

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodellldaten

Michael Kiffmeier, Stephan Frei

Abstract

Safety demands for automotive power supply systems are permanently increasing. This is caused by highly safety-critical functions, that are implemented in cars, e.g. for enabling autonomous driving. Additionally, the risk of faults within those power nets is increasing due to a new voltage level: 48 V. Here, arcs can occur, in addition to already known faults, like short circuits, open connectors, sneaking short circuits, aging contacts, and many more. Basically, model-based algorithms can be used for diagnosis and monitoring purpose. These algorithms merge the already existing voltage and current measurements from the ECUs and evaluate them based on known component models. For adding fault diagnosis ability to model-based algorithms, fault models are needed, as well. A very important model is the arc model. In this paper, an arc model for operation point simulation is presented and parameterised through experiment. Additionally, the dependence of the ability of an arc to reach a steady state from the power net components itself is presented and analysed. Arcs can be suppressed from the dynamic properties of the power net components.

Kurzfassung

Sicherheitsanforderungen an Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen steigen stetig an. Dies ist unter anderem eine Folge von stark sicherheitskritischen Funktionalitäten, die z.B. im Rahmen von autonomem Fahren Einzug in die Fahrzeuge halten. Zusätzlich erhöht sich das Risiko eines Fehlers durch die Anhebung der Bordnetzspannung auf 48 V. In diesem Bereich können Lichtbögen entstehen, welche erheblichen Schaden anrichten können. Grundsätzlich können modellbasierte Diagnose- und Monitoringalgorithmen genutzt werden, um Aussagen über den Zustand des Bordnetzes zu treffen. Diese Algorithmen bedienen sich der vorhandenen Strom- und Spannungsmessungen der Steuergeräte, sowie des Systemwissens über das Bordnetz. Zusätzlich zu Komponentenmodellen sind Fehlermodelle notwendig. Ein besonders wichtiges Modell ist das Lichtbogenmodell. Ein Lichtbogenmodell für Arbeitspunktsimulationen wird hier vorgestellt. Zusätzlich wird gezeigt, dass dynamische Bordnetzeigenschaften eine Lichtbogenzündung unterdrücken können.

1 Einleitung

Heutige Kfz-Bordnetze müssen für das assistierte oder autonome Fahren weiterentwickelt werden. Die stetig ansteigende Anzahl an implementierten sicherheitskritischen Funktionen hat zur Folge, dass Zuverlässigkeits- und Sicherheitsanforderungen an das Bordnetz ebenfalls angepasst werden müssen. Speziell die Energieversorgung muss ständig sichergestellt und absolut ausfallsicher sein. Weiterhin wird durch z.B. benötigte Rechenleistung, aber auch durch fortschreitende Elektrifizierung anderer Funktionen eine Anhebung der Bordnetzleistung notwendig. Die Erweiterung des Bordnetzes um neue Komponenten und die Anhebung des Gesamtleistungsbedarfs führen dazu, dass das bereits heute zu den schwersten Komponenten zählende Energiebordnetz weiter ergänzt werden muss und weiterhin an Komplexität zunimmt. Dieser Zuwachs an Komplexität ist mit einer erhöhten Fehlerwahrscheinlichkeit verbunden.

Dadurch dass das konventionelle 12 V Kfz-Bordnetz immer häufiger an seine Grenzen stößt, wurde die 48 V Spannungsebene eingeführt. Diese Spannungsanhebung garantiert auf der einen Seite weiterhin eine sichere Schutzkleinspannung und gewährleistet auf der anderen Seite einen Leistungstransport mit beherrschbaren Stromstärken. Die Anhebung der Spannung führt allerdings ebenfalls dazu, dass zu den bisher bekannten Fehlern, wie z.B. Kurzschlüssen, Fehlerströmen, Leitungsbrüchen oder Kontaktalterung noch Lichtbögen als mögliche Folge der beispielhaft genannten Fehler auftreten können. Lichtbögen sind grundsätzlich in der Lage, nicht nur die Funktionalität des Energiebordnetzes einzuschränken oder Komponenten zum Ausfall zu bringen, sondern können außerdem durch sehr hohe Temperaturen erhebliche Schäden anrichten. Diese Schäden können im Extremfall sogar zu Fahrzeugbränden führen.

Neben den Sicherheitsanforderungen an das Energiebordnetz steigen diese ebenfalls für alle weiteren Einzelkomponenten. Viele Steuergeräte begegnen diesen Anforderungen damit, das eigene elektrische Verhalten zu überwachen, also zu Eigendiagnosezwecken Spannungs- und Stromwerte zu messen und zu bewerten. Weiterhin besteht auch heute häufig die Möglichkeit, bestimmte Zustände oder Fehlerzustände der Steuergeräte z.B. zu einer Auswerteeinheit über die Bussysteme weiterzuleiten. Vor diesem Hintergrund kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass über das gesamte Bordnetz verteilt bereits eine große Anzahl elektrischer Sensoren, die häufig Spannungs- und Stromwerte überwachen, vorhanden sind. Zusätzlich bestehen umfangreiche Bus-Anbindungen der messenden Steuergeräte, sodass diese Messwerte in einer zentralen Stelle fusioniert werden können. Unter Verwendung geeigneter Diagnosemethoden können auf Basis dieser Messwerte Aussagen über den Zustand des Bordnetzes getroffen und ggf. Maßnahmen eingeleitet werden.

2 Modellbasiertes Bordnetzmonitoring

Speziell im Bereich der Bordnetzdiagnose oder des Bordnetzmonitorings spielen modellbasierte Algorithmen eine wichtige Rolle. Aufgrund des stark durch Simulation geprägten Entwicklungsprozess von Bordnetzen besteht zu fast allen Komponenten umfangreiches Wissen, welches ebenfalls in Form von Komponentenmodellen vorliegen kann. Modellbasierte Algorithmen können diese Modelle mit Messdaten kombinieren, um Aussagen über den Zustand des Bordnetzes zu liefern. Hierbei wird das Klemmenverhalten, passend zu verschiedenen Modellparametern, durch Simulationen bestimmt. Sobald sich eine Komponente innerhalb des Gesamtsystems ändert, ändert

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodellldaten

sich auch das Klemmenverhalten. Bei der Zuordnung des simulierten Klemmenverhaltens zu aktuellen Messwerten kann auf den tatsächlichen Zustand des Bordnetzes geschlossen werden. Bewertungen der Abweichungen können auf der Bildung einer Fehlernorm basieren.

3 Modellierung der Bordnetzkomponenten

Für ein modellbasiertes Monitoring sind ausreichend genaue Komponentenmodelle nötig. Hierzu gehören die Verbraucher und das Leitungsnetzes, inklusive Stecker, Sicherungen, Kontakte usw. Neben einem Gesamtsystemmodell für eine Bordnetzdiagnose sind Fehlermodelle nötig. Diese Fehlermodelle können an den möglichen Fehlerstellen eingebracht und so das System auf Änderungen bei Fehlern untersucht werden.

3.1 Lichtbogenmodelle zur Implementierung der modellbasierten Diagnose

Aufgrund der Spannungsanhebung von 12 V auf 48 V spielen Lichtbogenfehler in einer Fehlerdiagnose eine zentrale Rolle. Während die Modellierung für viele bereits bekannte Fehlerzustände direkt erfolgen kann, müssen entsprechende Lichtbogenmodelle zunächst auf ihre Gültigkeit in einer Kfz-Umgebung geprüft werden.

Für DC-Verteilnetze wurden bereits verschiedene Lichtbogenmodelle entwickelt, z.B. [1], [2], [3]. Eines der bekanntesten Lichtbogenmodelle zur Bestimmung verschiedener Arbeitspunkte wurde von Ayrton vorgeschlagen [4]. Hier wird der charakteristische Spannungsabfall über einem Lichtbogen genutzt, um das entsprechende Verhalten abzubilden. Der Spannungsabfall besteht aus einem konstanten Teil v_{ac} , der sich im Zündmoment einstellt und weitestgehend materialabhängig ist, und weiterhin aus einem längenabhängigen Teil, der mit einem entsprechenden Gradienten E in den Gesamtspannungsabfall einfließt. Zusätzlich wird ein nichtlinearer Term, der zusätzlich eine Stromabhängigkeit aufweist, mit $f(i_{LB}, d)$ einbezogen. Eine Vielzahl an Variationen, basierend auf einer ähnlichen Grundformel wurden z.B. von Steinmetz [5] oder Nottingham [6] vorgeschlagen. Die grundsätzliche Form der Modellvorstellung für den Lichtbogenspannungsabfall setzt sich wie folgt zusammen:

$$v_{LB} = v_{ac} + E \cdot d + f(i_{LB}, d) \quad (1)$$

Die Darstellung in Form eines Ersatzschaltbildes kann durch Verwendung von gesteuerten Quellen erfolgen.

Die Modellparameter können mithilfe von Messreihen individuell ermittelt werden. Um den Anforderungen innerhalb von Kfz-Bordnetzen gerecht zu werden, wurde ein Lichtbogenprüfstand entwickelt, der definierte Lichtbögen in einem entsprechenden Stromkreis erzeugen kann. Eine Darstellung dieses Prüfstands mit einer Prinzipdarstellung der Testumgebung zeigt Bild 1. Der Prüfstand besteht aus einem Schrittmotor, der von einer Mikrocontrollersteuerung gesteuert wird. Der erste Moment einer Lichtbogenzündung wird durch den charakteristischen Spannungsabfall erkannt. Ab diesem Punkt können flexibel präzise Abstände angefahren werden. Bei den verwendeten Steckerpaaren handelt es sich um übliche verzinnte Messingstecker. Die Verfahrensgeschwindigkeit betrug konstant $1,9 \frac{mm}{s}$.

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodelldaten

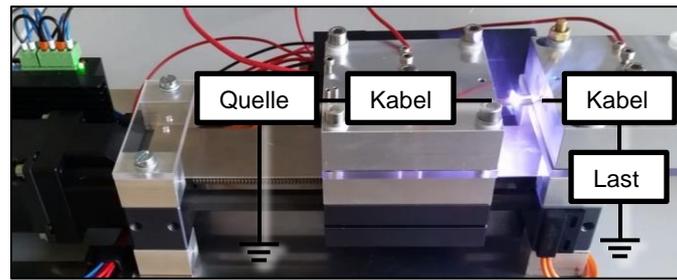


Bild 1 – Lichtbogenprüfstand mit einer Prinzipdarstellung der Beschaltung

Innerhalb dieser definierten Testumgebung wurden Lichtbögen gezündet und die charakteristischen Eigenschaften, Spannungsabfall und Lichtbogenstrom, gemessen. Die Darstellung ausgewählter Ergebnisse ist in Bild 2 zu finden.

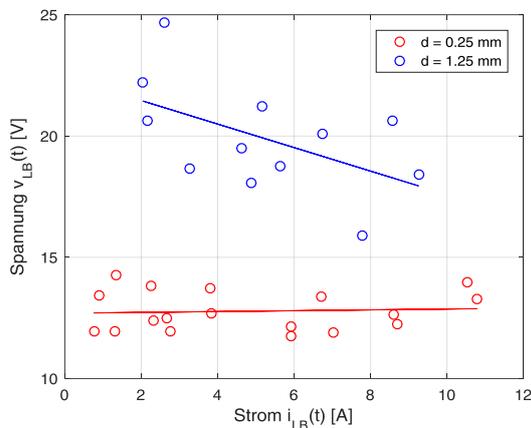


Bild 2 - U-I-Diagramme für Lichtbögen bei zwei unterschiedlichen Lichtbogenlängen mit approximierten Geraden

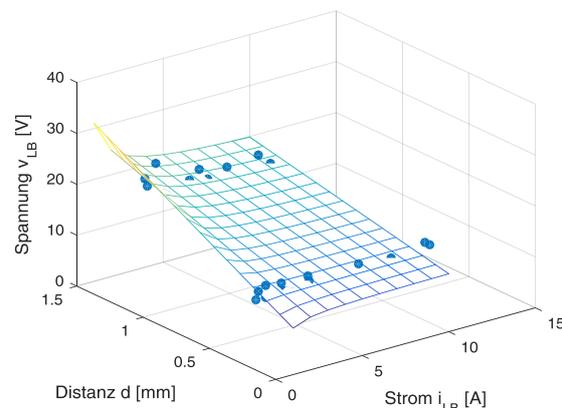


Bild 3 – Modelldarstellung basierend auf der Ayrton-Gleichung mit der Parametrierung zugrunde liegenden Messdaten

Die dargestellten Messpunkte weisen das für Lichtbögen typische Verhalten auf. Die längenabhängigen U-I-Diagramme können zur Modellbildung herangezogen werden, wie in Bild 3 dargestellt. Um ebenfalls eine Extrapolation zu ermöglichen, wird der nichtlineare Anteil des vorgeschlagenen Modell $f(i_{LB}, d)$ beibehalten.

Die abschließend parametrisierte Gleichung sieht dann folgendermaßen aus:

$$v_{LB} = 11.6 V + 4.7 \frac{V}{mm} \cdot d + \frac{9.9 \frac{VA}{mm} \cdot d - 2.5 VA}{i_{LB}} \quad (2)$$

Auf dieser Grundlage lassen sich Validierungsuntersuchungen durchführen. Als repräsentatives Szenario wurde ein Wackelkontakt inklusive Lichtbogenbildung ausgewählt. Der Aufbau wird von einer 48 V Quelle gespeist. Die Stecker werden separiert bis zum Auftreten eines Lichtbogens, dann kontinuierlich mit der oben genannten Geschwindigkeit auf einen maximalen Abstand von 1 mm gebracht und danach wieder zusammengeführt. Die Zusammenführung endet bei Lichtbogenlöschung durch Wiederkontaktierung. Das Entfernungsprofil kann in Bild 4 (rechts) gesehen werden. Spannungs-, Strom-, Leistungs-, Energie- und Widerstandsprofile, sowie deren Simulationen sind in Bild 4 und Bild 5 dargestellt. Da es sich um langsame Vorgänge handelt, können die dynamischen Eigenschaften der Komponenten vernachlässigt werden. Im fehlerfreien

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodellldaten

Fall begrenzt ein Verbraucherwiderstand den Strom. Diese Verhältnisse können vor und nach dem Lichtbogenergebnis in Bild 4 erkannt werden.

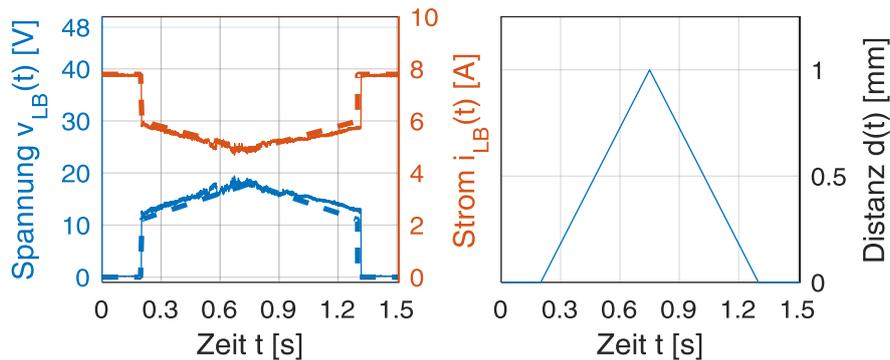


Bild 4 - links: Vergleich von Messung und Simulation – Lichtbogenspannung und Lichtbogenstrom; rechts: Bewegungsprofil der Stecker – Steckerabstand aufgetragen über der Zeit;

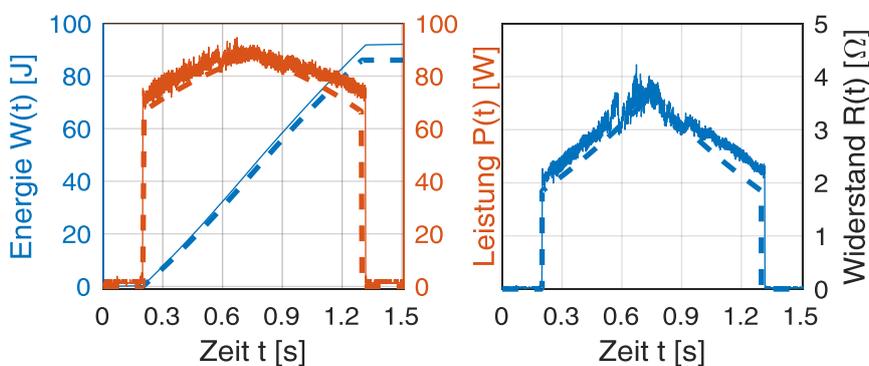


Bild 5 - links: Vergleich von Messung und Simulation – Lichtbogenleistung und Lichtbogenenergie; rechts: Vergleich von Messung und Simulation – Lichtbogensatzwiderstand

Die Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Simulation. Mithilfe des dargestellten Lichtbogenmodells können nun modellbasierte Diagnosealgorithmen ebenfalls Lichtbögen berücksichtigen und die entsprechenden Modelle in ein Gesamtsystemmodell mit einfügen. Auf diese Weise können Änderungen im Klemmenverhalten aufgrund von Lichtbogenergebnissen in verschiedenen Bordnetzabschnitten simuliert und erkannt werden.

3.2 Einfluss der dynamischen Eigenschaften der Bordnetzkomponenten auf das Auftreten von Lichtbögen

Die oben beschriebenen Rahmenbedingungen und Modelle können für Simulationen im Arbeitspunktbereich herangezogen werden, sobald ein Lichtbogen einen stationären Zustand erreicht hat. Tatsächlich liegen für dynamische Vorgänge in Kfz-Bordnetzen jedoch komplexe Zusammenhänge vor, die ebenfalls ausschlaggebende Auswirkungen auf den Zündmoment von Lichtbögen aufweisen. Der berücksichtigte Versuchsaufbau wurde so ausgewählt, dass sowohl Leitungsinduktivitäten als auch kapazitive Anteile von Steuergeräten berücksichtigt werden. Kapazitäten in Steuergeräten sind für die Spannungsstabilisierung und EMV notwendig. Das gesamte Systemmodell ist in Bild 6 dargestellt. Unter der Annahme, dass die Lichtbogenlänge im Zündmoment

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodellldaten

$d = 0 \text{ mm}$ beträgt, kann der Lichtbogen als Konstantspannungsquelle angenommen werden, die im Zündmoment die Zündspannung annimmt. Diese vereinfachte Modellvorstellung resultiert auf Basis der Beobachtungen und Untersuchungen für Arbeitspunkte des Lichtbogens.

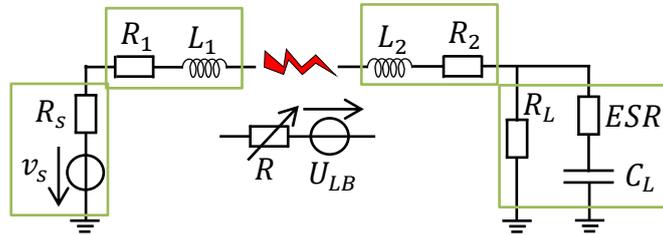


Bild 6 - Bordnetzmodell unter Berücksichtigung der dynamischen Eigenschaften der Bordnetzkomponenten; Darstellung des Lichtbogenmodells in Zusammenhang mit einer möglichen Lichtbogenlöschung (hochohmiger Ersatzwiderstand R)

Die steile Spannungsflanke des zündenden Lichtbogens verursacht im vorliegenden Schwingkreis eine RLC-Schwingung, bedingt durch die Leitungsinduktivitäten und die Lastkapazität. Diese Schwingung macht es erforderlich, die Brennbedingungen des Lichtbogens mit in eine Simulation einfließen zu lassen. Sobald der Lichtbogen einen minimalen Strom I_{min} erreicht hat, sind die Brennbedingungen nicht mehr erfüllt, der Lichtbogen erlischt und geht in eine hochohmige Leitungsunterbrechung über.

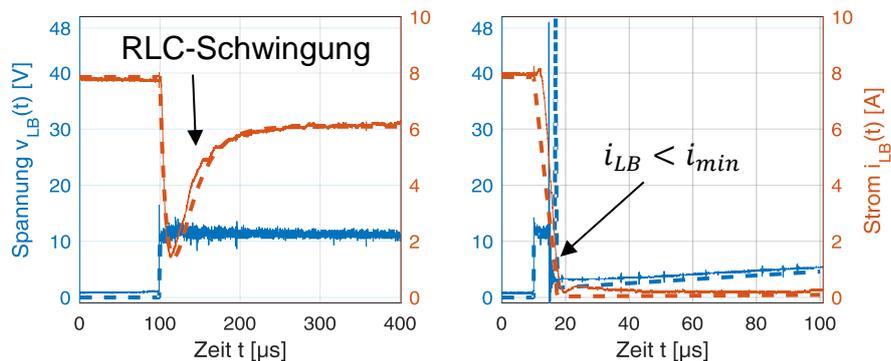


Bild 7 - Transiente Betrachtung eines Lichtbogenzündmoments; links: ständige Erfüllung der Brennbedingung I_{min} ; $C_L = 20 \mu\text{F}$, $R_L = 6.1 \Omega$; rechts: Unterschreitung des minimalen Lichtbogenstroms I_{min} mit anschließendem Lichtbogenabriss; $C_L = 200 \mu\text{F}$, $R_L = 6.1 \Omega$; für weitere Komponentenbedatung, siehe Bild 8

In Bild 7 ist ein Vergleich zwischen der Modellvorstellung und der Messung des Zündmoments dargestellt. Eine Lichtbogenlöschung wurde in der Simulation durch einen hochohmigen Widerstand dargestellt. Auf dem linken Bild erkennt man, dass der Strom aufgrund der Lichtbogenzündung zwar absinkt, jedoch zu keinem Zeitpunkt unterhalb der Grenze I_{min} verläuft. Auf dem rechten Bild erkennt man, dass aufgrund einer abweichenden Kapazität die Schwingung verstärkt und I_{min} somit unterschritten werden. Die Spannungsspitze im Abrissmoment wird ebenfalls durch die Leitungsinduktivitäten mit einem hochohmigen R erzeugt. Nach dem Abriss erkennt man einen langsamen Spannungsaufbau an der Trennstelle, bedingt durch die Entladezeitkonstante der Lastkapazität.

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodellldaten

Auf der Basis dieser Überlegungen können quantitative Kombinationen angegeben werden, für die stabile Lichtbögen entstehen können oder unterdrückt werden. Die Ergebnisse einer exemplarischen Untersuchung sind in Abbildung Bild 8 dargestellt. Die beschriebenen Bauteilgrößen beziehen sich auf das Ersatzschaltbild aus Bild 6.

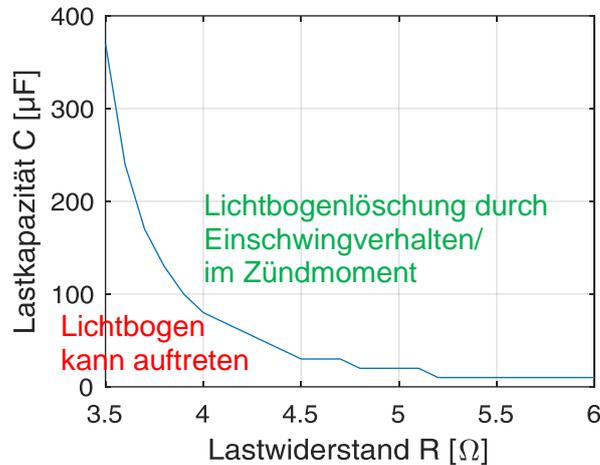


Bild 8 - Quantitative Lichtbogensvorhersage für die Konfiguration $v_B = 48 V, R_B = R_1 = R_2 = 5 m\Omega, L_1 = L_2 = 5 \mu H, ESR = 1 \Omega, v_{min} = 10.8 V, i_{min} = 1 A$;

6 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag arbeitet die Bedeutung genauer Komponentenmodelle des Bordnetzes für die modellbasierte Fehlererkennung heraus. Damit modellbasierte Algorithmen Fehlerzustände erkennen können, sind zusätzlich zu den Komponentenmodellen genaue Fehlermodelle erforderlich. In diesem Zusammenhang wird in diesem Beitrag ein Lichtbogenmodell dargestellt und parametrisiert, sodass modellbasierte Fehlerdetektionen um Lichtbögen erweitert werden können. Zusätzlich wird dargestellt, dass eine Lichtbogenzündung und das Brennverhalten stark von der Beschaltung der Trennstelle abhängen. Quantitative Aussagen und Vorhersagen zu speziellen Konfigurationen, bezogen auf das Potential kritischer Lichtbögen, wurden gemacht. Auf dieser Basis können gezielt unkritische Konfigurationen im Bordnetz geschaffen werden.

Es wurde ferner dargestellt, dass auch vereinfachte Modellvorstellungen für Lichtbögen, basierend auf Arbeitspunktmodellen in Kombination mit Fallunterscheidungen für transiente Vorgänge verwendet werden und die Wirklichkeit ausreichend gut abbilden können.

Abschließend ist zu erwähnen, dass Lichtbögen stark von statistischem Verhalten geprägt sind. Die Reproduzierbarkeit von Messungen ist gering. Die hier gezeigten Messungen zeigen jedoch klare Tendenzen auf.

Oft unberücksichtigt war bisher das Phänomen der Wiederspaltung. Trotz einer RLC-Kombination im scheinbar unkritischen Bereich (siehe Bild 8), konnte der Lichtbogen nach einer Löschung wieder zünden. Diese Wiederspaltungen können erst auftreten, sobald eine ausreichend hohe Spannung U_{min} von der Lastkapazität bereitgestellt wurde.

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodelldaten

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts DriveBattery 2015 (Intelligente Steuerungs- und Verschaltungskonzepte für modulare Elektrofahrzeug-Batteriesysteme zur Steigerung der Effizienz und Sicherheit sowie zur Senkung der Systemkosten - TU Dortmund-Subprojekt) und wurde durch das BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) unter der Subventionsnummer 03 ET6003 I finanziert. Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

Literaturverzeichnis

- [1] 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 Transactions on Smart Grid, VOL. 3, NO. 4, 2012.
- [2] R. Ammermann, T. Gammon, P. Sen und J. Nelson, „DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations,“ IEEE Transactions on Industry Applications, VOL.46, NO.5, 2010.
- [3] F. Uriarte, H. Estes, T. Hotz, A. Gattozzi, J. Herbst, A. Kwasinski und R. Hebner, „Development of a Series Fault Model for Microgrids,“ IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2011.
- [4] H. Ayrton, The Electric Arc, London: The Electrician, 1902.
- [5] C. Steinmetz, „Transformation of electric power into light,“ American Institute of Electrical Engineers, New York, 1906.
- [6] W. Nottingham, „A New Equation for the Static characteristic of the Normal Electric Arc,“ American Institute of Electrical Engineers, New York, 1925.
- [7] R. Haug, T. Kouakou und J. Doremieux, „Phenomena preceding arc ignition between opening contacts: experimental study and theoretical approach,“ France.
- [8] P. Zeller, „A simple arc model for the simulation of the clearing time of drawn arcs with a commercial electronics simulation tool,“ IEEE Holm Conference, Electrical Contacts, 2009.

Detektion und Lokalisierung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz durch den kontinuierlichen Vergleich von Messdaten mit permutierten Fehlermodelldaten

Autoren / *The Authors*:

M. Sc. Michael Kiffmeier, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme, Dortmund
Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme, Dortmund