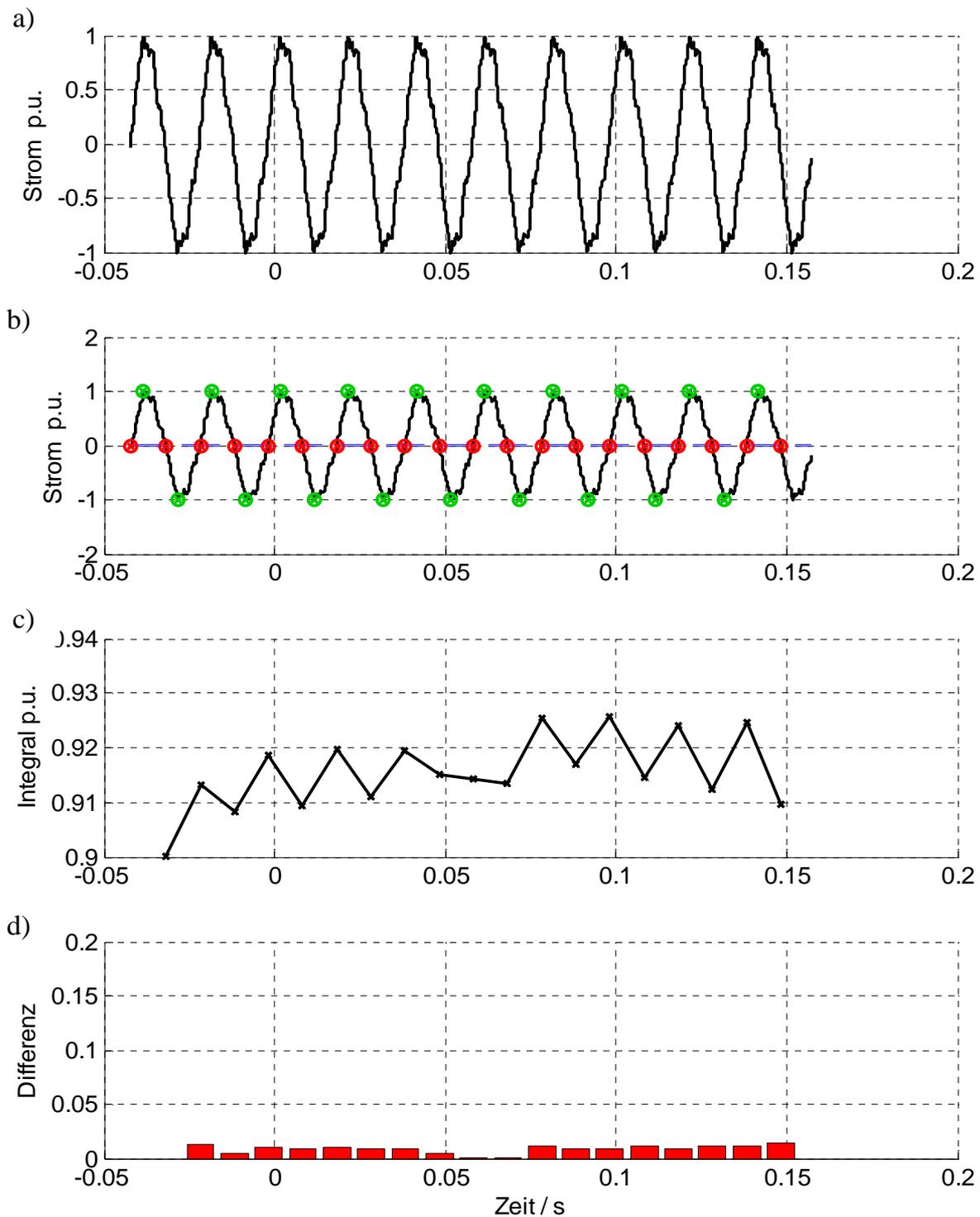


Abbildung 72: a) Stromverbrauch von Bürogebäude und Labor b) Ermittlung der Stromnulldurchgänge und des Scheitelpunkts der Halbwelle c) Integral über die Halbwellen d) Differenz zwischen normierter und gemessener Halbwelle maximal 0,02.

Abbildung 73 zeigt die Auswertung anhand eines seriellen Lichtbogenfehlers. An diesem Beispiel lässt sich sehr gut der Vorteil der normierten Integration erkennen. Obwohl es zum Zeitpunkt 0 einen deutlichen Sprung in der Amplitude durch das Zuschalten einer Last gibt, ist die Differenz zwischen der zweiten und der dritten Halbwelle minimal. Die erste Halbwelle wurde noch nicht

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

vollständig aufgezeichnet, weshalb sie am Anfang keinen Stromnulldurchgang hat. Es kann kein Integral über eine volle Halbwelle berechnet werden. Deshalb beginnt die Auswertung erst mit der zweiten Halbwelle. Bei der Integration der Halbwelle sieht man deutlich, dass einige Halbwellen keine Lichtbogenzündung aufweisen. Dadurch ist das Integral über der Halbwelle auch nahe dem maximalen möglichen Integral von 1. Ist die Halbwelle durch die Lichtbogenzündung deformiert, so ergibt sich ein errechneter Wert kleiner 1. Je nach Intensität des Lichtbogens liegen die Differenzen zwischen den Halbwellen bei 3-15 %. Dies entspricht dem 2-7 fachen der auftretenden Differenzen im ungestörten Betriebes.

## AUSWERTEALGORITHMEN ZUR FEHLERDETEKTION

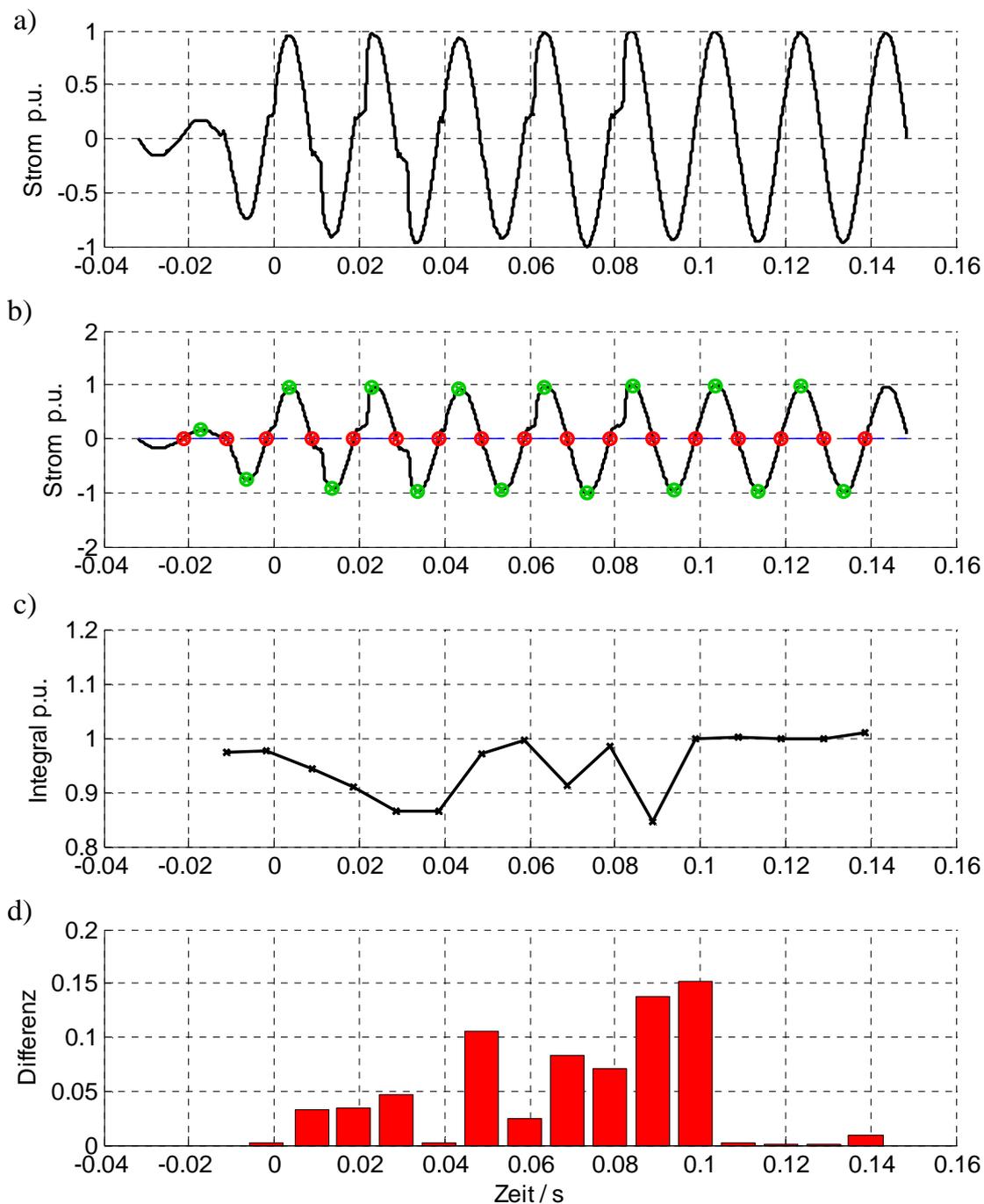


Abbildung 73: a) Einsetzender serieller Lichtbogen b) Ermittlung der Stromnulldurchgänge und des Scheitelpunkts der Halbwelle c) Integral über die Halbwellen d) Differenz zwischen normierter und gemessener Halbwelle 0,04 - 0,15.

Das Verfahren wird in Abbildung 74 auch am parallelen Störlichtbogen getestet. Hier zeigt sich besonders deutlich der Vorteil der normierten Integration. Die Schwankung der absoluten Amplitude wirkt sich nicht aus. Einzig die Deformierung durch den Lichtbogen liefert einen Beitrag zur Differenz zwischen den Halbwellen. Dadurch kann die starke Beeinflussung der Halbwellenform durch das späte Wiederzünden des parallelen Lichtbogens gut erkannt werden. Die Halbwellenintegrale erreichen teilweise nur 60% der maximalen Halbwellenfläche (siehe Panel 3). Die Differenz zwischen den

## 5.1 LICHTBOGENERKENNUNG IM ZEITBEREICH

Halbwellen ist daher besonders groß. Im Vergleich zum ungestörten Betrieb liegen die Amplituden teilweise um das 10-fache höher.

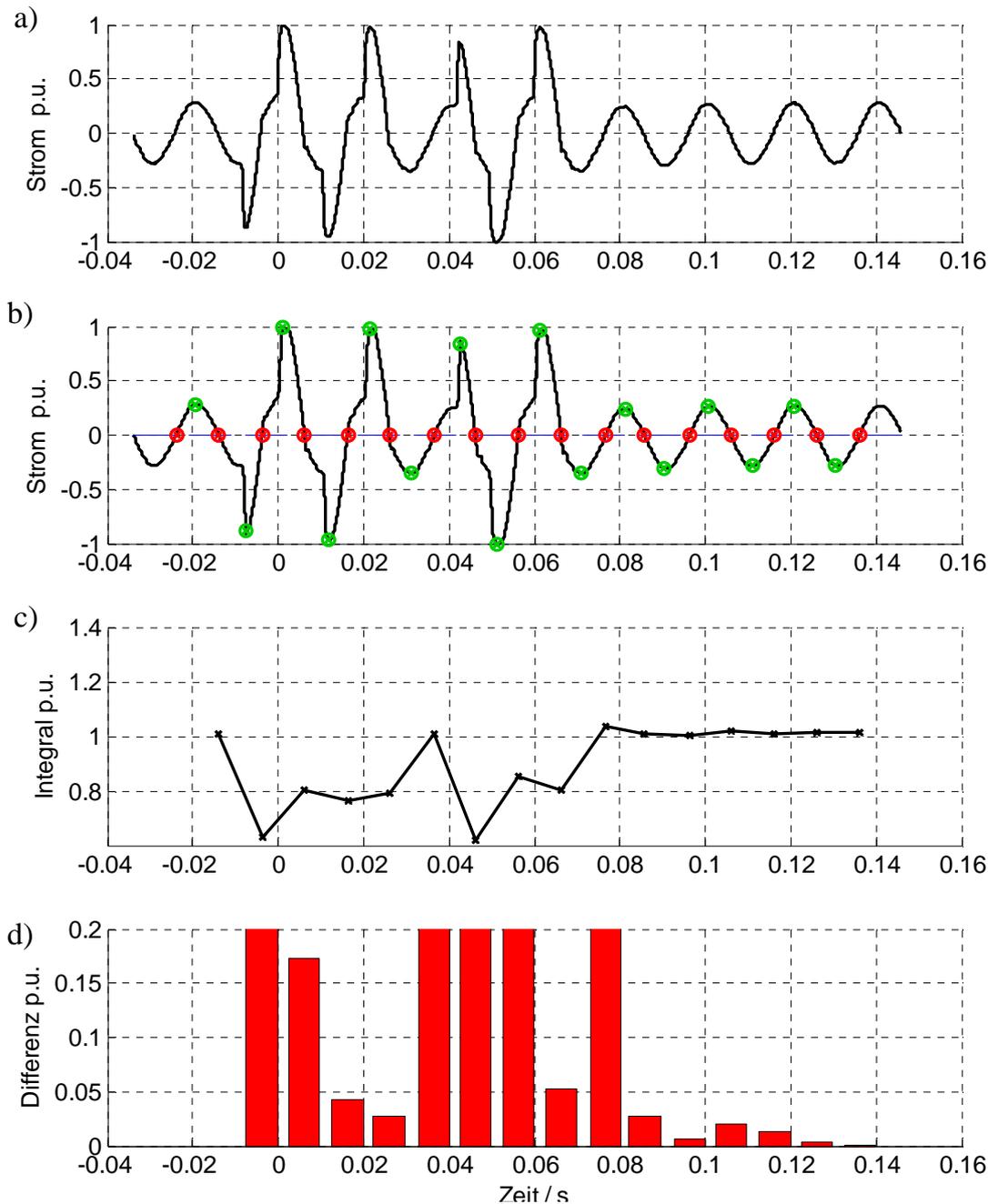


Abbildung 74: a) Parallelere Lichtbogen über 4 Perioden b) Ermittlung der Stromnulldurchgänge und des Scheitelpunkts der Halbwelle c) Integral über die Halbwellen d) Starke Schwankungen im Flächeninhalt von Halbwelle zu Halbwelle (über 20%).

Ein Nachteil des Verfahrens ist es, dass sich bei Messung von geringen Lastströmen Schwankungen im Milliampere Bereich prozentual genauso stark auswirken wie Schwankungen um einige Zehn Ampere bei hohen Strömen. Durch die Normierung erkennt das Verfahren nicht mehr, wie groß der gemessene Gesamtstrom ist. Insbesondere bei sehr kleinen Gesamtströmen in

der Schaltanlage könnte so suggeriert werden, dass Schwankungen im Prozentbereich von einem Lichtbogen stammen, obwohl es tatsächlich nur um Schwankungen von einigen Milliampere handelt, die keinesfalls von einem Lichtbogen stammen können. Abhilfe kann die Definition eines minimalen Laststroms schaffen, ab dem das Verfahren eine Auswertung beginnt.

## 5.2 Auswertung im Frequenzbereich

In den bisherigen Verfahren wurde die Auswertung der gemessenen Signale nur im Zeitbereich durchgeführt. Wie in Kapitel 4 beschrieben gibt es auch im Frequenzbereich einige charakteristische Merkmale des stromschwachen Störlichtbogens. In diesem Abschnitt wird ein Verfahren beschrieben, wie diese Lichtbogenmerkmale mittels FFT zur Fehlererkennung genutzt werden können.

### 5.2.1 Integral über das Frequenzspektrum

Die Fouriertransformation liefert, wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert, das Amplitudendichtespektrum eines gemessenen Stromverlaufes. Aufgrund der Lichtbogenmerkmale unterscheiden sich Spektren der Ströme mit und ohne Lichtbogen deutlich.

Im hier vorgestellten Verfahren soll der Lichtbogen anhand seiner Auswirkungen auf die spektralen Anteile erkannt werden. Dazu wird zunächst das Frequenzband ausgewählt, in dem die Unterschiede zwischen gestörtem und ungestörtem Laststrom am deutlichsten sind. Dies ist, wie in Kapitel 4 vorgestellt, hauptsächlich der Bereich unterhalb von 10 kHz. Zwar ist auch im Frequenzbereich darüber noch ein leichter Unterschied im Amplitudendichtespektrum festzustellen. Aufgrund der geringen Amplitude tragen die hohen Frequenzen im Vergleich zu den Amplituden unterhalb 10 kHz jedoch kaum zum Ergebnis bei. Zudem wird die Auswertung aufwändiger, je höher Frequenzen mittels FFT ausgewertet werden sollen.

Zur Bestimmung einer vergleichbaren Größeneinheit für den Flächeninhalt des Amplitudendichtespektrums werden zunächst alle Werte zwischen 0 und 10 kHz addiert. Um eine tatsächliche Fläche zu erhalten müsste der Wert noch mit der Zeit zwischen den einzelnen Samples multipliziert werden. Da die Abstände jedoch immer konstant sind, kann dies unterbleiben. Abbildung 75 (siehe Beispiel in Kapitel 4.2.2) zeigt farblich dargestellt die unterschiedlich großen Flächen, die sich mit und ohne Lichtbogen im Frequenzspektrum ergeben.

## 5.2 AUSWERTUNG IM FREQUENZBEREICH

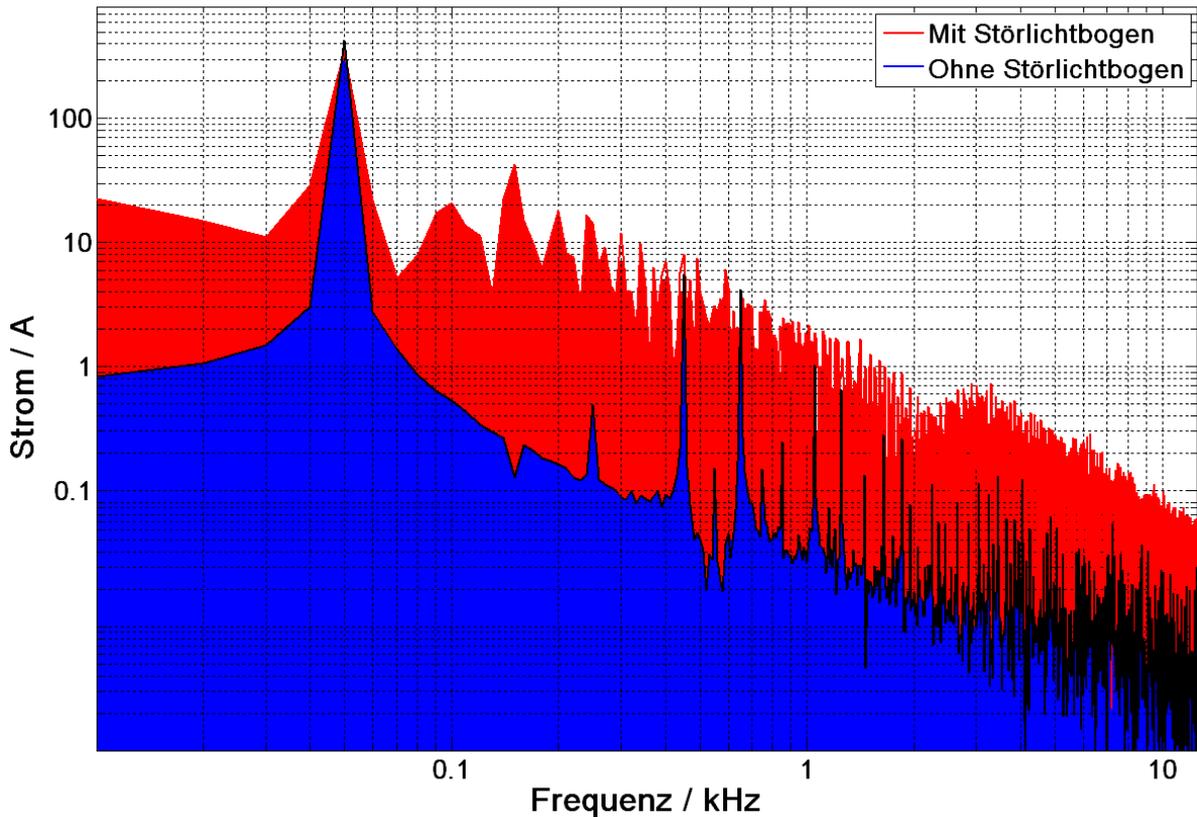


Abbildung 75: Vergleich der Flächen des Stromspektrums einer ohmschen Last (blau) und eines seriellen Lichtbogens (rot) mit im Zeitbereich gleicher Amplitude.

Werden die jeweiligen Werte der Amplituden aufaddiert, ergeben sich folgende Werte:

Spektrum ohne Störlichtbogen: 470 (Flächeneinheiten)

Spektrum mit Störlichtbogen: 1128 (Flächeneinheiten)

Tabelle 1: Vergleich der Summen des Amplitudendichtespektrums

Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Lastströmen mit Lichtbogen und solchen ohne Fehlerstrom (Faktor 2,4 in Tabelle 1). Bei einfachen Lastanordnungen lässt sich so bereits der Störlichtbogen detektieren. Es zeigt sich aber bereits die Schwachstelle der einfachen Integration über das ganze Spektrum: Obwohl auf der doppelt logarithmischen Darstellung das Spektrum des Störlichtbogens deutlich, teils mehrere Dekaden, über der ohmschen Last liegt, ist das Ergebnis der Integration nicht im selben Masse unterschiedlich. Dies liegt daran, dass die Amplitude der Netzfrequenz einen übergroßen Anteil an der Gesamtsumme hat. Vergleicht man die beiden Spektren erst ab der 2. Harmonischen (100 Hz), ergibt sich ein deutlich größerer Unterschied zwischen Lichtbogenspektrum und Lastspektrum (Faktor 21 in Tabelle 2).

Spektrum ohne Störlichtbogen (ab 100 Hz): 29,9

Spektrum mit Störlichtbogen (ab 100 Hz): 655,3

Tabelle 2: Vergleich der Summen des Amplitudendichtespektrums ab 100 Hz

Dieses Beispiel zeigt, dass mit selektiver Auswahl der betrachteten Frequenzbereiche ein deutlich besseres Detektionsergebnis erzielt werden kann. Ein Verfahren zur Lichtbogendetektion durch Untersuchung ausgewählter Spektralbereiche wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

## 5.2.2 Spektralanalyse ohne ungeradzahlige Harmonische

Die durch den Lichtbogen verursachten spektralen Anteile tragen einen großen Teil zur Gesamtsumme des Spektrums bei. Die mit Abstand höchsten Amplituden verursachen jedoch die Netzfrequenz und deren Harmonische, wie in Abbildung 76 an einem Beispiel zu sehen ist. Diese treten sowohl im gestörten als auch im ungestörten Betrieb auf und erhöhen so zwar die Gesamtfläche, tragen aber nicht zur Fehlererkennung bei.

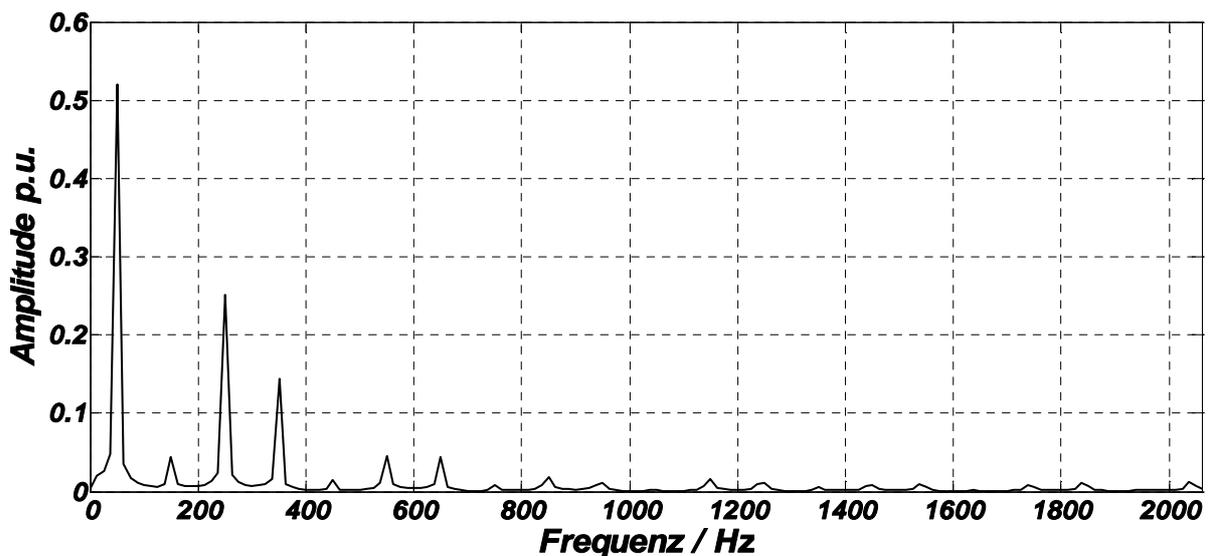


Abbildung 76: Spektrale Anteile eines Stromverlaufes ohne Störlichtbogen. Dominierend sind die Netzfrequenz und ihre ungeradzahligen Harmonischen.

Um gestörten und ungestörten Betrieb besser differenzieren zu können, werden im vorgestellten Verfahren die Netzfrequenz (hier 50 Hz) und alle ihre Harmonischen bis zur 40-ten Harmonischen vom Gesamtergebnis abgezogen. Die 40-te Harmonische ist auch der Grenzwert, bis zu der die EMV-Norm (IEC 61000-3-12:2004) Oberwellen für Geräte bis 75 A Nennstrom definiert. Oberhalb dieses Nennstromes ist kein Grenzwert für Oberwellen definiert.

## 5.2 AUSWERTUNG IM FREQUENZBEREICH

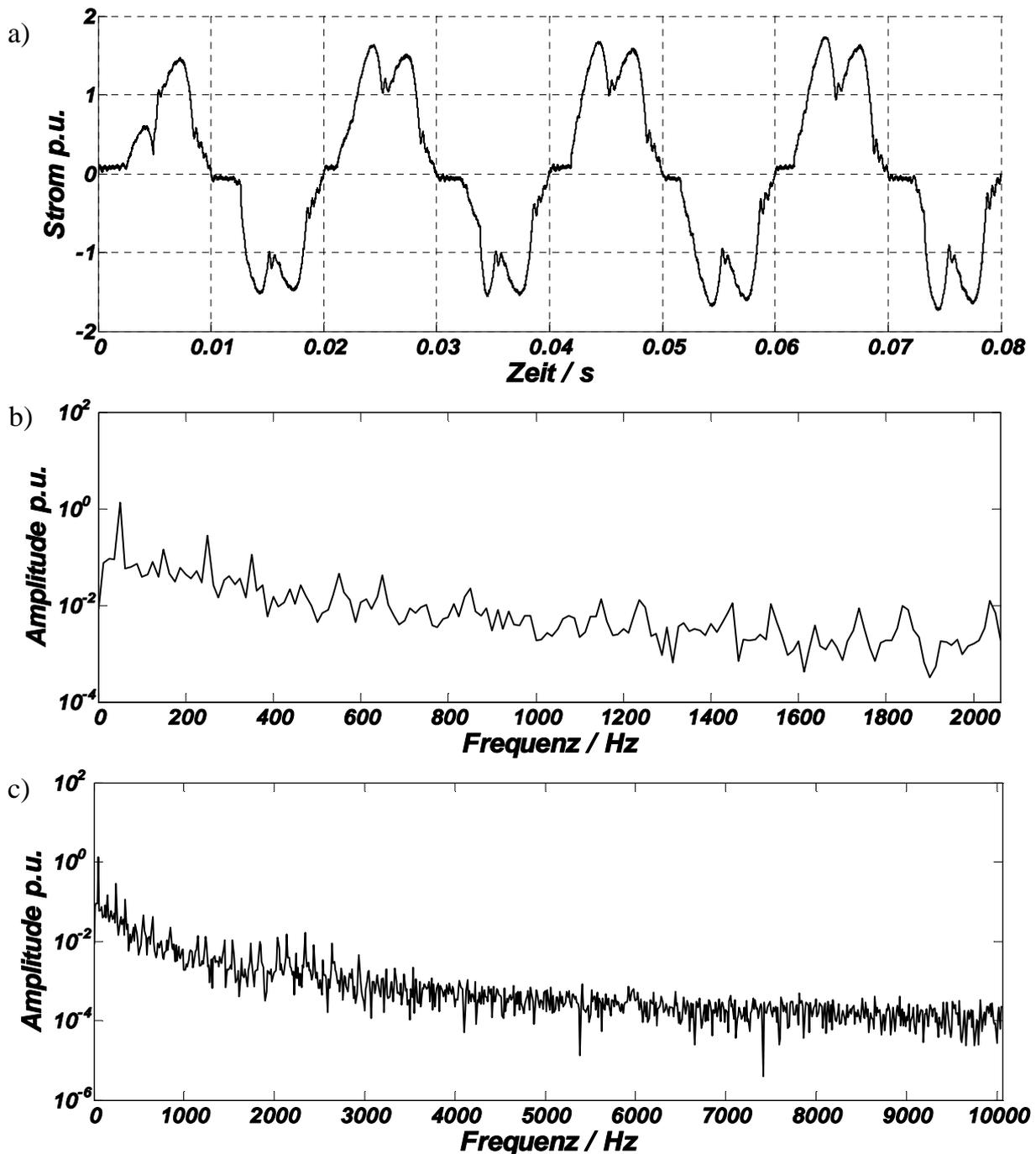


Abbildung 77: Vergleich der spektralen Anteile des Laststromes eines Aufzugs a) Laststrom im Zeitbereich b) Amplitudendichtespektrum bis 2 kHz c) Amplitudendichtespektrum bis 10 kHz

	Bis 2 kHz	Bis 10 kHz
Gesamtfläche	2,235	2,569

Tabelle 3: Summe des Amplitudendichtespektrums bis 2 kHz und bis 10 kHz

Die so entstehende Maßzahl für den Flächeninhalt besteht dann aus allen spektralen Anteilen des gemessenen Stromes, jedoch ohne die Netzfrequenz und

ihrer Vielfachen. Versuche haben gezeigt, dass die Auswertung des Spektrums bis 10 kHz für dieses Verfahren keinen zusätzlichen Vorteil bringt. In Abbildung 77 ist zu sehen, dass die spektralen Anteile zwischen 2 kHz und 10 kHz nur noch minimal zum Gesamtergebnis beitragen. Obwohl das Spektrum fünfmal mehr Frequenzwerte enthält, ist die Gesamtsumme bei 10 kHz nur um ca. 14% höher, wie in Tabelle 3 dargestellt. Die Auswertung für dieses Verfahren bis 2 kHz ist daher ausreichend.

Zur Vereinfachung der Spektralanalyse ohne ungeradzahlige Harmonische wird das Spektrum in Abschnitte aufgeteilt. Jeder Abschnitt gruppiert sich um eine Harmonische. Abbildung 78 verdeutlicht, dass so Abschnitte mit ungeradzahligen (1., 3., 5., ...) und geradzahligen Harmonischen (2., 4., 6, ...) entstehen. Alle Abschnitte enthalten gleich viele Werte. Für die Maßzahl zur Bestimmung der spektralen Fläche werden nur die geradzahligen Abschnitte aufaddiert. So entsteht ein Wert, der unabhängig von Auftreten und Amplitude der Vielfachen der Netzfrequenz die spektralen Anteile des gemessenen Stromverlaufes darstellt.

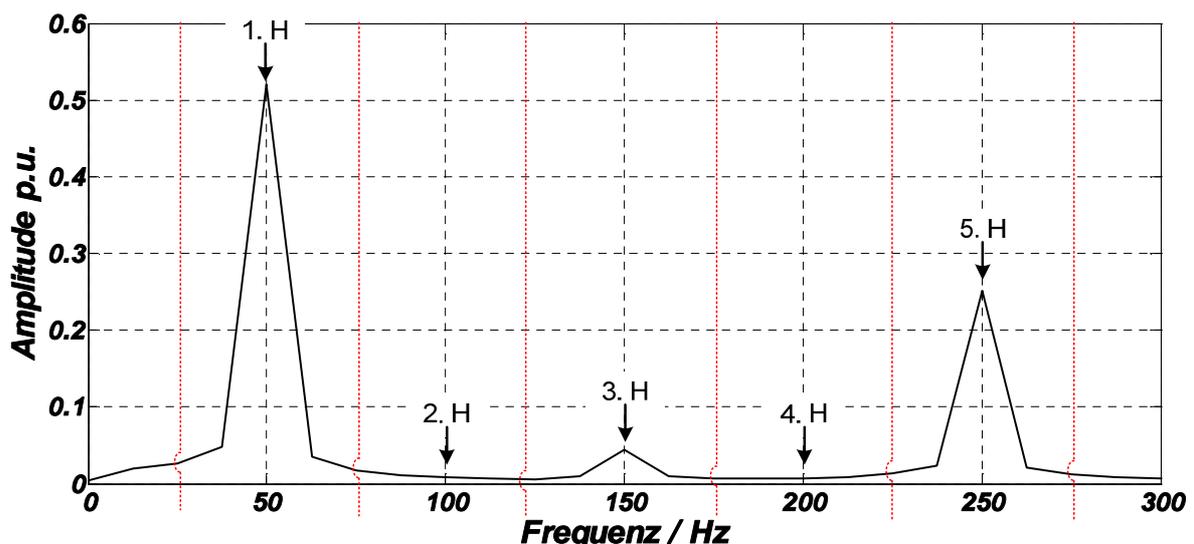


Abbildung 78: Aufteilung des Spektrums in Abschnitte um die geradzahligen und ungeradzahligen Vielfachen (Harmonische 1. H - 5. H) der Netzfrequenz.

Anhand von Beispielen soll die Arbeitsweise des Verfahrens dargestellt werden. In Abbildung 79 ist der Laststrom eines Verbrauchers ohne Störlichtbogen zu sehen. Das zugehörige Frequenzspektrum in Abbildung 80 zeigt, dass neben der Netzfrequenz hauptsächlich deren ungeradzahlige Vielfache hohe Amplituden im Spektrum erzeugen. Zum Vergleich sind in den Beispielen sowohl die Summe über das gesamte Spektrum, als auch die Summe der ausschließlich geradzahligen Harmonischen berechnet. Im Beispiel des ohmschen Verbrauchers ergibt sich so eine Gesamtfläche von 22,87 FE (Flächeneinheiten) für die Fläche bis zur 40. Harmonischen der Grundfrequenz. Dies entspricht für eine Netzfrequenz von 50 Hz einem Integral der Amplituden vom 100 Hz bis 2 110

## 5.2 AUSWERTUNG IM FREQUENZBEREICH

kHz. Betrachtet man nur die Fläche für die geradzahigen Harmonischen, so haben diese einen Anteil von 33,1% an der Gesamtfläche. Die Fläche der ungeradzahigen Harmonischen umfasst 66,9%. Dieser fast doppelt so hohe Wert verdeutlicht, dass bei einem rein ohmschen Verbraucher ohne Lichtbogen das Amplitudendichtespektrum hauptsächlich aus der Netzfrequenz und wenigen Vielfachen davon besteht. Diese dominieren das Frequenzspektrum.

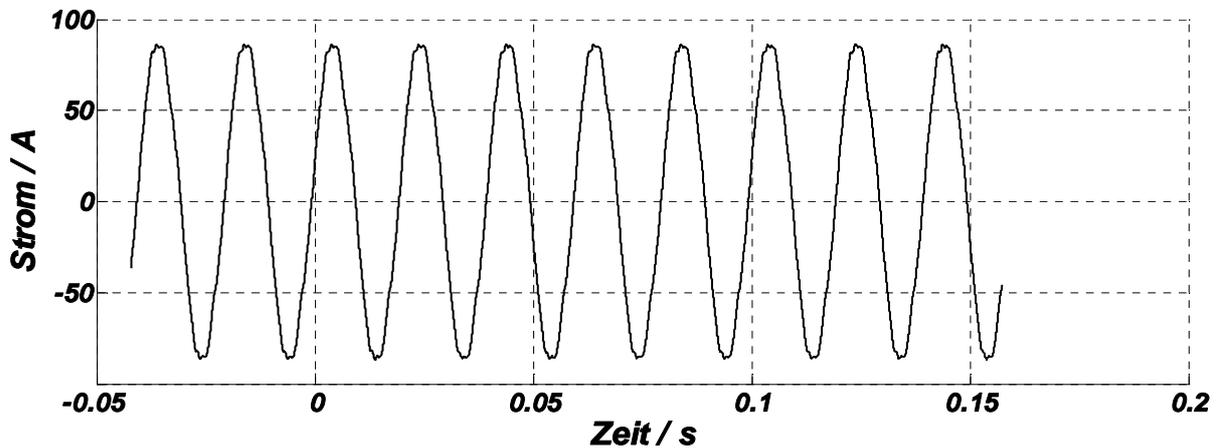


Abbildung 79: Stromverlauf eines ohmschen Verbrauchers zur Bestimmung der Frequenzanteile.

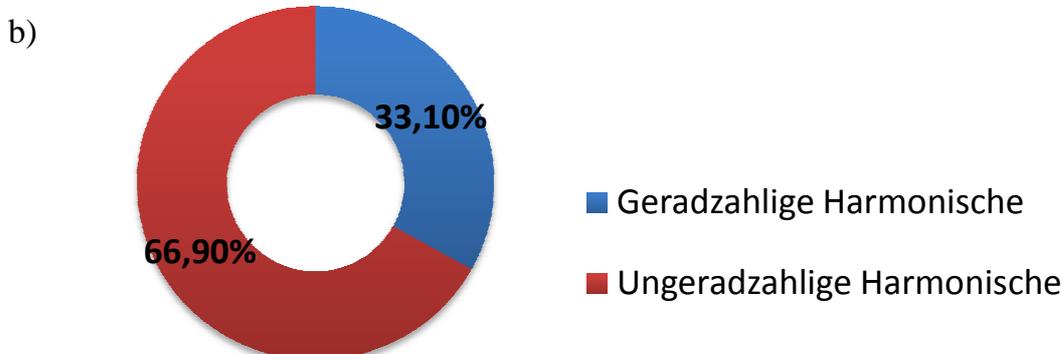
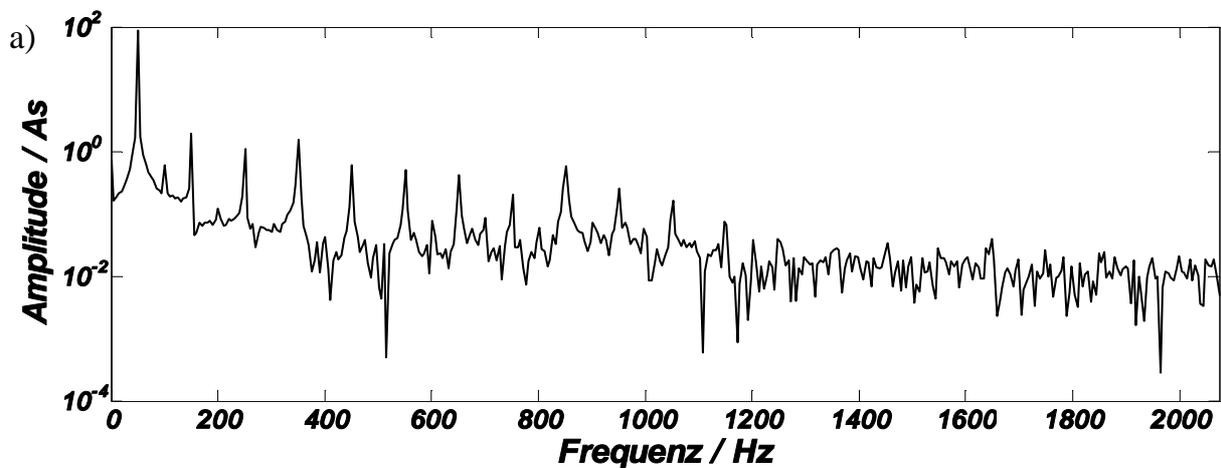


Abbildung 80: a) Amplitudendichtespektrum des Stromverlaufes über den ohmschen Verbraucher b) Anteil geradzahliger und ungeradzahliger Harmonischer am Spektrum

Im nächsten Beispiel wird ein Stromverlauf mit einsetzendem seriellen Lichtbogen betrachtet. Der Stromverlauf in Abbildung 81 zeigt einen Laststrom von ohmschen Verbrauchern, bei dem eine weitere ohmsche Last mit seriellen Lichtbogen zugeschaltet wird. Es wird wiederum das Verfahren zu Bestimmung der Flächeninhalte im Spektrum angewendet. Da die Amplitude im Zeitbereich in diesem Beispiel sehr viel höher ist als im vorherigen, lassen sich die Ergebnisse am besten durch die prozentualen Anteile der geradzahigen und ungeradzahigen Harmonischen am Gesamtspektrum vergleichen.

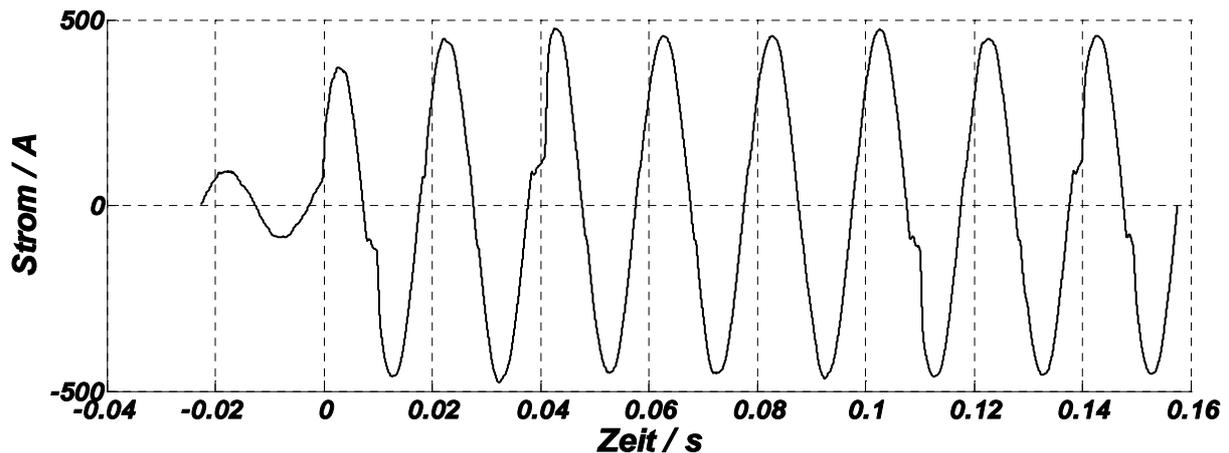


Abbildung 81: Laststrom eines ohmschen Verbrauchers, bei dem ein serieller Störlightbogen zugeschaltet wird.

Im Frequenzspektrum des Stromverlaufes in Abbildung 82 sieht man nun deutlich, welche Auswirkungen der Lichtbogen hat. Die Harmonischen der Grundfrequenz sind nicht mehr eindeutig auszumachen. Die Zwischenfrequenzen um die geradzahigen Harmonischen haben deutlich höhere Amplituden als bei einer ohmschen Last und unterscheiden sich nicht mehr von den ungeradzahigen Harmonischen. Das Amplitudendichtespektrum hat eine sehr gleichmäßig abfallende Amplitude. Bis auf die 50 Hz Netzfrequenz gibt es keine besonders erhöhten Frequenzen. Dementsprechend haben auch die Abschnitte der gerad- und ungeradzahigen Harmonischen ähnlich hohe Amplituden. Die geradzahigen Harmonischen machen 53,8% der Gesamtfläche aus, die Ungeradzahigen 46,2%. Das Verhältnis ist nahezu 1:1. Dies ist ein deutliches Anzeichen für einen Störlightbogen.

## 5.2 AUSWERTUNG IM FREQUENZBEREICH

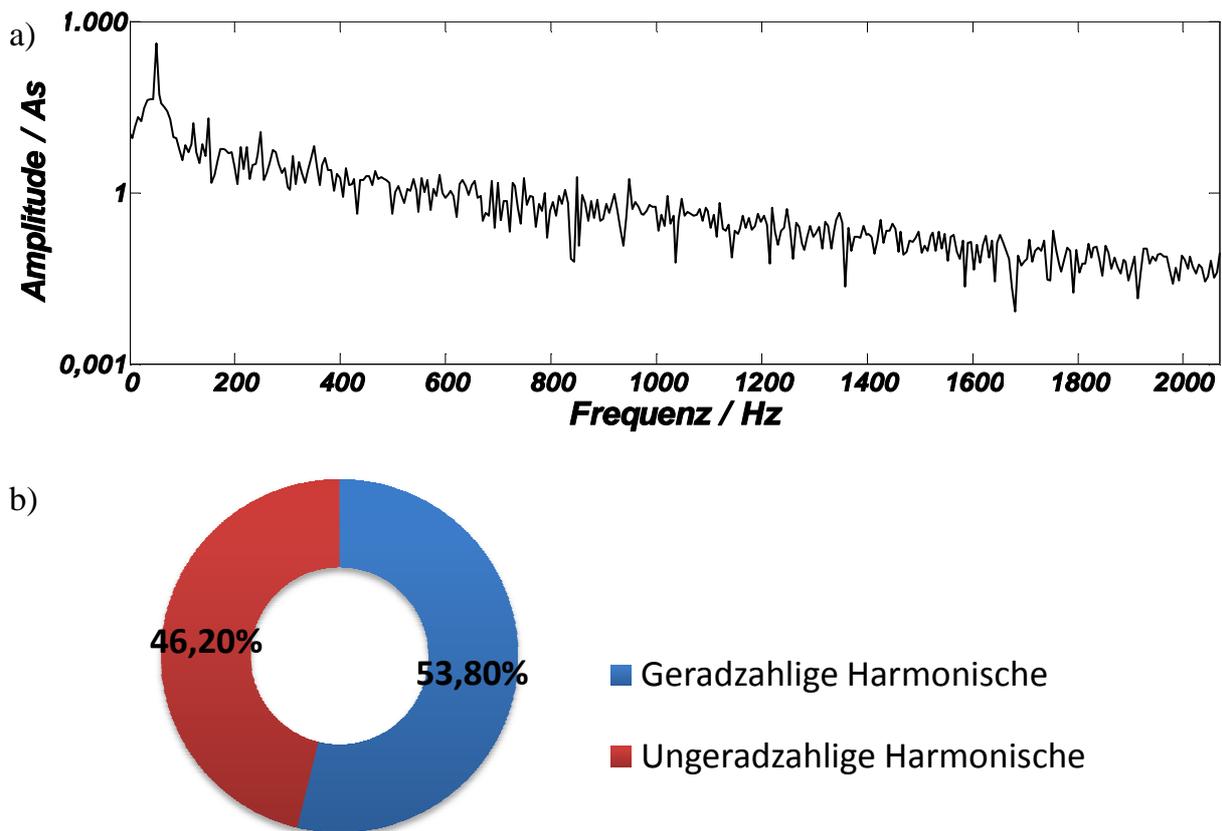


Abbildung 82: a) Amplitudendichtespektrum des seriellen Lichtbogens aus Abbildung 81 b) Anteil geradzahliger und ungeradzahliger Harmonischer am Spektrum

Im nächsten Beispiel soll eine Last betrachtet werden, welche die Sinusschwingung des Stromes stark verzerrt. Dies wird am Beispiel des Kompressors einer Klimakammer gezeigt. Der Stromverlauf in Abbildung 83 zeigt im Scheitel des Stromes ausgeprägte Spitzen. Es brennt jedoch kein Störlichtbogen.

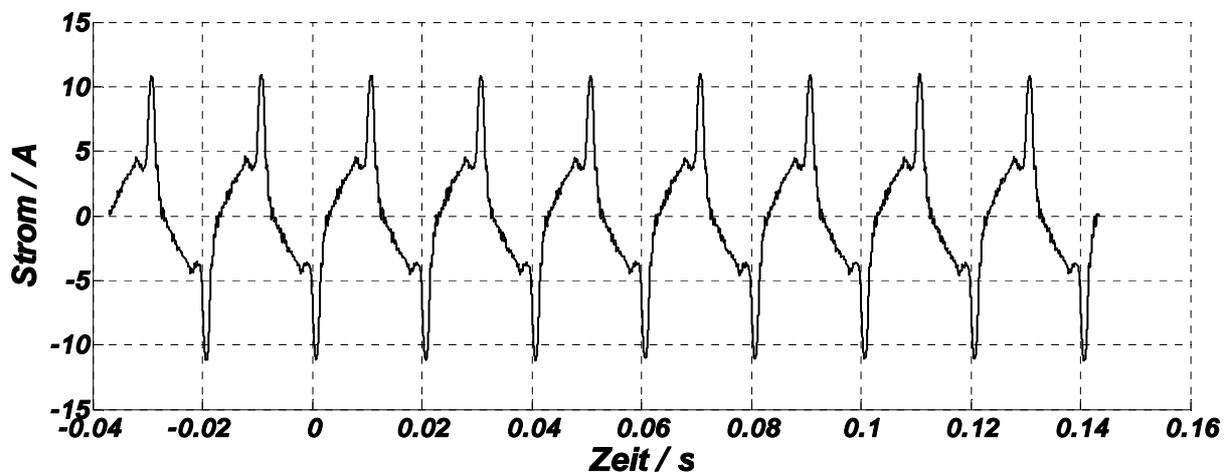


Abbildung 83: Stromverlauf von Laborlasten und des Kompressors einer Klimakammer.

Durch die Verzerrung des Stromverlaufes entstehen zusätzliche Frequenzen, die im Spektrum hohe Spitzen erzeugen. Wie in Abbildung 84 zu sehen ist, sind dies hauptsächlich die Harmonischen der Grundfrequenz. Zwischen diesen Harmonischen liegt die Amplitude bis zu zwei Dekaden tiefer. Dementsprechend ist auch das Verhältnis zwischen geradzahligen und ungeradzahligen Harmonischen sehr unterschiedlich. Der Anteil der Zwischenharmonischen liegt nur bei 15,4% der Gesamtfläche. Diese Art der Last ist typisch für Industrieanwendungen, in denen elektrische Maschinen und Motoren betrieben werden. Das Verfahren kann trotz der stark verzerrten Sinuskurve erkennen, dass es sich nicht um einen Störlichtbogen handelt, sondern um einen Laststrom von ohmschen oder induktiven Verbrauchern.

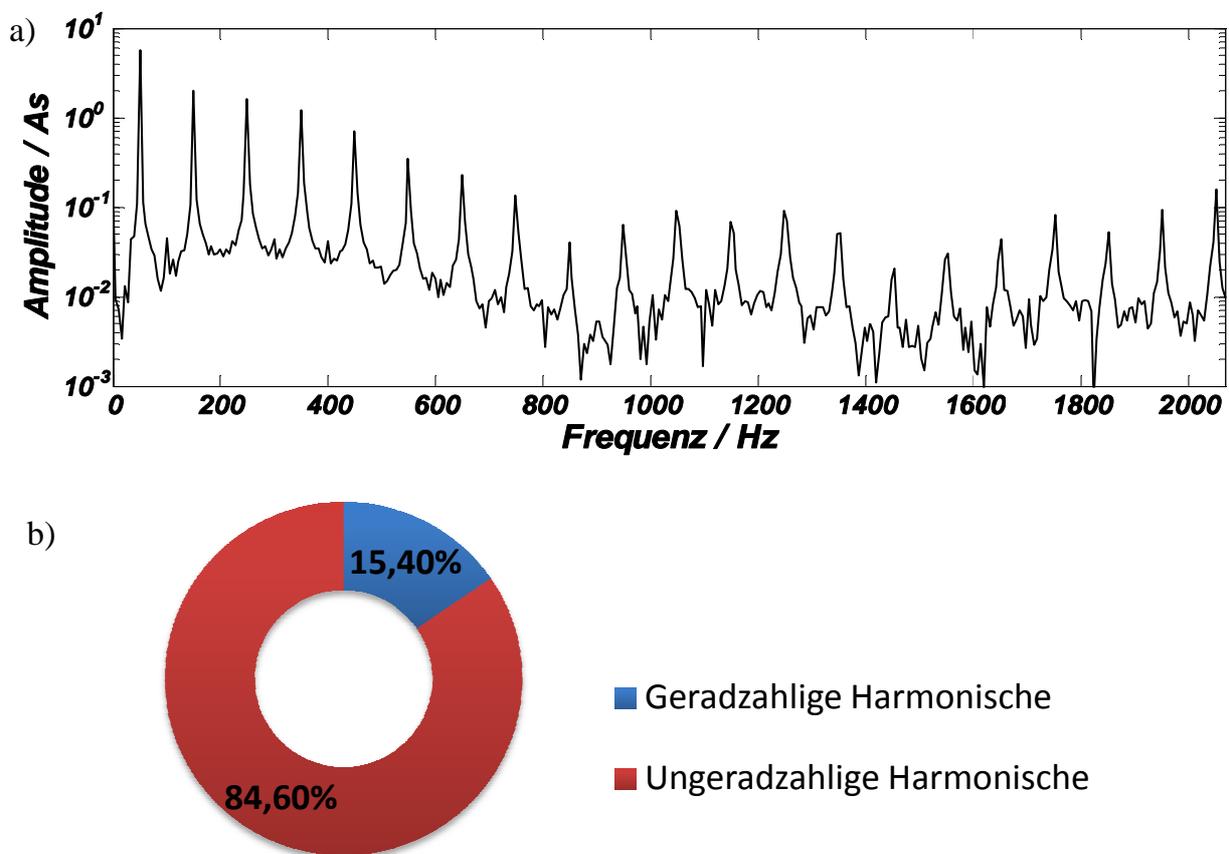


Abbildung 84: a) Amplitudendichtespektrum des Laststromes aus Abbildung 83.b) Anteil geradzahliger und ungeradzahliger Harmonischer

Im Beispiel in Abbildung 85 wird der Strom eines parallelen Lichtbogens untersucht. Der Lichtbogen setzt nach ca. 20 ms ein und erlischt nach ca. 80 ms wieder.

## 5.2 AUSWERTUNG IM FREQUENZBEREICH

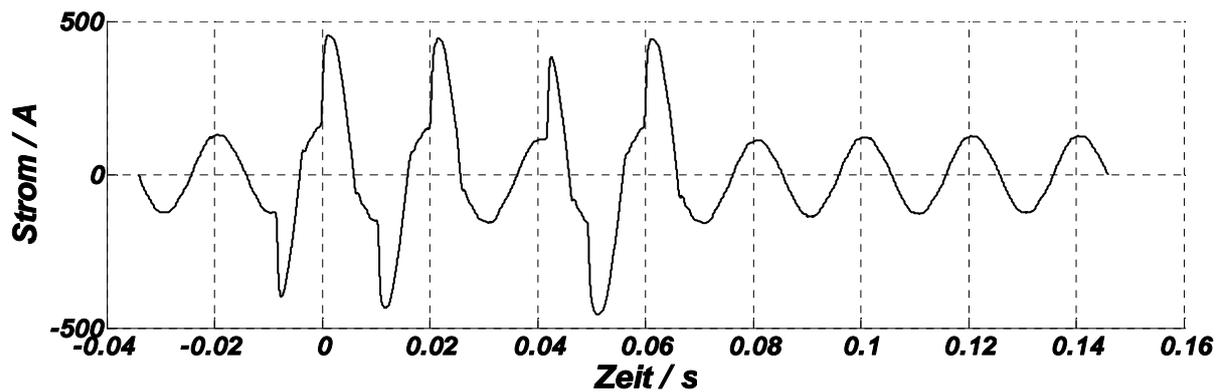


Abbildung 85: Stromverlauf eines parallelen Störlichtbogens, der einen sinusförmigen Laststrom überlagert.

Durch die Überlagerung des Lichtbogenstroms mit einem ohmschen Laststrom sind die steilen Zündflanken nicht mehr eindeutig zu bestimmen. Bei einem noch ungünstigeren Verhältnis von Laststrom zu Lichtbogenstrom, können die Lichtbogenmerkmale zumindest im Zeitbereich vollständig vom Strom der anderen Verbraucher überlagert werden.

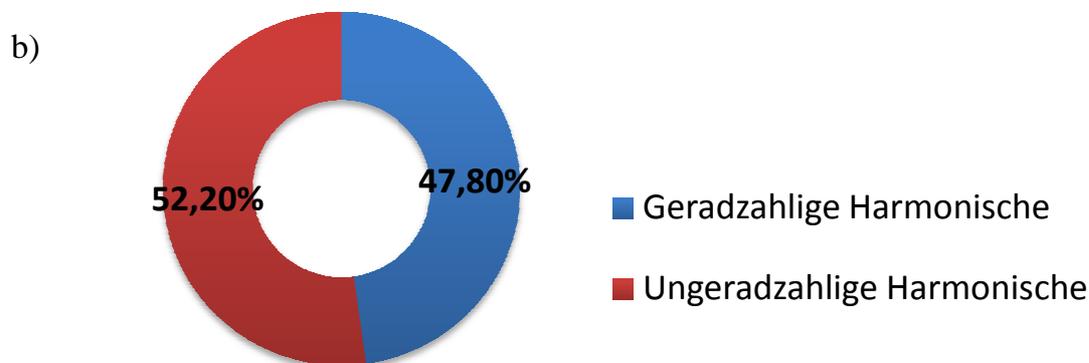
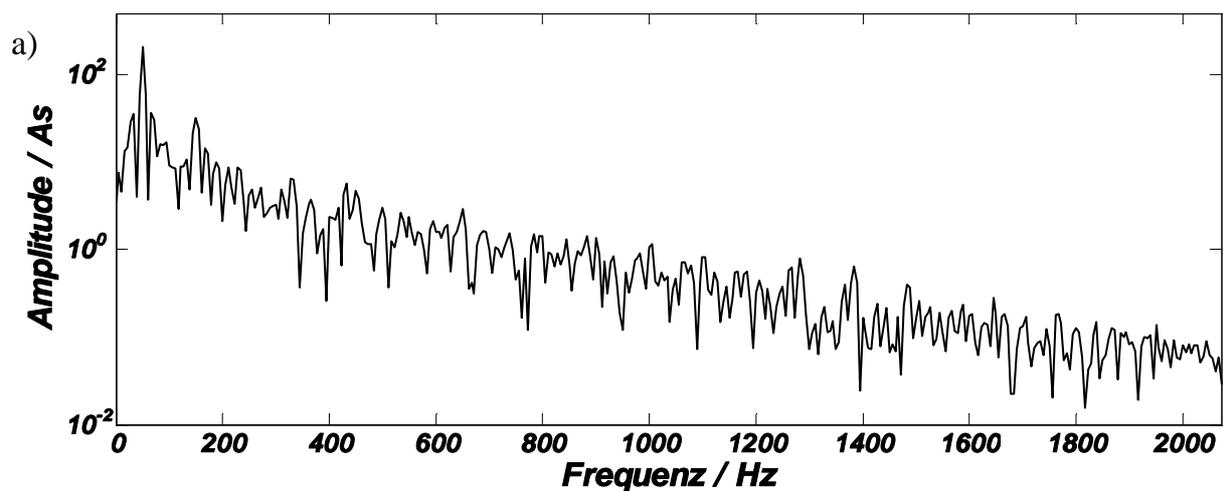


Abbildung 86: a) Amplitudendichtespektrum des Laststroms aus Abbildung 85. b) Die geradzahligen und ungeradzahligen Spektralanteile sind nahezu gleich groß.

Die Auswertung in Abbildung 86 zeigt jedoch, dass wie beim seriellen Lichtbogen auch beim parallelen Lichtbogen die geradzahigen Harmonischen stark erhöht sind. Das Verfahren erkennt einen stark erhöhten Anteil der geradzahigen Harmonischen von 47,8% der Gesamtfläche.

## 5.3 Grenzen der Lichtbogendetektion in Schaltanlagen

### 5.3.1 Verhältnis von Lichtbogenstrom zu Gesamtstrom

Ob ein Lichtbogen in einem gemessenen Stromverlauf detektiert werden kann, hängt zu einem großen Teil vom Verhältnis Lichtbogenstrom zu Gesamtstrom

$$I_{LB}/I_{ges} \quad I_{LB}/I_{ges}$$

ab. Beste Detektierbarkeit besteht, wenn der gesamte Laststrom der Anlage durch die Fehlerstelle fließt. Dann ist der Lichtbogenstrom gleich dem Gesamtstrom. Dies kann in drei Fällen passieren:

- Ein serieller Störlichtbogen brennt unmittelbar nach dem Leistungsschalter und noch vor dem ersten Abgang eines Verbrauchers (Position 1 in Abbildung 87). Der gesamte Strom, der durch den Stromwandler fließt, muss auch durch den Lichtbogen. Dabei spielt es keine Rolle, wie viele Lastabgänge in der Schaltanlage aktiv sind. Es gibt keinen unbeeinflussten Stromanteil. Wenn der Lichtbogen im Stromnulldurchgang erlischt, dann lückt der gesamte gemessene Strom auf dieser Phase.
- Es sind außer dem fehlerhaften Abgang bzw. Verbraucher keine weiteren Verbraucher angeschlossen oder aktiv. Der Fehlerstrom wird bei einem seriellen Lichtbogen durch den Verbraucher begrenzt.
- An der Schaltanlage sind keine Verbraucher eingeschaltet. Es fließt kein Strom, der einen seriellen Lichtbogen erlauben würde. Durch Fremdkörper oder verschmutzte Isolation kann trotzdem ein paralleler Lichtbogen auftreten. Da keine Verbraucher parallel zum Lichtbogen angeschlossen sind, fließt der Strom ausschließlich über den Lichtbogen. Ein paralleler Lichtbogen, bei dem der Lichtbogen der einzige Verbraucher ist, ist nur durch das Lückverhalten und der Stromamplitude von einem seriellen Lichtbogen zwischen Stromwandler und erstem Verbraucherabgang zu unterscheiden (wie im ersten beschriebenen Fall).

Je weiter der serielle Lichtbogen vom Strommesspunkt, in diesem Beispiel der Leistungsschalter, entfernt ist und je mehr Abgänge mit angeschlossenen Lasten dazwischen liegen, desto kleiner wird das Verhältnis von Störlichtbogenstrom

### 5.3 GRENZEN DER LICHTBOGENDETEKTION IN SCHALTANLAGEN

zu Gesamtstrom  $I_{LB}/I_{ges}$ . Die im ungestörten Betrieb vorkommenden Frequenzanteile werden größer und überlagern die, durch den Lichtbogen verursachten Frequenzen. Für eine auf Stromcharakteristiken basierte Lichtbogendetektion wird es nun schwieriger, diesen von einem Verbraucher ohne Lichtbogenfehler zu unterscheiden.

Brennt ein serieller Lichtbogen im Abgang einer Last, zwischen Sammelschiene und Last (Position 2 in Abbildung 87), so besteht der Lichtbogenstrom ausschließlich aus dem Laststrom des angeschlossenen Verbrauchers. Je nach Höhe des Laststromes kann dann das Verhältnis  $I_{LB}/I_{ges}$  so klein sein, dass sich der gemessene Gesamtstrom der Schaltanlage trotz Störlichtbogen nur noch minimal vom Gesamtstrom im Normalbetrieb unterscheidet.

Parallele Störlichtbögen entstehen zwischen einer Sammelschiene und geerdeten Teilen der Anlage oder zwischen zwei Sammelschienen unterschiedlicher Phase. Da der Strom eines parallelen Lichtbogens nicht von den angeschlossenen Lasten der Schaltanlage abhängt, kann er als parallel zu allen anderen Verbrauchern angenommen werden (Position 3 in Abbildung 87). Der Lichtbogenstrom wird dem Gesamtstrom der Schaltanlage addiert. Somit hängt auch die Detektierbarkeit nicht primär vom Fehlerort ab, sondern vielmehr von der Amplitude des Störlichtbogenstromes. Eine Aussage über die Position eines parallelen Lichtbogens innerhalb der Schaltanlage, lässt sich kaum treffen. Zum einen können diese wandern, und zum anderen hängt die Ausprägung der charakteristischen Merkmale stark von den Umgebungsbedingungen (Entstehungsursache des Lichtbogens) ab, die innerhalb der Anlage sehr stark variieren.

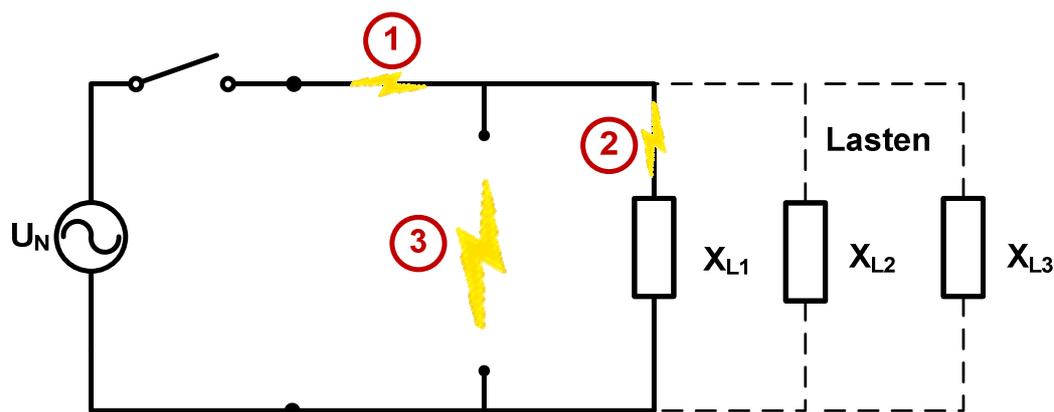


Abbildung 87: Ersatzschaltung einer Schaltanlage mit angeschlossenen Lasten ( $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$ ,  $X_{L3}$ , ...).

#### 5.3.2 Selektivität

Die Stromwandler sind in der Schaltanlage in der Regel im Leistungsschalter verbaut. Es wird daher nur der Gesamtstrom am Eingang der Schaltanlage

gemessen. Da die Anlage mehrere Abgänge besitzt, kann nicht bestimmt werden, wie viel Strom der Anlage durch die angeschlossenen Verbraucher auch wieder entnommen wird. Dies wäre nur mit einer Differentialmessung möglich, bei der der Strom durch alle Abgänge gemessen wird. Die Summe der abgehenden Ströme muss dann dem gemessenen Strom am Eingang der Anlage entsprechen (für den ungestörten Fall ohne seriellen Lichtbogen). Da dieses Verfahren für Anlagen mit vielen Abgängen sehr aufwändig ist (viele Stromwandler, Verkabelung, Messwertanalyse,...) wird es im Niederspannungsbereich nur für besonders sensible Anlagen verwendet. Im Mittel- und Hochspannungsbereich ist der Differentialschutz hingegen eine gebräuchliche Schutzeinrichtung.

Eine Schaltanlage, in der nur an einer Stelle der Gesamtstrom gemessen wird, hat daher messtechnisch keine räumliche Selektivität. Nur mittels der Messung an zwei Punkten ist es möglich, auf einer Leitung zwischen Punkt A und Punkt B eine Strombilanz zu bilden. Dann kann bestimmt werden, ob in diesem Leitungsstück (oder dem Sammelschienenstück) ein Stromverlust durch einen Störlichtbogen stattgefunden hat. Bei einem parallelen Störlichtbogen wäre die Stromdifferenz groß, da er wie ein zusätzlicher Verbraucher mit geringem Widerstand wirkt. Bei einem seriellen Lichtbogen könnte nur der im Lichtbogen in Wärme umgesetzte Leistungsumsatz gemessen werden.

Tritt ein Lichtbogen nach Punkt A (erster Stromwandler) auf, so kann ein einzelner Stromwandler nicht erkennen, wie weit der Lichtbogen vom Wandler entfernt ist. Es kann sowohl ein Fehler in der Schaltanlage sein, als auch ein Fehler in einem Verbraucher, der nicht zur Schaltanlage gehört. Eine räumliche Einschränkung der Fehlerstelle ist nicht möglich.

Der Differenzschutz kann hingegen zumindest bei parallelen Störlichtbögen auch eine Aussage über die Position des Fehlers machen. Tritt ein Fehler zwischen Punkt A und Punkt B auf, so ist die Differenz zwischen den beiden Stromwandlern ungleich Null (siehe Abbildung 88). Über den Fehler fließt ein Strom  $I_V$ , der zwar in  $I_A$  durch Stromwandler A, nicht jedoch durch Stromwandler B fließt. Die Fehlerstelle muss zwischen A und B liegen. Würde der Fehler nach Stromwandler B liegen, so würden beide Wandler denselben Strom messen. Der Fehler kann durch Detektionsalgorithmen an beiden Stromwandlern detektiert werden. Da er jedoch an beiden erkannt wird, ist klar, dass die Fehlerstelle außerhalb der Schaltanlage liegt und für diese keine Gefahr darstellt. Es muss nur der betroffene Lastzweig abgeschaltet werden.

## 5.4 ZUSAMMENFASSUNG DER AUSWERTEVERFAHREN

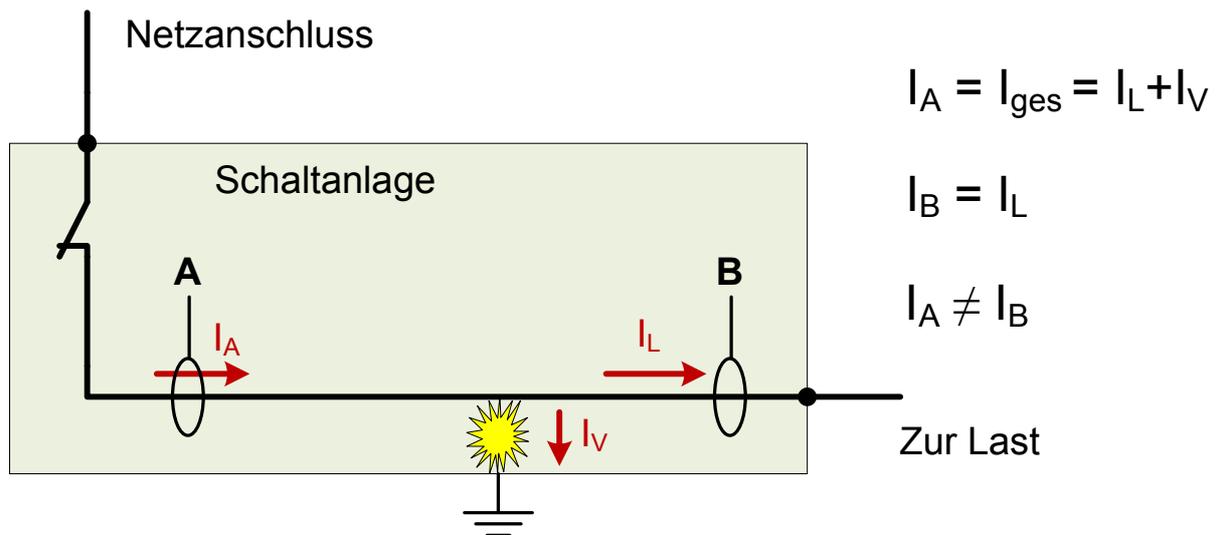


Abbildung 88: Differentialschutz mit 2 Sensoren (A und B) in einer Schaltanlage, mit parallelem Lichtbogen gegen Erde.

## 5.4 Zusammenfassung der Auswerteverfahren

Im vorliegenden 5. Kapitel wurden mehrere Verfahren vorgestellt, welche einen Lichtbogenstrom von einem ohmschen, induktiven, oder auch durch Leistungselektronik verzerrten Laststrom unterscheiden können. Dabei wurden unterschiedliche Merkmale, die einen Lichtbogen kennzeichnen, zur Detektion herangezogen. Es ist jedoch nicht möglich auszuschließen, dass einzelne dieser Merkmale, wie beispielsweise steile Stromflanken, auch von anderen Netzlasten verursacht werden. Dies könnte dazu führen, dass das Auswerteverfahren zu keinem Ergebnis kommt, oder in seltenen Fällen auch eine Fehlauslösung vorkommt. Auch stromrichter gesteuerte Lasten könnten durch das Zu- und Abschalten des Stroms den Eindruck eines wiederzündenden Lichtbogens vermitteln.

Um eine Fehlauslösung durch ein einzelnes Detektionsverfahren zu vermeiden, wird die Kombination mehrerer Verfahren empfohlen. Jedes Verfahren für sich verwendet die Lichtbogenmerkmale auf eine unterschiedliche Art, um zu einem Ergebnis zu kommen. Nur wenn alle angewendeten Verfahren zum gleichen Ergebnis kommen, kann sichergestellt werden, dass der Strom nicht durch einen ungewöhnlichen, aber ungefährlichen Lastfall abgeschaltet wird.

Eines der größten Alleinstellungsmerkmale eines stromschwachen Lichtbogens ist zudem die Anzahl der Außenleiter, die betroffen sind. Da größere Verbraucher mit hohen Lastströmen dreiphasig angeschlossen werden, treten lichtbogenähnliche Merkmale des Stromes im Zeit- und Frequenzbereich auch auf allen drei Außenleitern auf. Bei seriellen Lichtbögen kann nur ein Außenleiter betroffen sein. Daher können Störlichtbogenmerkmale auch nur auf einer der drei überwachten Außenleitern auftreten. Einzige Ausnahme ist der

serielle Lichtbogen bei Verbrauchern mit sternförmig angeschlossener dreiphasiger Versorgung. Dann können die Merkmale eines seriellen Lichtbogens auf zwei Außenleitern gemessen werden. Treten Merkmale auf allen drei Außenleitern zum selben Zeitpunkt (gleiche Phasenlage) auf, so deutet dies auf eine Störung durch andere Einflussgrößen hin. Ein serieller Lichtbogenfehler ist dann nicht wahrscheinlich. Ähnlich verhält es sich mit parallelen Lichtbogenfehlern. Brennt dieser zwischen einem Außenleitern und geerdeten Teilen, so dürfen die Lichtbogenmerkmale wiederum nur auf einem Leiter messbar sein. Brennt der Lichtbogen hingegen zwischen zwei benachbarten Außenleitern, dann können die Merkmale auf maximal zwei Leitern nachgewiesen werden. Ein Lichtbogen über alle 3 Leiter kann nahezu ausgeschlossen werden. In diesem Falle würde der Lichtbogenstrom deutlich größer als der Nennstrom werden, und so die konventionellen Schutzverfahren, wie beispielsweise den Überstromschutz, auslösen.

Die vorgestellten Verfahren haben bisher nur jeweils einen Leiter des Drehstromsystems einer Schaltanlage betrachtet. Mit Anwendung einer Kombination aus verschiedenen Auswerteverfahren und unter Beachtung der genannten Regeln für dreiphasige Systeme, kann eine sichere Lichtbogendetektion gewährleistet werden.

### **Ablaufdiagramm der Lichtbogendetektion**

Um die genannten Auswerteverfahren parallel anwenden zu können, muss der in der Anlage gemessene Stromverlauf entsprechend ausgewertet werden. Abbildung 89 zeigt ein Ablaufdiagramm für drei der vorgestellten Auswerteverfahren. Wie in Kapitel 5.1.1 beschrieben, wird für die Auswertung der Abstände zwischen den Zündflanken eine analoge Vorfilterung empfohlen. Dazu muss das Signal des Stromwandlers separat abgegriffen werden, und erst nach der Signalfilterung mittels AD-Wandler digitalisiert werden. Für die Auswertung der Halbwellenflächen, sowie des Frequenzspektrums, kann das Stromwandlersignal direkt digitalisiert werden. Mit den digitalisierten Signalen können die Auswerteverfahren direkt angewendet werden. Um ein Auswertergebnis als Fehler zu definieren, muss in den meisten der Verfahren noch ein Triggerlevel ausgewählt werden. Dies kann eine Schwelle sein, die bei jeder Anlage je nach angeschlossenen Lastverhältnissen individuell gewählt wird. Die zweite Möglichkeit besteht darin, einen vordefinierten Triggerlevel in Abhängigkeit der maximal auftretenden Lastströme zu definieren. Dies birgt jedoch die Gefahr, dass bei besonders ausgefallenen Lastverhältnissen (hohe Amplituden der Harmonischen) der Triggerpegel auch durch Netzlasten ohne Lichtbogenfehler überschritten werden kann. Mittels einer Gewichtung können die unterschiedlichen Verfahren am Ende noch priorisiert werden. So können entweder alle angewendeten Verfahren die gleiche Gewichtung haben, oder aber ein Verfahren höher bewertet werden. So kann beispielsweise bei stark

## 5.4 ZUSAMMENFASSUNG DER AUSWERTEVERFAHREN

verzerrten Lastströmen die Frequenzanalyse höher gewichtet werden, wenn im Zeitbereich ein Lichtbogen nur schwer erkannt werden kann.

Da alle drei Leiter überwacht werden müssen, gibt es von jedem Leiter ein Ergebnis pro Auswertezeitraum. Ein dreiphasiger Stromschwacher Störlichtbogen kann nahezu ausgeschlossen werden. Detektieren alle drei Außenleiter einen Störlichtbogen, handelt es sich höchstwahrscheinlich um einen Drehstromverbraucher, der eine lichtbogenähnliche Charakteristik aufweist.

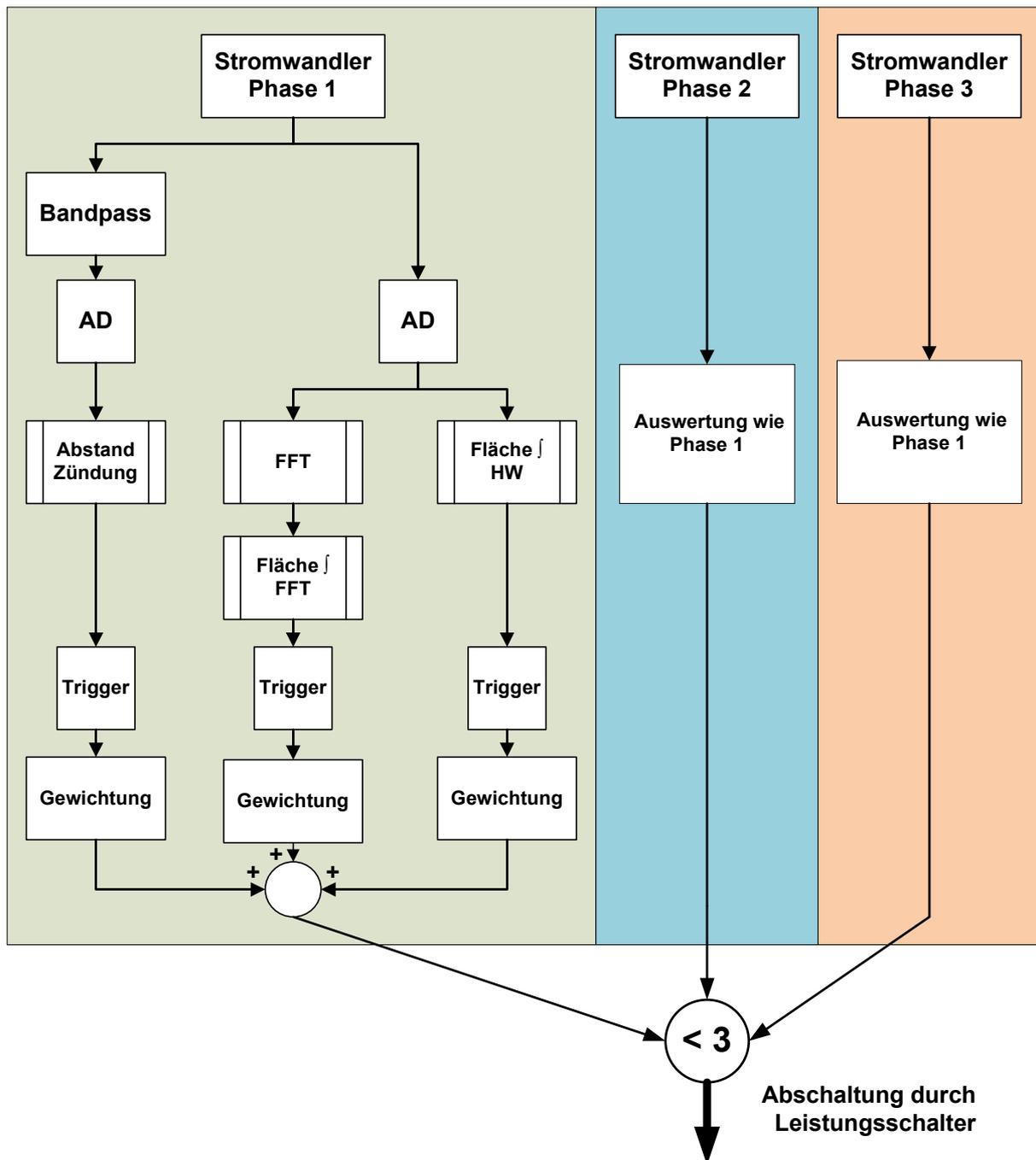


Abbildung 89: Flussdiagramm der Störlichtbogendetektion bei Kombination von 3 Verfahren.

Erst wenn alle angewendeten Verfahren zu einem eindeutigen Ergebnis kommen, kann für den überwachten Außenleiter ein Lichtbogen angenommen werden. Wird dann noch überprüft, ob mindestens ein anderer Außenleiter keinen Lichtbogen erkennt, kann mit großer Sicherheit von einem stromschwachen Lichtbogen ausgegangen werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Erkennung von Lichtbogenfehlern hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Die Einführung der Arc Fault Current Interrupter AFCI in den USA hat gezeigt, dass die Lichtbogendetektion im Bereich des Nennstroms prinzipiell möglich ist, und ein mehr an Sicherheit bietet. Nicht zuletzt durch diese Entwicklung und dem Bestreben die Lichtbogenerkennung auch im europäischen Markt einzuführen, ist es zu verdanken, dass die Erkennung von Lichtbögen auch in Schaltanlagen wieder neuen Auftrieb erhalten hat. Mit der Einführung von optischen Systemen, basierend auf Lichtwellenleitern, wurde ein Anfang gemacht. Die Entwicklung wird jedoch weiter gehen, um die Erkennung von Lichtbogenfehlern auch durch Stromanalyse zu ermöglichen. Dazu hat die vorliegende Arbeit einen entscheidenden Beitrag geliefert.

#### Lichtbogenerzeugung

Erstmals konnten Verfahren zur einfachen und reproduzierbaren Nachbildung von seriellen und parallelen stromschwachen Störlichtbögen in Sammelschienensystemen beschrieben werden. Diese beiden Fehlerquellen sind die Hauptauslöser für Lichtbogenfehler in Schaltanlagen. Bei beiden Fehlerarten können Lichtbogenströme auftreten, die unterhalb des Nennstromes der Anlage liegen und somit nicht mehr von konventionellen Schutzkonzepten erkannt werden. Die vorgestellten experimentellen Verfahren ermöglichen es, reproduzierbare Lichtbögen mit Lichtbogenströmen bis zu 400 A zu erzeugen. Da die sogenannten „Stromschwachen Störlichtbögen“ im Strombereich von handelsüblichen Netzlasten liegen, mussten neue Verfahren gefunden werden, um diese Fehlerfälle erkennen und abschalten zu können.

Bisherige Verfahren zur Lichtbogenerzeugung sind zum Teil sehr aufwändig oder liefern Ergebnisse, die nicht auf Lichtbögen in Sammelschienen anwendbar sind. Einige wissenschaftliche Untersuchungen stützen sich auf hauptsächlich simulierte Stromverläufe von Lichtbogenfehlern. Um bessere Messdaten zu erhalten, wurden zwei neue Verfahren entwickelt, um Lichtbogenfehler im Labor nachzubilden. Mittels Lichtbogenzündung durch Metallfilmwiderstände, können parallele Störlichtbögen zwischen zwei Außenleitern auf eine einfache, aber verlässliche Art und Weise erzeugt werden. Serielle Lichtbögen sind durch Sammelschienenverbindung mit stark erhöhtem Kontaktwiderstand nachgebildet worden.

### Lichtbogenmerkmale

Die aus den realitätsnahen Versuchen gewonnenen Messergebnisse wurden hinsichtlich ihrer besonderen Merkmale, sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich, untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass es nicht das eine, einzigartige Lichtbogenmerkmal gibt. Vielmehr gibt es eine Vielzahl von Indikatoren im Zeit- und im Frequenzbereich. Zu diesen gehören:

- Das Erlöschen des Lichtbogens im Stromnulldurchgang erzeugt eine Stufe, auch Stromlücke genannt, im Stromverlauf. Dieses Merkmal ist typisch für stromschwache Lichtbögen, da bei diesen das Lichtbogenplasma nicht so sehr aufgeheizt wird, dass der Lichtbogen ohne Unterbrechung im Stromnulldurchgang weiter brennt. Die Dauer dieser Stufe, oder auch Stromlücke, hängt unter anderem vom Lichtbogenstrom, sowie vom Abstand zwischen den Lichtbogenfußpunkten ab. So haben serielle Lichtbögen deutlich kürzere und weniger ausgeprägte Lücken im Stromverlauf.
- Der Stromanstieg nach dem Wiederezünden des Lichtbogens erzeugt eine steile Flanke im Stromverlauf, die in der ansteigenden Halbwelle auftritt (bis zu 5 ms nach dem Stromnulldurchgang). Je länger die Stromlücke, desto ausgeprägter ist auch die steile Stromflanke. Da die Zündbedingungen des Lichtbogens stochastisch schwanken, ist auch der Zündzeitpunkt ein zeitlich variierendes Ereignis. Dies unterscheidet ihn von nahezu allen anderen Verbrauchern.
- Aufgrund des schwankenden Zündzeitpunktes schwankt auch die Energie des Lichtbogens bei jeder Halbwelle. Jede Halbwelle hat, im Vergleich zur vorherigen Halbwelle, einen leicht unterschiedlichen Flächeninhalt.
- Im Frequenzbereich erzeugt der Lichtbogen eine Erhöhung des Amplitudendichtespektrums. Insbesondere bei niedrigen Frequenzen unterhalb 10 kHz sind im Gegensatz zu netzüblichen Verbrauchern nicht nur die Harmonischen der Grundfrequenz erhöht, sondern auch die Frequenzen zwischen den Harmonischen haben nahezu dieselbe Amplitude.
- Störlichtbogenmerkmale treten nicht gleichzeitig auf allen drei Außenleitern auf. Die Fehlerarten betreffen maximal 2 Außenleiter gleichzeitig. Verbraucher mit Anschlussleistungen im Bereich der Lichtbogenströme werden dreiphasig angeschlossen. Lichtbogenähnliche Merkmale zeigen sich daher auch auf allen drei Leitern und ermöglichen so eine Unterscheidung zwischen Lichtbogenstrom und Laststrom.

### Auswerteverfahren

Zur Erkennung von Fehlern in Schaltanlagen wurden die gefundenen Lichtbogenmerkmale in Algorithmen eingebunden. Diese in Matlab implementierten Programme können die in einem gemessenen Stromverlauf charakteristischen, auf einen Lichtbogen hindeutenden Muster erkennen. Vier

## 6.1 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

verschiedene Verfahren wurden vorgestellt und ihre Vor- und Nachteile erläutert.

- Der Zündzeitpunkt eines Wechsellichtbogens nach dem Stromnulldurchgang, ist ein stochastisch schwankendes Ereignis. Das unterscheidet ihn von allen anderen Verbrauchern. Je nach Höhe des Lichtbogenstroms ist die Zündflanke mehr oder weniger stark ausgeprägt. Das Verfahren misst den zeitlichen Abstand, der im Stromverlauf auftretenden Flanken. Schwanken die Abstände zueinander über mehrere Halbwellen, deutet dies auf einen brennenden Lichtbogen hin.
- Die Amplitude und Brenndauer des Lichtbogens ändert sich mit jeder Halbwelle. Dadurch variiert auch die Fläche je Halbwelle (Energie pro Halbwelle). Das Verfahren „Vergleich von Halbwellenintegralen“ bestimmt jede Halbwellenfläche und vergleicht sie mit der darauffolgenden. Bei ohmschen und induktiven Verbrauchern sind keine, oder nur sehr geringe Schwankungen zu erwarten. Bei Lichtbogenströmen kann es je nach Art des Lichtbogens starke Flächenunterschiede zwischen den Halbwellen geben.
- Um das im vorigen Punkt genannte Verfahren unabhängig von Ein- und Ausschaltvorgängen zu machen (Lastsprünge), wird im Verfahren „Vergleich von normierten Halbwellenintegralen“, die tatsächliche Amplitude auf die jeweils maximal mögliche Amplitude (bei idealem Sinus) normiert. So haben Lastschwankungen und Schaltvorgänge keinen Einfluss mehr auf das Detektionsergebnis. Allerdings wird das Verfahren auch unempfindlicher gegenüber Schwankungen der Amplitude aufgrund des Lichtbogens selbst.
- Zur Detektion von Lichtbogenmerkmalen im Zeitbereich wird die FFT angewendet. Das Spektrum wird hinsichtlich seiner Harmonischen untersucht. Es werden Blöcke um die einzelnen Harmonischen (geradzahlige und ungeradzahlige) gebildet. Ist die Summe aller geradzahliger Blöcke ähnlich hoch wie die der Ungeradzahligen, ist dies ein Indikator für den Störlichtbogen.

Um die Schwachstellen eines einzelnen Auswertalgorithmus auszugleichen, wird die Kombination von mindestens drei der Programme empfohlen. Die gefundenen Lichtbogenmerkmale dürfen zudem nicht auf allen drei Leitern gleichzeitig auftreten. Dies würde auf einen dreiphasigen Verbraucher hindeuten und ist für einen stromschwachen Lichtbogen ausgeschlossen. Durch Beachtung dieser Regeln lassen sich Fehlauflösungen durch Verbraucher mit lichtbogenähnlichen Eigenschaften vermeiden.

Die Detektierbarkeit eines Lichtbogens hängt im Weiteren vom Verhältnis des Lichtbogenstromes zum Gesamtstrom der Anlage ab. Je höher der Lichtbogenstrom, desto besser kann er detektiert werden. Schwache Lichtbögen, die weniger als 10% des Gesamtstromes ausmachen, können dennoch detektiert werden, wenn der restliche Anlagenstrom nur geringe Anteile hochfrequenter Signale enthält. Dies ist der Fall, wenn die angeschlossenen Verbraucher ohmschen Charakter haben und wenig Oberwellen verursachen.

### **6.2 Ausblick auf weitere Arbeiten**

Die vorgestellten Verfahren wurden anhand von im Labor erzeugten Lichtbögen verifiziert. Um eine bessere Aussage über die Detektionsgenauigkeit treffen zu können, müssen nun Feldversuche durchgeführt werden. Dazu wird empfohlen, Störlichtbögen in Schaltanlagen mit realen Lastkonfigurationen zu messen. Die Lichtbögen können dabei wieder wie im beschriebenen Messaufbau per Kabel an der Hauptsammelschiene der Schaltanlage angeschlossen werden. Die so gewonnenen Messdaten zeigen den Einfluss der angeschlossenen Lasten und der Sammelschienenanordnung in der Schaltanlage auf den Stromverlauf. Aufgrund dieser Daten können Grenzwerte festgelegt werden, ab denen die Merkmale eines Störlichtbogens im Grundrauschen der übrigen angeschlossenen Verbraucher untergehen.

Um den bestmöglichen Schutz vor Lichtbögen zu erhalten, können die Detektionsverfahren auf eine Anlage speziell eingelernt werden. Dazu muss eine Nullmessung bei Betrieb aller angeschlossenen Lasten durchgeführt werden. Aufgrund dieser Nullmessung können obere Grenzwerte für den Grundstörpegel definiert werden. Je nach gewünschter Sensitivität des Schutzes, können dann für jedes einzelne Detektionsverfahren Schwellwerte festgelegt werden, die beim Überschreiten einen Lichtbogen signalisieren. Dieses „Einlernen“ ermöglicht es, auch bei lichtbogenähnlichen Lasten eine sichere Fehlererkennung zu gewährleisten.

Um die entwickelten Detektionsverfahren in einer realen Schaltanlage anwenden zu können, muss die Software in die bestehende Hard- und Softwarearchitektur integriert werden. Als Strommessung bietet sich die Nutzung der vorhandenen Stromwandler an. Diese haben im Falle von Rogowski-Spulen je nach Verstärkerschaltung eine ausreichende Bandbreite, um die für die Auswertung relevanten Frequenzen zu übertragen.

Für die anschließende Auswertung bieten sich zwei Varianten der Messwerterfassung an. Da für alle Verfahren eine Mindestauswertzeit von 100 ms angenommen wurde, muss diese Zeit mindestens abgewartet werden, bis eine erste Auswertung möglich ist. In einem parallelen Verfahren kann dann dieser Datenarray ausgewertet werden, während ein zweiter Controller wieder

## 6.2 AUSBLICK AUF WEITERE ARBEITEN

100 ms Messdaten aufnimmt. Der Vorteil des Verfahrens ist die lange Zeit, die zur Verfügung steht, um einen einzelnen Datensatz auszuwerten. Innerhalb der 100 ms können alle Auswerteverfahren angewendet und die Ergebnisse verglichen werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, nach jeder neu aufgenommenen, vollen Halbwelle eine Auswertung durchzuführen. Ähnlich einem Schieberegister wird dabei die älteste Halbwelle gelöscht, so dass immer eine Auswertezeit von 100 ms zur Verfügung steht. Das Verfahren hat den Vorteil, dass beim Auftreten eines Lichtbogens maximal eine Halbwelle vergeht, bevor dieser das erste Mal erkannt wird. Der Nachteil besteht darin, dass nur 10 ms, bis zum Einlesen der nächsten Halbwelle, bleiben, um die nötigen Auswertungen durchzuführen.

Die Schnelligkeit und mögliche Komplexität der angewendeten Auswerteverfahren, hängt im Wesentlichen von der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hardware ab. Mit entsprechendem Aufwand können Auswerteverfahren in kürzester Zeit durchgeführt werden, so dass zwischen Auftreten des Fehlers und Fehlererkennung nur noch wenige Millisekunden liegen.

## Anhang A

### Liste der Veröffentlichungen

- [1] P. Müller, S. Tenbohlen, W. Maier, M. Anheuser: „Artificial low current arc faults for pattern recognition in low voltage switchgear“, *55<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Vancouver BC, 2009, Canada*
- [2] P. Müller, S. Tenbohlen, W. Maier, M. Anheuser: „Erzeugung künstlicher stromschwacher Störlichtbögen zur Fehlererkennung in Niederspannungsschaltanlagen“, *20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2009,*
- [3] P. Müller, S. Tenbohlen, W. Maier, M. Anheuser: „Detektion von stromschwachen Störlichtbögen zur Diagnose von Fehlern in Niederspannungsschaltanlagen“, *Internationaler ETG Kongress des VDE, Düsseldorf, 2009,*
- [4] P. Müller, S. Tenbohlen, W. Maier, M. Anheuser: „Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain“, *25<sup>th</sup> ICEC and 56<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Charleston SC, 2010, USA*
- [5] P. Müller, S. Tenbohlen, W. Maier, M. Anheuser: „Influence of Capacitive and Inductive Loads on the Detectability of Arc Faults“, *57<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Minneapolis MN, 2011, USA*
- [6] P. Müller, S. Tenbohlen, W. Maier, M. Anheuser: „Einfluss von kapazitiven und induktiven Verbrauchern auf die Detektierbarkeit von Störlichtbögen“, *21. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2011*

## Anhang B

### Beispiel einer FFT anhand eines gemessenen Signals

Der gemessene Strom wird als ein Array von Messpunkten abgespeichert. Es entsteht eine zweispaltige Tabelle. Die Anzahl der Messpunkte hängt von der bei der Messung gewählten Auflösung ab. Zu jedem Messwert gibt es einen Zeitpunkt, an dem dieser aufgezeichnet wurde. Die Zeitabstände können dabei als immer gleich angenommen werden. Aus der Zeitspalte lässt sich die Abtastfrequenz  $f_a$  (2) des gemessenen Signals ermitteln:

$$f_a = \frac{1}{t_{n+1} - t_n} f_a = \frac{1}{t_{n+1} - t_n} \quad (2)$$

Durch die Fourier Transformation ergibt sich aus dem Stromverlauf ein Array aus Daten, die die jeweilige Amplitude zu einer Frequenz angeben. Der erste Datenpunkt im Array stellt dabei die Frequenz Null dar, welche dem Gleichanteil entspricht. Der zweite Datenpunkt ist die Amplitude der kleinsten messbaren Frequenz. Diese Frequenz ist gleichzeitig auch die kleinste Frequenzauflösung des gesamten Frequenzspektrums. Sie ergibt sich aus der zeitlichen Länge des aufgezeichneten Signals. Für eine aufgezeichneten Signaldauer von 1 Sekunde ( $t_{\text{mess}}$ ) ergibt sich eine Frequenzauflösung ( $\Delta f$ ) von 1 Hz nach der Formel (3):

$$\Delta f = \frac{1}{t_{\text{mess}}} \Delta f = \frac{1}{t_{\text{mess}}} \quad (3)$$

Zumeist wurden Lichtbogenströme mit einer Länge von 100 – 200 ms aufgezeichnet, was einer Frequenzauflösung von 5 – 10 Hz entspricht. Der Einfluss eines Lichtbogens auf Frequenzen unterhalb von 5 Hz könnte mit einer längeren Aufzeichnungszeit gemessen werden. Bei der praktischen Umsetzung der Lichtbogendetektion hat dies jedoch Auswirkungen auf die Zeit bis zur Detektion eines Fehlers. Je länger aufgezeichnet wird, desto länger dauert es auch, bis die Auswertung der Daten einen Fehler erkennen kann. Die maximale Aufzeichnungszeit zur Frequenzanalyse wird deshalb auf 200 ms begrenzt.

### Absolutwerte der Fouriertransformation

Die Fourier Transformation liefert keine Absolutwerte sondern komplexe Werte zurück. Zur Verdeutlichung werden in Abbildung 90 Messwerte mit dem

## ANHANG B

Matlab-Befehl `fft(Dateiname)`; fouriertransformiert. Die linke Spalte (1) enthält die Zeitachse X, die rechte Spalte (2) die Amplitude Y.

	Y	X		Y	X	
	1	2		1	2	
1	-0.0421904340...	-0.02383030...		1	2.8741e+03 + 0.0000e+00i	13.9393 + 0.0000i
2	-0.0421864340...	-0.02388660...		2	-9.9763e-02 + 1.5850e+03i	1.8038 - 0.4563i
3	-0.0421824340...	-0.02394280...		3	-9.9802e-02 + 7.9250e+02i	2.2505 - 1.4433i
4	-0.0421784340...	-0.02399910...		4	-9.9802e-02 + 5.2833e+02i	2.3331 - 1.6078i
5	-0.0421744340...	-0.02405530...		5	-9.9787e-02 + 3.9625e+02i	2.4042 - 2.5751i
6	-0.0421704340...	-0.02411160...		6	-9.9791e-02 + 3.1700e+02i	2.4318 - 3.7532i
7	-0.0421664340...	-0.02416160...		7	-9.9799e-02 + 2.6417e+02i	3.1233 - 5.3764i
8	-0.0421624340...	-0.02421780...		8	-9.9794e-02 + 2.2643e+02i	3.8109 - 7.3307i
9	-0.0421584340...	-0.02427410...		9	-9.9790e-02 + 1.9812e+02i	5.8068 - 11.9416i
10	-0.0421544340...	-0.02432410...		10	-9.9796e-02 + 1.7611e+02i	11.2338 - 26.1882i
11	-0.0421504340...	-0.02437410...		11	-9.9796e-02 + 1.5850e+02i	-5.4090e+02 + 1.4231e+03i
12	-0.0421464340...	-0.02442410...		12	-9.9792e-02 + 1.4409e+02i	-9.8579 + 28.1339i
13	-0.0421424340...	-0.02448030...		13	-9.9793e-02 + 1.3208e+02i	-4.6183 + 14.7879i

Abbildung 90: Messdatenarray (links) im Zeitbereich und das Ergebnis nach Anwendung des Befehls `fft(Dateiname)` in Matlab.

Um die absoluten Amplitudenwerte anzuzeigen, wird in MATLAB der Befehl `abs(Dateiname)` verwendet (siehe Abbildung 91). Das Ergebnis enthält die Absolutwerte der Fouriertransformierten. Der erste Wert in Spalte 2 (hier 13.939...) entspricht dem Gleichanteil des Signals (Frequenz 0 Hz).

	Y	X		Y	X	
	1	2		1	2	
1	-0.0421904340...	-0.02383030...		1	2874.14539657810	13.9392529156600
2	-0.0421864340...	-0.02388660...		2	1584.99904094681	1.86063316431338
3	-0.0421824340...	-0.02394280...		3	792.499532494719	2.67353882017210
4	-0.0421784340...	-0.02399910...		4	528.333007535443	2.83344686438528
5	-0.0421744340...	-0.02405530...		5	396.249758060158	3.52295630741318
6	-0.0421704340...	-0.02411160...		6	316.999817592254	4.47217090890722
7	-0.0421664340...	-0.02416160...		7	264.166512355023	6.21775739946657
8	-0.0421624340...	-0.02421780...		8	226.428436062369	8.26212689304678
9	-0.0421584340...	-0.02427410...		9	198.124888824016	13.2786077764192
10	-0.0421544340...	-0.02432410...		10	176.111016104766	28.4960128079490
11	-0.0421504340...	-0.02437410...		11	158.499911521964	1522.44452368641
12	-0.0421464340...	-0.02442410...		12	144.090831255885	29.8109482273511
13	-0.0421424340...	-0.02448030...		13	132.083267809933	15.4922380513083

Abbildung 91: Messdatenarray im Zeitbereich (links) und dieselben Werte nach der Fouriertransformation (rechts).

Die Fouriertransformierte der Zeitachse in Spalte (1) kann für die weitere Auswertung unberücksichtigt bleiben. Da die Spalte nur die Zeitpunkte der Abtastungen abbildet, enthält sie keine Informationen über das Frequenzspektrum des Messsignals. Da immer gleiche Abtastintervalle

angenommen werden, kann die Frequenzauflösung  $\Delta f$  als kleinste Einheit für die Achsenbeschriftung verwendet werden.

Die Werte der Fouriertransformation ergeben ein Datenarray, das in der ersten Hälfte dieselben Werte enthält wie in der zweiten Hälfte, allerdings um den Mittelwert gespiegelt (Abbildung 92). Das Frequenzspektrum ist symmetrisch zur Nyquist Frequenz. Zur besseren Darstellung wurde die y-Achse logarithmisch dargestellt.

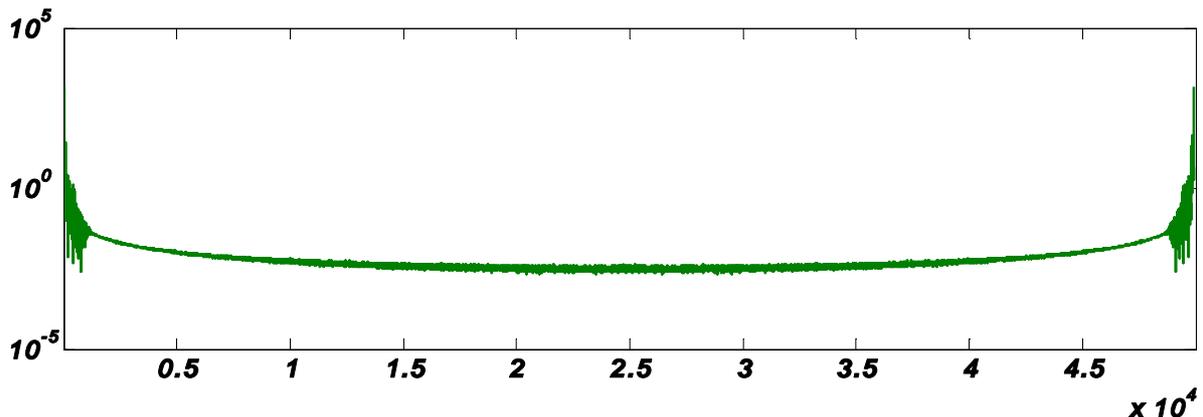


Abbildung 92: Absolutwerte eines fouriertransformierten Signals.

Die Fast Fourier Transformation nutzt den Umstand, dass die Unterschiede der Werte auf der linken und rechten Seite so gering sind, dass sie vernachlässigt werden können. Somit müssen nur halb so viele Werte berechnet werden, was das Verfahren erheblich beschleunigt.

Für eine Darstellung der im Signal enthaltenen Frequenzinformationen ist nur die erste Hälfte des Arrays nötig. Die zweite Hälfte wird abgeschnitten, dargestellt werden nur die Amplitudenwerte bis  $X_{\max}/2$  (siehe Abbildung 93). Bei der späteren Berechnung der Amplitudenwerte muss dann berücksichtigt werden, dass die zweite Hälfte bei der Darstellung vernachlässigt wurden. Da die meisten Informationen im untersten Frequenzbereich um die Netzfrequenz enthalten sind, wird die X-Achse logarithmisch dargestellt. Die hat jedoch den Nachteil, dass der 0. Wert des Arrays, also die Frequenz 0 Hz, nicht als 0. Wert dargestellt werden kann sondern als 1. Wert ( $\log(0)=1$ ). Dies führt dazu, dass die Messwerte alle um einen Wert nach rechts verschoben sind. Der 0. Wert enthält den Gleichanteil des gemessenen Stromes. Bei induktiver Messung des Stromes sollte der Gleichanteil nahezu Null sein, weshalb der Wert auch vernachlässigt werden kann. Er wird deshalb gelöscht. Die erste dann noch dargestellte Frequenz entspricht dem 1. Wert des Arrays und damit der Frequenz  $1/t_{\text{mess}}$ . Bei einer Aufzeichnungszeit von 200 ms ergibt sich so für den ersten Datenpunkt der FFT die Amplitude der Frequenz 5 Hz. Alle weiteren Amplituden sind die Werte der Vielfachen von 5 Hz (10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, ...).

## ANHANG B

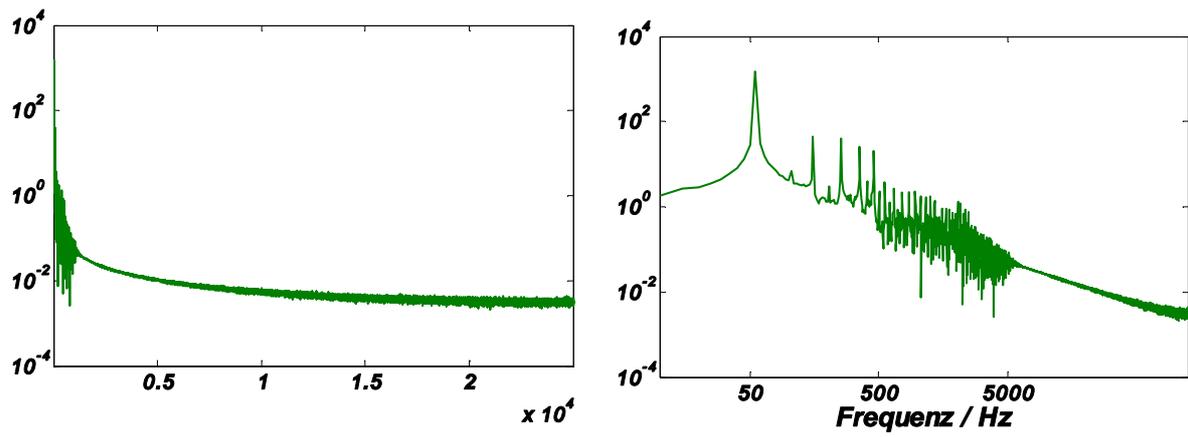


Abbildung 93: Lineare (links) und logarithmische (rechts) Darstellung der ersten Hälfte der Fouriertransformierten.

# Literaturverzeichnis

- [Ayrton 1902] H. Ayrton: „The Electric Arc“ Cambridge Library Collection – Technology, Cambridge University Press, 2012, (1. Auflage 1902)
- [Balzer 1992] G. Balzer, B. Boehler, K. Haneke, H.G. Kaiser, R. Pöhlmann, W. Tettenborn, G. Voß: „Schaltanlagen“ ABB Taschenbuch 9. Auflage, Cornelsen Verlag, Düsseldorf, 1992
- [Beck 2006] J.B. Beck, D.C. Nemir: “Arc fault detection through model reference estimation” *Proceedings of the SAE Power Systems Conference*, New Orleans, USA, 2006
- [Berger 2009] F. Berger: „Der Störlichtbogen – ein Überblick“ “ 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2009
- [Blumenroth 2009] F. Blumenroth, N. Lücke, S. Schlegel, S. Großmann, H. Löbl: „Untersuchung zum Langzeitverhalten von ruhenden Verbindungen in der Elektroenergie-technik“ 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2009
- [Brechtken 2001] D. Brechtken: “Präventivschutz als Weiterentwicklung des aktiven und passiven Störlichtbogenschutzes“ *VDE Fachtagung für Niederspannungs-Schaltanlagen und -Gerätetechnik*, Leipzig, 2001
- [Burger 2011] D. Burger, S. Tenbohlen, W. Köhler, W. Ebbinghaus: „Sources of Transient Electromagnetic Disturbance in Medium Voltage Switchgear“ *EMC Europe 2011*, York, United Kingdom, 2011
- [Crastan 2012] V. Crastan: “Elektrische Energieversorgung 1: Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik“ 3. Auflage, Springer Verlag, 2012

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Dahmouni 1999] Y. Dahmouni: „Brandentstehung in Niederspannungsanlagen“ Dissertation, Universität Hannover, 1999
- [Draxler 1997] H. Draxler: „Elektrische Kontakte für kleine und mittlere Lasten - Grundlagen und Anwendungshinweise“ *14. Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 1997
- [Esser 2009] W. Esser, D. Meyer: „Auslösekennlinien einstellungsspezifisch darstellen und ihr Zusammenwirken kompetent beurteilen“ Fachaufsatz 3. Auflage, Moeller Electric GmbH, Bonn, 2009
- [Fischer 2008] K. Fischer: „Konzepte zur Umsetzung neuer Schutzfunktionen für Leistungsschalter“ Diplomarbeit [Unveröffentlicht], Hochschule Amberg-Weiden, Amberg, 2008
- [Fisher 1970] L. E. Fisher: „Resistance of Low-Voltage AC Arcs“ *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, Vol. IGA-6, No.6, 1970
- [Fuller 1985] J.F. Fuller, W.J. Hanna, G.A. Kallenbach: „Arcing faults in metallic conduit at 120 and 240 V“ *IEEE Transactions of Industrial Applications*, Vol. IA-21, No. 4, 1985
- [Gammon 1999] T. Gammon, J. Matthews: „The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems“ *IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, 1999
- [Gammon 2000] T. Gammon, J. Matthews: „Arcing-fault models for low-voltage power systems“ *IEEE Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference*, Conference Record, 2000
- [GE 2001] GE Industrial Systems: „DEH-40117 Homeowner & Installer Information“ General Electric Company, Plainville, CT, 2001

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Gregory 1998] G.D. Gregory, G.W. Scott: "The arc fault circuit interrupter: An emerging product" *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. 34, No.5, 1998
- [Hetzmannseder 2001] E. Hetzmannseder, J. Zuercher: „Lichtbogenfehler“ 16. *Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 2001
- [Heuck 2002] K. Heuck, K.-D. Dettmann: „Elektrische Energieversorgung“ Vieweg Verlag, 5. Auflage, 2002
- [Holm 1941] Ragnar Holm: "Die technische Physik der elektrischen Kontakte" Technische Physik in Einzeldarstellungen, Springer Verlag, Berlin, 1941
- [Holm 1958] R. Holm, E. Holm: „Electric Contacts Handbook“ Springer Verlag, 1958
- [Könen 2003] P.L. Könen: "Personen- und Anlagenschutz im Störlichtbogenfall" ETZ Heft 15/2003, VDE Verlag, 2003
- [Kosse 2009] S. Kosse, A. Hauser: „Schaltlichtbögen – Vergleichbarkeit von Simulation und Experiment“ 20. *Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 2009
- [Krechla 1998] A. Krechla, J. Petzoldt: „Stromrichternetzrückwirkungen im Frequenzbereich 2 ... 10 kHz“ *Tagungsband des 9. Symposiums Maritime Elektronik*, Universität Rostock, 1998
- [Küchler 2004] A. Küchler: „Hochspannungstechnik: Grundlagen–Technologie–Anwendung“ VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin, 2004

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Kühnel 2013] C. Kühnel, S. Schlegel, S. Großmann: "Untersuchungen zur Überlastabschaltung von Ganzbereichssicherungen bei erhöhter Sammelschienen- und Umgebungstemperatur" 22. *Albert-Keil-Kontaktseminar*, VDE Fachbericht 69, Karlsruhe, 2013
- [Land 2003 /1] H. Bruce Land, III: „Determination of the Cause of Arcing Faults in Low-Voltage Switchboards” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 44, NO.2, Page 430-436, 2008
- [Land 2003 /2] H. Bruce Land, III: „The Behavior of Arc Faults in Low-Voltage Switchboards” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 44, NO.2, Page 437-444, 2008
- [Lindmayer 1987] M. Lindmayer: „Schaltgeräte: Grundlagen, Aufbau, Wirkungsweise“ Springer Verlag Berlin, 1987
- [Lindmayer 2009] M. Lindmayer, M. Springstubbe, E. Marzahn: „Neues über die Komplettsimulation des Lichtbogenverhaltens in Schaltgeräten“ 16. *Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 2001
- [Lindmayer 2009] M. Lindmayer: „Lichtbogensimulation – ein Überblick“ 20. *Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 2009
- [Maroni 2001] C.S. Maroni, R. Cittadini, Y. Cadoux, M. Serpinet: “Series arc detection in low voltage distribution switchboard using spectral analysis” *International Symposium on Signal Processing and its Application (ISSPA)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2001
- [Meckler 2002] P. Meckler: “Simulation of AC arc faults in aircraft electrical networks” 21<sup>st</sup> *International Conference on Electrical Contacts*, Zürich, Switzerland, 2002
- [Müller 2007] P. Müller: “Untersuchung von stromschwachen Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen“, Diplomarbeit [Unveröffentlicht] am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, 2007

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Müller 2011] P. Müller, S. Tenbohlen, W. Maier, M. Anheuser: "Influence of Capacitive and Inductive Loads on the Detectability of Arc Faults", *57<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Minneapolis MN, USA, 2011
- [Nasser 1971] E. Nasser: „Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics” John Wiley & Sons Verlag New York, 1971
- [Nemir 2004] D. Nemir, A. Martinez, B. Diong: "Arc fault management using solid state switching" *Proceedings of the SAE Power Systems Conference*, Reno, USA, 2004
- [Onderdonk 1994] I. M. Onderdonk: "To melt copper conductors" *Elect. World*, Jun. 24, 1994
- [Parise 2011] G.Parise, L. Parise, P. Nicolucci: "Localized Fire Ignition Hazard in Branch Circuits, Cord and Connected Equipment" *Industry Applications Society (IAS), Annual Meeting, IEEE*, 2011
- [Rempel 1987] W. Rempel: "Zu Entstehung und Ablauf von Lichtbogenkurzschlüssen in Drehstrom-Niederspannungs-Anlagen und deren mathematische Beschreibung" *Dissertation an der TU Ilmenau, Deutschland*, 1987
- [Restrepo 2007] C.E. Restrepo: "Arc fault detection and discrimination methods" *53<sup>rd</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Pittsburgh PA, USA, 2007
- [Rieder 1967] W. Rieder: „Plasma und Lichtbogen“ Vieweg Verlag Braunschweig, Deutschland, 1967
- [Schröder 1993] K.-H. Schröder: „Kontaktverhalten und Schalten in der elektrischen Energietechnik –Grundlagen und Anwendungstechnik“ *12. Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 1993

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Schumacher 2005] A. Schumacher, H. Schomlke: "Störlichtbogen – nicht zu vermeiden aber beherrschbar" ETZ Heft 7/2005, VDE-Verlag, 2005
- [Schwab 2010] A. J. Schwab, W. Kürner: „Elektromagnetische Verträglichkeit“ VDI-Buch, Springer-Verlag, Berlin, 2010
- [Shea 2008] J.J. Shea: „Comparing 240V to 120V series arcing faults in residential wire” *24<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts*, Saint Malo, Frankreich, 2008
- [Shea 2010] J.J. Shea: “RF Current Produced from AC Arcs with Asymmetrical Electrodes” *56<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Charleston SC, USA, 2010
- [Shea 2011] J.J. Shea: “RF Current Produced from Electrical Arcing” *57<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Minneapolis MN, USA, 2011
- [Siemens 1990] Siemens AG: “Schalten, Schützen, Verteilen in Niederspannungsnetzen“ Siemens Aktiengesellschaft, München, 1990
- [Siemens 2010] Siemens AG Building Technologies: "Sicherungssysteme - BETA Niederspannungs-Schutzschalttechnik Technik-Fibel", Best.-Nr. E10003-E38-10T-G3021, Siemens Aktiengesellschaft, 2010
- [Siemens 2013] Siemens AG: „Projektierungshandbuch – Offene Leistungsschalter 2013“ Best. – Nr. : 3ZW1012-3WL11-0AB1, Siemens Aktiengesellschaft, München, 2013
- [Sletbak 1992] J. Sletbak, R. Kristensen, H. Sundklakk, G. Navik, M. Runde: „Glowing contact areas in loose copper wire connections” *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, Vol. 15, No. 3, 1992

## LITERATURVERZEICHNIS

- [Sultan 1994] A.F. Sultan, G.W. Swift, D.J. Fedirchuk: "Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry" *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 1, 1994
- [UL 1996] Underwriters Laboratories Inc.: „Report on Arc-Fault Detection Circuit Breakers" for the National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn VA, USA, 1996
- [Vinaricky 1993] E. Vinaricky: „Grundlagen elektrischer Kontakte“ 12. *Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 1993
- [Vinaricky 2001] E. Vinaricky: „Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen“ 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2001
- [Wafer 2005] J. A. Wafer: „The Evolution of Arc Fault Circuit Interrupters" 51<sup>st</sup> *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Chicago IL, USA 2005
- [Zheng 2009] W. Zheng, W. Wu: "Detecting Low Voltage Arc Fault Based on Lifting Multiwaves" 2<sup>nd</sup> *IEEE Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Applications*, Wuhan, China, 2009
- [Zhou 2008] X. Zhou, J. Hastings, T. Schöpf: "Detection of Glowing Contacts Employing Acoustic Sensing Technologies" 24<sup>th</sup> *International Conference on Electrical Contacts*, Saint Malo, Frankreich, 2008