

# Modellbasierte online-Erkennung von Fehlern in Kfz-Energieversorgungsnetzen

---

Alexander Sapadinski, Selcuk Önal, Daniel Renner, Stephan Frei

## Abstract

The increasing number of electronic and electric components in vehicles and the electrification of the powertrain leads to complex cable harness. Thus, the probability for occurrence of failure rises, e. g. destruction of connectors in vehicle power supply systems. Further possible failures are short circuit, corroded contacts, and electric arc in 48 V systems.

This article introduces an approach for early recognition of different failure types in power supply systems. The proposed approach is based on continuous monitoring of voltages and currents at electronic control units in board net and central collection and processing of data. Having knowledge about operating states makes it possible to estimate model-based values and compare them online with actual situation. Deviations observed in the behavior of the system indicate a failure, which can often be correctly determined and located. As a consequence, troubleshooting can be performed. Therefore, an increased operating reliability can be achieved only by consequent processing of available data. Moreover, less hardware in the safety concept for power supply systems would be possible when redundancy is not needed.

Behavioral models for main components of the power supply system are created. These include cables, connectors, and electronic components. The developed failure detection method is explained in details and the potential is shown and discussed by means of extensive simulations on a simple board net model.

## Kurzfassung

Der stetige Anstieg der Anzahl der elektrischen und elektronischen Komponenten im Fahrzeug und die Elektrifizierung des Antriebsstranges führen zu einer erhöhten Komplexität des Kabelbaumes. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers in einem Kfz-Bordnetz, zum Beispiel durch das Lösen einer Steckverbindung, steigt dadurch. Als weitere Fehler sind Kurzschlüsse, korrodierte Kontakte oder auch Lichtbögen in 48V-Bordnetzen zu nennen.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur frühzeitigen Fehlererkennung im Kfz-Bordnetz vorgestellt. Dieser basiert auf dem kontinuierlichen Monitoring von Spannungen und Strömen an möglichst vielen Stellen im Bordnetz und der zentralen Sammlung sowie Weiterverarbeitung der Information. Durch Kenntnis der Betriebszustände können modellbasiert Erwartungswerte bestimmt und online mit der aktuellen Ist-Situation verglichen werden. Ein abweichendes Verhalten deutet auf einen Fehler hin, der in vielen Fällen konkret bestimmt und lokalisiert werden kann. Eine gezielte Fehlerbe-

handlung ist damit möglich. Dadurch wird mit weitgehend vorhandenen Daten eine erhöhte Betriebssicherheit erreicht. Auch sind im Sicherheitskonzept der Energieversorgung an anderer Stelle Einsparungen denkbar, wenn keine Redundanz der Datenerfassung gefordert ist.

Für die Online-Simulation werden in einfachen Verhaltensmodellen die wichtigsten Komponenten des Bordnetzes abgebildet. Dazu gehören Leitungen, Kontakte und ausgewählte Verbraucher. Weiterhin wird in diesem Beitrag die Fehlererkennungs-methodik ausführlich erläutert, und durch umfangreiche Simulationen an einem einfachen Bordnetz wird deren Potential aufgezeigt und diskutiert.

## 1. Einleitung

Die erhöhte Komplexität des Kabelbaumes im Fahrzeug führt ohne entsprechende Gegenmaßnahmen zur Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Fehlerfalles. In diesem Zusammenhang können Kurzschluss, Leitungsbruch, versehentliches Lösen einer Steckverbindung unter Last, gealterte Kontakte oder auch Lichtbögen in einem 48V-Bordnetz genannt werden.

Heute werden für die Absicherung gegen Kurzschlüsse Schmelzsicherungen (Abbildung 1 (links)) meistens eingesetzt. Nachteilig ist hierbei unter anderem, dass solche Sicherungen nicht rücksetzbar sind und nach Auslösung ausgewechselt werden müssen. Im Falle eines stehenden Lichtbogens können Schmelzsicherungen oft nicht reagieren, da der Strom in dieser Situation sogar geringer werden kann [1].

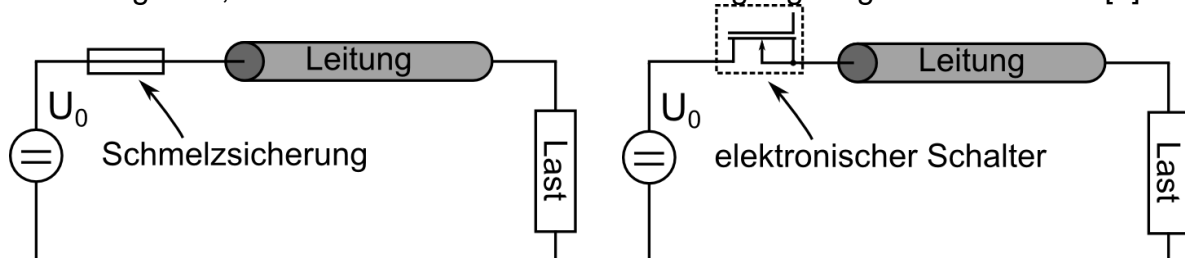


Abbildung 1: (links): Absicherung mittels Schmelzsicherung; (rechts) Absicherung mittels Transistorschalter

Dagegen können elektronische Absicherungskonzepte (Abbildung 1 (rechts)) mehr Flexibilität gewährleisten. So können die Transistoren viel schneller eine Überlast abschalten oder auch im Falle anderer Fehlerfälle geeignet reagieren [4,5,6]. Das wiederum ermöglicht die Ausarbeitung neuer Absicherungskonzepte. Um auch die Vorteile dieser Konzepte optimal nutzen zu können sind Kenntnisse über die dynamischen und statischen Vorgänge im Bordnetz notwendig.

In modernen Fahrzeugen werden immer mehr Steuergeräte und intelligente Stromverbraucher eingesetzt, dadurch werden Strom- und Spannungsmessdaten an unterschiedlichen Stellen im Bordnetz erfasst und meist nur lokal verwertet. Der Austausch der Daten und eine zentrale Analyse bieten die Möglichkeit einer modellbasierten Echtzeiterkennung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz.

## 2. Absicherungskonzept

Die unterschiedlichen Fehlerfälle in einem Kfz-Energiebordnetz äußern sich durch das abweichende Verhalten zu einem fehlerfreien Betriebszustand. Die genaue Kenntnis dieser Abweichung erlaubt Rückschlüsse auf die Art des Fehlers. Zwei grundsätzliche Herausforderungen müssen dabei bewältigt werden. Zum Einem soll der Fehlertyp rechtzeitig identifiziert werden, zum Anderem soll auch der Auftrittsort des Fehlers möglichst präzise lokalisiert werden.

Der Ablaufplan der modellbasierten Diagnose ist in der Abbildung 2 dargestellt. Ein hinreichend genaues Modell des Bordnetzes und seiner Komponenten ist dazu notwendig. Die Simulation läuft parallel zu dem eigentlichen Systembetrieb und bestimmt den aktuellen Bordnetzzustand bei fehlerfreiem Betrieb. Dieser wird kontinuierlich mit den tatsächlichen Sensorzuständen verglichen. Im idealen Fall sollte es keine signifikante Abweichung geben. Tritt ein Fehler auf, so muss der Fehlertyp richtig identifiziert und lokalisiert werden. Anschließend wird eine geeignete Maßnahme bestimmt. Zum Beispiel kann ein Signal zum Abschalten einer Leitung an die intelligente Sicherung oder eine Warnung an den Fahrer gesendet werden.

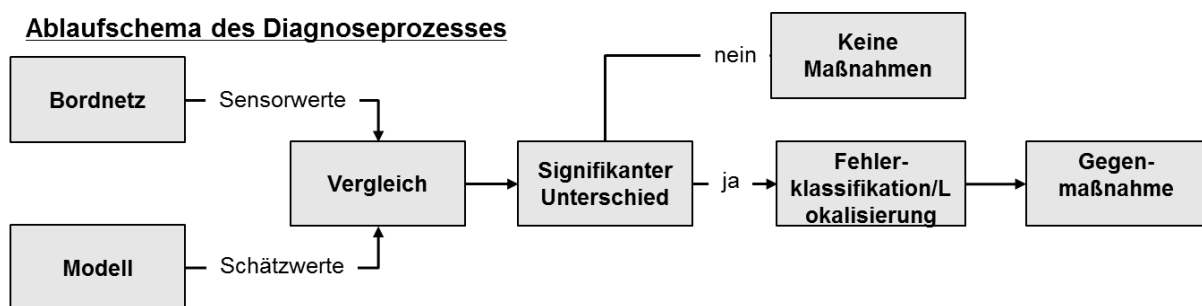


Abbildung 2: Ablaufschema des Diagnoseprozesses

Zwei Ansätze zur Fehlertypidentifikation und Lokalisierung sind denkbar. Das adaptive Modell passt die Parameter interner Fehlermodelle solange an, bis das simulierte Systemverhalten dem beobachteten Systemverhalten entspricht [7]. Der hier betrachtete Ansatz geht von einer Fehlertyp- und Fehlerort-spezifischen Abweichung zwischen dem Ist- und dem Soll-Verhalten aus, sodass geeignete Schwellenwerte definiert werden können.

Das Modell für das Bordnetzes und das funktionale Verhalten können auf einem zentralen Steuergerät implementiert werden, um das System in Echtzeit zu diagnostizieren. Dabei wird angenommen, dass in dem zentralen Steuergerät die Sensordaten für Strom- und Spannung von elektrischen Verbrauchern und der Batterie regelmäßig zur Verfügung gestellt werden.

## 2. Simulationsmodelle

Zu den wichtigsten Komponenten, die für die Analyse des Bordnetzzustandes notwendig sind, gehören elektrische Verbraucher, Leitungen, Batterie und Kontakte. Des Weiteren werden für die simulative Analyse und zur Abschätzung der Potentiale der Fehlererkennungsmethodik, Fehlermodelle benötigt. Vorhandene Simulations-

modelle müssen dem Zweck entsprechend angepasst werden und dürfen für die Echtzeitfähigkeit der Diagnose nicht zu komplex sein.

## 2.1. Modellierung der Bordnetzkomponenten

### Leitungen

Für die Analyse des Systemzustands genügt für Leitungen ein einfaches Ersatzschaltbild. Die Kenntnis des Leitungswiderstandes und der Leitungsinduktivität ist ausreichend (Abbildung 3).

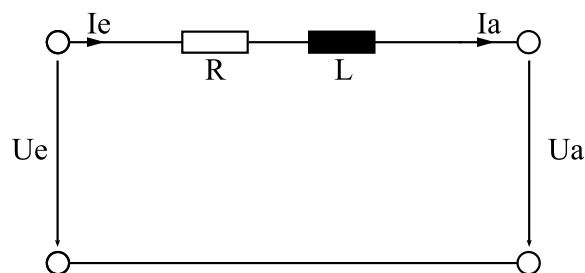


Abbildung 3: einfaches Leitungsmodell

### Elektrische Verbraucher

Die elektrischen und elektronischen Verbraucher werden hier als statische passive Lasten modelliert, und in drei Kategorien aufgeteilt:

- Niederohmig-resistiv
- Hochohmig-resistiv
- Induktiv-resistiv

Außerdem wird davon ausgegangen, dass jeder Verbraucher intern Einrichtungen für die Strom- und Spannungsüberwachung besitzt.

### Kontakte und Sicherungen

Die elektrischen Kontakte, Steckverbindungen, Verzweigungen und Sicherungen werden in erster Näherung nur durch einen konstanten Widerstandswert modelliert.

### Batterie

Für die Batterie wird einfaches Modell bestehend aus einer realen Quelle mit einem Innenwiderstand verwendet. Zusätzlich findet eine kontinuierliche Überwachung des Batteriestromes und der Batteriespannung statt.

## 2.2. Fehlermodelle

Die einzelnen Fehlertypen werden mittels variabler Widerstände modelliert. In den Abbildung 4, 5 und 6 ist deren Ersatzschaltbild (ESB) skizziert.

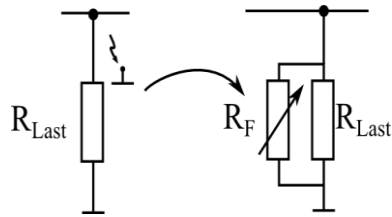


Abbildung 4: ESB Kurzschluss

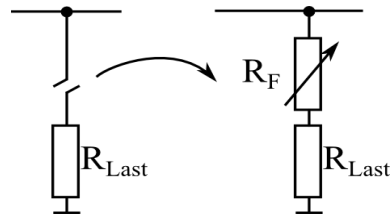


Abbildung 5: ESB Leitungsbruch

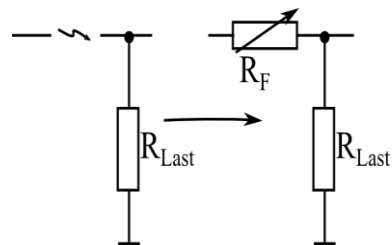


Abbildung 6: ESB Serieller Lichtbogen

Dabei ist  $R_f$  der variable Widerstand zur Realisierung der Fehlertypen.

## 4. Simulationsergebnisse

### 4.1 Simulationsframework

Die vorgestellte Methodik wurde anhand eines einfachen Bordnetzmodells in Matlab/Simscap analysiert. Die Topologie des Bordnetzes ist in Abbildung 7 dargestellt. Dieses Modell besteht aus einer Batterie, die über einen einfachen Kabelbaum drei Lasten mit elektrischer Energie versorgt. Außerdem sind in diesem Modell unterschiedliche Kabelfehler direkt vor den Lasten modelliert, die in der Simulation ausgewählt werden können. Dieses Modell wird ab jetzt als Fehlermodell bezeichnet. Parallel dazu gibt es ein identisches Modell ohne Fehler, welches als Referenzmodell bezeichnet wird. Es wird davon ausgegangen, dass alle Lasten beliebig schnell Strom und Spannung messen und die Daten zur Verfügung stellen können.

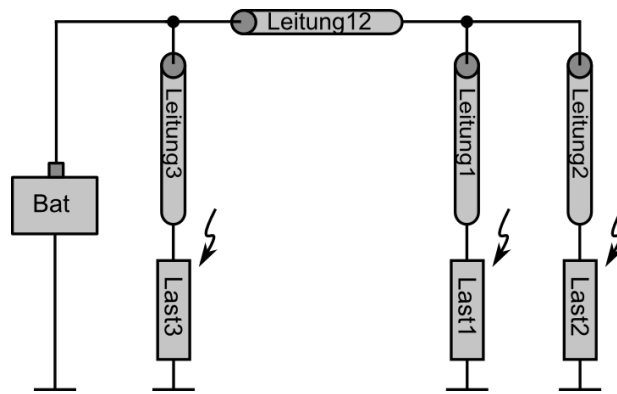


Abbildung 7: Gewählte Bordnetztopologie

## 4.2. Analyse: Kurzschluss und Leitungsbruch

Das Testszenario geht von einem sukzessiven Zuschalten der Lasten aus. Die Last 1 wird zum Zeitpunkt  $t=0,05$  s, die Last 2 zum Zeitpunkt  $t=0,15$  s und die Last 3 zum Zeitpunkt  $t=0,25$  s eingeschaltet. Zum Zeitpunkt  $t=0,3$  s tritt ein Fehler auf, nachdem alle dynamischen Vorgänge abgeklungen sind. Als mögliche Fehler werden Kurzschluss und ein erhöhter Leitungswiderstand angenommen, zum Beispiel hervorgerufen durch Leitungsbruch oder Lösen der Steckverbindung. Die Ergebnisse aus den Simulationen für die Fehlerfälle sind in den Abbildungen 8, 9 und 10 dargestellt. Werden die Spannungs- und Stromverläufe betrachtet, so ist eine deutliche Abweichung zwischen dem Fehlermodell und dem Referenzmodell zu erkennen. Anhand dieser Abweichung und ihrer Größe lassen sich sowohl der Fehlertyp identifizieren als auch der Fehlerort genau lokalisieren. An diesem Beispiel soll das Vorgehen zur Fehlerdetektion näher erläutert werden.

### Kurzschluss Last 1

Nach dem Eintritt des Kurzschlusses steigt der Batteriestrom deutlich über dem vom Referenzmodell vorausgesagtem Wert an. Gleichzeitig bricht die Batteriespannung ein. An der betroffenen Last wird keine Spannung und kein Strom gemessen. In den parallelen Zweigen sind Spannung und Strom ungleich null.

Die Tatsache, dass keine Spannung und kein Strom an der Last gemessen werden können, ist nicht hinreichend für einen Kurzschluss, da der gestörte Betrieb der Mess-Elektronik im Steuergerät der Last nicht prinzipiell ausgeschlossen werden kann. Dadurch, dass aber auch Daten von weiteren Messpunkten ausgewertet werden, steigt die Wahrscheinlichkeit für ein zuverlässiges Identifikationsergebnis.

### Leitungsbruch Last 1

Bei einem Leitungsbruch ohne Berührung der Karosserie fließt kein Strom durch die Last 1, und auch die Spannung durch die interne Messeinrichtung kann nicht gemessen werden. Das entspricht einem Spannungsverlust. Allerdings sinkt der Batteriestrom erheblich, und die Batteriespannung steigt an. Dementsprechend erhöht sich auch die Spannung über den intakten Verbrauchern, und die Lastströme steigen leicht an.

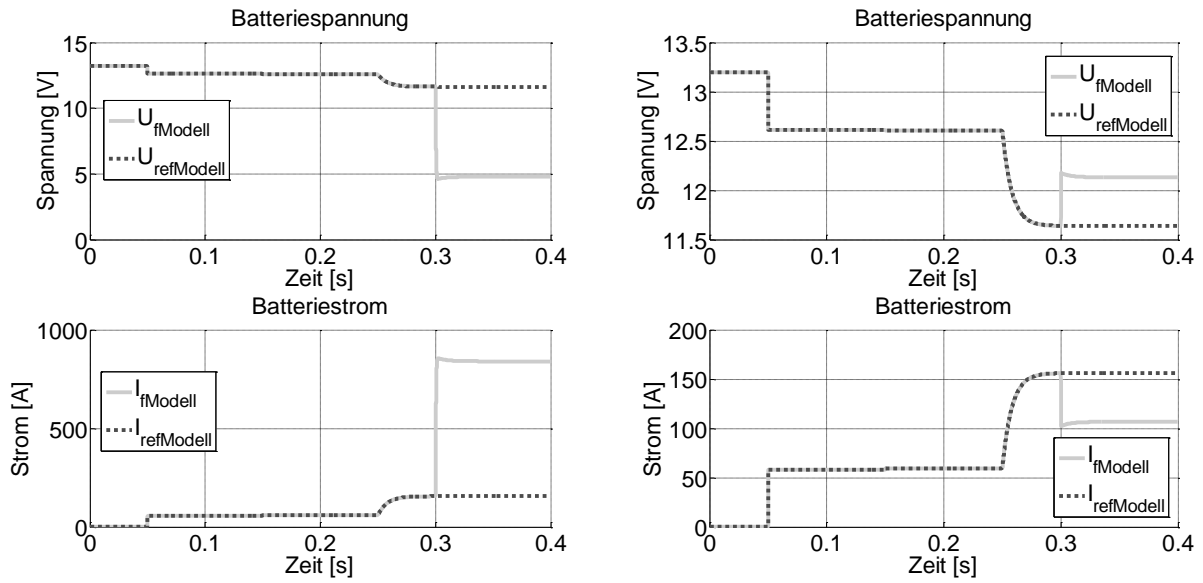


Abbildung 8: (links): Kurzschluss (Last1), (rechts): Leitungsbruch (Last1)

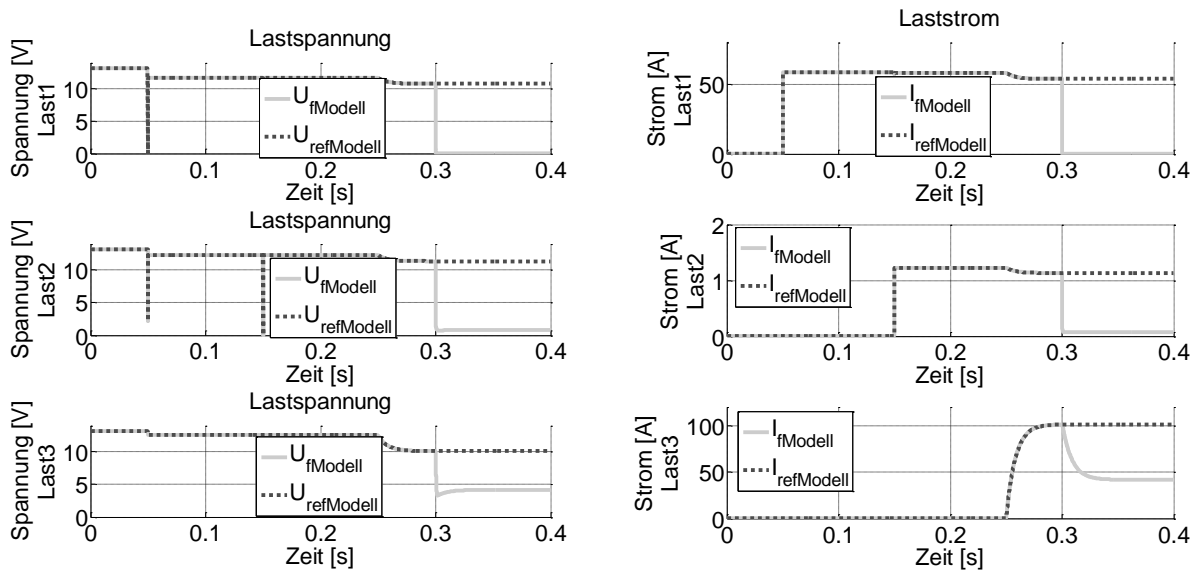


Abbildung 9: Kurzschluss (Last1): (links): Lastspannung; (rechts): Laststrom

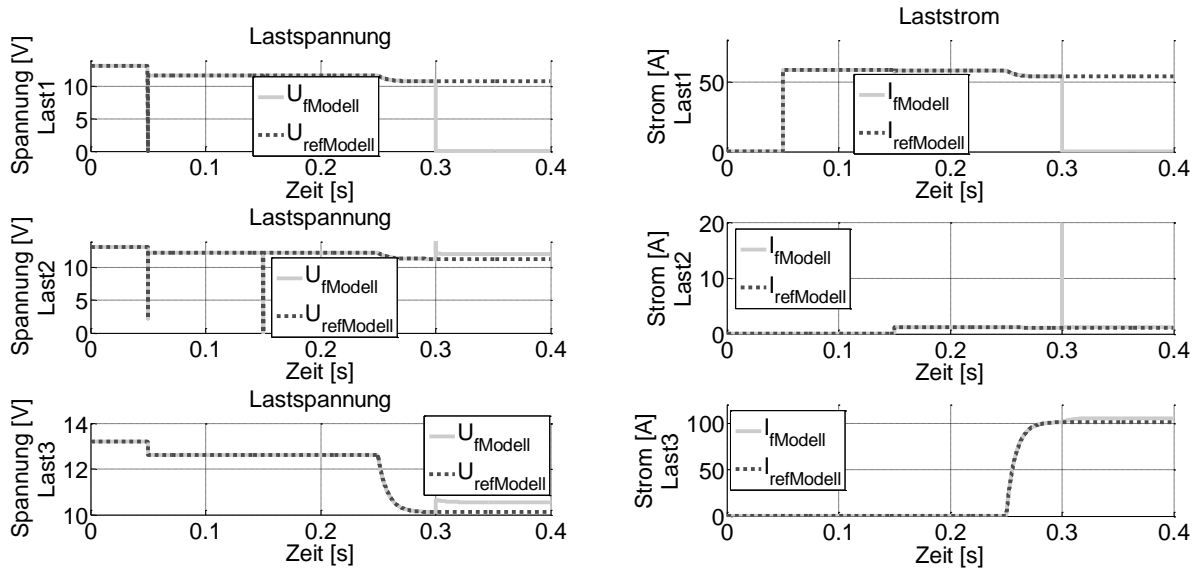


Abbildung 10: Leitungsbruch Last1: (links): Lastspannung; (rechts): Laststrom

### Komplette Simulation

Die Ergebnisse der Simulationen der Kurzschlüsse (KS) und der Leitungsbrüche (LL) an unterschiedlichen Stellen im System sind in dem Balkendiagramm (Abbildung 11) zu sehen. Einzelne Balken stellen die auf Soll-Werte normierte Abweichung der Spannungen und Ströme zwischen dem Fehlermodell und dem Referenzmodell dar. Dabei wurden stets die stationären Werte betrachtet. Die einzelnen Fehlerfälle wurden zu Gruppen zusammengefasst. Da Kurzschlüsse und Leitungsbrüche an drei Stellen simuliert wurden, ergeben sich insgesamt sechs Fehlermöglichkeiten. Des Weiteren gilt:

- negative Abweichung: Spannungs- oder Stromeinbruch,
- positive Abweichung: Spannungs- oder Stromanstieg.

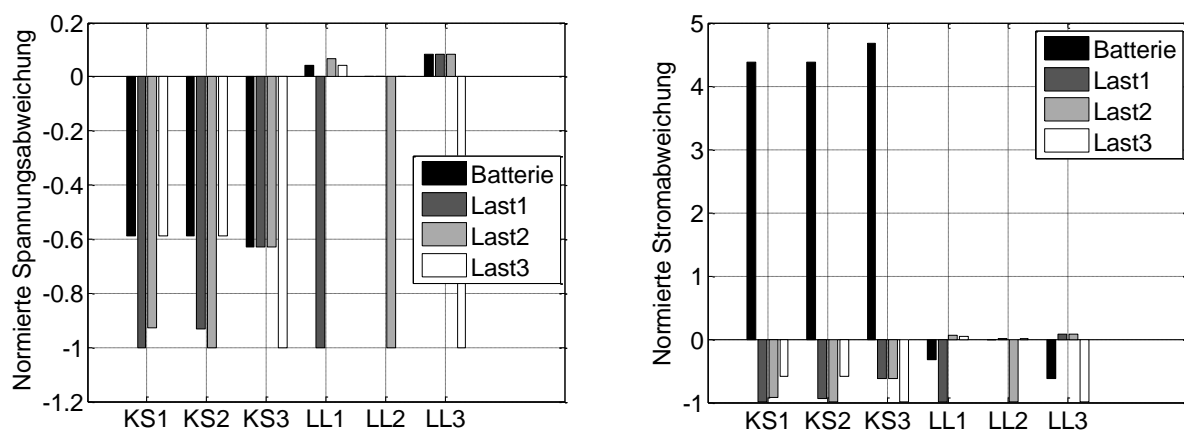


Abbildung 11: Normierte Abweichung für unterschiedliche Fehlerfälle

Es ist ersichtlich, dass jeder Fehlertyp seine eigenen Merkmale aufweist, die zu der genauen Fehleridentifikation und gleichzeitig zur Fehlerlokalisierung genutzt werden können. Dies bedarf einer Definition geeigneter Schwellenwerte  $\theta_i$ , sodass entspre-



chende WENN-DANN-Regeln aufgestellt werden können. Für einen Kurzschluss an der Last 1 kann folgende Regel aufgestellt werden:

$$\begin{aligned} & \text{WENN } U_{bat} < \theta_1 \text{ UND } I_{bat} > \theta_2 \text{ DANN KURZSCHLUSS} \\ & \text{WENN } U_{L1} < \theta_3 \text{ UND } U_{L2,L3} > \theta_4 \text{ UND } I_{L1} < \theta_5 \text{ DANN KURZSCHLUSS Last1} \end{aligned} \quad (1)$$

Die Suche nach optimalen Schwellenwerten  $\theta_i$  stellt ein Optimierungsproblem dar und wird im Rahmen dieses Beitrags nicht näher betrachtet.

### 4.3. Analyse: Korrodierter/Gealterter Kontakt

Ein weiterer Fehlerfall, der in diesem Beitrag analysiert wurde, ist der Einfluss des erhöhten Kontaktwiderstandes in den Steckverbindungen. Über die Lebenszeit des Automobils sind die Kontakte sowohl mechanischen Beanspruchungen als auch Umwelteinflüssen stark ausgesetzt. Diese Einflüsse führen im Laufe der Zeit zur Verringerung der Leitfähigkeit und entsprechend zur Steigerung des Kontaktwiderstandes.

Die Kontaktalterung kann durch einen Vergleich des Soll-Neuzustandes mit dem aktuellen Ist-Zustand bestimmt werden. Aber auch ein sporadischer Wackelkontakt kann sich durch die Erhöhung des Kontaktwiderstandes bemerkbar machen. Untersucht wurde hier ein Initialzustand (5 m $\Omega$ ) und ein Worst-Case-Szenario (30 m $\Omega$ ). Die Ergebnisse sind in der Abbildung 12 dargestellt.

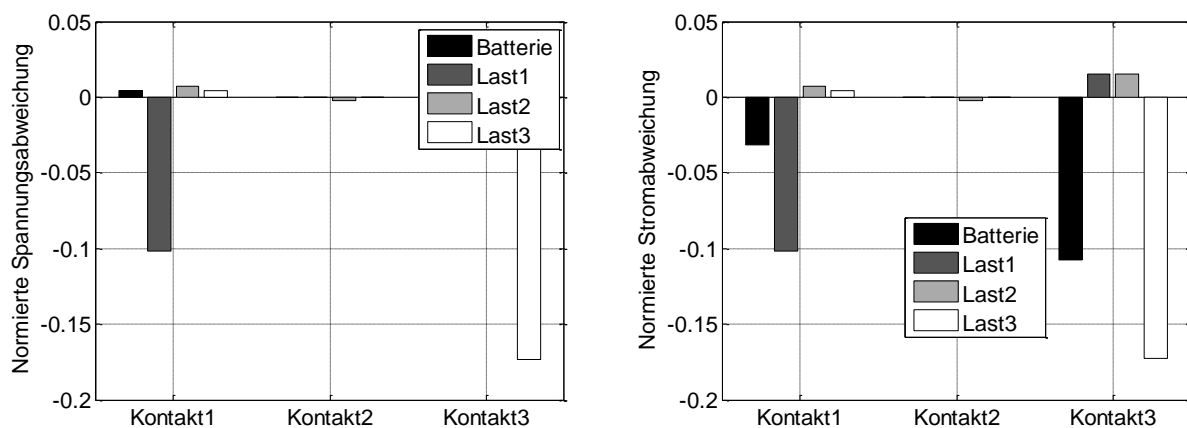


Abbildung 12: Normierte Abweichung bei gealterten Kontakten

Für die gealterten Kontakte 1 und 3 kann eine Spannungs- und Stromabsenkung von 10% - 15% beobachtet werden. Allerdings ist für den Kontakt 2 kaum eine Veränderung feststellbar, da es sich bei der Last 2 um einen hochohmigen Verbraucher handelt.

### 4.4. Analyse: Lichtbogen im 48 V Bordnetz

Mit der Diskussion zur Einführung der zusätzlichen 48 V Spannungsebene im Kfz [2] kommen auch neue Gefahrenpotentiale auf, die für diese Spannungsebene spezifisch sind. Vor allem die Ausbildung stehender Lichtbögen ist problematisch. Die hier

vorgestellte Methode wird auch auf diesen Fehlerfall angewandt. Es wird das System aus den vorherigen Betrachtungen verwendet. Der Unterschied besteht lediglich in der Verwendung einer höheren Spannung und die Lasten sind an 48 V angepasst. In der Literatur wird zwischen parallelen und seriellen Lichtbögen unterschieden [1]. In diesem Beitrag wird nur der serielle Lichtbogen untersucht.

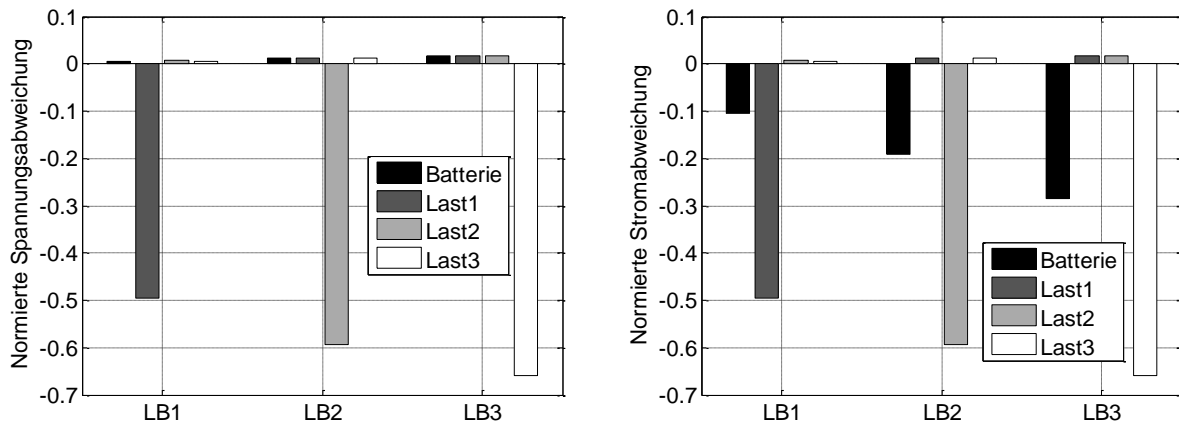


Abbildung 13: Normierte Abweichung beim seriellen Lichtbogen

In der Abbildung 13 ist dargestellt, wie Spannung und Strom sich beim Auftreten eines stehenden seriellen Lichtbogens, zum Beispiel in einer Steckverbindung infolge eines Wackelkontaktes, verändern. Kennzeichnend für diesen Fehlerfall ist der ausgeprägte Spannungs- und Stromeinbruch an der entsprechenden Last, der bis auf die Hälfte des Nominalwertes absinkt. Somit lassen sich auch in diesem Fall geeignete Schwellenwerte definieren, und sowohl der Fehlertyp als auch Fehlerort können bestimmt werden.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird eine neue Möglichkeit der Erkennung von Fehlern im Kfz-Energiebordnetz vorgestellt. Der verwendete Ansatz basiert auf dem kontinuierlichen Monitoring von Spannungs- und Stromverläufen und deren Vergleich mit simulierten Werten für ein fehlerfreies System. Im Fehlerfall ergibt sich eine Abweichung, die für verschiedene Fehlertypen und Fehlerorte charakteristisch sein kann.

Das Potential dieser Methode wurde für einige kritische Fehlerfälle wie Kurzschluss, Leitungsbruch, korrodierte Steckverbindung und Lichtbögen anhand zahlreicher Simulationen an einem einfachen Bordnetzmodell aufgezeigt. Durch die geeignete Wahl von Schwellenwerten können WENN-DANN-Regeln aufgestellt werden. Die so gewonnene Kenntnis über den Bordnetzzustand kann beispielsweise zur Fehleranalyse oder auch zur Entwicklung neuer Absicherungskonzepte basierend auf Transistorschaltern genutzt werden. Allerdings ist bei dieser Methode eine genaue Modellierung und Simulation des Bordnetzes notwendig. Diese ist für komplexe Topologie mit sehr viel Aufwand verbunden.

Bei hochohmigen Verbrauchern ist der Einfluss einer Kontaktalterung kaum feststellbar. Hier ist ein erhöhter Widerstand aber aufgrund geringer Ströme auch unkritisch. Des Weiteren steigt die Anzahl der zu aufstellenden WENN-DANN-Regeln mit stei-

gender Anzahl der Fehlertypen stark an. Die Betrachtung von selbstlernenden Algorithmen, wie zum Beispiel künstliche neuronale Netze, kann Abhilfe schaffen. Aber auch Kombinationen aus bekannten Regeln und selbstlernenden Methoden ist denkbar und muss in den weiteren Arbeiten genauer analysiert werden.

## 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.

## Literatur

- [1] M. Naidu, T.J. Schoepf, S. Gopalakrishnan, „Arc fault detection scheme for 42-V automotive DC networks using current shunt,“ IEEE Transactions on power electronics, vol. 21, No. 3, May 2006
- [2] R. Friedrich, „Das 48V Bordnetz.: Pflicht oder Kür?,“ [http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads/Vortrag\\_TU\\_Berlin\\_Final\\_Netz.pdf](http://lexikon.kfz.tu-berlin.de/kfz-seminar/downloads/Vortrag_TU_Berlin_Final_Netz.pdf) [Online], Berlin, 2013
- [3] C. R. Paul, „Analysis of Multiconductor Transmission Lines,“ New York: Wiley, 1994
- [4] G. Babel, „Bordnetze und Powermanagement – Thermische Modellbildung für elektrische und elektronische Bauelemente,“ Springer Verlag, 2013
- [5] K. Reif, „Automobilelektronik,“ 3. Auflage, Vieweg+Teubner, 2009
- [6] S. Rafati, „Innovative Absicherungskonzepte von 12 V DC bis 48 V DC“ in Haus der Technik Fachbuch 133, „Elektrik/Elektronik in Hybrid- und elektrofahrzeugen und elektrisches Energiemanagement V“: Expert Verlag, Renningen, 2014, ff. 59-69. ISBN:978-3-8169-9264-2
- [7] A. Breuer, U. Siebel, „Grenzen der modellbasierten Diagnose in Fahrzeugsystemen“ <http://www.elektroniknet.de/automotive/sonstiges/artikel/30969/> [Online]

## **Autoren / *The Authors:***

M.Sc. Alexander Sapadinski, Arbeitsgebiet Bordsysteme, TU Dortmund, Dortmund

M.Sc. Selcuk Önal, Arbeitsgebiet Bordsysteme, TU Dortmund, Dortmund

M.Sc. Daniel Renner, Audi Electronics Venture, Gaimersheim

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, Arbeitsgebiet Bordsysteme, TU Dortmund, Dortmund