

Modellbasierte Fehlererkennung im Kfz-Bordnetz

Michael Kiffmeier, TU Dortmund, Dortmund, michael.kiffmeier@tu-dortmund.de
Stephan Frei, TU Dortmund, Dortmund, stephan.frei@tu-dortmund.de

Kurzfassung

Für den zuverlässigen Betrieb eines Kfz ist eine funktionierende Energieversorgung unbedingt notwendig. Während in den elektronischen Verbrauchern die Diagnosemöglichkeiten seit vielen Jahren stetig zunehmen, ist der Zustand des physikalischen Bordnetzes kaum beobachtbar. Fehler werden zum Teil nur durch ausgefallene Systeme und aufgeschmolzene Sicherungen erkennbar. Eine genaue Lokalisierung kann sehr aufwendig sein. In diesem Beitrag wird durch eine systematische Einteilung von Verbrauchern, verfügbaren Informationen und möglichen Fehlern innerhalb eines Bordnetzes eine Grundlage geschaffen, um über die Fusion von Strom- und Spannungsdaten aus den elektrischen Verbrauchern Rückschlüsse auf das Bordnetz bzw. nicht diagnosefähige Verbraucher zu ziehen. Neben einer Diskussion der möglichen Ansätze und Potentiale wird in diesem Beitrag exemplarisch eine Methode vorgestellt, die basierend auf einer Knotenanalyse ein Teilbordnetz überwacht und Informationen über Fehler liefert.

Abstract

Reliable energy supply systems within automotive vehicles are very important. But the physical conditions are not easy to observe in nowadays systems. Failures only get noticed by damaged fuses or totally broken control units and loads. A precise localization can be very complicated. In this article a systematic classification of loads, information and failures is suggested in order to detect and isolate faults and changes within the above mentioned systems, based on current and voltage measurements. A sensor fusion approach provides an option to identify failures. Beside discussions about possible approaches, a specific method is presented. This method bases on a nodal analysis and is able to monitor certain parts of the on board energy supply system.

1 Einleitung

Ein Kfz-Energiebordnetz dient dazu, alle Verbraucher mit Energie zu versorgen. Diese elektrischen Verbraucher können sehr unterschiedlich beschaffen sein. Oft besitzen sie verschiedene Überwachungs- beziehungsweise Messeinheiten für die Versorgungsspannung und evtl. auch den aufgenommenen Strom, sowie die Möglichkeit, über einen Datenbus zu kommunizieren. Einige dieser Bordnetzeigenschaften werden in Abbildung 1 anschaulich dargestellt.

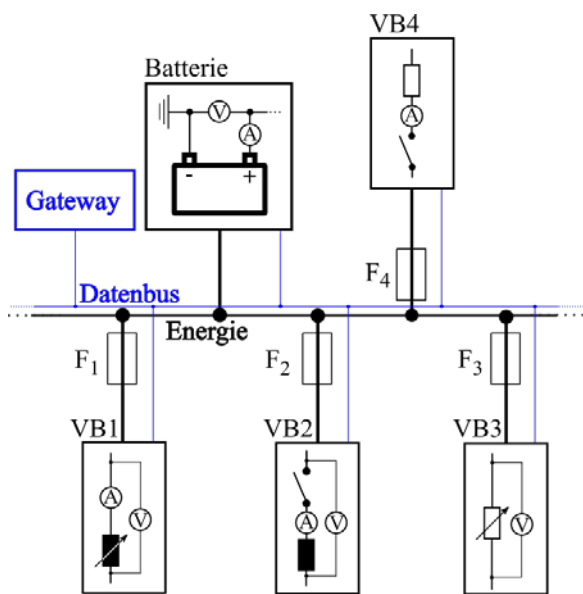


Abbildung 1 – Mögliche Struktur eines Energiebordnetzes mit verschiedenen Verbrauchern und Mess- und Kommunikationseinrichtungen

Durch die steigende Anzahl der Verbraucher und die Relevanz der durch intelligente elektrische Systeme übernommenen Aufgaben nehmen auch die Anforderungen an die Betriebssicherheit des Energieversorgungsbordnetzes zu. Die Wahrscheinlichkeit, sowie die Auswirkungen von Fehlern, die auftreten können, werden zukünftig in einen kritischen Bereich verschoben, sodass nicht nur fatale Fehler, wie beispielsweise ein Kurzschluss durch z.B. Flachstecksicherungen, abgesichert werden müssen, sondern auch präventive Maßnahmen an Bedeutung gewinnen. Isolationsermüdung, schleichende Kurzschlüsse, Kontaktalterungserscheinungen und im 48 Volt-Netz auch sporadische Lichtbögen deuten schwere Fehler an, die möglichst frühzeitig erkannt werden sollten.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Versorgungsleitung eines Verbrauchers. Im Verlauf der Leitung, vom Abgriff der Batteriespannung über die Sicherung bis zum Verbraucher VB , sind verschiedene Fehler skizziert, ein Leitungsbruch, ein Kurzschluss bzw. Lichtbogen nach Masse, eine Kontaktalterung mit Z_K und ein Isolationsschaden mit Z_E (von rechts nach links).

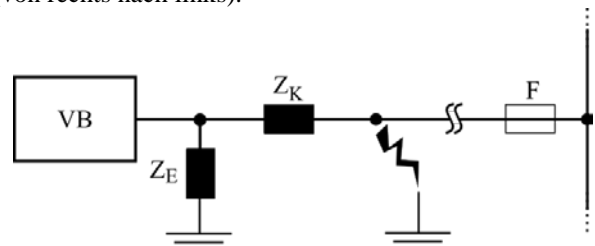


Abbildung 2 – Exemplarische Versorgungsleitung mit verschiedenen Fehlern

Zusätzlich zu Fehlern im Leitungsnetz können auch direkt die Verbraucher von kritischen Veränderungen betroffen sein. So ist es zum Beispiel möglich, dass eine veränderte Stromaufnahme eine bald auftretende Fehlfunktion eines Verbrauchers ankündigt.

Durch eine zentrale Weiterverarbeitung der im Bordnetz an verschiedenen Stellen vorhandenen Spannungs- und Strominformationen ergeben sich neue Möglichkeiten, Fehlerzustände und Veränderungen im Bordnetz zu detektieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Auf diesem Weg ist es möglich, das Gesamtbordnetz mit geringem zusätzlichen Aufwand zu überwachen und somit eine erhöhte Funktionssicherheit herzustellen.

Ziel der hier gezeigten Untersuchungen ist es, die Potentiale und Grenzen einer zentralen Verarbeitung aller bordnetzrelevanten Daten aufzuzeigen.

1.1 Eigenschaften eines Bordnetzes

Für eine indirekte Fehlererkennung ist es nötig, die möglichen Fehler und Fehlerursachen, sowie die angeschlossenen Verbraucher und zur Verfügung stehenden Informationen bzw. Messwerte zu klassifizieren und zu bewerten. Mit Hilfe dieser Einteilungen können für verschiedene Kombinationen Erkennungsalgorithmen entwickelt und untersucht werden.

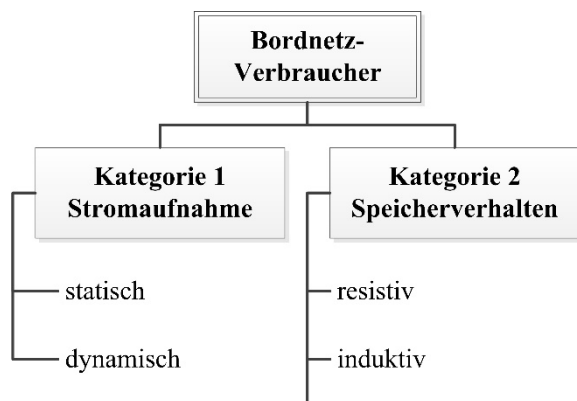


Abbildung 3 - Klassifizierung der Verbraucher innerhalb des Energiebordnetzes

Die Unterteilung der Verbraucher innerhalb des Energiebordnetzes erfolgt auf Basis des in Abbildung 3 vorgestellten Diagrammes. Eine Unterteilung der Art der Stromaufnahme und inwieweit ein System ein Speicherverhalten zeigt erlaubt es, eine große Anzahl relevanter Verbraucher abzudecken.

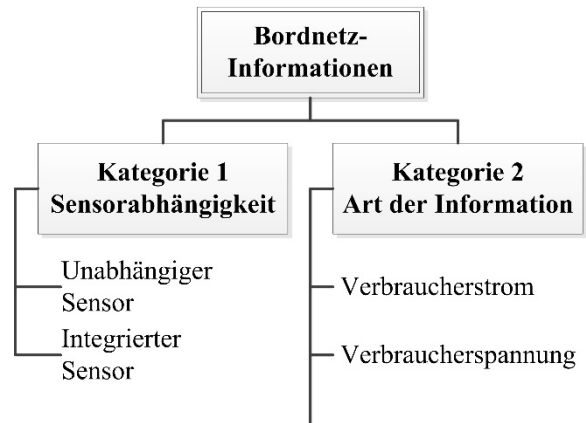


Abbildung 4 - Klassifizierung der Informationen innerhalb des Energiebordnetzes

Die Abhängigkeit und die Art der Informationen, die in einem Bordnetz vorhanden sein können, lassen sich mit Hilfe von Abbildung 4 beschreiben.

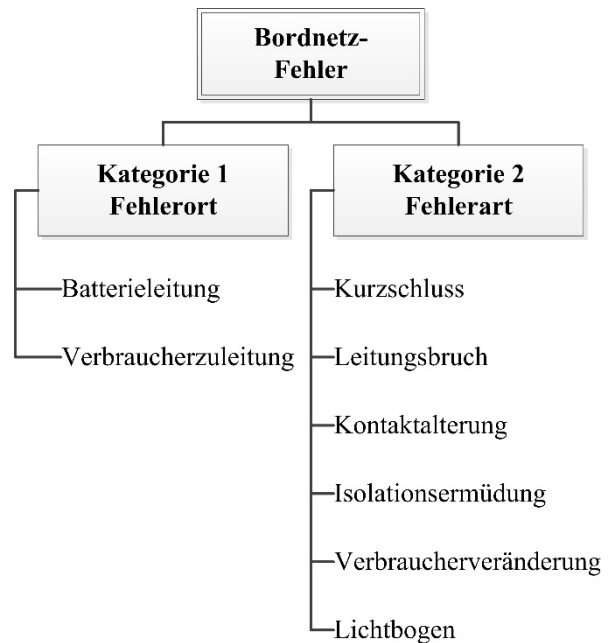


Abbildung 5 - Klassifizierung von Fehlern, die in einem Energiebordnetz auftreten können

Eine Auflistung möglicher Fehler im Bordnetz ist in Abbildung 5 zu finden.

Eine leistungsfähige Fehlererkennung sollte alle Kombinationen der aufgeführten Kategorien abdecken können. Eine Möglichkeit der sukzessiven Erarbeitung von Erkennungsstrategien liegt in der Erprobung isolierter Algorithmen für spezielle Konfigurationen der oben aufgeführten Fälle.

Die Grenzen der Algorithmen hängen stark von der möglichen Genauigkeit und zeitlichen Auflösung der zur Verfügung stehenden Messdaten und den Verarbeitungsmöglichkeiten ab. Daher stellen diese zwei Kriterien eine Untersuchungsgrundlage für vorgeschlagene Überwachungskonzepte dar.

1.2 Fault Detection and Isolation - FDI

Fehlererkennung innerhalb bestimmter Systeme oder Prozesse ist eine Querschnittsdisziplin, die auf verschiedene Bereiche angewendet werden kann. Im größeren Kontext des „Abnormal Event Managements“ (AME) [1] findet sich das Gebiet der „Fault Detection and Isolation“ (FDI). Innerhalb dieser Disziplin lassen sich drei wesentliche Ansätze abgrenzen [2].

Der ‚modellbasierte Ansatz‘ basiert auf einer physikalischen Modellierung des Systems und der Arbeit mit mathematischen Ausdrücken zur Beschreibung des modellierten Systems. Durch die physikalische Modellierung ist fundiertes Systemwissen ein zentraler Punkt innerhalb dieses Ansatzes. Der ‚datenbasierte Ansatz‘ modelliert ein System auf Basis von gesammelten oder erzeugten Daten, wobei physikalisches Systemwissen bei diesem Ansatz nicht unbedingt nötig ist. Der ‚Wissen-basierte Ansatz‘ basiert auf der graphischen Darstellung von bekannten Eigenschaften, beispielsweise durch Petri-Netze oder Bayes’sche Netze [3].

Das allgemeine Vorgehen bei der Anwendung von Fehlererkennungskonzepten lässt sich grundlegend mit Hilfe von Abbildung 6 beschreiben:

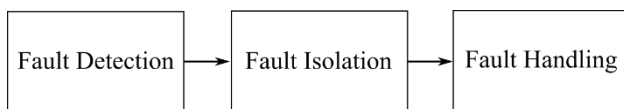


Abbildung 6 - FDI Framework inkl. Fehlerbehandlung

Die Feststellung, dass innerhalb des beobachteten Systems eine Veränderung oder ein Fehler vorliegt, steht an erster Stelle und bildet somit die Basis. Die örtliche Lokalisierung des Fehlers stellt den zweiten Schritt dar. Erst durch diese Information wird der dritte Schritt möglich, die Fehlerbehandlung. Ausgehend von Ort und Art des erkannten Fehlers, können verschiedene Gegenmaßnahmen, wie zum Beispiel das gezielte Abschalten eines Bordnetzbereiches, ausgewählt werden.

1.3 Fokus und Eingliederung des vorgestellten Konzeptes

In dieser Arbeit wird ein Konzept für eine modellbasierte Systemüberwachung vorgestellt, wie sie in Abbildung 7 dargestellt ist.

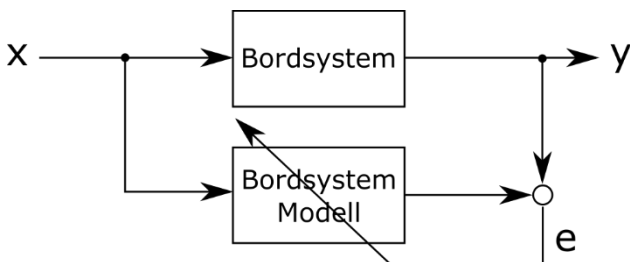


Abbildung 7 - modellbasierter Ansatz für die Bordsystem-Überwachung

Das beobachtete System besteht aus einer zunächst beliebigen Anzahl ohmscher Verbraucher, die zeitabhängig ein- und ausgeschaltet werden. Die genutzten Messwerte sind Strominformationen der einzelnen Leitungen, die beispielsweise durch zentrale Sensoren innerhalb der Sicherungsboxen mit einer bestimmten Frequenz aufgenommen werden. In diesem Beispiel sollen Leitungsbrüche erkannt werden.

Im Folgenden werden Methoden für die Simulation eines sich dynamisch verändernden zeitvarianten Systems beschrieben, mit denen ein modellbasierter Abgleich der Messdaten für eine Onlineüberwachung möglich ist. Es wird eine Modified Nodal Analysis (MNA) mit konstanter Admittanzmatrix angewendet. Die ersten beiden Blöcke aus Abbildung 6 werden mit dieser Methode abgedeckt. Zusätzlich findet eine online-Modellanpassung statt. Eine direkte Fehlerbehandlung ist nicht vorgesehen.

2 Modifizierte Knotenpotentialanalyse (MNA)

2.1 Grundlagen

Die Modifizierte Knotenpotentialanalyse (MNA) basiert auf der Auswertung der Kirchhoff’schen Maschen- und Knotengleichungen eines elektrischen Netzwerks zur Erzeugung eines linearen Gleichungssystems. Mit Hilfe verschiedener Stempelformalismen, wie sie z.B. in [4] zu finden sind, können direkt einzelne Elemente eines elektrischen Netzwerkes in die Admittanzmatrix \mathbf{G} und in den Anregungsvektor \vec{b} eingetragen werden. Ein statisches System läuft auf die folgende Darstellung hinaus

$$\mathbf{G} \cdot \vec{x} = \vec{b}. \quad (1)$$

Bei dynamischen Betrachtungen wird diese Darstellung um eine zweite Matrix \mathbf{W} erweitert

$$\mathbf{G} \cdot \vec{x} + \mathbf{W} \cdot \dot{\vec{x}} = \vec{b}. \quad (2)$$

Die in diesem Beitrag gewählte Topologie sieht zur vereinfachten Darstellung der Methode einfache Widerstände vor, wodurch eine Beschreibung durch Formel (1) ausreichend ist.

2.2 Schaltermodell

Um eine gute Performance zu erreichen, auch im Hinblick auf die spätere Implementierung auf einem Bordnetzsteuergerät, wird ein Verfahren ausgewählt, das es erlaubt, bei geänderter Schalterstellung die Admittanzmatrix \mathbf{G} konstant zu halten. Das Schaltermodell basiert auf einem 2013 von Razzaghi, R. *et al.* untersuchtem Konzept [5].

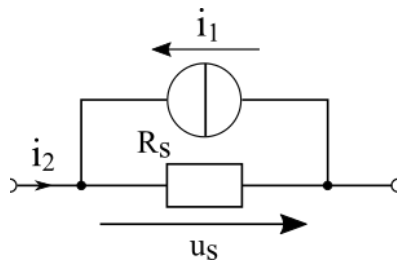


Abbildung 8 - verwendetes Schaltermodell [5]

Hierbei wird eine „History-based“ Current Source verwendet, die bei geöffnetem Schalter dem entstehenden Stromfluss entgegenwirkt [5]

$$i_1^{n+1} = -i_2^n \quad (3)$$

und bei geschlossenem Schalter den entstehenden Stromfluss an R_s vorbeileitet [5]

$$i_1^{n+1} = u_s^n / R_s \quad (4)$$

Die dargestellten Stromwerte sind im Anregungsvektor \vec{b} zu aktualisieren.

Das so realisierte Verhalten besitzt den Nachteil, dass Schaltaktionen nur näherungsweise abgebildet werden können. Zur Steigerung der Genauigkeit wurden die Schalterwiderstände R_s analog zum verwendeten Lastwiderstand im gleichen Strang ausgewählt.

3 Anwendungsbeispiel

3.1 Untersuchte Struktur und Algorithmus

Bei dem hier gezeigten Beispiel wurde angenommen, dass jeder vorhandene Verbraucher über eine unabhängige Stromüberwachung verfügt. Diese Daten werden mit einer bestimmten Frequenz über einen Bus zur Verfügung gestellt.

Die verwendete Bordnetztopologie ist in Abbildung 9 zu finden. Sie besteht aus einer realen Quelle, die eine Batterie darstellen kann, und drei ohmschen Widerständen, die jeweils einen niederohmigen ($R_1 = 0,25 \Omega$), einen mittleren ($R_2 = 2 \Omega$) und einen hochohmigen ($R_3 = 10 \Omega$) Verbraucher repräsentieren. Der Quellen-Innenwiderstand R_{in} wurde zu $10 m\Omega$ angenommen, die Spannung der idealen Quelle $U = 13 V$. Eine solche Topologie lässt sich leicht erweitern und der Ansatz auf beliebig große Netzwerke ausweiten.

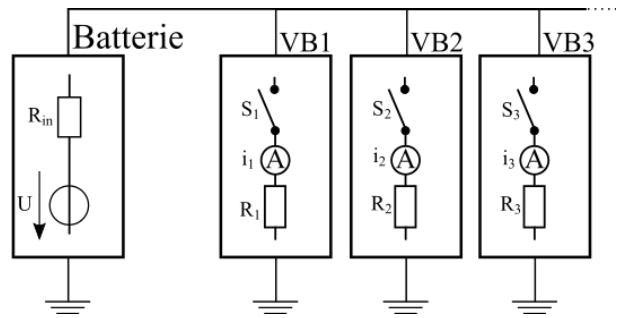


Abbildung 9 - Untersuchte Struktur

Die in der oben gezeigten Topologie zu findenden Schalter wurden wie in

Abbildung 8 modelliert. Die Admittanzmatrix \mathbf{G} , der Anregungsvektor \vec{b} und der Lösungsvektor \vec{x} können auf Basis einer Netzliste erstellt werden.

Die wesentlichen Punkte der online Überwachungs- und Anpassungsstrategie können folgendem Pseudocode entnommen werden. Hierbei stellt t die fortschreitende Simulationszeit dar.

```

1 : while( $t < \text{Simulationsende}$ ) do
2 :    $\vec{b}$  gemäß Schaltermodell aktualisieren
3 :    $\vec{x}$  (MNA) berechnen
4 :   if  $t = \text{Kontrollpunkt}$  gemäß RI
5 :     Residuum  $r$  berechnen
6 :     if ( $r$  innerhalb Toleranz) then (/)
7 :     else Fehlerorte/–stränge prognostizieren
8 :     while ( $r_{neu} > r$ ) do
9 :        $\vec{b}$  anpassen gemäß Fehlerorten
10 :       $\vec{x}$  (MNA) berechnen
11 :      Residuum  $r_{neu}$  berechnen
12 :    end while
13 :   end if
14 : end if
15 :    $t = t + \Delta t$ 
16 : end while

```

Algorithmus 1 – FDI-Pseudocode

Der Anregungsvektor \vec{b} wird für jeden Zeitschritt bestimmt. Der Ergebnisvektor \vec{x} wird dann anhand des Anregungsvektors und der Systemmatrix \mathbf{G} berechnet. Das Residuum r wird auf Basis der berechneten Stromwerte und der direkt vom beobachteten System bereitgestellten Stromwerte gebildet.

Im Pseudocode lassen sich einige Schlüsselstellen identifizieren. Zum einen hängt der verbleibende Fehler aufgrund von Modellungenauigkeiten und aufgrund des verwendeten Schaltermodells von der Simulationsschrittweite Δt ab. Auf der anderen Seite bestimmt die Frequenz, mit der Informationen abgefragt werden können, bzw. das Intervall, das zwischen zwei Berechnungen von Residuen liegt (im Folgenden RI genannt), die Güte des Konzepts und somit den verbleibenden Fehler.

Beide Schlüsselstellen sind im Kfz-Umfeld kritische Größen. Die Simulationsschrittweite Δt wird durch die ausführende Hardware begrenzt und das Berechnungsintervall für die Residuen RI hängt von der Verfügbarkeit einer Kommunikation, also der Auslastung des Kommunikationsbusses ab.

Weiterhin ist die Prognose des Fehlerortes in Zeile 7 von besonderer Bedeutung. Hier wird angegeben, welche Reihenfolge bei der Suche nach der fehlerhaften Verbraucherzuleitung eingehalten werden muss, und somit wie oft die *while*-Schleife, Zeile 8 bis Zeile 12, wiederholt wird. Eine mögliche Bewertung des wahrscheinlichsten Fehlerstranges ist die Überprüfung der relativen Abweichung der Stromwerte zum Bemessungsstrom innerhalb eines Strangs, $r_x/I_{x,nenn} \cdot 100$ [%]. Diese Strategie kann verfolgt werden, wenn alle Strominformationen, wie in diesem Beispiel, zur Verfügung stehen.

Die Definition einer Toleranz für ein berechnetes Residuum hängt von einem vorher zu definierenden Fehler-schlauch ab. Da der Fokus hier auf der Erkennung von geschalteten Verbraucherzuleitungen bzw. Leitungsbrüchen innerhalb eines Stranges liegt, kann der Fehler-schlauch ΔI ausreichend groß gewählt werden. Bei einem nicht optimalen Verhältnis von Fehler-schlauch und Simulationsschrittweite $\Delta I/\Delta t$ besteht die Gefahr, dass durch eine zu langsame Konvergenz ein korrekt angepasstes Modell bei einer weiteren Residuum-Berechnung fälschlicherweise als fehlerhaft erkannt wird. Je größer die Simulationsschrittweite ist, desto langsamer ist die Konvergenz, und desto größer muss also der Fehler-schlauch gewählt werden.

Für die weitere Erprobung wurde ein Schaltmuster ausgewählt. Dieses beinhaltet alle möglichen Kombinationen innerhalb der vorhandenen Topologie. Die gleichzeitigen Schaltvorgänge erschweren die Überwachung, stellen jedoch ein realistisches Szenario dar. Das Schaltmuster ist in Abbildung 10 zu finden.

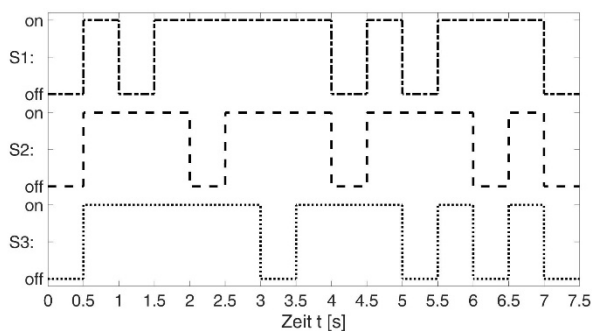


Abbildung 10 - definiertes Schaltmuster

3.2 Simulationsergebnisse

Das beschriebene Konzept wurde zunächst in einer reinen Simulation getestet. Hierzu wurde die untersuchte Netzwerkstruktur aus Abbildung 9 für die Schaltungssimulation implementiert und entsprechend dem definierten Schaltmuster, Abbildung 10, variiert. Zeitgleich wurde das aufgestellte Gleichungssystem, wie in Formel (1), entsprechend dem Pseudocode in Algorithmus 1 gelöst und

angepasst. Das Ergebnis dieser Simulation ist in Abbildung 11 gezeigt.

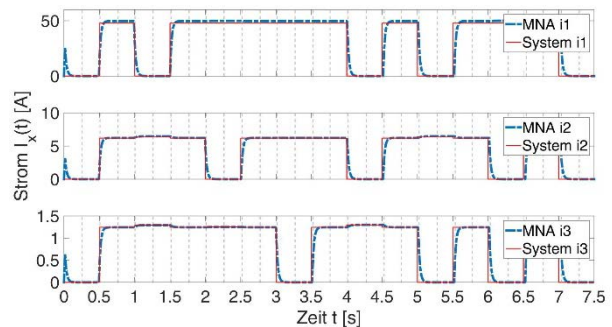


Abbildung 11 - Simulationsergebnis - $\Delta t = 15ms$, $RI = 251ms$

Die vertikalen grauen Linien stellen die Zeitpunkte der Residuum-Berechnungen und somit der möglichen Modellanpassungen dar (hier: $RI = 251ms$). Die Simulationsschrittweite ist $\Delta t = 15ms$.

Es ist zu erkennen, dass am Beginn der Simulation eine Einschwingphase stattfindet. Diese Einschwingphase ist auf das verwendete Schaltermodell zurückzuführen. Außerdem erkennt man, dass der vorgeschlagene Programmablauf zuverlässig die Schalthandlungen erkennt, und dass das angepasste Modell zu jeder Zeit zuverlässig die Netzwerkgrößen, in diesem Fall die jeweiligen Strangströme, darstellen kann. Auch der Einfluss der Stränge untereinander wird abgebildet.

4 Validierung durch Messung

Um die simulatorisch untersuchten Algorithmen und ermittelten Werte validieren zu können, wurde die vorgestellte Topologie in einem Laboraufbau realisiert.

Um vergleichbare Messreihen zu gewährleisten, wurde das in Abbildung 10 dargestellte Schaltmuster verwendet.

Das Konzept wurde vollständig analog zur Simulation verwendet mit dem Unterschied, dass die direkt vom beobachteten System bereitgestellten Informationen reale Messdaten beinhalten, die in jedem Residuum-Berechnungsintervall online aufgenommen wurden.

Eine weiche Echtzeitfähigkeit wurde durch folgende Strategie gewährleistet:

Die Simulationszeit t , und somit auch die Werte aus den Netzwerkberechnungen durch die MNA, wurde abschnittsweise immer bis zu einem Zeitpunkt einer Messdatenabfrage vorangetrieben. Zu diesem Zeitpunkt wartet der Algorithmus bis die reale Zeit die Simulationszeit wieder erreicht hat. Nach dem Datenerhalt wird Algorithmus 1 angewendet. Danach wird die Simulationszeit wieder entsprechend dem Residuum-Berechnungsintervall RI vorangetrieben.

Die verwendete Hardware muss bei diesem Verfahren gewährleisten, dass die Berechnungszeit kürzer als die reale Zeit ausfällt.

Das Ergebnis dieser Messung ist in Abbildung 12 zu finden.

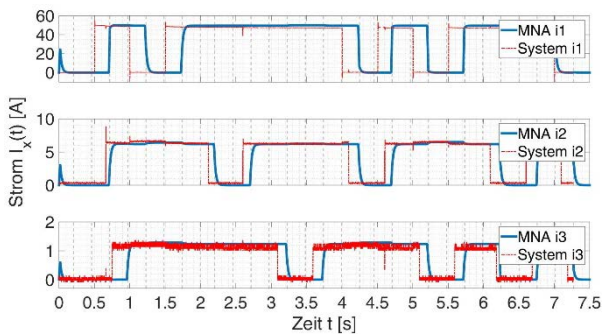


Abbildung 12 – Messung - $\Delta t = 15ms$ - $RI = 251ms$

Die Art der Kommunikation zu den Schaltern erlaubt keine gleichzeitigen Schaltvorgänge. Auf diese Weise entstehen Latenzzeiten zwischen den Schaltzeitpunkten.

Durch die Eigenschaften des Messkonzeptes liegen zu den Abfragezeitpunkten nicht alle Werte bis zu diesem Zeitpunkt vor, sondern nur bis zu einem Zeitpunkt, der durch die Dauer und Auflösung der Messwertaufnahme und die Dauer der Kommunikation bestimmt wird. Dies erschwert die Einhaltung einer einheitlichen Frequenz der Messdatenabfrage. Der in Abbildung 12 ermittelte Verlauf weist dementsprechend trotz der aus der Simulation vorgegebenen günstigen Werte für RI keinen minimalen Fehler auf. Legt man zur Auswahl von Δt und RI den übergeordneten Verlauf zugrunde und wählt sowohl für RI als auch für Δt einen minimal möglichen Wert aus, beschränkt durch die verwendete Hardware bzw. deren Echtzeitfähigkeit und durch die Auslastung des Kommunikationsbusses, so ergibt sich folgender Verlauf:

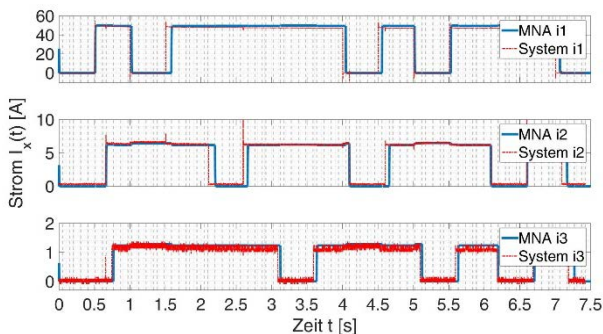


Abbildung 13 – Messung - $\Delta t = 1ms$ - $RI = 90ms$

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wird ein neuer Ansatz zur Bordnetzdiagnose vorgeschlagen. Durch eine zentrale Weiterverarbeitung der im Bordnetz an verschiedenen Stellen oft vorhandenen Spannungs- und Strominformationen können Fehlerzustände und Veränderungen im Bordnetz detektiert und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Auf diesem Weg ist es möglich, das Gesamtbordnetz mit geringem Aufwand zu überwachen und somit eine erhöhte Funktionssicherheit herzustellen.

Exemplarisch wird eine Bordnetzkonfiguration gewählt und mittels modellbasierter Analyse auf Leitungsbrüche untersucht. Der dafür entwickelte und hier vorgestellte Al-

gorithmus beweist in Simulation und Messung in einer isolierten Umgebung seine Funktion. Eine Unterscheidung zwischen einem nicht zugeschalteten Verbraucher und einem Leitungsbruch ist in dieser Konstellation zunächst nicht möglich.

In der zukünftigen Arbeit werden weitere Bordnetzkombinationen und Fehlertypen untersucht und Algorithmen zur zuverlässigen Überwachung entwickelt.

Das Gesamtziel ist es, möglichst viele Fehlerzustände und Veränderungen mittels möglichst weniger Daten und Algorithmen zuverlässig erkennen zu können.

6 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.

7 Literatur

- [1] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin und S. N. Kavuri, „A review of process fault detection and diagnosis PartI: Quantitative model-based methods,“ Elsevier Science Ltd, 2002.
- [2] R. Ghimire, C. Sankavaram, A. Ghahari, K. G. Y. Pattipati, 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.
- [3] J. Luo, H. Tu, K. Pattipati, L. Qiau und S. Chigusa, „Diagnosis Knowledge Representation and Inference,“ IEEE Autotestscon, 2005.
- [4] H. Chung-Wen, A. E. Ruehli und B. A. Pierce, „The Modified Nodal Approach to Network Analysis,“ IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1975.
- [5] R. Razzaghi, C. Foti, M. Paolone und F. Rachidi, „A Novel Method for the Optimal Parameter Selection of Discrete-Time Switch Model,“ International Conference on Power Systems Transients, Vancouver, Canada, 2013.