

Modellbasierte Analyse und Diagnose von Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dortmund genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

von

M. Sc. Michael Kiffmeier

Dortmund, 2021

Tag der mündlichen Prüfung:	05.02.2021
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Götze

Überblick

Die Ergänzung bestehender 12 V Energiebordnetzsysteme in Kraftfahrzeugen um die 48 V-Ebene ist bereits fortgeschritten und wird in Zukunft weiterhin an Relevanz gewinnen. Bei der Verwendung von 48 V Kfz-Bordnetzen können jedoch in der Verkabelung neben den klassischen Fehlern, wie z.B. Kurzschlüssen und Leitungsbrüchen, auch gefährliche Lichtbogenfehler entstehen, welche in 12 V Bordnetzen noch keine besondere Beachtung erfahren müssen. Diese Lichtbögen bergen aufgrund enormer Hitzeentwicklung die Gefahr von Fahrzeugbränden. Auch funktionale Ausfälle, welche durch die Beeinflussung der elektrischen Eigenschaften des 48 V Energiebordnetzes durch Lichtbögen entstehen können, können besonders in Zusammenhang mit autonomen oder automatisierten Fahrfunktionen sehr gefährlich sein und ein hohes Unfallpotential verursachen. Hardwaretechnische Maßnahmen und Diagnoseverfahren können dieser Gefahr grundsätzlich entgegenwirken. Die zuverlässige Handhabung dieser Lichtbogenfehler ist mit heutigen Mitteln jedoch nicht immer zuverlässig machbar.

Zur Untersuchung der Beschaffenheit der Lichtbogenfehler und für die Simulation der elektrischen, und gegebenenfalls funktionalen, Auswirkungen wird in dieser Arbeit ein neues Lichtbogenmodell entworfen, welches die in dieser Arbeit analysierten und definierten Anforderungen an Lichtbogenmodelle für Simulationen in 48 V Kfz-Bordnetzen erfüllen kann. Dieses Lichtbogenmodell kann mit Modellen von Bordnetzen kombiniert und so für die Analyse von fehlerhaften Bordnetzen verwendet werden. Anhand einer exemplarischen Bordnetzauslegung wird demonstriert, dass bei geschickter Wahl der Bordnetzabschlüsse und Verkabelungselemente eine intrinsische Sicherheit gegen serielle Lichtbögen erreicht werden kann. Für parallele Lichtbögen wird ein Diagnoseverfahren vorgestellt, welches in der Lage ist, diese zu detektieren und zu klassifizieren. Es werden für verschiedene Konfigurationen Worstcase-Abschätzungen bezüglich der Verlustenergie und somit der maximalen Reaktionszeit von Diagnoseverfahren durchgeführt. Das modellbasierte Diagnoseverfahren wird abschließend zunächst theoretisch hergeleitet und an einem konkreten Beispiel im Labor und mittels einer mit dem neuen Lichtbogenmodell nachgebildeten Simulation angewendet, validiert und diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Ziele der Arbeit.....	4
1.3 Gliederung.....	4
2 RAHMENBEDINGUNGEN VON KFZ-ENERGIEBORDNETZEN	7
2.1 Kfz-Energiebordnetzkomponenten und Verkabelungsfehler	7
2.1.1 Energiespeicher	8
2.1.2 Energieerzeuger/elektrische Maschinen	9
2.1.3 Energieverbraucher.....	10
2.1.4 Kabelbaumkomponenten und DC/DC-Wandler.....	12
2.1.5 Fehler in der Energieverkabelung	15
2.2 Beschreibung und Analyse von Bordnetzarchitekturen	17
2.2.1 Funktionale Anforderungen an 48 V-Energiebordnetze	17
2.2.2 Ausfallsicherheit/fail-operational.....	19
2.2.3 Energiebordnetz-Topologien	20
2.2.4 Definition der Basistopologien.....	21
3 MODELLBILDUNG FÜR BORDNETZ UND LICHTBOGEN	25
3.1 Bordnetzmodell	25
3.1.1 Quellenmodell	26
3.1.2 Verbrauchermodell.....	27
3.1.3 Modelle für Verkabelungselemente	30
3.1.4 Gesamtmodell der definierten Basistopologien	35
3.2 Lichtbogenmodelle für 48 V Kfz-Bordnetze	37
3.2.1 Grundlagen zur Entstehung von Lichtbögen	37
3.2.2 Darstellung des Prüfstands zur Erzeugung von Lichtbögen.....	43
3.2.3 Lichtbogenmodell-Anforderungsanalyse	48
3.2.4 Bekannte Modellierungsansätze	63

3.2.5	Ayrton-Low-Voltage-Erweiterung (ALVE)	66
3.2.6	Zustandsübergangsdiagramm und Ersatzschaltbild.....	68
4	PARAMETRIERUNG, VALIDIERUNG UND VERGLEICH DER LICHTBOGENMODELLE	73
4.1	Parametrierung der ALVE- und Ayrton-Gleichung	73
4.1.1	Parametrierung der Ayrton-Low-Voltage-Erweiterung (ALVE)	74
4.1.2	Parametrierung der Ayrton-Gleichung.....	77
4.2	Validierung und Vergleich.....	77
4.2.1	Zündvorgang des Lichtbogens	78
4.2.2	Brennverhalten des Lichtbogens.....	81
4.2.3	Quellenvariation/Spannungsvariation.....	84
4.2.4	Lichtbögen bei Schalthandlungen im Bordnetz	85
5	ANWENDUNG DES LICHTBOGENMODELLS	89
5.1	Analytische Bordnetzauslegung	89
5.2	Modellbasierte Bordnetzauslegung	90
5.3	Modellbasierte Energieanalysen	95
6	LICHTBOGEN-DIAGNOSEKONZEPTE.....	103
6.1	Analytische Abschätzungen zu Lichtbogenenergien.....	103
6.1.1	Lichtbögen in Zusammenhang mit ohmschen Verbrauchern	104
6.1.2	Lichtbögen in Zusammenhang mit Konstantleistungsverbrauchern	110
6.2	Diagnoseprozesse und Lichtbogendetektionsverfahren	117
6.2.1	Diagnoseprozesse und Fehlerbehandlung.....	117
6.2.2	Physikalische Lichtbogenphänomene	121
6.2.3	Elektrische modellbasierte Lichtbogen-Diagnose.....	125
7	VALIDIERUNG UND UNTERSUCHUNG DER LICHTBOGEN-DIAGNOSEMETHODE	131
7.1	Vorbereitung des Diagnosemodells und Beschreibung des Vorgehens	132
7.2	Validierung der Diagnosemethode und Simulation des Szenarios	133

7.3 Grenzen des Verfahrens.....	141
7.3.1 Mess- bzw. Modellungenauigkeit und Fehlerort	141
7.3.2 Zeitliche Performance	142
7.3.3 Transiente Vorgänge.....	143
8 ZUSAMMENFASSUNG.....	145
LITERATURVERZEICHNIS	151
ANHANG.....	163
Anhang A: Sicherungsparameter (VDA).....	163
Anhang B: Implementierung des Lichtbogenmodells.....	172
Anhang C: Herleitung der analytischen Beschreibung des Einschwingvorgangs des seriellen Lichtbogenstroms.....	175
Anhang D: Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	178
Veröffentlichungen und Vorträge.....	178
Studentische Arbeiten	179
Patente.....	180

Abkürzungsverzeichnis

ASIL	- Automotive Safety Integration Level
ALVE	- Ayrton Low Voltage Erweiterung (Extension)
BEV	- Battery Electric Vehicle
BN	- Bordnetz
CO ₂	- Kohlenstoffdioxid
DC	- Direct Current
DoD	- Depth of Discharge
DSC	- Dynamic Stability Control
DSK	- Doppelschichtkondensator
EMV	- Elektromagnetische Verträglichkeit
EPS	- Electronic Power Steering
GUI	- Graphical User Interface
HEV	- Hybrid Electric Vehicle
HV	- Hochvolt
ICE	- Internal Combustion Engine
Kfz	- Kraftfahrzeug
LB	- Lichtbogen
LED	- Light Emitting Diode
LFP	- Lithium-Eisen-Phosphat
Li-Ion	- Lithium-Ionen
LTO	- Lithiumtitanoxid
MNA	- Modified Nodal Analysis
NiMH	- Nickel-Metallhydrid
NMC	- Nickel-Mangan-Cobalt
PVC	- Polyvinylchlorid
PV	- Photovoltaik
PWM	- Pulse Width Modulation
SOC	- State of Charge
SoD	- State of Discharge
SoF	- State of Function
SoH	- State of Health
TDR	- Time Domain Reflectometry
µC	- Mikrocontroller
VDA	- Verband der Automobilindustrie

1 Einleitung

1.1 Motivation

Ein wichtiger Trend in der Automobilindustrie ist die allgemeine Elektrifizierung. Zum einen erfolgt die Elektrifizierung des Antriebstrangs (Elektromobilität). Die hier verwendeten Komponenten, z.B. elektrische Antriebsmaschinen, werden meist mit hohen Spannungen (HV) versorgt [1]. Elektrifizierung kann weiterhin bedeuten, dass neue Funktionen, oft mit neuen Steuergeräten, Einzug in das Bordnetz halten, oder ehemals mechanische Komponenten durch elektrische ersetzt werden [2], [3], [4]. Diese neuen Komponenten sind in der großen Mehrheit im 12 V und 48 V Bordnetz zu finden [5]. Zum Beispiel führt das autonome/automatisierte Fahren zu einer stark erhöhten Anzahl an Sensorik zur Umfelderkennung [6]. Klima- oder Wasserpumpen können ebenfalls als Beispiel für Verbraucher mit höheren Leistungen im Niederspannungsbordnetz (12 V und 48 V) genannt werden [7]. Auch der Einzug völlig neuer Aktuatoren belastet das Bordnetz zusätzlich. Hier sind z.B. die Wankstabilisierung oder kleinere, den Hauptantrieb ergänzende, elektrische Antriebsmaschinen mit Leistungen im unteren zweistelligen Kilowattbereich zu nennen. Während auf der Hochvolt-Ebene hauptsächlich eine Antriebsbatterie und der Antriebsmotor selber zu finden sind [8], entwickeln sich das 12 V und 48 V Bordnetz je nach Modell und Ausstattung zu hochkomplexen und hochvernetzten Strukturen [9]. Welche Verbraucher hierbei aufgrund von z.B. Bordnetzdimensionierungs-, Stabilitäts- oder Leistungsanforderungen auf der 12 V oder der 48 V Ebene zu finden sein werden, ist noch nicht abschließend für jeden Verbraucher geklärt, bzw. hängt vom jeweiligen Bedarf und der individuellen Umsetzung ab. Es wird in Zukunft also voraussichtlich die stark vernetzten und komplexen 12 V und 48 V Spannungsebenen, sowie das Hochvolt-Bordnetz geben.

Die Hochvolt-Ebene muss aufgrund der großen Gefahr für den Menschen hohe Anforderungen an z.B. Berührungsschutz erfüllen. Diesen Anforderungen kann z.B. mit Maßnahmen begegnet werden, die auch die mechanische Festigkeit erhöhen, wie z.B. Kabelschirme. Auch aktive Sicherheitseinrichtungen können verwendet werden, bzw. ist die Beobachtung des Zustands des Hochvolt-Bordnetzes mit dem gezielten Einsatz spezieller Messtechnik aufgrund der nur geringen Anzahl an Komponenten möglich [10]. Auf der anderen Seite liegen die Betriebsspannungen des 12 V und 48 V Bordnetzes unterhalb der Schutzkleinspannungsgrenze [11]. Der fehlende Bedarf an Berührungsschutz führt zusätzlich eher zur Verwendung günstigerer und einfacherer Verkabelungskomponenten. Diese Bedingungen, zusammen mit der hohen Anzahl an Komponenten und der großen Komplexität/Vernetzung können zu einer erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeit führen. Bereits in den letzten Jahren war ein signifikanter Anteil aller

Pannen auf Fehler in der allgemeinen Elektrik, bzw. sogar speziell der Verkabelung, zurückzuführen (siehe Tabelle 1). Und auf Basis der beschriebenen Entwicklungen ist zu erwarten, dass dieser Anteil noch weiter zunimmt.

Tabelle 1: Auszug aus ADAC-Pannenstatistik aus den jeweiligen Jahren 2010 - 2019. „?“: nicht explizit ausgewiesene Werte [12].

Jahr	Kabel/Verkabelung	Beleuchtung	Anlasser	Generator	Batterie	Σ
2010	2,9%		39,4%			42,3%
2011	3,5%		37,7%			41,2%
2012	?		4,6%	4,1%	31,7%	40,4%+?
2013	?		4,6%	4,1%	33,1%	41,8%+?
2014	?	46,0%				46,0%+?
2015	11,9%				35,7%	47,6%
2016	10,8%				39,0%	49,8%
2017	10,2%				39,9%	50,1%
2018	10,1%				42,0%	52,2%
2019	10,6%				41,8%	52,4%

Die Relevanz der 48 V Ebene ist in den letzten Jahren stetig angestiegen. Die leistungstechnischen Möglichkeiten bei geringeren Kabelquerschnitten und gleichzeitig immer noch vernachlässigbaren Gefahren bei Berührung für den Menschen zeigen die Überlegenheit gegenüber der 12 V Ebene. Auch verschiedene Vorhersagen für den Marktanteil gehen bei variierenden Szenarien/Annahmen immer von einer stark steigenden Marktdurchdringung aus [13].

Die neu aufkommenden Steuergeräte in Zusammenhang mit den genannten Trends, vor allem aber mit Funktionen im Bereich des autonomen oder automatisierten Fahrens, bringen gleichzeitig hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit mit sich [14]. Während der Ausfall z.B. des Radios zwar vermieden werden muss, aber keine unmittelbare Gefahr für die Insassen erzeugt, kann der Ausfall eines Rechners zur Trajektorienberechnung für das Fahrzeug direkt zu einem schweren Unfall mit Personenschäden führen. Dieser Zielkonflikt wird in Abbildung 1.1 noch einmal bildlich verdeutlicht.

Insgesamt lässt sich also zusammenfassen, dass durch den steigenden Elektrifizierungs- bzw. Elektronikanteil in Fahrzeugen die allgemeine Komplexität der elektrischen Netzwerke, besonders auch des 12 V- und 48 V-Energiebordnetzes, stark anwächst. Diese Entwicklung führt ohne zusätzliche Maßnahmen zu einer ansteigenden Fehlerwahrscheinlichkeit in der Energieversorgung. Gleichzeitig fordern alle neuen

Teilsysteme, beispielsweise besonders Funktionen des autonomen bzw. automatisierten Fahrens, eine extrem hohe Fehlertoleranz bzw. Systemverfügbarkeit.

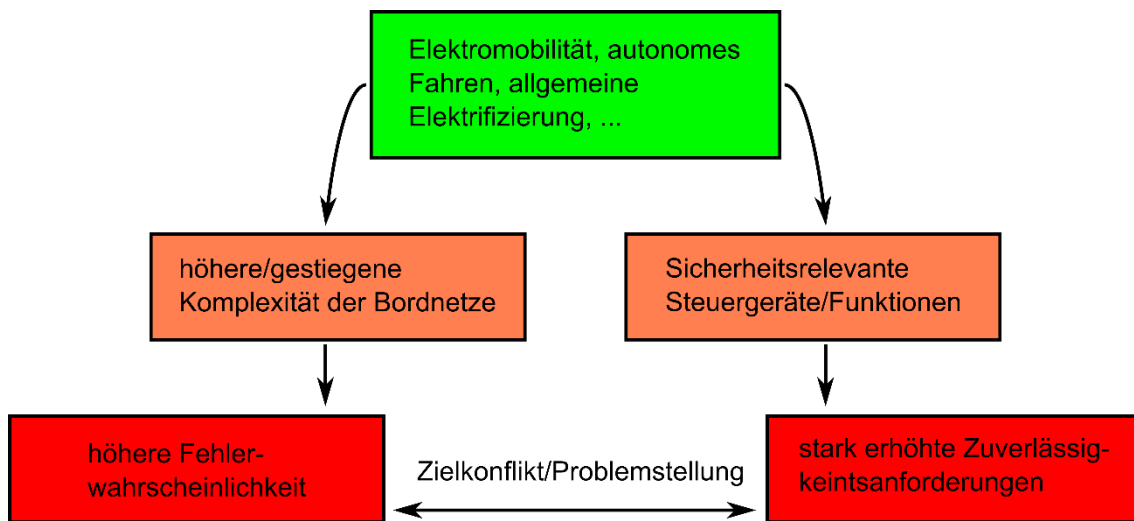


Abbildung 1.1: Darstellung des Zielkonflikts, der durch heutige Entwicklungen entstehen kann.

Das Fahrzeug muss auch bei aufgetretenen Fehlern im Energiebordnetz weiterhin funktionstüchtig bleiben und es darf zu keinem Zeitpunkt zu einer Gefährdung der Insassen oder anderer Verkehrsteilnehmer kommen. Ein Übergang von fail-safe zu fail-operational wird also angestrebt [15].

Diesem Zielkonflikt kann mit verschiedenen Maßnahmen begegnet werden. Um in Fehlerfällen die richtigen Maßnahmen treffen zu können, ist eine genaue Kenntnis des Zustands des Energieversorgungsnetzes essenziell. Um dieses Ziel zu erreichen, kann die Entwicklung und Implementierung von robusten und zuverlässigen Diagnosekonzepten für Energieversorgungsnetze einen besonderen Stützpfeiler darstellen.

Während die Verkabelungsfehler sich auf der 12 V Ebene auf Kurzschlüsse, Leitungsbrüche und verschiedene Alterungserscheinungen begrenzen, müssen bei der 48 V Ebene außerdem zusätzlich Lichtbogenfehler betrachtet werden. Diese Lichtbogenfehler können bei einem Kurzschluss gegen Masse als paralleler Lichtbogenfehler oder in Verbindung mit einem Leitungsbruch entlang der Leitung als serieller Lichtbogenfehler auftreten. Aufgrund ihrer extremen Hitze können Lichtbögen ein Brandrisiko darstellen. Lichtbogenfehler, sowie deren Auswirkungen und Detektionsverfahren gelten allgemein als bislang noch unzureichend untersucht. Weiterhin ist eine Detektion mit herkömmlichen Mitteln nicht immer möglich oder mit enormen Mehrkosten verbunden, wie im Laufe der Arbeit ausführlich dargestellt wird.

Aus all diesen Gründen beschäftigt sich diese Arbeit mit der modellbasierten Analyse und Diagnose von Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen.

1.2 Ziele der Arbeit

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der modellbasierten Analyse und Diagnose von Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen. Der Lichtbogen wird im Verlaufe der Arbeit als Bindeglied zwischen dem Kurzschluss und Leitungsbruch dargestellt. Unter anderem soll in dieser Arbeit die folgende Forschungsfrage diskutiert und beantwortet werden:

- Welche Möglichkeiten gibt es, Lichtbogenfehler und deren Ursache, sowie zusammenhängende Fehlerbilder (Kurzschluss, Leitungsbruch), in verschiedenen 48 V Bordnetzen zu erkennen, zu identifizieren, zu lokalisieren und zu kontrollieren?

Daraus ergeben sich weitere Fragestellungen:

- Wie können vereinfachte aber aussagekräftige 48 V Teilbordnetze definiert werden, deren Lichtbogenanalyse und -diagnose einfach auf komplexere Strukturen erweitert werden kann, und wie können diese für Lichtbogensimulationen modelliert werden?
- Was sind die Eigenschaften von Lichtbögen in 48 V Energiebordnetzen und wie ist der Zusammenhang mit Kurzschlüssen und Leitungsbrüchen?
- Welcher Modellierungsansatz für Lichtbögen ist besonders für Simulationen in 48 V Kfz-Bordnetzen geeignet?
- Welche Maßnahmen können in der Bordnetzauslegung getroffen werden, um das Risiko von Beschädigungen durch Lichtbogenfehler zu minimieren?
- Welche Anforderungen müssen robuste Lichtbogen-Diagnosekonzepte erfüllen?

1.3 Gliederung

Zunächst werden die aktuellen Rahmenbedingungen von Kfz-Bordnetzkomponenten und deren Energieversorgung beschrieben. Hierbei wird ein Überblick über die auf der Niedervolt-Ebene häufig vorkommenden Verbraucher und deren Funktion gegeben. Weiterhin werden die Energieverkabelung und die dort auftretenden Fehler, vor allem der Lichtbogen in 48 V Systemen, beschrieben. Anschließend werden auf Grundlage verschiedener Topologien bzw. Architekturen beispielhaft relevante Basistopologien für die 48 V Ebene definiert, die für weiterführende skalierbare Analysen herangezogen werden können.

Um die Auswirkungen und deren Schwere (bzw. die Symptome) bei Lichtbögen beschreiben zu können, wird eine modellbasierte Untersuchung vorgestellt. Hierzu werden zunächst die definierten Basistopologien mit einem angemessenen Abstraktionslevel modelliert. Anschließend werden verschiedene Lichtbogenmodelle analysiert und das geeignetste ausgewählt, um hierauf aufbauend eine neue Erweiterung vorzustellen. Diese wird anhand von Messungen mit einem Lichtbogenprüfstand systematisch parametrisiert und validiert. Ein Vergleich zu einem viel verwendeten Ansatz und der Abgleich mit den zuvor definierten Anforderungen verdeutlichen die Überlegenheit des neuen Modells.

Weiterführend wird die Anwendung des Lichtbogenmodells im Hinblick auf die Unterdrückung von seriellen Lichtbögen durch eine gezielte Bordnetzauslegung und der Energieanalyse von seriellen und parallelen Lichtbögen vorgestellt. Die Möglichkeit der Unterdrückung von seriellen Lichtbögen soll im darauffolgenden Teil der Arbeit von einer Lichtbogen-Diagnose unterstützt werden. Außerdem wird die Detektion von parallelen Lichtbögen detailliert beschrieben. Grundsätzlich sind sehr unterschiedliche Diagnoseverfahren denkbar. Es wird zunächst ein allgemeiner Diagnoseprozess beschrieben. Weiterhin wird ein systematischer Überblick über Auswahlkriterien für die Datenerfassung und Diagnoseverfahren bzw. Analysemethoden vorgestellt. Da der Fokus dieser Arbeit auf Lichtbögen liegt, werden zunächst Lichtbogenphänomene anhand von bekannten Lichtbogendetektionsverfahren vorgestellt und diskutiert. Anschließend wird eine neue modellbasierte Diagnosemethode vorgestellt. Abschließend wird exemplarisch gezeigt, wie Lichtbogenfehler mit der dargestellten modellbasierten Methode in dem definierten Teilbordnetz detektiert und identifiziert werden können. Diese Methode wird an einem Laboraufbau validiert. Die Nachbildung des Versuchs in der Simulation mittels des neuen Lichtbogenmodells stellt die Möglichkeit bereit, den Algorithmus zu untersuchen und seine Grenzen aufzuzeigen. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung.

2 Rahmenbedingungen von Kfz-Energiebordnetzen

Heutige Kfz-Energiebordnetze sind von einer großen Varianz geprägt [16]. Individuelle Untersuchungen für jeden kundenspezifischen Kabelbaum durchzuführen, ist kaum möglich und wenig sinnvoll. Deswegen werden, nach einer allgemeinen Übersicht über Kfz-Bordnetze und verschiedene Architekturen, 48 V Basistopologien definiert, welche dann als einheitliche Untersuchungsobjekte dienen. Zunächst werden hierfür Bordnetzkomponenten beschrieben. Es wird zwischen Bordnetzabschlüssen, nämlich Energiespeichern, -erzeugern und -verbrauchern, sowie Kabelbaum-/Verkabelungselementen und DC/DC-Wandlern unterschieden. Anschließend wird ein systematischer Überblick über mögliche Verkabelungsfehler gegeben.

2.1 Kfz-Energiebordnetzkomponenten und Verkabelungsfehler

Die in heutigen Kfz zu findenden Energiebordnetzkomponenten können im Wesentlichen in die folgenden Untergruppen kategorisiert werden: Energiespeicher, Energieerzeuger, Energieverbraucher und das Verkabelungssystem, sowie Wandler und Verteiler. Abbildung 2.1 beschreibt die hier vorgenommene systematische Darstellung, die im darauffolgenden Text konkretisiert wird. Das Verhalten und die Leistungsfähigkeit jeder dieser Komponenten kann durch verschiedene Eigenschaften beschrieben werden. Welche Anforderungen diese jeweiligen Eigenschaften erfüllen müssen, hängt oft vom individuellen Gesamtkonzept des Fahrzeugs ab.

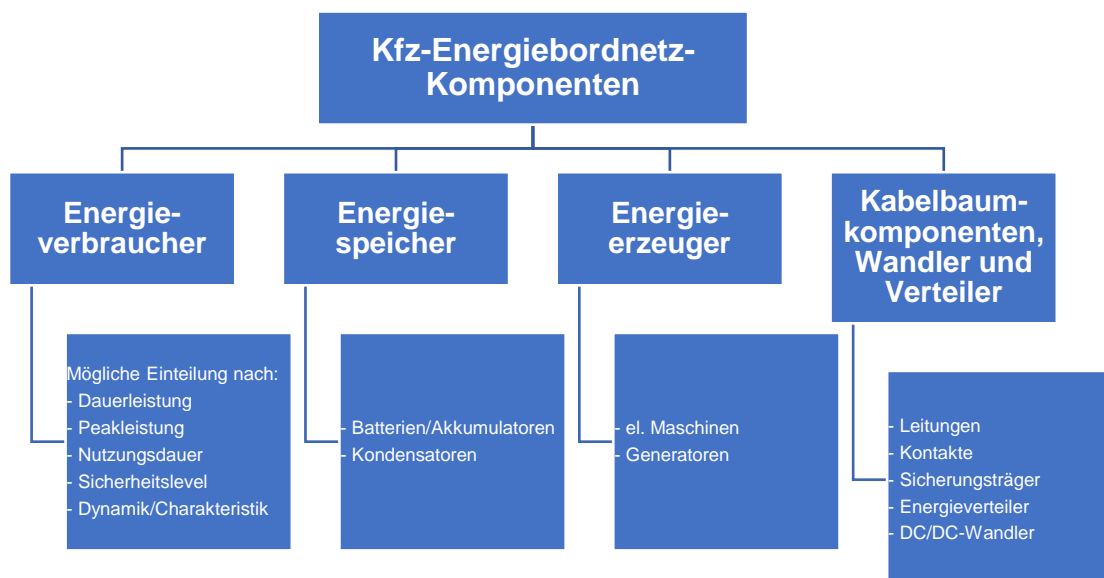


Abbildung 2.1: Überblick über Kfz-Energiebordnetze und wichtige Komponenten(-einteilungen).

2.1.1 Energiespeicher

Energiespeicher speichern elektrische Energie und geben diese bei Bedarf ab. In dieser Kategorie sind vor allem verschiedene Arten von Akkumulatoren (im Kfz-Bereich auch Batterien genannt) zu finden. In verschiedenen Anwendungen können auch Supercaps oder Doppelschichtkondensatoren (DSK) [17] zum Einsatz kommen. Die wichtigsten Eigenschaften der Energiespeicher, die bei einer Dimensionierung bzw. Neuentwicklung wichtig sein können, sind folgende [18], [19]:

- Ladungsmenge bzw. Kapazität
- Leistungsdichte und Energiedichte
- Gewicht/Volumen
- Kosten
- Lebensdauer (bezogen auf zyklische und kalendarische Alterung)
- Sicherheit/Zuverlässigkeit/Diagnosefähigkeit
- Selbstentladung
- Ladeakzeptanz/Eingangsimpedanz
- Spannungsebene (z.B. 12 V, 48 V, HV)

Andere wichtige Eigenschaften müssen während des Betriebs von einem Managementsystem (allgemein: Steuergerät) mittels geeigneter Messtechnik (z.B. Strom-, Spannungs- und Temperaturmessung) beobachtet und gegebenenfalls limitiert werden. Weiterhin verfügt ein solches Steuergerät sehr häufig über einen Bus-Anschluss, um z.B. mit dem Generator oder anderen relevanten Bordnetzteilnehmern die energietechnische Strategie abzustimmen. Die zumeist während des Betriebs überwachten und beeinflussten Größen sind [20]:

- State of Charge (SoC)
- State of Health (SoH)
- State of Function (SoF)
- Temperatur

Welche genauen Anforderungen diese Eigenschaften erfüllen müssen, hängt sehr stark von der individuellen Konfiguration ab. Die klassischste Form des Energiespeichers in Kfz-Bordnetzen bildet die 12 V Blei-Säure-Batterie, welche in ICE¹-Fahrzeugen auch Starterbatterie genannt wird. Diese dient hauptsächlich der Sicherstellung des Motorstarts, sowie der Versorgung der Verbraucher bei Motorstillstand, bzw. Unterversorgung durch den Generator, und der generellen Bordnetzstabilisierung [21].

¹ ICE – Internal Combustion Engine

Die vorhandene Energiemenge (SoC) muss also immer ausreichen, um den Verbrennungsmotor starten zu können. Die Leistung, die abgegeben werden kann (SoF), muss ebenfalls stets ausreichen, um den Motor starten zu können. Eine weitere Form von Energiespeicher sind Hochvolt-Traktionsbatterien in Elektrofahrzeugen. Durch eine Verschaltung einzelner Batteriezellen kommen hier hohe Spannungen von einigen hundert Volt für ein Batterie-Pack zusammen. Diese Batterien werden hauptsächlich für die Antriebseinheit verwendet. Geladen werden sie oft durch Rekuperation und an Ladesäulen. Auch für die 48 V Ebene werden Batterien benötigt und eingesetzt. Die Einsatzzwecke sind vielfältig. Sie werden beispielsweise für die Versorgung kleinerer Antriebsmaschinen (zweistelliger Kilowattbereich) oder anderer Hochleistungsverbraucher verwendet.

Die oben genannten Eigenschaften können durch verschiedene konstruktive Maßnahmen beeinflusst werden. Diese sind z.B.:

- Zellform
- Zellchemie
- Kühlungsart
- Zellverschaltung
- weitere zellinterne Dimensionierungen

In Konfigurationen, bei denen z.B. eine hohe Leistungsfähigkeit und Ladeakzeptanz nötig sind, werden bevorzugt Supercaps oder Doppelschichtkondensatoren eingesetzt. Dies kann bei optimierter Rekuperation der Fall sein [22].

2.1.2 Energieerzeuger/elektrische Maschinen

Unter Energieerzeugern werden hauptsächlich Generatoren bzw. elektrische Maschinen im Zusammenspiel mit Gleich- bzw. Umrichtern gefasst. Diese nehmen eine zentrale Rolle in modernen Kfz-Energiebordnetzen ein. Daher werden deren Eigenschaften im Folgenden kurz erläutert.

Generatoren dienen dazu, die Energiespeicher zu laden und die Bordnetzverbraucher zu versorgen. Die Spannung ist daher in Grenzen, z.B. abhängig vom Fahrscenario oder Speicherzustand, regelbar. In modernen Konfigurationen, besonders auf der 48 V-Ebene, können diese elektrischen Maschinen gleichzeitig als Starter genutzt oder für Boost-, Rekuperation- oder Segelfunktionalitäten in den Antriebsstrang integriert werden. In ICE-Fahrzeugen wird so der Verbrennungsmotor unterstützt oder kurzzeitig vollständig ersetzt [23]. Dieses Verfahren erlaubt CO₂-Einsparungen. Aktuell werden verschiedene mechanische Topologien untersucht, welche mit P0, P1, usw. benannt werden (siehe Abbildung 2.2 für einige beispielhafte Integrationsmöglichkei-

ten). Die Topologien geben Auskunft darüber, an welcher Stelle und wie (Riemen, Direktantrieb) die elektrische Maschine an den Antriebsstrang gekoppelt sein kann. Jede dieser mechanischen Topologien hat Vor- und Nachteile bezüglich der maximalen Leistung, des Verschleißes oder der Nutzungsmöglichkeiten der elektrischen Maschine [23].

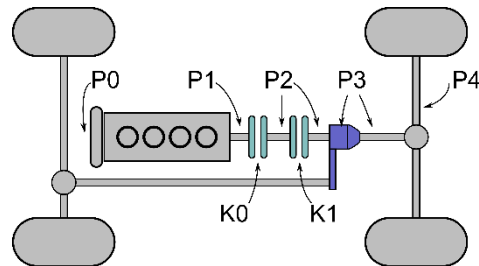


Abbildung 2.2: Mechanische Topologien/Architekturen für elektrische Maschinen (Micro/Mild-Hybrid), vorrangig in 48 V Energiebordnetzen. P: Position, K: Kuppelung.

Auch vollelektrische Fahrzeuge auf Basis der 48 V Technologie sind denkbar und werden teilweise bereits umgesetzt. Bereits entwickelte elektrische Maschinen hierfür sind z.B. in [24] zu finden.

Im Allgemeinen werden die genannten elektrischen Maschinen über einen Umrichter an das Bordnetz angeschlossen. So kann zum einen die Maschine bei Bedarf angetrieben werden, zum anderen kann sie Energie in das Energiebordnetz einspeisen. Aufgrund der Regelungs- sowie der Monitoring-Anforderungen des eigenen elektrischen Verhaltens sind häufig Strom- und Spannungssensoren in den Umrichter integriert. Weiterhin ist ein Busanschluss nötig, damit energietechnische Szenarien beispielsweise mit dem Batterie- oder Bordnetzmanagement abgestimmt werden können.

2.1.3 Energieverbraucher

Die Anzahl der möglichen Energieverbraucher in modernen Kfz-Bordnetzen ist enorm groß. Aufgrund dieser Vielfältigkeit gibt es verschiedene Klassifikationsmöglichkeiten für Energieverbraucher.

Dauer-/Peakleistung/Dynamik

Der Leistungsbedarf schwankt stark bei unterschiedlichen Verbrauchern. Während manche Verbraucher, wie z.B. Beleuchtungselemente/LEDs zur Innenraumbeleuchtung, maximal nur wenige Watt benötigen, können andere Verbraucher, wie z.B. elektrische Antriebsmaschinen oder Klimapumpen, mehrere Kilowatt benötigen.

Weiterhin kann ebenfalls eine Unterscheidung aufgrund der Dynamik bzw. der Charakteristik der Leistungsaufnahme durchgeführt werden. Neben hochdynamischen Verbrauchern, wie z.B. EPS (Electric Power Steering) [4] oder DSC (Dynamic Stability Control), deren Konsumverhalten sogar deutlich größere Dynamik aufweist als die Regelmöglichkeit des Generators [25], verhalten sich andere Aktuatoren, wie beispielsweise verschiedene Heizelemente, eher konstant und können lediglich beim Zu- oder Abschalten dynamische Auswirkungen auf das Bordnetz haben.

Nutzungsdauer

Wenn man die Nutzungsdauer der Verbraucher betrachtet, wird häufig zwischen Kurzzeit-, Langzeit- und Dauerverbrauchern unterschieden. Während beispielsweise Bremsleuchten zu Kurzzeitverbrauchern zählen, können Scheinwerfer oder das Radio zu Langzeitverbrauchern gezählt werden. Verbraucher bzw. Steuergeräte, wie z.B. das Motorsteuergerät oder Multi-Domain-Controller/Rechnerplattformen für das autonome Fahren, sind während der gesamten Fahrdauer aktiv und zählen deswegen zu Dauerverbrauchern.

Sicherheitslevel/Priorität für Energiemanagementfunktionen/Funktionale Sicherheit

Steuergeräte können verschiedenen Sicherheitsleveln (ISO 26262) zugeordnet werden. Je nach Häufigkeit der Fahrsituation, Schwere des möglichen Schadens und der Beherrschbarkeit durch den Fahrer können Steuergeräte gemäß Kriterien der Funktionalen Sicherheit in ASIL (Automotive Safety Integration Level) eingeteilt werden (QM, A, B, C, D), wobei „QM“ die niedrigste Sicherheitsstufe und „ASIL D“ die höchste, also sicherheitsrelevanteste Stufe ist. Weniger kritische Steuergeräte und Aktuatoren, wie z.B. der Fensterheber, haben hierbei ein niedriges ASIL, andere Steuergeräte und Aktuatoren, wie z.B. die elektrische Lenkung, haben ein hohes ASIL. Eine Information über die Priorität kann ebenfalls dazu genutzt werden, Verbraucher mit niedriger Priorität bei Energie-/Leistungsengpässen abzuschalten, um eine für sicherheitskritische Steuergeräte ausreichende Bordnetzstabilität zu gewährleisten.

Sonstiges Verhalten/Weiter Eigenschaften

Aufgrund hoher Anforderungen an die Eigendiagnose beinhalten sehr viele Steuergeräte Strom- und Spannungssensoren, um das eigene und das Verhalten der Verbraucher bzw. Aktuatoren zu überwachen und bewerten zu können. Weiterhin ist eine Kommunikation über Bus-Systeme nötig, um z.B. Steuer- oder Sensorinformationen zu empfangen und zu senden. Eine weitere Gemeinsamkeit nahezu aller Steuergeräte ist die ähnliche Eingangskapazität. Hier sind in 48 V Kfz-Bordnetzen sehr häufig Elekt-

rolytkondensatoren im dreistelligen Mikrofarad-Bereich zu finden. Diese dienen hauptsächlich der Spannungsstabilisierung. Weiterhin haben Steuergeräte gewisse Anforderungen an die Versorgungsspannung. Sie führen einen Reset bei einer Unterspannung aus oder schalten ab. Diese Spannungsbereiche sind für 48 V Kfz-Bordnetze beispielsweise in der VDA 320 definiert. Sie sind in Abbildung 2.3 dargestellt.

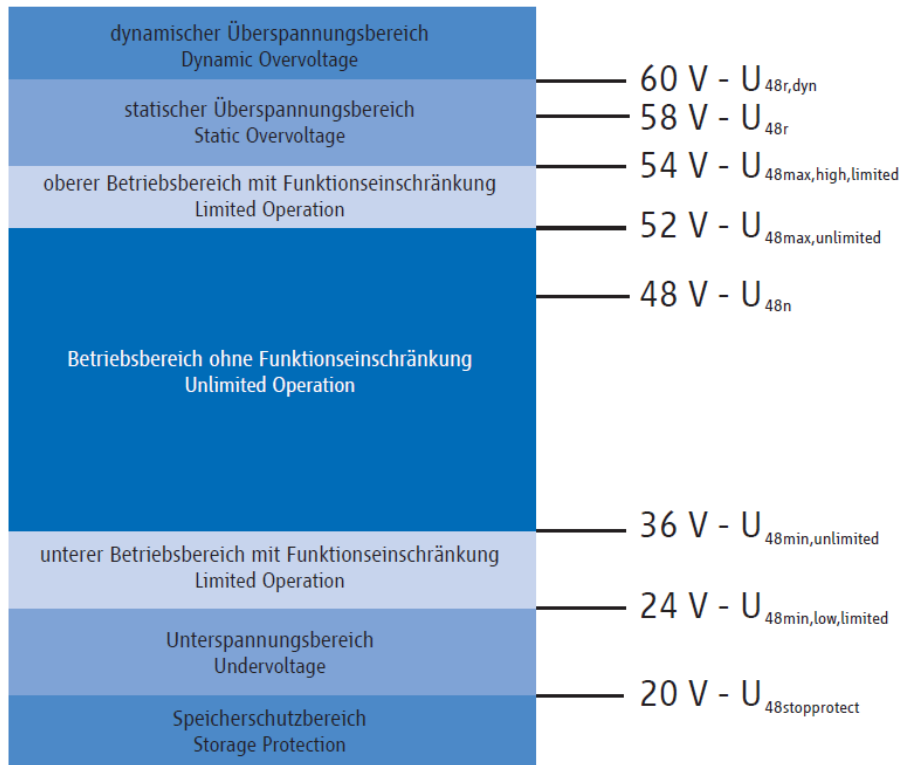


Abbildung 2.3: "Definitionen der Spannungsbereiche - Quelle: VDA 320, Stand Juli 2014" [3].

Eine Spannungsgrenze von 20 V markiert die unterste Grenze für die Aufrechterhaltung der reduzierten Funktion des Steuergeräts. Unterhalb von 36 V können bereits Funktionseinschränkungen entstehen.

2.1.4 Kabelbaumkomponenten und DC/DC-Wandler

Die zuvor erwähnten Abschlüsse des Bordnetzes, also Energiespeicher, Energieerzeuger und Energieverbraucher, werden über den Kabelbaum, bzw. das Energiebordnetz, miteinander verbunden. Die folgenden Unterkapitel geben jeweils einen kurzen Überblick über verschiedene Ausführungsformen, Möglichkeiten und Anforderungen der/an die jeweiligen Kabelbaumkomponenten. Da der Kabelbaum aus mehreren tausend Leitungen bestehen kann, die eine Gesamtlänge von mehreren Kilometern besitzen können, und zu den schwersten Einzelkomponenten im gesamten Kfz gehört

[16], kommt ihm eine besondere Bedeutung zu. Die gemeinsamen, allgemeinen Anforderungen aller Kabelbaumkomponenten sind: geringes Gewicht, geringe Kosten und geringes Volumen. Diese Anforderungen stehen oft im Konflikt mit den im Folgenden genannten individuellen Anforderungen und Eigenschaften, was eine optimale Dimensionierung erschweren kann.

Leitungen

Leitungen müssen so ausgelegt sein, dass sie zu keinem Zeitpunkt thermisch überlastet werden. Das kann z.B. durch Querschnitts- oder Materialanpassungen erfolgen. Typische Materialien in Energieleitungen im Kfz sind Kupfer und Aluminium. Typische Querschnitte für Energiekabel liegen bei weniger als $0,14 \text{ mm}^2$ [16] bis teilweise mehr als 70 mm^2 [26]. Typische Längen von Energieleitungen in Fahrzeugen liegen im Bereich von einigen Zentimetern bis zu mehreren Metern. Der begrenzende Faktor für eine thermische Überlast ist die Isolation. Hier kommen einerseits einfache Werkstoffe, wie PVC zum Tragen, sowie andererseits in besonders heißen Bereichen Silikonisolationen. Weiterhin darf ein zulässiger Spannungsabfall über dem Versorgungspfad von der Quelle bis zum Verbraucher nicht überschritten werden. Durch ihre Induktivität und Kapazität haben Leitungen auch einen Einfluss auf das dynamische Verhalten des Bordnetzes. Neben elektrischen können auch mechanische Anforderungen, wie z.B. minimale Biegeradien, an Leitungen gestellt werden. Zumeist wird die Karosserie als Masse, also als Rückleiter, verwendet.

Kontakte

Elektrische Kontakte kommen in Kfz-Bordnetzen sehr häufig vor. Diese Kontaktstellen lassen sich grundsätzlich in ruhende und bewegliche Kontakte einteilen [27], [28]. Eine weiterführende mögliche Klassifizierung für Kontakte ist in Abbildung 2.4 dargestellt [27], [28].

Splice-Verbindungen (Pressverbindungen) [29] können einen Kontakt zwischen mehreren Leitungsenden herstellen. Crimpverbindungen (Pressverbindungen) [30] erzeugen z.B. einen Kontakt zwischen einem Leitungsende und einem Steckelement. Innerhalb von Steckverbindungen entsteht ein Kontakt zwischen dem Stecker und der Buchse. Über Schraubverbindungen an z.B. Massebolzen wird ein Kontakt zwischen einem Kabel bzw. einem Kabelschuh und der Fahrzeugkarosserie/Masse hergestellt. Die relevantesten Kontaktmaterialien in energietechnischen Kfz-Anwendungen sind Kupfer, Silber und Gold und verschiedene Legierungen mit speziellen Beschichtungen [31]. Wie Leitungen, müssen auch Kontakte individuelle Anforderungen bezüglich thermischer Belastung und einem maximal zulässigen Spannungsabfall erfüllen [32].

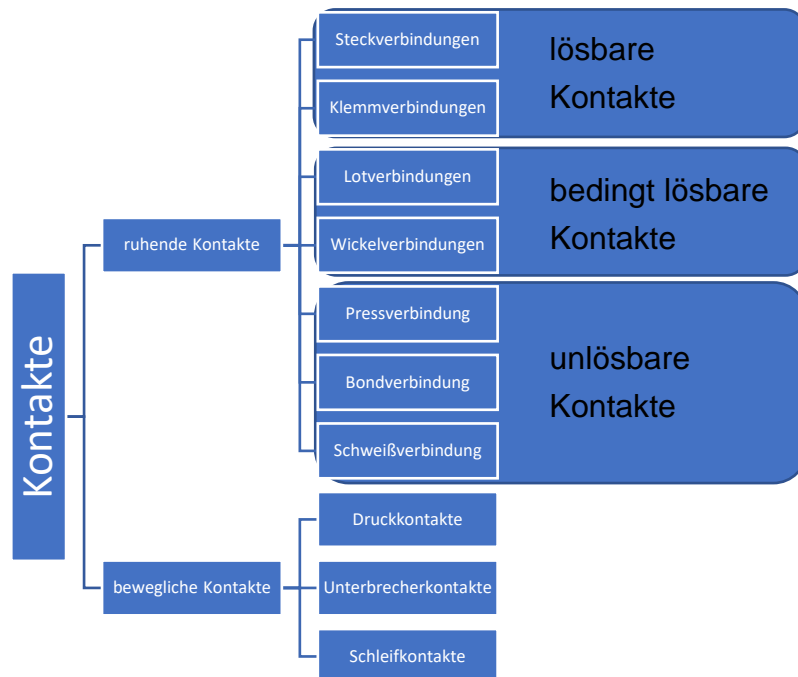


Abbildung 2.4: Mögliche Klassifizierung von Kontakten [27], [28].

Sicherungsträger und Energieverteilerboxen

Größere und zentrale Verbindungsknoten in Kfz Energiebordnetzen werden häufig in Form von Sicherungsträgern bzw. Energieverteilerboxen ausgeführt [9]. Hierbei besteht die Hauptaufgabe meistens darin, eine ankommende Versorgungsleitung in mehrere Leitungen aufzuteilen, um verschiedene Verbraucher zu versorgen. Weitere Elemente solcher Sicherungsträger sind Sicherungselemente. Die etablierte, klassische Lösung ist die Schmelzsicherung. Auch Relais können Bestandteil solcher Energieverteilerboxen sein. In modernen Kfz kommen immer häufiger Halbleiterschalter zum Einsatz, die ebenfalls mit entsprechender Messtechnik und Mikrocontrollersteuerungen zu intelligenten Sicherungen erweitert werden können [33]. Anbindungen an Bus-Systeme können die Integration in eine übergeordnete Steuerung zulassen, sodass der Schalter nicht nur zum Leitungsschutz, sondern auch verschiedene erweiterte Aufgaben übernehmen kann. So können in eine Schaltentscheidung mehr Informationen fließen als nur der Zustand der angeschlossenen Leitung (weitere Sensorinformationen, Messungen, Schaltbefehle von übergeordnetem Steuergerät wegen z.B. Fehlerisolation).

DC/DC-Wandler

DC/DC-Wandler dienen in Kfz-Bordnetzen zumeist der Spannungstransformation von einer zu einer anderen Spannungsebene, wobei der Leistungsfluss uni- oder bidirektional sein kann. Auch primär- und sekundärseitig identische Spannungen sind möglich, wobei der Wandler dann vorrangig als Entkopplungselement aus z.B. Stabilitätsgründen genutzt wird [25]. Zusätzlich ist der Einsatz in Steuergeräten möglich, die bordnetzseitig zwar mit z.B. 12 V oder 48 V versorgt werden, intern jedoch z.B. die Versorgungs- und Logiklevel 5 V oder 3,3 V benötigen. Als Bestandteil des Energiebordnetzes werden DC/DC-Wandler verwendet, um die 12 V-, 48 V- und Hochvolt-Ebene miteinander zu verbinden. Theoretisch sind hierbei beliebige Kombinationen möglich, was später in Kapitel 2.2.3 dargestellt wird. Zentrale Eigenschaften von DC/DC-Wandler sind der Wirkungsgrad und der maximale Leistungsfluss.

2.1.5 Fehler in der Energieverkabelung

Zufällige Fehler können jederzeit und überall im Verkabelungssystem auftreten. Grundsätzlich können Fehler in serielle und parallele Fehler eingeteilt werden. Serielle Fehler treten in Reihe zur Quelle bzw. zur Senke auf, parallele Fehler treten parallel zur Quelle bzw. zur Senke auf. Eine allgemeine Darstellung ist in Abbildung 2.5 abgebildet. Parallele Fehler können gegen Masse, wie dargestellt, jedoch grundsätzlich auch gegen ein anderes Potential auftreten, z.B. zwischen 12 V und 48 V.

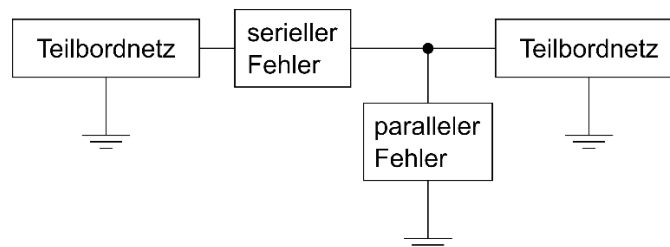


Abbildung 2.5: Unterteilung von seriellen und parallelen Fehlern in der Verkabelung.

Weiterhin können Fehler als sprunghaft auftretend und schleichend entstehende Fehler klassifiziert werden. Während sprunghaft auftretende Fehler schlagartig auftreten, erzeugen schleichende Fehler nur langsame Veränderungen, die ggf. langfristig zu einer Gefahr werden können. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die möglichen Fehlerarten. In den hier betrachteten 48 V Bordnetzen kann jeder der dargestellten Fehler direkt oder mittelbar mit dem Lichtbogenfehler zusammenhängen.

Tabelle 2: Mögliche Einteilung von Fehlern im Energiebordnetz.

	Serielle Fehler	Parallele Fehler
Schleichend entstehende Fehler (kann zu Lichtbögen führen)	Kontaktalterung, Kontaktverschleiß, Korrosion	Isolationsermüdung, Isolationsalterung, Kriechströme gegen Masse/schleichender Kurzschluss, Isolationsbeschädigung
Sprunghaft auftretende Fehler (Lichtbogen)	Lichtbogen im Zuge der Leitung/an Kontakten (serieller Lichtbogen)	Lichtbogen gegen Masse/gegen anderes Potential (paralleler Lichtbogen)
Sprunghaft auftretende Fehler (kann in Zusammenhang mit Lichtbögen auftreten)	Kontaktabriss, Leitungsbruch, unbeabsichtigtes Öffnen einer Steckverbindung	Kurzschluss gegen Masse/gegen anderes Potential

Durch verschiedene Umwelteinflüsse, z.B. wechselnde Temperaturen, Wasser, Vibrationen, usw. können Steckverbinder altern bzw. korrodieren. Dieser Effekt kann die Funktionalität herabsetzen, bzw. den Übergangswiderstand erhöhen und den Isolationswiderstand verringern. Bei Kontaktverlust eines Steckverbinders oder bei Kabelbrüchen können unter bestimmten Voraussetzungen serielle Lichtbögen entstehen. Nachdem der Lichtbogen abgerissen ist, geht der Fehler in den Kontaktabriss/Leitungsbruch, also hochohmigen Zustand, über. Bei beschädigten oder gealterten Kabelisolationen ist es grundsätzlich möglich, dass geringe Fehlerströme gegen Masse abfließen. Ist die Beschädigung so groß, dass eine niederohmige Verbindung zur Masse entsteht, können Kurzschlüsse und parallele Lichtbögen entstehen. Im Rahmen dieser Arbeit werden vorrangig die sprunghaft auftretenden Fehlertypen berücksichtigt und analysiert.

Jeder der genannten physikalischen Fehler hat bestimmte Auswirkungen auf das System (Energiebordnetz). Diese Auswirkungen können auch als Fehlersymptom bezeichnet werden. Sie können schließlich funktionale und somit sicherheitskritische Auswirkungen haben. Neben funktionalen Auswirkungen sind auch Brände bei Lichtbögen oder Kurzschlüssen möglich, die wiederum zu funktionalen Auswirkungen führen können.

Die zunächst relevantesten Symptome der genannten Fehler können elektrisch oder thermisch sein. Elektrische Auswirkungen spiegeln sich in einem Ausfall oder einer unzulässigen Veränderung der Spannung an einem Verbraucher durch z.B. unkontrollierte Spannungsabfälle wider. Auch unzulässig hohe Ströme können entstehen und so z.B. Quellen im Bordnetz überlasten. Dies kann bei unzureichenden Maßnahmen zum Ausfall von Einzelverbrauchern oder vollständiger Teilbordnetze führen. Gleichzeitig können hohe Überströme thermische Schäden an z.B. Leitungen verursachen. Lichtbogenfehler können direkt aufgrund ihrer großen Hitze ebenfalls Bordnetzkomponenten entzünden und so schnell weitere Schäden und weitere elektrische Fehler auslösen.

2.2 Beschreibung und Analyse von Bordnetzarchitekturen

Der Zusammenschluss der Einzelkomponenten in einer konkreten Topologie bildet das Energiebordnetz, bzw. die Energiebordnetzarchitektur. Die Auswahl und Auslegung der Komponenten und die Festlegung einer Topologie ist dabei variantenabhängig, auch heute werden teilweise noch kundenspezifische Kabelbäume entwickelt. Die Auswahl und Auslegung der Komponenten und die Festlegung einer Topologie folgen jedoch einigen Kriterien, die im Folgenden kurz genannt und beschrieben werden.

Die allgemeinen Forderungen nach geringen Kosten, geringem Gewicht und geringem Volumen treffen natürlich auch auf die Energiebordnetzarchitektur zu. Weiterhin müssen eine optimale Gewichtsverteilung und eine möglichst geringe Verlustleistungen angestrebt werden. Auch fertigungstechnische Kriterien, wie die Möglichkeit einer automatisierten oder standardisierten Fertigung, können bei der Architekturentwicklung wichtig sein. Im Konflikt mit einigen dieser Anforderungen stehen oft funktionale Kriterien, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

2.2.1 Funktionale Anforderungen an 48 V-Energiebordnetze

Eine wichtige Anforderung an Energieversorgungsnetze ist die Spannungsstabilität in allen Betriebszuständen [25], [34]. Sowohl transiente als auch eingeschwingene oder statische Spannungslevel an den Verbrauchern dürfen nicht unzulässig sein, es dürfen also keine unzulässigen Störungen auftreten. Einige standardisierte Versorgungsspannungsverläufe können in ISO 16750-2 für 12 V Bordnetze und in ISO 21780 für 48 V Bordnetze gefunden werden. Kritische transiente Szenarien sind hier z.B. große Lastsprünge von Hochleistungsverbrauchern. Auch die thermische Belastung der Leitungen und Kontaktelemente darf nicht unzulässig hoch sein. Die Sicherstellung

dieser Anforderung erfolgt durch eine Kombination aus entsprechender Komponentendimensionierung (Kabelquerschnitte, Leistungsfähigkeit der Batterie, ...), sowie einer angemessenen Steuerung/Betriebsstrategie seitens des Energiemanagements. Wenn beispielsweise zwei Verbraucher von einer gemeinsamen Versorgungsleitung versorgt werden, muss diese Leitung entweder so dimensioniert werden, dass auch bei gleichzeitigem Betrieb beider Verbraucher kein unzulässiger Spannungseinbruch oder -abfall auftritt. Oder das Energiemanagement steuert die Verbraucher so, dass nie beide gleichzeitig eingeschaltet sind. In diesem Fall könnte die Leitung grundsätzlich kleiner dimensioniert werden.

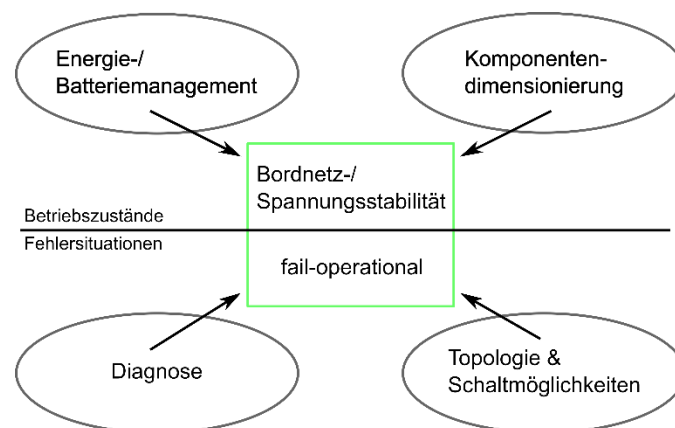


Abbildung 2.6: Anforderungen an Energiebordnetze und Möglichkeiten der Erfüllung.

Die zweite zentrale, besonders in Zusammenhang mit hochautomatisiertem oder sogar autonomem Fahren aufkommende Anforderung an Energiebordnetzarchitekturen betrifft den Umgang mit Fehlern im Leitungsnetz bzw. Steuergeräteausfällen. Auch im Fehlerfall muss sichergestellt sein, dass sicherheitsrelevante Funktionen weiterhin zuverlässig ausgeführt werden können. Diese Bordnetzeigenschaft nennt man fail-operational. Um ein fail-operational Energiebordnetz betreiben zu können, ist es zunächst sehr wichtig, aufgrund von Verschaltungen und möglichen Schalthandlungen kritische Fehler rückwirkungsfrei isolieren zu können. Weiterhin ist es nötig, mit einer Diagnose alle Fehler zuverlässig erkennen zu können, um im Fehlerfall entsprechende Schalthandlungen tätigen zu können. Besonders das Erkennen von Lichtbögen ist jedoch mit konventionellen Mitteln nicht immer eindeutig und zuverlässig. Eine kurze Übersicht über die genannten Anforderungen an Energiebordnetze und die Möglichkeit, diese Anforderungen zu erfüllen, ist in Abbildung 2.6 abgebildet.

2.2.2 Ausfallsicherheit/fail-operational

Besonders wichtig für das Design eines fail-operational Bordnetzes sind Redundanz und Diversität. Von Redundanz spricht man, wenn Systeme mehrfach vorhanden sind. So kann ein System bei Ausfall des anderen Systems die ausgefallene Funktion übernehmen. In Zusammenhang mit automatisierten Fahraufgaben kann z.B. ein zweiter Rechner zur Berechnung von Fahrmanövern nötig werden, um einen ersten Rechner bei Ausfall ersetzen zu können. Da sowohl Fehler innerhalb des Rechners als auch der Ausfall der Energieversorgung zum Ausfall der Funktion führen können, muss beides redundant ausgeführt werden. Dieses Konzept ist beispielhaft in Abbildung 2.7 dargestellt. Verschiedene Konzepte können redundante Hardware ebenfalls im selben Gehäuse vorsehen, sodass praktisch zwei unabhängige Energieversorgungsanschlüsse an dasselbe Gehäuse angeschlossen werden.

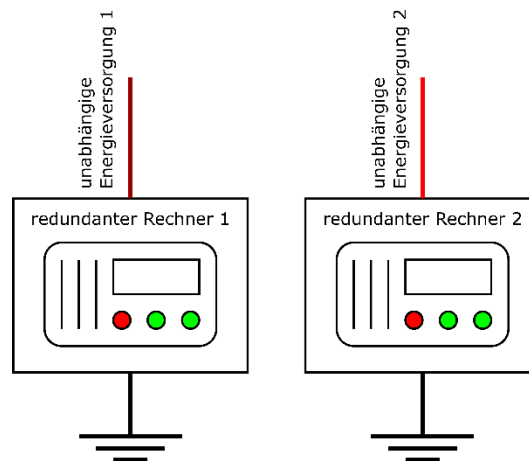


Abbildung 2.7: Betrieb zweier redundanter Rechner mit unabhängigen Energieversorgungen.

Diversität beschreibt die Möglichkeit, dass verschiedene Systeme die gleiche Aufgabe übernehmen können [35]. In Bezug auf das automatisierte Fahren gibt es die Möglichkeit, einen Backup-Rechner vorzusehen, der zwar leistungstechnisch kleiner dimensioniert ist, bei Ausfall des Hauptrechners allerdings die anfallenden Aufgaben mit einer reduzierten Performance übernehmen kann. Ein weiterer Aspekt der Ausfallsicherheit ist die Dissimilarität von Komponenten [35]. Sie beschreibt die Ausführung zweier Komponenten, die auf unterschiedlichen Technologien basieren, jedoch die gleiche Aufgabe durchführen. Diese unterschiedliche Ausführung wird im Rahmen der Dissimilarität gefordert, damit ein Fehlerevent nicht direkt zum Ausfall beider Systeme führen kann.

Die Schaffung der Redundanz und Unabhängigkeit/Rückwirkungsfreiheit in der Energieversorgung kann je nach Topologie sehr unterschiedlich ausgeführt sein. Um

redundant versorgte Knoten bereitstellen zu können, ist der Anschluss an zwei Quellen nötig. Die Unabhängigkeit/Rückwirkungsfreiheit kann dann gewährleistet werden, wenn es möglich ist, die Versorgungsleitungen zu diesem Knoten durch Schalthandlungen von möglichen Fehlerstellen entkoppeln zu können. Daher werden im Folgenden Beispiele für konventionelle und modernere Topologien vorgestellt, die später zu reduzierten Basistopologien führen. Diese Basistopologien werden dann für Untersuchungen in dieser Arbeit genutzt.

2.2.3 Energiebordnetz-Topologien

Nur mit der Auswahl einer geeigneten Topologie mit entsprechender Möglichkeit, verschiedene Schalthandlungen durchführen zu können, können die genannten Anforderungen an das Energiebordnetz erfüllt werden. Die meisten Topologieansätze basieren auf den Grundstrukturen Baum, Ring, Stern oder Backbone/Bus [36]. Auch Mischformen können sinnvoll sein.

Die klassische, etablierte Topologie für das 12 V Bordnetz in ICE-Fahrzeugen ist in Abbildung 2.8 dargestellt [3]. Hier dient der Starter dem Motorstart. Dieser wird von der Batterie gespeist. Der Generator dient der Energieversorgung und dem Laden der Batterie. Die Lasten sind hierarchisch, meist mit Schmelzsicherungen abgesichert, in einer Baumstruktur angeschlossen [37]. Auch nicht einzeln abgesicherte, verzweigte Leitungen durch z.B. Splices können vorhanden sein [38]. Das Vorhandensein von Einzelleitungen, sowie verzweigten Leitungen ist angedeutet. Redundante Versorgungsleitungen sind in dieser Topologie nicht vorgesehen.

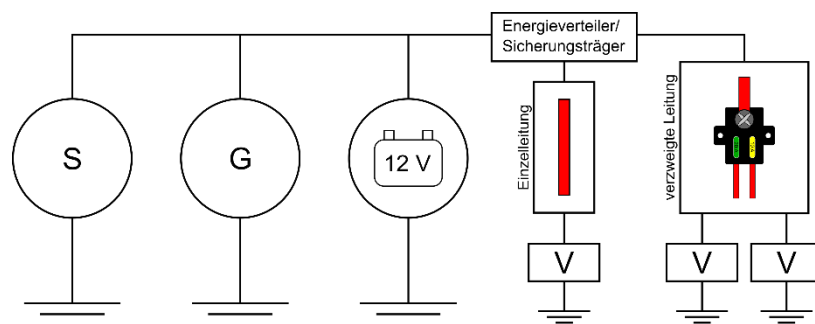


Abbildung 2.8: Klassische Topologie für konventionelle 12 V Energiebordnetze in ICE-Fahrzeugen. S: Starter, G: Generator, V: Verbraucher.

Eine moderne, und somit relevantere Variante, die für fail-operational-Anwendungen diskutiert wird und durch eine 48 V Spannungsebene ebenfalls für Hochleistungsverbraucher geeignet ist, ist in Abbildung 2.9 abgebildet [3]. Diese Darstellung ist um

ein Trennelement auf der 12 V Seite ergänzt. Durch den Generator kann die 48 V Batterie geladen werden. Durch die Kopplung der 12 V mit der 48 V Seite kann auch die 12 V Batterie vom Generator geladen werden. Weiterhin gibt es mehrere Bereiche, die redundant versorgt werden und gleichzeitig durch Schalter bzw. durch den DC/DC-Wandler von möglichen Fehlerstellen isoliert werden können. Diese redundanten Versorgungsknoten sind mit R gekennzeichnet. Der dargestellte Halbleiterschalter auf der 12 V-Seite kann zwei Teilbordnetze voneinander trennen und so auch mögliche Fehler isolieren. Die markierten Knoten können somit als redundante Versorgungsknoten angesehen werden. Auch die Kombination mit dem markierten Knoten auf der 48 V Ebene ist möglich, da die 12 V und die 48 V Ebene durch den DC/DC-Wandler entkoppelt sind. Auch hier sind die Versorgungsleitungen zu den Verbrauchern mit Schmelzsicherungen oder Halbleiterschaltern abgesichert. Auch verzweigte Leitungen, die nicht einzeln abgesichert sind, sind möglich.

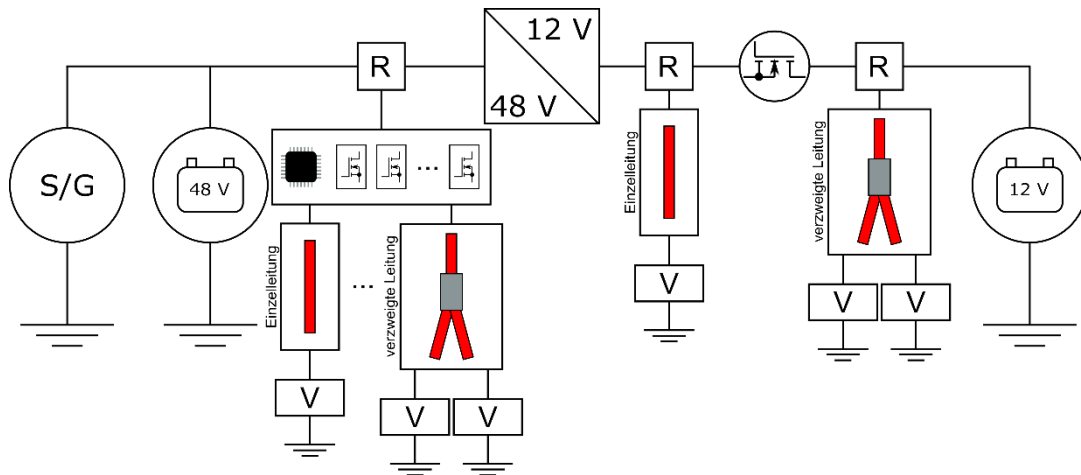


Abbildung 2.9: Mögliche Energiebordnetzarchitektur mit redundanten Energieversorgungsknoten. S/G: Starter/Generator, V: Verbraucher, R: redundanter Knoten.

Die geeignetste Topologie für ein Kfz ist sehr individuell und hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Die Architekturentwicklung ist ein iterativer Prozess und die Rahmenbedingungen und Freiheitsgrade variieren von Fahrzeug zu Fahrzeug [34]. Weitere Topologievorschlage sind z.B. in [39] zu finden.

2.2.4 Definition der Basistopologien

Die Variantenvielfalt bezogen auf mögliche Topologien und Ausstattungen ist extrem groß. Eine individuelle Untersuchung aller Möglichkeiten und der Entwurf von individuellen Diagnosemethodiken für alle Varianten ist hierbei kaum möglich. Deswegen werden im Folgenden Strukturen identifiziert und definiert, die allen Topologien

gemein sind und auf denen die hier zu findenden Untersuchungen basieren. Die abgeleiteten Ergebnisse können dann an speziellere Beispiele angepasst werden. Die grundsätzlichen Untersuchungsmethodiken können weiterhin auf komplexere Strukturen angewendet werden.

Für diese Arbeit wurde eine Einzelleitung (siehe Abbildung 2.10) und eine verzweigte Leitung (siehe Abbildung 2.11) ausgewählt. Auf einer Seite werden die Leitungs-Steckersysteme von einem Teilbordnetz mit einer oder mehreren Quellen versorgt. Diese Quellen können Batterien oder Generatoren sein. Bei einer einseitigen Betrachtung können auch DC/DC-Wandler als Quelle interpretiert werden. Auf der anderen Seite speisen sie ein Steuergerät bzw. einen Aktuator (Verbraucher). Beide Strukturen stellen einfache Grundkomponenten einer Energiebordnetzarchitektur dar, sodass die Ergebnisse leicht auf beliebige Konfigurationen angewendet und auch mit individuellen Anforderungen erweitert werden können. In Abbildung 2.10 ist eine Einzelleitung dargestellt. Am Anfang der Einzelleitung können Spannungs- und Stromsensoren vorhanden sein, aufgrund z.B. der Verwendung von intelligenten Sicherungen. Die Leitung ist über einen Kontakt/Stecker mit der Energieverteilerbox verbunden. Auf der Steuergeräteseite wird die Leitung ebenfalls über einen Kontakt/Stecker angeschlossen. Wie bereits erwähnt, besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass im Steuergerät Spannungs- und Stromsensoren vorhanden und diese über Bus-Systeme kommunizierbar sind.

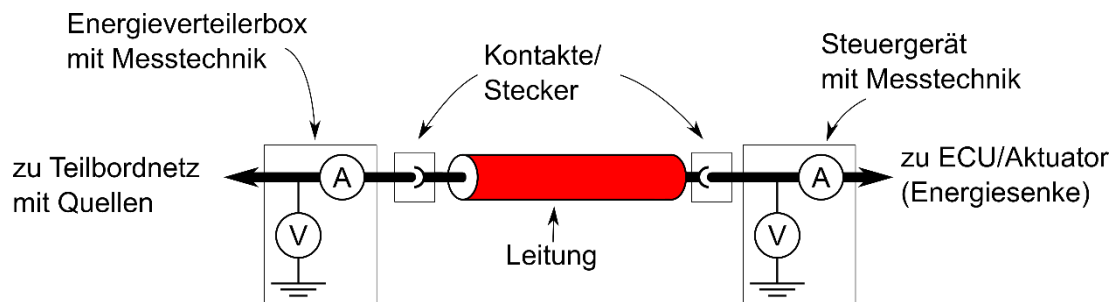


Abbildung 2.10: Einzelleitung mit Steckern und ggf. verfügbarer Messtechnik.

In Abbildung 2.11 ist ein verzweigtes Leitungs-Steckersystem zu sehen. Hierbei herrschen grundsätzlich an den Abschlüssen die gleichen Rahmenbedingungen wie bei der beschriebenen Einzelleitung. Zusätzlich wird jedoch die Möglichkeit eingeräumt, dass ein unbeobachteter Knoten in der Mitte vorhanden ist. Dieser Knoten kann z.B. durch einen Splice erzeugt werden und es ist sehr wahrscheinlich, dass hier keine Messtechnik verfügbar ist. Auch das Vorhandensein von Übergangswiderständen durch die Verwendung eines Sicherungsträgers, wie in Abbildung 2.8 ist möglich. Die

dargestellte Messtechnik an den Abschlüssen kann wieder nur als Möglichkeit und nicht als zwingend vorhanden verstanden werden.

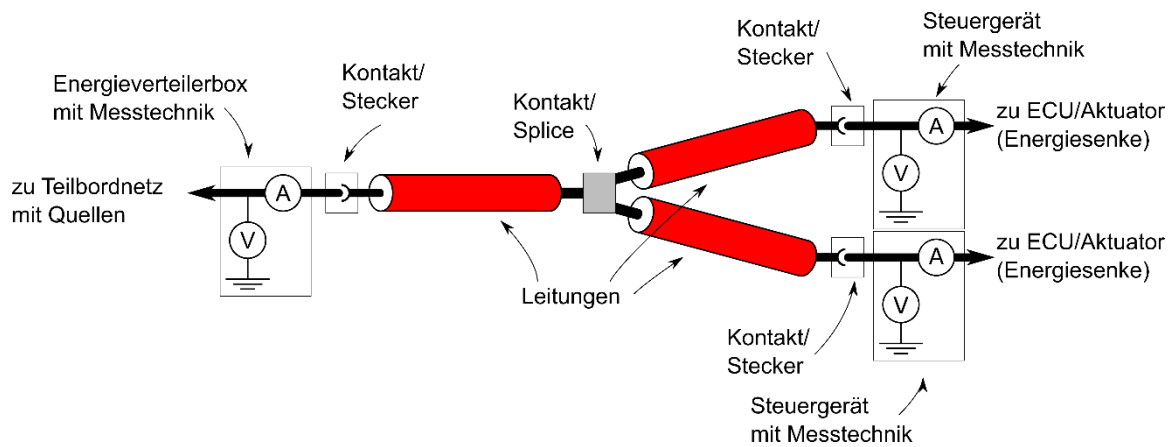


Abbildung 2.11: Verzweigte Leitung mit Steckern und einem Splice und ggf. vorhandener Messtechnik.

Da es sich bei Lichtbogenfehlern meist um zufällige Ereignisse handelt, ist jeder Ort entlang der gesamten Basistopologien ein möglicher Fehlerort, sowohl für serielle als auch für parallele Lichtbögen.

3 Modellbildung für Bordnetz und Lichtbogen

Bevor verschiedene Diagnosemethoden entwickelt, untersucht und bewertet werden können, müssen die elektrischen Auswirkungen von Lichtbogenfehlern in Kfz-Bordnetzen bekannt sein. Da Lichtbögen auch unter Laborbedingungen gefährlich und schwer beherrschbar sind, ist die Simulation ein sehr geeignetes Mittel, um verschiedene Fehlerkonfigurationen untersuchen zu können. Weiterhin ist die theoretische Anzahl an möglichen Fehlerarten und -orten durch die vorliegende Zufälligkeit enorm hoch. Auch deswegen kann die Simulation eine enorme Unterstützung darstellen, nicht zuletzt für Tests von Diagnosealgorithmen in der Simulation. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Schwerpunkt auf dem Verständnis und der Modellierung des Lichtbogenfehlers liegen. Diese wird anhand einer ausführlich dargestellten und diskutierten Anforderungsanalyse entwickelt. Der Fokus wurde auf die elektrische Modellierung gelegt. Weiterhin werden Modelle für relevante Bordnetzkomponenten vorgestellt.

3.1 Bordnetzmodell

Die Art der Modellbildung kann auf verschiedenen Grundlagen basieren. Eine wichtige Rahmenbedingung kann das Simulationsziel, bzw. stationäre oder dynamische Simulation sein. Sollen nur Arbeitspunktanalysen (DC-Analysen) durchgeführt werden, sind statische Modelle ausreichend. Wenn auch transiente Vorgänge analysiert werden sollen, müssen auch gedächtnisbehaftete Anteile in der Modellierung berücksichtigt werden. Je nach Frequenzbereich können verschiedene Systemanteile für eine Modellbildung relevant werden.

Bei Untersuchungen von Bordnetzstabilitäten werden typischerweise Frequenzen bis ca. 10 kHz berücksichtigt [21]. In anderen Veröffentlichungen werden bei der Modellbildung von Bordnetzkomponenten Frequenzen bis 100 kHz berücksichtigt [40]. Weiterhin können die Schwingkreiseigenschaften von Bordnetzen im Zusammenhang mit Lichtbogenfehlern eine wichtige Rolle spielen. Die erwarteten Zeitkonstanten typischer Leitungs-Abschlusskapazitätskonfigurationen liegen ebenfalls im niedrigen Millisekundenbereich (Abschlusskapazitäten im Mikrofaradbereich und Leitungsinduktivitäten im Mikrohenrybereich). Deswegen werden höhere Frequenzen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Des Weiteren kann die Messtechnik, die für die in dieser Arbeit dargestellten Messungen verwendet wurde, mit einer Frequenzgrenze von ca. 100 kHz verwendet werden.

Die im Folgenden dargestellten Betrachtungen fokussieren sich zunächst auf eine Ersatzschaltbildarstellung. In dieser Arbeit sind nicht alle physikalischen Eigenschaften von Bordnetzkomponenten und Lichtbogenfehlern notwendig. Der Fokus liegt viel

mehr auf der Nachbildung des korrekten Verhaltens des Bordnetzes unter Fehlereinwirkung. Daher werden Verhaltensmodelle für die Bordnetzkomponenten, wie auch für den Lichtbogenfehler, bevorzugt aufgebaut und verwendet. Die Verhaltensmodelle weisen gegenüber physikalischen Modellen oft eine niedrigere Komplexität auf und können zumeist einfacher parametrisiert werden.

Grundsätzlich wären alle in Kapitel 2.1 vorgestellten Teilkomponenten zu modellieren. Aufgrund der Definition der Basistopologien in Kapitel 2.2.4 können die benötigten Teilmodelle jedoch in Quellenmodelle, Verbrauchermodelle und Modelle für die Verkabelungselemente unterteilt werden. Batterie, Generatoren oder Supercaps/Doppelschichtkondensatoren werden hierbei durch Quellen repräsentiert. In der vorliegenden Arbeit können auch DC/DC-Wandler als Quellen interpretiert werden aufgrund der Definition der Basistopologien. Ohmsche Lasten, Konstantleistungs- und Stromsenken werden durch Verbrauchermodelle repräsentiert. Diese erstellten Modelle werden im Folgenden vorgestellt.

3.1.1 Quellenmodell

Ein Quellenmodell kann grundsätzlich aus einer idealen Quelle U_{ocv} , die eine Leerlaufspannung ohne Belastung darstellt, und einer internen Impedanz Z_{in} bestehen, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Klemmenspannung $u_s(t)$ und der Klemmenstrom $i_s(t)$ ergeben sich dann aus dem zeitlichen Verlauf der Belastung.

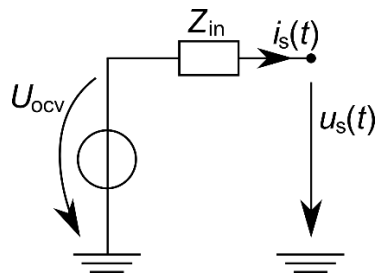


Abbildung 3.1: Ideale Spannungsquelle und interne Impedanz.

Je nach Quelle und Simulationsziel kann die interne Impedanz unterschiedlich ausgeführt werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.2 gezeigt. Der ohmsche Anteil kommt bei Batterien z.B. durch Verbindungselemente der Einzelzellen zustande [18]. Wenn das transiente Verhalten beachtet werden soll, können verschiedene RC-Glieder berücksichtigt werden [17], [41]. RC-Glieder können chemische Vorgänge in Batterien oder Kondensatoren nachbilden. Auch die Berücksichtigung von Induktivitäten kann sinnvoll sein, wenn z.B. Generatoren als Quellen vorhanden sind [40]. Ein weiterer Grund für die Verwendung von Induktivitäten bei der Modellierung von Quellen im

Bordnetze können allgemein Leitungen oder speziell Verbindungsleitungen zwischen z.B. Einzelzellen bei Batteriepacks sein.

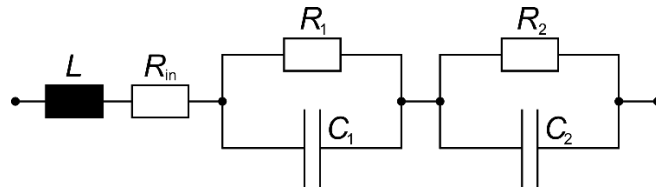


Abbildung 3.2: Modellierungsmöglichkeit für die interne Impedanz von Quellen [41].

Die Größenordnungen aller Ersatzschaltbildelemente können z.B. von den in Kapitel 2.1 genannten Eigenschaften, bzw. der Kombination verschiedener Quellen und Zuleitungen, abhängen. Die Spannung der idealen Quelle U_{OCV} kann z.B. mit dem SoC oder anderen Quelleneigenschaften variieren. Typische Werte für einzelne Arbeitspunkte können in [40] gefunden werden.

3.1.2 Verbrauchermodell

Bei der Modellierung verschiedener Steuergeräte bzw. Aktuatoren/Verbraucher kann grundsätzlich der Ansatz in Abbildung 3.3 verwendet werden. Hierbei wird der Verbraucher von einer ggf. zeitveränderlichen Impedanz Z_L modelliert.

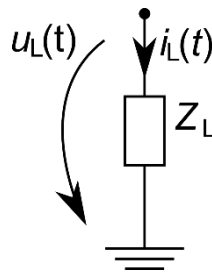


Abbildung 3.3: Modellierung eines Verbrauchers mit der Lastimpedanz Z_L .

Die konkrete Ausführung der Impedanz hängt vom Simulationsziel (z.B. Frequenzanteile des zu untersuchenden Phänomens) und den dynamischen Eigenschaften des Verbrauchers ab. In Abbildung 3.4 ist ein ohmsch-kapazitiver Verbraucher dargestellt, wie er sehr oft in Kfz-Anwendungen vorkommt [40]. Hierbei repräsentiert der ohmsche Anteil $R_L(t)$ den tatsächlichen Aktuator, wie z.B. Heizelemente. Die parallele Kapazität ist sehr häufig in Steuergeräten als Spannungsstabilisator bzw. Tiefpassfilter zu finden. Es können weitere, oft parasitäre, Elemente berücksichtigt werden, wenn

das Verhalten bei hohen Frequenzen nachgebildet werden muss [37]. Sollen Arbeitspunktanalysen durchgeführt werden, kann das vereinfachte Modell in Abbildung 3.5 bereits ausreichen.

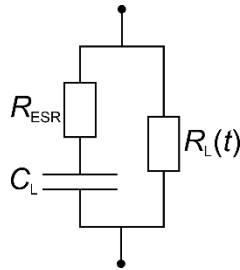


Abbildung 3.4: Abschlusswiderstand mit spannungsstabilisierendem Kondensator.

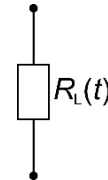


Abbildung 3.5: Verbrauchermodell für ohmsche Last.

Aufgrund der immer häufiger eingesetzten Leistungselektronik und den geregelten Aktuatoren können auch Konstantleistungsverbraucher das reale Verhalten verschiedener Aktuatoren gut nachbilden [17], [42]. Eine mögliche Modellierung ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

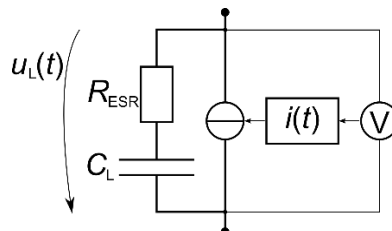


Abbildung 3.6: Allgemeine Darstellung eines Verbrauchers mit gesteuerter Stromquelle.

Hierbei wird eine spannungsgesteuerte Stromquelle verwendet, deren Strom, abhängig von der Lastleistung $P_L(t)$, mit der folgenden Gleichung berechnet wird:

$$i(t) = \frac{1}{R_{\min}/u_L(t) + u_L(t)/P_L(t)} = f(u_L(t), R_{\min}, P_L(t)) \quad (3.1)$$

Die parallele Kapazität mit Serienwiderstand wird auch bei dieser Art von Verbraucher oft aus Gründen der Spannungsstabilisierung verwendet. Aus Gleichung (3.1) wird ersichtlich, dass neben einer Leistung $P_L(t)$ ebenfalls ein ohmscher Anteil R_{\min} aus Gründen der Simulationsstabilität berücksichtigt werden kann.

Da bei Konstantleistungsverbrauchern eine reduzierte Spannung einen steigenden Strom verursacht, kann für die realistische Nachbildung von Steuergeräten bzw. Aktuatoren zusätzlich eine Stromobergrenze eingeführt werden.

Um ein verbessertes reales Verhalten bei starken Spannungseinbrüchen zu berücksichtigen, kann ein Steuergeräte-Reset bzw. eine Abschaltung bei einer Mindestspannung eingeführt werden. Hierbei kann auf die Spannungsbereiche für die 48 V Spannungsebene zurückgegriffen werden, welche bereits in Abbildung 2.3 dargestellt wurden [3]. Ab einer Verbraucherspannung von 20 V wird keine Funktion mehr ausgeführt und das Steuergerät schaltet ab. Oberhalb von 20 V bis 36 V liegt ein Bereich mit Funktionseinschränkung. Für Konstantleistungsverbraucher kann das bedeuten, dass ein oberes Stromlimit erreicht wurde, sodass die angefragte Leistung nicht mehr erreicht wird. Oberhalb von 36 V liegt der Betriebsbereich der Steuergeräte. Das Verhalten ist in Abbildung 3.7 exemplarisch für einen 2,5 kW-Verbraucher dargestellt.

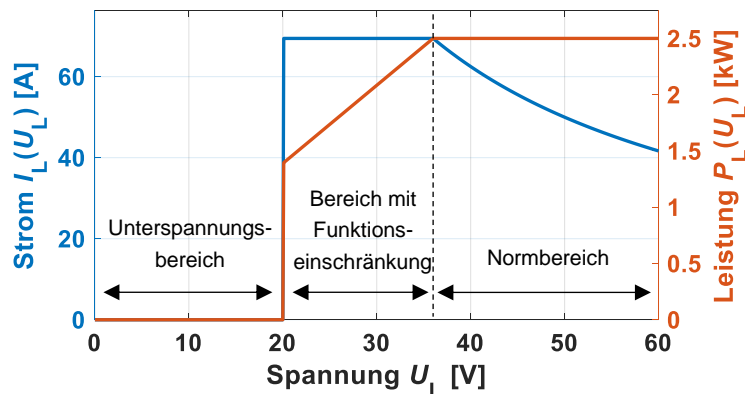


Abbildung 3.7: Beispiel für spannungsabhängiges Verhalten von Verbraucherstrom und Verbraucherleistung eines Konstantleistungsverbrauchers mit 2,5 kW.

Für alle Lasten kann bei der Abschaltung durch Unterspannung und dem Einschalten bei ausreichender Spannungsversorgung eine Hysterese vorgesehen werden. Diese Hysterese kann notwendig sein, um unkontrolliertes Ein- und Ausschalten bei einer grenzwertigen Versorgungsspannung zu vermeiden. Diese Hysterese ist in Abbildung 3.8 dargestellt.

Auch eine Spannungsobergrenze, bei der Beschädigungen entstehen, könnte berücksichtigt werden. Konkrete Leistungsaufnahmen verschiedener Steuergeräte sind in [36] oder [43] zu finden. In dieser Arbeit werden ohmsche Verbraucher und Konstantleistungsverbraucher betrachtet. Ebenso werden parallele Kapazitäten berücksichtigt. Wenn ebenfalls die nachfolgende Gleichung berücksichtigt wird, kann der Modellierungsansatz in Abbildung 3.6 (Verbrauchermodellierung mittels gesteuerter Stromquelle) für diese Arbeit als allgemeiner Ansatz verstanden werden:

$$i(t) = u_L(t) / R_L = f(u_L(t), R_L) \quad (3.2)$$

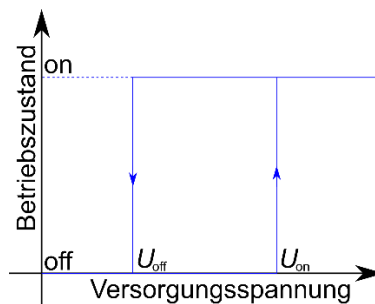


Abbildung 3.8: Mögliche Hysterese des Aus- und Einschaltverhaltens bei Steuergeräten/Aktuatoren.

3.1.3 Modelle für Verkabelungselemente

Die zu modellierenden Verkabelungselemente sind Kontakte und Leitungen. Die für diese Arbeit relevanten Modellierungsansätze werden im Folgenden vorgestellt.

Kontaktmodelle

Die für die in Kapitel 2.2.4 definierten Basistopologien relevanten Kontaktarten sind Steckverbindungen, die typischerweise am Übergang zu den Quellen und Verbrauchern zu erwarten sind, sowie Pressverbindungen, die z.B. Leitungen mit Steckverbindern oder Leitungen mit Leitungen (Splices) über einen Crimpvorgang oder durch Schweißen verbinden.

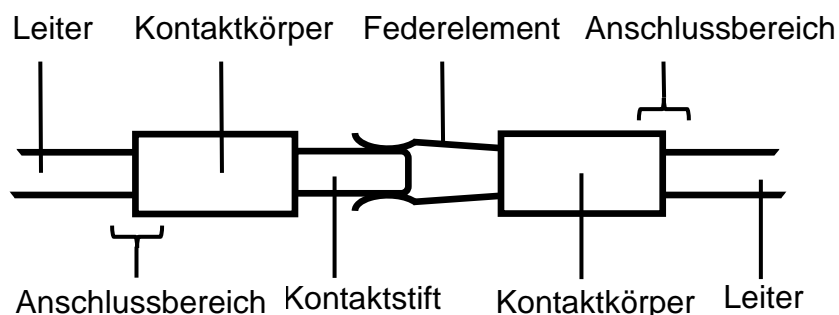


Abbildung 3.9: Grundsätzlicher Aufbau von Steckverbindern mit Darstellung verschiedener Kontaktstellen [44].

Ein möglicher prinzipieller Aufbau eines Einzelkontaktes ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

Jede Kontaktstelle kann grundsätzlich durch einen ohmschen Übergangswiderstand beschrieben werden. Hierbei können Abhängigkeiten von den folgenden Eigenschaften bestehen [28]:

- Kontaktoberflächenstruktur (rau/glatt/...) bzw. Kontaktfläche
- Kontaktnormalkraftkraft
- Kontaktmaterialien
- Alterung
 - o Fremdschichten/Korrosion
 - o Schichtverschleiß
 - o Spannungsrelaxation

Der kumulierte Widerstand aller am Steckverbinder beteiligten Elemente (z.B. Kontaktkörper, Kontaktstift, ...) wird Gesamtdurchgangswiderstand R_{ges} genannt. Das Gesamtmodell ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

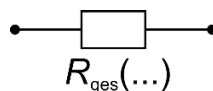


Abbildung 3.10: Modellierungsansatz für Steckverbinder und Pressverbinder.

Da für Energiekontakte eine möglichst niedrige Verlustleistung und ein möglichst niedriger Spannungsabfall angestrebt werden, sind die üblichen Widerstandswerte für Kontaktwiderstände bzw. Gesamtdurchgangswiderstände klein. Minimale Werte für Hochstromkontakte können hier bis hinunter in den zweistelligen Mikroohmbereich reichen [45].

Leitungsmodelle

Das Ersatzschaltbild für ein elektrisch kurzes Leitungsstück der Länge Δz ist in Abbildung 3.11 dargestellt [46].

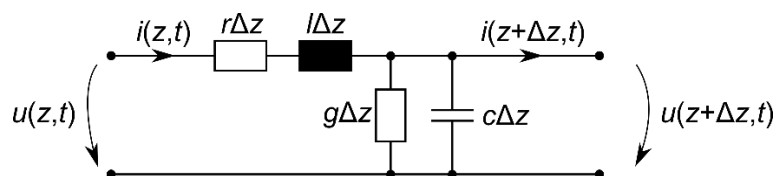


Abbildung 3.11: Ersatzschaltbild für ein kurzes Leitungsstück der Länge Δz [46].

Der serielle Widerstandswert $r\Delta z$ repräsentiert die ohmschen Verluste des Leitermaterials. Weiterhin resultiert die Induktivität $l\Delta z$ aus der Bildung der Stromschleife von Hin- und Rückleiter. Aufgrund der elektrisch leitfähigen Hin- und Rückleiter, sowie des

Dielektrikums zwischen ihnen (z.B. Isolation) kann elektrische Ladung gespeichert werden und ein paralleler Kondensator $c\Delta z$ bildet sich aus. Ohmsche Verluste aufgrund der endlichen Isolationsfähigkeit der Isolierung begründen den parallelen Leitwert $g\Delta z$. Die Ersatzschaltbildelemente werden aus dem Produkt der Länge Δz und den längenbezogenen Belagsgrößen r , l , c und g gebildet.

Die Grenzwertbildung für $\Delta z \rightarrow 0$ führt zu den Telegraphengleichungen, welche das Übertragungsverhalten allgemein beschreiben. Wenn die Wellenausbreitungseffekte aufgrund einer deutlich geringeren Leitungs- als Wellenlänge keine Rolle spielen, dann kann die vollständige Leitung mit der Länge l_{Ltg} durch das Ersatzschaltbild in Abbildung 3.12 repräsentiert werden. Für die hier durchgeführten Analysen ist dieses Ersatzschaltbild ausreichend. Weitere Vereinfachungen werden im Folgenden beschrieben.

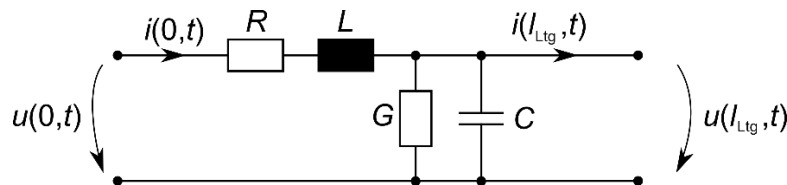


Abbildung 3.12: Ersatzschaltbild für eine Leitung der Länge l_{Ltg} .

Der spezifische Widerstand von typischen Isolierungsmaterialien in Kfz-Anwendungen (z.B. PVC) liegt bei sehr hohen Werten. Die kaum messbaren statischen Fehlerströme sind gegenüber den großen Verbraucherströmen irrelevant. Deswegen wird der parallele Leitwert G in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Zum einen hat die innere Induktivität eines Leiters einen Anteil an der dargestellten Induktivität L . Diese kommt durch Magnetfelder innerhalb des Leiters zustande. Sie liegt für Kfz relevante Leitungen im Bereich von 50 nH/m oder niedriger [47]. Weiterhin hat die äußere Induktivität einen deutlich größeren Anteil an der dargestellten Induktivität L . Aufgrund einer großen Inhomogenität und oft unbekanntem Verhältnissen in 48 V Kfz-Energiebordnetzen können hier Abschätzungen genutzt werden. Werte im Bereich von 1 μ H/m werden in dieser Arbeit verwendet [47].

Aufgrund der Leitungslängen im Meterbereich kann der serielle ohmsche Widerstand merkbar zum Leitungsverhalten beitragen. Er kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$R = \rho \cdot \frac{l_{Ltg}}{A} \quad (3.3)$$

ρ beschreibt den materialabhängigen spezifischen Widerstand, l_{Ltg} beschreibt die Leitungslänge, A beschreibt die Fläche des Querschnitts. Die relevanten Werte für spezifische Widerstände sind in Tabelle 3 dargestellt. Typische Werte für Leitungswiderstände liegen im niedrigen Milliohmbereich.

Tabelle 3: Spezifische Widerstände für Kupfer und Aluminium.

Material	Spezifischer Widerstand [$\Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$]
Kupfer	0,0171
Aluminium	0,0279

Auch eine Temperaturabhängigkeit kann bei Leitungsmodellen berücksichtigt werden. Der Fokus der Arbeit liegt jedoch auf der elektrischen Modellierung und die thermischen Effekte werden vernachlässigt.

Die Größenordnung der für Kfz relevante Leitungskapazitäten liegt im Pikofaradbereich. Da die zu betrachtenden Frequenzen im Kiloherzbereich liegen, bilden die Kapazitäten eine hohe Impedanz und können somit vernachlässigt werden. Weiterhin sind die Abschlusskapazitäten der Steuergeräte, die in dieser Arbeit explizit berücksichtigt werden, in einem vielfach größeren Wertebereich [34].

Wie z.B. auch in [47] dargestellt, kann als Ersatzschaltbild für Leitungsmodelle das Ersatzschaltbild in Abbildung 3.13 verwendet werden. Es liegen Widerstandswerte im Milliohmbereich, sowie Induktivitätswerte im Mikrohenrybereich vor.

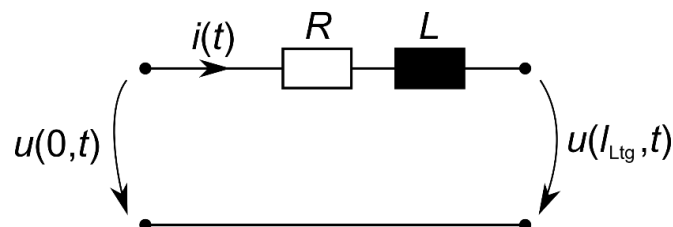


Abbildung 3.13: Relevantes Ersatzschaltbild zur Nachbildung von Leitungen.

Modelle für Sicherungselemente

Die etablierte Aufgabe von Sicherungselementen in Kfz-Bordnetzen ist der Leitungsschutz. Es muss gewährleistet werden, dass der Stromfluss durch eine Leitung unterbrochen wird, bevor die thermische Belastung für die Isolation zu groß wird.

Etablierte Sicherungselemente sind Schmelzsicherungen. Diese werden anhand ihrer Auslösekennlinie charakterisiert [48]. Diese beschreibt, nach welcher Zeit bei welcher Stromstärke der Sicherungsdraht schmilzt. Wenn in jedem Szenario der Schmelzdraht der Sicherung schmilzt, bevor die Leitungsisolation Schaden nehmen kann, ist

ein sicherer Kurzschluss- und Überlastschutz gewährleistet. Das Verhalten solcher Sicherungselemente kann auf verschiedenen Wegen modelliert werden. In dieser Arbeit werden der Ansatz und die validierten Modellparameter aus [49] verwendet. Aufgrund des ohmschen Widerstands des Sicherungsdrahtes wird die Verlustleistung $P_{\text{Sicherung}}$ umgesetzt. Anders als bei den dargestellten Leitungsmodellen wird aufgrund des großen Temperaturbereichs und der Relevanz für das Auslöseverhalten der Sicherungswiderstand mit der folgenden Gleichung berechnet:

$$R_{\text{Sicherung}}(T) = R_{\text{nom}} \cdot (1 + T_C \cdot (T - T_{\text{nom}})) \quad (3.4)$$

Der Widerstand der Sicherung $R_{\text{Sicherung}}$ wird mit den Werten R_{nom} , also dem Widerstand, der sich bei der Temperatur T_{nom} ergibt (häufig 20°C), und dem Temperaturkoeffizient T_C bestimmt. Die von [49] genutzte Bibliothek und die entsprechenden Modellparameter sind in Anhang A: Sicherungsparameter (VDA) zu finden.

Die Temperatur T der Sicherung wird mit einem thermischen Netzwerk bestimmt. Die Temperaturerhöhung basiert auf der elektrischen Verlustleistung $P_{\text{Sicherung}}$. Hier wird das thermische Netzwerk (viergliedriges Foster-Netzwerk), wie in Abbildung 3.14 dargestellt, zur Simulation der Sicherungstemperatur verwendet. Die Umgebungstemperatur wird mit T_{Amb} berücksichtigt. Die RC-Glieder bilden verhaltensbasiert die Temperaturentwicklung der Sicherung nach.

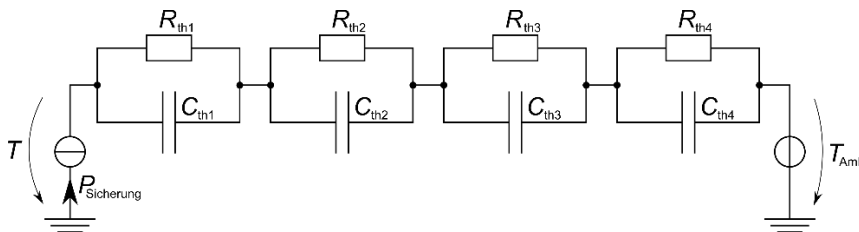


Abbildung 3.14: Thermisches Ersatzschaltbild zur verhaltensbasierten Simulation einer Schmelzsicherung.

Bei der Verwendung intelligenter Sicherungen, bestehend aus Messtechnik, Halbleiterschaltern und Mikrocontrollern mit Auswertelgorithmen, können nahezu beliebige Abschaltkriterien definiert werden. Hier können zunächst kumulierte Stromkriterien genannt werden [50], oder auch modellbasierte Absicherungskonzepte, die ebenfalls die Leitungstemperatur mitberücksichtigen [51]. Durch eine Bus-Anbindung und die Messwertkommunikation ist die Nutzung solcher intelligenter Sicherungen für einen allgemeinen Bordnetzschutz (auch Lichtbogenschutz) und die Absicherung der fail-operational-Eigenschaften ebenfalls denkbar und wird in modernen Kfz angestrebt.

3.1.4 Gesamtmodell der definierten Basistopologien

Da das Teilbordnetz, welches Quellen beinhaltet und mögliche Lasten über Leitungen speist, grundsätzlich unbekannt ist, wird es in Anlehnung an das Thevenin-Theorem und an eine in z.B. CISPR 25 [52] beschriebene induktive Bordnetznachbildungen für den relevanten Frequenzbereich durch eine ideale Quelle U_{ocv} , einen ohmschen Innenwiderstand R_{in} und eine serielle Induktivität L_{in} nachgebildet (siehe nachfolgend Abbildung 3.15 und Abbildung 3.16). Die Verbraucher bzw. Steuergeräte können zwar nahezu beliebig sein, sind aber grundsätzlich wie bereits beschrieben, ausgeführt. Die Leitungen sind ebenfalls wie beschrieben modelliert worden. Beide Modelle der Basistopologien werden im Folgenden unter Berücksichtigung von möglichen Fehlerorten dargestellt. Die genauen Werte der Ersatzschaltbildelemente, sowie der Lastwiderstände oder Leistungen werden für die Simulationen individuell ausgewählt.

Basistopologie *Einzelleitung*

In Abbildung 3.15 ist das in dieser Arbeit verwendete Bordnetzmodell für die Basistopologie *Einzelleitung* dargestellt.

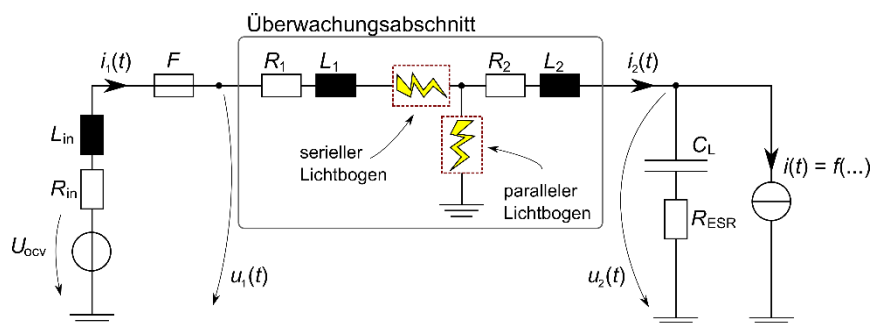


Abbildung 3.15: Modell der Basistopologie *Einzelleitung*.

Die Quelle wird mit einer idealen Spannungsquelle U_{ocv} , einem ohmschen Anteil R_{in} und einem induktiven Anteil L_{in} modelliert. Unmittelbar vor dem Überwachungsabschnitt befindet sich ein Absicherungselement F , welches eine gewöhnliche Schmelzsicherung, aber auch eine intelligente Sicherung sein kann. Weiterhin ist einen Verbraucher, der ohmsch oder leistungskonstant sein und eine parallele Stabilisierungskapazität haben kann, an den Überwachungsabschnitt angeschlossen. Die Anteile des Überwachungsabschnitts bestehen aus ohmschen Anteilen aus Kontakt- und Leitungswiderständen, sowie Induktivitäten, die hauptsächlich als Leitungsinduktivitäten vorkommen. Als Fehlerort wird ein beliebiger Ort entlang des Überwachungsabschnitts gewählt. Entsprechend werden R_1 , L_1 , R_2 und L_2 dimensioniert. Es gilt für den Gesamtwiderstand des Überwachungsabschnitts $R_{ges} = R_1 + R_2$ und für die Gesamtinduktivität

des Überwachungsabschnitts $L_{ges} = L_1 + L_2$. Mit $i_1(t)$ wird der Strom, der in den Überwachungsabschnitt hineinfließt, bezeichnet. Mit $i_2(t)$ wird der Strom, der aus dem Überwachungsabschnitt hinausfließt, bezeichnet. $u_1(t)$ und $u_2(t)$ stellen die Spannungen an den Enden des Überwachungsabschnitts dar.

Basistopologie *verzweigte Leitung*

Als mögliche Erweiterung der Basistopologie *Einzelleitung* kann die Basistopologie *verzweigte Leitung* definiert werden. Das vollständige Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.16 dargestellt. Es wird hiermit die Möglichkeit eingeräumt, dass im Bordnetz unbeobachtete Knoten, also Knoten ohne Messtechnik, existieren. Die Quelle wird wie in der Basistopologie *Einzelleitung* modelliert. Weiterhin kann wieder die Absicherung der verzweigten Leitung durch ein beliebiges Sicherungselement vorgesehen sein. Die Abschlüsse stellen Steuergeräte bzw. Aktuatoren mit Stabilisierungskondensatoren dar. Sie können sich ohmsch oder leistungskonstant verhalten. Auch induktive Anteile sind denkbar. Der Überwachungsabschnitt selbst besteht aus drei Teilabschnitten, die verbunden sind. Zur eindeutigen Identifizierbarkeit im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Teilabschnitte mit *Bordnetzanbindung*, *Versorgungsleitung 1* und *Versorgungsleitung 2* benannt.

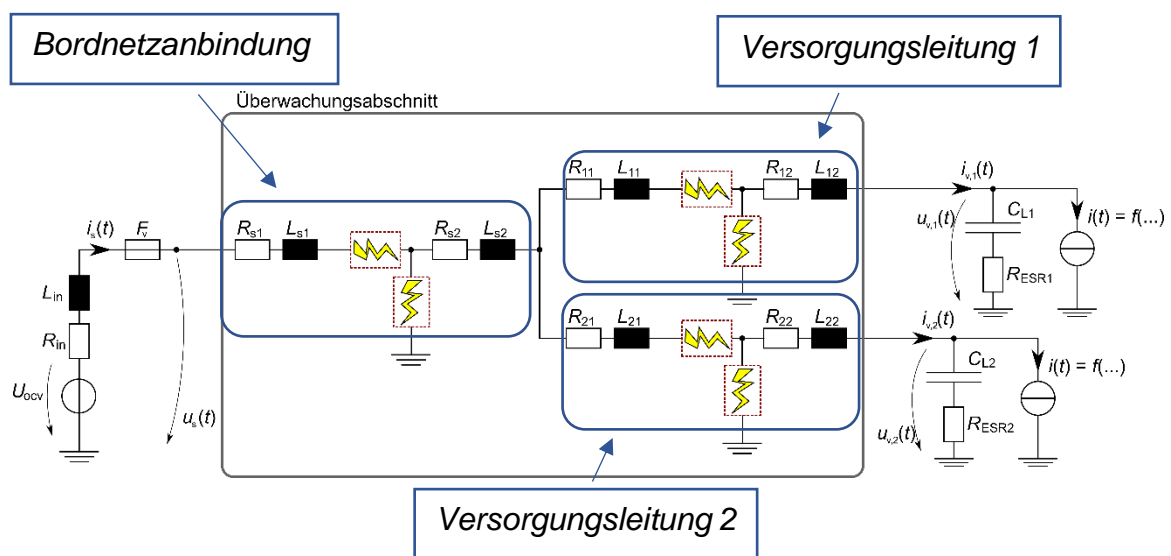


Abbildung 3.16: Modell der Basistopologie *verzweigte Leitung*.

Es gilt wieder, dass sich der Gesamtwiderstand und die Gesamtinduktivität jedes Teilabschnitts aus der Summe der einzelnen, den Fehlerort beschreibenden, Anteile ergeben müssen. Diese Zusammenhänge sind in den folgenden Gleichungen beschrieben:

$$\begin{aligned}R_{s,ges} &= R_{s1} + R_{s2} \\L_{s,ges} &= L_{s1} + L_{s2} \\R_{1,ges} &= R_{11} + R_{12} \\L_{1,ges} &= L_{11} + L_{12} \\R_{2,ges} &= R_{21} + R_{22} \\L_{2,ges} &= L_{21} + L_{22}\end{aligned}\tag{3.5}$$

3.2 Lichtbogenmodelle für 48 V Kfz-Bordnetze

Da speziell auf der 48 V Ebene die Lichtbogenfehler im Vordergrund stehen und andere klassische Fehler, wie Kurzschlüsse oder Leitungsbrüche, nahezu immer in Verbindung mit Lichtbögen auftreten, wie später ausführlich dargestellt wird, müssen vorrangig Lichtbogenmodelle erstellt werden. Im Folgenden werden zunächst physikalische Vorgänge und Grundlagen zu Lichtbögen vorgestellt. Anschließend werden die Entwicklung und der Aufbau eines spezifischen Lichtbogenprüfstands dargestellt. Weiterhin werden vor dem Hintergrund von Literaturrecherchen und auf Basis von Laborbeobachtungen Modellierungsansätze mit dem Ziel gegenübergestellt, geeignete Modelle für die Simulation von Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen auszuwählen, bzw. zu entwickeln. Anschließend wird die Verwendung eines neu angepassten Verhaltensmodells systematisch begründet und die Implementierung mittels eines Zustandsübergangsdiagramms wird beschrieben. Die im darauffolgenden Kapitel dargestellte Parametrierung und Validierung bestätigt die Eignung des gewählten Ansatzes. Der neue Ansatz wird ALVE-Gleichung (Ayrton-Low-Voltage-Erweiterung) genannt.

3.2.1 Grundlagen zur Entstehung von Lichtbögen

Ein Lichtbogen ist eine Gasentladungserscheinung, die man auch Plasma nennt. Grob beschrieben ist Plasma ein Gas, welches elektrisch leitfähig ist, also Ionen und freie Elektronen besitzt [53]. Es existieren grundsätzlich zwei Entstehungsmöglichkeiten von Gasentladungsstrecken bzw. Lichtbögen [53]. Zum einen gibt es einen Durchschlag durch Luft, bei dem sich eine Entladungsstrecke bildet, ohne vorherigen galvanischen Kontakt. Dieser Effekt kann bei parallelen Lichtbögen eine Rolle spielen. Auf der anderen Seite kann ein Lichtbogen entstehen, nachdem ein galvanischer Kontakt getrennt wurde. Dieser Effekt kann bei seriellen Lichtbögen eine Rolle spielen. Die physikalischen Hintergründe werden im Folgenden kurz erläutert.

Durchschlag

Da in 48 V Kfz-Bordnetzen eher geringe Spannungen und kleinere Abstände relevant sind, können Erklärungen für Hochspannungsanwendungen, u.A. die Paschenkurve, nicht verwendet werden. Es werden stattdessen Parallelen zwischen einem Durchbruch im Vakuum und Durchbrüchen bei sehr geringen Abständen (Mikrometerbereich) von Kontakten gezogen [54]. Da hier nicht davon ausgegangen werden kann, dass sich im Spalt bereits freie Elektronen und Ionen befinden, müssen diese auf andere Weise erzeugt werden [53], [54]. Hierbei wird davon ausgegangen, dass Elektronen direkt aus der Kathode ausgelöst werden. Dies kann z.B. durch thermische Emission oder Photoemission geschehen. Auch Tunneleffekte aufgrund der Welleneigenschaft von Elektronen können zur Erklärung herangezogen werden. Sobald die Stromdichte hoch genug ist, trägt Metalldampf der Elektroden [54] ebenfalls zum Vorhandensein von Elektronen und Atomen im Spalt bei. Im Bereich von $0,2 \mu\text{m}$ bis $40 \mu\text{m}$ konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der benötigten Durchbruchspannung V_B und dem Elektrodenabstand d beobachtet werden: $V_B = 100 \text{ V}/\mu\text{m} \cdot d$. Nähere Informationen hierzu können in [54] und [55] gefunden werden.

Trennung von Kontakten/der aufgezugene Lichtbogen

Wenn stromführende Kontakte getrennt werden, verringert sich die Kontaktfläche vom vollständigen Kontakt bis zum vollständigen Kontaktverlust stetig. Aufgrund der sich verringernden Kontaktfläche steigt die Stromdichte stark an [56]. Ab einem gewissen Punkt ist die Stromdichte hoch genug, um das Elektrodenmaterial/Metall zu verflüssigen. So entsteht eine Brücke aus geschmolzenem Metall zwischen den Kontakten. Diese Brücke kann materialabhängig eine gewisse Zeit und bis zu einer gewissen Länge bestehen bleiben, bis sie instabil wird und zusammenbricht [55], [57], [58]. Der zurückbleibende Metalldampf dient dann der Lichtbogenbildung. Der Vorgang von der Verflüssigung des Metalls bis zur tatsächlichen Lichtbogenzündung spielt sich im niedrigen Nanosekundenbereich ab [56]. Ein qualitativer Spannungsverlauf während der Lichtbogenzündung ist in Abbildung 3.17 abgebildet. Bereich 1 beschreibt das Erreichen einer Schmelzspannung U_s , einen Spannungsanstieg an der Metallbrücke, Spannungsschwankungen aufgrund von Brückeninstabilitäten und das schlussendliche Erreichen der Abrissspannung U_B . Bereich 2 beschreibt den Zündvorgang, bei dem mit Spannungsgradienten von bis zu 10^9 V/s die Lichtbogenspannung ansteigt und schließlich bei der minimalen Lichtbogenspannung U_{min} bleibt. Im Bereich 3 kann der Lichtbogen in einen stabilen Zustand übergehen, sofern die Eingangsbeschaltung geeignete Arbeitspunkte hat. Der beschriebene Zündvorgang kann transiente Signale hervorrufen (z.B. Stromschwingungen). Nachdem diese abgeklungen sind, kann der stabile Lichtbogen in einem quasi-stationären Arbeitspunkt brennen.

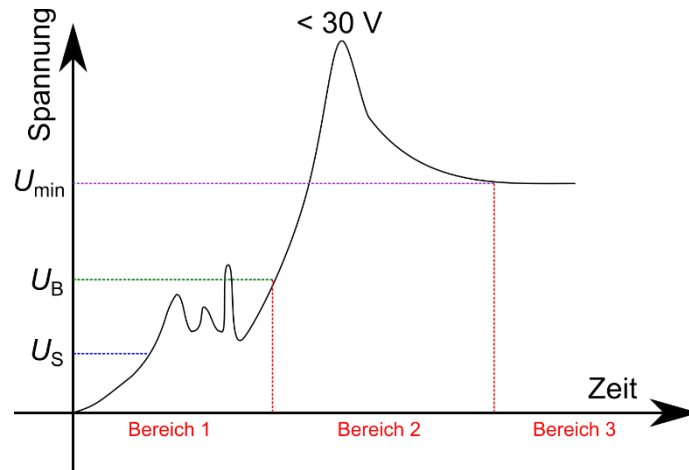


Abbildung 3.17: Spannungsverlauf bei der Lichtbogenbildung bei Trennung von Kontakten.

Die später dargestellte Modellierung verzichtet auf eine Berücksichtigung der Metallbrücke, sowie eine Modellierung der Spannungsüberhöhung aufgrund der Vernachlässigbarkeit für Energieuntersuchungen und der extrem schnellen Vorgänge. Aus dem hier qualitativ beschriebenen Verlauf wird Bereich 3 in der späteren Modellierung berücksichtigt.

Strom-Spannungs-Charakteristik

Die Strom-Spannungs-Charakteristik von Plasmen/Gasentladungserscheinungen ist in Abbildung 3.18 dargestellt. Unterschiedliche Entladungsformen sind bei unterschiedlichen Strom-Spannungskombinationen möglich. Nähere Erläuterungen zur Strom-Spannungs-Charakteristik von Gasentladungserscheinungen kann in [59] gefunden werden.

Der für diese Arbeit entscheidende Bereich ist der Bereich der Bogenentladung, der bei geringen Spannungen und hohen Strömen existieren kann (rechter Bereich in Abbildung 3.18). Aufgrund der starken Lichtemission wird die Entladungserscheinung in diesem Bereich auch als Lichtbogen bezeichnet. Die isolierte Lichtbogenkennlinie für verschiedene Lichtbogenlängen ist in Abbildung 3.19 dargestellt. Neben dem nicht-linearen Verlauf sind die wichtigen und charakteristischen Größen minimale Lichtbogen-Spannung U_{\min} und minimaler Lichtbogenstrom I_{\min} dargestellt. Unterhalb dieser Werte kann ein stabiler Lichtbogen nicht möglich [55], [60], was bedeutet, dass der Lichtbogen solche Arbeitspunkte nicht dauerhaft behalten kann. Wie ebenfalls in Abbildung 3.19 dargestellt, verschiebt sich die Lichtbogenkurve mit der Lichtbogenlänge [53].

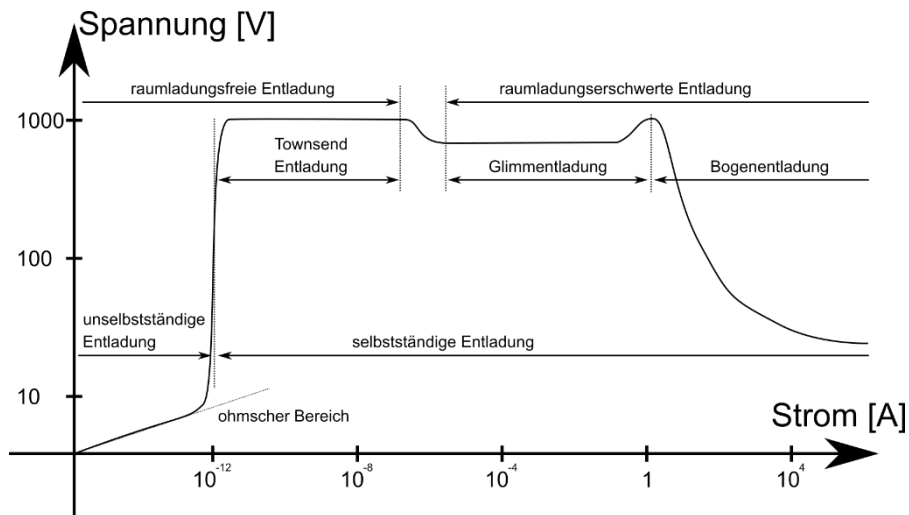


Abbildung 3.18: Gasentladungskennlinie für offene Kontakte mit konstantem Abstand [59].

Bei vereinzelt Untersuchungen konnte auch ein Ansteigen der Lichtbogenkennlinie, also ein ohmscher Bereich, für sehr große Ströme beobachtet werden [61], [62], [63]. Wie später dargestellt, konnte dies auf Basis der für diese Arbeit durchgeführten Messungen nicht eindeutig nachgewiesen werden und wird daher hier nicht berücksichtigt.

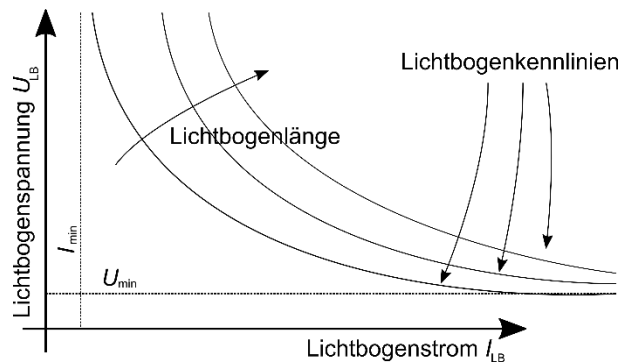


Abbildung 3.19: Mögliche Lichtbogenkennlinien - U_{\min} , I_{\min} gekennzeichnet.

In Abbildung 3.20 ist die längenabhängige Spannungsvariation von Lichtbögen bei konstant bleibendem Strom skizziert [64], [65]. Hierbei wird deutlich, dass ein näherungsweise linearer Zusammenhang für große Längen und große Spannungen gilt, jedoch im für 48 V Kfz-Bordnetze relevanten Bereich der Zusammenhang nichtlinear ist.

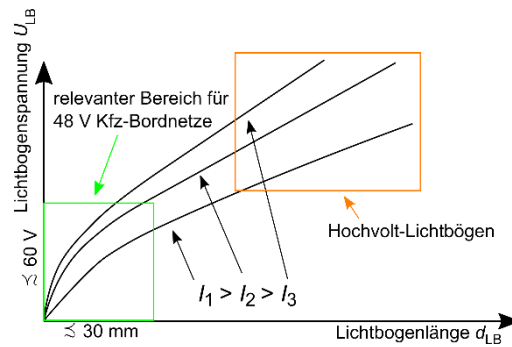


Abbildung 3.20: Lichtbogenspannung über Lichtbogenlänge mit konstanter Stromstärke [64], [65].

Der sich einstellende Arbeitspunkt von Lichtbögen hängt maßgeblich von der Eingangsbeschaltung ab. Diese beeinflusst zusätzlich auch das Einschwingverhalten des Lichtbogens [59], [64], [66], [67], [68].

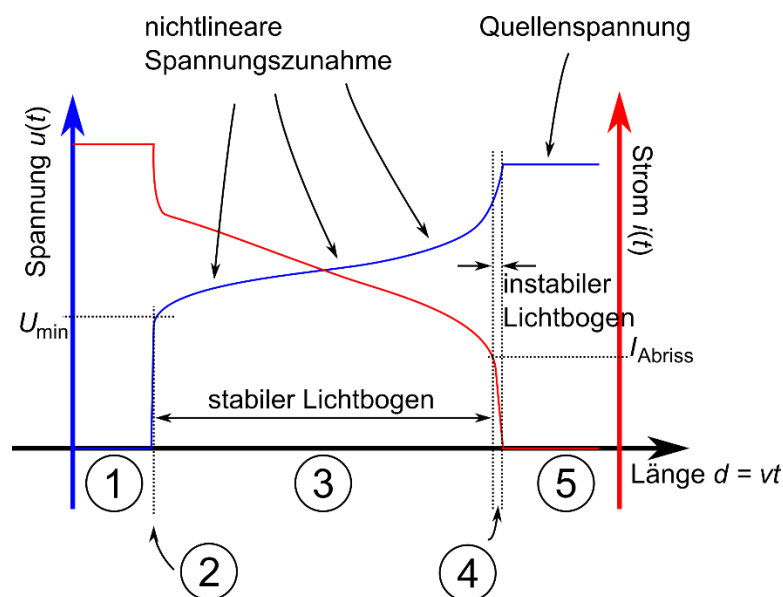


Abbildung 3.21: Prinzipieller Verlauf von Lichtbogenstrom und Lichtbogenspannung in einem ohmschen Stromkreis für einen seriellen Lichtbogen.

In Abbildung 3.21 ist der prinzipielle Verlauf von Lichtbogenstrom und Lichtbogenspannung beispielhaft in einem ohmschen Stromkreis (vgl. Abbildung 3.15 mit seriellen Lichtbogen und vernachlässigbaren Induktivitäten und Kapazitäten) über der Lichtbogenlänge, bzw. der Zeit bei linearem Zusammenhang ($d = v \cdot t$), dargestellt. Die Kurven können in fünf Bereiche aufgeteilt werden, wie ebenfalls in der Grafik dargestellt.

Bereich 1: Hier existiert kein Lichtbogen, bzw. die Elektroden haben niederohmigen Kontakt. Der Strom wird nur durch die Höhe der Quellenspannung und die Quellenbelastung begrenzt.

Bereich 2: Bereich 2 beschreibt den Zündmoment, welcher auch in Abbildung 3.17 detaillierter dargestellt wurde.

Bereich 3: Der Spannungssprung zu Anfang von Bereich 3 entspricht dem Sprung auf die minimale Lichtbogenspannung U_{\min} . Diese kann physikalisch durch den Spannungsabfall direkt an der Anode und an der Kathode erklärt werden. Das Anoden- und Kathoden-Fallgebiet sind in Abbildung 3.22 dargestellt. Durch die Verlängerung des Lichtbogens verschiebt sich die Lichtbogenkurve im Verlaufe des Bereich 3 und dementsprechend gibt es nichtlineare Strom- und Spannungsänderungen. Der sich mit der Lichtbogenlänge ändernde Spannungsabfall am Lichtbogen wird physikalisch durch den Spannungsabfall an der langen Plasmasäule beschrieben, wie ebenfalls in Abbildung 3.22 dargestellt [62]. Jeder dieser Arbeitspunkte kann theoretisch lange bestehen bleiben. Die Veränderungen der Lichtbogenspannung können weiterhin so langsam geschehen, dass sie keine transienten Effekte in der Eingangsbeschaltung hervorrufen. Deswegen kann es sich hierbei um quasi-stationäre Arbeitspunkte handeln.

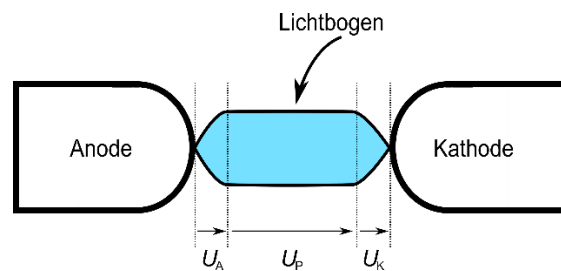


Abbildung 3.22: Spannungsabschnitte am Lichtbogen: Anodenfallgebiet U_A , Kathodenfallgebiet U_K , Spannungsabfall über Plasmasäule U_P [62].

Bereich 4: Am Anfang von Bereich 4 ist der minimale Lichtbogenstrom I_{Abriss} , der im individuellen Stromkreis möglich ist, erreicht, sodass der Lichtbogen in einen instabilen Zustand übergeht und abreißt. Dies ist gleichbedeutend damit, dass der Stromkreis keinen stabilen Arbeitspunkt bereitstellt, den ein Lichtbogen aufgrund seiner Strom-Spannungs-Charakteristik fordert. Siehe hierzu auch Abbildung 3.23.

Bereich 5: Bereich 5 stellt einen offenen Stromkreis dar. An der hochohmigen Trennstelle fließt kein Strom.

Der Ablauf bei Betrachtung der U - I -Kennlinie ist ebenfalls in Abbildung 3.23 dargestellt.

Da die Eingangsbeschaltung einen maßgeblichen Einfluss hat und, wie in vorigen Kapiteln beschrieben, außerdem in 48 V Kfz-Bordnetzanwendungen sehr individuell

ausgeführt sein kann, muss dieser Einfluss Bestandteil der weiterführenden Untersuchungen sein.

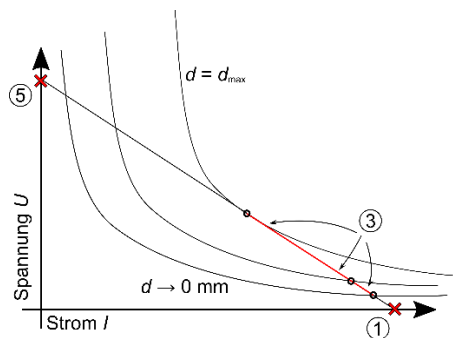


Abbildung 3.23: Darstellung der Strom-Spannungs-Verhältnisse eines Lichtbogens in einem ohmschen Stromkreis [69].

3.2.2 Darstellung des Prüfstands zur Erzeugung von Lichtbögen

Lichtbogenprüfstand/Lichtbogenerzeugungseinheit

Um weiterführend zu in der Literatur vorhandenen Lichtbogenuntersuchungen eigene, für 48 V Kfz-Bordnetze spezifische Laboruntersuchungen anstellen zu können, war es notwendig, einen Lichtbogenprüfstand zu entwickeln. Der Prüfstand kann für folgende Aufgaben genutzt werden:

- Erzeugung beliebiger gesteuerter und geregelter serieller und paralleler Lichtbögen.
- Untersuchung von stabilen Lichtbögen in quasi-stationären Arbeitspunkten.
- Untersuchung dynamischer Vorgänge aufgrund der Beschaltung (Einschwingvorgänge).
- Untersuchung von Umwelteinflüssen auf das Lichtbogenverhalten.
- Modellparametrierung.
- Modellvalidierung.
- Fehlerinjektion in 48 V Kfz-Bordnetzprüfstände und Tests von Diagnosealgorithmen.

In Abbildung 3.24 ist ein Überblick über den isolierten Lichtbogenprüfstand/die Lichtbogenerzeugungseinheit dargestellt. Es sind grundsätzlich für andere Einsatzzwecke auch andere Prüfstandskonzepte denkbar [70].

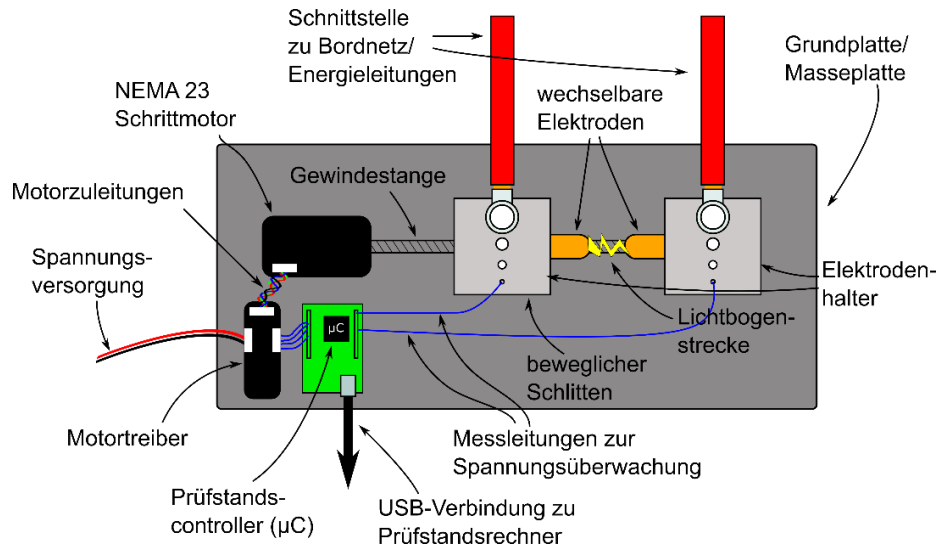


Abbildung 3.24: Überblick Lichtbogenprüfstand/Lichtbogenerzeugungseinheit ohne verwendete Messtechnik zur Lichtbogenüberwachung (Spannung und Strom).

Der Prüfstand besteht aus zwei Elektrodenhaltern (massive Aluminiumblöcke). Hier können beliebige Elektroden, auch verschiedene Kfz-Steckersysteme, angebracht werden. Einer der Schlitten ist entlang einer Achse beweglich. Die Bewegung kann mittels einer Gewindestange (Gewindesteigung: 25 mm) und einem Schrittmotor erzeugt werden. Die Schrittmotorsteuerung erfolgt durch einen Schrittmotortreiber. Die gewählte Kombination aus Schrittmotor und Schrittmotortreibereinstellung erlaubt 1600 Schritte pro Umdrehung. Hieraus ergibt sich eine theoretische Auflösung bezogen auf den beweglichen Schlitten von ca. 16 μm pro Schritt. Aufgrund von Lagerspiel und anderen konstruktiven Ungenauigkeiten liegt die tatsächliche Auflösung und Wiederholgenauigkeit im niedrigen Mikrometerbereich ($< 100 \mu\text{m}$). Der bewegliche Schlitten kann mit Geschwindigkeiten von 0 mm/s bis ca. 200 mm/s bewegt werden. Die direkte Steuerung des Schrittmotors bzw. die Ansteuerung des Schrittmotortreibers erfolgt über einen Prüfstandscontroller auf Mikrocontrollerbasis. Hier wird ständig die Position des Schlittens nachverfolgt bzw. kontrolliert und gemäß den Vorgaben abgefahren. Die Lichtbogenüberwachung auf Mikrocontrollerebene erfolgt über Spannungsmessungen am Lichtbogen. Auf diesem Weg ist eine präzise Feststellung des Kontaktpunktes zwischen den Elektroden und eine Steuerung oder auch Regelung des Lichtbogens möglich.

Beliebige serielle und parallele Lichtbogenprofile können vorgegeben werden. Ein qualitatives Beispiel für ein serielles und paralleles Elektroden-Abstandsprofil ist in Abbildung 3.25 und in Abbildung 3.26 dargestellt. Darüber hinaus können auch beispielsweise intermittierende Lichtbögen (Wackelkontakte) leicht nachgestellt werden.

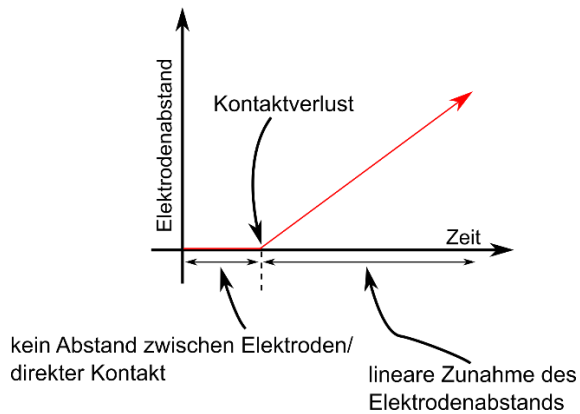


Abbildung 3.25: Beispielhaftes Bewegungsprofil für serielle Lichtbögen.

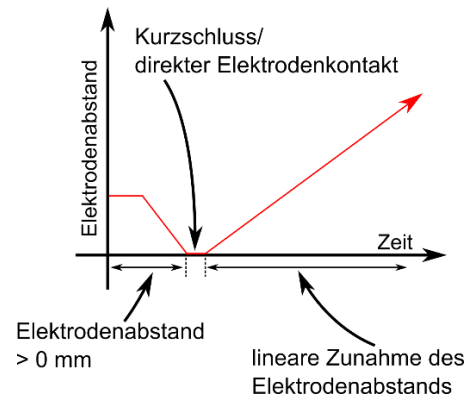


Abbildung 3.26: Beispielhaftes Bewegungsprofil für parallele Lichtbögen.

Die Geschwindigkeitsanpassungen werden softwaretechnisch zwischen zwei Schritten des Schrittmotors angepasst. Die maximalen Geschwindigkeitsänderungen zwischen zwei Schritten wurden messtechnisch ermittelt und liegen oberhalb der in dieser Arbeit durchgeführten Geschwindigkeitssprünge. Deswegen können Beschleunigungsphasen auf vorgegebene Geschwindigkeiten in guter Näherung vernachlässigt werden.

In Abbildung 3.27 ist ein Teil des Lichtbogenprüfstands, die Elektrodenadapter mit Kupferelektroden, dargestellt. Weiterhin sind die Spannungsüberwachungsanschlüsse des Prüfstandscontrollers und die Anschlüsse der Energiekabel zu sehen.



Abbildung 3.27: Elektrodenadapter mit Kupferelektroden des Lichtbogenprüfstands.

Überblick über den vollständigen Versuchsaufbau zur Erzeugung und Messung von Lichtbögen

Der Lichtbogenprüfstand muss für tatsächliche Messungen in einen größeren Versuchsaufbau integriert werden. Eine beispielhafte Konfiguration, welche auch für Parametrierungsmessungen verwendet wurde, ist in Abbildung 3.28 dargestellt. Der Lichtbogenstromkreis wurde bei den meisten Messungen von einem Labornetzteil (EA-PSI 9080-510) mit 48 V versorgt ($U_{OCV} = 48 \text{ V}$, $R_{in} = 0 \text{ } \Omega$, $L_{in} = 0 \text{ H}$ gemäß Abbildung 3.15 und Abbildung 3.16). Bei den Darstellungen der Messungen, bei denen Batterien als Quelle verwendet wurden, wird dies explizit erwähnt. Zur Strombegrenzung wurden verschiedene Kombinationen von Lastwiderständen verwendet. Um das Verhalten von Steuergeräten nachzubilden, sind beliebige Lasten möglich. Exemplarisch ist eine RC-Kombination eingezeichnet. Die Messungen, bei denen die alternative elektronische Last (EA EL 9080-400) verwendet wurde, werden explizit ausgewiesen. Die Parallelschaltung von Kondensatoren kann genutzt werden, um verschiedene transiente Effekte zu untersuchen. Wie erwähnt, können bei leichter Anpassung des Aufbaus auch parallele Lichtbögen erzeugt werden. Zur Steuerung des Lichtbogenprüfstands wurde ein Prüfstands-PC mit Matlab verwendet. Per Spannungstastkopf und Stromzange wurden Lichtbogenspannung und Lichtbogenstrom gemessen.

Für die Messungen wurde das Oszilloskop Teledyne Lecroy HDO6104A (1 GHz, 12-bit) verwendet. Die Lichtbogenspannungen wurden mit dem Spannungstastkopf Testec TT-SI 9101 (100 MHz) gemessen. Die Lichtbogenströme wurden mit der Stromzange E3N Chauvin Arnoux (100 kHz) oder bei Strömen, die oberhalb von ca. 100 A lagen, mit der Stromzange Tektronix TCP404XL (2 MHz) gemessen.

Um ebenfalls den Einfluss von variierenden Umweltbedingungen untersuchen zu können, kann der Prüfstand ebenfalls in eine Klimakammer integriert werden. Ein beispielhafter vollständiger Versuchsaufbau, inklusive Klimakammer (Vötsch Industrietechnik VCL 4010), ist in Abbildung 3.29 dargestellt.

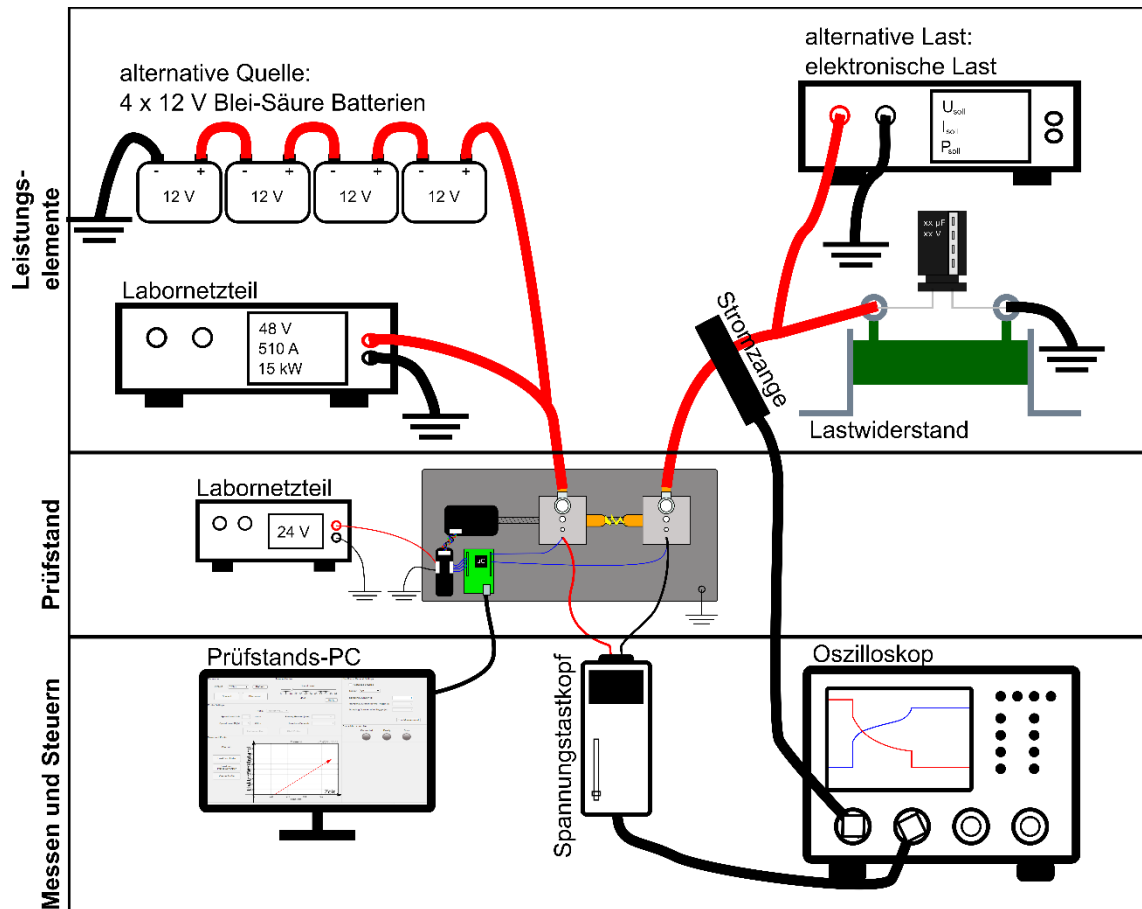


Abbildung 3.28: Überblick über möglichen Versuchsaufbau mit Lichtbogenprüfstand.



Abbildung 3.29: Vollständiger möglicher Versuchsaufbau des Lichtbogenprüfstands.

3.2.3 Lichtbogenmodell-Anforderungsanalyse

Bevor Lichtbogenmodelle untersucht und Parametrierungen durchgeführt werden können, soll das für die Bordnetze relevante Verhalten von Lichtbögen dargestellt werden. Dieses Verhalten ist von verschiedenen Größen abhängig. Zum einen können Umwelteinflüsse oder andere physikalische Rahmenbedingungen als Einflussfaktoren auf das Lichtbogenverhalten angeführt werden. Weiterhin müssen der Einfluss der Eingangsbeschaltung und das Rauschverhalten und andere statistische Abweichungen diskutiert werden. Im Folgenden wird untersucht, welche Einflussfaktoren in der Modellbildung und Parametrierung für 48 V Kfz-Bordnetze in dieser Arbeit berücksichtigt werden müssen.

3.2.3.1 Einfluss von Umwelt- und anderen Rahmenbedingungen

Die im Folgenden dargestellten Recherchen werden durch Messungen mit dem beschriebenen Lichtbogenprüfstand unterstützt. Das Schaltbild des Prüfaufbaus, der bei den vorgestellten Messungen benutzt wurde, kann mit Abbildung 3.15 beschreiben werden. Die Zuleitung zum Lichtbogenprüfstand und die Verbindungsleitung vom Prüfstand zur Last hatten einen Widerstand von $R_1 = R_2 = 2,5 \text{ m}\Omega$ und eine Induktivität von $L_1 = L_2 = 2,5 \text{ }\mu\text{H}$. Da die Messzeitdauer zur Betrachtung der quasi-stationären Arbeitspunkte jedoch deutlich größer war als die Zeitkonstanten auf Basis der Induktivitäten, können die Einflüsse dieser auf die Messungen vernachlässigt werden. Es wurde kein Abschlusskondensator verwendet, also $C_L = 0 \text{ }\mu\text{F}$. Der verwendete Lastwiderstand R_L (gemäß Abbildung 3.15 und Gleichung (3.2)) wurde variiert. Für die im Folgenden dargestellten Messungen wurden verschiedene Elektrodengeometrien verwendet. Die verwendeten Geometrien waren plan, spitz und rund. Die genauen Abmessungen sind in Abbildung 3.30 dargestellt.

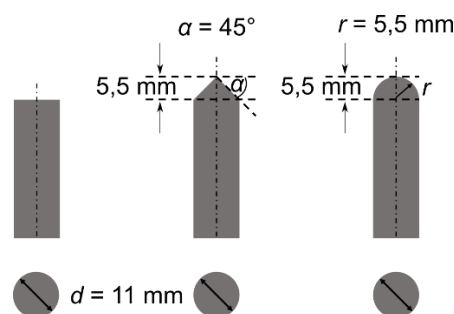


Abbildung 3.30: Verwendete Elektrodengeometrie; links: plan; Mitte: spitz; rechts: halbrund.

Als Elektrodenmaterialien wurden Kupfer und Aluminium verwendet, da es sich hierbei um die am häufigsten verwendeten Leitermaterialien im Kfz handelt und so die

Verhältnisse bei Leitungsbrüchen und teilweise bei parallelen Lichtbögen gut nachgestellt werden können. Nach jeder Messung wurden die Elektroden poliert und einer Sichtprüfung unterzogen. Bei starker Beschädigung wurde die Elektrode ausgetauscht. Bei geringen Lichtbogenleistungen wurden sie öfter verwendet als bei hohen Lichtbogenleistungen. Ein Einfluss von Elektrodenbeschädigungen auf die Ergebnisse kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden. Die Bewegungsgeschwindigkeit des Schlittens betrug für jede in diesem Kapitel dargestellte Messung 9 mm/s.

Im Folgenden wird zunächst der Einfluss verschiedener Umweltbedingungen (Luftdruck, Luftfeuchtigkeit und Umgebungstemperatur) und danach anderer Rahmenbedingungen (Bewegungsgeschwindigkeit, Elektrodenmaterial, Elektrodengeometrie) auf das Lichtbogenverhalten dargestellt und untersucht.

Umweltbedingung: Luftdruck

Nach [71] nimmt die Querschnittsfläche eines Lichtbogens mit dem Druck ab, also würde bei gleicher Stromstärke die Stromdichte steigen. Dieses Verhalten wurde in [72] nachgewiesen. Weiterhin wird in [71] angegeben, dass ein erhöhter Druck auch eine Erhöhung des Spannungsbedarfs des Lichtbogens zur Folge hat. Die in [72] angegebene Luftdruckabhängigkeit umfasst jedoch einen sehr großen Bereich von 1 atm bis 100 atm. Basierend auf der Annahme, dass der Luftdruck bei üblichen Betriebsbedingungen von Kfz-Bordnetzen zwar variiert (ca. 550 hPa/5,4 atm auf dem Mount Blanc bei ca. 4800 m bis ca. 1070 hPa/10,5 atm am toten Meer bei ca. -425 m), aber nur in geringem Maße, kann der Einfluss als vernachlässigbar angesehen werden.

Umweltbedingung: Luftfeuchtigkeit

Besonders in Hochspannungsanwendungen oder bei elektrostatischen Entladungen kann die Luftfeuchtigkeit eine große Rolle spielen. Ein Einfluss auf eine Durchschlagspannung wird z.B. in [73] beschrieben. Es wird dargestellt, dass eine erhöhte Luftfeuchtigkeit bei Luftspalten von 100 μm zu einer erhöhten Durchschlagsspannung führt. Ein Einfluss auf das Brennverhalten von Lichtbögen in 48 V Kfz-Bordnetzen kann nicht ausgeschlossen werden. Daher soll dieser Einfluss Gegenstand der folgenden Untersuchungen sein. Um den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf das Lichtbogenverhalten bewerten zu können, wurden Lichtbogenversuche in der Klimakammer mit variierender Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Um einen möglichst großen Bereich der absoluten Luftfeuchtigkeit abdecken zu können, wurde die Umgebungstemperatur zu 50°C gewählt. Weiterhin wurden halbrunde Elektroden aus Kupfer gemäß Abbildung 3.30 verwendet. Es wurde ein Lastwiderstand von mit $R_L = 0,5 \Omega$ verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.31 dargestellt.

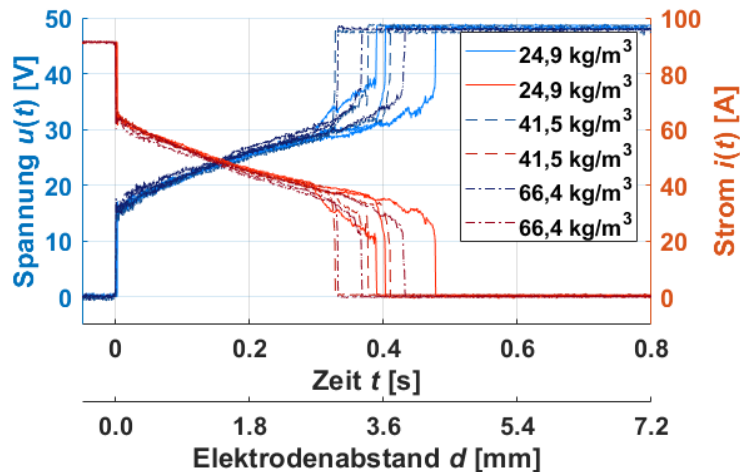


Abbildung 3.31: Variation der Luftfeuchtigkeit; Elektrodengeometrie: halbrund; Elektrodenmaterial: Kupfer; Umgebungstemperatur: 50°C; Lastwiderstand $R_L = 0,5 \Omega$.

Abbildung 3.31 zeigt, dass die Luftfeuchtigkeit keinen erkennbaren Einfluss hat. Lediglich eine signifikante Variation in der maximalen Lichtbogenlänge konnte beobachtet werden. Diese Variation kann auf zufällige Prozesse zurückgeführt werden. Dieser Effekt wird später näher erläutert. Die Luftfeuchtigkeit wird bei den folgenden Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

Umweltbedingung: Umgebungstemperatur

Die Umgebungstemperatur ist ebenfalls eine Umweltbedingung, die in Kfz-Anwendung je nach Einbauraum oder Einsatzort stark variieren kann. Der Kfz-Einsatz in sehr kalten Gebieten kann niedrige Minustemperaturen bedeuten, während heiße Einsatzorte und z.B. motornahe Regionen sehr hohe Temperaturen hervorrufen können [74]. Weiterhin kann sie Auswirkungen auf die Lichtbogeneigenschaften haben. Da auch die thermische Emission von Elektronen zu einem Anstieg des Stromes im Spalt beitragen kann, kann auch die Temperatur eine Rolle spielen. Die Erwärmung der Elektroden trägt zur Auslösearbeit der Elektronen bei, wodurch schneller mehr Elektronen, besonders im Zündmoment bzw. vor Brennen des sehr heißen Lichtbogens, für den Stromfluss zur Verfügung stehen könnten. Aufgrund der sehr hohen Lichtbogentemperaturen ist jedoch davon auszugehen, dass die vergleichsweise niedrige Umgebungstemperatur während der Brenndauer nur eine untergeordnete Rolle spielt. Um diese Einschätzung zu unterstützen, wurden Lichtbogenversuche in der Klimakammer mit variierender Umgebungstemperatur durchgeführt. Es wurden plane Elektroden gemäß Abbildung 3.30 aus Kupfer verwendet. Die Last ist $R_L = 0,5 \Omega$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.32 dargestellt.

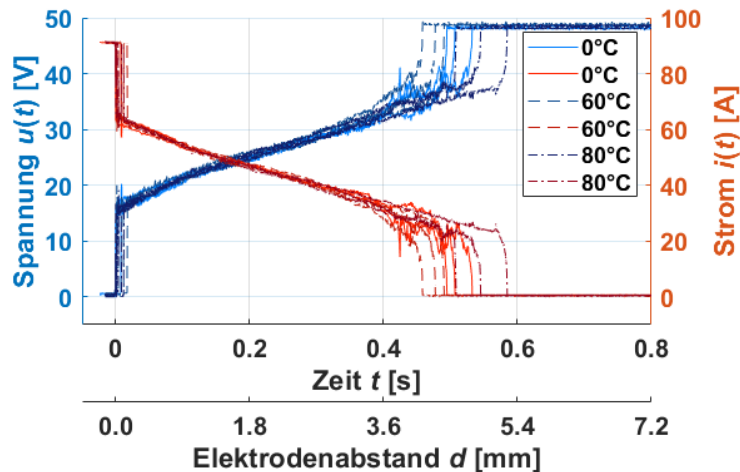


Abbildung 3.32: Variation der Umgebungstemperatur; Elektrodengeometrie: plan; Elektrodenmaterial: Kupfer; Lastwiderstand $R_L = 0,5 \Omega$.

Es ist zu erkennen, dass die Variation der Umgebungstemperatur keinen erkennbaren Einfluss auf den Lichtbogen hat. Lediglich eine signifikante Variation in der maximalen Lichtbogenlänge konnte beobachtet werden. Diese Variation kann auf zufällige Prozesse zurückgeführt werden. Dieser Effekt wird später näher erläutert. Die Umgebungstemperatur wird entsprechend bei den im Folgenden dargestellten Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt. Die Folgenden Untersuchungen werden bei Raumtemperatur durchgeführt.

Rahmenbedingung: Bewegungsgeschwindigkeit der Elektroden

Auch die Bewegungsgeschwindigkeit der Elektroden kann einen Einfluss auf die Ausbildung von Lichtbögen haben. Diese Effekte können auch im Zünd- und Abrissmoment, also bei schnellen transienten Vorgängen, in Zusammenhang mit der Eingangsbeschaltung eine Rolle spielen.

Bei variierender Beschleunigung sich öffnender Kontakte kann die Schmelzzeit der Elektroden und die Zeit bis zum Zusammenbruch der Brücke aus geschmolzenem Metall ebenfalls variieren [58]. Kupferelektroden bei Strömen von 2000 A haben hier Werte im dreistelligen Mikrosekundenbereich aufgewiesen. Unterschiedliche Zeitdauern der Metallbrückenphase können also theoretisch eine unterschiedliche Zeitdauer bis zur Lichtbogenzündung bedeuten [58]. Die zeitliche Dauer von instabilen/erlöschenden Lichtbögen mit Strömen kleiner als 1 A kann mit steigender Induktivität im Lichtbogenstromkreis steigen [68]. Da die Lichtbogendauer hierbei jedoch sehr kurz ist, können solche Effekte für die für diese Arbeit relevanten energetischen Untersuchungen vernachlässigt werden. Nach [75] hat eine Öffnungsgeschwindigkeit, die unterhalb von 20 cm/s liegt, keinen Einfluss auf das Lichtbogenverhalten bei geringen

Strömen (< 10 A). In [76] wird beschrieben, dass die wesentlichen Lichtbogeneigenschaften, wie z.B. die Abrisslänge d_{\max} , in einem Bereich von 0 mm/s bis 200 mm/s bei Quellenspannungen von 200 V bis 500 V unabhängig von der Öffnungsgeschwindigkeit v sind. Die Lichtbogendauer T wird als antiproportional zur Öffnungsgeschwindigkeit angegeben. Dies sagt aus, dass bei der Proportionalitätskonstante d_{\max} (maximale Lichtbogenlänge bzw. Abrisslänge) die Lichtbogendauer ebenfalls unabhängig von der Öffnungsgeschwindigkeit ist. Der Zusammenhang kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$T \sim \frac{1}{v} \Leftrightarrow T = \frac{1}{v} \cdot d_{\max} \quad (3.6)$$

In [77] ist beschrieben, dass induktiv-resistive Lasten (9 mH) in 42 V Bordnetzen bei Initialströmen von 10 A und 30 A dafür sorgen können, dass eine steigende Trenngeschwindigkeit (2 cm/s bis 30 cm/s) auch einen größeren Elektrodenabstand bei Lichtbogenabriss zur Folge hat. Der erhöhte Kontaktabstand kann eine Folge von der weiteren Auseinanderfahrbewegung nach der Unterschreitung von I_{Abriss} (siehe Abbildung 3.21) sein. Unter der Annahme, dass der minimale Lichtbogenstrom für unterschiedliche Geschwindigkeiten jeweils bei gleichem Elektrodenabstand unterschritten wurde und der Strom des instabilen Lichtbogens bei verschiedenen Geschwindigkeiten aufgrund der verwendeten Induktivität eine gleich lange Zeit braucht, um auf 0 A abzusenken, vergrößert sich der Elektrodenabstand innerhalb dieser Zeit proportional zur Auseinanderfahrgeschwindigkeit. Die abweichenden Lichtbogendauern liegen im unteren Millisekundenbereich. Es kann festgehalten werden, dass die Trenngeschwindigkeit der Elektroden bei Vorhandensein von signifikanten Induktivitäten einen geringen Einfluss auf das Lichtbogenverhalten haben kann. Besonders die transienten Momente, z.B. der Moment der Erlöschung, sind hierbei hervorzuheben. Bei langsamen Geschwindigkeiten und dem Durchfahren von quasi-stationären Lichtbogenarbeitspunkten wird nicht davon ausgegangen, dass die Trenngeschwindigkeit einen Einfluss auf das Lichtbogenverhalten hat.

Rahmenbedingung: Elektrodenmaterial

Die zunächst relevantesten Elektrodenmaterialien bei zufälligen Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen als Folge von z.B. Leitungsbrüchen sind Aluminium und Kupfer. Ein besonderer Einfluss des Elektrodenmaterials wurde bei der Höhe der Mindest-/Zündspannung festgestellt. In [78] werden die Untersuchungsergebnisse für verschiedene Materialien dargestellt. Die minimalen Lichtbogenspannungen von Aluminium und Kupfer werden von Holm mit 14 V und 13 V angegeben. Auch der minimale Lichtbogenstrom, der überschritten sein muss, um stabile Lichtbögen zu erzeugen, kann

vom Elektrodenmaterial abhängen. Ebenfalls in [78] wird für Kupfer der Wert 0,43 A von Holm angegeben, Aluminium wurde nicht untersucht. Es ist zu erwähnen, dass auch von anderen Wissenschaftlern Versuche hierzu durchgeführt wurden und diese teilweise abweichende Werte gefunden haben, wie z.B. 1,15 A als minimalen Lichtbogenstrom für Kupfer von Fink [78] und 12,5 V als minimalen Lichtbogenspannung für Kupfer von Gaulrapp [78]. Weitere Werte für andere Materialien können in [55] gefunden werden. Auch ein Einfluss des Elektrodenmaterials auf den Verlauf der Kennlinie kann also nicht ausgeschlossen werden. Daher muss das Elektrodenmaterial Gegenstand der Untersuchungen sein. Um den Einfluss des Elektrodenmaterials auf das Lichtbogenverhalten bewerten zu können, wurden Lichtbogenversuche an Kupfer- und Aluminiumelektroden verglichen. Die Last ist $R_L = 0,5 \Omega$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.33 dargestellt.

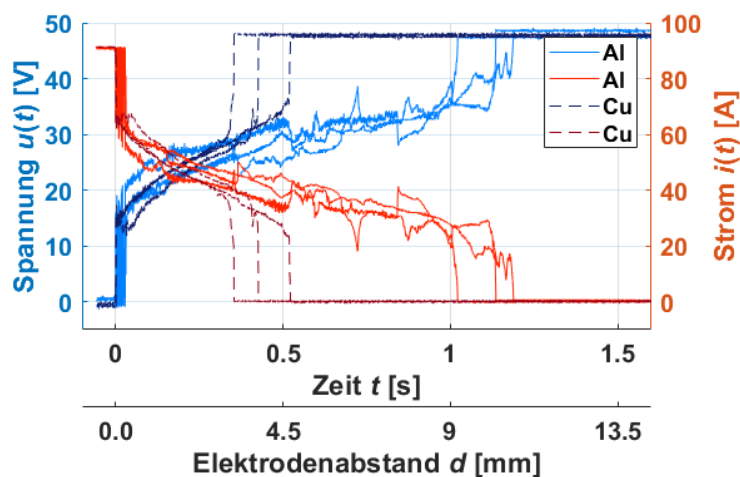


Abbildung 3.33: Variation des Elektrodenmaterials; Elektrodengeometrie: halbrund; Lastwiderstand $R_L = 0,5 \Omega$.

Anhand von Abbildung 3.33 kann erkannt werden, dass das Elektrodenmaterial einen signifikanten Einfluss auf das Lichtbogenverhalten haben kann. Besonders die maximale Lichtbogenlänge ist bei Aluminiumelektroden deutlich größer als bei Kupferelektroden. Die geringere Schmelztemperatur von Aluminium (660°C) kann gegenüber der höheren Schmelztemperatur von Kupfer (1085°C) zu einem erhöhten Metalldampfanteil und so zu einer höheren Ionisierungsrate führen. Weiterhin ist bei Kupferelektroden ein „sauberer“ Verlauf als bei Aluminiumelektroden zu verzeichnen. Das kann ebenfalls daran liegen, dass die großen Lichtbogentemperaturen bei Aluminium (geringere Schmelztemperatur) stärkere Aufschmelzung und Verformung der Elektroden verursachen. Dies kann besonders bei der Parametrierung Schwierigkeiten bereiten, da die tatsächliche Lichtbogenlänge nur ungenau angegeben werden kann. Da das

Elektrodenmaterial eine Veränderung der Lichtbogenkennlinie zur Folge haben kann, werden die Modellparameter für Aluminium und Kupfer separat ermittelt.

Rahmenbedingung: Elektrodengeometrie

Die Elektrodengeometrie kann aufgrund von zufälligen Kabelbrüchen oder Lichtbögen in Steckverbindern grundsätzlich variieren. In [79] wird gezeigt, dass die Elektrodengeometrie bei höheren Spannungen ($> 200\text{ V}$) und höheren Strömen ($> 200\text{ A}$) einen Einfluss auf die Lichtbogenbrenndauer bei Elektrodentrennung/Schalteröffnung haben kann. Halbrunde Elektroden erzeugen eine kurze Lichtbogenbrenndauer, während plane Elektroden eine längere Brenndauer zur Folge haben. Ein Einfluss der Elektrodengeometrie für 48 V Kfz-bordnetzrelevante Spannungen kann also nicht ausgeschlossen werden und muss daher Gegenstand der Untersuchungen sein. Um den Einfluss der Elektrodengeometrie auf das Lichtbogenverhalten bewerten zu können, wurden Lichtbogenversuche mit variierender Elektrodengeometrie durchgeführt. Es wurden Elektroden aus Kupfer gemäß Abbildung 3.30 verwendet. Die Last ist $R_L = 0,5\ \Omega$. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.34 dargestellt.

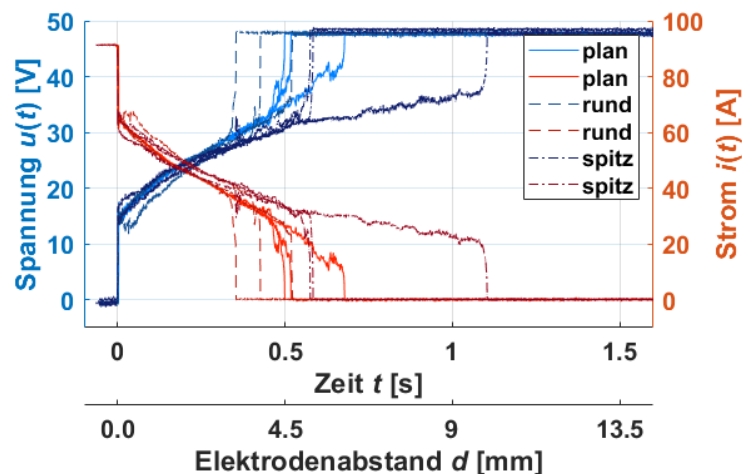


Abbildung 3.34: Variation der Elektrodengeometrie; Elektrodenmaterial: Kupfer; Lastwiderstand $R_L = 0,5\ \Omega$.

Auf Basis der dargestellten Ergebnisse kann gezeigt werden, dass die Geometrie einen Einfluss auf die Kurvenverläufe haben kann. Die spitzen Elektroden erreichen hierbei eine gesteigerte maximale Lichtbogenlänge. Lichtbögen an halbrunden Elektroden reißen am frühesten ab. Um die maximale Lichtbogenlänge als erweitertes Bewertungskriterium genauer untersuchen zu können und zudem eine Unterscheidung zu der bis hierhin oft beobachteten zufälligen Variation der maximalen Lichtbogenlänge angeben zu können, wurden Untersuchungen mit variierendem Lastwiderstand durchgeführt. Es wurden Kupferelektroden verwendet. Die Geometrie wurde zwischen

spitz und halbrund gegen plan (siehe auch Abbildung 3.27) variiert. Die Lastwiderstände waren $2\ \Omega$, $1\ \Omega$, $500\ \text{m}\Omega$, $250\ \text{m}\Omega$ und $140\ \text{m}\Omega$. Die Ergebnisse hierzu sind in Abbildung 3.35 dargestellt.

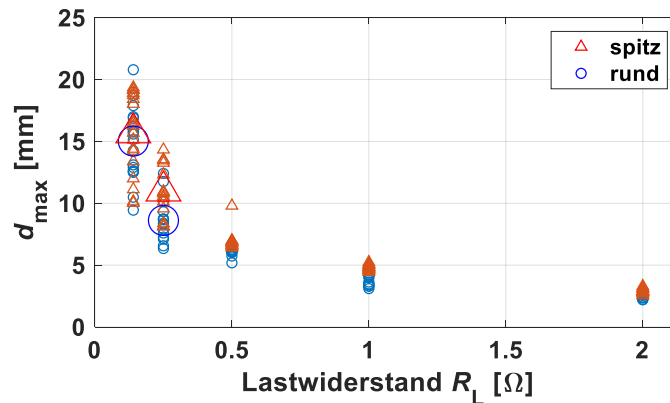


Abbildung 3.35: Abhängigkeit der maximalen Lichtbogenlänge vom Lastwiderstand bei Kupferelektroden im ohmschen seriellen Stromkreis.

Aus Abbildung 3.35 wird ersichtlich, dass gerade bei großen Lastwiderständen, also geringen Lichtbogenströmen, die maximale Länge von der Geometrie beeinflusst wird. Bei kleineren Lastwiderständen, also bei großen Lichtbogenströmen, jedoch scheinen die natürlichen Variationen durch zufällige Prozesse diese Abhängigkeit zu überlagern. Große Lichtbogenleistungen können z.B. durch Aufschmelzung der Elektroden häufiger zu zufälligen Prozessen führen. Es besteht die Möglichkeit, dass eine größere Anzahl an Messungen auch jeweils größere Lichtbogenlängen hätte erzeugen können. Aufgrund der höheren Wichtigkeit von Lichtbögen mit größeren Strömen wird im weiteren Verlauf der Arbeit auf eine gesonderte Berücksichtigung der Elektrodengeometrie verzichtet.

Fazit zu Umwelt- und andere Rahmenbedingungen

Auf Basis der durchgeführten Recherche und den Lichtbogenversuchen kann folgendes Fazit in Bezug auf eine Modellbildung von Lichtbögen bzw. die Modellparametrierung gezogen werden:

- Die Luftfeuchtigkeit, der Luftdruck, die Umgebungstemperatur, die Bewegungsgeschwindigkeit der Elektroden und die Elektrodengeometrie haben nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Lichtbogenverhalten. Die statistische Variation der Lichtbogensignale überlagert die Einflüsse. Daher werden sie in der weiterführenden Modellbildung und Parametrierung nicht explizit berücksichtigt.
- Es existiert eine statistische Variation, die vor allem bei Betrachtung der maximalen Lichtbogenlänge ersichtlich wird. Dieser Effekt soll für eine korrekte Modellbildung berücksichtigt werden.

- Das Elektrodenmaterial spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Kupfer und Aluminium werden deshalb bei der späteren Parametrierung gesondert berücksichtigt.

Die relevanten Einflüsse der Eingangsbeschaltung, sowie die ermittelte statistische Unsicherheit werden im Folgenden anhand von Lichtbogenmessungen detailliert untersucht und erläutert.

3.2.3.2 Einfluss der Eingangsbeschaltung

Wie bereits erwähnt, spielt die Beschaltung eine maßgebliche Rolle bei der Entwicklung und Einstellung der Lichtbogensignale. Bei der Darstellung und Interpretation der Beobachtungen wird im Folgenden explizit zwischen dem Zündmoment (, welcher transiente Schwingungen hervorrufen kann) und dem Brennverhalten in quasi-stationären Arbeitspunkten unterschieden. Im folgenden Abschnitt werden die relevanten Einflüsse der Eingangsbeschaltung auf Basis eigener Messungen am vorgestellten Lichtbogenprüfstand dargestellt und interpretiert.

Der Zündmoment von seriellen und parallelen Lichtbögen

Es wurde ein Versuch mit einem seriellen Lichtbogen im Aufbau gemäß Abbildung 3.15 bzw. Abbildung 3.28 durchgeführt. Der Lastwiderstand R_L beträgt hier $2,5 \Omega$. Die Leitungswiderstände waren $R_1 = 1 \text{ m}\Omega$ und $R_2 = 5 \text{ m}\Omega$. Die Induktivitäten waren $L_1 = 1 \text{ }\mu\text{H}$ und $L_2 = 30 \text{ }\mu\text{H}$. Die Abschlusskapazität war ein Elektrolytkondensator mit $C_L = 100 \text{ }\mu\text{F}$ und $R_{\text{ESR}} = 290 \text{ m}\Omega$. Lichtbogenspannung und Lichtbogenstrom eines seriellen Lichtbogens im Zündmoment sind in Abbildung 3.36 dargestellt. Die Lichtbogenzündung erfolgt zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ ms}$. Der steile Spannungsanstieg auf ca. 12 V am Lichtbogen erzeugt Stromoszillationen. Diese Oszillationen können durch den Schwingkreis aus den Leitungsinduktivitäten und der Abschlusskapazität erklärt werden. Die Dämpfung wird durch die Leitungswiderstände, sowie durch den Serienwiderstand des Kondensators erklärt. Bei Spannungsquellen, wie Batterien, können auch Innenwiderstände der Quellen einen Einfluss haben. Die Unabhängigkeit der Lichtbogenspannung vom Lichtbogenstrom im Zündmoment kann ebenfalls erkannt werden. Der Elektrodenabstand vergrößert sich in der dargestellten Millisekunde nicht signifikant, weswegen die Lichtbogenspannung nahezu konstant ist. Bei ca. $t = 0,5 \text{ ms}$ ist der Strom eingeschwungen.

In Abbildung 3.37 sind die Messungen zu einem anderen Szenario dargestellt, in welchem die Kombination aus Abschlusswiderstand ($R_L = 2,5 \Omega$), Induktivität ($L_2 = 44 \text{ }\mu\text{H}$) und Abschlusskapazität ($C_L = 220 \text{ }\mu\text{F}$) eine derart starke Stromschwin-

gung verursacht, dass der Strom bis auf null absinkt. In dem Moment, in dem der Mindeststrom für die Aufrechterhaltung des Lichtbogens unterschritten wird, verlischt der Lichtbogen und das RC-Glied bestimmt den Verlauf der Spannung an der Trennstelle.

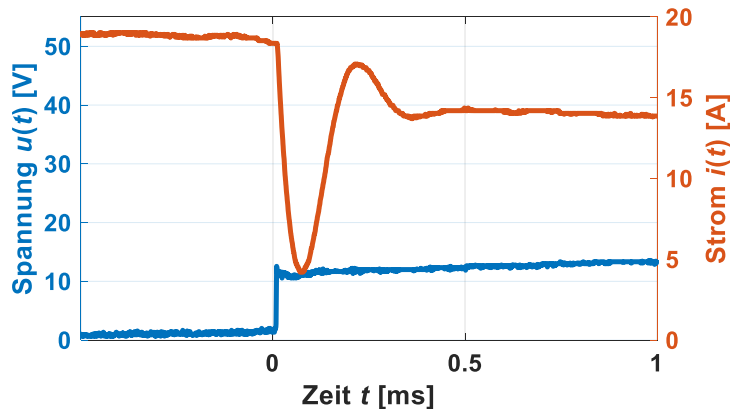


Abbildung 3.36: Einschwingvorgang des Lichtbogenstroms bei seriellen Lichtbögen.

Dieses Erlöschen aufgrund der beschriebenen Stromschwingungen wird nun Selbstlöschung genannt. Obwohl dieses Verhalten für eine lichtbogensichere Bordnetzauslegung genutzt werden könnte, besteht trotzdem die Möglichkeit einer Wiederzündung.

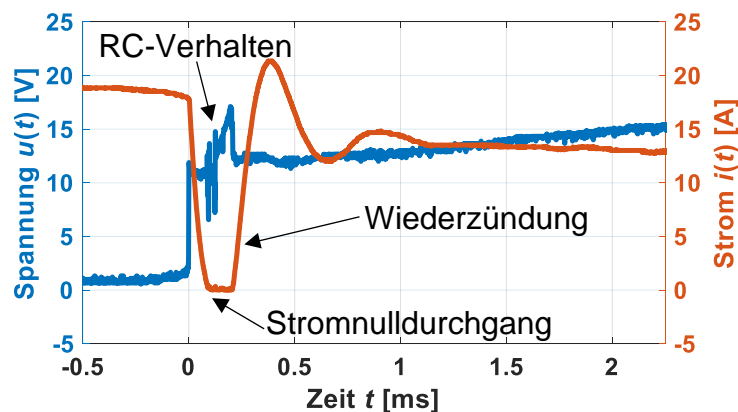


Abbildung 3.37: Erlöschen serieller Lichtbögen im Zündmoment und Wiederzündung.

Bei ca. $t = 0,25$ ms springt die Spannung wieder auf die Lichtbogenzündspannung, was impliziert, dass der Lichtbogen wieder gezündet ist. Mikrovibrationen in Kombination mit einer Elektrodenverformung und ein extrem geringer Abstand im μm -Bereich könnten hierfür der Grund sein. Dieses Verhalten wird im Folgenden bei parallelen Lichtbögen ebenfalls beschrieben.

Das Einschwingverhalten aufgrund der Beschaltung kann in 48 V Kfz-Bordnetzen einen erheblichen Einfluss auf den Lichtbogen haben und muss daher von Lichtbogenmodellen korrekt nachgebildet werden. Auch die modellbasierte Analyse und Auswahl von Bauteilkombinationen, die zur Selbstlöschung führen, kann für die lichtbogensichere Bordnetzauslegung von besonderer Wichtigkeit sein, wie später detailliert dargestellt wird.

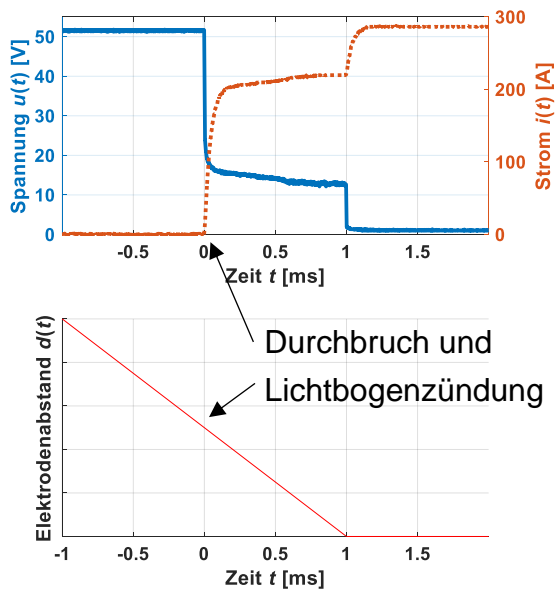


Abbildung 3.38: Parallelere Lichtbogen; Spannungs- und Strommessung, qualitatives Bewegungsprofil.

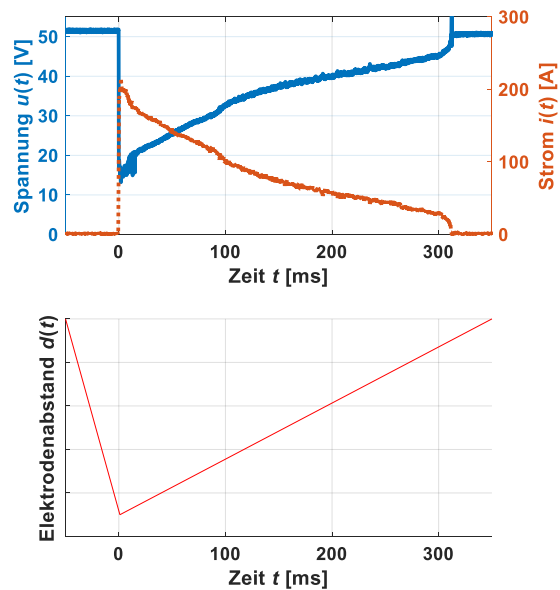


Abbildung 3.39: Parallelere Lichtbogen; Spannungs- und Strommessung, qualitatives Bewegungsprofil.

Zwei Varianten für Spannungs- und Stromverläufe bei parallelen Lichtbögen sind in Abbildung 3.38 und Abbildung 3.39 dargestellt. Der Aufbau kann anhand des Ersatzschaltbilds in Abbildung 3.15 (für den parallelen Lichtbogen) beschrieben werden. Als Quelle wurden hier jetzt vier 12 V Blei-Säure-Batterien in Reihe verwendet mit $U_{OCV} = 51$ V, $R_{in} = 30$ m Ω . L_{in} und R_L waren hierbei vernachlässigbar, der Laststrom war also 0 A. R_1 war 150 m Ω (es wurde zusätzlich zu einer Leitung noch ein Widerstand verwendet). Der Aufbau war sonst wie zuvor beschrieben. Abbildung 3.38 zeigt die Verläufe für offene Klemmen bis $t = 0$ s. Über den offenen Klemmen fällt die volle Quellenspannung ab und kein Strom fließt. Bei $t = 0$ s hat sich die Kupferelektrode stark an die Masse angenähert, sodass ein Lichtbogen entsteht. Durch ein weiteres Annähern entsteht bei $t = 1$ ms ein Kurzschluss. Hier ist deutlich zu erkennen, dass ein Kurzschluss nicht notwendigerweise vor einem Lichtbogen vorhanden sein muss. Abbildung 3.39 zeigt den Verlauf eines parallelen Lichtbogens für ein anderes Abstandsprofil über der Zeit. Bei $t = 0$ s zündet der Lichtbogen bei einem Abstand, der

größer als null ist, also nicht im Kurzschluss. Im Zündmoment ändert der Prüfstand die Bewegungsrichtung und verlängert den Lichtbogen wieder bis er bei ca. $t = 300$ ms aufgrund von der überschrittenen maximalen Länge bzw. des unterschrittenen minimalen Stroms abreißt.

Das Brennverhalten in quasi-stationären Arbeitspunkten

Nachdem alle transienten Effekte im Zündmoment abgeklungen sind, kann sich im Gesamtsystem ein quasi-stationärer Arbeitspunkt einstellen. Den Gesamtverlauf der quasi-stationären Lichtbogensignale kann man hier besonders gut darstellen und analysieren. In Abbildung 3.40 ist der Spannungs- und Stromverlauf eines seriellen Lichtbogens dargestellt, mit $R_1 = R_2 = 1$ m Ω , $L_1 = L_2 = 1$ μ H, $C_L = 0$ μ F und $R_L = 0,5$ Ω . Einschwingvorgänge sind hier nicht zu beobachten. Anhand dieser Darstellung lässt sich der Spannungsverlauf in die zuvor erwähnten drei Abschnitte/Phasen einteilen. Ein Spannungssprung U_{AD} im Zündmoment stellt das Anoden- und Kathoden-Fallgebiet dar. Hiermit ist ein minimaler Spannungsabfall am Lichtbogen definiert. Diese Spannung ist materialabhängig [78]. Ein weiterer Bereich ist $U_P(d, I)$, ein längen- und stromabhängiger Spannungsabfall, der an der Lichtbogensäule entsteht. Bei Erreichen eines minimalen Stroms bzw. einer maximalen Länge reißt der Lichtbogen ab.

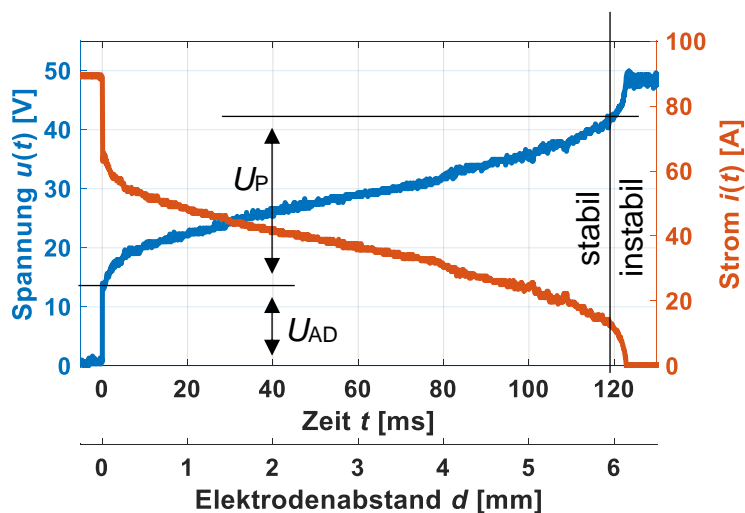


Abbildung 3.40: Lichtbogensignale bei Kupferelektroden als Abfolge quasi-stationärer Arbeitspunkte bis zum instabilen Lichtbogen.

Da hier die maximale Spannung, bestimmt durch die Eingangsbeschaltung, noch nicht erreicht ist, kann man auf dieser Basis einen dritten Spannungsbereich definieren, den Bereich des instabilen Lichtbogens.

3.2.3.3 Zufällige Variationen

Wie bereits dargestellt, spielen bei Lichtbögen auch statistische Prozesse eine Rolle. Diese machen sich insbesondere im Bereich der maximalen Lichtbogenlänge bemerkbar. Keine zwei Lichtbogenmessungen verlaufen identisch. In Abbildung 3.41 sind zwei Lichtbogenmessungen dargestellt. Beide Messungen wurden im Aufbau nach Abbildung 3.15 (serieller Lichtbogen) erzeugt und gemessen: $R_1 = R_2 = 1 \text{ m}\Omega$, $L_1 = L_2 = 1 \text{ }\mu\text{H}$, $C_L = 0 \text{ }\mu\text{F}$, $R_L = 250 \text{ m}\Omega$, mit einer konstanten Elektrodengeschwindigkeit von 95 mm/s und Kupferelektroden.

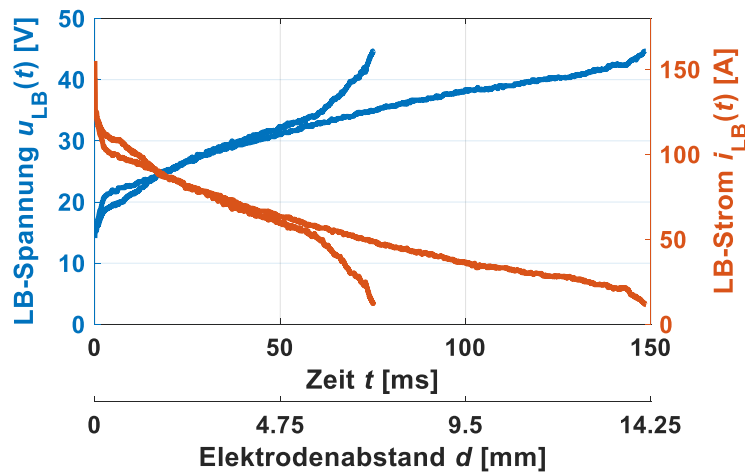


Abbildung 3.41: Zwei aufeinanderfolgende Lichtbogenmessungen.

Trotz der konstanten Rahmenbedingungen reißen beide Lichtbögen zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten, bzw. bei zwei sehr unterschiedlichen Elektrodenabständen ab. Diese Variabilität kann z.B. durch zufällige Prozesse im Plasma oder minimale, unvermeidbare Abweichungen im Versuchsaufbau verursacht werden.



Abbildung 3.42: Exemplarische Darstellung der Deformation an Kupfer- und Aluminiumelektroden nach mehreren Lichtbogenversuchen.

Eine weitere Möglichkeit, diese zufälligen Abrissprozesse bei variierendem maximalen Elektrodenabstand zu erklären, ist eine zufällige Aufschmelzung bzw. ein Abbrand der Elektroden, wie in Abbildung 3.42 dargestellt.

Weiterhin können Biegeerscheinungen der Plasmasäule ebenfalls dazu führen, dass die tatsächliche Lichtbogenlänge größer als der Elektrodenabstand ist [80], [81]. Thermische Effekte könnend dazu führen, dass der Lichtbogen sich nach oben biegt [80], [81]. In Abbildung 3.43 ist ein serieller gebogener Lichtbogen dargestellt, mit einer ohmschen Last von $10\ \Omega$ [80].

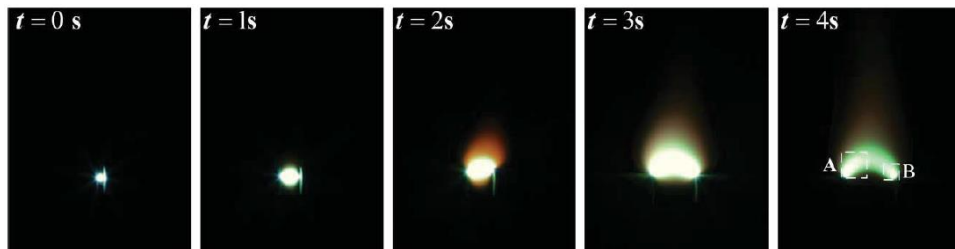


Abbildung 3.43: "Generation and developing procedure of dc arc at current of 7 A, and electrode moving speed of 2.5 mm/s". [80]

In Abbildung 3.44 ist die exemplarische Biegung eines seriellen Lichtbogens in einem ohmschen Stromkreis mit einem Initialstrom von 10 A dargestellt [81].

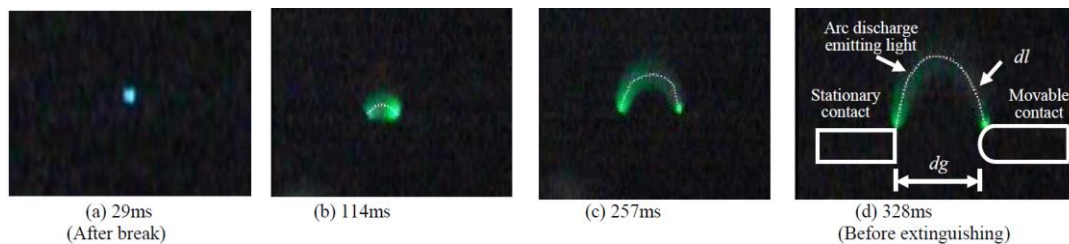


Abbildung 3.44: "Example of typical photograph of arc discharge light ($E=200V$, $I_0=10A$, $v=50mm/s$, Ag contacts arc)". [81]

Weiterhin wird bereits in [82] dargestellt, dass neben den schwer beschreibbaren Einflüssen durch Umweltbedingungen auch andere unbekannte Rahmenbedingungen, wie z.B. Luftbewegungen am Lichtbogenspalt, zu einem verfrühten Abriss führen können.

In [53] wird zwischen Niederstrom- und Hochstrombögen ($> 80\ A$) unterschieden. Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Bewegung der Lichtbogensäule. Dies kann eine Erklärung für den zunächst ähnlichen Strom-/Spannungsverlauf bei hohen Strömen in Abbildung 3.41 sein. Um möglichst realistische Lichtbogensimulationen durchführen zu können, kann es nötig sein, den dargestellten statistischen Charakter von Lichtbögen in dem Lichtbogenmodell zu berücksichtigen.

3.2.3.4 Lichtbogenrauschen

Auch das Frequenzspektrum eines Lichtbogens kann zur Beschreibung der Eigenschaften herangezogen werden. Sehr häufig werden diese Eigenschaften als Detektionskriterium in z.B. Photovoltaikanlagen genutzt.

Die Beiträge des Lichtbogens zu bereits vorhandenen Frequenzen im Bordnetz [83] können grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilt werden. Zunächst können die Frequenzanteile der schnellen Vorgänge im Zündmoment analysiert werden. Hierbei spielt z.B. die steile Flanke im Spannungs- und ggf. im Stromsignal eine wichtige Rolle. Analysen hierzu wurden z.B. in [84] dargestellt. Weiterhin beziehen sich verschiedene Untersuchungen [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92] auf die Frequenzanteile des Lichtbogenrauschens eines Lichtbogens im quasi-stationären Arbeitspunkt. In [85] wird ein Verhaltensmodell gezeigt, welches auf [86] basiert, und um angepasstes rosa Rauschen als für einen Lichtbogen charakteristisches Rauschen ergänzt wird. Ideales rosa Rauschen wird von z.B. [87], [88] vorgeschlagen. In z.B. [89] wird in einer Photovoltaik-Umgebung ein rosa Rauschbeitrag eines Lichtbogenfehlers im Bereich bis 1 kHz messtechnisch nachgewiesen. Besonders im Hinblick auf eine mögliche Detektion ist es notwendig, das Lichtbogenrauschen vom Rauschbeitrag anderer Systemkomponenten zu unterscheiden, wie es z.B. in [90] vorgeschlagen wird. Lichtbogenrauschen in PV-Anlagen wird von [91] in einem Bereich um 39 MHz identifiziert. Auf der anderen Seite beschreibt [92] einen Lichtbogenbeitrag zum Spektrum unterhalb von 10 MHz.

Die vorhandene Messtechnik in Kfz-Bordnetzen ist oft sehr langsam. Nicht nur die Messtechnik selber, sondern auch die Möglichkeit der Messwertkommunikation über Bus-Systeme, also der Sensorfusion in einem zentralen Steuergerät, limitiert die Geschwindigkeit. Somit ist eine Detektion, die auf dem Lichtbogenrauschen basiert mit vorhandenen Bordmitteln nicht einfach möglich. Zusätzlich ist in Kfz-Energiebordnetzen auch in normalen Betriebszuständen durch Schalthandlungen, Leistungselektronik oder andere EMV-Störquellen ein zu großen Teilen zufälliger und unbekannter Rauschbeitrag enthalten. Basierend auf der oben dargestellten Recherche scheint das Lichtbogenrauschen zusätzlich stark von der äußeren Beschaltung abhängig zu sein. Weiterhin ist die zu erwartende Energie im Rauschanteil gering, wodurch dieser Anteil nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Gefährdungspotential haben kann. Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Arbeit das Lichtbogenrauschen vernachlässigt.

3.2.3.5 Fazit zur Anforderungsanalyse Lichtbogenmodell

Auf Basis der dargestellten Untersuchungen können folgende Anforderungen an ein Lichtbogenmodell zur Fehlersimulation in 48 V Kfz-Bordnetzen identifiziert werden:

- Das Einschwingverhalten aufgrund von gedächtnisbehafteten Elementen der Eingangsbeschaltung muss berücksichtigt werden, um Nulldurchgänge, die zu Lichtbogenlöschung führen, simulieren zu können.
- Die Strom-Spannungs-Charakteristik von Lichtbögen muss korrekt wiedergegeben werden, um die Lichtbogenenergie korrekt simulieren zu können.
- Der Einfluss der Umgebungsvariablen Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Umgebungstemperatur und Elektrodengeometrie gehen in der statistischen Variation (z.B. der Lichtbogenlänge) unter, die Bestandteil des Lichtbogenmodells sein soll.
- Die Elektrodenmaterialien Kupfer und Aluminium müssen bei der Modellparametrierung gesondert berücksichtigt werden.
- Die Rauschanteile von Lichtbögen werden aufgrund der begrenzten Messmöglichkeit, des vorhandenen großen Grundrauschens in Kfz-Bordnetzen und der Vernachlässigbarkeit bei Energiebetrachtungen nicht berücksichtigt.
- Die Messungen zeigen neben Lichtbogenscheinungen auch Kurzschlüsse und offene Kontakte. Um vollständige Szenarien simulieren zu können, muss das Lichtbogenmodell ebenfalls Kurzschlüsse und offene Klemmen simulieren können.
- 48 V Kfz-Bordnetze können sehr komplex oder zeitvariant sein. Das Modell bzw. die Modellparameter müssen unabhängig von der Eingangsbeschaltung sein. Es soll ein Zweipolmodell ohne weitere Signaleingänge (z.B. verschiedene Messpunkte im Bordnetz) sein.

Im folgenden Abschnitt werden bekannte Modellierungsansätze für Lichtbögen vorgestellt. Weiterhin werden die Modelle vor dem Hintergrund der dargestellten Anforderungsanalyse auf Ihre Anwendbarkeit in 48 V Kfz-Bordnetzen hin untersucht.

3.2.4 Bekannte Modellierungsansätze

Bei der Modellierung von Lichtbögen gibt es grundsätzlich verschiedene Ansätze. Zunächst besteht die Möglichkeit, eine physikalische Modellierung anzustreben. Hierbei werden die physikalischen Vorgänge, die auf den Plasmaeigenschaften beruhen, nachgebildet. Lichtbögen können nach [93] mit sieben Differentialgleichungen vollständig beschrieben werden. Die Tatsache, dass viele physikalische Parameter sowie komplexe Randbedingungen bekannt sein müssen, macht eine praktische Anwendung der Modelle jedoch extrem schwierig. Die korrekte Nachbildung der Vorgänge im Lichtbogenplasma ist auch nach Einschätzungen aus [94] hoch komplex und nicht einfach modellierbar. Andere, etwas vereinfachte physikalische Modelle können z.B. auf Mayr und Cassie Gleichungen basieren [95], [96]. Die Modelle basieren auf der Annahme eines Energiegleichgewichts zwischen abgeleiteter/abgestrahlter Wärme vom Lichtbogen und zugeführter elektrischer Leistung. Bei Änderung einer dieser Größen braucht

es eine Zeit bis sich dieses Gleichgewicht wieder eingestellt hat. Die Verwendung bei Fehlersimulationen in PV-Anlagen steht dabei oft im Vordergrund [95]. Der Modellierungsansatz wird in [95] jedoch als nur bei sehr kleinen Strömen ($< 7 \text{ A}$) anwendbar angegeben und ist deswegen für die Anwendung in dieser Arbeit nicht geeignet. Auch die Kombination zu einer einzigen Gleichung wurde untersucht [97], [98], [99]. Die hierbei vorausgesetzten Rahmenbedingungen unterscheiden sich jedoch teilweise sehr stark von den zuvor in dieser Arbeit für 48 V Kfz-Bordnetze identifizierten. Es werden häufig HV oder AC-Lichtbögen untersucht. Auch die in [98] beschriebenen Strombereiche im hohen Kiloamperebereich sind für 48 V-Bordnetze nicht vorrangig relevant. Trotz der reduzierten Anzahl an benötigten Parametern im Gegensatz zur Modellierung mittels sieben Differentialgleichungen ist die Parametrierung aufwendig und unterliegt Annahmen, welche nur eine eingeschränkte Anwendbarkeit erwarten lassen. Eine weitere Schwierigkeit bei der Verwendung dieser Modellansätze besteht darin, dass nicht die Lichtbogenlänge als direkter Parameter verwendet werden kann. Der vorrangige Einsatzzweck der dargestellten Gleichungen ist also zunächst die Kleinsignalanalyse.

Aus diesen beschriebenen Gründen und aufgrund der Tatsache, dass für die Simulation der Auswirkungen von Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen die inneren Vorgänge in Lichtbögen nicht relevant sind, wird der Ansatz der physikalischen Modellbildung in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Neben der physikalischen Modellierung existiert die Verhaltensmodellierung der Lichtbögen. Hierbei wird verhaltensbasiert der nichtlineare Zusammenhang zwischen Lichtbogenstrom, Lichtbogenspannung und Lichtbogenlänge dargestellt. Wie beschrieben variiert dieser Zusammenhang mit Veränderung der Lichtbogenlänge. Der Großteil aller Darstellungen kann auf die folgende Gleichung zurückgeführt werden:

$$U_{\text{LB}}(I_{\text{LB}}, d_{\text{LB}}) = A'(d_{\text{LB}}) + \frac{D'(d_{\text{LB}})}{I_{\text{LB}}^n} \quad (3.7)$$

Mit U_{LB} = Lichtbogenspannung, I_{LB} = Lichtbogenstrom, d_{LB} = Lichtbogenlänge, $A'(d_{\text{LB}})$ und $D'(d_{\text{LB}})$ = Modellfunktionen und n = weiterer Modellparameter. Alle Modellparameter besitzen hierbei nur mittelbar einen physikalischen Hintergrund. Ein kurzer Überblick über die gängigsten Ansätze ist in Tabelle 4 dargestellt.

Eine fehlende Längenabhängigkeit, wie z.B. von Nottingham, kann aufgrund der Verschiebung der Kennlinie mit Variation der Länge keine akkuraten Simulationsergebnisse hervorbringen (siehe Abbildung 3.19). Wie in [100] gezeigt, kann hier zwar die Längenabhängigkeit als Erweiterung des Ansatzes eingebracht werden, für 48 V Kfz-Bordnetzanwendungen sind Ansätze mit linearem Zusammenhang zwischen

Lichtbogenspannung und Lichtbogenlänge jedoch nicht geeignet (siehe Abbildung 3.20). Sowohl die Steinmetz-Gleichung als auch die Ayrton- und Rieder-Gleichung weisen diesen linearen Zusammenhang auf, weshalb keine der Gleichungen für die Anwendung in dieser Arbeit geeignet ist. Der Ansatz in [101] hat neben der elektrischen Modellierung auch die thermische Modellierung im Fokus und beschreibt Lichtbögen speziell in elektromechanischen Relais. Die erzielten Ergebnisse der thermischen Simulationen werden jedoch auch in der Beschreibung schon als nicht zutreffend beschrieben. Weiterhin kann eine Stromabhängigkeit der Lichtbogenspannung im Zündmoment aufgrund eines verwendeten Offsets für $D'(d_{LB})$ die Bedingung, dass der Zündmoment korrekt nachgebildet werden muss, nicht erfüllen (siehe Abbildung 3.36). Diese Abhängigkeit kann bei Steinmetz und Ayrton gefunden werden.

Tabelle 4: Modellierungsansätze für Lichtbogenkennlinien. Individuelle Koeffizienten (A_x , B_x , C_x , D_x) sind möglich (Index wurde zur Unterscheidung verwendet).

Nottingham-Gleichung [62], [100]	$U_{LB} = A_N + \frac{B_N}{I_{LB}^n}$
Steinmetz-Gleichung [62]	$U_{LB} = A_S + \frac{C_S \cdot (d_{LB} + D_S)}{I_{LB}^{0,5}}$
Ayrton-Gleichung [62]	$U_{LB} = A_{Ay} + B_{Ay} \cdot d_{LB} + \frac{C_{Ay} + D_{Ay} \cdot d_{LB}}{I_{LB}}$
Zeller-Gleichung [101]	$U_{LB} = U_{AK} + E_Z(t) \cdot d_{LB} \text{ mit } E_Z(t) = f(I_{LB}, d_{LB}, \dots)$
Rieder-Gleichung [53]	$U_{LB} = A_R + (B_R + d_{LB}) \cdot E_R(I_{LB}) \text{ mit } E_R(I_{LB}) = C_R \cdot \left(\frac{\ln(I_{LB})}{D_R}\right)^{-3}$

In [86] und [102] werden erweiterte verhaltensbasierte Modellansätze vorgestellt bzw. verwendet, die jedoch direkt Informationen über die Eingangsbeschaltung benötigen. Weiterhin wird ein bekannter Spannungsabfall an der Lichtbogentrennstelle vorausgesetzt, an den sich die Lichtbogenspannung mit sich verlängernder Lichtbogenlänge annähern kann. In [86] wird dies am Beispiel eines seriellen Lichtbogens demonstriert. Da ein von der Beschaltung unabhängiges Lichtbogenmodell angestrebt wird, sind diese Modellansätze ebenfalls ungeeignet für das Ziel dieser Arbeit.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass es viele Verhaltensmodelle gibt, die jedoch die speziellen Anforderungen an Lichtbogenmodelle für Simulationen von 48 V Kfz-Bordnetzen nicht erfüllen können. Aus diesen Gründen müssen die bestehenden

Modelle weiterentwickelt werden. Diese Weiterentwicklung und die vollständige Implementierung werden im Folgenden beschrieben. Außerdem wird zu Vergleichszwecken die in der Literatur häufig zu findende Ayrton-Gleichung ebenfalls implementiert und parametrisiert. Als neue Lichtbogengleichung für Lichtbögen in 48 V Kfz-Bordnetzen und als Erweiterung der Ayrton-Gleichung wird die ALVE-Gleichung vorgeschlagen (Ayrton-Low-Voltage-Erweiterung).

3.2.5 Ayrton-Low-Voltage-Erweiterung (ALVE)

Die große Mehrheit aller Lichtbogengleichungen, die eine Verhaltensbeschreibung der Zusammenhänge von der Lichtbogenspannung, des Lichtbogenstroms und der Lichtbogenlänge darstellen, fußen auf der Ayrton-Gleichung. Es kann als bewährt angesehen werden, diese Ausgangsgleichung zu verwenden und an die individuellen Rahmenbedingungen anzupassen. Deswegen ist die Ayrton-Gleichung besonders als Basis für Weiterentwicklungen geeignet. Im Folgenden wird die Entwicklung der angepassten Lichtbogengleichung, die die analysierten Anforderungen an Lichtbogensimulationen in 48 V Kfz-Bordnetzen erfüllen kann, beschrieben und erläutert.

Wie bereits dargestellt, muss im Zündmoment eine konstante Spannung das Kathoden- und Anodenfallgebiet darstellen. Daher ist ein Offset A_{ALVE} für $A'(d_{LB})$ anzusetzen. Der in vielen Lichtbogengleichungen verwendete (s.o.) lineare Zusammenhang zwischen Lichtbogenspannung und Lichtbogenlänge bei konstantem Lichtbogenstrom gilt nur für höhere Spannungen und größere Längen [65]. Der für diese Arbeit in 48 V Kfz-Bordnetzen relevante Bereich weist hier einen logarithmischen Zusammenhang auf, was auch in Abbildung 3.45 anhand von Messungen erkannt werden kann.

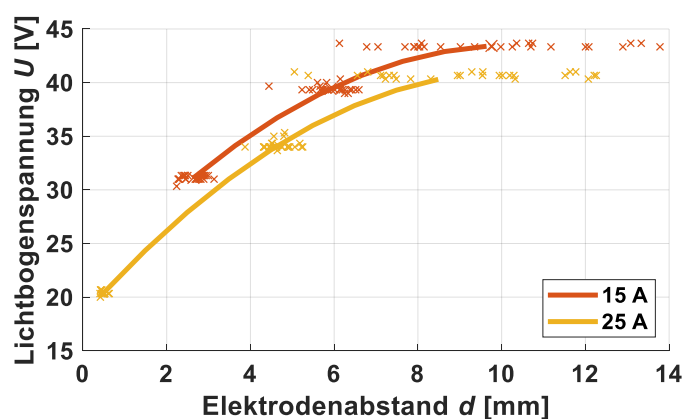


Abbildung 3.45: Lichtbogenspannung über Elektrodenabstand bei konstanten Lichtbogenströmen für Kupferelektroden.

Für größere Lichtbogenlängen verbreitert sich hierbei die Streuung (aufgrund von unvorhergesehener Bewegung und Biegung), was ebenfalls anhand der Grafik erkannt

werden kann. Die eingezeichneten logarithmischen Kurven können hiervon negativ beeinflusst worden sein.

Weiterhin darf keine Stromabhängigkeit der Lichtbogenspannung im Zündmoment bestehen. Aus diesen Gründen wird als Ansatz, bei dem möglichst wenige Parameter bestimmt werden müssen, der jedoch gleichzeitig die relevanten Eigenschaften gut abbilden kann, die folgende neue Modellstruktur zur Parametrierung vorgeschlagen.

$$A'(d_{LB}) = A_{ALVE} + B_{ALVE} \cdot \ln(C_{ALVE} \cdot d_{LB} + 1) \quad (3.8)$$

$$D'(d_{LB}) = D_{ALVE} \cdot d_{LB} \quad (3.9)$$

Die vollständige Lichtbogengleichung ist dann:

$$U_{LB}(I_{LB}, d_{LB}) = A_{ALVE} + B_{ALVE} \cdot \ln(C_{ALVE} \cdot d_{LB} + 1) + \frac{D_{ALVE} \cdot d_{LB}}{I_{LB}} \quad (3.10)$$

Ein ohmscher Bereich für hohe Ströme wird nicht berücksichtigt, da diese Spannungsabhängigkeit für in Luft brennende Lichtbögen bis ca. 1000 A eher gering ist [103] und auch in den durchgeführten und später dargestellten Messungen nicht nachgewiesen werden konnte.

Die beschriebene Ungenauigkeit in der Lichtbogenlänge, sowie unbekanntes Umweltbedingungen werden zusammengefasst und mit $d_{LB} = d + \Delta d$ modelliert, wobei d der Elektrodenabstand und Δd der Unterschied zwischen der Lichtbogenlänge d_{LB} und dem Elektrodenabstand d ist. Eine Anpassung der Modellstruktur um einen statistischen Parameter wird in der folgenden Gleichung vorgestellt:

$$U_{LB}(I_{LB}, d) = A_{ALVE} + B_{ALVE} \cdot \ln(C_{ALVE} \cdot (d + \Delta d) + 1) + \frac{D_{ALVE} \cdot (d + \Delta d)}{I_{LB}} \quad (3.11)$$

Der Parameter Δd kann von verschiedenen Größen, wie z.B. Elektrodenverformung, Verschmutzungen, von der Variation des Angriffspunktes des Lichtbogens oder Luftbewegung abhängen. Auch thermische Effekte können eine Verlängerung verursachen, die zu einer Biegung des Lichtbogens führen kann. Um die Lichtbogenbiegung zu beschreiben, wird ein allgemeiner quadratischer Ansatz gewählt. Dieser ist Abbildung 3.46 dargestellt und kann beschrieben werden mit:

$$h(x) = -\frac{4h_{\max}}{d^2}x^2 + h_{\max} \quad (3.12)$$

Die tatsächliche Bogenlänge d_{LB} kann mit dem folgenden Zusammenhang berechnet werden:

$$d_{LB} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \sqrt{1 + (h'(x))^2} dx \quad (3.13)$$

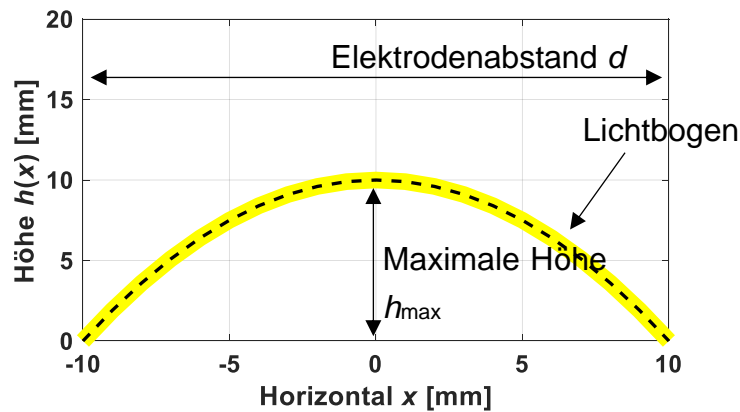


Abbildung 3.46: Gebogener Lichtbogen.

Die maximale Höhe h_{max} des Bogens ist unbekannt und wird abhängig vom Elektrodenabstand angenommen. Es wird ein allgemeiner quadratischer Zusammenhang mit

$$h_{max}(d) = a \cdot d^2 \quad (3.14)$$

angenommen. Nach Einsetzen in Gleichung (3.12) und Gleichung (3.13) kann die angenommene tatsächliche Lichtbogenlänge in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand d und einer Zufallsvariablen a angegeben werden mit:

$$d_{LB} = \frac{\arcsin(4 \cdot a \cdot d) + 4 \cdot a \cdot d \cdot \sqrt{16 \cdot a^2 \cdot d^2 + 1}}{8 \cdot a} \quad (3.15)$$

3.2.6 Zustandsübergangsdiagramm und Ersatzschaltbild

In einem vollständigen energietechnischen Fehlerszenario in 48 V Kfz-Bordnetzen tritt der Lichtbogen wahrscheinlich nicht alleine auf, sondern häufig ist ein Kurzschluss oder sind offene Klemmen vor- oder nachgelagert. Hierbei können diese Zustände sowohl einen normalen Betriebszustand oder auch einen weiteren Fehlerzustand darstellen. In Abbildung 3.47 sind exemplarisch mögliche Zustandsübergänge bei einem seriellen Lichtbogenfehler dargestellt. Hierbei fließt zunächst ein Nennstrom über einen Stecker. Sobald der Stecker getrennt wird, bildet sich ein Lichtbogen aus. Nun

fließt der vom Lichtbogen beeinflusste Strom und die Lichtbogen­spannung fällt am Stecker ab. Wenn sich der Stecker weiter auseinanderbewegt und die Distanz die maximale Lichtbogenlänge überschreitet, verlischt der Lichtbogen und die Klemmenspannung fällt über den offenen Klemmen ab.

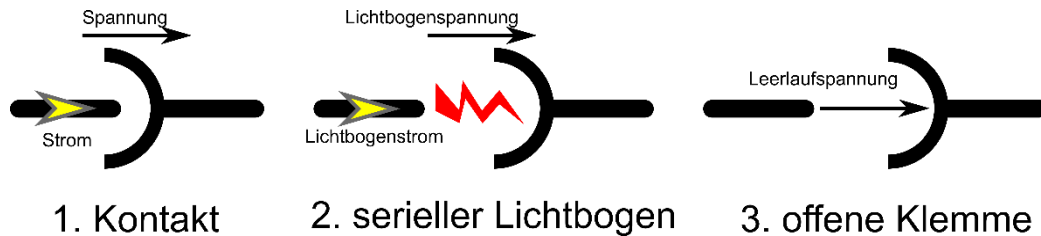


Abbildung 3.47: Beispiel für Zustandsübergänge zwischen einem Kurzschluss, einem Lichtbogen und offenen Klemmen bei einem seriellen Lichtbogenfehler.

In Abbildung 3.48 sind exemplarisch mögliche Zustandsübergänge bei einem parallelen Lichtbogenfehler dargestellt. Hierbei fließt zunächst ein Nennstrom durch das Kabel zum Verbraucher. Sobald das Kabel mit der beschädigten Isolation die Masse berührt, entsteht ein Kurzschluss. Nun fließt ein Kurzschlussstrom. Wenn der Abstand zwischen Isolationsfehler und Masse sich nun wieder vergrößert, entsteht ein paralleler Lichtbogen. Dann fließt der vom Lichtbogen beeinflusste Fehlerstrom. Der Lichtbogen kurz vor der Masseberührung (zwischen 1. und 2.) wurde bei dieser Darstellung vernachlässigt.

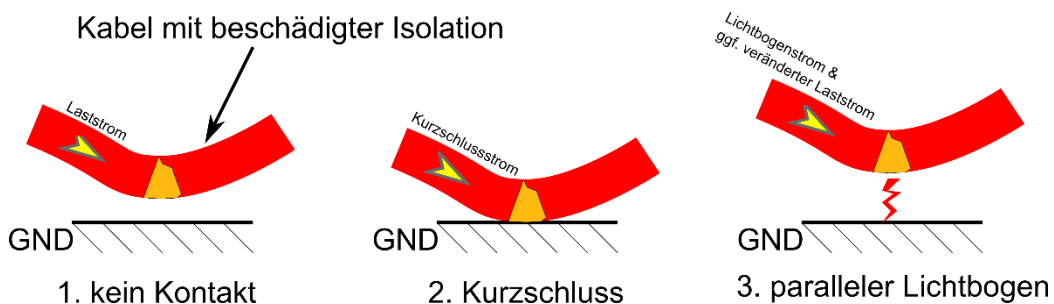


Abbildung 3.48: Vereinfachtes Beispiel für Zustandsübergänge bei parallelen Lichtbögen (vernachlässigte Lichtbogenbildung bei Elektrodenannäherung).

Wenn beliebige Fehlerszenarien simuliert werden sollen, muss das Lichtbogenmodell von einem Zustandsübergangsdiagramm gesteuert werden. Dieses Zustandsübergangsdiagramm enthält den Kurzschluss, den Lichtbogen und offene Klemmen als Zustände berücksichtigen. Abhängig von den simulierten Szenarien werden diese Zustände variiert. Das Übergangsdiagramm und die Bedingungen für Zustandsüber-

gänge sind in Abbildung 3.49 dargestellt. Die Doppelkreise stehen für mögliche Initialzustände. Wenn das Modell mit einem Elektrodenabstand von 0 mm gestartet wird, ist der Kurzschluss der Initialzustand, ansonsten startet das Diagramm mit offenen Klemmen. Bei einem Start im Kurzschluss und einer Erhöhung des Abstands und einem Stromfluss von 0 A kann kein Lichtbogen entstehen und das Modell geht in offene Klemmen über. Wenn jedoch ein Stromfluss besteht, geht das Modell in den Lichtbogen über. Wenn jedoch ein Stromfluss besteht, geht das Modell in den Lichtbogen über. In [55] wird gezeigt, dass auch bei unzureichender Quellenspannung die vorhandenen Induktivitäten kurzzeitig eine für einen Lichtbogen ausreichende Spannung induzieren können. Ein schnell sinkender Strom würde im Modell dann schnell zu einem weiteren Zustandsübergang zu offenen Klemmen führen. Daher ist dieser Übergang auch bei geringen Strömen und Spannungen zulässig. Wenn sich das Modell im Lichtbogenzustand befindet und der Elektrodenabstand wieder auf 0 mm gesenkt wird, geht das Modell wieder in einen Kurzschluss über. Wenn sich das Modell jedoch im Lichtbogenzustand befindet und der Lichtbogenstrom zu klein wird, um den Lichtbogenzustand aufrecht zu erhalten, geht das Modell in offene Klemmen über. Die Strombedingung dieses Zustandsübergangs ist mit einem „Dach“ gekennzeichnet. Im Hinblick auf die Implementierung wird hiermit impliziert, dass es sich um eine Stromprädiktion handelt, um einen Simulationsfehler zu vermeiden. Wenn sich das Modell im Zustand der offenen Klemmen befindet und der Elektrodenabstand so klein wird, dass ein Durchschlag zu einem Lichtbogen führen (siehe Kapitel 3.2.3.2) kann, geht das Modell in den Lichtbogenzustand über. Aufgrund dieses Vorgangs ist der direkte Zustandsübergang im betrachteten 48 V Kfz-Bordnetz von den offenen Klemmen in einen Kurzschluss unzulässig.

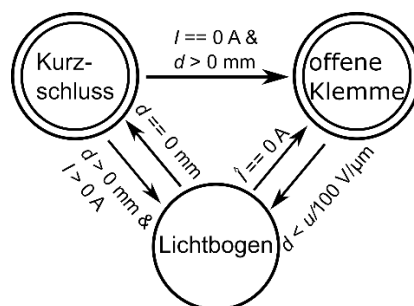


Abbildung 3.49: Zustandsübergangsdiagramm des Fehler-/Lichtbogenmodells.

Die konkrete Nachbildung der Zustände kann mittels einer gesteuerten Spannungsquelle und einem Widerstand erfolgen. Hierbei wird die gesteuerte Spannungsquelle verwendet, um die Lichtbogenspannung nachzubilden, und der gesteuerte Widerstand, um den niederohmigen Kurzschluss und hochohmige offene Klemmen nachzubilden. Das Ersatzschaltbild ist in Abbildung 3.50 dargestellt.

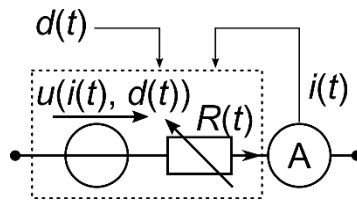


Abbildung 3.50: Ersatzschaltbild des Lichtbogenmodells.

4 Parametrierung, Validierung und Vergleich der Lichtbogenmodelle

4.1 Parametrierung der ALVE- und Ayrton-Gleichung

Die Modellparametrierung wird für die neu entwickelte ALVE-Lichtbogengleichung (siehe Gleichung (3.10) mit (3.15)) und zu Vergleichszwecken für die Ayrton-Lichtbogengleichung (siehe Tabelle 4) anhand von Messdaten durchgeführt. Die Ayrton-Gleichung wurde ausgewählt, weil sie ebenfalls eine Beschreibung der Strom-Spannungs-Charakteristik darstellt. Die einfache Parametrierung mittels vieler Messdaten ist möglich. Die Möglichkeit der Integration in das beschriebene Zustandsübergangsdiagramm, also die gleiche Implementierung, ist ebenfalls möglich. Die Modellparameter sind zunächst unabhängig von der Eingangsbeschaltung. Der ALVE-Ansatz kann weiterhin als Erweiterung der Ayrton-Gleichung angesehen werden. Für Parametrierungsmessungen wurde der Aufbau gemäß Abbildung 3.15 bzw. Abbildung 3.28 mit der elektronischen Quelle, sowie (vernachlässigbarem) $R_1 = R_2 = 1 \text{ m}\Omega$, (vernachlässigbarem) $L_1 = L_2 = 1 \text{ }\mu\text{H}$, $C_L = 0 \text{ }\mu\text{F}$ verwendet. Der Abschlusswiderstand R_L wurde variiert. Es wurden für Kupfer- und Aluminiumelektroden jeweils mit verschiedenen Lastwiderständen ($2 \text{ }\Omega$, $1 \text{ }\Omega$, $500 \text{ m}\Omega$, $140 \text{ m}\Omega$) insgesamt ca. 300 Messungen durchgeführt. Als gezielte Ergänzung konnten auch Messungen mit einem Lastwiderstand von $250 \text{ m}\Omega$ für die Parametrierung durchgeführt und verwendet werden.

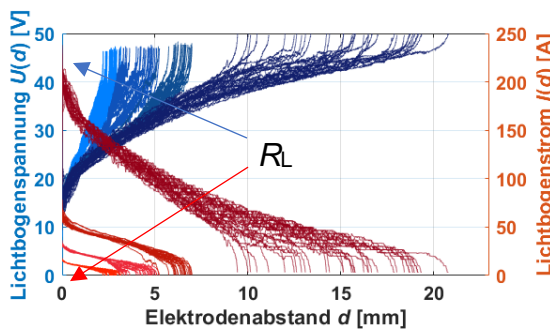


Abbildung 4.1: Darstellung der Parametrierungsmessungen für Kupferelektroden. Lastwiderstände $\approx 2 \text{ }\Omega$, $1 \text{ }\Omega$, $500 \text{ m}\Omega$, $140 \text{ m}\Omega$ von hell nach dunkel.

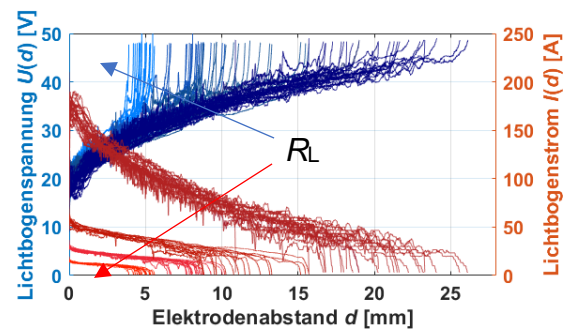


Abbildung 4.2: Darstellung der Parametrierungsmessungen für Aluminiumelektroden. Lastwiderstände $\approx 2 \text{ }\Omega$, $1 \text{ }\Omega$, $500 \text{ m}\Omega$, $140 \text{ m}\Omega$ von hell nach dunkel.

Die Elektroden wurden nach einer Sichtprüfung bei geringer Beschädigung wiederverwendet und bei größerer Beschädigung ausgetauscht. Besonders bei Aluminium waren schon nach wenigen Lichtbögen starke Aufschmelzungen zu beobachten. Ein Ein-

fluss auf die Messungen aufgrund von Elektrodenbeschädigungen kann nicht ausgeschlossen werden. Es konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen der Lichtbogenlänge und der Anzahl an vorangegangenen Lichtbogenzündungen an den Elektroden festgestellt werden. Die Messungen sind in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 dargestellt.

4.1.1 Parametrierung der Ayrton-Low-Voltage-Erweiterung (ALVE)

Zunächst werden die Messungen mit den jeweils längsten Lichtbögen, bzw. größten Elektrodenabständen, pro Lastwiderstand R_L genutzt, um so Worstcase-Parameter zu ermitteln, die ebenfalls lange Lichtbögen in der Simulation erzeugen. Es kann davon ausgegangen werden, dass trotz der großen Anzahl an Messungen, die zur Auswahl standen, auch noch längere Lichtbögen möglich sind. Auf Basis der ausgewählten Messungen werden in einem ersten Schritt die Strom-Spannungs-Kennlinien gemäß Gleichung (3.7) für definierte Lichtbogenlängen berechnet. Es wird Gleichung (3.7) verwendet, um die gemeinsame Basis der Verhaltensmodelle (hier: ALVE und Ayrton) in Form von Lichtbogengleichungen zu nutzen und zu verdeutlichen. Dies wird in der Parametrierung der Ayrton-Gleichung im nächsten Kapitel verdeutlicht. Die extrahierten Messpunkte von den längenabhängigen Strom-Spannungs-Kennlinien werden genutzt, um die Parameter A' und D' zu bestimmen. Das Fitting wird auf Basis einer Least-Squares-Optimierung durchgeführt. Die Messpunkte zur Bedatung, sowie die Modelle, basierend auf Gleichung (3.7), sind in Abbildung 4.3 für Kupferelektroden und in Abbildung 4.4 für Aluminiumelektroden abgebildet. Es wurden keine Kennlinien für längere Lichtbögen bestimmt, da hier aufgrund der Ausprägung von R_L nur 2 Messpunkte oder weniger zur Verfügung standen.

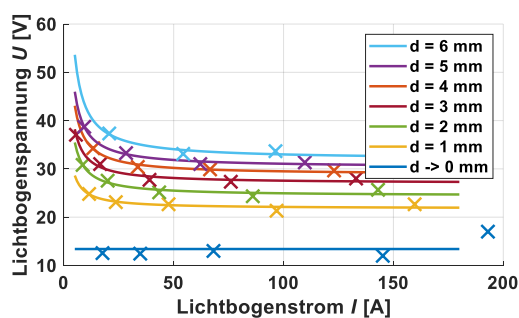


Abbildung 4.3: Strom-Spannungs-Kennlinien für ausgewählte Lichtbogenlängen für Kupferelektroden.

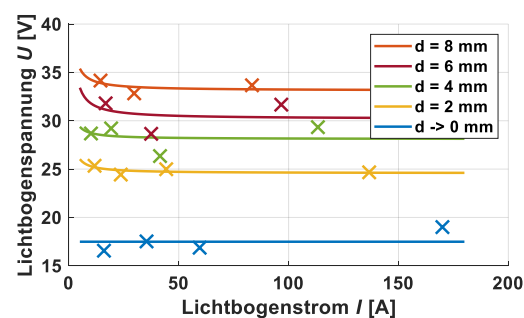


Abbildung 4.4: Strom-Spannungs-Kennlinien für ausgewählte Lichtbogenlängen für Aluminiumelektroden.

Die konkreten Parameter A' und D' , die zur Berechnung der Kennlinien für einzelne Längen ermittelt wurden, sind in Abbildung 4.5 für Kupferelektroden und in Abbildung

4.6 für Aluminiumelektroden dargestellt (rote Kreuze). Bei der Verwendung von Gleichung (3.8) und Gleichung (3.9) können die Parameter A_{ALVE} , B_{ALVE} , C_{ALVE} und D_{ALVE} ermittelt und somit die Abhängigkeit von d_{LB} beschrieben werden. Die Berechnung basiert auf einer Least-Squares-Optimierung. Die entsprechenden Modelle, also $A'(d_{LB})$ und $D'(d_{LB})$, sind ebenfalls in den Abbildungen dargestellt (blaue Linien).

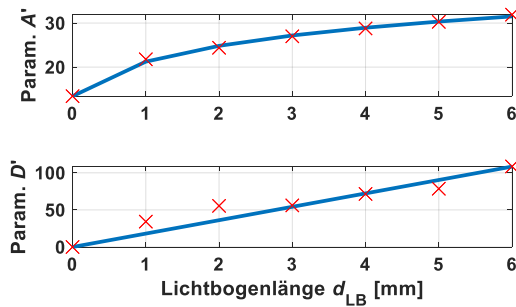


Abbildung 4.5: Modellparameter A' und D' für einzelne Lichtbogenlängen (siehe Abbildung 4.3) bei Kupferelektroden. $A'(d_{LB})$ und $D'(d_{LB})$ entsprechend der ALVE-Gleichung.

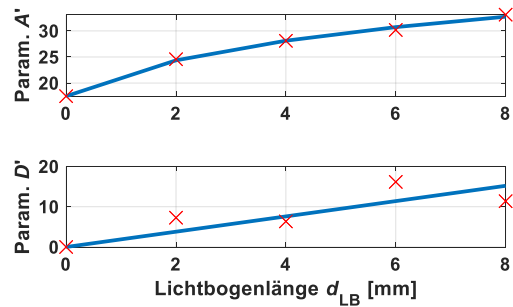


Abbildung 4.6: Modellparameter A' und D' für einzelne Lichtbogenlängen (siehe Abbildung 4.4) bei Aluminiumelektroden. $A'(d_{LB})$ und $D'(d_{LB})$ entsprechend der ALVE-Gleichung.

Die ermittelten Modellparameter zur Parametrierung von Gleichung (3.10) sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Lichtbogenparameter der ALVE-Gleichung für Aluminium und Kupfer.

	A_{ALVE} [V]	B_{ALVE} [V]	C_{ALVE} [1/mm]	D_{ALVE} [VA/mm]
Kupfer	13,4	7,4	2,0	10,0
Aluminium	17,5	9,0	0,6	1,9

Die dargestellten Parameter sind von Lichtbögen mit den größten Längen bzw. größten Elektrodenabständen abgeleitet. Hierbei gilt die Annahme, dass die Lichtbogenlänge dem Elektrodenabstand entsprach. Bei einem früheren Abreißen bei einem geringeren Elektrodenabstand wird angenommen, dass die maximale Lichtbogenlänge aufgrund von Biegung, Lichtbogenbewegungen oder Elektrodenbeschädigungen erreicht war. Besonders der Parameter A_{ALVE} für Aluminiumelektroden erscheint relativ hoch. In der zuvor vorgestellten Literatur sind deutlich niedrigere Werte für U_{min} für Aluminium bestimmt worden. Eine mögliche Erklärung für den großen Wert kann die Elektrodenbeschädigung sein. Bei Kontaktverlust tritt durch die hohen Temperaturen sofort eine starke Aufschmelzung auf, welche den Elektrodenabstand und somit die Lichtbogenlänge sofort verändert, unabhängig von der Elektrodenbewegung. Da die hier angestellten Messungen jedoch dieses Ergebnis erzeugen, wird mit diesem Parameter weiter gerechnet.

Weiterhin können Lichtbögen aufgrund von Störungen auch früher abreißen und einen leicht anderen Verlauf nehmen, wie bereits in Abschnitt 0 diskutiert. Die Streuung in den Messungen in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 für jede Konfiguration ist offensichtlich. Die dargestellten Messungen werden herangezogen, um eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Grad der Störung (Biegung) des Lichtbogens auf Basis von Gleichung (3.15) zu bestimmen. Hierbei wird die Wahrscheinlichkeitsdichte des Parameters a bestimmt. Die Verwendung einer Beta-Verteilung hat hierbei eine gute Verwendbarkeit gezeigt. Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8 zeigen die Verteilungen für Kupfer- und Aluminiumelektroden mit $\alpha_{Cu} = 1,56$, $\beta_{Cu} = 23,55$, $\alpha_{Al} = 1,99$ und $\beta_{Al} = 42,89$.

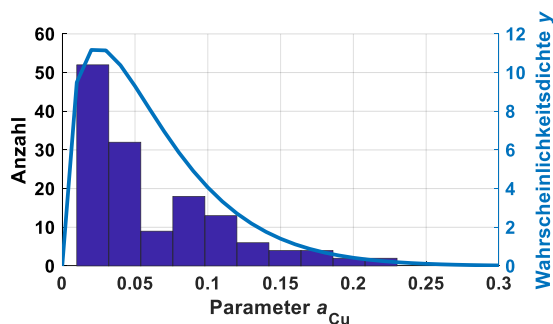


Abbildung 4.7: Wahrscheinlichkeitsdichte y von Parameter a_{Cu} (siehe Gleichung (3.15)) bei Kupferelektroden.

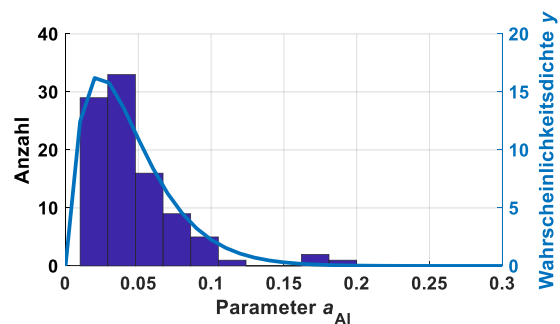


Abbildung 4.8: Wahrscheinlichkeitsdichte y von Parameter a_{Al} (siehe Gleichung (3.15)) bei Aluminiumelektroden.

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen können mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$y = f(a|\alpha, \beta) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} \cdot a^{\alpha-1} \cdot (1-a)^{\beta-1} \cdot I_{[0,1]}(a) \quad (4.1)$$

In Gleichung (4.1) beschreibt $B(\alpha, \beta)$ die Betafunktion, die folgendermaßen ausgeführt ist:

$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 a^{\alpha-1} \cdot (1-a)^{\beta-1} da \quad (4.2)$$

Die dargestellten Verteilungen zeigen, dass die meisten Lichtbögen bis zu einer großen Elektrodenentfernung ungestört brennen können, dass jedoch einige schon bei einem geringeren Abstand aufgrund von z.B. Biegung ihre maximale Länge erreicht haben und abreißen. Es gilt: $0 < a < 1$. Die obere Grenze liegt bei der dargestellten Verteilung jedoch deutlich niedriger.

4.1.2 Parametrierung der Ayrton-Gleichung

Für den Vergleich der Ansätze wird für Kupfer mit den dargestellten Messdaten in Abbildung 4.1 ebenfalls die Ayrton-Gleichung parametrieren (siehe Tabelle 4). Die Parametrierung der Ayrton-Gleichung erfolgt analog zur Parametrierung des neuen ALVE-Ansatzes. Auf die Erweiterung um die statistische Abweichung wurde verzichtet. Deshalb werden mittlere Parameter ermittelt. Zunächst werden aus allen Messungen Strom-Spannungs-Arbeitspunkte für ausgewählte Längen extrahiert. Die entsprechenden Mittelwerte sind in Abbildung 4.9 dargestellt. Als erster Schritt werden hiermit und basierend auf Gleichung (3.7) für jede Länge individuelle Parameter A' und D' berechnet. Die individuellen Parameter sind in Abbildung 4.10 dargestellt (rote X). Da die Parameter A' und D' Funktionen der Länge sind, werden in einem zweiten Schritt die Ayrton-Parameter berechnet, nämlich zwei lineare Ansätze für $A'(d_{LB})$ und $D'(d_{LB})$. Die so bestimmten Parameter A_{Ay} , B_{Ay} , C_{Ay} und D_{Ay} sind in Tabelle 6 abgebildet. Mit ihnen wurden die Geraden in Abbildung 4.10 ergänzt.

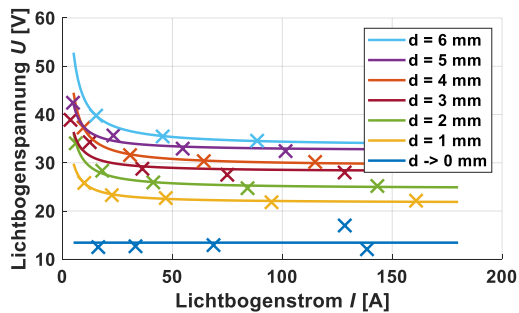


Abbildung 4.9: Mittlere Strom-Spannungs-Kennlinien für ausgewählte Lichtbogenlängen für Kupferelektroden.

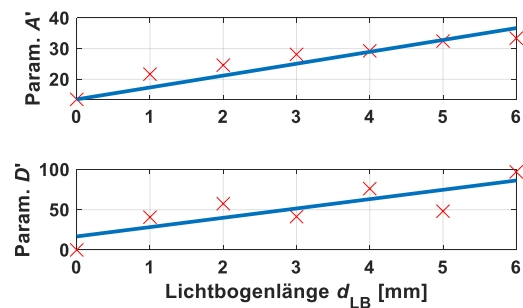


Abbildung 4.10: Modellparameter A' und D' für einzelne Lichtbogenlängen (siehe Abbildung 4.9) bei Kupferelektroden. $A'(d_{LB})$ und $D'(d_{LB})$ entsprechend der Ayrton-Gleichung.

Tabelle 6: Mittlere Modellparameter für die Ayrton-Gleichung.

	A_{Ay} [V]	B_{Ay} [1/mm]	C_{Ay} [VA]	D_{Ay} [VA/mm]
Kupfer	13,4	3,9	16,8	11,6

4.2 Validierung und Vergleich

In den vorangegangenen Kapiteln wurden zunächst konkrete Anforderungen an ein Lichtbogenmodell für Fehlersimulationen in 48 V Kfz-Bordnetzen formuliert. Diese Anforderungen waren das Ergebnis einer Literaturrecherche und eigener Messungen.

Anschließend wurde vorgestellt, wie diese Anforderungen mit einem Modell umgesetzt werden können. Die neu entwickelte ALVE-Gleichung, sowie die zum Vergleich herangezogene Ayrton-Gleichung wurden mittels der Messungen parametrierung. In Anhang B: Implementierung des Lichtbogenmodells wird die konkrete Implementierung des Lichtbogenmodells beschrieben. In diesem Kapitel werden die Modellvalidierung, ein Vergleich der Ansätze und eine detaillierte Erklärung der transienten Stromschwingungen im Zündmoment und der quasi-stationären Arbeitspunkte während des stabilen Brennens vorgestellt.

4.2.1 Zündvorgang des Lichtbogens

Eine besondere Wichtigkeit wurde den transienten Stromverläufen bei der Lichtbogenzündung in 48 V Kfz-Bordnetzen zugeschrieben, wie in Kapitel 3.2.3 dargestellt wurde. Aufgrund der Bordnetzeigenschaften können Lichtbögen solche Stromschwingungen anregen. Diese müssen in der Simulation korrekt nachgebildet werden, um besonders die Selbstlöschung richtig zu simulieren. Das kann bei der Auslegung von 48 V Kfz-Bordnetzen hilfreich sein.

Die Modellvalidierung wird exemplarisch für die Basistopologie *Einzelleitung* (siehe Abbildung 3.15) durchgeführt. Die Verbindungsleitung von der Quelle zum Lichtbogenprüfstand hat den Widerstand $R_1 = 5 \text{ m}\Omega$ und die Induktivität $L_1 = 5 \text{ }\mu\text{H}$. Die Verbindungsleitung zur Last, die Lastkapazität und der Lastwiderstand wurden bei den im Folgenden dargestellten Versuchen und Simulationen variiert und sind deswegen separat genannt.

In Abbildung 4.11 ist eine Messung, sowie eine Simulation mittels der ALVE-Gleichung, sowie mit der Ayrton-Gleichung dargestellt. Die Verbindungsleitung vom Prüfstand zur Last hatte $R_2 = 5 \text{ m}\Omega$ und $L_2 = 5 \text{ }\mu\text{H}$. Die Lastkapazität C_L betrug $550 \text{ }\mu\text{F}$ mit einem R_{ESR} von etwa $300 \text{ m}\Omega$ und der Lastwiderstand war $R_L = 1,02 \text{ }\Omega$. Für einen durchschnittlichen Lichtbogen wurde $a = 0,025$ gewählt. Der Elektrodenabstand wurde mit 10 mm/s vergrößert. Der Parameter a und die Auseinanderfahrgeschwindigkeit haben jedoch in den durchgeführten Simulationen fast keinen Einfluss, da die erreichten Längen nach den dargestellten 1 bis 2 ms sehr gering sind.

Die Messung in Abbildung 4.11 zeigt einen Spannungssprung, der innerhalb der dargestellten Zeit nur geringfügig variiert. Weiterhin ist eine Stromschwingung ebenfalls eindeutig erkennbar. Der Lichtbogenstrom hat sich bei 2 ms auf einen festen Wert eingeschwungen. Die Übereinstimmung von Messung und Simulation mit dem neuen ALVE-Ansatz ist sehr gut. Sowohl der Spannungs- als auch der Stromverlauf werden sehr gut abgebildet. Die Simulation mit der Ayrton-Gleichung zeigt deutlich, dass die Stromabhängigkeit im Zündmoment mit $C_{\text{Ay}}/l_{\text{LB}}$ für $d_{\text{LB}} = 0 \text{ mm}$ (siehe Tabelle 4) einen

Spannungsanstieg aufgrund der Stromschwingung verursacht. Dieser Spannungsanstieg führt dazu, dass die Stromschwingung zusätzlich verstärkt wird. Dieser Effekt führt dazu, dass das Modell einen Stromnulldurchgang erkennt und somit fälschlicherweise eine Selbstlöschung abbildet. Ein zweites Beispiel mit $R_2 = 25 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 25 \text{ }\mu\text{H}$, $R_L = 2,52 \text{ }\Omega$, $C_L = 80 \text{ }\mu\text{F}$ und einem R_{ESR} von ca. $400 \text{ m}\Omega$ ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Aufgrund der geänderten Bauteilkombinationen verändert sich die Frequenz und Amplitude der Schwingung. Die deutlich bessere Abbildung in der Simulation durch den neuen ALVE-Ansatz ist ebenfalls ersichtlich.

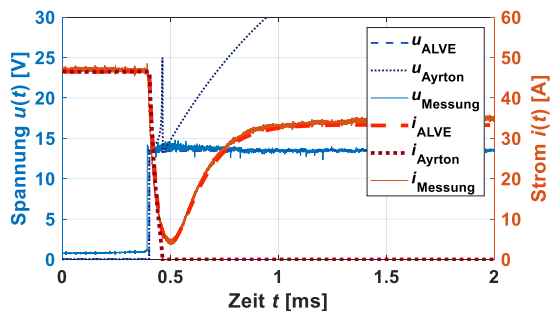


Abbildung 4.11: Validierung und Vergleich des ALVE- und Ayrton-Ansatzes.

$R_2 = 5 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 5 \text{ }\mu\text{H}$, $C_L = 550 \text{ }\mu\text{F}$,
 $R_{\text{ESR}} = 300 \text{ m}\Omega$, $R_L = 1,02 \text{ }\Omega$.

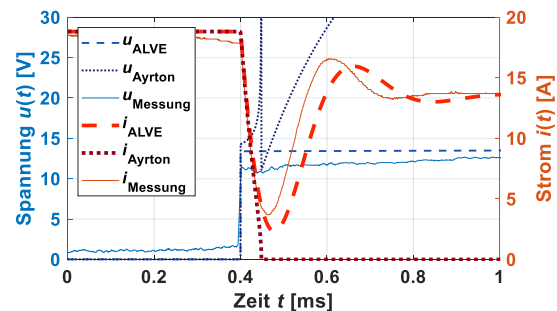


Abbildung 4.12: Validierung und Vergleich des ALVE- und Ayrton-Ansatzes.

$R_2 = 25 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 25 \text{ }\mu\text{H}$, $C_L = 80 \text{ }\mu\text{F}$,
 $R_{\text{ESR}} = 400 \text{ m}\Omega$, $R_L = 2,52 \text{ }\Omega$.

In Abbildung 4.13 ist dargestellt, dass der ALVE-Ansatz auch eine Lichtbogenlöschung im Zündmoment gut und korrekt abbilden kann. Die Mess- und Simulationskonfiguration ist wie beschrieben. Der Abschlusskondensator C_L war $540 \text{ }\mu\text{F}$, der R_{ESR} betrug $300 \text{ m}\Omega$. Der Lastwiderstand R_L war $2,6 \text{ }\Omega$.

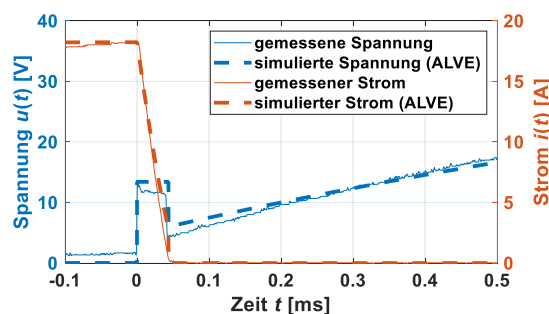


Abbildung 4.13: Simulation einer Selbstlöschung im Zündmoment mit dem ALVE-Ansatz.

Die Leitungsparameter waren $R_1 = 5 \text{ m}\Omega$, $L_1 = 5 \text{ }\mu\text{H}$, $R_2 = 25 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 25 \text{ }\mu\text{H}$, gemäß Abbildung 3.15.

Um die dargestellten Unterschiede zwischen dem ALVE- und dem Ayrton-Ansatz bei der Vorhersage der Selbstlöschung deutlich zu machen, wird im Folgenden zunächst ein analytischer Ansatz vorgestellt, um diese Grenze zu berechnen. Hierbei wird eine Schwingkreisanalyse durchgeführt.

Zur analytischen Berechnung wird das allgemeine Ersatzschaltbild für die Basistopologie *Einzelleitung* in Abbildung 3.15 vereinfacht. Das vereinfachte Ersatzschaltbild ist in Abbildung 4.14 dargestellt. R_{in} , R_1 und R_2 können in erster Näherung vernachlässigt werden, da der Dämpfungseinfluss auf den Schwingkreis durch R_{ESR} in der Regel überwiegt. L_{in} , L_1 und L_2 werden in L_w zusammengefasst.

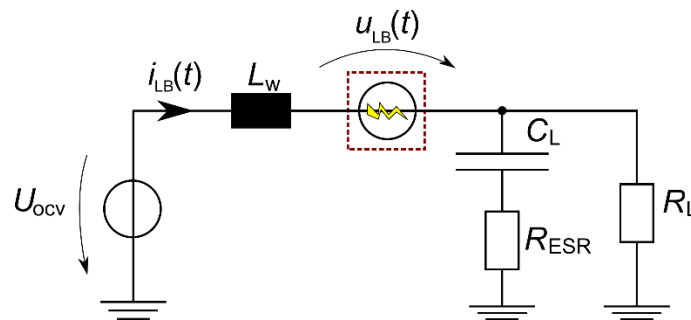


Abbildung 4.14: Reduziertes Ersatzschaltbild zur Berechnung der Stromschwingungen bei seriellen Lichtbögen.

Im Zündmoment spielt der steile Spannungsanstieg auf die Anoden- und Kathodenspannung eine zentrale Rolle, wie bereits in Kapitel 3.2.1 dargestellt. Da zunächst damit zu rechnen ist, dass keine starke Verlängerung des Lichtbogens stattfindet, kann der längen- und stromabhängige Anteil der Lichtbogenspannung vernachlässigt werden. Daher ist es zulässig, die Lichtbogenmodelle auf eine Sprungspannungsquelle von 0 V auf A_{ALVE} bzw. A_{Ayrton} (also $u_{LB}(t) = U_{LB} = 13,4$ V für Kupferelektroden) zu reduzieren. Der Stromverlauf kann mit der folgenden Differentialgleichung für den Schwingkreis berechnet werden:

$$\frac{d^2}{dt^2} i_{LB}(t) + a_1 \cdot \frac{d}{dt} i_{LB}(t) + a_0 \cdot i_{LB}(t) = b_1 \cdot \frac{d}{dt} u(t) + b_0 \cdot u(t) \quad (4.3)$$

$u(t)$ stellt dabei die im Sprung um die Lichtbogenspannung verringerte Quellenspannung dar. Die Herleitung der relevanten Parameter kann in Anhang C: Herleitung der analytischen Beschreibung des Einschwingvorgangs des seriellen Lichtbogenstroms gefunden werden. In Abbildung 4.15 sind Messungen zur Selbstlöschung, die Simulation mit dem ALVE-Ansatz, die Simulation mit der Ayrton-Gleichung und die

analytische Berechnung für verschiedene Lastwiderstände und Abschlusskapazitäten gegenübergestellt. Der Messaufbau ist wie in Abbildung 3.15 beschrieben:

- Zuleitungsabschnitt zu Lichtbogenprüfstand: $R_1 = 5 \text{ m}\Omega$, $L_1 = 5 \text{ }\mu\text{H}$.
- Verbindungsleitungsabschnitt vom Lichtbogenprüfstand zur Last: $R_2 = 33 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 33 \text{ mH}$ (Es wurde ein Aufbau mit erhöhter Induktivität gewählt, um deutliche Stromschwingungen zu provozieren).
- Last: $R_L = \text{var.}$, $C_L = \text{var.}$, $R_{\text{ESR}} = 300 \text{ m}\Omega$ (geringe Abweichungen sind möglich).

Die Simulationsmodelle wurden ebenso parametriert. Die verwendeten Parameter für die analytische Berechnung (siehe Abbildung 4.14) waren $L_w = L_1 + L_2 = 38 \text{ }\mu\text{H}$, $U_{\text{OCV}} = 48 \text{ V}$ und $R_{\text{ESR}} = 300 \text{ m}\Omega$.

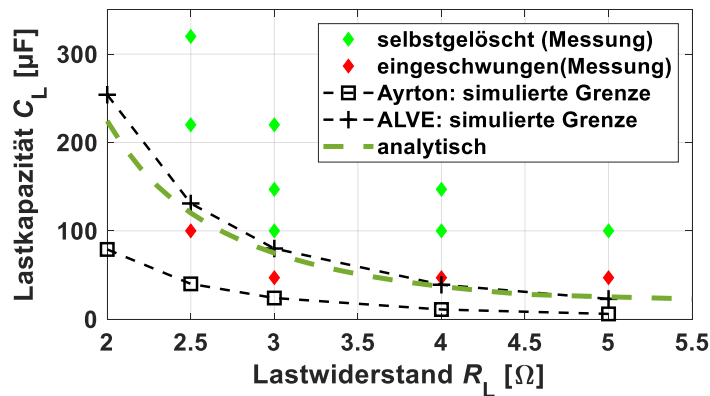


Abbildung 4.15: Vergleich von Messung, ALVE-Simulation, Ayrton-Simulation und analytischer Berechnung von Selbstlöschung.

Es ist zu erkennen, dass die Verwendung der Ayrton-Lichtbogengleichung zu schlechten Ergebnissen führt. Die in der Simulation bestimmte Selbstlöschung erfolgt schon bei geringen Kapazitätswerten. Der Anteil des stromabhängigen Terms für sehr kleine Lichtbogenlängen ist also hier signifikant. Abweichungen zwischen der ALVE-Simulation und der analytischen Berechnung können mit den getroffenen Vereinfachungen, die zum reduzierten Ersatzschaltbild in Abbildung 4.14 führen, begründet werden. Abweichungen zwischen Simulation und Messung können an Abweichungen bei den genauen Kapazitäts- und ESR-Werten liegen. Diese Selbstlöschung serieller Lichtbögen kann eine Bordnetzauslegung unterstützen, wie später dargestellt wird.

4.2.2 Brennverhalten des Lichtbogens

Zum Vergleich der ALVE-Gleichung mit der Ayrton-Gleichung von der Lichtbogenzündung bis zum Lichtbogenabriss aufgrund von Überschreitung einer maximalen Länge wird wieder der Aufbau aus Abbildung 3.15 verwendet. Für eine vereinfachte

Betrachtung kann dieses zu dem in Abbildung 4.16 gezeigten Ersatzschaltbild reduziert werden. Es wurde kein Kondensator verwendet. Da es sich um einen rein seriellen Stromkreis handelt, können Leitungswiderstände R_1 und R_2 in den Lastwiderstand R_L integriert werden. Die Leitungen wurden sehr kurz ausgeführt, $L_1 = L_2 = 1 \mu\text{H}$. Da die Gesamtdauer des Lichtbogens aufgrund des gewählten Bewegungsprofils der Elektroden deutlich größer als die hiervon hervorgerufenen transienten Effekte ist, sind diese Effekte in den Darstellungen vernachlässigbar. Trotzdem werden die Induktivitäten mit $L = 2 \mu\text{H}$ berücksichtigt. Das ausgewählte Bewegungsprofil der Elektroden sieht eine konstante Auseinanderfahrgeschwindigkeit von 50 mm/s vor. Es wurden Kupferelektroden verwendet. Die Validierung wird hier für verschiedene Lastwiderstände R_L durchgeführt.

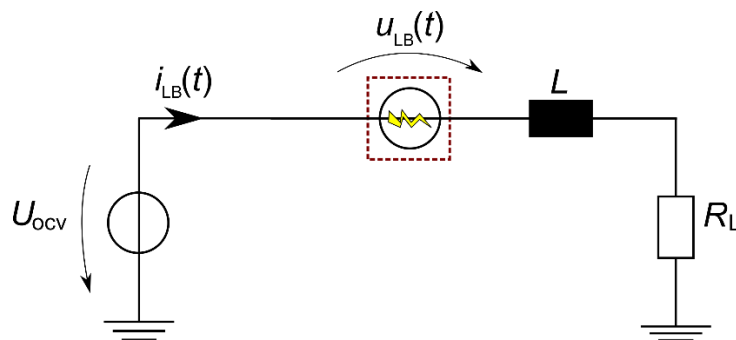


Abbildung 4.16: Reduziertes Ersatzschaltbild zum Aufbau zur Validierung von Lichtbogen-Arbeitspunkten.

In Abbildung 4.17 bis Abbildung 4.20 sind Vergleiche zwischen der ALVE-Lichtbogengleichung und der Ayrton-Lichtbogengleichung dargestellt. Außerdem sind die jeweiligen Messverläufe dargestellt. Die Lichtbogenzündung erfolgt jeweils zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$. Der Verlauf der Messkurven kann mit der ALVE-Gleichung deutlich besser abgebildet werden als mit der Ayrton-Gleichung. Dies kann an dem linearen Ansatz in der Ayrton-Gleichung und dem passenderen logarithmischen Ansatz der ALVE-Gleichung liegen. Durch die Anpassung der tatsächlichen Lichtbogenlänge über den Parameter a kann die ALVE-Gleichung ebenfalls den Abrissmoment genauer simulieren. Die mittleren Parameter der Ayrton-Gleichung funktionieren für Simulationen mit Widerstandswerten im mittleren Bereich gut, weisen an den Rändern des Widerstandsintervalls, der für die Parametrierung verwendet wurde, jedoch Schwächen auf. In den Abrissmomenten können kleinere Spannungspeaks erkannt werden. Diese treten in den Messungen auf, da der Lichtbogen bei einem minimalen Strom I_{Abriss} abreißt, der größer als 0 A ist. Durch die Leitungsinduktivitäten wird an der hochohmigen Trennstelle die induzierte Spannung ersichtlich. Dass neben Über- auch Unterschwinger beobachtet werden können (siehe Abbildung 4.17 und Abbildung 4.18), spricht dafür,

dass auch parasitäre Kapazitäten eine Rolle spielen. Da dieses Verhalten jedoch nahezu keinen Einfluss auf die in dieser Validierung relevanten Verläufe hat, wird auf die Nachbildung an dieser Stelle verzichtet.

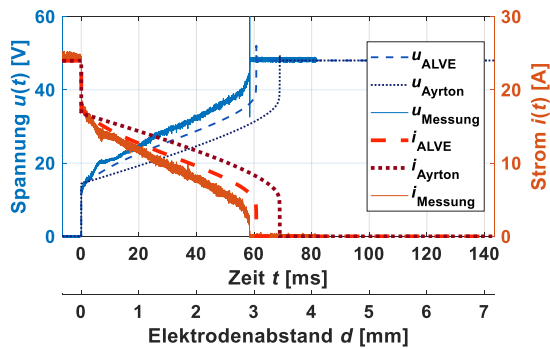


Abbildung 4.17: Vergleich zwischen ALVE- und Ayrton-Ansatz mit $R_L = 2 \Omega$ und $a = 0,14$.

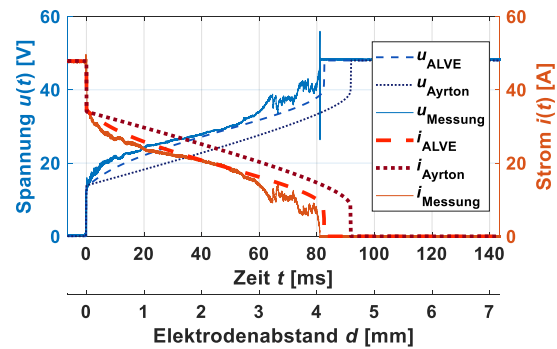


Abbildung 4.18: Vergleich zwischen ALVE- und Ayrton-Ansatz mit $R_L = 1 \Omega$ und $a = 0,12$.

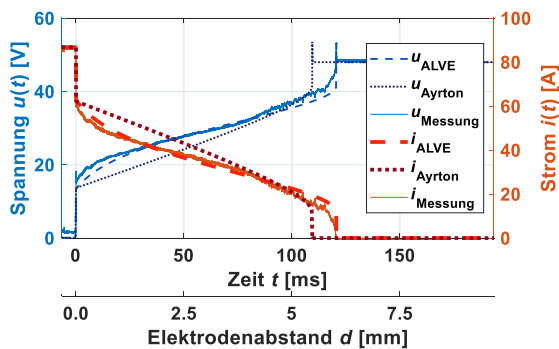


Abbildung 4.19: Vergleich zwischen ALVE- und Ayrton-Ansatz mit $R_L = 0,55 \Omega$ und $a = 0,07$.

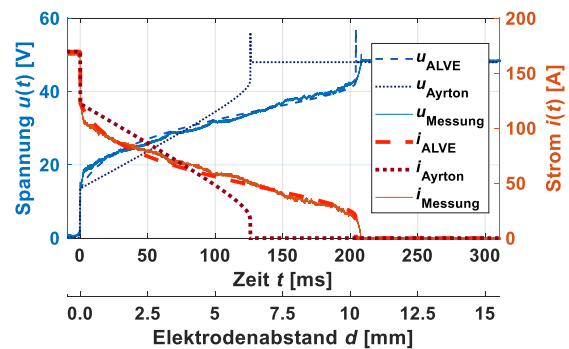


Abbildung 4.20: Vergleich zwischen ALVE- und Ayrton-Ansatz mit $R_L = 0,28 \Omega$ und $a = 0,02$.

In Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 sind die jeweils längsten und kürzesten Lichtbogenmessungen für Kupferelektroden mit $0,28 \Omega$ und $0,14 \Omega$ für R_L in den durchgeführten Messreihen dargestellt. Außerdem wurden jeweils 10 Simulationen mit zufälligem a im ermittelten Intervall (siehe Abbildung 4.7) für einen rein ohmschen Stromkreis mit der ALVE-Gleichung durchgeführt und dargestellt. Die Messungen wurden mit durchgezogenen Linien dargestellt, die Simulationen sind mit gestrichelten Linien geplottet. Es ist gut zu erkennen, dass der von den Messungen aufgespannte Bereich von den Zufallssimulationen gut abgedeckt wird.

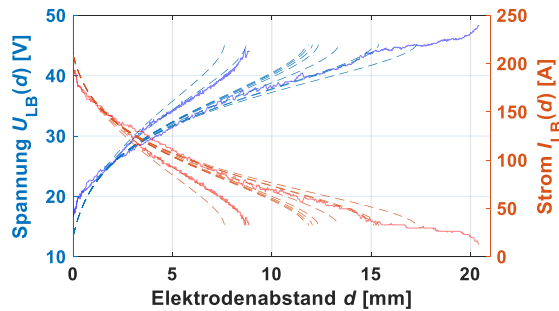


Abbildung 4.21: Lichtbogenmodellvalidierung für quasi-stationäre Arbeitspunkte. Messungen: durchgezogen, Simulationen: gestrichelt. $R_L = 0,14 \Omega$.

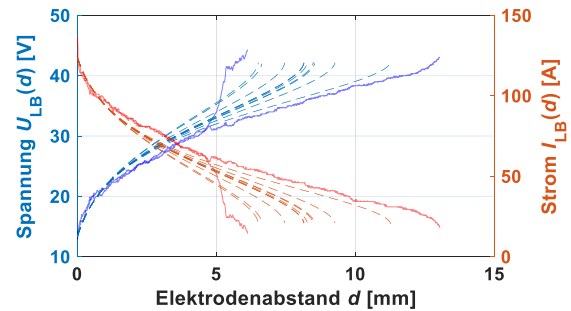


Abbildung 4.22: Lichtbogenmodellvalidierung für quasi-stationäre Arbeitspunkte. Messungen: durchgezogen, Simulationen: gestrichelt. $R_L = 0,28 \Omega$.

Abschließend lässt sich festhalten, dass neben dem Einschwingverhalten im Zündmoment auch das Brennverhalten mit dem neuen ALVE-Ansatz sehr gut nachgebildet werden kann.

4.2.3 Quellenvariation/Spannungsvariation

Wie z.B. in Abbildung 2.3 dargestellt, kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Bordnetzspannung in 48 V Bordnetzen immer bei 48 V liegt. Viel mehr unterliegt sie Schwankungen, was zum Beispiel am Ladezustand der Batterie oder am Lastszenario liegen kann. Daher ist es wichtig, nachzuweisen, dass das vorgestellte und parametrisierte Modell mit der ALVE-Gleichung auch bei von 48 V abweichenden Spannungslagen gute Ergebnisse liefern kann. Hierfür wurden Messungen im in Abbildung 3.15 dargestellten Stromkreis durchgeführt. Der Zuleitungsabschnitt zum Lichtbogenprüfstand und der Verbindungsleitungsabschnitt vom Prüfstand zur Last waren $R_1 = R_2 = 5 \text{ m}\Omega$ und $L_1 = L_2 = 5 \mu\text{H}$. Es wurde kein Kondensator verwendet, also $C_L = 0 \mu\text{F}$. Es wurden zwei verschiedene Lichtbogenversuche mit der elektronischen Quelle in einer ersten Konfiguration mit $U_{OCV} = 30 \text{ V}$ und in einer zweiten Konfiguration mit $U_{OCV} = 60 \text{ V}$ durchgeführt. Es wurde für 30 V der Lastwiderstand $R_L = 0,49 \Omega$ und für 60 V der Lastwiderstand $R_L = 2 \Omega$ ausgewählt. So wurden Verbraucher nachgestellt, die in beiden Konfigurationen ca. 1,8 kW im lichtbogenfreien Zustand umsetzen. Es wurden Kupferelektroden jeweils mit einer konstanten Geschwindigkeit von 50 mm/s auseinanderbewegt. Weiterhin wurden jeweils 5 Zufallssimulationen mit variierendem a mit der berechneten Wahrscheinlichkeitsverteilung (siehe Kapitel 0) durchgeführt. Die Strom- und Spannungsverläufe an der Trenn-/Lichtbogenstelle sind in Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24 in Simulation und Messung dargestellt. Als Vergleich wurden die gleichen Szenarien mit der Ayrton-Lichtbogengleichung und den in Kapitel 4.1.2 ermittelten mittleren Parametern simuliert. Diese Simulationsergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 4.23 und Abbildung 4.24 zu finden.

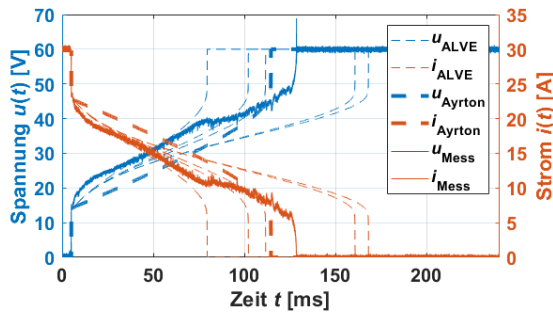


Abbildung 4.23: Validierung und Vergleich mit $U_{OCV} = 60 \text{ V}$ und $R_L = 2 \Omega$.

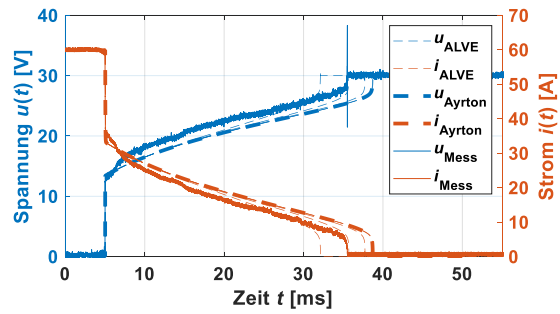


Abbildung 4.24: Validierung und Vergleich mit $U_{OCV} = 30 \text{ V}$ und $R_L = 0,49 \Omega$.

Es ist zu erkennen, dass die durchgeführte Messung im aufgespannten Bereich der Zufallssimulationen mit der ALVE-Gleichung liegt. Im vorgestellten Beispiel kann auch der Ayrton-Ansatz ein gutes Ergebnis für die maximale Lichtbogenlänge liefern. Dies liegt an der günstigen Wahl der Eingangsbeschaltung für die ermittelten Parameter.

4.2.4 Lichtbögen bei Schalthandlungen im Bordnetz

Da Lichtbögen jederzeit auftreten können, kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese auch während einer Veränderung (z.B. Schalthandlung) auftreten. Mit dem vorgestellten Modell können Lichtbögen auch bei Schalthandlungen oder anderen Veränderungen im Bordnetz simuliert werden. So kann die Unabhängigkeit von der Eingangsbeschaltung nochmals dargestellt werden.

Zum Nachweis der Eignung bei Schalthandlungen wird wieder im Aufbau aus Abbildung 3.15 ein serieller Lichtbogen erzeugt. Die Zuleitung zum Lichtbogenprüfstand, sowie die Verbindungsleitung vom Lichtbogenprüfstand zur Last waren $R_1 = R_2 = 2,5 \text{ m}\Omega$ und $L_1 = L_2 = 2,5 \text{ }\mu\text{H}$. Es wurde kein Kondensator verwendet. Der Lastwiderstand war zeitabhängig und hat seinen Wert während des Lichtbogenereignisses von $R_{L1} = 0,48 \Omega$ zu $R_{L2} = 4,5 \Omega$ geändert. Aus konstruktiven Gründen wurden silberbeschichtete Kupferstecker als Elektroden gewählt. Um die allgemeine Anwendbarkeit der mittels einheitlicher Kupferelektroden ermittelten Modellparameter darzustellen, werden diese für die dargestellte Simulation verwendet. Die Längenunsicherheit, welche in Kapitel 0 diskutiert und in Kapitel 3.2.5 beschrieben wurde, wurde mit $a = 0,08$ berücksichtigt. In Abbildung 4.25 sind sowohl die gemessenen als auch die simulierten Strom- und Spannungsverläufe dargestellt. Der Lichtbogen zündet bei $t = 0 \text{ s}$ und die Stecker bewegen sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 20 mm/s auseinander.

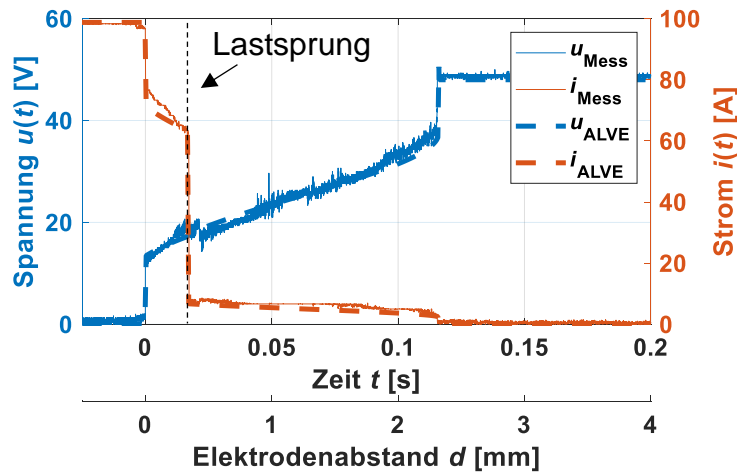


Abbildung 4.25: Vergleich von Simulation und Messung bei Schaltvorgängen während eines Lichtbogenfehlers. Lastsprung von $0,48 \Omega$ auf $4,5 \Omega$.

Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung zu erkennen. Im Lastveränderungsmoment sinkt der Strom stark. Abbildung 4.26 und Abbildung 4.27 zeigen den Vergleich zwischen Simulation und Messung für verschiedene Arbeitspunkte. Zunächst ist auf der x-Achse bei ca. 100 A der initiale Arbeitspunkt zu erkennen, in dem noch kein Lichtbogen vorhanden ist. Die Lichtbogenarbeitspunkte des kurzen Lichtbogens (z.B. 0,1 mm und 0,3 mm) liegen vor dem Lastsprung auf der ersten Lastgeraden. Man kann gut erkennen, dass die längeren Lichtbögen (z.B. 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm und 2 mm) auf einer zweiten Lastgeraden liegen, die sich nach dem Lastsprung ergibt. Weiterhin kann auf der y-Achse bei 48 V der Arbeitspunkt erkannt werden, der sich nach Lichtbogenlöschung ergibt. Dieser Arbeitspunkt stellt die offenen Klemmen dar.

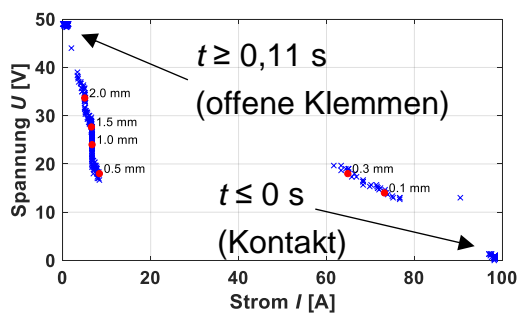


Abbildung 4.26: Darstellung der Arbeitspunkte bei Lastsprung ($0,48 \Omega \rightarrow 4,5 \Omega$) während Lichtbogen (Messung).

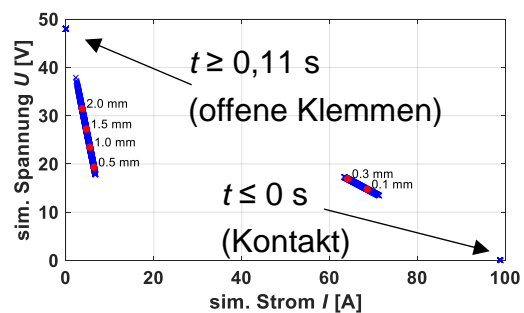


Abbildung 4.27: Darstellung der Arbeitspunkte bei Lastsprung ($0,48 \Omega \rightarrow 4,5 \Omega$) während Lichtbogen (Simulation).

In Abbildung 4.28 werden Lichtbogensignale im oben beschriebenen Stromkreis bei einem umgekehrten Lastsprung dargestellt. Der Lastwiderstand springt also von $R_{L1} = 4,5 \Omega$ zu $R_{L2} = 0,48 \Omega$. Die statistische Unsicherheit bei der Lichtbogenlänge

wurde mit $a = 0,18$ berücksichtigt. Bei der hier dargestellten Messung hat der Lichtbogen während des Lastsprungs das erwartete Verhalten. Aufgrund des gestiegenen Stroms verringert sich die Lichtbogenspannung zum Zeitpunkt $t = 0,05$ s.

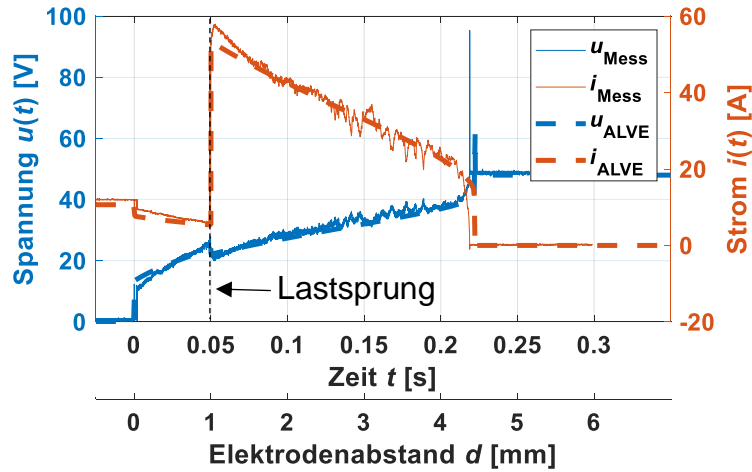


Abbildung 4.28: Vergleich von Simulation (gestrichelt) und Messung bei Schaltvorgängen während eines Lichtbogenfehlers. Lastsprung von $4,5 \Omega$ auf $0,48 \Omega$.

In Abbildung 4.29 und Abbildung 4.30 ist gut zu erkennen, dass die Lastgerade im Schaltmoment springt. Weiterhin kann sowohl in Abbildung 4.28 als auch in Abbildung 4.29 und Abbildung 4.30 eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erkannt werden.

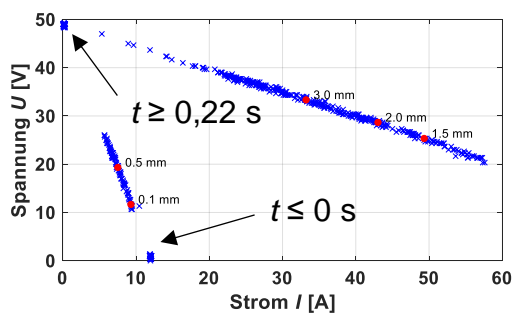


Abbildung 4.29: Darstellung der Arbeitspunkte bei Lastsprung ($4,5 \Omega \rightarrow 0,48 \Omega$) während Lichtbogen (Messung).

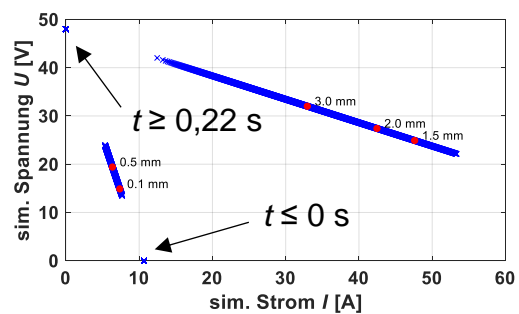


Abbildung 4.30: Darstellung der Arbeitspunkte bei Lastsprung ($4,5 \Omega \rightarrow 0,48 \Omega$) während Lichtbogen (Simulation).

5 Anwendung des Lichtbogenmodells

Wie bereits in Kapitel 4.2.1 und in Anhang C: Herleitung der analytischen Beschreibung des Einschwingvorgangs des seriellen Lichtbogenstroms dargestellt, ist es analytisch und mit dem ALVE-Ansatz möglich, ein Einschwingverhalten von seriellen Lichtbögen in der Basistopologie *Einzelleitung* zu simulieren. Bei Stromschwingungen, die so groß sind, dass sie einen Stromnulldurchgang verursachen, verlischt der Lichtbogen fast direkt nach der Zündung und das Gefahrenpotential kann durch die Begrenzung der freigesetzten Verlustenergie stark verringert werden. Dieser Effekt kann bei der Bordnetzauslegung berücksichtigt werden, was im Folgenden näher dargestellt und erläutert wird. Anschließend wird mittels der ALVE-Gleichung und der in Anhang B: Implementierung des Lichtbogenmodells beschriebenen Implementierung die Auslegung für die Basistopologie *verzweigte Leitung* durchgeführt.

5.1 Analytische Bordnetzauslegung

In Abbildung 5.1 sind für den Aufbau in Abbildung 4.14 mit $U_{LB} = 13,4 \text{ V}$ und $R_{ESR} = 100 \text{ m}\Omega$ exemplarisch Bauteilkombinationen dargestellt, die die Grenze für eine Selbstlöschung darstellen. Zur Berechnung wurde die Lösung von Gleichung (4.3) verwendet. Die Ebene stellt eine Erweiterung der analytisch berechneten Kurve in Abbildung 4.15 dar. Oberhalb der Ebene findet im Einschwingvorgang kein Stromnulldurchgang statt. Unterhalb der Ebene findet der Nulldurchgang statt und eine Selbstlöschung erfolgt. In Abbildung 5.2 ist dargestellt, dass auch die Qualität des Abschlusskondensators, bzw. der Wert R_{ESR} einen Einfluss auf die dargestellten Grenzen haben kann.

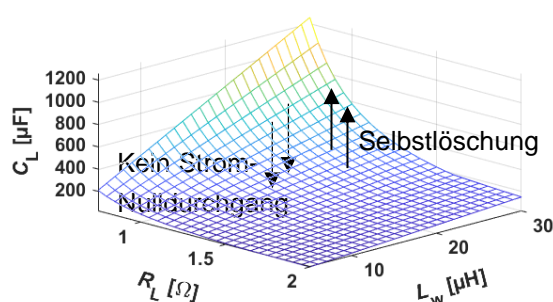


Abbildung 5.1: Analytisch berechnete Bauteilkombinationen aus R_L , L_w und C_L , die zur Selbstlöschung im Zündmoment eines seriellen Lichtbogens führen.

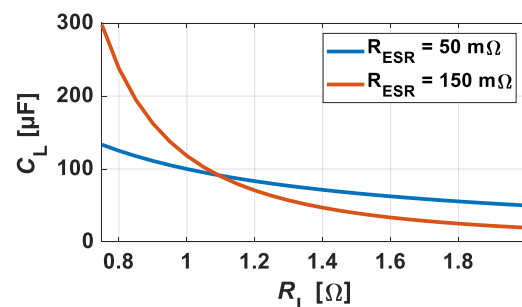


Abbildung 5.2: Grenzkurven für Selbstlöschung mit $L_w = 5 \mu\text{H}$ und $U_{LB} = 13,4 \text{ V}$ (bezogen auf Ersatzschaltbild in Abbildung 4.14).

Es kann folgendes Fazit aus der dargestellten Analyse gezogen werden:

- Bei einer passenden Konfiguration aus Leitungsinduktivität, Abschlusskapazität und Abschlusswiderstand können serielle Lichtbögen zur Selbstlöschung im Zündmoment gebracht werden.
- Die Bauteilkombinationen, bei denen die Selbstlöschung stattfindet, können grundsätzlich analytisch berechnet werden, wie auch in Kapitel 4.2.1 und in Anhang C: Herleitung der analytischen Beschreibung des Einschwingvorgangs des seriellen Lichtbogenstroms ausführlich dargestellt wurde.
- Folgende Bauteiltendenzen führen zur Selbstlöschung:
 - o Große Abschlusskapazitäten;
 - o Kleine Leitungsinduktivitäten;
 - o Große Abschlusswiderstände (kleine Belastung/geringer Initialstrom);

Die analytische Bestimmung von Bauteilkombinationen, die die Selbstlöschung bei seriellen Lichtbögen verursachen, ist nur in einfachen Netzwerken möglich. Dass der zuvor vorgestellte Ansatz die analytische Betrachtung um eine allgemein anwendbare simulative Auslegung ergänzen kann, wird im Folgenden Abschnitt dargestellt.

5.2 Modellbasierte Bordnetzauslegung

Die analytische Berechnung für die Basistopologie *verzweigte Leitung* (siehe Abbildung 3.16) ist nur sehr schwer möglich. Deswegen wird hier eine exemplarische Bordnetzauslegung einer verzweigten Leitung unter Verwendung des aufgebauten Lichtbogenmodells dargestellt. Die durchgeführten Simulationen können auch in noch komplexeren Bordnetzstrukturen durchgeführt werden.

Für das simulierte Beispiel werden zwei ohmsche Verbraucher angenommen. Es wird weiterhin angenommen, dass die Widerstands- und Induktivitätsverhältnisse aufgrund von Leitungslängen, Leitungsquerschnitten und Verlegearten vorgegeben sind. Die Abschlusskapazitäten sollen für die Sicherheit gegen serielle Lichtbögen dimensioniert werden. Die Widerstands- und Induktivitätsverhältnisse des Überwachungsabschnitts werden gemäß Abbildung 3.16 mit folgenden Werten parametrisiert:

Tabelle 7: Gewählte Parametrierung (siehe Abbildung 3.16).

Bordnetzanbindung		Versorgungsleitung 1		Versorgungsleitung 2	
$R_{s\text{ges}}$	2 mΩ	$R_{1\text{ges}}$	4 mΩ	$R_{2\text{ges}}$	4 mΩ
$L_{s\text{ges}}$	2 μH	$L_{1\text{ges}}$	4 μH	$L_{2\text{ges}}$	4 μH

Die Abschlüsse werden mit folgenden Werten berücksichtigt:

Tabelle 8: Exemplarische Parametrierung der Abschlüsse für die lichtbogensichere Bordnetzauslegung.

Versorgung		Last 1		Last 2	
U_{OCV}	48 V	C_{L1}	Freiheitsgrad	C_{L2}	Freiheitsgrad
R_{in}	10 m Ω	R_{ESR1}	50 m Ω	R_{ESR2}	50 m Ω
L_{in}	5 μ H	R_{L1}	0,8 Ω	R_{L2}	1,2 Ω

Die simulierten Lichtbögen resultieren aus einer Elektrodenbewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit von 100 mm/s. Es wurden die Modellparameter für Kupferelektroden mit $a = 0,025$ verwendet. Unter Verwendung des vorgestellten Modells werden C_{L1} - C_{L2} -Kombinationen ermittelt, die jeweils einen Lichtbogen in Versorgungsleitung 1 (Grenze LB₁), Versorgungsleitung 2 (Grenze LB₂) und in der Bordnetzanbindung (Grenze LB_s) zum Erlöschen bringen. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass beide Abschlusskondensatoren bis zu einem bestimmten Grenzwert einen Einfluss auf einen Lichtbogen in der jeweils anderen Versorgungsleitung haben. Weiterhin kann man erkennen, dass beide Abschlusskapazitäten einen Einfluss auf die Lichtbogenlöschung in der Bordnetzanbindung haben. Aus der Überlagerung der Kurven ergibt sich ein Kapazitätsraum, aus dem gewählt werden kann, wenn eine Selbstlöschung an allen drei Fehlerstellen angestrebt wird. Verschiedene Bereiche (Bereich 1 bis Bereich 7) können identifiziert werden.

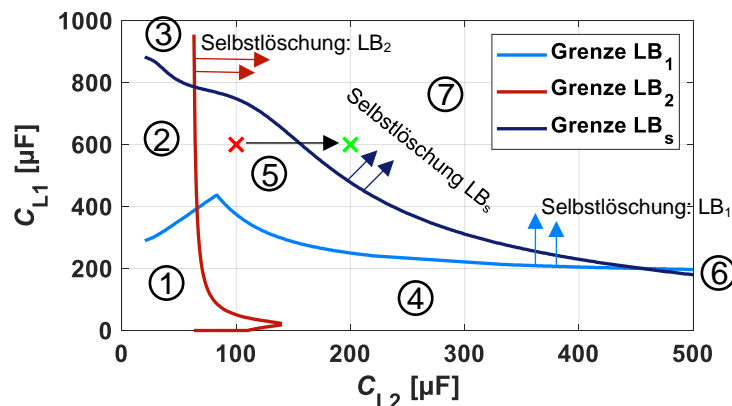


Abbildung 5.3: Abschlusskapazitätskombinationen für Lichtbogenlöschung in unterschiedlichen Leitungen. Rotes und grünes X markieren die später ausführlich dargestellten Beispielsimulationen.

Die in Abbildung 5.3 markierten Bereiche können einer Lichtbogenlöschung in den verschiedenen Teilbereichen der Basistopologie zugeordnet werden. Diese sieben Bereiche sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Eigenschaften der Lichtbögen in den dargestellten Kapazitätsbereichen.

Bereich	Lichtbogen in Bordnetzanbindung	Lichtbogen in Versorgungsleitung 1	Lichtbogen in Versorgungsleitung 2
1	Keine Selbstl.	Keine Selbstlöschung	Keine Selbstlöschung
2	Keine Selbstl.	Selbstlöschung	Keine Selbstlöschung
3	Selbstlöschung	Selbstlöschung	Keine Selbstlöschung
4	Keine Selbstl.	Keine Selbstlöschung	Selbstlöschung
5	Keine Selbstl.	Selbstlöschung	Selbstlöschung
6	Selbstlöschung	Keine Selbstlöschung	Selbstlöschung
7	Selbstlöschung	Selbstlöschung	Selbstlöschung

Exemplarisch werden zunächst Simulationen aus Bereich 5 dargestellt (rotes X in Abbildung 5.3). Die Lichtbogenzündung erfolgt jeweils bei $t = 1$ ms. Es werden die Kapazitätswerte $C_{L1} = 600 \mu\text{F}$ und $C_{L2} = 100 \mu\text{F}$ gewählt. Um realitätsnähere Verhältnisse zu schaffen, schalten die Verbraucher bei einer unteren Spannungsgrenze von 20 V ab, der jeweilige Widerstand R_{L1} oder R_{L2} wird also hochohmig. Abbildung 5.4 stellt die Spannungen und Ströme an den Abschlüssen des Überwachungsabschnitts dar. Abbildung 5.5 stellt die Lichtbogensignale des Lichtbogens in Versorgungsleitung 1 dar.

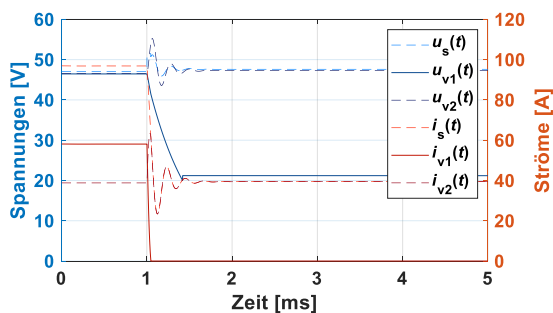


Abbildung 5.4: Signale an den Abschlüssen des Überwachungsabschnitts. Serieller Lichtbogen in Versorgungsleitung 1.

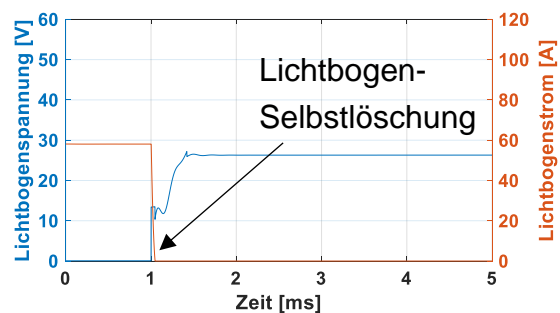


Abbildung 5.5: Lichtbogensignale eines seriellen Lichtbogens in Versorgungsleitung 1.

Es ist zu erkennen, dass der Lichtbogenstrom, also auch der Strom $i_{L1}(t)$ im Zündzeitpunkt schnell sinkt, bis es zum Nulldurchgang und zur Lichtbogenlöschung kommt. Die Spannung $u_{v1}(t)$ sinkt etwas langsamer aufgrund der getrennten Versorgung bis

die untere Grenze von 20 V erreicht wurde. Da der Aktuator zu diesem Zeitpunkt abgeschaltet wird, verändert sich die Kondensatorspannung in der restlichen Simulationszeit kaum.

In Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 sind Signale bei der Lichtbogenzündung in Versorgungsleitung 2 dargestellt. Wie bei der Lichtbogenzündung in Versorgungsleitung 1 kann beobachtet werden, dass die Stromschwingung einen Nulldurchgang und somit die Selbstlöschung zur Folge hat. Der Spannungseinbruch bei $u_{v2}(t)$ endet wieder bei ca. 20 V.

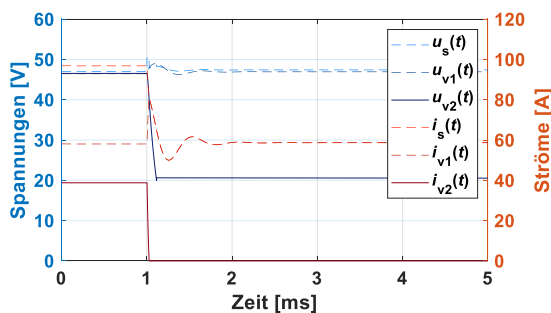


Abbildung 5.6: Signale an den Abschlüssen des Überwachungsabschnitts. Serieller Lichtbogen in Versorgungsleitung 2.

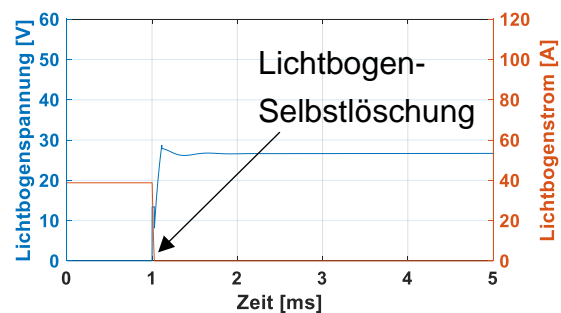


Abbildung 5.7: Lichtbogensignale eines seriellen Lichtbogens in Versorgungsleitung 2.

In Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 sind Signale bei der Lichtbogenzündung in der Leitung zur Bordnetzanbindung dargestellt.

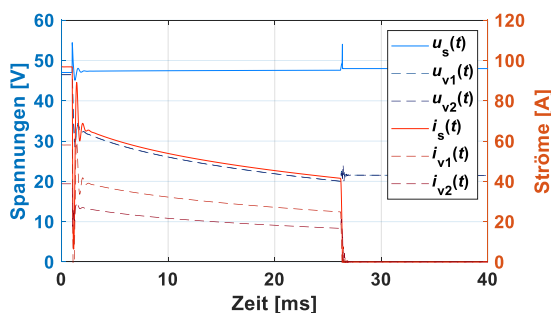


Abbildung 5.8: Signale an den Abschlüssen des Überwachungsabschnitts. Serieller Lichtbogen in der gemeinsamen Leitung.

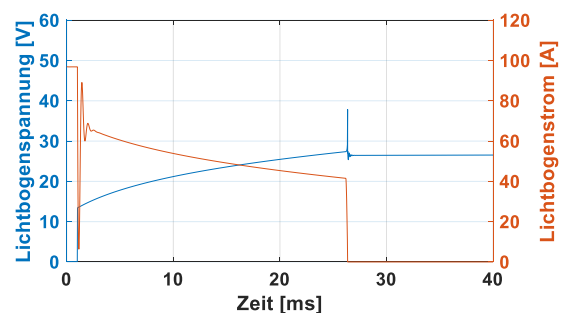


Abbildung 5.9: Lichtbogensignale eines seriellen Lichtbogens in der gemeinsamen Leitung.

Es ist der vollständige Lichtbogenverlauf dargestellt, der erst aufgrund der Erreichung der unteren Spannungsgrenze von 20 V bei $t \approx 26$ ms verlöscht.

Bei Betrachtung der ersten 5 Millisekunden in Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 kann erkannt werden, dass es zu einem Stromunterschwinger, jedoch nicht zu einem Nulldurchgang und somit auch nicht zur Selbstlöschung kommt.

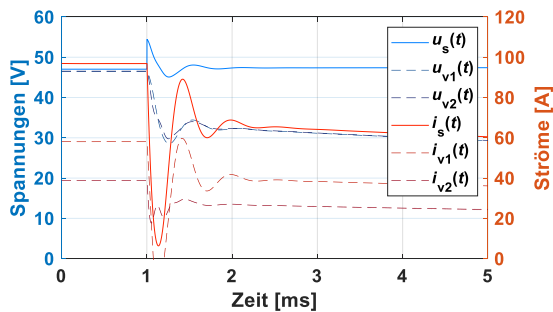


Abbildung 5.10: Ausschnitt aus Abbildung 5.8.

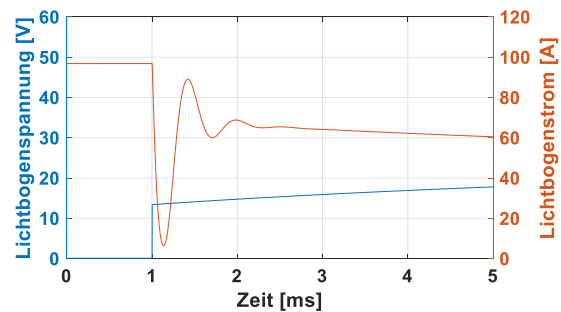


Abbildung 5.11: Ausschnitt aus Abbildung 5.9.

Um nun den Lichtbogen in der gemeinsamen Leitung ebenfalls zur Selbstlöschung im Zündmoment zu zwingen, kann z.B. der Wert von C_{L2} auf einen Wert von $200 \mu\text{F}$ erhöht werden (grünes X in Abbildung 5.3). Die entsprechenden Signale sind in Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 dargestellt. Nun ist auch die Amplitude dieser Stromschwingung groß genug, um den Lichtbogen im Zündmoment zu löschen.

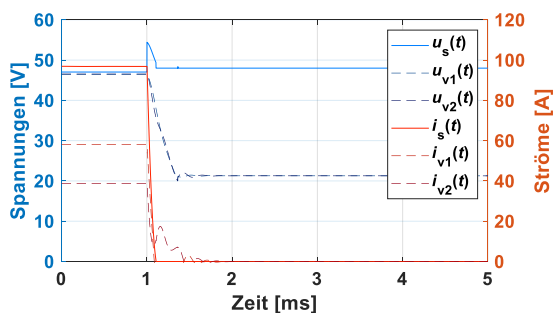


Abbildung 5.12: Signale an den Abschlüssen des Überwachungsabschnitts. Serieller Lichtbogen in der gemeinsamen Leitung mit angepasster Abschlusskapazität C_{L2} .

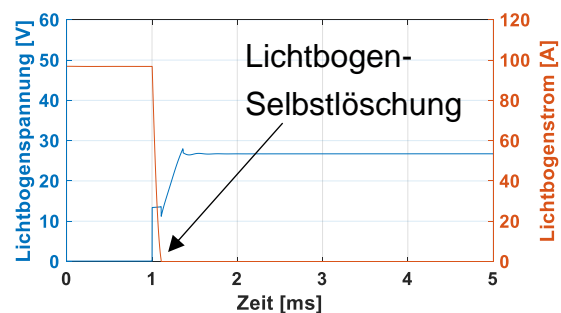


Abbildung 5.13: Lichtbogensignale eines seriellen Lichtbogens in der gemeinsamen Leitung mit angepasster Abschlusskapazität C_{L2} .

Es kann zusammengefasst werden, dass das erstellte Lichtbogenmodell für die Auslegung der Bordnetzeigenschaften für lichtbogensichere Teilbordnetze verwendet werden kann. Wenn eine Selbstlöschung serieller Lichtbögen in allen Teilabschnitten der Basistopologie garantiert werden kann, kann die Gefahr durch serielle Lichtbögen stark reduziert werden. Die schnelle Selbstlöschung reduziert die vom Lichtbogen an seine Umgebung abgegebene Wärmeenergie enorm.

5.3 Modellbasierte Energieanalysen

Maximal zulässige Verlustenergie des Lichtbogens

Die Verlustleistung ist bei Lichtbögen von besonderer Wichtigkeit, da diese nahezu vollständig in Wärmeenergie umgesetzt wird. In [69] werden Grenzenenergien angegeben, ab denen verschiedene Kfz-relevante Stoffe Schaden nehmen. Bei einer Energie, die größer als 12 J ist, werden Oberflächen beschädigt oder Flusen von z.B. Teppich verbrannt. Ab einer Grenzenenergie von 200 J entstehen großflächige Verbrennungen an Schaumstoffoberschichten und Löcher in Dichtfolie. Ab einer Grenzenenergie von 760 J kann ein Lichtbogen zum eigenständigen Weiterbrennen von mit Öl verschmutzten Stoffproben führen. In [104] wird der energieabhängige Schaden an Schaumstoffen bei Kurzschlüssen in 42 V Netzen untersucht. Hierbei wird eine kritische Grenze von 500 J definiert.

Auch einige Probemessungen mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Lichtbogenprüfstand (siehe Kapitel 3.2.2) haben dazu geführt, dass Gewebepbandproben selbstständig weitergebrannt haben. Abbildung 5.14 zeigt die Entstehung eines Lichtbogens an einem mit Gewebepband umwickeltem Stecker, den Lichtbogen und das eigenständige Weiterbrennen des Gewebepbands. Auch geringe Lichtbogenenergien haben bereits zu kritischen Bränden geführt. Ein Zusammenhang zwischen der Lichtbogenenergie, dem Vorhandensein von brennbarem Material und der Luftzufuhr konnte festgestellt werden, wie er auch in [105] dargestellt ist.



Abbildung 5.14: Links: Lichtbogenentstehung mit Gewebepband umwickelt. Mitte: Lichtbogen. Rechts: Lichtbogen verloschen, Gewebepband entzündet.

In Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 sind die Messungen zu dem Lichtbogen dargestellt, der zum Brand des Gewebepbands geführt hat. Die Beispielmessung zeigt, dass auch schon geringe Lichtbogenenergien (ca. 100 J) zu einem Brand führen können.

Aufgrund der dargestellten Beispielmessung wird für die weiterführende Analyse eine Grenzenenergie von 100 J festgesetzt. Besonders für Lichtbogen-Diagnosekonzepte ist es wichtig, Lichtbögen vor Erreichen dieser kritischen Grenze zu löschen. Es ist nicht auszuschließen, dass auch Lichtbögen mit geringeren Energien bereits zur Entzündung angrenzender Materialien führen kann.

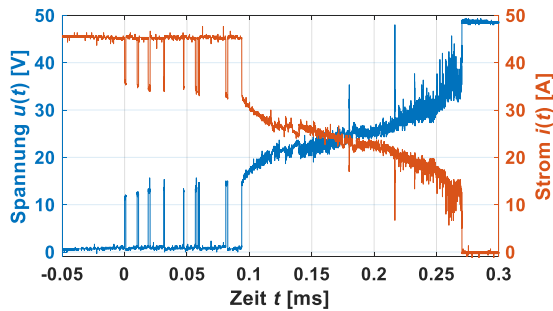


Abbildung 5.15: Lichtbogenspannung und Lichtbogenstrom bei Entzündung von Gewebeband.

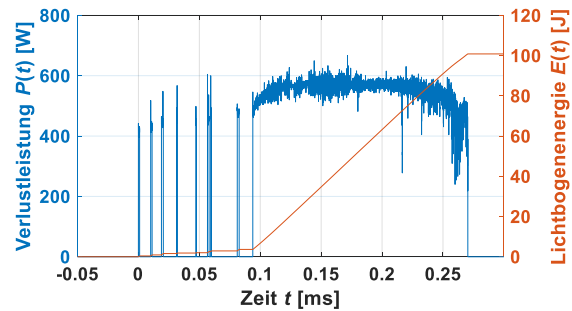


Abbildung 5.16: Lichtbogenleistung und Lichtbogenenergie bei Entzündung von Gewebeband.

Simulation paralleler Lichtbögen – Sicherheit durch Schmelzsicherungen?

Unter der Annahme, dass ein Bordnetz gegen serielle Lichtbögen sicher ausgelegt ist, müssen weiterhin die parallelen Lichtbögen untersucht werden. Bei parallelen Lichtbögen können Sicherungselemente, wie z.B. Schmelzsicherungen, einen gewissen Schutz bereitstellen. Exemplarisch werden Simulationen in einem Bordnetz mit der Basistopologie *Einzelleitung*, wie in Abbildung 3.15 dargestellt, durchgeführt, mit $U_{OCV} = 48 \text{ V}$, $R_{in} = 20 \text{ m}\Omega$, $L_{in} = 5 \text{ }\mu\text{H}$, $R_1 = R_2 = 4 \text{ m}\Omega$, $L_1 = L_2 = 4 \text{ }\mu\text{H}$, $R_L = 0,4 \text{ }\Omega$. Aufgrund von einer sicheren Auslegung gegen serielle Lichtbögen: $C_L = 1800 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{ESR} = 50 \text{ m}\Omega$ (mittels der zuvor dargestellten Bordnetzauslegung ermittelt). Um realitätsnahe Ergebnisse zu erzeugen, schaltet der Verbraucher bei einer unteren Spannungsgrenze von 20 V ab (R_L wird hochohmig) und bei einer zweiten Spannungsgrenze von 30 V wieder ein (R_L nimmt den Ursprungswert an). Die Aufteilung der Widerstände und Induktivitäten des Überwachungsabschnitts impliziert bereits, dass angenommen wird, dass ein paralleler Lichtbogen bei homogenem bzw. symmetrischem Widerstands- und Induktivitätsbelag in der Mitte auftritt. Das Lichtbogenmodell wird mit den ALVE-Parametern für Kupfer und $a = 0,025$ angewendet. Am Anfang des Überwachungsabschnitts wird eine Schmelzsicherung vorgesehen. Hierzu wird das Modell aus [49] verwendet, welches in Kapitel 3.1.3 beschrieben ist und mit dem Parametern in Anhang A: Sicherungsparameter (VDA) parametrisiert wurde. Es wurde vereinfacht angenommen, dass die Sicherung bei einer Schmelztemperatur von 400°C auslöst. Im dargestellten Beispiel wurden Sicherungsparameter für die MAX150 Schmelzsicherung ausgewählt. Eine Umgebungstemperatur von 25°C wurde angenommen.

Es werden im Folgenden zwei Szenarien vorgestellt. Die Ausbildung des Lichtbogens erfolgt dabei jeweils in zwei Schritten. Das erste hier beschriebene Szenario geht von einer beschädigten Isolierung aus. Der frei liegende Kupferleiter hat so einen kurzen Massekontakt, es kommt also zu einem Kurzschluss. Anschließend erhöht sich der Abstand, also die Lichtbogenlänge, schnell wieder bis auf einen kleinen Wert, der

dann langsamer weiter ansteigt. Das Profil ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Die Unterscheidung zwischen Elektrodenabstand d und Lichtbogenlänge d_{LB} basiert auf Gleichung (3.15). Nach einer Kurzschlusszeit von $1 \mu\text{s}$ entfernen sich die Elektroden für 3 ms mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/s . Anschließend verändert sich der Abstand mit 1 mm/s .

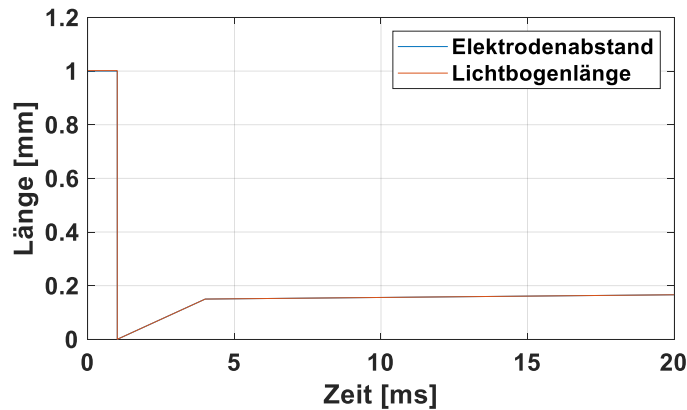


Abbildung 5.17: Elektrodenabstandsprofil 1 für parallelen Lichtbogen ($a = 0,025$).

Die zugehörigen Lichtbogensignale sind in Abbildung 5.18 und die Sicherungstemperatur ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Die Simulation wurde zum Zeitpunkt der Sicherungsauslösung (vereinfachte Annahme: $T_F = 400^\circ\text{C}$) abgebrochen.

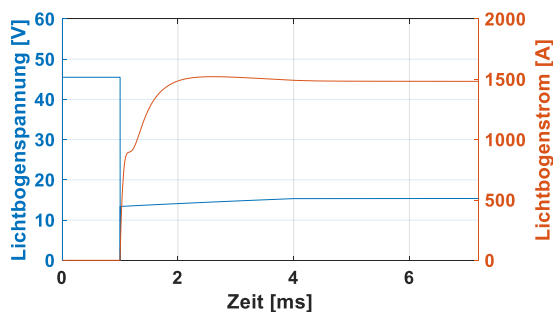


Abbildung 5.18: Spannung und Strom bei parallelem Lichtbogen mit Elektrodenabstandsprofil 1.

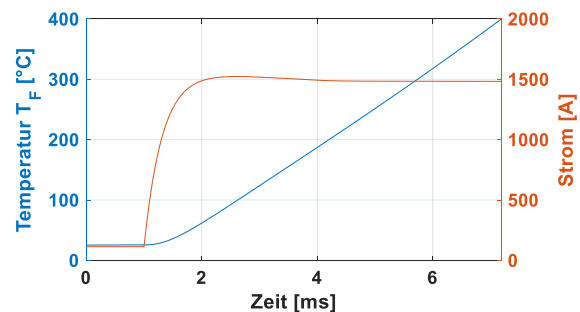


Abbildung 5.19: Strom- und Temperaturverlauf in der Sicherung bei parallelem Lichtbogen mit Elektrodenabstandsprofil 1.

Es ist ein Spannungseinbruch an der Lichtbogenstelle im Kurzschlussmoment bei $t = 1 \text{ ms}$ zu erkennen. Direkt darauf folgt die Lichtbogenzündung, sodass die Spannung auf die Lichtbogenspannung springt. Der Lichtbogenstrom steigt, begrenzt durch die vorhandenen Induktivitäten. Die Sicherungstemperatur erreicht nach ca. 6 ms die Schmelztemperatur und würde dann den Lichtbogen löschen. Die zugehörige Lichtbogenenergie und -leistung sind in Abbildung 5.20 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass

die Schmelzsicherung den Lichtbogen erst knapp oberhalb der kritischen Energie löschen kann. In Abbildung 5.21 sind die entsprechenden Signale am Anfang und am Ende des Überwachungsabschnitts dargestellt.

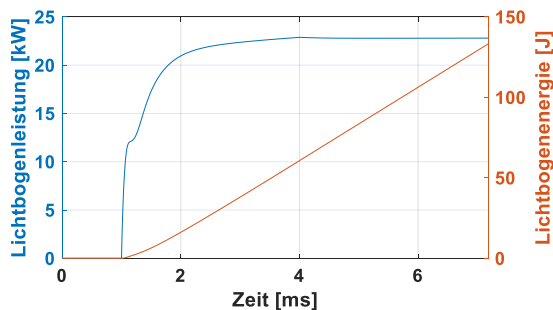


Abbildung 5.20: Lichtbogenenergie und -leistung bis zur Sicherungsauslösung für Elektrodenabstandsprofil 1.

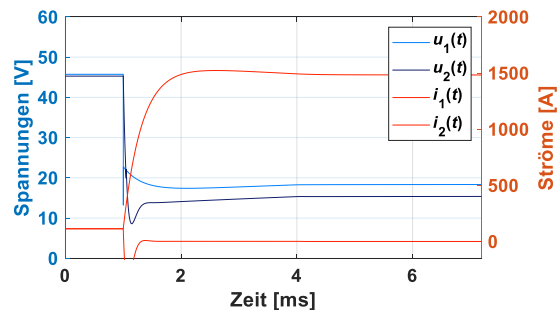


Abbildung 5.21: Strom- und Spannungssignale am Anfang und Ende des Überwachungsabschnitts bis zur Sicherungsauslösung für Elektrodenabstandsprofil 1.

Da jedoch das Längenszenario bei zufälligen Lichtbogenfehlern nicht zuverlässig vorhergesagt werden kann, müssen verschiedene Szenarien untersucht werden. Ein zweites Szenario ist in Abbildung 5.23 dargestellt. Es wird wieder von einer beschädigten Isolierung ausgegangen, wie in Abbildung 5.22 dargestellt.

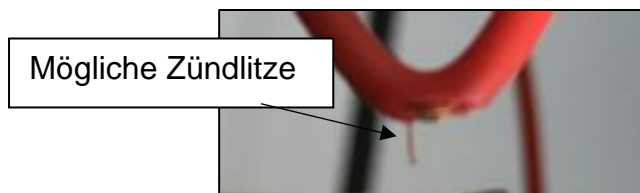


Abbildung 5.22: Beschädigte Isolierung mit potenzieller Zündlitze.

Hier erzeugt aber im Gegensatz zum ersten Beispiel eine einzelne Litze einen Kurzschluss. Aufgrund des hohen Kurzschlussstroms verbrennt diese Litze sehr schnell, was eine schnelle Zündung und schnellere Verlängerung des Lichtbogens bis auf einen größeren Wert zur Folge hat. Eine weitere Zerstörung des Leiters kann die Lichtbogenlänge anschließend langsamer weiter erhöhen, bis der Lichtbogen schließlich verlischt. Hier wird davon ausgegangen, dass der Elektrodenabstand sich nach einer Kurzschlusszeit von 1 μ s mit einer Geschwindigkeit von 1000 mm/s in einer Zeit von 5 ms auf 5 mm erhöht und sich dann nur noch langsam ändert (Geschwindigkeit 100 mm/s). Das Abstands- und Lichtbogenlängenprofil sind in Abbildung 5.23 dargestellt. Aufgrund der gesteigerten Länge können Elektrodenabstand und Lichtbogenlänge voneinander abweichen, wie mit Gleichung (3.15) beschrieben wurde. Dieser

Effekt kann durch Bewegungen bzw. Biegung des Lichtbogenplasmas entstehen, wie in Kapitel 0 diskutiert wurde.

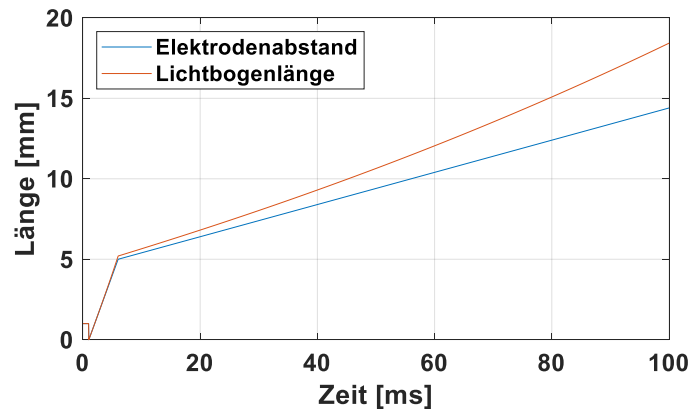


Abbildung 5.23: Elektrodenabstandsprofil 2 und angenommene Lichtbogenlänge für parallele Lichtbögen ($a = 0,025$).

Das zugehörige Simulationsergebnis bis zur Auslösung der Sicherung bei 400°C (vereinfachte Annahme) ist in Abbildung 5.24 und Abbildung 5.25 dargestellt. Man erkennt deutlich den Spannungseinbruch im Kurzschlussmoment und die Stromerhöhung. Weiterhin kann man die zwei unterschiedlichen Abschnitte in der Längenzunahme erkennen. Der Stromsprung bei $t \approx 5$ ms kann mit dem Wiedereinschalten der Last bei Wiedererreichen von 30 V erklärt werden (siehe Abbildung 5.27). Die zugehörige Sicherungstemperatur ist in Abbildung 5.25 dargestellt.

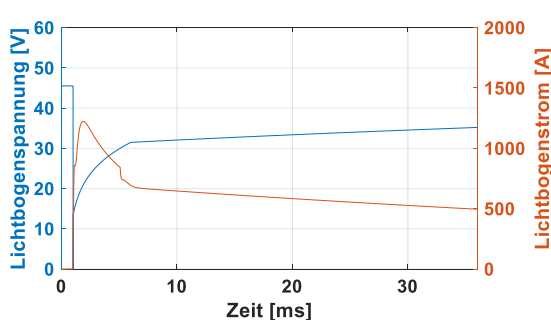


Abbildung 5.24: Lichtbogensignale für Elektrodenabstandsprofil 2.

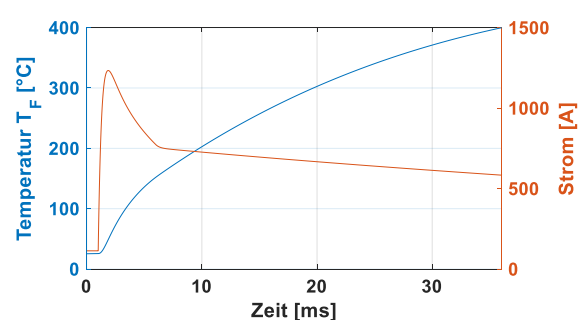


Abbildung 5.25: Sicherungstemperatur und -strom für die Simulation mit dem Elektrodenabstandsprofil 2.

In Abbildung 5.27 sind die Verläufe der Spannungen und Ströme am Anfang und am Ende des Überwachungsabschnitts dargestellt. Der Spannungseinbruch im Kurzschlussmoment lässt den Verbraucher ausfallen. Aufgrund der Längen- und Spannungszunahme des Lichtbogens hat der Verbraucher bei $t \approx 5$ ms wieder eine ausreichende Spannung von 30 V erreicht, was den Anstieg von $i_2(t)$ und den kurzen Einbruch von $u_2(t)$ erklärt. Die in Abbildung 5.26 dargestellte Lichtbogenleistung

und -energie zeigen, dass der Lichtbogen erst bei einer sehr großen abgegebenen Energie (~700 J) gelöscht wird und vorher bereits benachbarte Komponenten in Brand setzen kann.

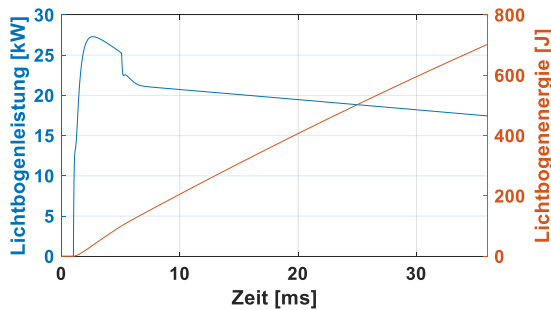


Abbildung 5.26: Lichtbogenenergie und -leistung bis zur Sicherungsauslösung für Elektrodenabstandsprofil 2.

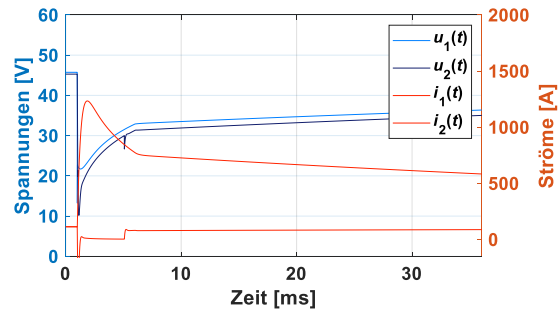


Abbildung 5.27: Strom- und Spannungsverläufe am Anfang und Ende des Überwachungsabschnitts bis zur Sicherungsauslösung für Elektrodenabstandsprofil 2.

Tabelle 10 gibt die Lichtbogenenergien unter Verwendung des Elektrodenabstandsprofils 2 aus Abbildung 5.23 mit einer Kurzschlusszeit von $1 \mu\text{s}$ an. R_L war hochohmig, sodass es vor Lichtbogenzündung keinen Stromfluss durch die Sicherung gab. Dies stellt den Worstcase dar, da R_L keinen Beitrag zum Sicherungsstrom leistet. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde nur die Auslösecharakteristik bzw. der Sicherungstyp angepasst, nicht aber die Induktivitäts- und Widerstandsverhältnisse.

Die hier dargestellten Energien gelten ausschließlich für das angenommene Elektrodenabstandsprofil 2. Auch andere Profile, bei denen potenziell größere Energien umgesetzt werden können, sind denkbar. Die besondere Gefahr durch intermittierende Lichtbögen wird z.B. in [106] dargestellt.

Tabelle 10: Maximale Lichtbogenenergien für das angenommene Elektrodenabstandsprofil 2 und verschiedene Schmelzsicherungen.

Sicherungstyp	Umgesetzte Energie [J]
ATO10	4,1
ATO15	7,48
ATO20	11,15
ATO25	19,32
ATO30	31,59
MINI10	3,55
MINI15	6,69
MINI20	9,37
MINI25	13,28
MINI30	21,67
MAXI20	20,82
MAXI30	119,04
MAXI40	410,28
MAXI50	792,49
MAXI60	Keine Auslösung (2,35 kJ bis zur Löschung aufgrund der Überschreitung der maximalen Länge)

6 Lichtbogen-Diagnosekonzepte

Im folgenden Kapitel werden zunächst über analytische Abschätzungen Zeitanforderungen an Diagnosekonzepte gestellt. Anschließend wird ein Überblick über Diagnosealgorithmen und dann speziell über Lichtbogenphänomene, die für eine Diagnose verwendet werden könnten, gegeben. Die in dieser Arbeit vertiefte elektrische modellbasierte Diagnose wird danach allgemein eingeführt und dann speziell an die Basistopologie *Einzelleitung* angepasst. Die Nachbildung eines parallelen Lichtbogens aus dem Labor mit dem bereits vorgestellten Lichtbogenmodell schafft abschließend eine sehr realitätsnahe Umgebung, um den Diagnose-Algorithmus zu validieren und seine Grenzen zu untersuchen.

6.1 Analytische Abschätzungen zu Lichtbogenenergien

Um die Zusammenhänge zwischen seriellen und parallelen Lichtbögen, sowie die möglichen Worstcase-Situationen abzuschätzen und so verschiedene Rahmenbedingungen, wie z.B. zeitliche Anforderungen an Lichtbogen-Diagnosekonzepte oder minimale parallele Lichtbogenströme, definieren zu können, werden an dieser Stelle allgemeine analytische Untersuchungen zu Lichtbogenenergien vorgestellt.

Da das Längenprofil eines Lichtbogens nicht zuverlässig vorhergesagt werden kann, kann zunächst davon ausgegangen werden, dass der Lichtbogen im Arbeitspunkt der maximalen Verlustleistung länger bestehen kann. Mit der Variation der Länge können die Lichtbogen-Arbeitspunkte unter Berücksichtigung der geltenden Rahmenbedingungen nahezu beliebig gesteuert werden. Aufgrund dieses Freiheitsgrades ist die Reduzierung des Lichtbogenmodells auf eine konstante Quelle in erster Näherung zulässig. Die Arbeitspunkte der maximalen Verlustleistung können für ohmsche Lasten und Konstantleistungsverbraucher bestimmt werden. Trotz einer lichtbogensicheren Bordnetzauslegung, wie sie im vorigen Kapitel beschrieben wurde, können auch serielle Lichtbögen in die Betrachtung mit einbezogen werden, da sie aufgrund der in Abbildung 3.37 dargestellten Wiederzündung trotzdem länger brennen können.

Die nachfolgend dargestellten Analysen führen systematisch zu den zentralen Darstellungen in Abbildung 6.7, Abbildung 6.11, Abbildung 6.17, Abbildung 6.20, Abbildung 6.21, Abbildung 6.25. Hier werden die maximal zulässigen Reaktionszeiten von Diagnosekonzepten bei Lichtbogenfehlern in unterschiedlichen Konfigurationen und mit unterschiedlichen Rahmenbedingungen dargestellt. Um analytische Abschätzungen anstellen zu können, werden im Folgenden ebenfalls reduzierte Ersatzschaltbilder verwendet. Es werden ausschließlich Arbeitspunktanalysen durchgeführt.

6.1.1 Lichtbögen in Zusammenhang mit ohmschen Verbrauchern

Für eine vereinfachte analytische Analyse wird das Ersatzschaltbild in Abbildung 3.15 reduziert. Die reduzierten Ersatzschaltbilder zur Analyse der Arbeitspunkte von seriellen und parallelen Lichtbögen sind in Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 dargestellt. Für die Analyse des seriellen Lichtbogens werden die seriellen Widerstände R_{in} , R_1 , R_2 und R_L in R zusammengefasst. Für die parallele Analyse werden die Widerstände R_{in} und R_1 in R_{1p} und die Widerstände R_2 und R_L in R_{2p} zusammengefasst. Da es sich um eine Arbeitspunktanalyse handelt, können die Leitungsinduktivitäten und die Abschlusskapazität vernachlässigt werden.

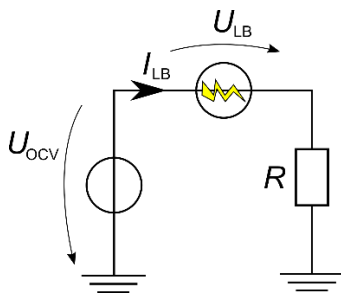


Abbildung 6.1: Reduziertes Ersatzschaltbild zur Arbeitspunktanalyse von seriellen Lichtbögen mit ohmschen Lasten.

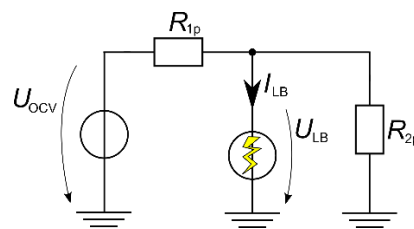


Abbildung 6.2: Reduziertes Ersatzschaltbild zur Arbeitspunktanalyse von parallelen Lichtbögen mit ohmschen Lasten.

Die Leistung des parallelen Lichtbogens kann basierend auf Abbildung 6.2 mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$P_{LB,parallel} = \frac{-U_{LB}^2 \cdot (R_{1p} + R_{2p}) + U_{LB} \cdot R_{2p} \cdot U_{OCV}}{R_{1p} \cdot R_{2p}} \quad (6.1)$$

Den Punkt der maximalen Verlustleistung kann man wie folgt bestimmen:

$$\frac{d}{dU_{LB}} P_{LB,parallel}(U_{LB}) = 0 \quad (6.2)$$

$$U_{LB} |_{P_{LB,parallel}=P_{LB,parallel,max}} = \frac{U_{OCV}}{2} \cdot \frac{R_{2p}}{R_{1p} + R_{2p}} \quad (6.3)$$

Es ist zu erkennen, dass der Lichtbogen dann im Punkt seiner maximalen Verlustleistung ist, wenn die Lichtbogenspannung weniger als die halbe Quellenspannung beträgt.

Die Lichtbogenleistung in diesem Arbeitspunkt kann mit der dargestellten Gleichung berechnet werden (Gleichung (6.3) in Gleichung (6.1) einsetzen):

$$P_{\text{LB,parallel,max}} = \frac{U_{\text{OCV}}^2 \cdot R_{2p}}{4 \cdot R_{1p} \cdot (R_{1p} + R_{2p})} \quad (6.4)$$

Da parallele Lichtbogenfehler zu einer beliebigen Zeit in einem unbekanntem Betriebszustand der Steuergeräte/Verbraucher auftreten können, muss davon ausgegangen werden, dass sie dann auftreten, wenn die Verlustleistung maximal ist, wenn also R_{2p} gegen unendlich geht, bzw. das angeschlossene Steuergerät bzw. der zu versorgende Aktuator ausgeschaltet ist. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 6.3 für eine Beispielkonfiguration verdeutlicht. Hier sind maximale Lichtbogenleistungen (Gleichung (6.3) bzw. Gleichung (6.4)) in Abhängigkeit von R_{2p} bei einer Quellenspannung $U_{\text{OCV}} = 48 \text{ V}$ und einem $R_{1p} = 10 \text{ m}\Omega$ dargestellt. Die weiteren Analysen beziehen sich daher auf den seriellen Lichtbogen, der gleichzeitig das Worstcase-Szenario für parallele Lichtbögen darstellt.

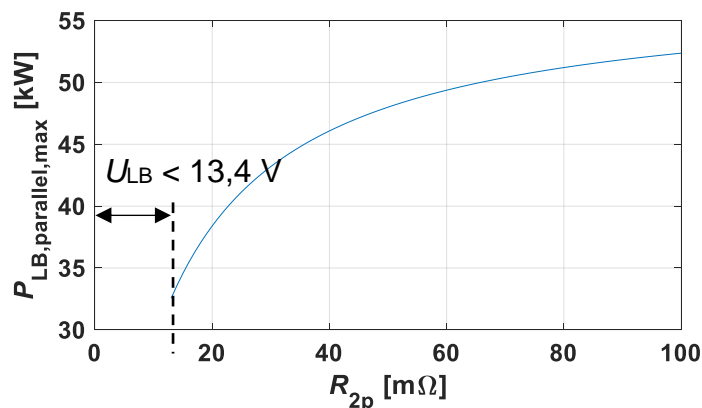


Abbildung 6.3: Maximale Lichtbogenleistung bei parallelem Lichtbogen mit variierendem R_{2p} , $R_{1p} = 10 \text{ m}\Omega$, $U_{\text{OCV}} = 48 \text{ V}$.

Der Übergang vom parallelen zum seriellen Lichtbogen wird mit der Grenzwertbetrachtung von R_{2p} durchgeführt:

$$\lim_{R_{2p} \rightarrow \infty} P_{\text{LB,parallel}} = P_{\text{LB,seriell}} = \frac{-U_{\text{LB}}^2 + U_{\text{LB}} \cdot U_{\text{OCV}}}{R_{1p}} \quad (6.5)$$

Wenn R_{2p} gegen unendlich strebt, ergeben sich die Verhältnisse in Abbildung 6.1, also wird der parallele zum seriellen Lichtbogen. Gleiches gilt für die Betrachtung des Punktes der maximalen Verlustleistung:

$$\lim_{R_{2p} \rightarrow \infty} U_{LB} |_{P_{LB,parallel} = P_{LB,parallel,max}} \quad (6.6)$$

$$\frac{d}{dU_{LB}} P_{arc,seriell} = 0 \quad (6.7)$$

$$U_{LB} |_{P_{arc,seriell} = P_{arc,seriell,max}} = \frac{U_{OCV}}{2} \quad (6.8)$$

Die Lösung von Gleichung (6.6) und Gleichung (6.7) erzeugen das gleiche Ergebnis wie Gleichung (6.8).

Gemäß den Gesetzen der Leistungsanpassung befindet sich der Lichtbogen genau dann im Punkt der maximalen Verlustleistung, wenn an ihm die halbe Quellenspannung abfällt. Die tatsächliche Länge des Lichtbogens hängt dabei von der Eingangsbeschaltung ab. In Abbildung 6.4 ist die längenabhängige Lichtbogenleistung in einem seriellen Stromkreis mit $U_{OCV} = 48 \text{ V}$ und $R = 0,25 \text{ } \Omega$ abgebildet. Es wurde die in Kapitel 3.2.5 entwickelte ALVE-Lichtbogengleichung mit den ermittelten Parametern für Kupfer und $a \rightarrow 0$ verwendet. Es kann eindeutig ein Maximum erkannt werden. In Abbildung 6.5 ist die stromabhängige Lichtbogenlänge für die maximale Verlustleistung bei verschiedenen Quellenspannungen dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass schon kurze Lichtbögen eine maximale Verlustleistung hervorrufen. Dies lässt vermuten, dass die Worstcase-Annahme, dass der Lichtbogen sich im Punkt seiner maximalen Verlustleistung befindet, sehr gut anwendbar ist.

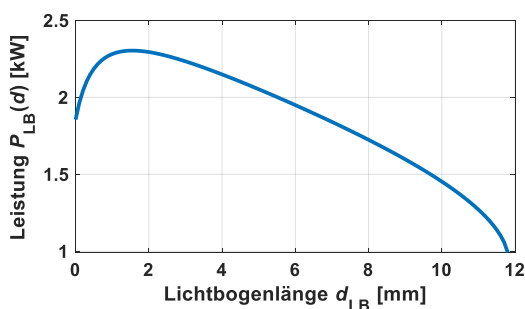


Abbildung 6.4: Längenabhängige Lichtbogenleistung in seriellen Stromkreis mit $R = 0,25 \text{ } \Omega$ und $U_{ocv} = 48 \text{ V}$.

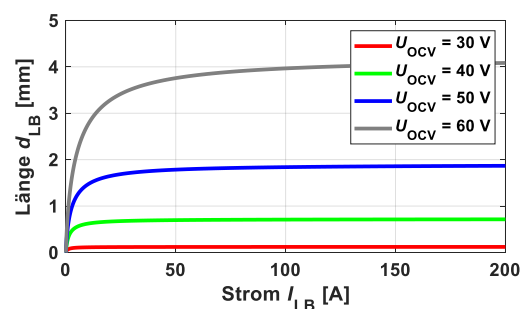


Abbildung 6.5: Stromabhängige Lichtbogenlänge, die eine maximale Verlustleistung hervorrufen, für verschiedene Quellenspannungen.

Die maximale Verlustleistung des Lichtbogens im dargestellten Stromkreis kann mit der nachfolgenden Gleichung berechnet werden:

$$P_{\text{LB,max,seriell}} = \frac{1}{4 \cdot R} \cdot U_{\text{OCV}}^2 \quad (6.9)$$

Wenn man die in Kapitel 5.3 begründete maximale Verlustenergie des Lichtbogens von 100 J zugrunde legt, kann für verschiedene serielle Widerstände eine maximale Reaktionszeit angegeben werden, in der ein Lichtbogen erkannt und gelöscht werden muss, um das Risiko für kritische Beschädigungen oder sogar Brände minimieren zu können. In Abbildung 6.6 ist die maximale Verlustleistung des Lichtbogens bei verschiedenen seriellen Widerständen für $U_{\text{OCV}} = 48 \text{ V}$ dargestellt. In Abbildung 6.7 ist die maximale Reaktionszeit bei variierendem seriellen Widerstand dargestellt.

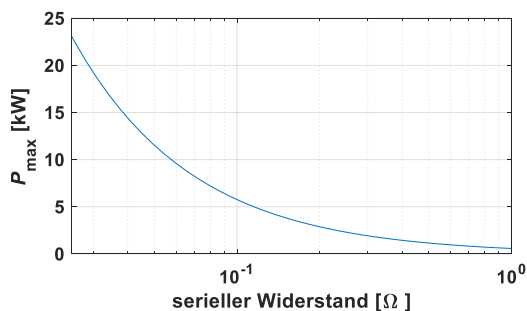


Abbildung 6.6: Maximale Lichtbogenleistung über seriellen Widerstand R .

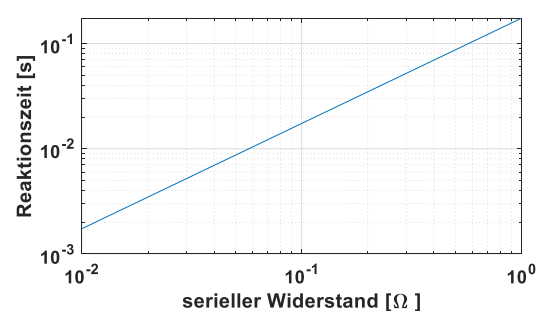


Abbildung 6.7: Maximale Reaktionszeit über seriellen Widerstand R .

Auf Basis der dargestellten Analysen liegt die Reaktionszeit bei Lichtbögen im Millisekundenbereich. Hierbei kommt es stark auf die Größe des seriellen Widerstands an. Bei parallelen Lichtbögen besteht dieser serielle Widerstand aus den Innenwiderständen der Quellen, den Übergangswiderständen der Stecker und den Leitungswiderständen bis zum Fehlerort. Bei seriellen Lichtbögen kann der serielle Widerstandswert deutlich größer sein, da auch der Verbraucherwiderstand berücksichtigt werden muss.

Berücksichtigung von Sicherungen

Die bisher dargestellten Analysen haben gezeigt, dass die Betrachtung für serielle Lichtbögen gleichzeitig die Worstcase-Situation für parallele Lichtbögen darstellt. Da jedoch die Lichtbogenleistungen bzw. -energien bei parallelen Lichtbögen unrealistisch ansteigen können, sollten für realitätsnahe Analysen weitere Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Üblicherweise gibt es Sicherungselemente, die als Leitungsschutz fungieren. Diese können parallele Lichtbögen mit großen Fehlerströmen

löschen. Das von Abbildung 3.15 ausgehende vereinfachte Ersatzschaltbild in Abbildung 6.2 wird also um ein Sicherungselement F erweitert. Diese Erweiterung ist in Abbildung 6.8 dargestellt.

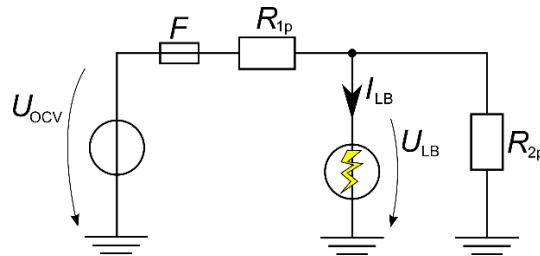


Abbildung 6.8: Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur analytischen Berechnung paralleler Lichtbögen mit Berücksichtigung eines Sicherungselements.

Parallele Lichtbögen, deren Strom dem nominalen Laststrom ähneln, sind von besonderem Interesse. In diesem Zusammenhang soll deswegen nun der minimale Lichtbogenstroms I_{Abriss} untersucht werden. Ein Lichtbogen kann, abhängig von der Eingangsbeschaltung, nur oberhalb eines minimalen Stroms stabil brennen, wie auch bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben wurde. Die durch die Beschaltung am Lichtbogenort (also für U_{LB} und I_{LB}) möglichen U - I -Arbeitspunkte können mit der hier dargestellten Gleichung berechnet werden:

$$U(I) = -\frac{R_{1p} \cdot R_{2p}}{R_{1p} + R_{2p}} \cdot I + \frac{R_{2p} \cdot U_{\text{OCV}}}{R_{1p} + R_{2p}} \quad (6.10)$$

Werden nun die möglichen mit den geforderten Arbeitspunkten (siehe Gleichung (3.10)) verglichen, kann der minimale Lichtbogenstrom für die maximale Lichtbogenlänge bestimmt werden. Die Auswertung von der nachfolgenden Gleichung beschreibt den tatsächlichen Lichtbogenarbeitspunkt:

$$-\frac{R_{1p} \cdot R_{2p}}{R_{1p} + R_{2p}} \cdot I_{\text{LB}} + \frac{R_{2p} \cdot U_{\text{OCV}}}{R_{1p} + R_{2p}} - \left(A_{\text{ALVE}} + \ln(B_{\text{ALVE}} \cdot d_{\text{LB}} + 1) + \frac{D_{\text{ALVE}} \cdot d_{\text{LB}}}{I_{\text{LB}}} \right) = 0 \quad (6.11)$$

Mit $\sigma = \frac{R_{2p}}{R_{1p} + R_{2p}}$ und einigen Umformungen ergibt sich die folgende Gleichung aus Gleichung (6.11):

$$I_{\text{LB}}^2 - I_{\text{LB}} \cdot \frac{\sigma \cdot U_{\text{OCV}} - A_{\text{ALVE}} - B_{\text{ALVE}} \cdot \ln(C_{\text{ALVE}} \cdot d_{\text{LB}} + 1)}{\sigma \cdot R_{1p}} + \frac{D_{\text{ALVE}} \cdot d_{\text{LB}}}{\sigma \cdot R_{1p}} = 0 \quad (6.12)$$

Die Auswertung dieser Gleichung hat zwei Ergebnisse, welche mit $\chi(d_{LB}) = \frac{\sigma \cdot U_{OCV} - A_{ALVE} - B_{ALVE} \cdot \ln(C_{ALVE} \cdot d_{LB} + 1)}{\sigma \cdot R_{1p}}$ und $v = \frac{D_{ALVE} \cdot d_{LB}}{\sigma \cdot R_{1p}}$ in der nachfolgenden Gleichung dargestellt sind:

$$I_{LB,1/2} = \frac{\chi(d_{LB})}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\chi(d_{LB})}{2}\right)^2 - v(d_{LB})} \quad (6.13)$$

Es wird klar, dass es theoretisch zwei Arbeitspunkte gibt, in denen der Lichtbogen existieren kann. Tatsächlich nimmt er den mit dem größeren Strom ein, da dies der stabile Arbeitspunkt ist. Die maximale Lichtbogenlänge, also der minimale Lichtbogenstrom ist dann erreicht, wenn es nur noch ein Ergebnis gibt, wenn also $\left(\frac{\chi(d_{LB})}{2}\right)^2 + v(d_{LB}) = 0$. Anhand der Auswertung der vorgestellten Gleichungen ergeben sich die in Abbildung 6.9 dargestellten minimalen Lichtbogenströme in einer exemplarischen Konfiguration mit $R_{1p} = 30 \text{ m}\Omega$ und $U_{OCV} = 48 \text{ V}$ mit variierenden Lastwiderständen R_{2p} . Es ist zu erkennen, dass Lichtbögen mit niederohmigen parallelen Lastwiderständen bis zu deutlich geringeren Strömen stabil brennen können. Gleichzeitig sind die Auslöseströme der Sicherungen, abhängig vom Lastwiderstand, dargestellt. Um die analytische Betrachtung zu vereinfachen, wird davon ausgegangen, dass der Nennstrom der Last mit $I_n = 48 \text{ V}/R_{2p}$ bestimmt werden kann und der Auslösestrom der Sicherung bei $1,3 \cdot I_n$ liegt. In Szenarien, in denen der trotz Lichtbogen verbleibende Verbraucherstrom (durch R_{2p}) und der Lichtbogenstrom den Sicherungsstrom nicht überschreiten, kann ein paralleler Lichtbogen trotz Sicherungselement existieren.

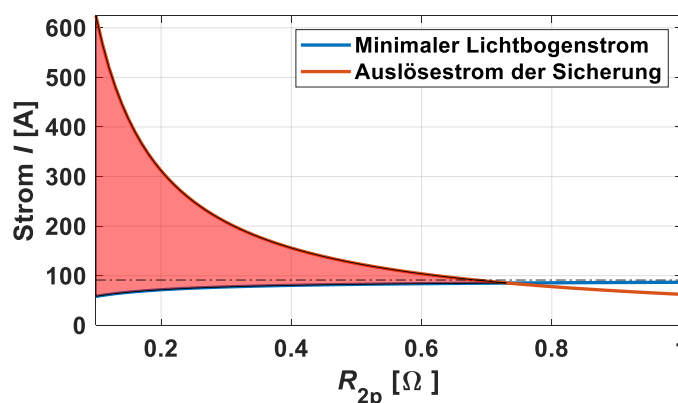


Abbildung 6.9: Kritischer Strombereich für parallele Lichtbögen.

Es ist zu erkennen, dass bis zu einer lastabhängigen Grenze parallele Lichtbögen aufgrund ihres Stroms nicht von einem Sicherungselement gegen Kurzschluss bzw. Überlast erkannt werden können. Bei einem wie hier beschriebenen ausgelegten Sicherungselement für Verbraucher, die oberhalb eines gewissen Widerstandswertes liegen, kann

dieses Sicherungselement parallele Lichtbögen bis zu ihrer unteren Stromgrenze erkennen und löschen.

Für eine Worstcase-Abschätzung kann hiervon ausgehend für jeden R_{2p} im möglichen Strombereich der Punkt der maximalen Verlustleistung bestimmt werden. Die Lichtbogenleistung kann mit der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$P_{LB}(I_{LB}) = R_{2p} \cdot \frac{U_{OCV} - R_{1p} \cdot I_{LB}}{R_{1p} + R_{2p}} \cdot I_{LB} \quad (6.14)$$

Das Ergebnis ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Unter der Verwendung der definierten Energiegrenze von 100 J können die maximalen Reaktionszeiten, wie in Abbildung 6.11 dargestellt, bestimmt werden.

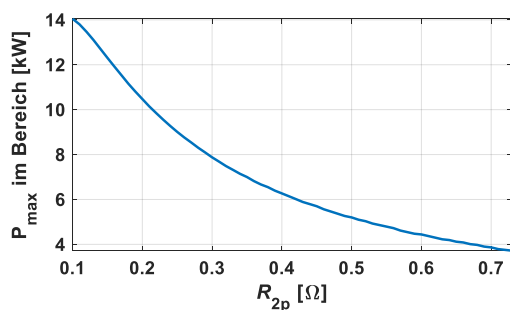


Abbildung 6.10: Maximale Lichtbogenleistung ohne Auslösen eines Sicherungselements.

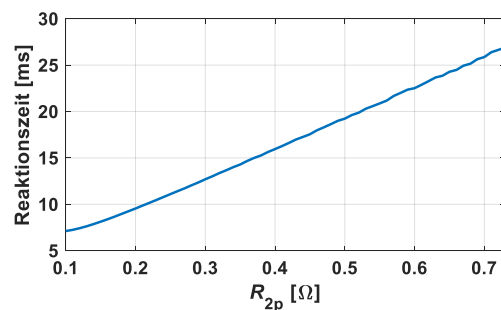


Abbildung 6.11: Maximale Reaktionszeit einer Lichtbogenerkennung, die keine Überstromdetektion ist.

Der minimale Lichtbogenstrom von parallelen Lichtbögen wird größer mit größer werdendem R_{2p} . Je größer R_{1p} , desto kleiner ist der minimale Lichtbogenstrom. Mit kleiner werdender Quellenspannung U_{OCV} wird auch der minimale Lichtbogenstrom kleiner. Der kleinste Lichtbogenstrom tritt also bei kleinen U_{OCV} , großen R_{1p} und kleinen R_{2p} auf. Diese Verhältnisse können bei der Parametrierung von Diagnosealgorithmen wichtig sein.

6.1.2 Lichtbögen in Zusammenhang mit Konstantleistungsverbrauchern

Die reduzierten Ersatzschaltbilder zur Arbeitspunktanalyse von seriellen und parallelen Lichtbögen in Netzen mit Konstantleistungsverbrauchern sind in Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 dargestellt.

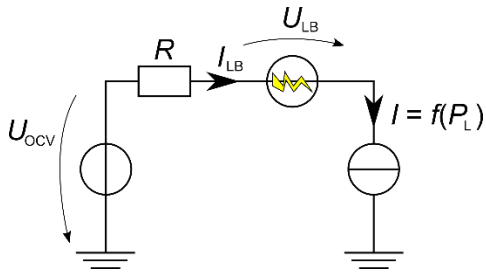


Abbildung 6.12: Reduziertes Ersatzschaltbild zur Arbeitspunktanalyse serieller Lichtbögen bei Konstantleistungsverbrauchern.

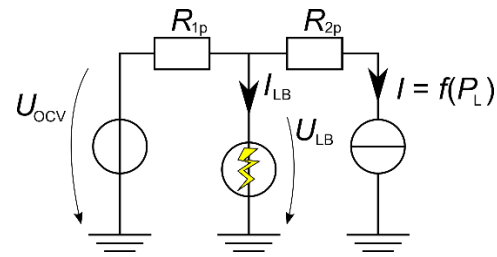


Abbildung 6.13: Reduziertes Ersatzschaltbild zur Arbeitspunktanalyse paralleler Lichtbögen bei Konstantleistungsverbrauchern.

Diese Ersatzschaltbilder werden genutzt, um analytische Abschätzungen durchführen zu können.

6.1.2.1 Serieller Lichtbogen mit Konstantleistungsverbrauchern

Die Lichtbogenleistung $P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{LB}$ im seriellen Stromkreis mit Konstantleistungsverbrauchern kann mit der dargestellten Gleichung berechnet werden:

$$P_{LB} = U_{LB} \cdot \left[\frac{U_{OCV} - U_{LB}}{2R} \pm \sqrt{\left(\frac{U_{OCV} - U_{LB}}{2R} \right)^2 - \frac{P_L}{R}} \right] \quad (6.15)$$

Es sind nur theoretisch zwei Arbeitspunkte für den definierten Konstantleistungsverbraucher möglich. In der Realität stellt sich der Arbeitspunkt mit der größeren Spannung und dem kleineren Strom an der Last ein. Daher kann Gleichung (6.15) umgeschrieben werden zu:

$$P_{LB} = U_{LB} \cdot \left[\frac{U_{OCV} - U_{LB}}{2R} - \sqrt{\left(\frac{U_{OCV} - U_{LB}}{2R} \right)^2 - \frac{P_L}{R}} \right] \quad (6.16)$$

Ein beispielhafter Verlauf ist für eine Quellenspannung $U_{OCV} = 48 \text{ V}$, einen seriellen Widerstand $R = 30 \text{ m}\Omega$ und einer Verbraucherleistung $P_L = 5 \text{ kW}$ in Abbildung 6.14 dargestellt.

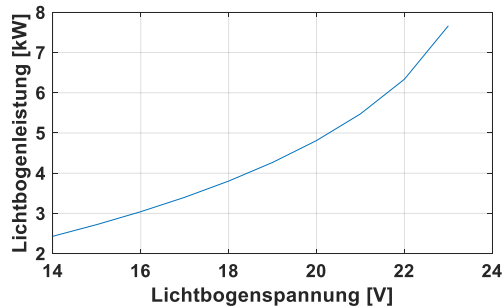


Abbildung 6.14: Lichtbogenleistung für seriellen Lichtbogen mit Konstantleistungsverbraucher.

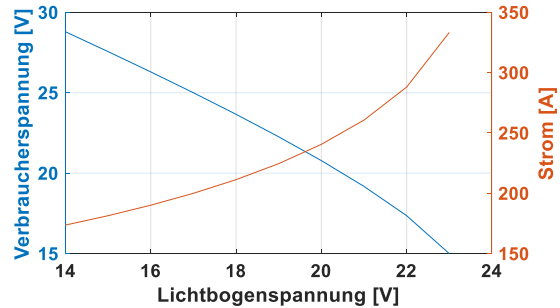


Abbildung 6.15: Verbraucherspannung und -strom bei seriellen Lichtbogen.

Anders als bei seriellen Lichtbögen mit einem ohmschen Verbraucher ist zu erkennen, dass mit steigender Lichtbogenspannung auch die Lichtbogenleistung zunimmt. Da eine steigende Lichtbogenspannung eine Verringerung der Verbraucherspannung zur Folge hat, muss der Strom ebenfalls steigen, um die Verbraucherleistung konstant zu halten, was in Abbildung 6.15 dargestellt ist. Generell können jedoch keine beliebig niedrigen Spannungen am Verbraucher toleriert werden. Daher wird von einer maximalen Lichtbogenverlustleistung bei einer minimalen Verbraucherspannung von 20 V ausgegangen. Die lastabhängige maximale Lichtbogenleistung bei einer Minimalspannung von 20 V an dem Konstantleistungsverbraucher für verschiedene Widerstände R ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Die entsprechenden maximalen Reaktionszeiten sind in Abbildung 6.17 dargestellt.

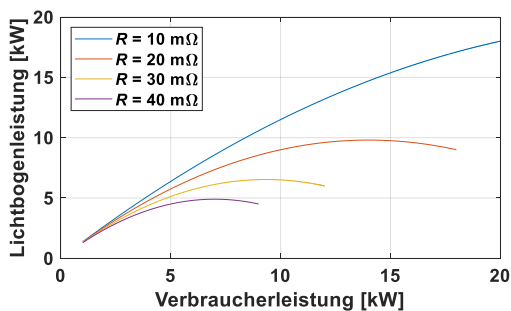


Abbildung 6.16: Maximale Lichtbogenleistung mit Konstantleistungsverbrauchern bei einer Minimalspannung von 20 V.

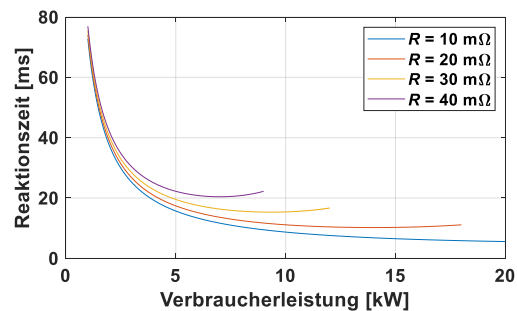


Abbildung 6.17: Maximale Reaktionszeiten, basierend auf Abbildung 6.16.

Es ist zu erkennen, dass niedrige Widerstandswerte zwischen Lichtbogen und Quelle (bzw. serielle Widerstandswerte) zu einer geringeren maximalen Reaktions-

dauer führen. Gleichzeitig müssen Lichtbögen in seriellen Stromkreisen mit Hochleistungsverbrauchern schneller gelöscht werden als in Stromkreisen mit Verbrauchern geringerer Leistung. Die geforderten Zeiten liegen bei wenigen Millisekunden.

6.1.2.2 Paralleler Lichtbogen mit Konstantleistungsverbrauchern

Bei einem parallelen Lichtbogenszenario mit Konstantleistungsverbraucher (siehe Abbildung 6.13) kann der Lichtbogenstrom mit der folgenden Gleichung berechnet werden.

$$I_{LB} = \frac{U_{OCV} - U_{LB}}{R_{1p}} - \left[\frac{U_{LB}}{2R_{2p}} \pm \sqrt{\left(\frac{U_{LB}}{2R_{2p}}\right)^2 - \frac{P_L}{R_{2p}}} \right] \quad (6.17)$$

Da in realen Bordnetzen bei Konstantleistungsverbrauchern nur einer von beiden möglichen Arbeitspunkten aus Gleichung (6.17) eingenommen werden kann, kann Gleichung (6.17) reduziert werden auf:

$$I_{LB} = \frac{U_{OCV} - U_{LB}}{R_{1p}} - \frac{U_{LB}}{2R_{2p}} + \sqrt{\left(\frac{U_{LB}}{2R_{2p}}\right)^2 - \frac{P_L}{R_{2p}}} \quad (6.18)$$

Wie man leicht sieht, gibt es bei der lichtbogenspannungsabhängigen Lichtbogenleistung $P_{LB} = U_{LB} \cdot I_{LB}$ einen Maximalpunkt. Dieser wird als Worstcase für die folgenden Berechnungen berücksichtigt. Mit dem Auflösen nach U_{LB} der im Folgenden dargestellten Gleichung wird der Punkt der maximalen Verlustleistung gefunden:

$$\frac{d}{dU_{LB}} P_{LB}(U_{LB}) = \frac{-2U_{LB} + U_{OCV}}{R_{1p}} - \frac{U_{LB}}{R_{2p}} + \frac{\frac{U_{LB}^3}{R_{2p}^2} - \frac{2U_{LB}P_L}{R_{2p}}}{2\sqrt{\frac{U_{LB}^4}{4R_{2p}^2} - \frac{U_{LB}^2P_L}{R_{2p}}}} = 0 \quad (6.19)$$

Diese maximale Verlustleistung variiert mit der Verbraucherleistung. Die verbraucherleistungsabhängige maximale Verlustleistung des parallelen Lichtbogens ist in Abbildung 6.18 für variierende R_{2p} und $R_{1p} = 25 \text{ m}\Omega$ dargestellt. Bei Variation von R_{1p} mit $R_{2p} = 5 \text{ m}\Omega$ ergibt sich die Darstellung in Abbildung 6.19. Die am Verbraucher verbleibende Spannung in diesem Betriebszustand kann mit der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$U_L = \frac{U_{LB}}{2} + \sqrt{\left(\frac{U_{LB}}{2}\right)^2 - R_{2p} \cdot P_L} \quad (6.20)$$

Die dargestellten Beispiele behalten eine Verbraucherspannung, die größer als 20 V ist.

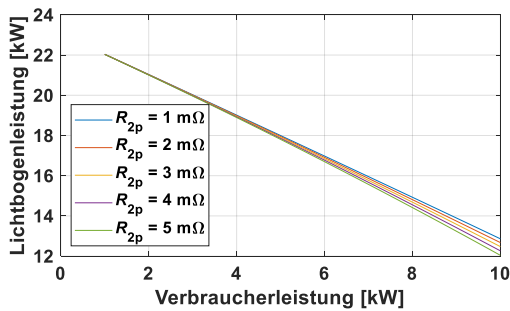


Abbildung 6.18: Maximale Lichtbogenleistung in Abhängigkeit von der Verbraucherleistung bei $R_{1p} = 25 \text{ m}\Omega$.

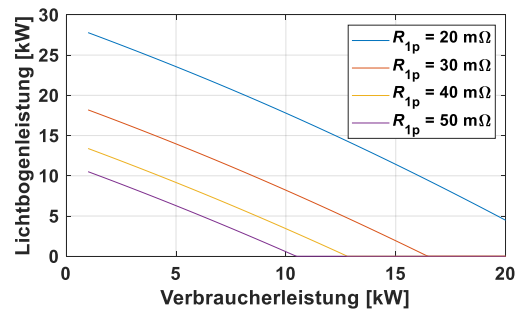


Abbildung 6.19: Maximale Lichtbogenleistung in Abhängigkeit von der Verbraucherleistung bei $R_{2p} = 5 \text{ m}\Omega$.

In Abbildung 6.20 und Abbildung 6.21 werden die maximal zulässigen Reaktionszeiten mit variierenden Ersatzschaltbildgrößen R_{1p} , R_{2p} und P_L dargestellt.

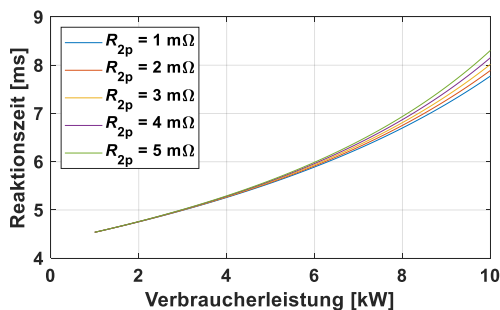


Abbildung 6.20: Maximale Reaktionszeit für parallele Lichtbögen in Teilbordnetzen mit Konstantleistungsverbraucher mit variierendem Widerstand zwischen Lichtbogen und Verbraucher.

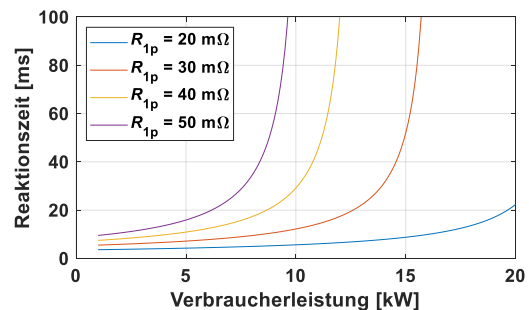


Abbildung 6.21: Maximale Reaktionszeit für parallele Lichtbögen in Teilbordnetzen mit Konstantleistungsverbraucher mit variierendem Quellen-Innenwiderstand.

Es ist zu erkennen, dass mit der Vergrößerung des Widerstandes zwischen dem parallelen Lichtbogen und dem Konstantleistungsverbraucher (R_{2p}) die maximale Reaktionszeit ebenfalls ansteigt. Da nicht vorhergesagt werden kann, wo sich ein paralleler Lichtbogen ausbildet, stellt also ein Lichtbogen am Anfang des Überwachungsabschnitts den Worstcase dar.

Weiterhin ist zu erkennen, dass eine Vergrößerung des Quellen-Innenwiderstands (R_{1p}) eine Vergrößerung der maximalen Reaktionszeit ermöglicht. Ein paralleler Lichtbogen in einem Teilbordnetz, welches sich nah an einer Quelle befindet, wo der Quellen-Innenwiderstand also klein ist, stellt dementsprechend den Worstcase dar.

Berücksichtigung von Sicherungen

Wenn man davon ausgeht, dass ein Stromkreis mit einem Sicherungselement abgesichert ist, werden die möglichen Lichtbogenleistungen paralleler Lichtbögen eingeschränkt. Das für analytische Untersuchungen vereinfachte Ersatzschaltbild in Abbildung 6.13 kann um ein Sicherungselement erweitert werden, welches in Abbildung 6.22 dargestellt ist.

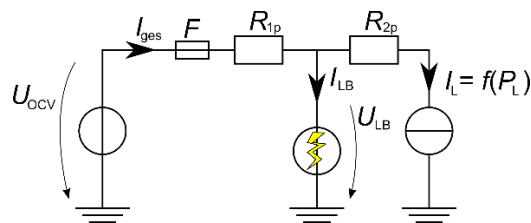


Abbildung 6.22: Vereinfachtes Ersatzschaltbild zur analytischen Berechnung paralleler Lichtbögen mit Berücksichtigung eines Sicherungselements.

Der maximale Strom, der von der Sicherung getragen werden kann, ohne dass sie auslöst, kann vereinfacht von der maximalen Dauerleistung des Verbrauchers vorgegeben sein. Wenn man davon ausgeht, dass der Verbraucher bis zu einer unteren Spannungsgrenze von 36 V seine volle Leistung umsetzen kann, kann der maximale Strom mit $P_{L,max}/36\text{ V}$ berechnet werden. Die Sicherung kann nun so ausgelegt werden, dass sie den 1,3-fachen Strom als Überstrom bzw. Kurzschluss erkennt. Es wird also das im Folgenden dargestellte Verhältnis angenommen:

$$I_{ges,max} = 1,3 \cdot \frac{P_{L,max}}{36\text{ V}} \quad (6.21)$$

Der tatsächliche Strom durch die Sicherung wird vom Verhältnis der Lichtbogen-Spannung U_{LB} , des strombegrenzenden Widerstands R_{1p} und der Quellenspannung U_{OCV} mit der folgenden Gleichung vorgegeben:

$$I_{ges} = \frac{U_{OCV} - U_{LB}}{R_{1p}} \quad (6.22)$$

Wie sich dieser Gesamtstrom I_{ges} in den Lichtbogenstrom I_{LB} und Laststrom I_{L} aufteilt, wie hoch also die Lichtbogenleistung P_{LB} sein kann, hängt vom aktuellen Betriebszustand der Last, $P_{\text{L,act}}$ ab. Hierbei wird davon ausgegangen, dass ein Konstantleistungsverbraucher eine maximale Leistung $P_{\text{L,max}}$ umsetzen kann, im Intervall 0 kW bis $P_{\text{L,max}}$ jedoch beliebige Leistungspunkte einnehmen kann, die mit $P_{\text{L,act}}$ beschrieben werden können. Der Laststrom kann mit der folgenden Gleichung bestimmt werden.

$$I_{\text{L}} = \frac{U_{\text{LB}}}{2 \cdot R_{2\text{p}}} - \sqrt{\left(\frac{U_{\text{LB}}}{2 \cdot R_{2\text{p}}}\right)^2 - \frac{P_{\text{L,act}}}{R_{2\text{p}}}} \quad (6.23)$$

Die lichtbogenspannungsabhängige Lichtbogenleistungen in einem Stromkreis mit Konstantleistungsverbrauchern und entsprechend dimensioniertem Sicherungselement ist in Abbildung 6.23 dargestellt. Es sind verschiedene Zustände eines Konstantleistungsverbraucher (0 kW, 4 kW, 8 kW) dargestellt. Die Quellenspannung ist $U_{\text{OCV}} = 48 \text{ V}$, die Widerstände sind $R_{1\text{p}} = 50 \text{ m}\Omega$ und $R_{2\text{p}} = 5 \text{ m}\Omega$.

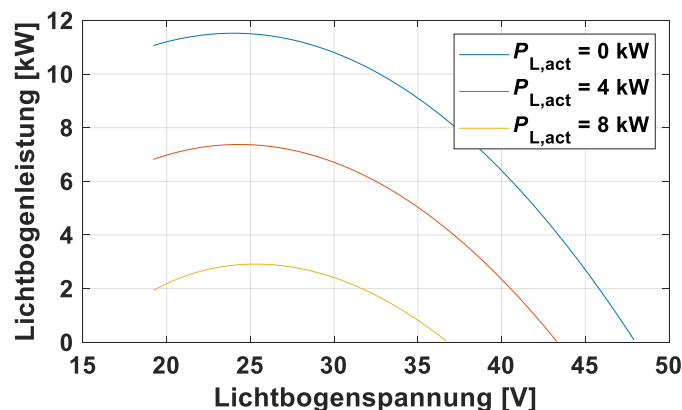


Abbildung 6.23: Lichtbogenleistungen bei $P_{\text{L,max}} = 16 \text{ kW}$ und verschiedenen $P_{\text{L,act}}$.

Man kann erkennen, dass der Worstcase der Lichtbogenleistung bei abgeschaltetem Verbraucher auftritt, also $P_{\text{L,act}} = 0 \text{ kW}$. Weiterhin gibt es einen maximalen Punkt der Lichtbogenverlustleistung entlang dieser Linie.

Wenn man den Worstcase-Punkt ($P_{\text{L,act}} = 0 \text{ kW}$) betrachtet, reduziert sich das Ersatzschaltbild in Abbildung 6.22 auf Abbildung 6.1. Die maximal mögliche Verbraucherleistung bestimmt den begrenzenden Gesamtstrom $I_{\text{ges,max}}$. Bei variierender maximaler Verbraucherleistung $P_{\text{L,max}}$ und entsprechendem Sicherungselement (nach Gleichung (6.21)) sind maximale Lichtbogenleistungen wie in Abbildung 6.24 dargestellt möglich. Eine größer werdende maximale Verbraucherleistung erzeugt ebenfalls einen größeren zulässigen Maximalstrom/Sicherungsstrom. Durch die Erhöhung des Stroms kann auch die maximale Lichtbogenleistung größer werden, da ein Sicherungselement

mit höherem Nennstrom ausgewählt werden muss. Der größer werdende Strom lässt die tatsächliche Lichtbogenspannung im Punkt der maximalen Leistung sinken. Bis zu einer gewissen Sicherungsgröße kann so die Leistung erhöht werden. Ab einer bestimmten Sicherungsgröße wird das Maximum, welches in Abbildung 6.23 dargestellt ist, nach links überschritten und die maximale Lichtbogenleistung bleibt konstant. Die entsprechenden maximalen Reaktionszeiten sind in Abbildung 6.25 dargestellt.

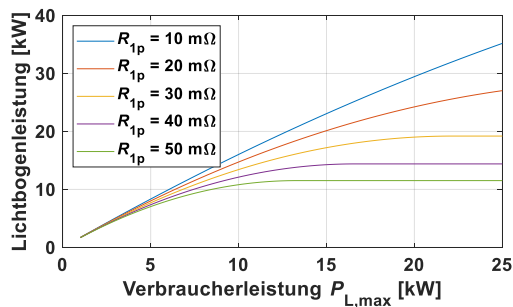


Abbildung 6.24: Maximale Lichtbogenleistung über maximaler Verbraucherleistung und entsprechendem Sicherungselement.

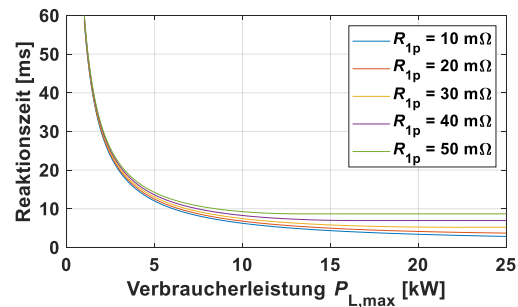


Abbildung 6.25: Maximale Reaktionszeit, abhängig von der maximalen Verbraucherleistung.

Vor dem Hintergrund der bisher dargestellten Analysen kann abgeschätzt werden, welche zeitlichen Anforderungen in verschiedenen Konfigurationen an Lichtbogendetektionsalgorithmen gestellt werden müssen.

6.2 Diagnoseprozesse und Lichtbogendetektionsverfahren

Um Lichtbögen rechtzeitig erkennen und behandeln zu können, sind Lichtbogen-Diagnosekonzepte notwendig. Im Folgenden werden zunächst allgemeine Eigenschaften und Systematisierungsmöglichkeiten von Diagnoseprozessen beschrieben. Danach werden spezielle Phänomene von Lichtbögen beschrieben, die grundsätzlich für eine Detektion verwendet werden könnten. Anschließend wird ein neuer modellbasierter Diagnoseansatz, der die elektrischen Eigenschaften des Lichtbogens nutzt, vorgestellt.

6.2.1 Diagnoseprozesse und Fehlerbehandlung

Ein vollständiges Diagnosekonzept lässt sich in Fehlerdiagnose [107] und Fehlerbehandlung einteilen. Die Fehlerdiagnose beschreibt die Detektion, Lokalisierung und Identifikation von Fehlern [107]. Die Fehlerbehandlung umfasst die Behebung des Fehlers oder die Isolation der Fehlerstelle, in 48 V Kfz-Bordnetzen z.B. durch Schalt-

handlungen. In fail-operational Anwendung muss dies ohne Beeinträchtigung von sicherheitsrelevanten Funktionen geschehen. Der grobe Ablauf ist in Abbildung 6.26 dargestellt.

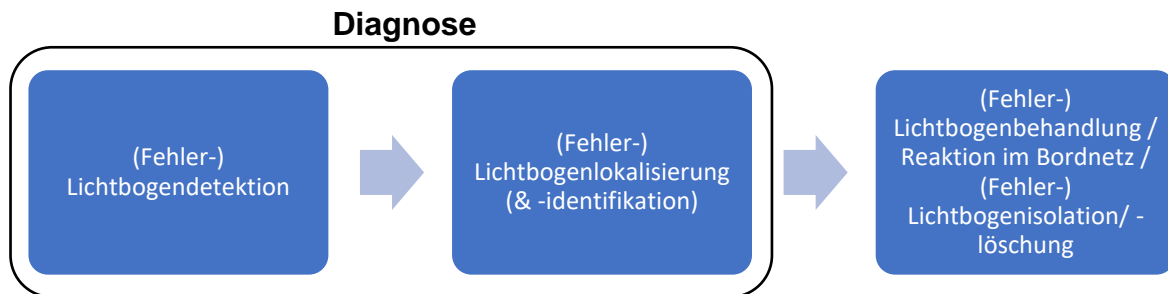


Abbildung 6.26: Allgemeiner Ablauf einer Diagnose [107] und die anschließende Fehlerbehandlung (bezogen auf Lichtbögen).

Die allgemeine Aufgabe einer Diagnose ist es, ein System anhand ausgewählter Eingangs- und Ausgangssignale (siehe Abbildung 6.27) zu beobachten und hiervon eine Detektion, Lokalisierung und Identifikation abzuleiten [108]. Bei dem zu beobachtenden System soll es sich hier um ein 48 V Kfz-Energiebordnetz handeln. Die Eingangs- und Ausgangssignale können in diesem Zusammenhang beispielsweise die bereits erwähnten Strom- oder Spannungswerte sein, aber auch Temperaturwerte und andere Umweltbedingungen oder Betriebszustände verschiedener Verbraucher können hier genannt werden. Die Auswahl der Eingangs- und Ausgangssignale hängt stark von der angestrebten Methode und der Verfügbarkeit der Information ab.

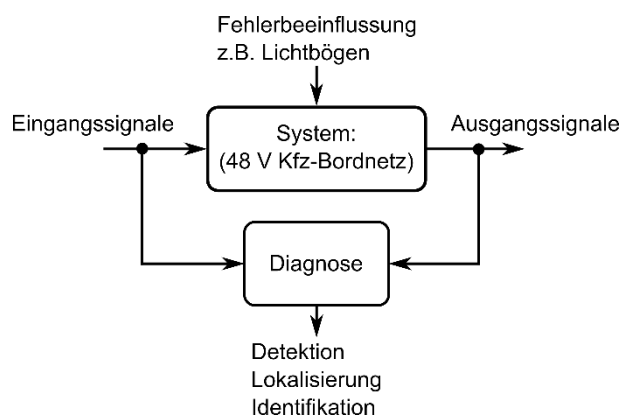


Abbildung 6.27: Grundlegender Ansatz für die Diagnose [108], [109].

Die Detektion beschreibt den Vorgang, der feststellt, ob ein zu beobachtendes System fehlerfrei ist, oder ob ein noch nicht näher identifizierter Fehler vorhanden ist. Wenn die Detektion ermittelt hat, dass ein Fehler im zu beobachtenden System vorhanden ist, muss dieser Fehler näher identifiziert werden. Bei Diagnosealgorithmen,

die neben Lichtbögen auch Kurzschlüsse und Leitungsbrüche berücksichtigen, kann beispielsweise entschieden werden, um welchen Fehlertyp es sich handelt. Auch eine Unterscheidung zwischen seriellern und parallelem Lichtbogen kann als Fehleridentifikation interpretiert werden. Weiterhin ist die Fehlerlokalisierung notwendig. In der Baustopologie *verzweigte Leitung* (siehe Abbildung 2.11 oder Abbildung 3.16) kann die Lokalisierung bedeuten, dass festgestellt wird, in welchem der drei Teilabschnitte ein Lichtbogen aufgetreten ist. Die Lokalisierung kann auch bedeuten, dass der fehlerhafte Ort entlang der Leitung bestimmt wird.

Grundsätzlich gibt es unterschiedliche Ansätze, eine Diagnosemethode aufzubauen. Im Folgenden wird dargestellt, welche Methoden möglich sind und auf welche Methode sich diese Arbeit fokussiert.

Gängige Diagnosemethoden nutzen ausgewählte Signale eines zu beobachtenden Systems [109]. Wenn z.B. bekannt ist, wie sich die Signale im fehlerfreien Fall von den Signalen im Fehlerfall unterscheiden, können hiermit Analysen durchgeführt werden. Hieraus entsteht also die Notwendigkeit, die Informationen über Signale des fehlerfreien und des fehlerbehafteten Systems zu generieren, welche durch verschiedene Maßnahmen erfüllt werden kann. Ein zweites System, welches als Hardware-Redundanz bezeichnet wird, wird als Hardware-Redundanz bezeichnet. Ausgewählte Signale des zu beobachtenden und des redundanten Systems können so direkt miteinander verglichen werden [110], [111]. Wenn ein Modell des zu beobachtenden Systems vorhanden ist, wird dies oft als analytische Redundanz bezeichnet. Ausgewählte Signale können so mit simulierten Signalen verglichen werden [112], [110]. Informationen zu Signalen von fehlerfreien und fehlerbehafteten Systemen können auch in Form historischer Daten oder als Expertenwissen bestehen. Diese Art der Informationsbeschaffung wird häufig als daten- oder wissensbasierte Methode bezeichnet [111], [113].

Die konkrete Verarbeitung der durch redundanz- oder datenbasierte Methoden vorhandenen Informationen kann auf unterschiedliche Arten geschehen. Beispielsweise kann die Verwendung mehrerer Sensoren als Hardware-Redundanz verstanden werden. Ein Vergleich und eine Mehrheitsentscheidung zeigen den wahrscheinlich korrekten Messwert und den fehlerhaften Sensor an [114]. Selbstlernende Algorithmen können als datenbasierter Modellierungsansatz verstanden werden [111]. Weiterhin kann die Verarbeitung der Informationen auf Signalverarbeitung beruhen [111], [115]. Mit signalverarbeitenden Methoden ist hierbei gemeint, dass die überwachten Signale eines Systems auf Fehlersymptome untersucht werden. Das kann z.B. durch das Überwachen von Schwellwerten geschehen. So können z.B. einfache Plausibilitätschecks [115] und Schwellwertuntersuchungen [110], [111] durchgeführt werden.

Abgeleitet von dem bisher beschriebenen kann eine Einteilung verschiedener Diagnoseverfahren, wie in Abbildung 6.28 dargestellt, gemacht werden.

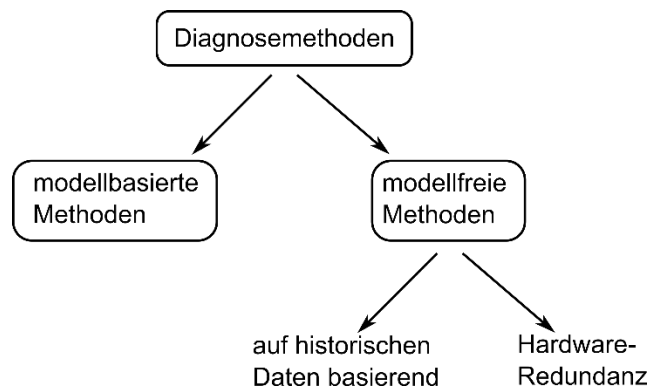


Abbildung 6.28: Darstellung modellbasierter und modellfreier Methoden.

Im Bereich der modellbasierten Methoden können weitere Unterteilungen gemacht werden. Verschiedene modellbasierte Verfahren nutzen die beobachteten Signale in einer Trainingsphase, um die Modellparameter permanent neu zu berechnen. Diese Verfahren werden z.B. Parameteridentifikationsmethoden genannt [109], [116]. Ein entsprechendes Strukturdiagramm ist in Abbildung 6.29 dargestellt. Fehlerzustände können dann aufgrund der Bewertung der berechneten Modellparameter erkannt werden. Weiterhin können modellbasierte Ansätze genannt werden, die konstante Modellparameter haben [109]. Hierbei werden aus den gemessenen und simulierten Daten Residuen, z.B. mittels Paritätsgleichungen, berechnet. Diese Residuen werden mit Hilfe verschiedener Klassifikationsverfahren möglichen Fehlerzuständen zugeordnet. Ein Strukturdiagramm in Abbildung 6.30 dargestellt.

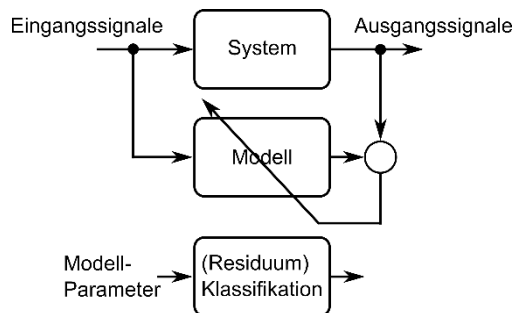


Abbildung 6.29: Allgemeiner Ansatz zur Parameteridentifikation [109], [116].

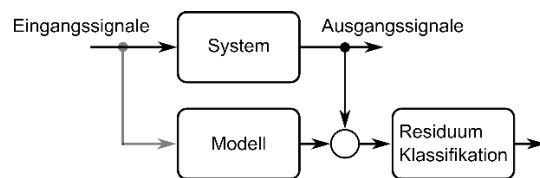


Abbildung 6.30: Allgemeiner Ansatz mit konstantem Modell [109].

Allgemein können die dargestellten modellbasierten Methoden in die Bereiche Residuum-Generierung und Residuum-Verarbeitung/-Klassifikation eingeteilt werden

[107]. Weiterhin können die modellbasierten Methoden auf Basis der benutzten Signale unterschieden werden. Wenn z.B. nur die Ausgangssignale nutzbar sind [112], können beispielsweise Bandpassfilter oder Fourieranalysen genutzt werden. Auf diese Weise können bei bekannten Frequenzen bzw. Spektren, die im Fehlerfall entstehen, Diagnoseentscheidungen getroffen werden. Wenn ebenfalls die Eingangsgrößen zugänglich sind und genutzt werden können, können diese zur Simulation verwendet werden [112]. Abschließend kann die Bewertung des Residuums auf unterschiedlichen Wegen durchgeführt werden. Neben einfachen Verfahren, wie der geometrischen Distanz oder Wenn-Dann-Regeln, können auch komplexere Klassifikatoren, wie neuronale Netze, angewendet werden.

Welcher Ansatz für eine Lichtbogen-Diagnose in 48 V Kfz-Bordnetzen gewählt werden kann, hängt von den speziellen Rahmenbedingungen des zu beobachtenden Systems (hier: 48 V Kfz-Bordnetze) und den Fehlereigenschaften ab. Die Phänomene, die bei Lichtbögen eine Rolle spielen können, werden anhand spezifischer Lichtbogendetektionsverfahren im Folgenden vorgestellt.

6.2.2 Physikalische Lichtbogenphänomene

Spezielle Lichtbogendetektionsverfahren aus der Literatur nutzen die speziellen Eigenschaften von Lichtbögen in den unterschiedlichen Domänen: optisch, akustisch, elektromagnetisch, thermisch und elektrisch. Eine graphische Übersicht ist in Abbildung 6.31 angedeutet.

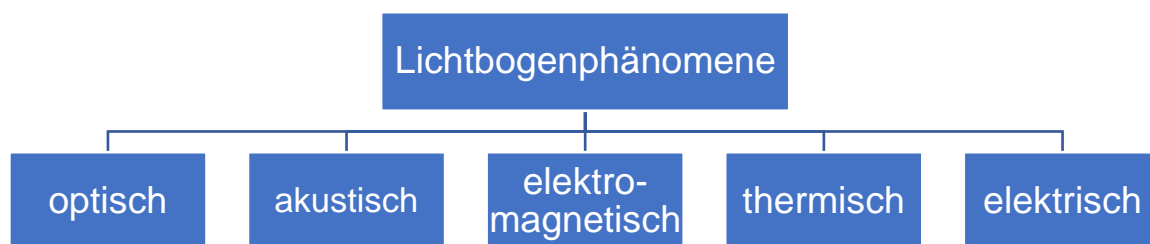


Abbildung 6.31: Überblick über Lichtbogenphänomene.

Diese Phänomene werden im Folgenden anhand spezieller Lichtbogendetektionsverfahren beschrieben. Die Verwendung dieser Phänomene kann auf unterschiedliche Art und Weise geschehen. Daher ist prinzipiell mit jeder Eigenschaft, sowohl ein modellbasiertes als auch modellfreies Verfahren denkbar. Die hier beschriebenen Verfahren werden exemplarisch diskutiert und nach Möglichkeit klassifiziert. Weiterhin wird beschrieben, ob nur eine Detektion oder auch eine Fehlerklassifikation und Lokalisierung möglich sind.

Der Lichtbogen stellt eine starke Lichtquelle dar, was auch zu seiner Namensgebung beigetragen hat. Die optischen Eigenschaften des Lichtbogens weisen spezielle Merkmale auf [117]. Das emittierte Licht kann für eine Diagnose verwendet werden. Durch die Verwendung eines faseroptischen Sensorkabels neben, bzw. in direkter Nähe zu, der zu beobachtenden Leitung können diese Lichtsignale zu einer Auswertestelle weitergeleitet werden [118]. Auch optisch-elektrische Kombinationsleiter können genutzt werden. Hierbei besteht die Isolation aus optisch leitfähigem Material, welches ebenfalls die Lichtimpulse eines Lichtbogens zu einer Auswerteeinheit weiterleiten kann [119]. Es handelt sich um Verfahren, welche eine Schwellwertüberprüfung auf Basis bekannter Verhaltensweisen des Lichtbogens durchführen. Man kann es am ehesten den modellfreien Verfahren zuordnen, die auf Expertenwissen, bzw. auf historisches Tabellenwissen, zurückgreifen. Es kann eine Detektion durchgeführt werden. Die Lokalisierung und Identifikation sind zunächst nicht möglich. Die Lichtsignale könnten anhand ihrer Intensität ausgewertet werden. Auch die Überprüfung auf bestimmte Lichtspektren im Frequenzbereich mittels bestimmter Filter ist denkbar. Jedoch ist in jedem Fall ein sehr spezieller Aufbau mit speziellen Sensorkabeln nötig.

Die Zündung des Lichtbogens ist mit einem akustischen Impuls verbunden. Durch die Verwendung eines Mikrofons kann der Zündton eines Lichtbogens für eine Diagnose genutzt werden [120]. Eine Unterscheidung zu anderen Geräuschquellen kann durch die Bestimmung verschiedener Spektren erfolgen [120]. Im Zeitbereich kann eine Korrelationsanalyse mit den gemessenen Geräuschen und bekannten Lichtbogensignaturen, die als historische Daten existieren, den Lichtbogen detektieren. Bei der Verwendung mehrerer Mikrofone kann auf Basis der Zeitunterschiede der gemessenen Signale eine Lokalisierung erfolgen [120]. Jedoch ist wieder die Installation spezieller Sensoren (Mikrofone) nötig. Außerdem kann eine Begrenzung des Überwachungsabschnitts auf das Kfz nicht gewährleistet werden. Die Verarbeitung der Signale im Frequenz- und Zeitbereich ist denkbar. Das Verfahren kann ebenfalls den modellfreien auf historischen Messdaten basierenden Verfahren zugeordnet werden.

Wenn ein Strom durch ein Kabel fließt, gibt es eine magnetische Emission. Diese Emission kann sich ändern, sobald der Strom durch das Kabel ebenfalls durch einen Lichtbogen fließt. Diese Veränderung kann für eine Diagnose genutzt werden [89]. Hierbei wird oft das Lichtbogenrauschen verwendet (siehe Kapitel 3.2.3.4). In verschiedenen Anwendungen wurde die Überwachung des Spektrums mittels einer Fraktalanterenne durchgeführt [91]. Auch Stabantennen oder Rahmenantennen können hier zum Einsatz kommen [92]. Eine Detektion wird durch Vergleich des aktuellen Spektrums mit bekannten Frequenzen des Lichtbogenrauschens durchgeführt. Daher kann man diese Möglichkeit der modellfreien Methode auf Basis historischer Daten zuordnen.

Die Lokalisierung ist nur schwer möglich. Außerdem ist es bei dieser Detektionsmethoden notwendig, dedizierte Sensoren in Form von Antennen in das Kfz einzubringen. Auch die Begrenzung des Überwachungsraums auf das Kfz scheint schwierig zu sein.

Lichtbögen erzeugen enorme Temperaturen [117]. Diese Temperaturen stellen im System Kfz-Bordnetz eine starke Änderung von allen Normalzuständen dar. Deswegen würde diese Lichtbogeneigenschaft grundsätzlich auch als Detektionskriterium in Frage kommen.

Weiterhin erzeugen Lichtbögen, wie in den vorangehenden Hauptkapiteln dieser Arbeit ausführlich dargestellt, direkt elektrische Veränderungen im Bordnetz. Die Untersuchung des Bordnetzes auf diese elektrischen Veränderungen kann als elektrische Diagnose bezeichnet werden. Ein detaillierterer Überblick über die weitere Klassifizierung der Methoden der elektrischen Diagnose ist in Abbildung 6.32 dargestellt.

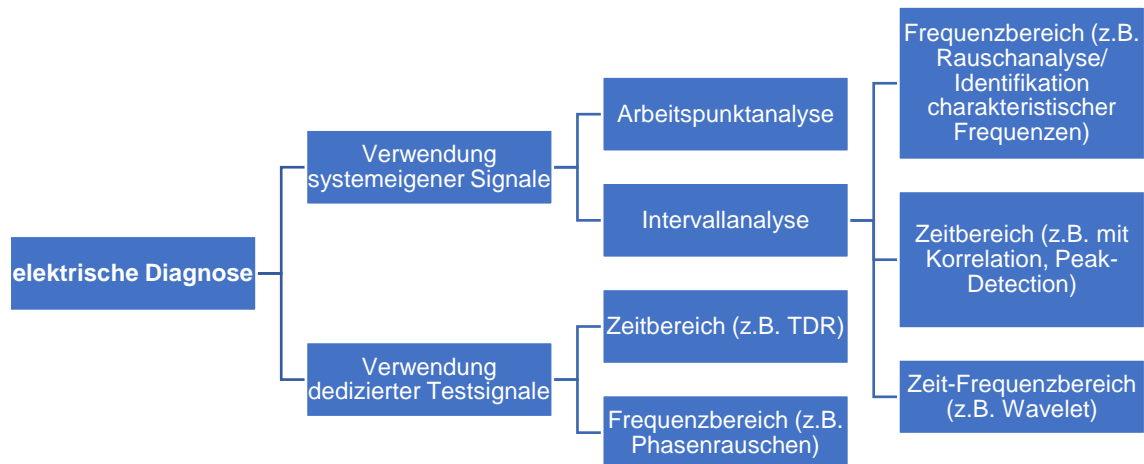


Abbildung 6.32: Mögliche Nutzung elektrischer Auswirkungen durch einen Lichtbogen.

Eine Unterscheidung innerhalb des Bereichs der elektrischen Lichtbogen-Diagnose kann aufgrund der Verwendung bzw. der Erzeugung der Messdaten gemacht werden. Zunächst besteht die Möglichkeit, mit eingespeisten Prüfsignalen die elektrischen Veränderungen im Bordnetz durch den Lichtbogen zu erkennen. Die Auswertung dieser Prüfsignale kann sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich erfolgen. Im Zeitbereich können prinzipiell z.B. TDR-Verfahren genutzt werden. TDR-Verfahren wurden besonders für die allgemeine Fehlerdetektion (Kurzschlüsse und Leitungsbrüche) in Kabeln untersucht [121]. Hiermit können allgemein die Kabeleigenschaften überwacht und somit prinzipiell auch Lichtbögen gefunden werden. Kurzschlüsse und Leitungsbrüche können so ebenfalls erkannt werden [122]. Neben Leitungsbrüchen und Kurzschlüssen können auch erhöhte Kontaktwiderstände in Kfz-Busleitungen erkannt werden [94]. Der genaue Wert eines möglichen Lichtbogenersatzwiderstands ist

zwar stark von der Eingangsbeschaltung abhängig, grundsätzlich könnte er jedoch unter den gegebenen Voraussetzungen ebenfalls durch das in [94] beschriebene TDR-Verfahren detektiert und lokalisiert werden. Eine ermittelte geringe Detektionsrate für erhöhte Übergangswiderstände lässt jedoch vermuten, dass die Robustheit und somit die Anwendbarkeit bei Lichtbögen zu gering ist. Weiterhin ist die Erzeugung der sehr steilen Flanken des Testsignals, sowie die aufwendige und hochfrequente Messtechnik nur schwer umzusetzen. Zusätzlich ist zu erwarten, dass die Eigenschaften der Energiebornetzverkabelung eher inhomogen sind, was die Verwendung von TDR-Verfahren zusätzlich erschwert.

Neben der Beobachtung und Auswertung eigener Testsignale im Zeitbereich können auch im Frequenzbereich Analysen durchgeführt werden [123]. Phasenrauschen könnte grundsätzlich Veränderungen aufgrund von Lichtbögen in einem elektrischen Netzwerk anzeigen [123]. Hierbei kann von einem Oszillator das Prüfsignal in ein Kabel eingespeist werden. In der beschriebenen Untersuchung [123] konnte jedoch keine signifikante Veränderung der Phase bzw. ein Phasenrauschen als Ergebnis des Einflusses eines Lichtbogens nachgewiesen werden.

Alle bis hierhin vorgestellten Bereiche der Lichtbogen-Diagnose auf Basis spezieller Lichtbogenphänomene können z.B. aufgrund von Kosten, Volumen, Gewichtsvorgaben oder einer zu hohen Komplexität nur schlecht in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden. Die Einbringung zusätzlicher aktiver Komponenten, wie z.B. TDR-Chips oder spezieller Sensoren, machen diese Verfahren zunächst ungeeignet für die Lichtbogen-Diagnose in 48 V Kfz-Bordnetzen. Auch die benötigte Robustheit eines Verfahrens kann in einem variantenreichen System, wie es das 48 V Kfz-Bordnetz darstellt, nicht immer garantiert werden.

Ein vielversprechender Ansatz hingegen ist die Verwendung der Spannungs- und Stromsignale, die potenziell bereits im Bordnetz vorhanden sind. Die elektrische Detektion unter Verwendung der systemeigenen Signale kann hier genannt werden (siehe Abbildung 6.32). Mögliche Messstellen im Rahmen der in dieser Arbeit untersuchten Überwachungsabschnitte sind bereits in Kapitel 2 beschrieben und in Abbildung 2.10 und Abbildung 2.11 dargestellt und in Abbildung 3.15 und Abbildung 3.16 benannt.

Bei der Verwendung systemeigener Signale kann zwischen einer Arbeitspunktanalyse und einer Intervallanalyse unterschieden werden. Sofern Zeitintervalle betrachtet werden, kann die Untersuchung im Zeit- oder Frequenzbereich stattfinden.

Wenn Ableitungen von Stromsignalen im Zeitbereich ausgewertet werden, können serielle Lichtbögen detektiert werden [106]. Die Erkennung von Stromsprüngen kann auf diese Weise erfolgen. Wenn man davon ausgeht, dass Lichtbögen auch während

ihrer Brenndauer schnelle Stromveränderungen verursachen, kann die Betrachtung der Stromvarianz ebenfalls die Dauer des Lichtbogens anzeigen [106]. Eine weitere mögliche Implementierung und die Betrachtung des Verfahrens im Frequenzbereich werden beispielsweise in [124] dargestellt. Hier werden Spannungsmessung verwendet.

Werden einzelne Messzeitpunkte verwendet, wird eine Arbeitspunktanalyse durchgeführt. Auf Basis einfacher Regeln können serielle und parallele Lichtbögen in einer Einzelleitung erkannt und identifiziert werden [125]. Hierbei wird der Spannungsabfall entlang einer zu überwachenden Leitung von mehr als 15 V als Kriterium für einen seriellen Lichtbogen, und eine Abweichung des in die Leitung hineinfließenden und des aus der Leitung hinausfließenden Stroms als Kriterium für einen parallelen Lichtbogen genannt. Die Ermittlung des Spannungsabfalls kann z.B. über die in [126] beschriebene Schaltung mittels Spannungsteiler und Operationsverstärker geschehen. Auch die Verwendung von Spannungs- und Stromsensoren, die bereits in den Steuergeräten vorhanden sind, ist möglich. Diese Regeln erscheinen klar und robust, sind jedoch nur bei Verfügbarkeit der erwähnten Messpunkte umsetzbar.

Die dargestellten Methoden sind entweder sehr aufwendig oder produzieren hohe zusätzlichen Kosten. Weiterhin ist die Robustheit oft nicht abgesichert. Auch die Skalierung und Anwendung auf größere Teilbordnetze ist nicht gegeben. Deswegen wird im Folgenden eine alternative Diagnosemethode für serielle und parallel Lichtbögen vorgestellt, die explizit die speziellen Rahmenbedingungen von Kfz-Bordnetzen berücksichtigt und außerdem skalierbar ist.

6.2.3 Elektrische modellbasierte Lichtbogen-Diagnose

Durch die stark modellbasierte Entwicklung von Kfz-Bordnetzen ist ein Großteil an Komponentenmodellen bereits verfügbar. Mindestens die Modellierung der Verkabelungselemente ist, wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, sichergestellt. Weiterhin kann das Verhalten von Lichtbögen ebenfalls modellhaft in all seinen Varianten dargestellt werden. Deswegen wird ein modellbasierter Ansatz gewählt. Es hat sich die Verwendung systemeigener Sensoren, also Strom- und Spannungssensoren, als vielversprechend und weitestgehend kostenneutral erwiesen. Deswegen werden die elektrischen Eigenschaften des Lichtbogens für eine Diagnose herangezogen und die Spannungs- und Stromsignale, die im Bordnetz vorhanden sind, analysiert.

Aufbauend auf diesen Voraussetzungen wird im Folgenden zunächst das Strukturdiagramm der modellbasierten Lichtbogen-Diagnose dargestellt. Anschließend wird ein spezielles Diagnosemodell für die Basistopologie *Einzelleitung* vorgestellt. Im dann

folgenden Kapitel wird abschließend das elektrische modellbasierte Diagnoseverfahren für die Basistopologie *Einzelleitung* am Labordemonstrator angewendet und die Grenzen des Verfahrens werden mittels des vorgestellten Lichtbogenmodells in der Simulation untersucht.

6.2.3.1 Überblick als Strukturdiagramm

Der in dieser Arbeit gewählte modellbasierte Ansatz entspricht einer Mischform aus den in Kapitel 6.2.1 dargestellten Möglichkeiten. Er ist als Multimodellansatz in Abbildung 6.33 dargestellt. Es werden die Strom- und Spannungsinformationen der Bordnetzabschlüsse analysiert.

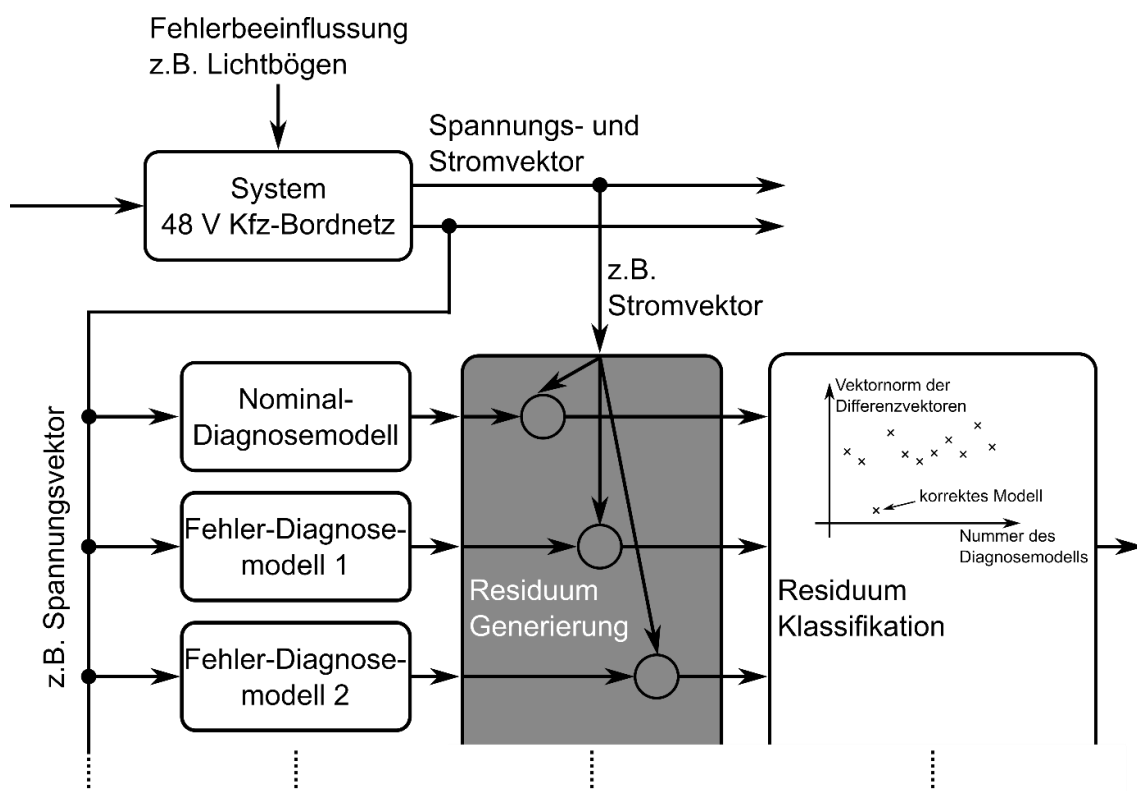


Abbildung 6.33: Multimodellansatz mit flexibler Interpretation der verfügbaren Messungen aus dem Bordnetz.

Das Verfahren hat Zugriff auf die Strom- und Spannungsmessungen aus dem Bordnetz. Diese Messgrößen variieren entweder mit den Betriebszuständen des Bordnetzes oder sind von Lichtbögen beeinflusst. Es werden außerdem Diagnosemodelle erstellt. Diese Diagnosemodelle enthalten einmal das fehlerfreie Bordnetzmodell (Nominal-Diagnosemodell) und Bordnetzmodelle mit jeweils einer Ausprägung eines Fehlermodells (Fehler-Diagnosemodelle). Nach der Permutation der Fehlerzustände (z.B. verschiedene Lichtbogenlängen) und der Fehlerorte erhält man viele Fehler-Diagnosemodelle (1, 2, ...). Es kann grundsätzlich nicht davon ausgegangen werden, dass

an allen Abschlüssen der Basistopologien sowohl Strom- als auch Spannungsinformationen vorhanden sind (z.B. $u_1(t)$, $u_2(t)$, $i_1(t)$ und $i_2(t)$ in Abbildung 3.15). Es wird hier zunächst davon ausgegangen, dass mindestens eine der Informationen (Strom oder Spannung) an jedem Abschluss vorhanden ist. Im später vorgestellten Beispiel sind die Spannungsinformationen verfügbar und werden als Modelleingang interpretiert. Die jeweils an einem Abschluss zusätzlich vorhandene Messung, im vorliegenden Beispiel die Strommessungen, werden als Ausgangssignal interpretiert und dienen der Residuum-Generierung. Diese Verhältnisse sind ebenfalls in Abbildung 6.33 angedeutet. Die Residuum-Generierung mit dem Nominal-Diagnosemodell kann als Detektionskriterium verwendet werden, die Residuum-Generierung mit den Fehler-Diagnosemodellen kann zur Lokalisierung und Identifikation verwendet werden. Die Residuum-Generierung wird zunächst in Form von Paritätsgleichungen vorgenommen, was bedeutet, dass die Differenzen der simulierten Stromvektoren und des gemessenen Stromvektors gebildet werden. In der Residuum-Klassifikation werden nun die Vektornormen der Differenzvektoren gebildet und die geringste Vektornorm kann dem Modell zugeschrieben werden, welches am ehesten der Wirklichkeit entspricht. Das genaue Vorgehen wird in Kapitel 7.2 detailliert an einem Beispiel beschrieben.

In Anlehnung an die in Kapitel 3 beschriebenen Modelle wird im Folgenden die Erstellung der Diagnosemodelle beschrieben.

6.2.3.2 Erstellung des (Fehler-)Diagnosemodells

Da die Modelle größtenteils in Form von Ersatzschaltbildern vorhanden sind, ist die Implementierung mittels der modifizierten Knotenpotentialanalyse (MNA) prädestiniert. Die Darstellungen und Herleitungen werden dementsprechend mittels der MNA beschrieben. Detaillierte Informationen hierzu können in [127] gefunden werden.

Die allgemeine Darstellung eines linearen elektrischen Netzwerks kann mit der folgenden Gleichung erfolgen:

$$\mathbf{G} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{W} \cdot \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{b}(t) \quad (6.24)$$

Sie stellt die kombinierte Darstellung der Kirchhoff- und Zweigggleichungen für Widerstand, Induktivität, Kapazität und Quellen dar. Hierbei stellen \mathbf{G} und \mathbf{W} die Matrizen dar, die Werte und Position der Ersatzschaltbildelemente beinhalten, \mathbf{b} ist der Anregungsvektor, größtenteils mit Informationen über Quellen im Netzwerk, und \mathbf{x} beinhaltet als Lösungsvektor die Ströme der Spannungsquellen und die Knotenpotentiale des Netzwerks.

Da der Lichtbogen an einem beliebigen Ort entlang des Überwachungsabschnitts auftreten kann, müssen die Admittanzmatrizen \mathbf{G} und \mathbf{W} abhängig vom Lichtbogenfehlerort z_f ausgeführt werden. Die zuvor entwickelte Lichtbogengleichung könnte grundsätzlich als gesteuerte Quelle dargestellt werden. Die unbekannte Lichtbogenlänge d_{LB} in der Realität bringt hier jedoch einen entscheidenden Freiheitsgrad mit ein. Da durch die Variation der Länge bei einer konstanten Eingangsbeschaltung der tatsächliche Arbeitspunkt des Lichtbogens variiert werden kann, ist es möglich, diese Längenabhängigkeit zu vernachlässigen und den Lichtbogen als konstante Quelle darzustellen. Mit diesen konstanten Quellen können vereinfacht alle Lichtbogenarbeitspunkte konstruiert werden, ohne die Abhängigkeiten berücksichtigen zu müssen. Durch die Ergänzung der Lichtbögen als Quellen mit konstanten Werten ist die additive Ergänzung der Lichtbogenfehler mit $\Delta \mathbf{b}_{LB}$ (siehe [112]) möglich. Nach der Ergänzung des Lichtbogenfehlers in einer beliebigen Ausprägung und an einem beliebigen Ort kann Gleichung (6.24) umgeschrieben werden zu:

$$\mathbf{G}(z_f) \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{W}(z_f) \cdot \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{b}(t) + \Delta \mathbf{b}_{LB}(t) \quad (6.25)$$

Die Admittanzmatrizen hängen nun vom (relativen) Lichtbogenfehlerort z_f ab und der Lichtbogenfehler wird als Anregung in die Gleichungen mit aufgenommen. Im Folgenden wird eine weitere mögliche Vereinfachung der Gleichung beschrieben.

Ob eine Intervallanalyse oder Arbeitspunktanalyse (siehe Abbildung 6.32) durchgeführt werden soll, hängt zum einen vom Verhältnis der Frequenz der Messgrößen und der relevanten Zeitkonstanten im System ab. Die Messwerte (Strom- und spannungswerte), auf die zurückgegriffen werden soll, werden in Bordnetzen zu unterschiedlichen Zwecken erhoben. Diese stellen hauptsächlich Eigendiagnosegründe der individuellen Steuergeräte dar. Daher ist es möglich, dass die Auflösung der Messwerte sehr verschieden ist. Weiterhin ist auch heute die Buslast in Kraftfahrzeugen hoch. Diese würde durch eine häufige Messwertkommunikation zur zentralen Sensorfusion weiter erhöht werden. Diese Fakten sprechen für eine eher geringe Update-Rate der benötigten Sensorinformationen.

Zum anderen hängt die Frage nach der Frequenz der Messgrößen vom Bedarf ab. Der Bedarf kann anhand der in Kapitel 6.1 dargestellten Untersuchungen abgeschätzt werden und ist individuell von der Verbraucherkonfiguration abhängig. Da jedoch die ermittelten maximalen Reaktionszeiten für typische Bauteilwerte auch in eher kritischen Konfigurationen im Millisekundenbereich lagen, wird davon ausgegangen, dass eine Sendefrequenz der Messwerte im Herz bis Kiloherzbereich zunächst ausreichend ist. Weiterhin ist durch die in z.B. Kapitel 3.2.3 vorgestellten Messungen und durch die

in z.B. Kapitel 4.2 vorgestellten Simulationen deutlich geworden, dass sich Lichtbogenfehler wahrscheinlich den größten Teil ihrer Lebensdauer in einem konstanten Arbeitspunkt aufhalten, wenn man das Lichtbogenrauschen vernachlässigt (siehe Kapitel 3.2.3.4). Aus diesen Gründen wird zunächst eine Arbeitspunktanalyse durchgeführt. Diese Vereinfachung resultiert in folgender Vereinfachung von Gleichung (6.25):

$$\mathbf{G}(z_f) \cdot \mathbf{x}(t_d) = \mathbf{b}(t_d) + \Delta \mathbf{b}_{\text{LB}}(t_d, m_1, m_2, \dots) \quad (6.26)$$

Die Berechnung erfolgt jeweils zu diskreten Zeitpunkten t_d , da keine gedächtnis-behafteten Elemente berücksichtigt werden. Die Einbringung des Fehlervektors $\mathbf{m} = [m_1 \ m_2 \ m_3 \ \dots]$ repräsentiert die Möglichkeit der Variation der (Fehler-/)Lichtbogenausprägung, also der unterschiedlichen Lichtbogenspannungen und -ströme.

Die Rekonstruktion aller Knotenspannungen und Quellenströme des Diagnosemodells mit Berücksichtigung der Lichtbögen erfolgt durch eine einfache Matrixinversion und kann folgendermaßen berechnet werden:

$$\mathbf{x}(t_d) = \mathbf{G}^{-1}(z_f) \cdot (\mathbf{b}(t_d) + \Delta \mathbf{b}_{\text{LB}}(t_d, m_1, m_2, \dots)) \quad (6.27)$$

Die allgemeine Berechnungsvorschrift in Gleichung (6.27) stellt das Diagnosemodell, also die analytische Redundanz, dar. Diese wird häufig auch digitaler Zwilling genannt. Anhand dessen können Residuen gebildet und ausgewertet werden.

Der bis hierhin allgemein beschriebene modellbasierte Diagnoseansatz, der die elektrischen Eigenschaften von Lichtbögen ausnutzt, wird im Folgenden an einem konkreten Beispiel validiert und diskutiert.

7 Validierung und Untersuchung der Lichtbogen-Diagnosemethode

Das zuvor beschriebene modellbasierte Diagnoseverfahren, welches die elektrischen Eigenschaften eines Lichtbogens ausnutzt (siehe Kapitel 6.2.3), wird in diesem Abschnitt an einem Laboraufbau und in der Simulation validiert. Hierzu wird zunächst ein realitätsnaher Aufbau definiert, welcher sich auf eine definierte Basistopologie (siehe Kapitel 2.2.4) zurückführen lässt. Anschließend wird ein kritischer paralleler Lichtbogen in diesem Aufbau im Labor mittels des für diese Arbeit konstruierten Lichtbogenprüfstands (siehe Kapitel 3.2.2) erzeugt und der Algorithmus wird auf die Messergebnisse angewendet. Kritisch heißt in diesem Kontext, dass der Lichtbogenstrom relativ klein ist, also potentiell im Bereich eines Verbraucherstroms liegt, wie in Kapitel 6.1 beschrieben wurde. Dieser Laboraufbau und der durchgeführte Versuch wird dann mittels des entwickelten Lichtbogenmodells (siehe Kapitel 3.2.5, Kapitel 3.2.6 und Kapitel 0) in der Simulation nachgebildet. Durch Variationen des Versuchsaufbaus in der Simulation kann der Algorithmus diskutiert und seine Grenzen erprobt werden.

Das ausgewählte Szenario ist in Abbildung 7.1, in Anlehnung an die Architektur in Abbildung 2.9, dargestellt. Das überwachte Teilbordnetz (grüner Rahmen) ist eine Einzelleitung mit Verbraucher, welches der Basistopologie *Einzelleitung* zugeordnet werden kann. Da davon ausgegangen werden kann, dass die relevanten Bauteile so ausgewählt wurden, dass eine intrinsische Lichtbogensicherheit gegen serielle Lichtbögen besteht (siehe Kapitel 5.1 und Kapitel 5.2), soll der Fokus in der hier vorgestellten Untersuchung auf parallelen Lichtbögen liegen. Das Teilbordnetz wird, wie dargestellt, über einen Halbleiterschalter abgesichert.

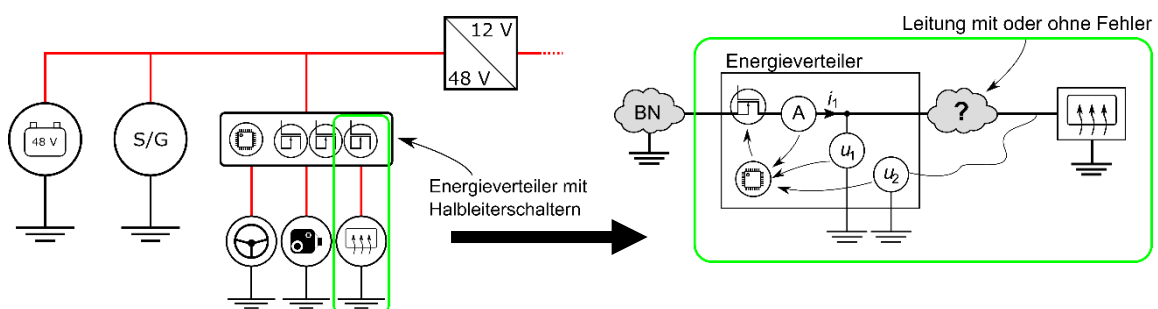


Abbildung 7.1: Reales Szenario für die Lichtbogen-Diagnose mit der Basistopologie *Einzelleitung*. BN: Bordnetz.

Exemplarisch wird mit diesem Halbleiterschalter die Auslösecharakteristik einer MAXI50 Schmelzsicherung nachgebildet, entsprechend des bereits vorgestellten Modells und den in Anhang A: Sicherungsparameter (VDA) dargestellten Parametern. Die

Steuerung des Halbleiterschalters (z.B. ein Mikrocontroller) hat zusätzlich Zugriff auf die Messgrößen $u_1(t)$, $u_2(t)$ und $i_1(t)$ (siehe Abbildung 3.15).

7.1 Vorbereitung des Diagnosemodells und Beschreibung des Vorgehens

Für die Berechnung wird das in Abbildung 3.15 dargestellte Modell der Basistopologie *Einzelleitung* durch ein Diagnosemodell für Arbeitspunktanalysen ersetzt. Dieses Diagnosemodell ist in der Lage, die im Zustandsübergangsdiagramm (siehe Abbildung 3.49) berücksichtigten Fehler Kurzschluss, Leitungsbruch und Lichtbogen entlang der Basistopologie in beliebigen Ausprägungen abzubilden. Da der Fokus auf Lichtbögen liegt, werden nur Lichtbögen als Fehler berücksichtigt. Da der Fokus auf parallelen Lichtbögen liegt, werden diese in der späteren Anwendung detailliert berücksichtigt, während serielle Lichtbögen nur beispielhaft mitgeführt werden. Das Diagnosemodell ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Zur Nachbildung des seriellen Lichtbogens wird eine Spannungsquelle u_{LB1} im Bereich der möglichen Lichtbogenspannung verwendet. Diese Berücksichtigung ist optional und kann die intrinsische Lichtbogensicherheit, welche durch die Auslegung der Abschlusskapazität erreicht wurde, unterstützen. Zur Nachbildung des parallelen Lichtbogens wird die Stromquelle i_{LB2} im Bereich möglicher Lichtbogenströme verwendet. Hier muss weiterhin die Nebenbedingung gelten, dass die Spannung u_{LB2} an der Stromquelle i_{LB2} größer als die minimale Lichtbogenspannung ist. Die Verschiebung der Fehlerstelle entlang der Leitung der Basistopologie wird durch die Variation von R_1 und R_2 umgesetzt. Es gilt $R_{ges} = R_1 + R_2$.

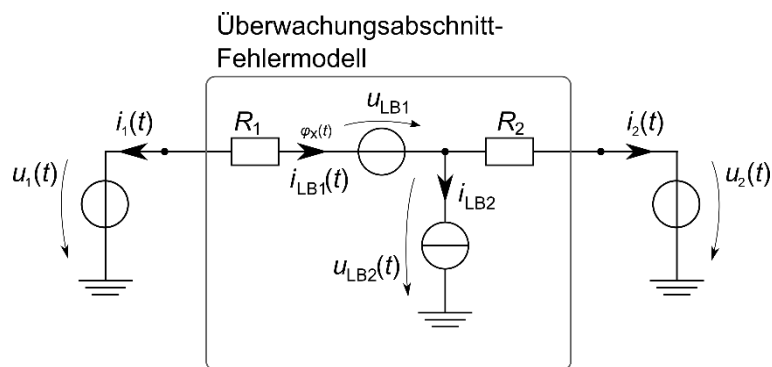


Abbildung 7.2: Fehler-Diagnosemodell für die Basistopologie *Einzelleitung*.

Zur Entkopplung vom restlichen Bordnetz werden die Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$ als Quellen berücksichtigt und als Eingangssignal für das Diagnosemodell interpretiert (siehe auch Abbildung 6.33). $u_1(t)$, $u_2(t)$, $i_1(t)$ und $i_2(t)$ werden als zeitabhängige Größen

dargestellt, da sie je nach Eingangsbeschaltung und Szenarien im Bordnetz zeitabhängig sein können. Entsprechend ändern sich der Strom $i_{LB1}(t)$, die Spannung $u_{LB2}(t)$ und das Potential $\varphi_x(t)$ ebenfalls. Für die dargestellten Berechnungen werden jeweils nur Einzelne Werte zu konkreten Zeitpunkten t_d gewählt. Für ein einzelnes Fehler-Diagnosemodell sind jedoch die Lichtbogen Spannung u_{LB1} und der Lichtbogenstrom i_{LB2} konstant.

Die Implementierung und Berechnung erfolgt mittels der MNA. Die entsprechenden Gleichungen sind im Folgenden dargestellt:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{z_f \cdot R_{ges}} & -\frac{1}{z_f \cdot R_{ges}} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{z_f \cdot R_{ges}} & \frac{1}{z_f \cdot R_{ges}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-z_f) \cdot R_{ges}} & -\frac{1}{(1-z_f) \cdot R_{ges}} & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{(1-z_f) \cdot R_{ges}} & \frac{1}{(1-z_f) \cdot R_{ges}} & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1(t_d) \\ \varphi_x(t_d) \\ u_{LB2}(t_d) \\ i_1(t_d) \\ i_2(t_d) \\ i_{LB1}(t_d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_1(t_d) \\ u_2(t_d) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{LB2} = -m_1 \cdot \Delta i_{LB2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{LB1} = \begin{cases} u_{LB1min} + (m_2 - 1) \cdot \Delta u_{LB1} & , m_2 = 0 \\ \text{sonst} \end{cases} \end{pmatrix} \quad (7.1)$$

mit $R_1 = z_f \cdot R_{ges}$ und $R_2 = (1 - z_f) \cdot R_{ges}$ und $z_f = 0 \dots 1$. Die in Kapitel 6.2.3.2 beschriebene Fehlerortabhängigkeit von $\mathbf{G}(z_f)$ und die additive Ergänzung der Fehlermodelle durch $\Delta \mathbf{d}_{LB}$ ist klar erkennbar. Die Auflösung der Ausprägungen der Lichtbogenfehler wird durch den Fehlerstromschritt Δi_{LB2} des parallelen Lichtbogens und den Fehler Spannungsschritt Δu_{LB1} des seriellen Lichtbogens beschrieben. Die absolute Ausprägung wird im vorliegenden Beispiel durch die ganzzahligen Werte von m_1 und m_2 bestimmt. Wenn nur Einzelfehler untersucht werden, wenn also nicht beide Fehlerarten gleichzeitig auftreten sollen, darf nur eine Komponente von \mathbf{m} von null verschieden sein.

Mit $m_1 = m_2 = 0$ kann der Nominalzustand simuliert werden (Variation von z_f nicht nötig), mit $m_1 > 0$ wird ein paralleler Lichtbogen oder Kurzschluss simuliert, mit $m_2 > 0$ wird ein serieller Lichtbogen oder Leitungsbruch simuliert.

7.2 Validierung der Diagnosemethode und Simulation des Szenarios

Um die Funktionalität der Methode nachzuweisen, wurde das Verfahren auf eine am Bordnetzprüfstand entstandene Messung angewendet. Es wurde ein Aufbau wie in Abbildung 7.1, bzw. Abbildung 3.15 verwendet. Als Quelle wurden vier 12 V Bleisäure Batterien in Reihe verwendet, wobei $U_{OCV} = 47,5$ V und $R_{in} = 35$ m Ω war. Die Verschaltung der Quellen und der Anschluss an den Überwachungsabschnitt hat zusätzlich ein $L_{in} = 1$ μ H verursacht. Das Anschlusskabel und die entsprechenden Kon-

taktwiderstände zum Lichtbogenprüfstand hatten $R_1 = 3 \text{ m}\Omega$ und $L_1 = 3 \text{ }\mu\text{H}$. Das Verbindungskabel vom Lichtbogenprüfstand zum Verbraucher hatte $R_2 = 25 \text{ m}\Omega$ und $L_2 = 5 \text{ }\mu\text{H}$. Es wurde die elektronische Last als Verbraucher verwendet, die während der gesamten Versuchsdauer einen Strom von $i_2 = 50 \text{ A}$ aufgenommen hat. Um einen möglichst kritischen Lichtbogen mit geringen Strömen, also im Bereich der Verbraucherströme, zu erzeugen, wurde ein dünner Aluminiumdraht, ähnlich zu einer Litze, verwendet (vergleiche auch Abbildung 5.22). Dieser wurde mit einer Länge von ca. 10 mm an die Aluminiumelektrode (siehe Abbildung 3.30) angebracht. Der Aufbau ist in Abbildung 7.3 dargestellt. Der Lichtbogenprüfstand wurde zusammengefahren bis der Draht Massekontakt hatte. Diese Position wurde vom Lichtbogenprüfstand gehalten. Aufgrund des hohen (Kurzschluss-)Stroms wurde der dünne Draht schnell zerstört und es entstand ein paralleler Lichtbogen, der sehr schnell an Länge zunahm. Aufgrund des konstanten Elektrodenabstands blieb die Lichtbogenlänge anschließend ebenfalls relativ konstant.

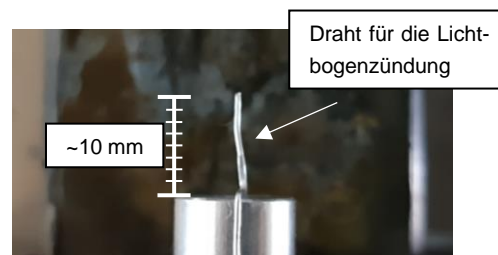


Abbildung 7.3: Lichtbogenzündung am Lichtbogenprüfstand mit einem Draht.

Die Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$, sowie der Strom $i_1(t)$, sowie die zugehörigen Simulationsdaten mit dem Bordnetzmodell zum Überwachungsabschnitt *Einzelleitung* und dem Lichtbogenmodell mit einem aus den Messungen rekonstruierten Längenprofil (Abbildung 7.5) sind in Abbildung 7.4 dargestellt. Die Rekonstruktion des Längenprofils basiert auf den für Aluminiumelektroden berechneten Modellparametern und der ALVE-Gleichung. Da von Gleichung (3.10) also die Lichtbogenlänge, der Lichtbogenstrom und die ALVE-Modellparameter bekannt waren, konnte die Lichtbogenlänge d_{LB} berechnet werden. Der so exakt in der Simulation nachgebaute Versuch wird später verwendet, um den Algorithmus weiter zu untersuchen. In Abbildung 7.4 sieht man eine Lichtbogenzündung zum Zeitpunkt $t \approx 50 \text{ ms}$. Zu diesem Zeitpunkt steigt der Strom schnell an, was am Kurzschluss bzw. an der niedrigen Lichtbogenlänge liegt. Eine relativ konstante Lichtbogenlänge von ca. 35 V und ein relativ konstanter Sicherungsstrom von ca. 290 A wurden bis zum Lichtbogenabriss bei $t \approx 100 \text{ ms}$ gehalten. Der Lichtbogenabriss war zufällig und kann nicht unmittelbar auf die Unterschreitung des minimalen Lichtbogenstroms oder die Überschreitung der maximalen Lichtbogenlänge im beschriebenen Stromkreis zurückgeführt werden.

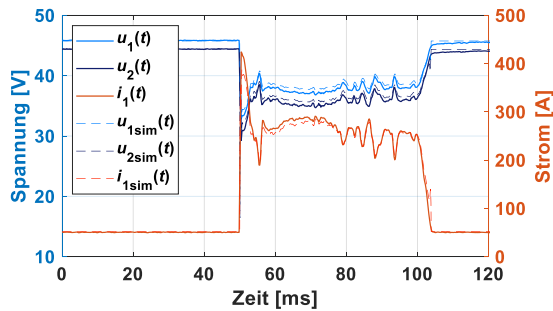


Abbildung 7.4: Spannungs- und Strommessungen bei parallelem Lichtbogen, sowie Simulationen (gestrichelt) mit dem ALVE-Lichtbogenmodell.

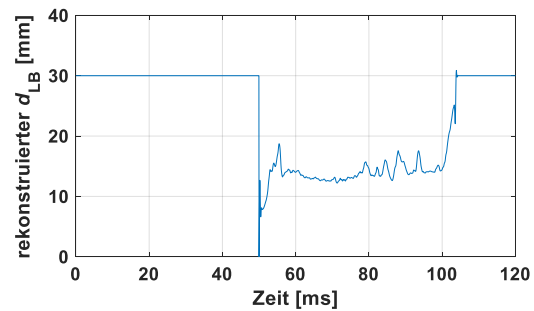


Abbildung 7.5: Rekonstruiertes Lichtbogenlängenprofil aus Messdaten mit dem ALVE-Lichtbogenmodell.

In Abbildung 7.6 ist der Zündmoment dargestellt. Besonders die Stromsteilheit wurde in der Simulation gut nachgebildet. Weiterhin kann in Abbildung 7.7 erkannt werden, dass der Spannungsabfall über dem Überwachungsabschnitt in Simulation und Messung gut übereinstimmt, dass jedoch die absoluten Spannungshöhen leicht abweichen. Das kann an geringen Abweichungen zwischen dem simulierten und dem tatsächlichen Lichtbogenverhalten, also an den Modellparametern, liegen.

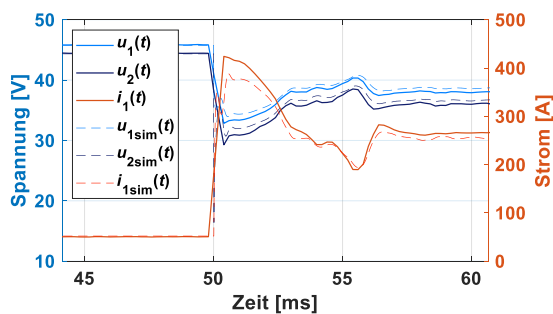


Abbildung 7.6: Zündvorgang des parallelen Lichtbogens in Simulation (gestrichelt) und Messung.

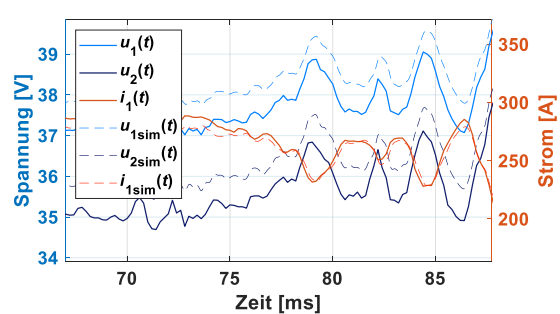


Abbildung 7.7: Ausschnitt aus gemessenen und simulierten (gestrichelt) Signalen bei parallelem Lichtbogen.

Der simulierte Verlauf der Sicherungstemperatur, die vom Halbleiterschalter theoretisch als Auslösekriterium genutzt wird, ist in Abbildung 7.8 dargestellt. Es ist eindeutig, dass der dargestellte Lichtbogen nicht von einer Schalthandlung des Halbleiterschalters, der die Charakteristik einer MAXI50 Sicherung nachbildet, gelöscht worden wäre.

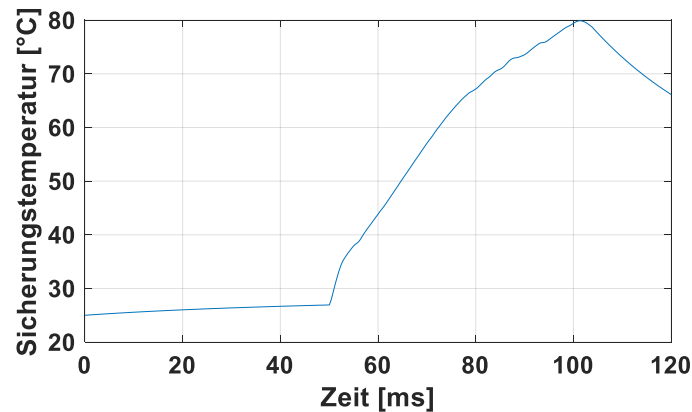


Abbildung 7.8: Simulierte Sicherungstemperatur bei Auftreten eines parallelen Lichtbogens.

Die dargestellten und in der Simulation nachgestellten Messungen werden nun mit Hilfe der vorgestellten Diagnose auf einen Lichtbogen hin untersucht. Hierzu wird zunächst das Diagnosemodell aus Abbildung 7.2 bzw. Gleichung (7.1) für das hier angeführten Beispiel mit $\Delta i_{LB2} = 1$ A, $u_{LB1min} = 13,4$ V, $\Delta u_{LB1} = 1$ V und $R_{ges} = 28$ m Ω folgendermaßen parametrisiert:

- Es werden zunächst drei Fehlerorte vorgesehen, weswegen $z_f = [0,25 \ 0,5 \ 0,75]$ gewählt wird.
- Die den parallelen Lichtbogen repräsentierende Stromquelle wird mit $m_1 = [0 \ 27:1500]$ parametrisiert. $m_1 = 0$ stellt den lichtbogenfreien Zustand dar, $m_1 > 0$ stellt Zustände dar, in denen parallele Lichtbögen brennen. Der kleinste von 0 verschiedene Wert für m_1 wurde mit 27 angegeben. Dieser Wert kann mit der in Kapitel 6.1.1 dargestellten Möglichkeit begründet werden, einen minimalen Lichtbogenstrom für die konkrete Eingangsbeschaltung zu berechnen. Für einen minimalen seriellen Widerstand von 35 m Ω , eine angenommene minimale Quellenspannung von $U_{ocv} = 30$ V und einem Lastwiderstand von 0,6 Ω ($30 \text{ V}/0,6 \ \Omega = 50$ A) kann der minimale Lichtbogenstrom mit den Lichtbogenmodellparametern auf ca. 27 A festgelegt werden.
- Aufgrund der Tatsache, dass davon ausgegangen werden kann, dass die Bordnetzkomponenten so ausgelegt wurden, dass serielle Lichtbögen im Zündmoment aufgrund des Stromnulldurchgangs erlöschen, liegt der Fokus dieser Untersuchungen auf dem parallelen Lichtbogen. Trotzdem kann der serielle Lichtbogen mit der vorgestellten Methode ebenfalls detektiert werden. Deswegen wird er stark reduziert mit nur der Zündspannung berücksichtigt, was in $m_2 = [0 \ 1]$ berücksichtigt wird. In Anwendungen, bei denen eine Detektion serieller Lichtbögen ebenfalls wichtig ist, kann die Anzahl der Elemente von m_2 deutlich erhöht werden.

Die Abtastfrequenz wird anhand der analytischen Abschätzung zur maximalen Verlustleistung in der gegebenen Konfiguration festgelegt (siehe auch Kapitel 6.1). Gemäß Abbildung 6.7 wird die Messfrequenz auf 166 Hz (alle 6 ms) festgelegt. Der serielle Widerstand bei einem parallelen Lichtbogen am Anfang des Überwachungsabschnitts hat einen Wert von $R_{in} = 35 \text{ m}\Omega$ (s.o.). Mit diesem Wert kann die minimale Messfrequenz abgelesen werden.

Die als Systemeingang genutzten Spannungen $u_1(t)$ und $u_2(t)$, sowie der vom Diagnosemodell rekonstruierte Strom $i_1(t)$ (bzw. $-i_1(t)$ aufgrund der unterschiedlichen Orientierung in Abbildung 7.2 und Abbildung 3.15) sind in Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10 dargestellt. Die Werte, die entsprechend der festgelegten Messfrequenz für eine Diagnose verwendet wurden, sind mit einem x dargestellt. Die Detektion wurde für jeden Messzeitpunkt korrekt durchgeführt. Um den gesamten Prozess der Diagnose für einen Messzeitpunkt darzustellen, werden die Vorgänge exemplarisch für die markierten Zeitpunkte näher erläutert.

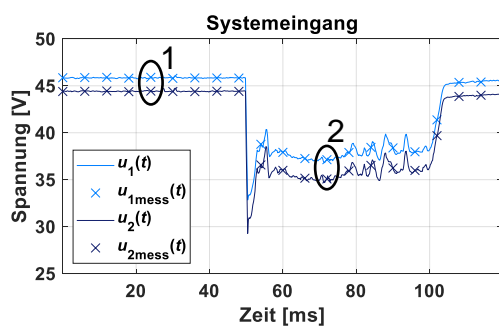


Abbildung 7.9: Spannungsverlauf und gewählte Zeitpunkte als Diagnoseinput.

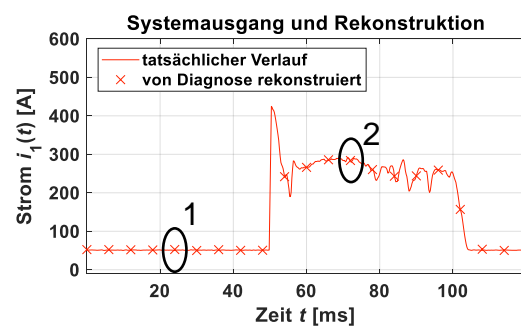


Abbildung 7.10: Stromverlauf $i_1(t)$ und von Diagnose rekonstruierte Strompunkte.

Diagnosezeitpunkt 1

Zum Zeitpunkt $t_d = 24 \text{ ms}$ (in Abbildung 7.9) stehen die Messwerte $u_1(t_d = 24 \text{ ms}) = 45,91 \text{ V}$, $u_2(t_d = 24 \text{ ms}) = 44,43 \text{ V}$ und $i_1(t_d = 24 \text{ ms}) = 50,27 \text{ A}$ zur Verfügung. Die Spannungswerte werden als Modellinput interpretiert. Mit diesen werden für jede Permutation von z_i , m_1 und m_2 die möglichen restlichen Größen des Diagnosemodells berechnet. Mit jedem erstellten Modell wird durch die in Gleichung (6.27) dargestellte Matrixinversion ein Lösungsvektor berechnet, der auch ein Berechnungsergebnis zum gemessenen Strom i_1 enthält. Alle berechneten Stromwerte, sowie die zur Verfügung stehende Messung, die als Systemausgang interpretiert wird, sind in Abbildung 7.11 dargestellt. Man erkennt die Permutationen für die unterschiedlichen Fehlerorte der parallelen Lichtbögen. Weiterhin erkennt man die möglichen Ströme bei seriellen Lichtbögen. Da es drei Fehlerorte gibt, gibt es auch drei Diagnosemodelle mit

einem seriellen Lichtbogen. Da die entsprechenden Ströme gleich sind, kann man die Unterscheidung in Abbildung 7.11 nicht erkennen. Den Normalzustand und die korrekte Klassifikation kann man in Abbildung 7.12 erkennen.

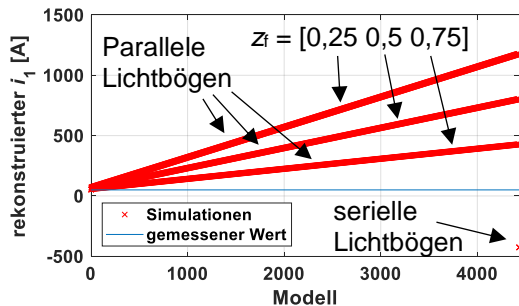


Abbildung 7.11: Berechnungsergebnisse für den Systemausgang (Punkt 1).

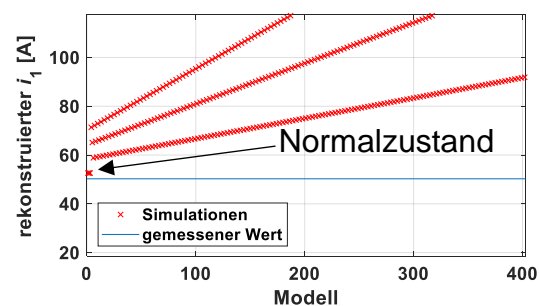


Abbildung 7.12: Berechnungsergebnisse für den Systemausgang (Punkt 1) (Zoom).

Durch Bildung der einfachen geometrischen Distanz (oben mit Vektornorm beschrieben) kann die vorliegende Messung dem korrekten Modell zugeordnet werden. Somit ist der Normalzustand richtig detektiert und die Stromrekonstruktion korrekt. Die leichte Abweichung des berechneten und gemessenen Wertes in Abbildung 7.12 kann an Mess- oder Modellgenauigkeiten, sowie an der Vernachlässigung der gedächtnisbehafteten Elemente im Diagnosemodell liegen.

Diagnosezeitpunkt 2

Zum Zeitpunkt $t_d = 78$ ms (in Abbildung 7.9) stehen die Messwerte $u_1(t_d = 78 \text{ ms}) = 37,13$ V, $u_2(t_d = 78 \text{ ms}) = 35,08$ V und $i_1(t_d = 78 \text{ ms}) = 283,73$ A zur Verfügung. Die möglichen Simulationsergebnisse für i_1 mit den gegebenen $u_1(t_d)$ und $u_2(t_d)$, die mittels der Diagnosemodelle ermittelt wurden, sind in Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 dargestellt. Man kann eine klare Variation des gemessenen Wertes erkennen. Außerdem zeigt ein großer Unterschied zwischen dem gemessenen Wert und dem mit dem Nominal-Diagnosemodell berechneten werden, dass es sich nicht um einen Normalzustand handelt. Die klare Zuordnung zu einem Diagnosemodell, welches einen parallelen Lichtbogenfehler repräsentiert, kann getroffen werden. Es ist jedoch weiterhin zu erkennen, dass die Lokalisierung der parallelen Lichtbögen entlang der Leitung nicht möglich ist (siehe Abbildung 7.14). Diese Mehrdeutigkeit lässt ebenfalls Fehler in der Lichtbogenstromberechnung und Stromberechnung i_2 zu.

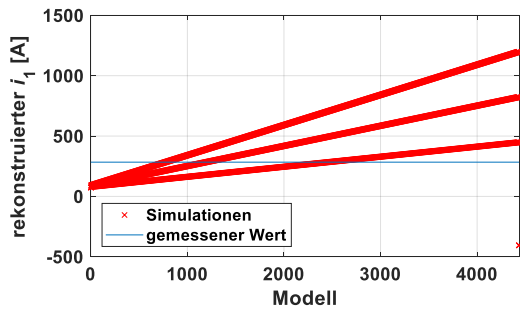


Abbildung 7.13: Berechnungsergebnisse für den Systemausgang (Punkt 2).

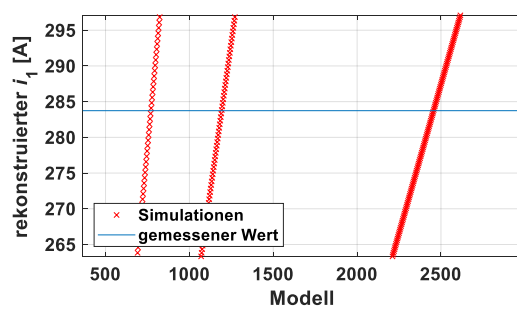


Abbildung 7.14: Berechnungsergebnisse für den Systemausgang (Punkt 2) (Zoom).

Gesamtbetrachtung, Erklärung und Interpretation

Die vom parallelen Lichtbogen umgesetzte Energie bis zum Erkennungszeitpunkt $t_d = 54$ ms beträgt 42,4 J, wie in Abbildung 7.15 dargestellt, und wäre demnach vermutlich unkritisch. Es wird davon ausgegangen, dass die erste Überprüfung der Messwerte (siehe Kreuze in Abbildung 7.9) eine korrekte Detektion ergibt.

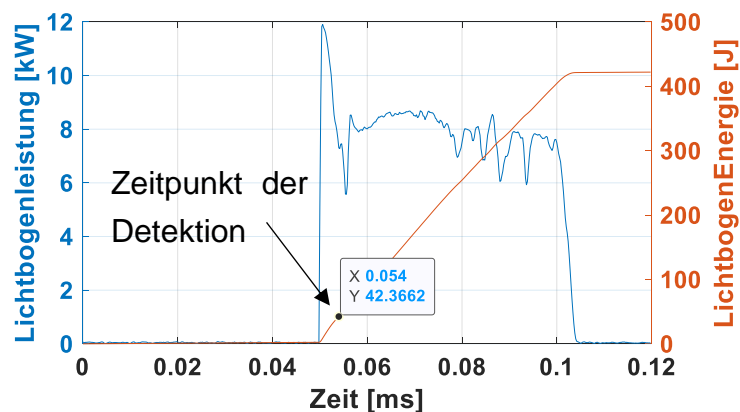


Abbildung 7.15: Lichtbogenleistung und -energie des parallelen Lichtbogens bis zur korrekten Detektion.

Der große Abstand der Berechnungsergebnisse der Modelle, die einen seriellen Lichtbogen beinhalten, zum Normalzustand lässt ebenfalls eine eindeutige Detektion und Identifikation vermuten. Dies lässt sich damit erklären, dass aufgrund der Verfügbarkeit beider Spannungswerte $u_1(t)$ und $u_2(t)$ ebenfalls eine differentielle Auswertung vorgenommen werden könnte, mit folgender Regel, die auch schon in Kapitel 6.2.2 beschrieben wurde:

Wenn $u_1(t) - u_2(t) > u_{LBmin}$, **dann** muss aus sicherheitstechnischen Gründen davon ausgegangen werden, dass ein serieller Lichtbogen brennt.

Der dargestellte Ansatz berücksichtigt diese Regel implizit.

Die eindeutige Detektion und Identifikation der parallelen Lichtbögen können anhand eines einfachen Beispiels erklärt werden. Anhand der Darstellungen in Abbildung 7.16 und Abbildung 7.17 können der fehlerfreie und der mit parallelem Lichtbogen behaftete Zustand gegenübergestellt werden. Die Spannungsdifferenz von $u_1(t)$ und $u_2(t)$ kann für den fehlerfreien Zustand mit der nachfolgenden Gleichung berechnet werden:

$$u_1(t) - u_2(t) = u_n(t) = R_{ges} \cdot i_1(t) \quad (7.2)$$

Die Spannungsdifferenz im fehlerbehafteten Zustand kann berechnet werden mit:

$$u_1(t) - u_2(t) = u_f(t) = R_{ges} \cdot i_1(t) - (1 - z_f) \cdot R_{ges} \cdot i_{LB} \quad (7.3)$$

Es ist ersichtlich, dass die Spannung über dem Überwachungsabschnitt im fehlerfreien Fall größer sein muss als sie unter Einfluss eines parallelen Lichtbogens ist. Sobald die tatsächliche Spannung also von der mit Gleichung (7.2) um $\Delta U = (1 - z_f) \cdot R_{ges} \cdot i_{LB}$ abweicht, ist ein paralleler Lichtbogen im System vorhanden.

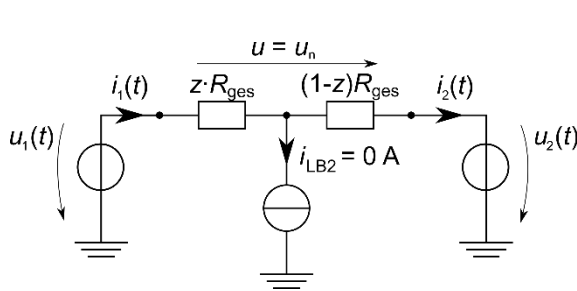


Abbildung 7.16: Diagnosemodell für Überwachungsabschnitt ohne Fehler.

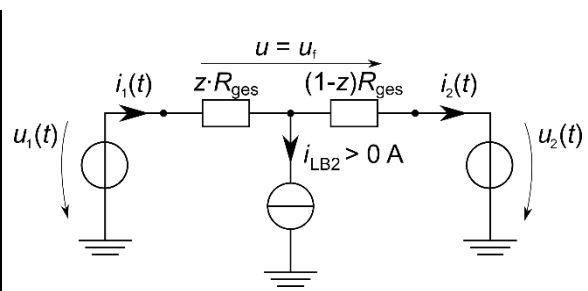


Abbildung 7.17: Diagnosemodell für Überwachungsabschnitt Einzelleitung mit parallelem Lichtbogen.

Das Residuum aus erwartetem Spannungsabfall und tatsächlichem Spannungsabfall:

$$r(t) = R_{ges} \cdot i_1(t) - (u_1(t) - u_2(t)) \quad (7.4)$$

für die dargestellte Messung ist in Abbildung 7.18 abgebildet. Man kann erkennen, dass im Fehlerfall die erwartete Spannung und die tatsächliche Spannung signifikant voneinander abweichen. Es kann konkret die Regel abgeleitet werden:

Wenn $r(t) = R_{ges} \cdot i_1(t) - (u_1(t) - u_2(t)) \neq 0 \text{ V}$, **dann** fließt ein Strom entlang des Überwachungsabschnitts/entlang der Leitung gegen Masse ab. Dies muss aus Sicherheitsgründen als paralleler Lichtbogen interpretiert werden.

Diese Regel wird ebenfalls von der vorgestellten Methode implizit berücksichtigt.

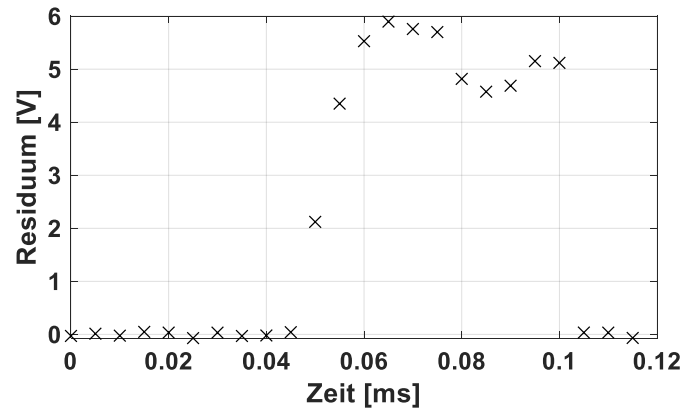


Abbildung 7.18: Auf der dargestellten regelbasierten Fehlerdetektion basierendes Residuum $r(t)$.

7.3 Grenzen des Verfahrens

7.3.1 Mess- bzw. Modellungenauigkeit und Fehlerort

Aufgrund der guten Nachbildung in der Simulation können anhand von simulativen Variationen im Versuchsaufbau die Grenzen des Verfahrens dargestellt werden. Ein kritisches Szenario wird in der vorgestellten Konfiguration erreicht, wenn z_f gegen 1 geht, wenn also der parallele Lichtbogen am Ende der Leitung auftritt. Dies kann anhand von Gleichung (7.3) ebenfalls ersichtlich werden. Ein geringerer Abstand des erwarteten zum tatsächlichen Spannungsabfall, gemeinsam mit Messungenauigkeiten, kann dazu führen, dass keine robuste Detektion mehr gewährleistet werden kann. Das nun angepasste Szenario (Abbildung 7.19) weist mit $z_f \approx 0,96$ einen relativ großen Wert auf, bei dem der Abstand zwischen Normal- und Fehlerzustand bereits einen relativ kleinen Wert annimmt. Die Konfiguration ist $R_1 = 27 \text{ m}\Omega$, $L_1 = 7 \text{ }\mu\text{H}$, $R_2 = 1 \text{ m}\Omega$, $L_2 = 1 \text{ }\mu\text{H}$. Die angenommenen Messungenauigkeiten in der Spannungsmessung betragen 200 mV. Die angenommene Messungenauigkeit in der Strommessung beträgt 5 A. Die simulierten Spannungen $u_{1\text{sim}}(t)$ und $u_{2\text{sim}}(t)$ und der simulierte Strom $i_{\text{sim}}(t)$ mit dem zuvor rekonstruierten Lichtbogenlängenprofil und dem angepassten Fehlerort ($z_f \approx 0,96$) sind in Abbildung 7.19 dargestellt.

Aufgrund des geringen Abstands zwischen dem Normal- und den Fehlerzuständen durch das große z_f und aufgrund der verrauschten Messungen können Situationen wie in Abbildung 7.20 entstehen, in denen fälschlicherweise ein Lichtbogen detektiert wird. Bereits die Betrachtung des Residuums, in Abbildung 7.21 dargestellt, zeigt, dass eine klare Auswertung unter den gegebenen Bedingungen schwierig sein kann.

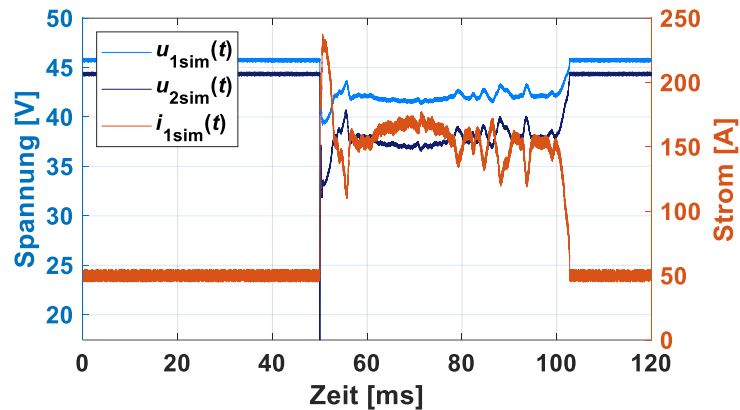


Abbildung 7.19: Simulierte Signale bei parallelem Lichtbogen in kritischem Szenario und rekonstruiertem Lichtbogenlängenprofil.

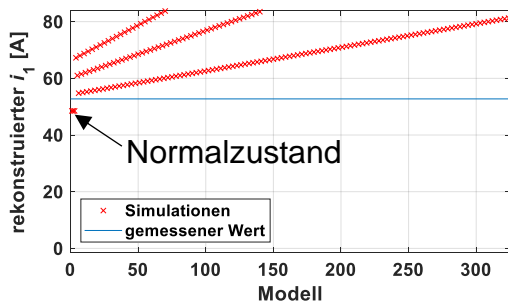


Abbildung 7.20: Vergleich des Messwerts mit den simulierten Werten zu einem konkreten Zeitpunkt.

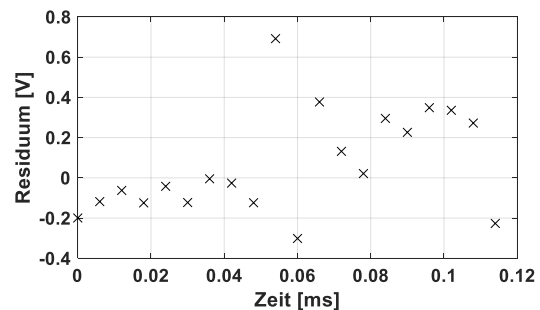


Abbildung 7.21: Residuum $r(t)$ aus regelbasierter Detektion mit großem z_f und Messrauschen.

7.3.2 Zeitliche Performance

Im Rahmen der Residuum-Generation müssen für jeden Diagnosezeitpunkt, im oben dargestellten Beispiel alle 6 ms, Berechnungen durchgeführt werden. Diese Berechnungen beinhalten Matrixinversionen. Die tatsächliche Anzahl an Berechnungen hängt von den Dimensionen der Fehlervektoren ab und kann für das dargestellte Beispiel für die Basistopologie *Einzelleitung* mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$\text{Anzahl Zustände} = \dim(z_f) \cdot [(\dim(m_1) - 1) + (\dim(m_2) - 1)] + 1 \quad (7.5)$$

Nach der Berechnung aller möglichen Zustände muss im Rahmen der Residuum-Klassifikation der wahrscheinlichste Zustand bestimmt werden. Das hier verwendete, einfache Verfahren basiert auf der geometrischen Distanz. Es müssen also Vektornormen gebildet werden. Der tatsächliche zeitliche Aufwand hängt sehr stark von der Implementierung und der verwendeten Hardware ab. Aufgrund der Datenunabhängigkeit

können die nötigen Berechnungen parallelisiert werden. Sobald der Berechnungsaufwand mit der zur Verfügung stehenden Hardware länger dauert als die Messperiode (hier 166 Hz, also ca. 6 ms), kann das Verfahren nicht mehr angewendet werden.

7.3.3 Transiente Vorgänge

Aufgrund der Arbeitspunktanalysen sind besonders bei transienten Vorgängen, also vornehmlich in Zünd- und Löschzeitpunkten, Fehler zu erwarten. Die Anwendung des beschriebenen Algorithmus auf den Zündzeitpunkt ist in Abbildung 7.22 und Abbildung 7.23 dargestellt. Der starke Spannungseinbruch von $u_2(t)$, welcher gut in Abbildung 7.22 gesehen werden kann, führt zu transienten Vorgängen. Besonders die im Verfahren nicht berücksichtigten Leitungsinduktivitäten können eine Spannung induzieren. Die fehlerhafte Stromrekonstruktion ist in Abbildung 7.23 dargestellt.

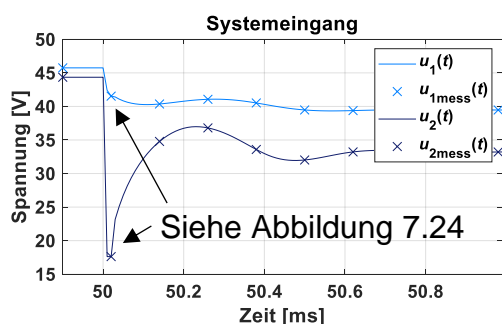


Abbildung 7.22: Messung/transienter Zündmoment. Systemeingang des Diagnosemodells.

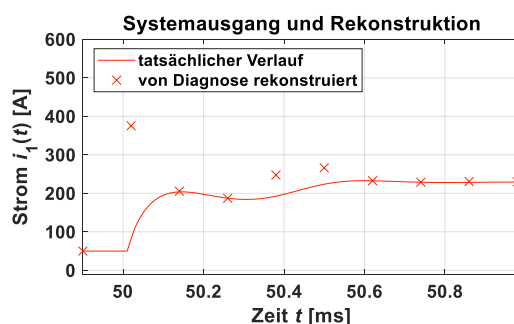


Abbildung 7.23: Stromrekonstruktion mit Diagnosemodell.

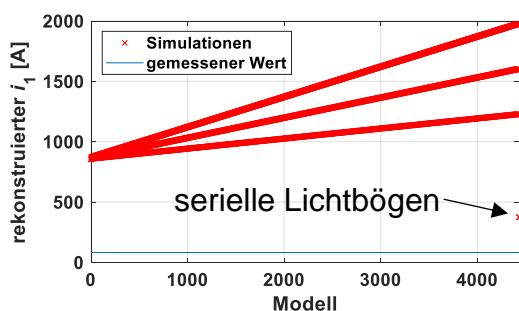


Abbildung 7.24: Diagnose für markierten Zeitpunkt.

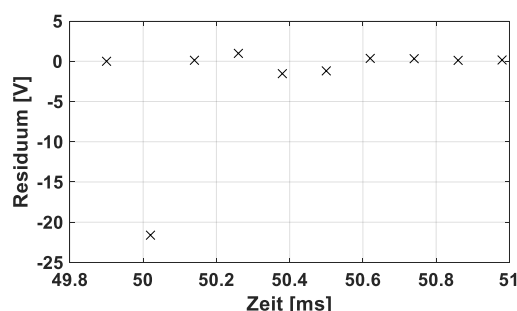


Abbildung 7.25: Residuum $r(t)$ für transienten Beispielzeitraum.

Die Wahl des Messzeitpunktes zu diesem Zeitpunkt führt zu einer fehlerhaften Simulation und somit zu einer fehlerhaften Stromrekonstruktion und Detektion/Klassifikation. Die Simulationsergebnisse des markierten Zeitpunkts des Systemeingangs sind in Abbildung 7.24 dargestellt. Der Abstand zu allen simulierten Arbeitspunkten ist groß, die Zuordnung zu dem seriellen Lichtbogenzustand ist falsch.

8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beginnt mit einer Begründung für die Signifikanz der 48 V-Technologie in zukünftigen Kfz-Bordnetzen. Das hohe CO₂-Einsparpotenzial, sowie die erhöhte Leistungsfähigkeit bei trotzdem geringen Kosten durch die intrinsische Berührsicherheit und die reduzierten Kabelquerschnitte stellen nur einige von vielen entscheidenden Vorteilen dar. Auch deswegen gehen verschiedene Forecast-Szenarien davon aus, dass sich 48 V-Bordnetze in zukünftigen Kraftfahrzeugen stark verbreiten und etablieren werden. Neben den zahlreichen Vorteilen existiert der Nachteil, dass im Fehlerfall gefährliche Lichtbögen entstehen können. Es ist sogar zu erwarten, dass auch die klassischen Fehler, also der Kurzschluss und der Leitungsbruch, nur gemeinsam mit einem Lichtbogen auftreten. Durch extrem hohe Temperaturen können den Lichtbogen umgebene Materialien in Brand geraten. Diese Brände können zu funktionalen Ausfällen führen, was besonders in zukünftigen Kraftfahrzeugen mit z.B. automatisierten oder sogar autonomen Fahrfunktionen unbedingt zu vermeiden ist. Auch die direkten elektrischen Auswirkungen von Lichtbögen können zum Ausfall wichtiger Bordnetzkomponenten führen. Aufgrund der Tatsache, dass Lichtbögen nicht zuverlässig von konventionellen Schutzeinrichtungen erkannt und gelöscht werden können und dass weiterhin Lichtbögen in 48 V Kfz-Bordnetzen noch nicht ausreichend untersucht und analysiert wurden, beschäftigt sich die Arbeit mit der Analyse und Diagnose von Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen. Die Analyse hat dabei einen Fokus auf der Lichtbogenenergie, also auf dem Beschädigungspotential für umliegende Materialien. Das Ziel ist es, Maßnahmen und aktive und passive Verfahren zu untersuchen, um die Energieabgabe von Lichtbögen in einem ungefährlichen Rahmen zu halten.

Um das Gesamtsystem Kfz-Bordnetz zunächst auf ein sinnvolles Teilbordnetz reduzieren zu können, welches als Untersuchungsgrundlagen dienen soll, werden erst allgemein Rahmenbedingungen von Kfz-Bordnetzen beschrieben. Hierbei wird vor allem auf die Variantenvielfalt und die hohen Sicherheitsanforderungen an fail-operational Bordnetze eingegangen. Abschließend werden die Basistopologien *Einzelleitung* und *verzweigte Leitung* definiert. Die definierten Basistopologien werden einheitlich auf einer Seite von einem Teilbordnetz mit Quellen gespeist und versorgen auf der anderen Seite verschiedene Verbraucher (Steuergeräte bzw. Aktuatoren). Die Analysen am Beispiel dieser Basistopologien können adaptiert und auf größere und komplexere Bordnetze angewendet werden. Durch die Gefahr von Lichtbogenfehlern und den großen Aufwand beim Betrieb von Prüfständen durch Beschädigung und sicherheitstechnische Kriterien wurde eine modellbasierte Analyse angestrebt.

Um eine modellbasierte Analyse durchführen zu können, werden im darauffolgenden Kapitel die zuvor definierten Basistopologien modelliert. Hierbei stand im Vordergrund, die quasi-stationären Betriebszustände, sowie transiente Effekte im zweistelligen Kiloherzbereich nachbilden zu können. Allgemein können Lichtbögen auch höherfrequente Phänomene anregen, wenn z.B. die Zündmomente hoch aufgelöst oder das Rauschverhalten genutzt werden soll. Für die in dieser Arbeit dargestellten Analysen waren die gewählten Modelle jedoch ausreichend. Teilbordnetze mit Quellen wurden mit idealen Quellen, Widerständen und Induktivitäten nachgebildet. Die Abschnitte vor und hinter dem Fehler des Überwachungsabschnitts, also die Leitungs-Stecker-Systeme, wurden ohmsch-induktiv nachgebildet. Die Verbraucher, also Bordnetzabschlüsse, wurden als ohmsch oder leistungskonstant nachgebildet. Ein Eingangskondensator zur Spannungsstabilisierung wurde ebenfalls berücksichtigt.

Nachdem Modelle für die Basistopologien aufgestellt und die Auftrittsorte von Lichtbögen entlang der Leitung dargestellt wurden, wurde der Fokus der Arbeit weg von der Eingangsbeschaltung des Lichtbogens hin zum Lichtbogen selber verlagert. Einige physikalische Hintergrundinformationen haben in das Modellbildungskapitel zum Lichtbogenfehler eingeleitet. Anschließend wurde der für diese Arbeit verwendete Lichtbogenprüfstand vorgestellt. Der Prüfstand diente dazu, das Lichtbogenverhalten in für 48 V Kfz-Bordnetze relevanten Szenarien untersuchen zu können. Weiterhin konnten diverse Parametrierungs- und Validierungsmessungen durchgeführt werden. Mittels dieses Prüfstands und weitreichenden Recherchen konnte eine Anforderungsanalyse für Lichtbogenmodelle für Simulationen in 48 V Kfz-Bordnetzen durchgeführt werden.

Das Ergebnis dieser Analyse war, dass die Einflüsse des Luftdrucks, der Luftfeuchtigkeit, der Umgebungstemperatur und der Elektrodengeometrie auf das Brennverhalten des Lichtbogens in einer anderweitigen statistischen Unsicherheit untergehen und somit nicht explizit, sondern mittelbar über einen statistischen Parameter berücksichtigt werden müssen. Um die genauen Zusammenhänge detailliert herauszuarbeiten, müssten weitere spezialisierte Messreihen durchgeführt werden. Aufgrund des Fokus dieser Arbeit wurde dieser Ansatz hier nicht weiter verfolgt. Der Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit der Elektroden schien für die angestrebten Untersuchungen hauptsächlich durch die Eingangsbeschaltung bestimmt zu werden. Da die Auswirkungen für diese Arbeit jedoch nicht maßgeblich relevant waren, wurde dieser Einfluss ebenfalls vernachlässigt. Die Kfz-relevanten Materialien Kupfer und Aluminium haben stark voneinander abweichende Verhaltensweisen hervorgerufen, sodass eine explizite Berücksichtigung angestrebt werden muss. Neben dem Brennverhalten konnte die weitere Anforderung definiert werden, dass auch Zündvorgänge, besonders

die Stromschwingungen aufgrund von steilen Spannungsflanken bei der Zündung serieller Lichtbögen, von dem Modell gut nachgebildet werden müssen. Weitere Anforderungen betreffen die Benutzbarkeit. Aufgrund von oft unbekanntem und möglicherweise wechselnden Eingangsbeschaltungen im Bereich von 48 V Kfz-Bordnetzsimulationen, darf keine direkte Abhängigkeit des Modells hierzu bestehen.

Nachdem die speziellen Anforderungen von Fehlersimulationen in 48 V Kfz-Bordnetzen an Lichtbogenmodelle definiert waren, wurden bekannte Modellierungsansätze von Lichtbögen dargestellt und untersucht. Da kein hier dargestellter Ansatz ausreichend gute Ergebnisse liefern bzw. alle Anforderungen aus der Anforderungsanalyse ausreichend erfüllen konnte, wurde eine neue Lichtbogengleichung, die das Verhältnis zwischen der Lichtbogenspannung, dem Lichtbogenstrom und der Lichtbogenlänge beschreibt (ALVE-Gleichung) entwickelt und mit sehr vielen variierenden Messungen parametrisiert. Durch eine entsprechende Implementierung konnten auch die Verwendbarkeit und das Wechselspiel zu den konventionellen Fehlern, also Kurzschlüssen und offenen Klemmen, nachgebildet werden. Die anschließende Validierung und der Vergleich zum Ayrton-Ansatz, auf welchem die neue Gleichung fußt, haben gezeigt, dass der ALVE-Ansatz in der dargestellten Implementierung die zuvor definierten Anforderungen erfüllen kann und das Lichtbogenverhalten in den hier interessanten 48 V Kfz-Bordnetzen besser nachbildet als der Ayrton-Ansatz. Trotzdem ist zu erwarten, dass auch unvorhergesehene Lichtbogensignalverläufe, resultierend aus unvorhersagbaren Beschädigungen der Elektroden oder Lichtbogenlängenprofilen, möglich sind.

Nach der Entwicklung, Parametrierung und Implementierung eines Lichtbogenmodells, welche die Simulationsanforderungen an Lichtbogensimulationen in 48 V Kfz-Bordnetzen erfüllen kann (ALVE-Gleichung), wurde die Anwendung des Modells demonstriert. Eine mögliche Form der Anwendung ist die lichtbogensichere Bordnetzauslegung. Hierbei kann die Eingangsbeschaltung des seriellen Lichtbogens so ausgelegt werden, dass die transiente Stromschwingung, welche durch den Spannungssprung im Lichtbogenzündmoment hervorgerufen wird, zur fast sofortigen Lichtbogenlöschung führt. Die exemplarische Analyse und Auslegung der Basistopologie *Einzelleitung* und der Basistopologie *verzweigte Leitung* wurden dargestellt. Hierbei wurde angenommen, dass die spannungsstabilisierenden Abschlusskondensatoren einen Freiheitsgrad in der Bordnetzauslegung darstellen. Es können simulativ Werte für die Abschlusskapazitäten ermittelt werden, sodass serielle Lichtbögen im Zündmoment erlöschen. Dieser Vorgang begrenzt die umgesetzte Lichtbogenenergie enorm.

Eine weitere mögliche Anwendung des Lichtbogenmodells ist die Vorhersage der vom Lichtbogen umgesetzten Energien in verschiedenen Szenarien. Hiervon kann das Gefahrenpotential, angrenzende Materialien zu entzünden, abgeleitet werden. Es wurden verschiedene Szenarien mit Überschreitung der kritischen Lichtbogenenergie von

100 J dargestellt. Weiterhin wurde in der Simulation nachgewiesen, dass auch klassische Schmelzsicherungen oft keinen ausreichenden Schutz gegen parallele Lichtbögen bieten können.

Aufgrund der Tatsache, dass zwar eine lichtbogensichere Bordnetzauslegung für die Unterdrückung serieller Lichtbögen durchgeführt werden kann, dass jedoch parallele Lichtbögen weiterhin unkontrolliert brennen können, wurde der weitere Fokus der Arbeit auf die Lichtbogen-Diagnose gelegt. Um zeitliche Anforderungen an diese Diagnosealgorithmen stellen zu können, wurden zunächst anhand theoretischer Überlegungen für serielle und parallele Lichtbögen in verschiedenen Konfigurationen kritische Zeiten bestimmt, in denen sie gelöscht werden müssen, um die Brandgefahr minimieren zu können. Die dargestellten Beispiele stellen zu erwartende Wertebereiche in realen Kfz dar. Die kritischen Zeiten lagen im ein bis zweistelligen Millisekundenbereich. Anschließend wurde zunächst der allgemeine Prozess bei Diagnoseverfahren beschrieben (Detektion, Identifikation, Lokalisierung) und verschiedene Möglichkeiten der Klassifikation von Diagnoseverfahren dargestellt (modellbasiert vs. modellfrei). Anschließend wurden spezifische Lichtbogenphänomene am Beispiel bekannter Lichtbogendetektionsverfahren vorgestellt (optisch, thermisch, elektromagnetisch, akustisch, elektrisch). Da alle Verfahren sehr aufwendig und nicht robust genug erschienen oder mit hohen Kosten verbunden sein können, wurde der Ansatz einer elektrischen modellbasierten Lichtbogen-Diagnose vorgeschlagen und vorgestellt. Hierbei lag der Fokus zum einen auf der modellbasierten Diagnose und zum anderen auf der Darstellung eines allgemeinen Ansatzes, der in dieser Form von den einfachen Teilsystemen dieser Arbeit (*Einzelleitung* und *verzweigte Leitung*) für beliebige Bordnetze erweitert werden kann. Das hier vorgestellte Verfahren fusioniert die im Bordnetz vorhandenen Strom- und Spannungsmessungen an einer zentralen Stelle, um sie dort modellbasiert bestmöglich zu verarbeiten. Für die Basistopologie *Einzelleitung* wurde ein stationäres Diagnosemodell erstellt, welches eine variierende Spannungsquelle für einen seriellen Lichtbogen und eine variierende Stromquelle für einen parallelen Lichtbogen beinhaltet. Durch die Permutation der Quellenwerte kann das Systemverhalten unter Lichtbogeneinfluss und einer beliebigen Ausprägung simuliert bzw. berechnet werden. Im vorgestellten Beispiel werden Spannungsmessungen als Modellinput und die Strommessungen als Modelloutput verstanden.

Ein mittels des Lichtbogenprüfstands im Labor erzeugter kritischer paralleler Lichtbogen in der Basistopologie *Einzelleitung* konnte trotz nur begrenzter Sensorinformationen durch das Verfahren zuverlässig erkannt werden. Anhand der simulativen Nachbildung des Versuchs mittels des Bordnetz- und Lichtbogenmodells konnten die Grenzen des Verfahrens bei z.B. anderen Fehlerorten entlang des Kabels oder Messungenauigkeiten verdeutlicht werden.

Unter Verwendung der Ergebnisse dieser Arbeit können zum einen nahezu beliebige Bordnetze auf Lichtbogensicherheit gegen serielle Lichtbögen modellbasiert geprüft werden. Weiterhin können die vorgeschlagenen Dimensionierungsrichtlinien genutzt werden, um die Wahrscheinlichkeit von seriellen Lichtbögen zu minimieren. Da auch selbstgelöschte serielle Lichtbögen durch Wiederzündung, sowie auch parallele Lichtbögen stabil brennen können, wurde ein allgemeiner Ansatz für eine modellbasierte Lichtbogen-Diagnose vorgestellt. Dieser Ansatz basiert auf dem Modellwissen über das Lichtbogen- und Bordnetzverhalten. Mittels des vorgestellten Ansatzes kann ein Diagnosealgorithmus entworfen werden, der sowohl serielle als auch parallele Lichtbögen erkennen kann. Durch die Möglichkeit der Simulation von Lichtbögen in Bordnetzen kann ein solcher Algorithmus in individuellen Bordnetzen und Konfigurationen vollständig getestet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] H. Wallentowitz und A. Freialdenhoven, Strategien zur Elektrifizierung des Antriebstranges, Wiesbaden, DE: Vieweg + Teubner, 2011.
- [2] M. Wortberg, P. Thoma und A. Bachmeier, „Bordnetzarchitekturen - Von der Evolution zur Revolution,“ *ATZ elektronik*, Nr. 04/2016, pp. 26 - 33, 2016.
- [3] ZVEI, „48-Volt-Bordnetz - Schlüsseltechnologie auf dem Weg zur Elektromobilität,“ ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V., 2015.
- [4] Indrawanto, T. Ayatullah und R. A. Prayoga, „On the Design of Electric Power Steering Control Unit,“ in *2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, Surakarta, Indonesien, 2018.
- [5] ZVEI, „Voltage Classes for Electric Mobility,“ 2013. [Online]. Available: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2014/april/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility/Voltage_Classes_for_Electric_Mobility.pdf. [Zugriff am 13.02.2021].
- [6] J. P. Trovao, „Trends in Automotive Electronics,“ *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Bd. 14, Nr. 4, pp. 100 - 109, 2019.
- [7] D.-C. Popa und D. Fodorean, „Electrical machines solutions for air conditioning system in automotive industry,“ in *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iasi, Rumänien, 2016.
- [8] K. Mueller und R. Heinrich, „Modern High Voltage Drive Train Architecture to Accommodate the Needs for a Variety of Components for Future Automotive Applications,“ in *Conference on Future Automotive Technology*, München, DE, 2013.
- [9] R. Letor und R. Crisafulli, „Smart Power devices and new electronic fuses compliant with new E/E architecture for autonomous driving,“ in *2019 AEIT International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE)*, Torino, Italien, 2019.
- [10] L. S. Kumar, R. N. Kumar und A. C. Huzefa, „Collision warning with auto brake & complete high voltage disconnect during crash - A real-life safety perspective,“ in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*, Pune, Indien, 2017.
- [11] UNECE, „ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/11,“ Working Party on Passive Safety, Genf, 2013.

- [12] ADAC, „ADAC - verschiedene Pannenstatistiken 2010 - 2019,“ [Online]. Available: <http://www.adac.de>. [Zugriff am 01 10 2020].
- [13] K. Jost, 48-V Developments, ISBN: 978-0-7680-8192-3: SAE International, 31.12.2016.
- [14] A. C. Serban, E. Poll und J. Visser, „Tactical Safety Reasoning. A Case for Autonomous Vehicles,“ in *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, Portugal, 2018.
- [15] S. v. Dorff, B. Böddeker, M. Kneissl und M. Fränzle, „A Fail-Safe Architecture for Automated Driving,“ in *2020 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, Grenoble, Frankreich, 2020.
- [16] M. Heuermann und M. Ernst, „Die wichtigsten Bordnetzrends,“ *Elektronik automotive Sonderheft Bordnetz*, pp. 20 - 23, 2014.
- [17] R. Gehring, „Bordnetzkomponenten,“ in *Beitrag zur Untersuchung und Erhöhung der Spannungsstabilität des elektrischen Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug*, Dissertation, München, DE, 2011, pp. 18 - 25.
- [18] K. Reif, „Starterbatterien,“ in *Batterien, Bordnetze und Vernetzung*, Wiesbaden, DE, Vieweg und Teubner, 2010, pp. 36 - 69.
- [19] H. Budde-Meiwes, B. L. J. Drillkens, J. Muennix, S. Rothgang, J. Kowal und D. U. Sauer, „A review of current automotive battery technology and future prospects,“ *Journal of Automotive Engineering*, Bd. 227, Nr. 5, pp. 761 - 776, 2010.
- [20] P. Shen, M. Ouyang, L. Lu, J. Li und X. Feng, „The Co-estimation of State of Charge, State of Health, and State of Function for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 67, Nr. 1, pp. 92 - 103, 2018.
- [21] R. Gehring, „Bordnetzstabilität,“ in *Beitrag zur Untersuchung und Erhöhung der Spannungsstabilität des elektrischen Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug*, Dissertation, München, DE, 2013, pp. 7 - 15.
- [22] M. Richter, S. Zinser, M. M. M. Stiegeler und H. Kabza, „Energy Management for Range Enlargement of a Hybrid Battery Vehicle with Battery and Double Layer Capacitors,“ in *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Birmingham, UK, 2011.
- [23] S. Hayslett, K. V. Maanen, W. Wenzel und T. Husain, „The 48-V Mild Hybrid: Benefits, Motivation, and the Future Outlook,“ *IEEE Electrification Magazine*, Bd. 8, Nr. 2, pp. 11 - 17, 2020.

-
- [24] S. Runde, A. Baumgardt, O. Moros, B. Rubey und D. Gerling, „ISCAD - Design, control and car integration of a 48 volt high performance drive,“ *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, Bd. 3, Nr. 2, pp. 117 - 123, 2019.
- [25] F. Ruf, Auslegung und Topologieoptimierung von spannungsstabilen Energiebordnetzen, Dissertation, München, DE, 2015.
- [26] A. Arora, N. Medora, B. Pinnangudi und T. Livemois, „Evaluation of resistive faults in high current starter cables,“ in *2009 IEEE Symposium on Product Compliance Engineering*, Toronto, ON, Kanada, 2009.
- [27] H. Fischer, H. Hofmann und J. Spindler, „Kontaktwerkstoffe,“ in *Werkstoffe in der Elektrotechnik*, Mittweida, DE, Hanser, 2006, pp. 181-198.
- [28] E. Vinaricky, K.-H. Schröder und J. Weiser, Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen, Heidelberg, DE: Springer Vieweg, 2016.
- [29] C.-W. Lin, L. Rao, P. Giusto, J. D'Ambrosio und A. L. Sangiovanni-Vincentellig, „Efficient Wire Routing and Wire Sizing for Weight Minimization of Automotive Systems,“ *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, Bd. 34, Nr. 11, pp. 1730 - 1741, 2015.
- [30] S. Ogihara, K. Takata, Y. Hattori und K. Yoshida, „Mechanical Analysis of Crimping Connection,“ in *Electrical Contacts - 2006. Proceedings of the 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Montreal, QC, Kanada, 2006.
- [31] H. Katzier, Elektrische Steckverbinder, Leuze Verlag, 2012.
- [32] R. D. Malucci, „Stability and Contact Resistance Failure Criteria,“ *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Bd. 29, Nr. 2, pp. 326 - 332, 2006.
- [33] L. Gysen, M. Ayeb und L. Brabetz, „Cable Bundle Protection and Cross-Section Reduction by using a centralized Smart Fusing Strategy,“ in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Nottingham, UK, 2018.
- [34] M. Hohmann, Ein synthetischer Ansatz zur Auslegung von Kfz-Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge, Dissertation, Ilmenau, DE, 2009.
- [35] RSK/ESK Geschäftsstelle - Bundesamt für Strahlenschutz, „Rechnerbasierte Sicherheitsleittechnik für den Einsatz in der höchsten Sicherheitskategorie in deutschen Kernkraftwerken,“ 2011.

- [36] K. Reif, „Energiebordnetze,“ in *Batterien, Bordnetze und Vernetzung*, Wiesbaden, DE, Vieweg und Teubner, 2010, pp. 10 - 35.
- [37] A. Zeichner, „Impedanzverhalten der Bordnetz-Komponenten,“ in *EMV Analysen zur Datenübertragung über das Kfz-Energiebordnetz*, Dissertation, Dortmund, DE, 2020, pp. 55 - 68.
- [38] M. Hohmann, „Bordnetzarchitekturen,“ in *Ein synthetischer Ansatz zur Auslegung von Kfz-Bordnetzen unter Berücksichtigung dynamischer Belastungsvorgänge*, Dissertation, Ilmenau, DE, 2009, pp. 13 - 20.
- [39] S. Schumi und A. Graf, „Energy and Supply Concepts for Automated Driving,“ in *AmE 2018 - Automotive meets Electronics - 9. GMM Fachtagung*, Dortmund, DE, 2018.
- [40] M. S. Bechteler, C. M. Scheßl und T. F. Bech, „Electrical Power Net Systems in Cars - Impedance Modeling and Measurement,“ *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Bd. 59, Nr. 3, pp. 1148 - 1155, 2010.
- [41] J. Wang, „Batterie,“ in *Simulationsumgebung zur Bewertung von Bordnetz-Architekturen mit Hochleistungsverbrauchern*, Dissertation, Kassel, DE, 2016, pp. 24 - 40.
- [42] M. Diebig, „Modellierung von Bordnetzkomponenten,“ in *Dimensionierung von Kfz-Bordnetzen*, Dissertation, Dortmund, DE, 2016, pp. 57 - 62.
- [43] S. Büchner, „Elektrisches Energiemanagement im Kraftfahrzeug,“ in *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*, Dresden, Springer Vieweg, 2008, pp. 4 - 27.
- [44] J. Ganz, I. Buresch, E. Vinarcky und J. Horn, „Dauerhafte Verbindungen, Steckverbindungen und Gleitkontaktsysteme,“ in *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen*, Heidelberg, DE, Springer Vieweg, 2016, pp. 537 - 602.
- [45] W. Shujuan, H. Fang, S. Bonan und Z. Guofu, „Method for calculation of contact resistance and finite element simulation of contact temperature rise based on rough surface contact model,“ in *26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012)*, Beijing, China, 2012.
- [46] C. R. Paul, „The Transmission-Line Equations for Two-Conductor Lines,“ in *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, 2008, pp. 71 - 88.
- [47] R. Gehring, „Leitungen,“ in *Beitrag zur Untersuchung und Erhöhung der Spannungsstabilität des elektrischen Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug*, Dissertation, München, DE, 2011, pp. 26 - 38.

-
- [48] S. Önal und S. Frei, „Elektrothermische Modellierung von Kfz-Schmelzsicherungen für dynamische Belastungen,“ in *AmE 2016 - Automotive meets Electronics - 7. GMM-Fachtagung*, Dortmund, DE, 2016.
- [49] D. P. Schwarz und D. J. Haase, „www.vda.de,“ 18 7 2006. [Online]. Available: <https://www.vda.de/de/services/Publikationen/fat-schriftenreihe-207.html>. [Zugriff am 27 06 2020].
- [50] L. Brabetz, M. Ayebe, G. Jilwan, P. Graebel und T. Kerner, „A New Approach to the Test, Assessment and Optimization of Robust Electrical distribution System,“ *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, Bd. 6, Nr. 3, pp. 382 - 388, 2013.
- [51] S. Önal und S. Frei, „Dynamic Control of Electronic Fuses in Vehicles Considering Longitudinal Temperature Distribution and Aging Behavior of Cables,“ in *AmE 2019 - Automotive meets Electronics - 10. GMM Fachtagung*, Dortmund, DE, 2019.
- [52] DKE, „DIN EN 55025 (VDE 0879-2),“ DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, 2018.
- [53] W. Rieder, *Plasma und Lichtbogen*, Braunschweig, DE: Friedr. Vieweg & Sohn, 1967.
- [54] P. G. Slade, „Vacuum Breakdown and Short-Gap Breakdown,“ in *Electrical Contacts: Principles and Applications*, CRC Press, 2014, pp. 566 - 569.
- [55] W. F. Rieder, „Low Current Arc Modes of Short Length and Time: A Review,“ *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Bd. 23, Nr. 2, pp. 286 - 292, 2000.
- [56] P. G. Slade, „The Formation of the Electric Arc,“ in *Electrical Contacts: Principles and Applications*, CRC Press, 2014, pp. 570 - 577.
- [57] H. Ishida, Y. Watanabe, M. Taniguchi, H. Inoue und T. Takagi, „Observation of contact bridge phenomena at transient and steady state,“ in *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts*, Seattle, WA, USA, 2004.
- [58] P. Koren, M. Nahemow und P. Slade, „The Molten Metal Bridge of Opening Electrical Contacts,“ *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, Bd. 11, Nr. 1, pp. 4 - 10, 1975.
- [59] A. Kuchler, „Gasentladungen,“ in *Hochspannungstechnik: Grundlagen - Technologie - Anwendungen*, Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 2005, pp. 152 - 203.

- [60] P. G. Slade, „The Arc in Air at Atmospheric Pressure,“ in *Electrical Contacts Principles and Applications*, CRC Press, 2014, pp. 578 - 591.
- [61] H. J. Fahrenwaldt und V. Schuler, „Metall-Lichtbogenschweißen,“ in *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*, Stuttgart/Ulm, Vieweg + Teubner, 2009, pp. 17 - 47.
- [62] R. F. Ammermann, T. Gammon, P. K. Sen und J. P. Nelson, „DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations,“ *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Bd. 46, Nr. 5, pp. 1810 - 1819, 2010.
- [63] J. Boskiner und E. J. Silverman, „Arc detection for telephone DC power distribution systems,“ in *15th International Telecommunications Energy Conference*, Paris, Frankreich, 1993.
- [64] P. G. Slade, „Arc Interruption in Direct Current Circuits,“ in *Electrical Contacts: Principles and Applications*, CRC Press, 2014, pp. 604 - 607.
- [65] W. F. Rieder, „Die Strom-Spannungs-Charakteristiken,“ in *Plasma und Lichtbögen*, Braunschweig, DE, Friedr. Vieweg & Sohn GmbH, 1967, pp. 107 - 110.
- [66] W. F. Rieder, „Anwendung der U(I)-Charakteristik,“ in *Plasma und Lichtbögen*, Braunschweig, DE, Friedr. Vieweg & Sohn GmbH, 1967, pp. 111 - 113.
- [67] M. Kiffmeier, C. Austermann und S. Frei, „Model-based analysis and evaluation of 48 V automotive power supply systems regarding to electric arc faults,“ in *IEEE Int. Conf. on Elect. Syst. for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Veh. & Int. Transp. Electrific. Conf. (ESARS-ITEC)*, Nottingham, UK, 2018.
- [68] N. Ben Jemaa, „Short Arc Duration Laws and Distributions at Low Current (< 1 A) and Voltage (14-42 V),“ *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Bd. 24, Nr. 3, pp. 358 - 362, 2001.
- [69] R. Große, H. Wallentowitz und S. Gies, Auswirkungen von Lichtbögen in Fahrzeug-Bordnetzen, Dissertation, Aachen, DE: Forschungsgesellschaft Kraftfahrtwesen mbH Aachen (fka), 2008.
- [70] F. Erhard, Beitrag zur Störlichtbogendetektion in Photovoltaikanlagen, Dissertation, Ilmenau, DE: Universitätsverlag Ilmenau, 2017.
- [71] A. KÜchler, Hochspannungstechnik, Springer Vieweg, 2017.
- [72] J. J. Lowke, „Simple theory of free-burning arcs,“ *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 12, Nr. 11, pp. 1873 - 1886, 1979.
- [73] M. Radmilovic-Radjenovic, B. Rajenovic, Z. Nikitovic, S. Matejcik und M. Klas, „The humidity effect on the breakdown voltage characteristics and the transport

- parameters of air," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 279, Bd. 279, pp. 103 - 105, 2012.
- [74] K. Borgeest, *Elektronik in der Fahrzeugtechnik*, Wiesbaden, DE: Springer Vieweg, 2014.
- [75] J. Sekikawa und T. Kubono, „Voltage-Current Characteristics of Breaking Arc at Constant Opening Speed in the Air,“ *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Bd. 27, Nr. 1, pp. 167 - 171, 2004.
- [76] K. Yoshida, K. Sawa, K. Suzuki und K. Takaya, „Influence of Opening Velocity on Various Characteristics in DC High Voltage Ag Break Arc,“ in *2015 IEEE 61st Holm Conf. on Elect. Contacts (Holm)*, San Diego, CA, USA, 2015.
- [77] L. Doublet, N. B. Jemaa, F. Hauner und D. Jeannot, „Electrical arc phenomena and its interaction on contact material at 42 volts DC for automotive applications,“ in *Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts Electrical Contacts*, Seattle, WA, USA, 2004.
- [78] R. Holm und E. Holm, „VI-characteristics of the stationary arc in air,“ in *Electrical Contact - Theory and Application*, Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1967, p. 283.
- [79] M. Junaid, K. Yang, H. Ge, Z. Liu, Y. Geng und J. Wang, „Arcing time analysis of liquid nitrogen with respect to electrode geometry,“ in *4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST)*, Xi'an, China, 2017.
- [80] L. Zhu und S. Ji, „Generation and Developing Process of Low Voltage Series DC Arc,“ *IEEE Transactions on Plasma Science*, Bd. 42, Nr. 10, pp. 2718 - 2719, 2014.
- [81] K. Yoshida, K. Sawa, K. Suzuki und K. Takaya, „Influence of contact materials and opening velocity on various characteristics of DC high voltage arc,“ in *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Denver, CO, USA, 2017.
- [82] R. Holm, „Die UI-Kennlinie des Bogens. Ziehen des Bogens. Durchschlag,“ in *Die technische Physik der elektrischen Kontakte*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1941, pp. 222 - 233.
- [83] A. Zeichner und S. Frei, „Immunity of Automotive Power Line Communication Systems,“ *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Bd. 58, Nr. 4, pp. 1289 - 1296, 2016.
- [84] J. Luis, „Stable Arc Data Analysis,“ in *Detection of Electric Arcs in 42-volt Automotive Systems*, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2003, pp. 53 - 57.

- [85] J. C. Kim, B. Lehman und R. Ball, „DC Arc Fault Model Superimposing Multiple Random Arc Noise States on Average Model,“ in *20th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Toronto, ON, Kanada, 2019.
- [86] F. M. Uriarte, A. L. Gattozzi, J. D. Herbst, H. B. Estes, T. J. Hotz, A. Kwasinski und R. E. Hebner, „A DC Arc Model for Series Faults in Low Voltage Microgrids,“ *IEEE Trans. on Smart Grid*, Bd. 3, Nr. 4, pp. 2063 - 2070, 2012.
- [87] N. L. Georgijevic, M. V. Jankovic, S. Srdic und Z. Radakovic, „The Detection of Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Arc Current Entropy,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 31, Nr. 8, pp. 5917 - 5930, 2016.
- [88] J. Johnson, B. Pahl, C. Luebke, T. Pier, T. Miller, J. Strauch, S. Kuszmaul und W. Bower, „Photovoltaic DC Arc Fault Detector testing at Sandia National Laboratories,“ in *37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle, WA, USA, 2011.
- [89] W. Miao, X. Liu, K. H. Lam und P. W. T. Pong, „DC-Arcing Detection by Noise Measurement With Magnetic Sensing by TMR Sensors,“ *IEEE Transactions on Magnetics*, Bd. 54, Nr. 11, 2018.
- [90] M. K. Alam, F. Khan, J. Johnson und J. Flicker, „A Comprehensive Review of Catastrophic Faults in PV Arrays: Types, Detection, and Mitigation Techniques,“ *IEEE Journal of Photovoltaics*, Bd. 5, Nr. 3, pp. 982 - 997, 2015.
- [91] Y. Xiong, S. Ji, L. Zhu, L. Zhong und Y. Liu, „A Novel DC Arc Fault Detection Method Based on Electromagnetic Radiation Signal,“ *IEEE Transactions on Plasma Science*, Bd. 45, Nr. 3, pp. 472 - 478, 2017.
- [92] C. J. Kim, „Electromagnetic Radiation Behavior of Low-Voltage Arcing Fault,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Bd. 24, Nr. 1, pp. 416 - 423, 2009.
- [93] W. F. Rieder, „Stationäre Lichtbögen,“ in *Plasma und Lichtbögen*, Braunschweig, DE, Friedr. Vieweg & Sohn GmbH, 1967, pp. 76 - 92.
- [94] A. Tengg und P. Hank, „Reflectometry based fault localization in automotive bus systems,“ in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz, Österreich, 2012.
- [95] M. Weerasekara, M. Vilathgamuwa und Y. Mishra, „Modelling of DC arcs for photovoltaic system faults,“ in *IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Auckland, Neuseeland, 2016.
- [96] T. E. Browne, „Practical Modeling of the Circuit Breaker ARC as a Short Line Fault Interrupter,“ *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Bd. 97, Nr. 3, pp. 838 - 847, 1978.

-
- [97] S. Golestani und H. Samet, „Generalised Cassie-Mayr electric arc furnace models,“ *IET Generation, Transmission & Distribution*, Bd. 10, Nr. 13, pp. 1 - 10, 2016.
- [98] Y. Lee, H. Nordborg, Y. Suh und P. Steimer, „Arc stability criteria in AC arc furnace and optimal converter topologies,“ in *APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, CA, USA, 2007.
- [99] P. Oramus, T. Chmielewski, T. Kuczek und M. Florkowski, „Simulations of electric arc behavior in hybrid LV switches,“ in *2016 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE)*, Koscielisko-Zakopane, Polen, 2016.
- [100] M. Buffo, J.-P. Martin, S. Saadate, J. Andrea, N. Dumoulin und E. Guillard, „Study of the Electric Arc in DC Contactors: Modeling, Simulation and Experimental Validation,“ in *IEEE Holm Conf. on Elect. Contacts*, Denver, CO, USA, 2017.
- [101] P. Zeller, „A Simple Arc Model for the Simulation of the Clearing Time of Drawn Arcs with a Commercial Electronics Simulation Tool,“ in *2009 Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, Vancouver, British Columbia, Kanada, 2009.
- [102] G.-S. Seo, K. A. Kim, K.-C. Lee, K.-J. Lee und B.-H. Cho, „A New DC Arc Fault Detection Method Using DC System Component Modeling and Analysis in Low Frequency Range,“ in *IEEE Appl. Power Electron. Conf. and Expo. (APEC)*, Charlotte, NC, USA, 2015.
- [103] A. D. Stokes und W. T. Oppenlander, „Electric arcs in open air,“ *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 24, pp. 26 - 35, 1991.
- [104] H. Wallentowitz, C. Amsel, R. Seyer, R. Fischer und R. Mäckel, „Detection and Characterization of Short circuits in 42 V Power Nets,“ in *42 V-PowerNets*, Aachen, DE, Springer, 2003, pp. 135 - 145.
- [105] H. Wallentowitz, C. Amstel und K. D. Pohl, „Cable Fire in Automotilbes: Causes, Effects and Prevention,“ in *42 V-PowerNets*, Aachen, DE, Springer, 2003, pp. 15 - 40.
- [106] M. Faifer, R. Ottoboni, M. Rossi, S. Toscani und R. Grasseti, „A method for the detection of series arc faults in DC aircraft power networks,“ in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Minneapolis, MN, USA, 2013.
- [107] J. J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*, CRC Press, 2017.

- [108] J. Chen und R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Springer US, 1999.
- [109] R. Isermann, „Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose für Kraftfahrzeuge,“ in *Fahrdynamik-Regelung*, Wiesbaden, DE, Vieweg, 2006, pp. 377 - 406.
- [110] U. Kiencke und L. Nielsen, *Automotive Control Systems*, Springer, 2006.
- [111] D. P. Zhang, *Model-Based Fault Detection of Linear Discrete-Time Systems*, Habilitationsschrift, 2011.
- [112] S. Simani, *Model-based fault diagnosis in dynamic systems using identification techniques*, Dissertation, 1999.
- [113] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin und S. N. Kavuri, „A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods,“ *Computers & Chemical Engineering*, Bd. 27, Nr. 3, pp. 293 - 311, 2003.
- [114] K. Suyama und F. Zhang, „A new type reliable control system using decision by majority,“ in *Proceedings of the 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM, USA, 1997.
- [115] S. X. Ding, *Model-based Fault Diagnosis Techniques*, Springer, 2008.
- [116] S. Lin, D. Mu, L. Liu, Y. Lei und X. Dong, „A Novel Fault Diagnosis Method for DC Filter in HVDC Systems Based on Parameter Identification,“ *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Bd. 69, Nr. 9, pp. 5969 - 5971, 2020.
- [117] J.-H. Du, R. Tu, Y. Zeng, L. Pan und R.-C. Zhang, „An experimental study on the thermal characteristics and heating effect of arc-fault from Cu core in residential electrical wiring fires,“ *PLOS ONE* <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182811>, Bd. 12, Nr. 8, 10 08 2017.
- [118] A. Schumacher und F. Boros, „optical fiber accidental arc detector for an electric power distribution switching device“. United States Patent Patent 5,940,547, 29 9 1997.
- [119] C. Kloß, „www.avt.et.tu-dresden.de - Kunststoffe in der Elektronik, Elektrotechnik und Optik,“ [Online]. Available: https://www.avt.et.tu-dresden.de/fileadmin/saet/Archiv_2011_2020/Treffen57/FHN_Kunststoffe_Elektrotechnik_110216.pdf. [Zugriff am 29 06 2020].
- [120] V. Cattin, P. Perichon, J. Dahmani, B. Schwartzmann und V. Heiries, „Detection of electric arcs in large batteries,“ in *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, Barcelona, Spanien, 2013.

- [121] D. J. Klassen und E. G. Anderson, „Fault Detection and Isolation in Automotive Wiring Harness by Time-Domain Reflectometry“. United States Patent 5,268,644, 7 12 1993.
- [122] L. A. Griffiths, R. Parakh, C. Furse und B. Baker, „The invisible fray: a critical analysis of the use of reflectometry for fray location,“ *IEEE Sensors Journal*, Bd. 6, Nr. 3, pp. 697 - 706, 2006.
- [123] M. D. Mishrikey, Detection of Arcs in Automotive Electrical Systems, Master Thesis, Massachusetts, USA, 2005.
- [124] F. Schimpf und L. E. Norum, „Recognition of electric arcing in the DC-wiring of photovoltaic systems,“ in *INTELEC 2009 - 31st International Telecommunications Energy Conference*, Incheon, Südkorea, 2009.
- [125] M. Wortberg, „Vorrichtung und Verfahren zum Erkennen von Störungen in einem Bordnetz“. Deutschland Patent DE 10 2015 209 588 B3, 06 10 2016.
- [126] M. Tigges, „Lichtbogenüberwachungssystem in einem Bordnetz“. Deutschland Patent DE 103 33 674 A1, 24 02 2005.
- [127] J. Vlach und K. Singhal, „General Formulation Methods,“ in *Computer Methods for Circuit Analysis and Design*, Van Nostrand Reinhold Company, 1983.
- [128] P. Slade, Electrical Contacts: Principles and Applications, CRC Press, 2014.
- [129] H. Ayrton, The Electric Arc, London, UK: Wiley, 1959.
- [130] C. Austermann, M. Kiffmeier und S. Frei, „State Transition Based Behavioural Model for Electric Arcs in 48 V Automotive Power Supply Networks,“ in *IEEE Int. Conf. on Elect. Syst. for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Veh. & Int. Transp. Electrific. Conf. (ESARS-ITEC)*, Nottingham, UK, 2018.
- [131] O. Mayr, Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens, Berlin, DE: VDE, 1943.
- [132] K. Sato, T. Sato, H. Sone und T. Takagi, „Relationship between Bridge Energy and Metallic Phase Arc Duration in Electric Contacts,“ *Japanese Journal of Applied Physics*, Bd. 26, Nr. 4, pp. 261 - 263, 1987.
- [133] K.-J. Tseng, Y. Wang und D. Vilathgamuwa, „An experimentally verified hybrid Cassie-Mayr electric arc model for power electronics simulations,“ *IEEE Transactions on Power Electronics*, Bd. 12, Nr. 3, pp. 429 - 436, 1997.
- [134] M. M. Walter und C. M. Franck, „Improved Method for Direct Black-Box Arc Parameter Determination and Model Validation,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, Bd. 29, Nr. 2, pp. 580 - 588, 2014.

Anhang

Anhang A: Sicherungsparameter (VDA)

Aus Bibliothek (siehe unten) entnommene Sicherungsparameter für die Parametrierung des Modells (siehe Kapitel 3.1.3), mit $T_{\text{NOM}} = 298.1 \text{ K}$:

Fuse-Type	$R_{\text{COLD}} [\Omega]$ $@T_{\text{NOM}}$	$T_c [1/\text{K}]$	$R_{\text{TH1}} [\text{K/W}]$	$C_{\text{TH1}} [\text{Ws/K}]$
MINI10	0.009001	0.002028	49.46	0.004692
MINI15	0.004543	0.003552	24.86	0.006994
MINI20	0.003121	0.003597	5.640	0.01350
MINI25	0.002370	0.003518	13.50	0.01216
MINI30	0.002712	0.001065	27.10	0.01128
ATO10	0.007675	0.007675	35.36	0.07444
ATO15	0.004782	0.003610	14.41	0.01310
ATO20	0.003286	0.003582	14.04	0.01230
ATO25	0.003182	0.002054	32.46	0.01482
ATO30	0.001939	0.003518	6.205	0.04177
MAXI20	0.003104	0.001106	51.53	1.948
MAXI30	0.002008	0.001098	0.7374	0.04115
MAXI40	0.001396	0.001111	5.696	0.2501
MAXI50	0.001092	0.001112	16.82	0.5004
MAXI60	0.0008900	0.001000	13.68	0.5152

Fuse-Type	R_{TH2} [K/W]	C_{TH2} [Ws/K]	R_{TH3} [K/W]	C_{TH3} [Ws/K]	R_{TH4} [K/W]	C_{TH4} [Ws/K]
MINI10	57.95	0.09733	31.48	0.02095	22.49	5.806
MINI15	11.24	2.527	55.23	0.03231	16.04	17.68
MINI20	18.21	0.3652	48.02	0.01159	16.09	6.677
MINI25	22.65	0.01690	20.11	0.5931	19.55	13.95
MINI30	20.14	0.3445	2.692	0.1375	17.03	10.36
ATO10	74.67	0.004158	20.34	0.9045	9.841	16.89
ATO15	42.02	0.01656	34.46	0.1484	10.74	16.78
ATO20	38.34	0.02460	22.61	0.2648	8.772	15.77
ATO25	22.68	0.2330	9.449	0.09336	9.264	13.02
ATO30	21.99	0.02221	16.64	0.3359	7.222	17.03
MAXI20	1.326	0.01468	49.08	0.1331	10.76	0.07547
MAXI30	7.381	0.1480	31.19	0.2943	50.85	3.907
MAXI40	41.45	5.108	25.83	0.4383	0.4518	0.05092
MAXI50	0.5246	0.05560	2.496	0.2953	39.57	4.424
MAXI60	2.160	0.3005	0.3706	0.07693	31.55	3.235

 -- Copyright (C) 2004-2011 VDA/FAT

--

-- This model is a component of the open source library created by the VDA/FAT
 -- working group number 30 and is covered by this license agreement. This model
 -- including any updates, modifications, revisions, copies, and documentation
 -- are copyrighted works of the VDA/FAT. Use of this model indicates your
 -- complete and unconditional acceptance of the terms and conditions set forth
 -- in this license agreement.

--

-- The VDA/FAT grants a non-exclusive license to use, reproduce, modify and
 -- distribute this model under the condition, that:

- (a) no fee or other consideration is charged for any distribution except
 -- compilations distributed in accordance with Section (d) of this license
 -- agreement;
- (b) the comment text embedded in this model is included verbatim in each
 -- copy of this model made or distributed by you, whether or not such
 -- version is modified;
- (c) any modified version must include a conspicuous notice that this model

```
-- has been modified and the date of modification; and
-- (d) any compilations sold by you that include this model must include a
-- conspicuous notice that this model is available from the VDA/FAT in
-- its original form at no charge.
--
-- THIS MODEL IS LICENSED TO YOU "AS IT IS" AND WITH NO WARRANTIES,
EXPRESSED
-- OR IMPLIED. THE VDA/FAT AND ALL COMPANIES CONTRIBUTING TO THIS
LIBRARY
-- SPECIFICALLY DISCLAIM ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY
OR FITNESS
-- FOR A PARTICULAR PURPOSE. THE VDA/FAT AND ALL COMPANIES ORGA-
NIZED WITHIN
-- MUST NOT HAVE ANY RESPONSIBILITY FOR ANY DAMAGES, FINANCIAL OR
LEGAL CLAIMS
-- WHATEVER.
-----
-- Development simulator:
-- SystemVision
--
-- Tested on:
-----
-- Version  Simulator Version  OS  Validator  Date
-----
-- 1.1
--
-- Modification History:
-----
-- Version  Author    Date        Description
-----
-- 1.1
-- 1.2    Haase      2004/11/30   revised version
-- 1.3    Warning/Haase 2005/04/17   MAXI70/MAXI80 updated
--
--
-----
-- $Version: 3.0.0 $
-- $Revision: 2627 $
-- $Date: 2010-12-20 19:11:06 +0100 (Mon, 20 Dec 2010) $
```

```
-- $Author: andre $
```

```
-----
```

```
--/**
```

```
--
```

```
-- Fuse parameters.
```

```
-- Contains parameters for LITTELFUSE fuses.
```

```
--
```

```
-- @author Joachim Haase
```

```
-- @author Dietmar Warning
```

```
--
```

```
--*/
```

```
library AUTOMOTIVE_VDA;
```

```
use AUTOMOTIVE_VDA.AUTOMOTIVE_VDA_FUNDAMENTAL_CONSTANTS.all;
```

```
package FUSE_VDA_PARAMETERS is
```

```
    type FUSE_TYPE is
```

```
        ( MINI3, MINI5, MINI7, MINI7p5, MINI10, MINI15, MINI20, MINI25, MINI30 -- Mini  
          Fuses MINIx (x Amp)
```

```
            , ATO3, ATO5, ATO7p5, ATO10, ATO15, ATO20, ATO25, ATO30 --
```

```
          ATO Fuses ATOx (x Amp)
```

```
            , MAXI20, MAXI30, MAXI40, MAXI50, MAXI60, MAXI70, MAXI80 --
```

```
          Maxi Fuses
```

```
        );
```

```
    type FUSE_DATA is array (1 to 13) of REAL;
```

```
        -- 1: resistance for TNOM RCOLD [Ohm]
```

```
        -- 2: temperature coefficient TC [1/K]
```

```
        -- 3: melting temperature TMELT [K]
```

```
        -- 4: nominal temperature TNOM [K]
```

```
        -- 5: thermal resistance RTH1 [K/W]
```

```
        -- 6: thermal capacitance CTH1 [Ws/K]
```

```
        -- 7: thermal resistance RTH2 [K/W]
```

```
        -- 8: thermal capacitance CTH2 [Ws/K]
```

```
        -- 9: thermal resistance RTH3 [K/W]
```

```
        -- 10: thermal capacitance CTH3 [Ws/K]
```

```
-- 11: thermal resistance RTH4 [K/W]
-- 12: thermal capacitance CTH4 [Ws/K]
-- 13: resistance after melting ROPEN [Ohm]

--/**
--
-- Fuse data.
-- Determines the fuse data.
--
-- @arg TYP fuse type
-- @return fuse data
--
--*/

function DETERMINE_FUSE_DATA (
    constant TYP : FUSE_TYPE
) return FUSE_DATA;

end package FUSE_VDA_PARAMETERS;

package body FUSE_VDA_PARAMETERS is

function DETERMINE_FUSE_DATA (
    constant TYP : FUSE_TYPE          -- Select fuse
) return FUSE_DATA is
    constant ROPEN : REAL := 1.0E6;
    variable RESULT : FUSE_DATA;
begin

    case TYP is

        when ATO3 =>
            RESULT (1 to 4) := (0.3111E-01, 0.3504E-02, 673.1, 298.1);
            RESULT (5 to 8) := (80.31, 0.1685E-02, 141.0, 0.5143E-02);
            RESULT (9 to 12) := (194.4, 0.2338E-01, 34.45, 4.331);
            RESULT (13) := ROPEN;

        when ATO5 =>
            RESULT (1 to 4) := (0.1812E-01, 0.3527E-02, 673.1, 298.1);
```

RESULT (5 to 8) := (25.03, 0.9686E-02, 51.45, 0.9194E-01);
RESULT (9 to 12) := (138.8, 0.2998E-02, 31.98, 1.501);
RESULT (13) := ROPEN;

when ATO7p5 =>

RESULT (1 to 4) := (0.1250E-01, 0.4003E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (27.14, 0.5542E-02, 91.45, 0.8041E-02);
RESULT (9 to 12) := (22.26, 0.2655, 7.399, 15.88);
RESULT (13) := ROPEN;

when ATO10 =>

RESULT (1 to 4) := (0.7675E-02, 0.3612E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (35.36, 0.7444E-01, 74.67, 0.4158E-02);
RESULT (9 to 12) := (20.34, 0.9045, 9.841, 16.89);
RESULT (13) := ROPEN;

when ATO15 =>

RESULT (1 to 4) := (0.4782E-02, 0.3610E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (14.41, 0.1310E-01, 42.02, 0.1656E-01);
RESULT (9 to 12) := (34.46, 0.1484, 10.74, 16.78);
RESULT (13) := ROPEN;

when ATO20 =>

RESULT (1 to 4) := (0.3286E-02, 0.3582E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (14.04, 0.1230E-01, 38.34, 0.2460E-01);
RESULT (9 to 12) := (22.61, 0.2648, 8.772, 15.77);
RESULT (13) := ROPEN;

when ATO25 =>

RESULT (1 to 4) := (0.3182E-02, 0.2054E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (32.46, 0.1482E-01, 22.68, 0.2330);
RESULT (9 to 12) := (9.449, 0.9336E-01, 9.264, 13.02);
RESULT (13) := ROPEN;

when ATO30 =>

RESULT (1 to 4) := (0.1939E-02, 0.3518E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (6.205, 0.4177E-01, 21.99, 0.2221E-01);
RESULT (9 to 12) := (16.64, 0.3359, 7.222, 17.03);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI3 =>

RESULT (1 to 4) := (0.4496E-01, 0.3568E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (49.48, 0.3700E-01, 7.789, 0.2956);
RESULT (9 to 12) := (37.86, 2.094, 165.2, 0.2784E-02);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI5 =>

RESULT (1 to 4) := (0.1827E-01, 0.3507E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (140.2, 0.3735E-02, 34.40, 0.7367E-02);
RESULT (9 to 12) := (54.42, 0.1042, 16.89, 5.594);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI7p5 =>

RESULT (1 to 4) := (0.1492E-01, 0.4913E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (42.50, 0.1234E-01, 57.29, 0.1585E-01);
RESULT (9 to 12) := (0.3348, 0.1740E-02, 6.566, 17.33);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI10 =>

RESULT (1 to 4) := (0.9001E-02, 0.2028E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (49.46, 0.4692E-02, 57.95, 0.9733E-01);
RESULT (9 to 12) := (31.48, 0.2095E-01, 22.49, 5.806);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI15 =>

RESULT (1 to 4) := (0.4543E-02, 0.3552E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (24.86, 0.6994E-02, 11.24, 2.527);
RESULT (9 to 12) := (55.23, 0.3231E-01, 16.04, 17.68);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI20 =>

RESULT (1 to 4) := (0.3121E-02, 0.3597E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (5.640, 0.1350E-01, 18.21, 0.3652);
RESULT (9 to 12) := (48.02, 0.1159E-01, 16.09, 6.677);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI25 =>

RESULT (1 to 4) := (0.2370E-02, 0.3518E-02, 673.1, 298.1);

RESULT (5 to 8) := (13.50, 0.1216E-01, 22.65, 0.1690E-01);
RESULT (9 to 12) := (20.11, 0.5931, 19.55, 13.95);
RESULT (13) := ROPEN;

when MINI30 =>

RESULT (1 to 4) := (0.2712E-02, 0.1065E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (27.10, 0.1128E-01, 20.14, 0.3445);
RESULT (9 to 12) := (2.692, 0.1375, 17.03, 10.36);
RESULT (13) := ROPEN;

when MAXI20 =>

RESULT (1 to 4) := (0.3104E-02, 0.1106E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (51.53, 1.948, 1.326, 0.1468E-01);
RESULT (9 to 12) := (49.08, 0.1331, 10.76, 0.7547E-01);
RESULT (13) := ROPEN;

when MAXI30 =>

RESULT (1 to 4) := (0.2008E-02, 0.1098E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (0.7374, 0.4115E-01, 7.381, 0.1480);
RESULT (9 to 12) := (31.19, 0.2943, 50.85, 3.907);
RESULT (13) := ROPEN;

when MAXI40 =>

RESULT (1 to 4) := (0.1396E-02, 0.1111E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (5.696, 0.2501, 41.45, 5.108);
RESULT (9 to 12) := (25.83, 0.4383, 0.4518, 0.5092E-01);
RESULT (13) := ROPEN;

when MAXI50 =>

RESULT (1 to 4) := (0.1092E-02, 0.1112E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (16.82, 0.5004, 0.5246, 0.5560E-01);
RESULT (9 to 12) := (2.496, 0.2953, 39.57, 4.424);
RESULT (13) := ROPEN;

when MAXI60 =>

RESULT (1 to 4) := (0.8900E-03, 0.1000E-02, 673.1, 298.1);
RESULT (5 to 8) := (13.68, 0.5152, 2.160, 0.3005);
RESULT (9 to 12) := (0.3706, 0.7693E-01, 31.55, 3.235);
RESULT (13) := ROPEN;


```
when MAXI70 =>
  RESULT (1 to 4) := (0.6885E-03, 0.2351E-02, 673.1, 298.1);
  RESULT (5 to 8) := (0.8310, 0.2129E-01, 17.46, 8.453);
  RESULT (9 to 12) := (4.098, 0.2039, 9.728, 0.9037);
  RESULT (13) := ROOPEN;

when MAXI80 =>
  RESULT (1 to 4) := (0.4626E-03, 0.1509E-02, 673.1, 298.1);
  RESULT (5 to 8) := (0.5079, 0.1317E-01, 23.14, 5.678);
  RESULT (9 to 12) := (12.42, 0.4960, 3.681, 0.8764E-01);
  RESULT (13) := ROOPEN;

when others => report "Data for fuse type are not available."
  severity error;
end case;
return RESULT;
end function DETERMINE_FUSE_DATA;

end package body FUSE_VDA_PARAMETERS;
```

```
-----
-- Copyright (C) 2004-2011 VDA/FAT
-----
```


In Abbildung 0.2 ist dargestellt, wie auf Basis der Lichtbogenlänge und des Lichtbogenstroms (Eingangsparameter links: *Distance* und *Current*) die Werte für die Ersatzschaltbildelemente aus Abbildung 3.50 (Ausgangsparameter *gapVoltage* und *Resistance*) berechnet werden. Hierbei wird zunächst im StateModel bestimmt, in welchem Zustand sich das Lichtbogenfehlermodell befindet (siehe Abbildung 3.49). In einem Matlab-fcn-Block werden dann die Lichtbogenspannung auf Basis der parametrisierten Lichtbogengleichung und der Widerstand bestimmt. Bei einem Zustandsübergang zu offenen Klemmen z.B. wird die Spannungsquelle auf 0 V und der Widerstand auf 1 MΩ geändert. Ein kontinuierlicher Übergang mittels Tangens hyperbolicus, wie in [86] beschrieben, stellt eine Alternative dar und kann zu der Simulationsstabilität beitragen.

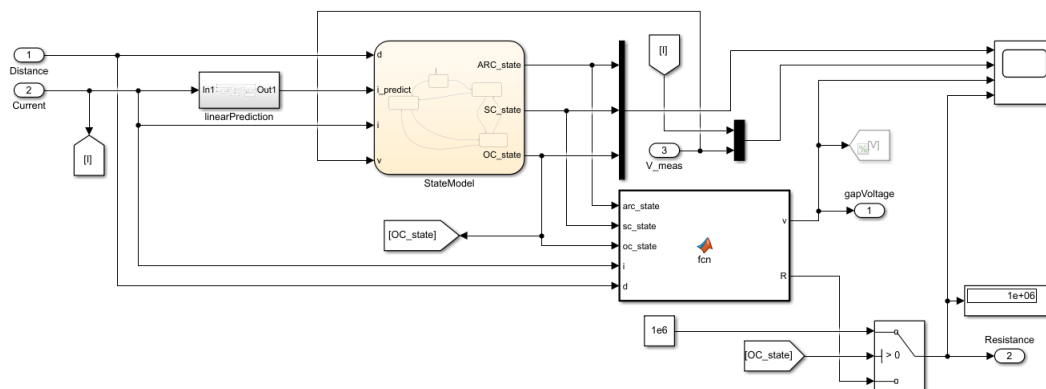


Abbildung 0.2: Matlab-Simscape-Lichtbogenfehlermodell - Ebene 2.

```
function [v, R] = fcn(arc_state, sc_state, oc_state, i, d)

if arc_state == 1
    v = 13.4 + 7.4 * log(2 * d + 1) + 10 * d / i; % Kupfer
    % v = 17.5 + 9 * log(0.6 * d + 1) + 1.9 * d / i; % Aluminium
    R = 0;
elseif sc_state == 1
    v = 0;
    R = 0;
elseif oc_state == 1
    v = 0;
    R = 1e6;
else
    v_init = 0;
    R_init = 1e6; % paralleler Lichtbogen
    % R_init = 1e6; % serieller Lichtbogen

    v = v_init;
    R = R_init;
end
```

Abbildung 0.3: Bestimmung des Widerstands- und Spannungsquellenwerts des Lichtbogenmodells.

Die Bestimmung des Widerstands- und Spannungsquellenwerts im fcn-Block ist in Abbildung 0.3 dargestellt. Die Variation der Strom-Spannungs-Charakteristik, z.B. der

Wechsel zur Ayrton-Gleichung oder die Materialvariation, ist an dieser Stelle einfach realisierbar. Die Initialwerte können je nach Lichtbogentyp ausgewählt werden.

Die Stromprädiktion basiert auf einem linearen Ansatz, wie in Abbildung 0.4 dargestellt ist. Mit der dargestellten Implementierung konnten stabile Simulationsergebnisse erzeugt werden. Hierbei kann der Parameter *addtime* (in Abbildung 0.4: *addtime_parallel*) an die individuelle Eingangsbeschaltung angepasst werden, sodass das Modell beispielsweise nicht im Einschwingvorgang serieller Lichtbögen zu früh den Zustand wechselt, aber auch nicht zu spät im Löschmoment. Besonders das Zusammenspiel zwischen diesem Parameter und der Schrittweite *fixed_step_size* kann Auswirkungen auf die Simulationsstabilität haben.

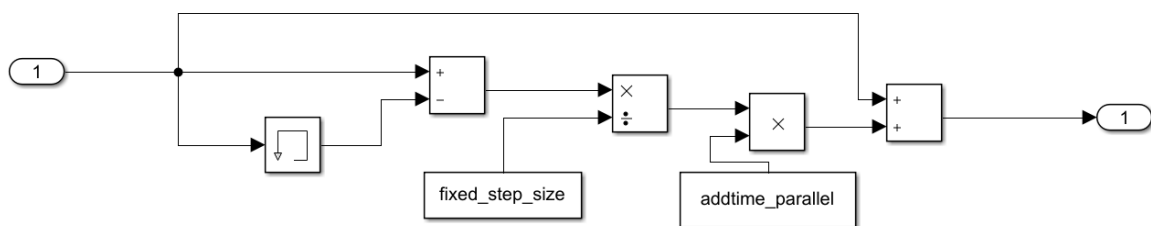


Abbildung 0.4: Lineare Stromprädiktion.

Das implementierte Zustandsdiagramm, wie in Kapitel 3.2.6 dargestellt, wurde wie in Abbildung 0.5 dargestellt implementiert. Der Vergleichswert des prädizierten Stroms kann hierbei eine zentrale Rolle bei der Simulationsstabilität spielen. Das Zusammenspiel zwischen *addtime* und dem Vergleichswert ist hierbei besonders wichtig. In den vorgestellten Simulationen wurde *i_predict* mit 0 A verglichen, jedoch können auch größere Werte je nach Eingangsbeschaltung sinnvoll sein.

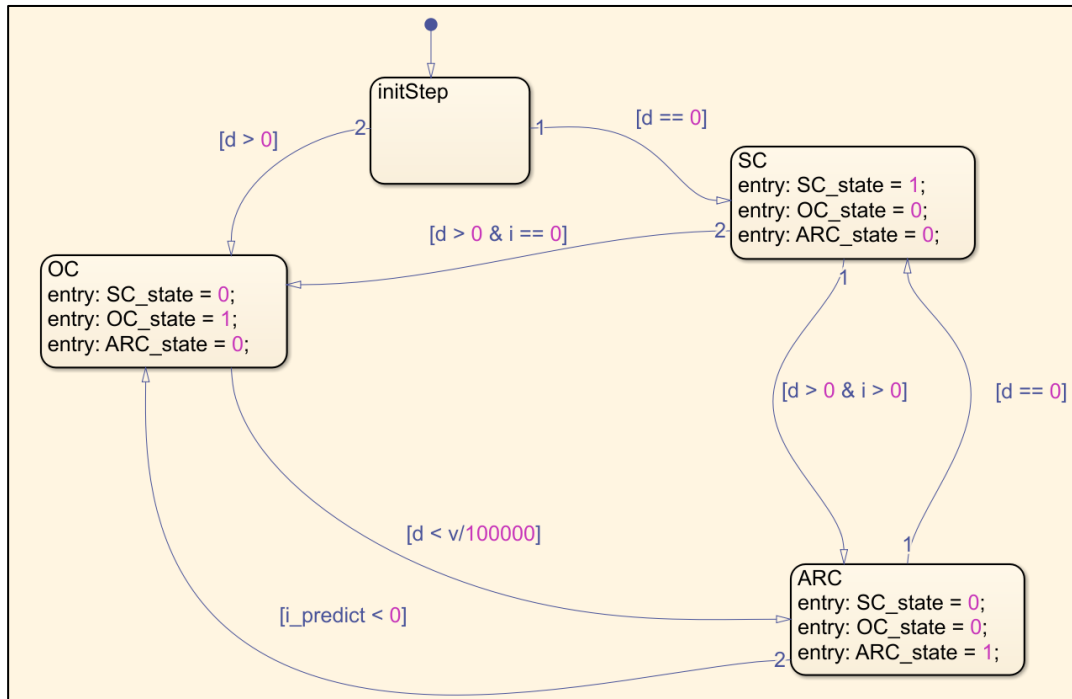


Abbildung 0.5: Mit Matlab Stateflow implementiertes Zustandsübergangdiagramm des Lichtbogenfehlermodells.

Anhang C: Herleitung der analytischen Beschreibung des Einschwingvorgangs des seriellen Lichtbogenstroms

Die Darstellungen beziehen sich auf Abbildung 4.14. Die Modellparameter zu Gleichung (4.3) können folgendermaßen dargestellt werden:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{R_L \cdot R_{ESR} \cdot C_L + L_w}{(R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w} \\
 a_0 &= \frac{R_L}{(R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w} \\
 b_1 &= \frac{1}{L_w} \\
 b_0 &= \frac{1}{(R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w}
 \end{aligned} \tag{0.1}$$

Der hier dargestellte allgemeine Ansatz kann für eine Lösung der Differentialgleichung genutzt werden:

$$i_{LB}(t) = \alpha + \beta \cdot e^{t \cdot \lambda_1} + \gamma \cdot e^{t \cdot \lambda_2} \tag{0.2}$$

Die benötigten Nullstellen des charakteristischen Polynoms können mit den folgenden Ausdrücken dargestellt werden:

$$\lambda_1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$

$$\lambda_2 = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a}$$
(0.3)

mit

$$a = (R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w$$

$$b = (R_L \cdot R_{ESR} \cdot C_L + L_w)$$

$$c = R_L$$
(0.4)

ergeben sich die Lösungen zu

$$\lambda_1 = \frac{-(R_L \cdot R_{ESR} \cdot C_L + L_w) + \sqrt{(R_L \cdot R_{ESR} \cdot C_L + L_w)^2 - 4 \cdot (R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w \cdot R_L}}{2 \cdot (R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w}$$

$$\lambda_2 = \frac{-(R_L \cdot R_{ESR} \cdot C_L + L_w) - \sqrt{(R_L \cdot R_{ESR} \cdot C_L + L_w)^2 - 4 \cdot (R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w \cdot R_L}}{2 \cdot (R_L + R_{ESR}) \cdot C_L \cdot L_w}$$
(0.5)

Die benötigten Anfangsbedingungen können wie folgt definiert werden:

$$i_{LB}(0) = \frac{U_{OCV}}{R_L}$$

$$\frac{d}{dt} i_{LB}(0) = -\frac{A_{ALVE}}{L_w}$$
(0.6)

Der Initialstrom wird nur durch den Abschlusswiderstand und die Quellenspannung bestimmt. Die Stromsteigung im Zündmoment wird durch die Zündspannung und die Induktivität vorgegeben.

Nach der vollständigen Berechnung aller Parameter kann der Ansatz (0.2) mit den Parametern in Gleichung (0.5) und in Gleichung (0.7) als Lösung verwendet werden.

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{U_{OCV} - A_{ALVE}}{R_L} \\
 \beta &= -\frac{A \cdot (c + \lambda_2 \cdot L_w)}{R_L \cdot L_w \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)} \\
 \gamma &= \frac{A_{ALVE} \cdot (c + \lambda_1 \cdot L_w)}{R_L \cdot L_w \cdot (\lambda_1 - \lambda_2)}
 \end{aligned}
 \tag{0.7}$$

Um die wichtigen Bauteilkombinationen aus Induktivität, Abschlusskapazität und Abschlusswiderstand, bei denen ein Stromnulldurchgang zur Selbstlöschung führt, zu finden, wird ein Nullstellen- bzw. Extremwertproblem definiert. Mit der nachfolgend dargestellten Berechnungsvorschrift kann der Zeitpunkt t_m des minimalen Stroms gefunden werden:

$$\frac{d}{dt} i_{LB}(t_m) = \lambda_1 \cdot \beta \cdot e^{\lambda_1 \cdot t_m} + \lambda_2 \cdot \gamma \cdot e^{\lambda_2 \cdot t_m} = 0
 \tag{0.8}$$

Die Lösung hierzu lautet:

$$t_m = \frac{\ln\left(-\frac{\lambda_1 \cdot \beta}{\lambda_2 \cdot \gamma}\right)}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{\ln\left(-\frac{\lambda_2 \cdot \gamma}{\lambda_1 \cdot \beta}\right)}{\lambda_1 - \lambda_2}
 \tag{0.9}$$

Die Auswertung der Gleichung (0.2) zum Zeitpunkt t_m gibt Auskunft über die Vorhersage der Selbstlöschung. Bei einem negativen Stromwert ist eine Selbstlöschung zu erwarten, bei einem positiven Stromwert ist zu erwarten, dass sich die Lichtbogensignale in einen quasi-stationären Zustand einschwingen können.

Anhang D: Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis

Während meiner Zeit als wissenschaftlicher Angestellter sind im Rahmen dieser Arbeit folgende Veröffentlichungen und Vorträge, sowie Bachelor- und Masterarbeiten entstanden.

Veröffentlichungen und Vorträge

- [E1] Dr. N. Potthoff, T. Feismann, Dr. R. Denkelmann, M. Kiffmeier, M. Rübartsch und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Optimization of Power and Signal Distribution Systems for Advanced Safety Features*, AmE – Automotive Meets Electronics, Dortmund, 2020.
- [E2] M. Kiffmeier, C. Austermann und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Arc Fault Analysis and Detection Methods*, IQPC – Automotive 48 V Power Supply Systems, Berlin, 2019.
- [E3] M. Kiffmeier, C. Austermann und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Arc Fault Analysis and Detection Methods*, Next Generation 48 V in Automotive, Berlin, 2019.
- [E4] C. Austermann, M. Kiffmeier und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *State Transition Based Behavioural Model for Electric Arcs in 48 V Automotive Power Supply Networks*, IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, 2018.
- [E5] M. Kiffmeier, C. Austermann und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Model-based analysis and evaluation of 48 V automotive power supply systems regarding to electric arc faults*, IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, England, 2018.
- [E6] S. Önal, M. Kiffmeier und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter*, EEHE – Electric & Electronic in Hybrid and Electric Vehicles and Electrical Energy Management, Würzburg, 2018.
- [E7] Prof. Dr.-Ing. S. Frei, M. Kiffmeier und M. Önal: *Support of Emergency Functions through Combination of Smart Fusing and Model-Based Diagnosis*, Internationaler Fachkongress Bordnetze im Automobil, Ludwigsburg, 2018.

-
- [E8] M. Kiffmeier und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Safety of 48 V power supply systems*, IQPC – Automotive 48 V Power Supply Systems, Berlin, 2018.
- [E9] M. Kiffmeier, S. Önal, C. Austermann und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Modelling of Arc Faults in 48 V Automotive Power Supply Systems*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Belfort, Frankreich, 2017.
- [E10] M. Kiffmeier und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodelldaten*, EEHE – Electric & Electronic in Hybrid and Electric Vehicles and Electrical Energy Management, Bamberg, 2017.
- [E11] M. Felder, M. Kiffmeier, M. Renner, Prof. Dr.-Ing. S. Frei und Prof. Dr.-Ing. J. Götze: *Fusion of measurements by existing nodes in an on-board power supply system for condition monitoring with focus on the battery*, AmE – Automotive meets Electronics, Dortmund, 2017.
- [E12] M. Kiffmeier, C. Austermann und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Impact of 48 V Power Network Characteristics on Arc Formation*, IQPC – Automotive 48 V Power Supply Systems, Berlin, 2017.
- [E13] M. Kiffmeier und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden*, EEHE – Electric & Electronic in Hybrid and Electric Vehicles and Electrical Energy Management, Wiesloch, 2016.
- [E14] M. Kiffmeier und Prof. Dr.-Ing. S. Frei: *Modellbasierte Fehlererkennung im Kfz-Bordnetz*, AmE – Automotive meets Electronics, Dortmund, 2016.

Studentische Arbeiten

- [B1] M. Grabarczyk: *Entwicklung, Analyse und Validierung von regel- und modellbasierten Fehlerdiagnosemethoden für hochzuverlässige Energiebordnetze an einem modularen 48 V Bordnetzprüfstand*, Masterarbeit, 2019
- [B2] T. Rudack: *Entwicklung, Analyse und Validierung von Berechnungsverfahren für Übergangswiderstände von gealterten Steckverbindern in Kfz-Energiebordnetzen*, Masterarbeit, 2019

- [B3] L. Sarkander: *Entwicklung und Implementierung von Komponentenfehlermodellen zur systematischen Bewertung der Systemreaktion*, Bachelorarbeit, 2019
- [B4] F. Busch: *Entwicklung und exemplarische Anwendung einer simulationsbasierten Testumgebung für Fehlerdiagnoseverfahren in Kfz-Bordnetzen*, Masterarbeit, 2018
- [B5] D. Ly: *Analyse der Robustheit von Parameterschätzmethoden zur Fehlerdetektion in Kfz-Bordnetzen*, Masterarbeit, 2018
- [B6] D. Habelmann: *Entwicklung und Analyse eines 48 Volt Kfz-Bordnetzprüfstands für reproduzierbare Untersuchungen der Auswirkungen von Fehlern in der Energieversorgung*, Masterarbeit, 2018
- [B7] P. Heronime: *Analyse von Umwelteinflüssen auf Lichtbogenfehler in 48 V Kfz-Bordnetzen*, Bachelorarbeit, 2018
- [B8] M. Jozwiak: *Analyse von Zündbedingungen für Lichtbögen in 48 V Kfz-Bordnetzen in Abhängigkeit von der Eingangsbeschaltung der Bordnetzkomponenten*, Bachelorarbeit, 2017
- [B9] F. Busch: *Analyse verschiedener 48 V Kfz-Bordnetzstrukturen hinsichtlich des Gefährdungspotentials durch parallele Lichtbögen*, Bachelorarbeit, 2017
- [B10] C. Austermann: *Entwicklung von dynamischen Lichtbogenmodellen für die simulationsbasierte Detektion und Lokalisierung von Fehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen*, Masterarbeit, 2017
- [B11] M. Ludwigs: *Untersuchung charakteristischer Eigenschaften von Lichtbogenfehlern an Steckverbindern in 48 V Kfz-Bordnetzen*, Bachelorarbeit, 2016
- [B12] L. Höttecke: *Untersuchung von seriellen Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen*, Bachelorarbeit, 2016

Patente

- [P1] Verfahren zum Erkennen eines Lichtbogens in einem Energieversorgungsnetz (10 2019 126 527.4)
- [P2] Fehlerdiagnose in einem elektrischen Netzwerk (10 2017 110 620.0)

Eidesstaatliche Versicherung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Modellbasierte Analyse und Diagnose von Lichtbogenfehlern in 48 V Kfz-Bordnetzen“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht.

Die Arbeit hat in gegenwärtiger oder in einer anderen Fassung weder der TU Dortmund noch einer anderen Hochschule im Zusammenhang mit einer staatlichen oder akademischen Prüfung vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift