

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Michael Kiffmeier, Stephan Frei

Abstract

There will be more and more electrical consumers within automotive vehicles. Those newly added consumers are partially processing security-critical and important functions. For these reasons the complexity and the requirements for reliability will rise. This fact leads to a much higher possibility for failures and critical changes within the power supply wiring harness. Numerous self-diagnosis functions for electronic control units have already been developed and mostly integrated. Often in this context current and voltage sensors within the control units are used to monitor their electrical behaviour. Furthermore all control units are linked through many different bus-systems. The Gateway can be identified as a common communication node. This work presents methods and concepts to use the already monitored current and voltage information in a central unit (e.g. Gateway) for monitoring the condition of wires, contacts, connectors, and so on of the electrical power supply system. A diagnosis process in the case of a control unit malfunction is also taken into account and presented.

Kurzfassung

Durch immer mehr elektrische Verbraucher innerhalb von Kfz-Architekturen, die zunehmend sicherheitskritische Funktionen ausführen, wachsen die Komplexität und die Zuverlässigkeitsanforderungen an das Energieversorgungsbordnetz an. Dies resultiert in einer höheren Wahrscheinlichkeit von Fehlern und in einer erhöhten Relevanz für kritische Veränderungen im Leitungsnetz. Bereits heute wird ein erheblicher Aufwand für die Eigendiagnose von Steuergeräten betrieben. Hierdurch bringen solche Steuergeräte sehr häufig Sensorik mit, die oft auch eine Strom- und Spannungsüberwachung beinhaltet. Die Verknüpfung aller Steuergeräte ist mit einer Vielzahl an Bus-Systemen sichergestellt. Ein gemeinsamer Kommunikationsknoten stellt z.B. das Gateway dar. Diese Arbeit verfolgt das Ziel, Methoden und Konzepte vorzustellen, die auf der Basis einer Informationsfusion der vorhandenen Strom- und Spannungsinformationen Informationen über den Zustand des Energiebordnetzes generieren. Die Konzepte sehen eine Überwachung des Gesamtsystems, sowie eine Diagnose im Fehlerfall vor.

1 Einleitung

Das Bordnetz ist eine der größten und schwersten Komponenten in einem modernen Kfz. Durch die rasante Zunahme an Sensoren, Steuergeräten, etc. wächst die Komplexität des Kabelbaums zusätzlich stetig an. Nicht nur die Komplexität, sondern auch die Relevanz und die Anforderungen an Sicherheit und Verfügbarkeit nehmen einen entscheidenden Stellenwert ein. Besonders im Bereich des assistierten oder autonomen Fahrens ist die Sicherstellung der elektrischen Energieversorgung für sicherheitsrelevante Komponenten unabdingbar und eine grundlegende Voraussetzung für den Betrieb des Gesamtsystems.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist ein weiterer entscheidender Aspekt, der die Anforderungen an das Energieversorgungsnetz innerhalb eines Kfz stark erhöht. Der große Umfang und die steigende Komplexität lassen Fehler in diesem Leitungsnetz deutlich wahrscheinlicher werden. Kritische Fehler können Kurzschluss, Leitungsbruch, unbeabsichtigte Öffnung von Steckverbindern, Wackelkontakte, Massebrüche und besonders im 48 V-Bereich Lichtbögen sein. Als kritische Veränderungen können Kontaktalterung, beziehungsweise Korrosion und schleichende Kurzschlüsse, beziehungsweise Isolationsermüdung/Isolationsfehler genannt werden.

Durch die Verschiebung der Anforderungen ist es mit konventionellen Konzepten schwierig geworden, einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

Als direkte Reaktionsmöglichkeit auf Fehler im Leitungsnetz sind Schmelzsicherungen vorgesehen. Diese Sicherheitseinrichtungen sollen einen Teilbereich des Bordnetzes im Falle eines Kurzschlusses oder bei Überlast abschalten. Die Detektion bezieht sich ausschließlich auf die Wärmeentwicklung durch fließende Ströme. Der unkontrollierte Teilausfall des Bordnetzes stellt jedoch zusätzlich ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar. Nach Auslösen einer Sicherung oder Ausfall eines Steuergerätes durch andere Fehler im Leitungsnetz ist meist eine aufwendige Fehlersuche notwendig.

All dies zeigt, dass mit der allgemeinen Weiterentwicklung von Kraftfahrzeugen neue Diagnose- und Überwachungskonzepte für das Energiebordnetz einhergehen sollten. Zur Eigendiagnose werden innerhalb der einzelnen Steuergeräte bereits heute große Bemühungen angestellt, das Verbraucherverhalten aus elektrischer Sicht zu überwachen. Im Zusammenhang mit dieser Überwachung und Eigendiagnose werden Strom- und Spannungsinformationen gesammelt.

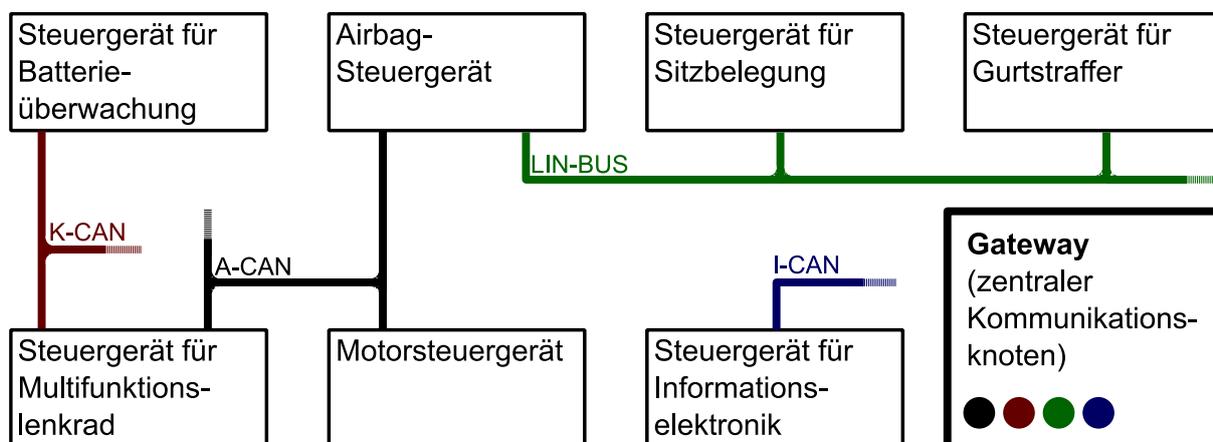


Abbildung 1 – Vernetzung von Steuergeräten über verschiedene Bus-Systeme; Gateway als möglicher zentraler Sammelknoten für Bus-Informationen (Ströme/Spannung)

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Zusätzlich sind alle Steuergeräte in ein Kommunikationsnetz eingebunden, wie es in Abbildung 1 angedeutet ist. Diese Kommunikation wird im Kfz durch eine Vielzahl unterschiedlicher Bus-Systeme realisiert. Als zentraler Knoten innerhalb dieses Kommunikationsnetzes ist das Gateway zu nennen.

Innerhalb dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, den Zustand des Energiebordnetzes (Leitungssystem) auf Basis einer Informationsfusion der Strom- und Spannungsinformationen der Steuergeräte zu bestimmen. Zusätzlich soll mit diesen Sensordaten im Fehlerfall eine Diagnose erfolgen.

Hierfür werden zunächst einfache Modelle für Bordnetzkomponenten und die hier betrachteten Fehler erarbeitet. Anhand dieser Modelle werden dann die charakteristischen Systemeigenschaften der fehlerfreien und fehlerbehafteten Zustände ermittelt, sodass schließlich durch Vergleich zwischen System- und den Modelldaten eine Aussage über den Gesamtsystemzustand getroffen werden kann. Dies wird im Folgenden modellbasierte Fehlererkennung genannt.

2 Grundlagen der modellbasierten Fehlerdiagnose

Im Allgemeinen ist die Fehlerdiagnose eine Querschnittsdisziplin, die auf verschiedene Prozesse und Systeme angewendet werden kann. Je nach Disziplin entstehen unterschiedliche Herangehensweisen und Anforderungen an die angestrebten Konzepte und Verfahren.

Fehlerdiagnose kann als zentraler Teil eines „*Abnormal Event Management*“ bezeichnet werden [1]. In der Literatur werden viele Anforderungen an ein Fehlerdiagnosekonzept beschrieben, von denen einige direkt übertragbar auf die Fehlerdiagnose in Kfz-Bordnetzen sind.

Allgemeine Vorschläge zu Überwachungs- beziehungsweise Diagnosekonzepten müssen auf unterschiedliche Anwendungen/Systeme übertragbar sein (*Adaptability*). Das Kfz-Bordnetz unterliegt in verschiedenen Ausführungen großen Varianzen, die jedoch auf einige gemeinsame Merkmale reduziert werden können.

Je nach Herangehensweise können Systemmodelle von Nöten sein. Diese Systemmodelle können grundsätzlich auf drei verschiedene Arten erstellt werden [2]. Bei der physikalischen Modellierung enthält das erstellte Modell möglichst viele physikalische Eigenschaften des Systems. Beim verhaltensbasierten Ansatz wird das System durch mathematische Konstrukte beschrieben. Diese Konstrukte werden oft auf Basis von Messdaten erstellt und bedatet. Drittens ist der wissensbasierte Ansatz zu nennen. Je nach verfolgtem Diagnose- und Überwachungskonzept müssen unterschiedliche Anforderungen an die Güte und Genauigkeit der Modelle gestellt werden (*Modelling Requirements*).

Die Fähigkeit, neben der reinen Erkennung von einem fehlerhaften Systemzustand, zusätzlich die Art des Fehlers zu bestimmen (*Isolability*), stellt einen wichtigen Schritt im Diagnoseprozess, beziehungsweise der Fehlererkennung und Systemüberwachung dar.

Je nach Art des zu überwachenden, beziehungsweise zu diagnostizierenden Systems kann die Anforderung entstehen, einen erkannten Fehler innerhalb dieses Systems zu lokalisieren (*Localizability*). Dies ist bei Kfz-Bordnetzen wünschenswert.

Vor dem Hintergrund dieser Vorüberlegungen lässt sich die innerhalb dieser Arbeit verfolgte Überwachungs- und Diagnosestrategie in vier entscheidende Bereiche unterteilen.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

2.1 Fehlerdetektion

Innerhalb der Fehlerdetektion wird das System beobachtet und auf Fehler geprüft. Es wird erkannt, dass das System in einem fehlerbehafteten Zustand ist, sobald ein unvorhergesehenes oder vorher bestimmtes Verhalten auftritt. Solche Verhalten, beziehungsweise Systemzustände können aufgrund der vorangehenden modellbasierten Systemanalyse identifiziert werden. Sobald festgestellt wurde, dass sich das System in einem fehlerbehafteten Zustand befindet, wird die Fehlerdetektion abgeschlossen und eine Fehlerklassifikation –lokalisierung, oder –behandlung kann begonnen werden.

2.2 Fehlerklassifikation

Um eine gezielte Fehlerbehandlung sicherstellen zu können, muss bei einem fehlerhaften System der Fehler klassifiziert werden. Das bedeutet, dass Information über den fehlerhaften Zustand gesammelt werden bis abgeschätzt werden kann, um welchen Fehler es sich speziell handelt. Im Bereich der Fehlerklassifikation in Kfz-Bordnetzen sind die bereits genannten Fehler in Betracht zu ziehen. Diese werden in Kapitel 5 näher untersucht und beschrieben.

2.3 Fehlerlokalisierung

Im Bereich der Bordnetzdiagnose ist eine Fehlerlokalisierung ein besonders wichtiger Bestandteil des Diagnoseprozesses. Dies ist ebenfalls ein wichtiger Punkt im Hinblick auf eine geeignete Fehlerbehandlung. Bei der Fehlerlokalisierung wird der Ort des aufgetretenen Fehlers bestimmt. Im Fall einer Energiebordnetzdiagnose wird in diesem Prozessschritt die fehlerhafte Leitung bestimmt.

2.4 Fehlerbehandlung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die tatsächliche Fehlerbehandlung nicht näher betrachtet. Trotzdem stellt sie den wichtigen Abschluss der beschriebenen Prozesskette dar. Alle vorangegangenen Prozessschritte zielen auf eine möglichst gute Fehlerbehandlung ab. Je besser die durch eine Diagnose gewonnen Informationen sind, desto gezielter kann die Fehlerbehandlung auf die Fehler eingehen und geeignete Maßnahmen treffen.

Die Reihenfolge der vorgestellten Prozessabschnitte der Diagnose kann variieren.

3 Vorüberlegungen zur Bordnetzmodellierung

In der vorliegenden Arbeit wird der beschriebene modellbasierte Ansatz verfolgt. Im Rahmen dieses Ansatzes sind Vorüberlegungen zu den zu verwendenden Modellen und anschließenden Untersuchungen besonders wichtig. Grundsätzlich kann man das Kfz-Energiebordnetz, also das betrachtete elektrische Netzwerk, auf drei verschiedene Arten untersuchen.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Eine statische *Arbeitspunktanalyse* kann grundsätzlich die Struktur und Eigenschaften der Bordnetzkomponenten und Bordnetzfehler aufzeigen. In diesem Bereich sind theoretische Überlegungen besonders gut möglich, und Zusammenhänge können leicht erkannt werden. Dynamische Eigenschaften, die durch kapazitives oder induktives Verhalten hervorgerufen werden, werden in diesem Bereich nicht berücksichtigt. Die Modellierung erfolgt rein auf der Basis von resistiven Komponenten.

Eine Untersuchung im Zeitbereich kann ebenfalls mit dieser Darstellung vorgenommen werden. Hierzu dient eine Aneinanderreihung von Arbeitspunktuntersuchungen mit sich verändernden Rahmenbedingungen, wie z.B. der Lichtbogenlänge bei einem Lichtbogenfehler.

Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, in *Zeitbereichsuntersuchungen* die transienten Eigenschaften der Komponenten zu berücksichtigen. Der Einfluss von kapazitiven und induktiven Eigenschaften kann so untersucht werden.

An eine Zeitbereichsanalyse kann sich eine *Frequenzbereichsanalyse* anschließen. In dieser Darstellung lassen sich eingeschwingene charakteristische Frequenzen, beziehungsweise lässt sich das Frequenzverhalten bestimmen.

Grundsätzlich gibt es verschiedene Zustände eines Kfz-Bordnetzes. Es ist innerhalb des online-Betriebes zwischen dem Fahrbetrieb mit eindeutigen Anforderungen des Fahrers an das Kfz und dem ruhenden Fahrzeug zu unterscheiden.

Gezielte Systembeeinflussungen durch Diagnosealgorithmen mit z.B. Prüfsignalen sind im Fahrbetrieb zunächst nur sehr eingeschränkt möglich, können jedoch in einem offline-Zustand (Werkstattdiagnose) genutzt werden.

Die vorliegende Arbeit reduziert die Betrachtungen auf statische Analysen im online-Zustand, beziehungsweise die Modellierung mit zunächst nur einfachen, resistiven Komponenten. Kurze Überlegungen zu einem notwendigen Übergang in eine Zeitbereichsanalyse im Rahmen der gewählten Darstellungen werden zusätzlich vorgestellt.

4 Beschreibung und Modellierung von Kfz-Bordnetzen

Im Allgemeinen unterliegen Kfz-Bordnetze je nach Modell und Variante großen Varianzen. Das heißt, eine modellbasierte Diagnose muss diese Vielfalt berücksichtigen. Trotzdem kann man einige gemeinsame Eigenschaften von unterschiedlichen Bordnetzen finden.

Eine zentrale Komponente, die in jedem Kfz-Bordnetz vorzufinden ist, stellt die Energiequelle dar. Diese ist typischerweise in 12 V-Bordnetzen auf der einen Seite durch eine Blei-Säure- oder in zukünftigen Modellen möglicherweise durch eine Lithium-Ionen Starterbatterie und auf der anderen Seite durch einen Generator (Lichtmaschine) sichergestellt. Diese stellen je nach Betriebsstrategie und Systemzustand die Energieversorgung für die Steuergeräte dar. Ein sehr einfaches Modell ist in Abbildung 2 dargestellt. Die hier angestellten grundsätzlichen Betrachtungen werden zunächst mit sehr einfachen Modellen durchgeführt, was für die Darstellung der Konzepte vollkommen ausreichend ist. Für die Anwendung in konkreten Zielfahrzeugen können die Modelle an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden. Das heißt, die Modelle müssen das reale Verhalten ausreichend genau nachbilden, was aber schon mit Modellen geringer Komplexität möglich ist.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

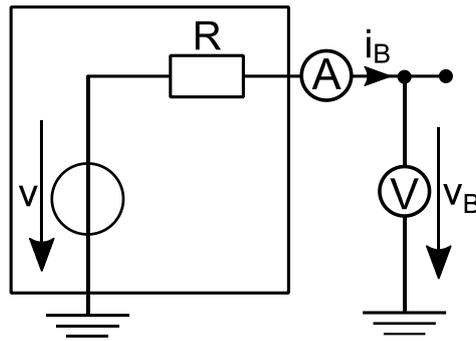


Abbildung 2 – Einfaches Quellen-Modell (Batterie oder Generator) – realisiert durch eine ideale Quelle und einen Innenwiderstand; die vorausgesetzte Sensorik setzt sich aus Strom- und Spannungsüberwachung zusammen

Zusätzlich zu vorhandenen Energiespeichern beziehungsweise Generatoren sind ebenfalls die Steuergeräte, also die Verbraucher, von zentraler Bedeutung. Im Zuge einer Arbeitspunktanalyse für das Gesamtsystem können Steuergeräte für die statische Analyse als einfache Widerstände gesehen werden, Abbildung 3. Als Verbinder von Steuergeräten und Energieversorgern werden Leitungen verwendet. Bei Beschränkung auf die statische Arbeitspunktanalyse kann eine Leitung als ohmscher Widerstand modelliert werden, Abbildung 4.

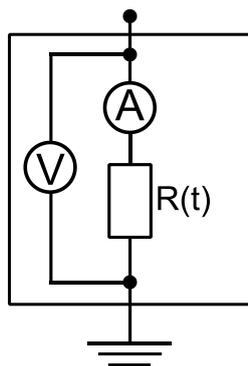


Abbildung 3 – Steuergerätemodell – realisiert durch einen resistiven Verbraucher; vorausgesetzte Sensorik setzt sich aus Spannungs- und Stromüberwachung zusammen

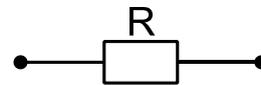


Abbildung 4 – Leitungsmodell – realisiert durch einen resistiven Verbraucher

Die Topologie von Kfz-Energiebordnetzen beschränkt sich im Wesentlichen auf eine Baumtopologie. Die Knoten befinden sich an zentralen Punkten, z.B. bei Sicherungsträgerboxen.

Die Teilmodelle können nun in Verbindung mit den aufgezeigten Eigenschaften zu einem Gesamtmodell zusammengesetzt werden, siehe hierzu Abbildung 5. Dargestellt sind eine Energiequelle und fünf Verbraucher, die in einer Baumtopologie verschaltet sind. Die Verbraucher sind mit Verbraucherleitungen an verschiedene Knoten angeschlossen. Die Knoten, also die Sicherungsträgerboxen, sind ebenfalls mit Leitungen verbunden und schließlich zur Spannungsquelle geführt. Ein Sicherheitskonzept, bestehend aus Schmelzsicherungen, ist ebenfalls angedeutet.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

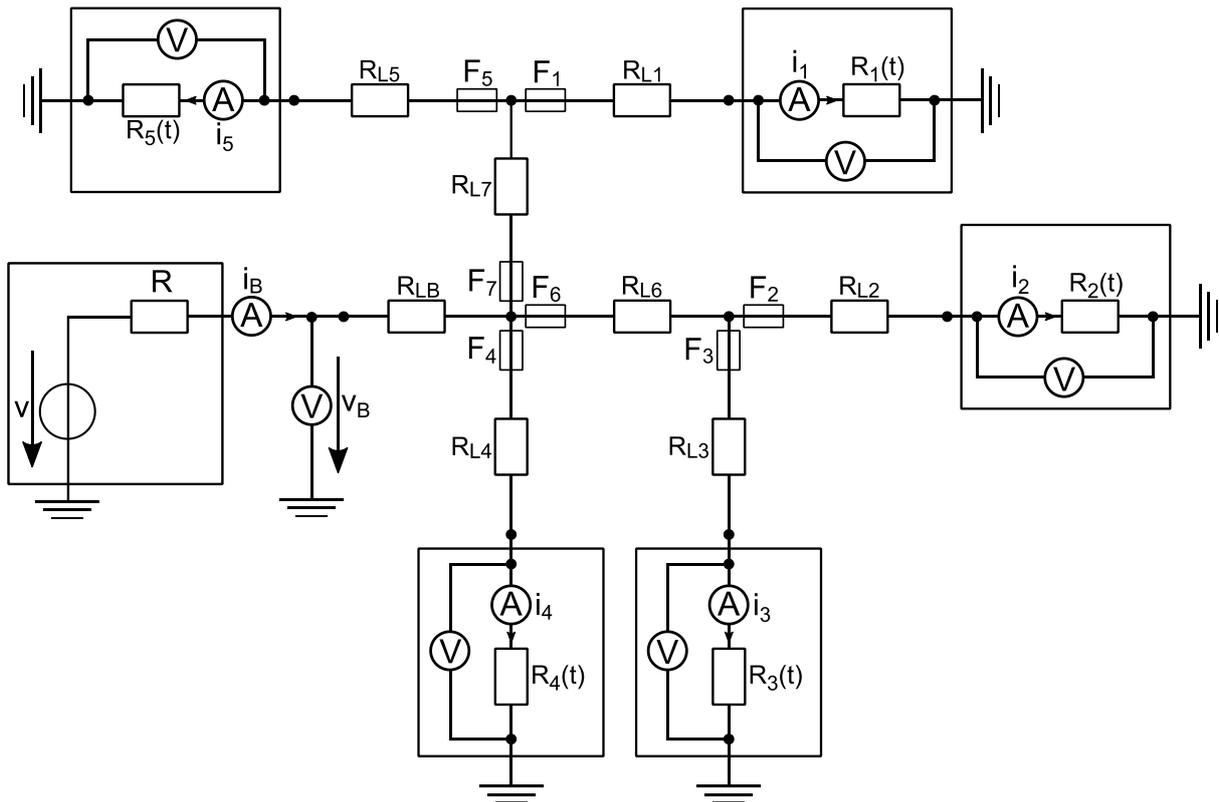


Abbildung 5 – Elektrisches Ersatzschaltbild für ein mögliches Versorgungsnetz inklusive Batteriemodell, Verbrauchermodelle, Leitungsmodelle; Sensorik und Sicherungskonzept mit Schmelzsicherungen sind angedeutet

5 Mögliche elektrische Fehler und kritische Veränderungen in einem Kfz-Bordnetz

In einem Energieversorgungsnetz können verschiedene Fehler an verschiedenen Orten auftreten. Diese Orte beschränken sich auf die Verbraucherleitungen (z.B. R_{L3}) mit ihren Steckern, vor oder hinter dem Verbraucher und auf die Sicherungsträgerverbinder (z.B. R_{L6}). Für eine Fehlerbetrachtung müssen ebenfalls für diese Fehler Fehlermodelle erstellt werden. Diese Modellbildung wird auch im Hinblick auf eine statische Arbeitspunktanalyse des Gesamtsystems durchgeführt. Im Rahmen einer Fehlerklassifizierung mit vier Fehlerklassen werden die erarbeiteten Modelle im Folgenden vorgestellt.

5.1 Fehlerklasse 1: Fehler mit Verbraucherausfall

Fehler, die direkt zu einem Verbraucher-, beziehungsweise Steuergeräteausfall führen, sind *Kurzschluss*, *Leitungsbruch* und das *unbeabsichtigte Öffnen eines Steckverbinders*. Durch eine Modellvorstellung in der elektrischen Domäne lassen sich die Fehler direkt in das Bordnetzmodell integrieren und das entsprechende Systemverhalten kann untersucht werden. Die Veränderung einer modellierten Leitung im Fehlerfall ist in Abbildung 6 und in Abbildung 7 dargestellt, die fehlerfreie Leitung ist dabei jeweils links, die fehlerbehaftete Leitung jeweils rechts abgebildet.

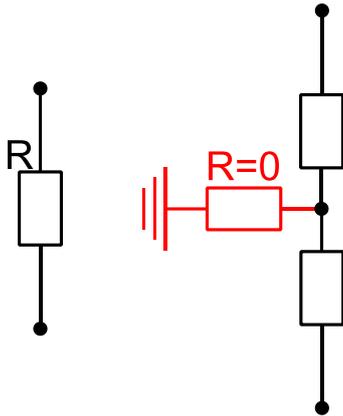


Abbildung 6 – Modellanpassung des Leitungsmodells im Fehlerfall Kurzschluss

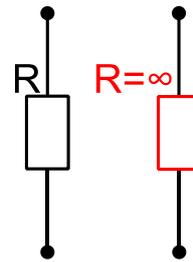


Abbildung 7 – Modellanpassung des Leitungsmodells im Fehlerfall Leitungsbruch, beziehungsweise unbeabsichtigte Öffnung eines Steckverbinders

Beide vorgestellten Fehler können sowohl in einer Verbraucherleitung als auch in einem Sicherungsträgerverbinder auftreten (Ausnahme: Massebruch). Dies hat den Ausfall von entweder lediglich einem oder direkt mehreren Verbrauchern zur Folge.

5.2 Fehlerklasse 2: Fehler mit sporadischem Verbraucherausfall

Fehler der Fehlerklasse 2 haben eine große Ähnlichkeit zu Fehlern der Fehlerklasse 1. Wenn ein Kurzschluss, Leitungsbruch oder die unbeabsichtigte Öffnung eines Steckverbinders jedoch nicht permanent auftreten, sondern nur kurzzeitig das Gesamtsystem beeinflussen, bleiben die Verbraucher nicht dauerhaft von der Versorgung ausgeschlossen. In diesem Fall weisen sie lediglich einen sporadischen Ausfall auf. Die Fehlermodelle, die in Abbildung 6 und Abbildung 7 vorgestellt wurden, ändern sich dann nur in der Art der Fehlerwiderstände (rot dargestellt, siehe Abbildung 8 und Abbildung 9). Solche Fehler werden meist als *Wackelkontakt gegen Masse* oder *Wackelkontakt im Steckverbinder* bezeichnet.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

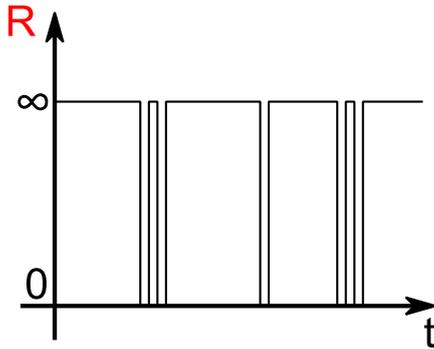


Abbildung 8 – Fehlerwiderstandsvariation im Falle eines Wackelkontaktes gegen Masse; beispielhafter charakteristischer Verlauf

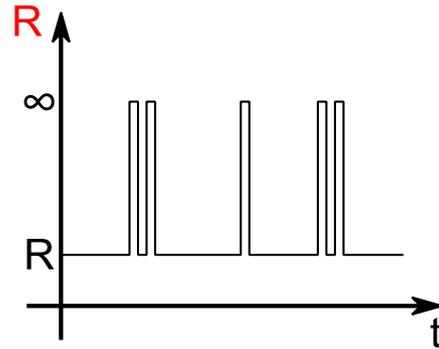


Abbildung 9 – Fehlerwiderstandsvariation im Falle eines Wackelkontaktes im Steckverbinder; beispielhafter charakteristischer Verlauf

In diesem Fall reicht eine reine Arbeitspunktanalyse nicht aus, sondern der zeitliche Verlauf muss betrachtet werden.

5.3 Fehlerklasse 3: kritische Veränderung ohne direkten Verbraucherausfall

Neben den bereits in den Fehlerklassen 1 und 2 beschriebenen Fehlern, die einen direkten Verbraucher-/Steuergeräteausfall zur Folge haben, gibt es auch solche Veränderungen, die nicht unmittelbar kritische Auswirkungen haben, auf lange Sicht jedoch einen (Teil-)Systemausfall bewirken können. Zusätzlich verschlechtern diese Veränderungen bereits in einem frühen Stadium die Systemeigenschaften des Energiebordnetzes. Zu nennen sind *Kontaktalterung*, beziehungsweise Korrosion o.Ä. und *schleichende Kurzschlüsse*, beziehungsweise Isolationsermüdung/Isolationsfehler. Entsprechende Modelle im Hinblick auf eine Systemanalyse im Arbeitspunktbereich sind in Abbildung 10 und Abbildung 11 zu finden.

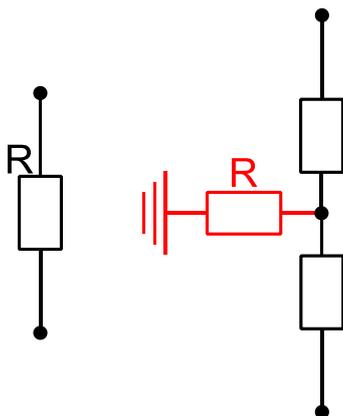


Abbildung 10 – Modellanpassung des Leitungsmodells im Falle eines schleichenden Kurzschlusses

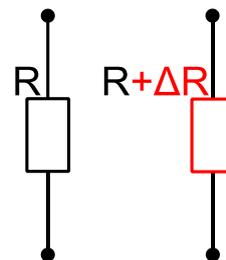


Abbildung 11 – Modellanpassung des Leitungsmodells im Falle von Kontaktalterung oder z.B. Korrosion

Im Falle eines schleichenden Kurzschlusses bildet sich ein Fehlerwiderstand aus, der nicht klein genug ist, um die Funktionsweise des Gesamtsystems zu stören, der jedoch unkontrolliert Fehlerströme i_F gegen Masse abfließen lässt.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Im Falle der Kontaktalterung vergrößert sich der natürliche Leitungs- und/oder Kontaktwiderstand R um ein ΔR , welches jedoch ebenfalls nicht direkt ausreicht, um das Gesamtsystem in seiner Funktionsweise zu stören. Bei den hier beschriebenen Fehlern handelt es sich um langfristige Änderungen, die jedoch nach einiger Zeit zu Funktionsbeeinträchtigungen führen können.

5.4 Fehlerklasse 4: Lichtbögen

Speziell vor dem Hintergrund einer Spannungsanhebung von 12 V auf 48 V werden Lichtbögen zu einer weiteren kritischen Gefahr für das Leitungsnetz inklusive seiner Steckverbinder und Kontakte.

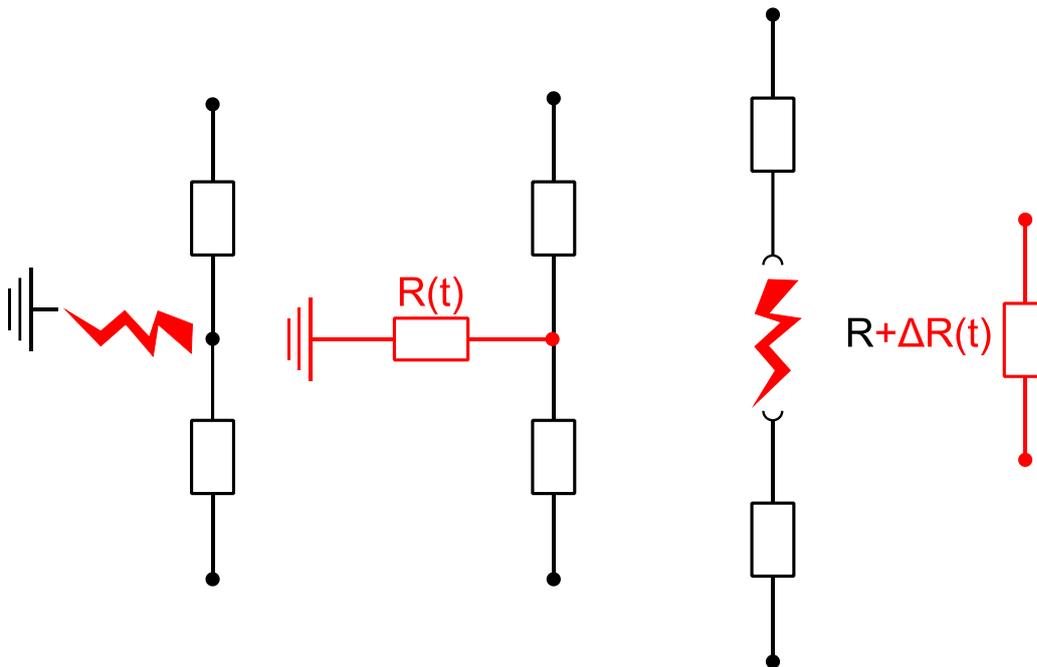


Abbildung 12 – Modellierung eines Lichtbogens gegen Masse als zeitabhängiger Widerstand

Abbildung 13 – Modellierung eines Lichtbogens im Steckverbinder als zeitabhängige Widerstandsänderung des Leitungsmodells

Je nach Verlauf des Ersatzwiderstandes werden Fehlerbilder von Fehlern der Klassen 1 bis 3 durchlaufen. Da dies in der Regel im Verhältnis schnelle Vorgänge sind, ist der Ersatzwiderstand als zeitabhängige Größe dargestellt, also $R(t)$, beziehungsweise $\Delta R(t)$.

Da bei einem Lichtbogen gegen Masse bei einer Lichtbogenzündung von Masseberührung ausgegangen wird, kann dieser Fehler analog zu einem Wackelkontakt gegen Masse betrachtet werden. Durch diese Gemeinsamkeit werden Betrachtungen vereinfacht und trotzdem keine relevanten Fehler außer Acht gelassen.

6 Überwachungskonzept

Auf Basis der angestellten Vorüberlegungen lässt sich ein Überwachungskonzept formulieren, welches dazu dient, viele der beschriebenen Fehler und Veränderungen zu erkennen, zu klassifizieren und nach Möglichkeit zu lokalisieren. Dieses Konzept besteht aus einer permanenten Überwachung der Ströme und Spannungen in den Verbrauchern, sowie einem Diagnoseprozess bei Verbraucherausfall.

6.1 Permanente Überwachung

Auf Basis der Strom- und Spannungsinformationen aus den Verbrauchern bzw. den Steuergeräten werden Fehlerströme und Leitungswiderstände in einem zentralen Steuergerät permanent berechnet. Der Gesamtfehlerstrom ist als Abweichung zwischen Batteriestrom und Summe aller Verbraucherströme definiert. Im betrachteten Beispielbordnetz, siehe Abbildung 5, bedeutet das:

$$i_B - \sum_{n=1}^5 i_n = i_F \quad (1)$$

Mit Hilfe einer permanenten Überwachung können also alternde Kontakte, beziehungsweise Leitungswiderstandserhöhungen und schleichende Kurzschlüsse festgestellt werden. Durch die Detektion von Änderung der Leitungswiderstände können ebenfalls Lichtbögen erkannt werden. Für diese Erkennung sind genauere Informationen über die charakteristischen Eigenschaften von Lichtbögen notwendig.

Lichtbogenerkennung

Kontakalterungserscheinungen bedeuten in einem Großteil aller Fälle zunächst eine kleine Widerstandsveränderung im Vergleich zu dem Effekt, den ein Lichtbogen hat. In Abbildung 14 ist ein Teilbordnetz des in Abbildung 5 beschriebenen Gesamtbordnetzes abgebildet. R_{LB} stellt dabei die Batterie-zuleitung, beziehungsweise die Zuleitung zur Spannungsquelle dar, R_{L4} ist das Leitungsmodell für die Zuleitung zu Verbraucher R_4 . Man trifft die Annahme, dass $R_{L4} \gg R_{LB}$ im Falle eines seriellen Lichtbogens in der Verbraucherleitung von R_4 . In diesem Fall gilt $v_{L4} + v_4 = v_B$. Durch die vorhandenen Strom- und Spannungsmessungen kann der Spannungsabfall am Lichtbogen berechnet und so seine Widerstandscharakteristik bestimmt werden.

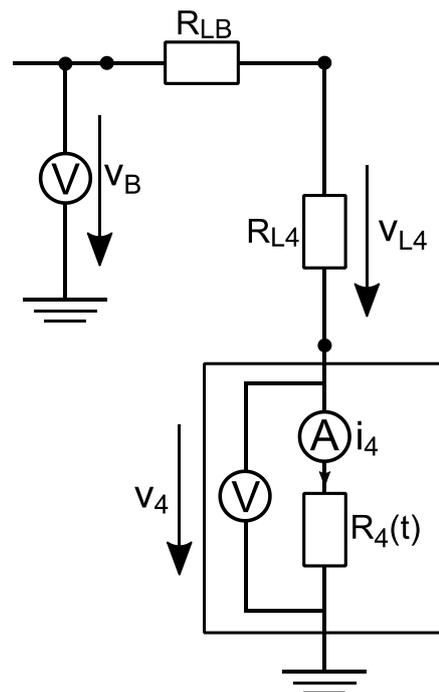


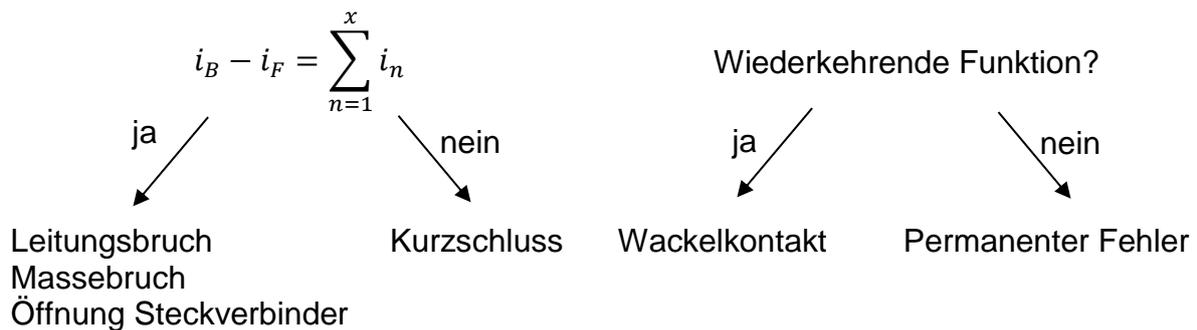
Abbildung 14 – Teilbordnetz zur Verdeutlichung einer möglichen Lichtbogenerkennung im Arbeitspunktbereich

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Die Unterscheidung zwischen einem Lichtbogen in einer Steuergeräte-Verbraucherleitung oder einem Sicherungsträgerverbinder kann durch die Betrachtung der gemeinsamen Leitungen der betroffenen Steuergeräte berücksichtigt werden.

6.2 Diagnose nach Verbraucherausfall

Im Falle eines Verbraucherausfalles kann eine einfache Rule-Engine die Fehlerklassifikation und -lokalisierung gewährleisten. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Sensoren der betroffenen, beziehungsweise ausgefallenen Verbraucher keine Daten mehr liefern und nicht mehr in eine Berechnung mit einbezogen werden.



Der Ort des Fehlers kann eingegrenzt werden, indem die gemeinsamen Leitungen der betroffenen Verbraucher betrachtet werden. Falls nur ein Verbraucher betroffen ist, liegt der Fehler in seiner Versorgungsleitung. Falls mehrere Verbraucher betroffen sind, liegt der Fehler in der letzten gemeinsamen Versorgungsleitung.

7 Experimentelle Validierung

Das vorgeschlagene Überwachungs- und Diagnosekonzept wurde im Rahmen eines experimentellen Aufbaus validiert. Der Messaufbau und die Ergebnisse dieser Validierung werden im Folgenden dargestellt.

7.1 Messaufbau

Die Untersuchungen wurden in einer Konfiguration wie in Abbildung 5 durchgeführt. Lichtbögen wurden im Rahmen einer Bordnetzuntersuchung mit 48 V betrachtet, alle anderen Fehler in einer 12 V Konfiguration. Die verwendeten Modellparameter wurden wie folgt festgesetzt:

R_1	\approx	1 Ω (12 V), 5 Ω (48 V)
R_2	\approx	9,5 Ω
R_3	\approx	8,7 Ω
R_4	\approx	13 Ω
R_5	\approx	5 Ω

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Aufgrund der Strom- und Spannungsüberwachung an den Steuergeräten sind diese Werte jederzeit verfügbar. Alle Messungen wurden mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 1,5 kSample/Sekunde durchgeführt.

7.2 Ergebnisse der Validierung

Kurzschluss

Je nach Fehlerort verursacht ein Kurzschluss im Leitungsnetz einen Ausfall von einem oder mehreren Verbrauchern. Da durch den Kurzschluss Strom an den Sensoren vorbei gegen Masse abfließen kann, kann aufgrund der großen und schlagartig ansteigenden Differenz zwischen der Summe der Verbraucherströme und dem Batteriestrom der Kurzschluss als Fehler bestimmt werden. Durch das Auslösen der Flachstecksicherung wechselt der Kurzschluss in der untersuchten Konfiguration zu einem Leitungsbruch. Der Gesamtstrom nimmt also ab. Die gemessenen Ströme sind in Abbildung 15 dargestellt.

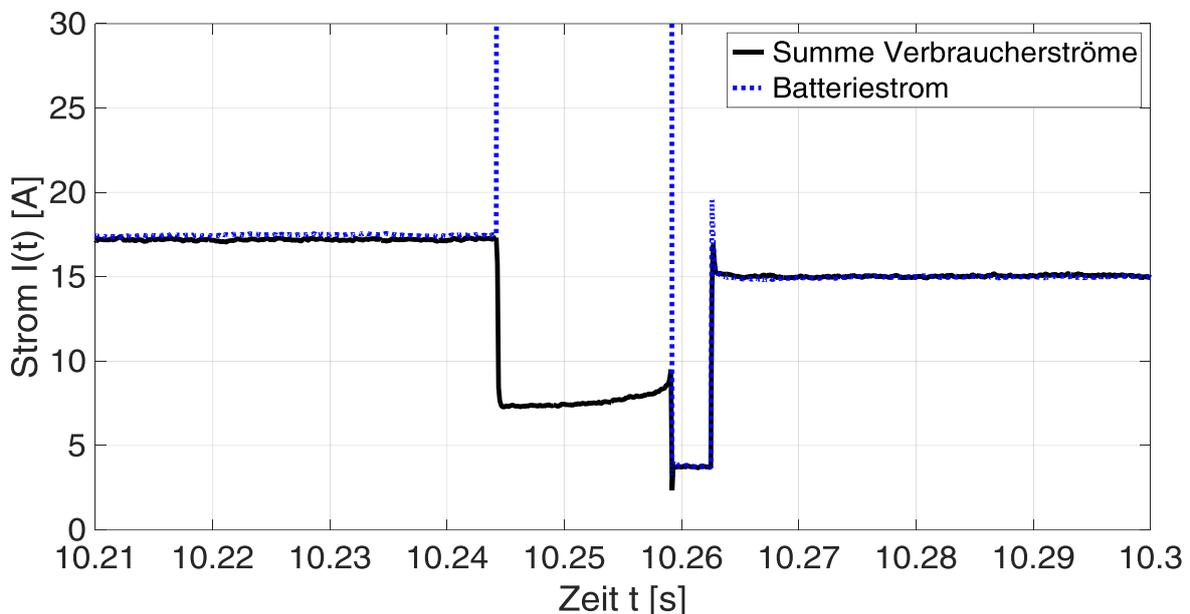


Abbildung 15 – Kurzschluss an der Versorgungsleitung von R_5
 F_5 : 15 A Schmelzsicherung

In heutigen Konfigurationen ist ein Kurzschluss durch Flachstecksicherungen abgesichert und die Detektion eines Leitungsbruchs folgt zeitlich der Detektion des Kurzschlusses. Jedoch kann aus der Kombination beider Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Kurzschluss und das Auslösen einer Flachstecksicherung geschlossen werden.

Leitungsbruch/Massebruch/Öffnung eines Steckverbinders

Das unbeabsichtigte Öffnen eines Steckverbinders hat ebenfalls einen Verbraucherausfall zur Folge. Durch die Betrachtung der Stromsummen kann der Kurzschluss ausgeschlossen und auf die Fehlerursache Leitungsbruch/Massebruch/Öffnung eines

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Steckverbinders geschlossen werden. Wieder gibt die Anzahl der ausgefallenen Verbraucher den Fehlerort an. Bei mehreren betroffenen Steuergeräten liegt der Fehler in der letzten gemeinsamen Versorgungsleitung. Die Verläufe von Batteriestrom und der Summe der Verbraucherströme ist in Abbildung 16 dargestellt.

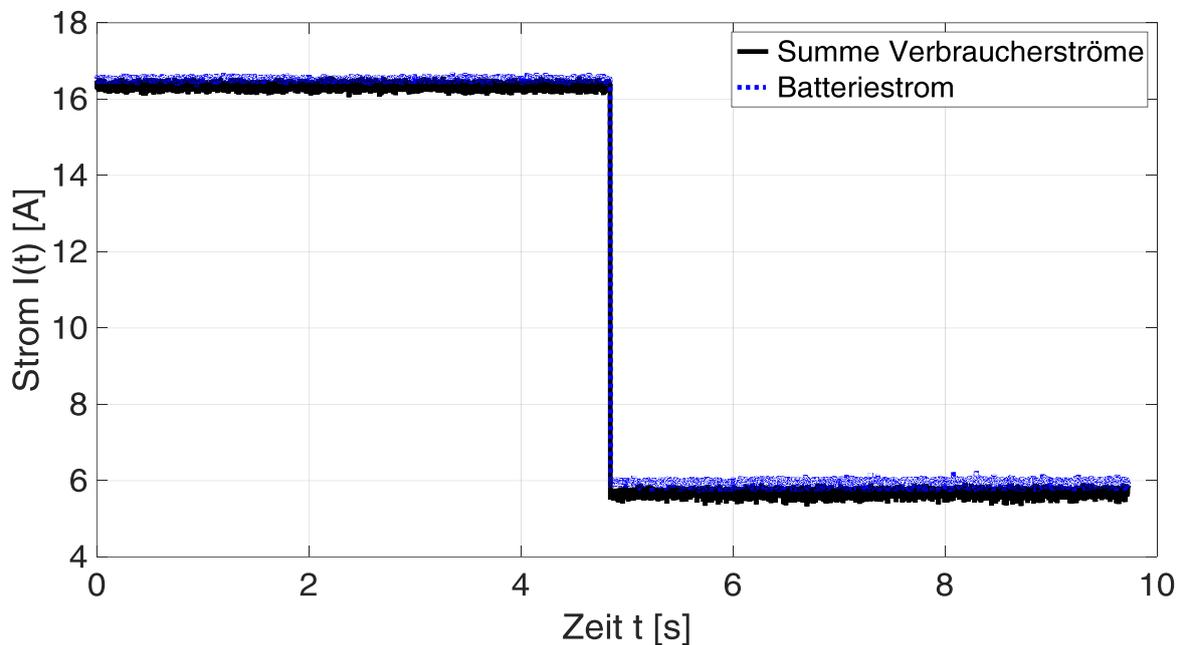


Abbildung 16 – Vergleich von Batterie- und der Summe der Verbraucherströme im Fall einer Öffnung eines Steckverbinders in der Versorgungsleitung von R_1

Wackelkontakt gegen Masse

Bei einem Wackelkontakt gegen Masse fallen je nach Fehlerort verschiedene Verbraucher sporadisch aus. Der Wackelkontakt ist jedoch durch die wiederkehrende Funktionsfähigkeit der Steuergeräte gekennzeichnet. Die Vorgänge sind so kurz, dass eine konventionelle Flachstecksicherung nicht auslöst. Der Batteriestrom vor und nach dem Fehler ist gleich, da das Gesamtsystem in den Normalzustand zurückkehrt. Stromverläufe im Fall eines Wackelkontaktes gegen Masse sind in Abbildung 17 dargestellt.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

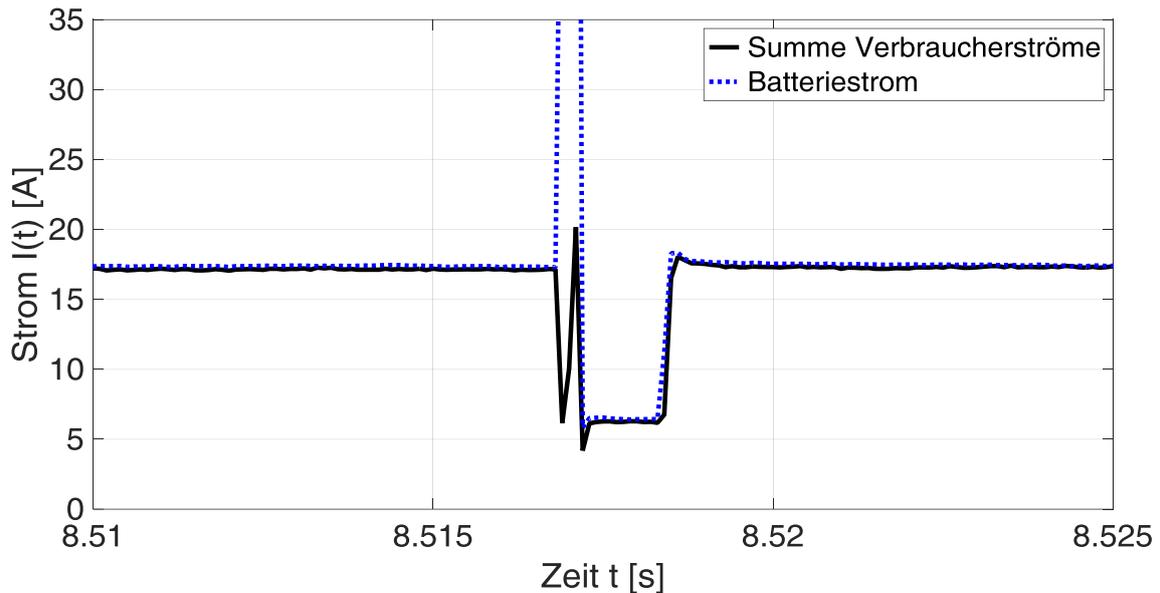


Abbildung 17 – Wackelkontakt gegen Masse an R_5 – kurzfristiger Verbraucherausfall, danach Normalzustand; F_5 : 15 A Schmelzsicherung

Wackelkontakt in Steckverbinder

Ein Wackelkontakt in einem Steckverbinder bedeutet, dass sich ein Steckverbinder mehrfach öffnet und wieder schließt. Die Funktion des angeschlossenen Steuergerätes ist also nur sporadisch gegeben. Der Vergleich der Summe der Verbraucherströme und des Batteriestroms lässt bei einem sporadischen Verbraucherausfall auf einen Wackelkontakt im Zuge der Leitung schließen. Die Stromverläufe sind in Abbildung 18 visualisiert.

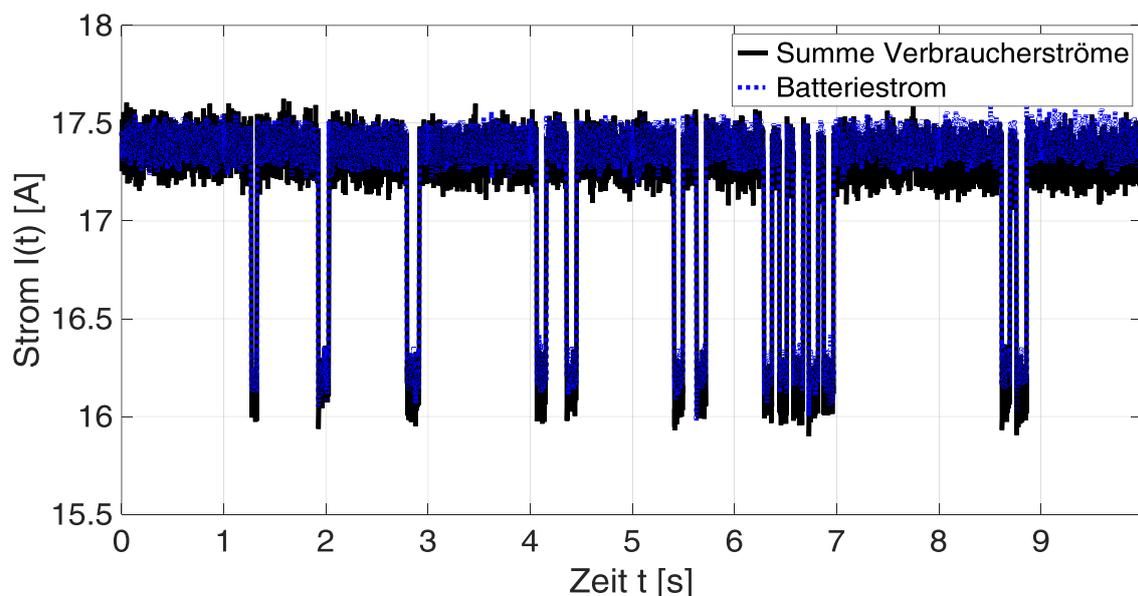


Abbildung 18 – Wackelkontakt in Steckverbinder; sporadischer Verbraucherausfall; charakteristisches Merkmal ist der konstante/sich nur leicht ändernde Fehlerstrom

Lichtbogen im Steckverbinder

Lichtbögen in Steckverbindern sind besonders kritische Fehlerfälle, weil hierbei nicht zwingend das angeschlossene Steuergerät ausfällt. Je nach Lichtbogenwiderstand kann es seine ursprüngliche Funktion weiterhin ausführen, trotzdem kann ein Lichtbogen erhebliche Schäden innerhalb eines Steckverbinders verursachen. Da kein Verbraucherausfall verzeichnet werden kann, gehört die Lichtbogenerkennung zum Bereich der permanenten Überwachung.

Im Zuge eines experimentellen Tests wurde ein serieller Lichtbogen in der Versorgungsleitung von R_5 analysiert.

Auf Basis des beschriebenen Konzeptes bei der Berechnung der Leitungswiderstände kann der Verlauf des Lichtbogenwiderstandes berechnet werden. Dieser ist in Abbildung 19 dargestellt.

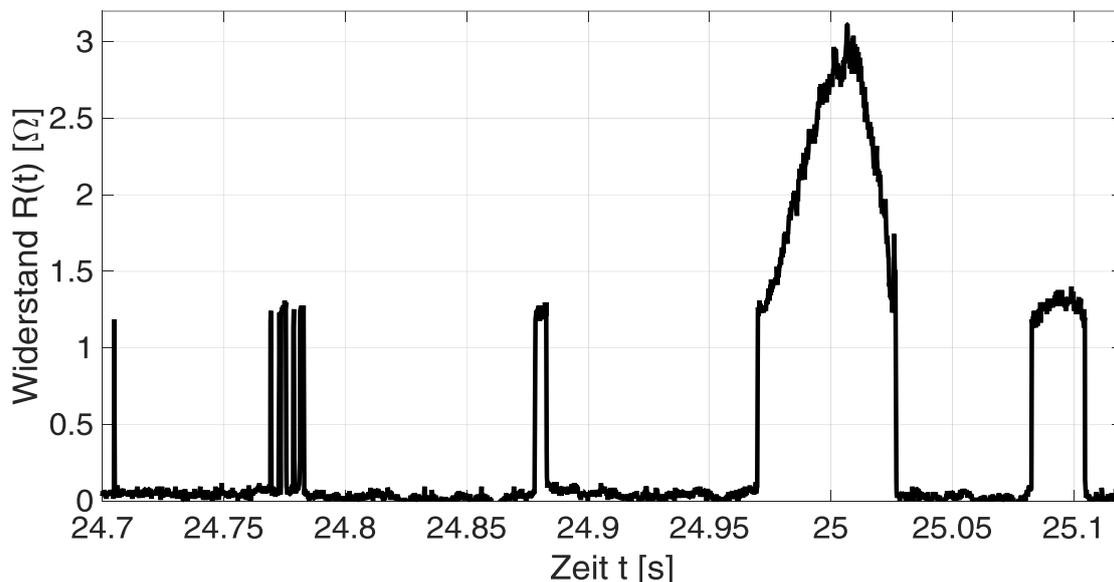


Abbildung 19 – Berechneter Lichtbogenwiderstand des Lichtbogens in einem Steckverbinder in der Versorgungsleitung von R_5

Lichtbogenwiderstände hängen von einer Vielzahl an Rahmenbedingungen ab. Eine genaue Kenntnis der charakteristischen Eigenschaften kann eine zuverlässige Lichtbogenerkennung auf Grundlage der vorgestellten Berechnungsstrategien ermöglichen.

Schleichende Kurzschlüsse/Isolationsermüdung/Isolationsfehler

Dadurch dass schleichende Kurzschlüsse im Normalfall nur geringe Fehlerströme gegen Masse abfließen lassen, hängt die Bestimmung stark von der Messgenauigkeit der verwendeten Sensorik ab. Sobald jedoch größere Ströme gegen Masse abfließen, kann das vorgeschlagene Konzept auch einen schleichenden Kurzschluss bestimmen. Mit der statischen Analyse ist eine exakte Lokalisierung nicht möglich. Aufgrund der genannten Probleme kann in diesem Fall nur eine Worst- und eine Best-Case-Betrachtung durchgeführt werden, von der die Worst-Case-Betrachtung die für die weitere Fehlerbehandlung ausschlaggebende ist.

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Die Worst-Case-Betrachtung nimmt einen Fehlerwiderstand an, der im Betriff ist, sich zu einem Kurzschluss zu entwickeln, der also bereits einen fast kritischen kleinen Widerstand aufweist.

Aufgrund des Spannungsabfalles sind Fehlerwiderstände, die direkt an der Quelle auftreten besonders kritisch. Der Worst-Case Fehlerwiderstandswert wird also direkt mit der Batterie- oder Generatorspannung und dem gemessenen Fehlerstrom berechnet:

$$R_F = v_B / i_F.$$

Innerhalb dieser Worst-Case-Betrachtung können Grenzen definiert werden, deren Unterschreitung zu der Annahme eines Fehlers führen kann und somit eine konkrete Fehlerbehandlung zur Folge haben.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein neues Diagnosekonzept für Kfz-Energiebordnetze vorgestellt. Unter der Annahme, dass Steuergeräte eine Strom- und Spannungsüberwachung besitzen und diese Sensorwerte über einen Bus einem zentralen Steuergerät zur Verfügung stellen können, wurde gezeigt, dass diese Sensordatenfusion einen Mehrwert im Hinblick auf eine Überwachung und Diagnose des Leitungsnetzes generieren kann.

Zur einheitlichen Beschreibung von Kfz-Bordnetzen wurden seine statischen Eigenschaften genutzt, um Modelle anzufertigen. Die genannten möglichen Fehler im Leitungsnetz wurden ebenfalls modelliert. Zusätzlich konnte eine Einteilung dieser in verschiedene Klassen vorgenommen werden. Aus dieser Betrachtung konnte ein Konzept abgeleitet werden, welches mit Hilfe einer Sensordatenfusion in einem zentralen Steuergerät, wie z.B. dem Gateway, Fehler detektiert, klassifiziert und nach Möglichkeit lokalisiert. Mit Hilfe eines Versuchsaufbaus und verschiedenen erzeugten Fehlerfällen konnten konkrete Anwendungen für das vorgeschlagene Konzept gezeigt werden.

Eine einschätzende Zusammenfassung der Potentiale des vorgestellten Konzeptes ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1 – Einschätzende Zusammenfassung der Konzeptfähigkeiten

Fehlerart	Detektion	Klassifikation	Lokalisierung
Kurzschluss	++	++	++
Leitungsbruch	++	0	+
Massebruch	++	0	+
Öffnung Steckverbinder	++	0	+
Wackelkontakt gegen Masse	++	++	++
Wackelkontakt in Steckverbinder	++	+	0
Schleichender KS	+	+	--
Kontaktalterung	+	+	0
Lichtbogen (gegen Masse)	+	0	0
Lichtbogen (in Steckverbinder)	+	+	+

Mit den vorgestellten Methoden können nicht alle beschriebenen Fehler voneinander unterschieden werden. Es ist z.B. nicht möglich, zwischen einem Leitungsbruch, der Öffnung einer Steckverbindung in der Versorgungsleitung eines Steuergerätes und einem Massebruch zu unterscheiden. Weiterhin kann nicht zwischen der Kontaktalte-

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

rung und der Erhöhung des Widerstandes des Masseverbinders unterschieden werden. Fehler dieser Art haben funktionstechnisch gleiche Auswirkungen. Daher ist eine Unterscheidung nicht unbedingt notwendig. Ähnlich verhält es sich bei z.B. einem Lichtbogen gegen Masse und einem Wackelkontakt gegen Masse, auch hier kann nicht eindeutig unterschieden werden. Weiterhin sind schleichende Kurzschlüsse mit der gezeigten Methode nicht lokalisierbar. Dynamische Messungen im Zeit- und Frequenzbereich könnten hier Abhilfe schaffen.

Die Genauigkeit der Fehlererkennung, -klassifikation und -lokalisierung des vorgestellten Konzeptes hängt teilweise von der Auflösung der zur Verfügung stehenden Messwerte ab. Speziell die Untersuchung auf Kontaktalterung benötigt eine relativ genaue Strom- und Spannungsüberwachung, und die Lichtbogenuntersuchung benötigt eine relativ feine zeitliche Auflösung. Speziell im Bereich der Lichtbogenuntersuchungen stehen zusätzlich noch spezielle Untersuchungen aus, die die charakteristischen Signalverläufe der Strom- und Spannungswerte untersuchen. Auf dieser Basis könnte eine robuste Lichtbogenerkennung erfolgen.

In der vorliegenden Arbeit wurden alle Überlegungen basierend auf statischen Arbeitspunkten angestellt. Da in realen Bordnetzen Steuergeräte sehr dynamisch ihr Verhalten ändern können, ist für einen Einsatz in realen Energieversorgungsnetzen eine Erweiterung der Modelle nötig.

Weiterhin ist die Verfügbarkeit von Messwerten ein entscheidender Aspekt, der in zukünftigen Untersuchungen betrachtet werden muss. Verschiedene Verfahren für Messwerteübertragungen sind hier denkbar.

Insgesamt zeigt das erarbeitete Überwachungs- und Diagnosekonzept erhebliches Potential, um verschiedene Fehler frühzeitig erkennen zu können und damit idealerweise einem Systemausfall im Fahrbetrieb vorzubeugen. Durch die Klassifizierung und Lokalisierung können defekte Komponenten bestimmt werden und notwendige Reparaturen könnten gezielt erfolgen.

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] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin und S.N. Kavuri, „A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods“, Elsevier Science Ltd., 2003.
- [2] R. Ghimire, C. Sankavaram, A. Ghahari, K. Pattipati, Y. Ghonheim, M. Howell und M. Salman, “Integrated Model-based and Data-driven Fault Detection and Diagnosis Approach for an Automotive Electric Power Steering System“, IEEE, 2011

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

- [3] S. Jiye, W. Rixin, X. Minqiang, G. Jingbo, „Model-based Fault Diagnosis for the Spacecraft Power System”, IEEE, 2007
- [4] C. Sankavaram, B. Pattipati, A. Kodali, K. Pattipati, M. Azam, S. Kumar, M. Pecht, “Model-based and Data-driven Prognosis of Automotive and Electronic Systems”, IEEE, 2009
- [5] J. Shao, H. Wan, H. Huang, Y. Liu, K. Wang, “Study on Modeling and Diagnosis of The Satellite Power System”, IEEE, 2012

1A.x Modellbasiertes on-line Monitoring des Energiebordnetzes durch Kombination physikalischer Systemmodelle mit Parameteridentifikationsmethoden

Autoren / *The Authors*:

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