

EINLEITUNG

Der Automobilsektor durchläuft einen fundamentalen Transformationsprozess. Die fortschreitende Elektrifizierung und die zunehmende Konnektivität stellen signifikante Anforderungen an die Energiebordnetzarchitektur. Der steigende Leistungsbedarf elektrischer Verbraucher, wie beispielsweise elektrischer Lenk- und Bremssysteme, Komfortfunktionen wie Sitzheizungen und Klimatisierungssystemen, sowie die exponentiell steigende Anzahl an Sensoren und Steuergeräten für Fahrerassistenzsysteme, erfordert eine effiziente und zuverlässige Energieversorgung. Parallel dazu wird eine kompakte und leichte Auslegung des Energiebordnetzes aus Gewichts- und Kostengründen angestrebt. Dieser inhärente Zielkonflikt stellt eine zentrale Herausforderung für die Entwicklung zukünftiger Energiebordnetzarchitekturen dar. [1]

Ein kritischer Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Gewährleistung der Spannungsstabilität. Kritische Spannungssituationen, insbesondere das Auftreten einer Unterspannung, können zu Fehlfunktionen oder sogar zum Ausfall sicherheitsrelevanter Systeme führen. Zur Prävention solcher kritischer Zustände ist eine Überwachung und Prädiktion der Leistungsfähigkeit des Energiebordnetzes sowie des dynamischen Verhaltens der einzelnen Komponenten erforderlich. Darüber hinaus ist die Entwicklung robuster und hinreichend genauer Prädiktionsfunktionen essenziell, um kritische Situationen frühzeitig erkennen und präzisieren zu können. Dies ermöglicht die Implementierung rechtzeitiger Gegenmaßnahmen zur Stabilisierung der Spannung im Energiebordnetz.

1.1. Problemstellung

Die zunehmende Elektrifizierung und der erweiterte Einsatz elektronischer Systeme in modernen Fahrzeugen führen zu einem kontinuierlich steigenden Leistungsbedarf im Energiebordnetz. Dieser erhöhte Bedarf muss unter der Prämisse gedeckt werden, Kosten, Gewicht und benötigten Bauraum des Energiebordnetzes nicht übermäßig ansteigen zu lassen. Diese gegensätzlichen Anforderungen erfordern eine optimierte Architektur des Energiebordnetzes und die Entwicklung intelligenter Managementstrategien.

Die Sicherheit ist das wichtigste Kriterium beim Autokauf und damit von hoher Priorität bei Fahrzeugherstellern und Zulieferern. Besonders kritisch ist dies bei sicherheitsrelevanten Funktionen, deren Ausfall zu Unfällen mit schweren Folgen wie Verlust von Menschenleben, zu behördlichen Strafen, schädlichen Rückrufen von Fahrzeugen, einer Schädigung der Marke und zu Haftungsansprüchen für Fahrzeughersteller führen kann. Somit sollte die Versorgung der sicherheitsrelevanten Verbraucher mit hohen Standards gewährleistet werden. [2]

Die zentrale Herausforderung besteht darin, die Spannungsstabilität im Energiebordnetz trotz schwankender Lasten und über unterschiedliche Zustände im Energiebordnetz, wie der Alterung der Batterie, zu gewährleisten. Daher ist die Entwicklung einer Prädiktionsfunktion, die kritische Spannungssituationen frühzeitig erkennt und entsprechende Gegenmaßnahmen einleitet, von höchster Relevanz. Zur längerfristigen Spannungsstabilisierung finden Energiemanagementstrategien, welche im Sekundenbereich die Spannung stabilisieren, durch eine kommandierte Verbraucherabschaltung oder Erhöhung der Ausgangsleistung des Generators beziehungsweise Gleichspannungswandlers statt. Aktuelle Ansätze zur kurzfristigen Spannungsstabilisierung im Energiebordnetz setzen häufig auf Hardwaremaßnahmen. Dazu gehören beispielsweise der Einsatz von Doppelschichtkondensatoren zur kurzfristigen Bereitstellung hoher Leistungen, die Überdimensionierung von Kabelquerschnitten zur Reduzierung von Leitungsverlusten und der Einsatz leistungsstärkerer Generatoren beziehungsweise Gleichspannungswandler. Diese Maßnahmen haben jedoch den Nachteil, dass sie zu einem erhöhten Gewicht, Bauraum und Kosten führen, was im Widerspruch zu den Anforderungen an ein kompaktes und leichtes Energiebordnetz steht. Gleichzeitig muss die Vielfalt an Varianten im Energiebordnetz bewältigt werden. Hierbei kann eine Energiebordnetzarchitektur bis zu 10^{14} unterschiedlichen Varianten beinhalten. [3]

Somit gewinnt die Entwicklung von Leistungsmanagementstrategien im Rahmen des Software-Defined Vehicle immer mehr an Bedeutung, da die Spannungsstabilität im Millisekundenbereich gewährleistet werden kann, ohne weitere Hardware zu benötigen. Hierzu gibt es bereits bestehende Ansätze, welche bis jetzt jedoch kaum Anwendung finden. Diese Ansätze betrachten hierbei nicht das gesamte Energiebordnetz. Sondern lediglich werden Batteriespannung und -strom bewertet. Somit lassen diese einen großen Teil des Energiebordnetzes außer Acht. Des Weiteren basieren die Ansätze oft auf Annahmen, dass der Leistungsbedarf weit im Voraus bekannt ist und darauf reagiert werden kann. Jedoch erweist sich dies in der Praxis als schwierig umsetzbar, da immer unerwartete Ereignisse wie Hindernisse auf der Straße auftreten können und somit das Energiebordnetz auch für diese unerwarteten Ereignisse ausreichend Leistung zur Verfügung stellen muss. Des Weiteren wird in den bestehenden Ansätzen der Leistungsbedarf von Fahrmanövern generisch generiert, sodass der wahre Leistungsbedarf eventuell nicht abgedeckt wird. Zuletzt werden die Spannungslimits der Verbraucher kaum betrachtet, wobei diese jedoch eingehalten werden müssen. In den bestehenden Ansätzen wird eine grundsätzliche Spannungsstabilisierung als Ziel gesetzt, wobei in der Praxis eine Spannung zwischen 11 und 14 V keine unmittelbare Gefahr darstellt. [4, 5, 6, 7, 8, 9]

1.2. Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, eine neuartige, diagnosebasierte Prädiktionsfunktion zu entwickeln, die eine zuverlässige Leistungsabsicherung zukünftiger Energiebordnetze ermöglicht. Der Fokus liegt dabei auf der Entwicklung von Diagnosefunktionen, die den Zustand des Kabelbaums, der Batterie und des Gesamtenergiebordnetzes bewerten. Anhand der ermittelten Informationen und einer tiefen Abschätzung des Leistungsbedarfs können kritische Spannungssituationen frühzeitig erkannt und Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, um die Spannungsstabilität zu gewährleisten und Ausfälle von sicherheitsrelevanten Verbrauchern zu verhindern. Die Diagnosefunktionen sollen so konzipiert werden, dass sie mit der vorhandenen Sensorik auskommen und keine aufwendige Erweiterung der Hardware erfordern. Dies ist von entscheidender Bedeutung für eine Umsetzung im realen Fahrzeugbetrieb.

Damit lassen sich die Ziele der Prädiktionsfunktion und somit dieser Arbeit ableiten. Das erste Ziel ist die Sicherstellung der Versorgung von sicherheitsrelevanten Systemen wie Lenk- und Bremssystemen bei der Durchführung von dynamischen Fahrmanövern. Ein Versagen sicherheitsrelevanter Systeme soll ausgeschlossen werden, um die sonst resultierenden Folgen auszuschließen. Als zweites Ziel sollen die Diagnosefunktionen mit vorhandener Hardware realisierbar sein und einheitlich in einer Energiebordnetzarchitektur umsetzbar sein. Folglich müssen die Diagnosefunktionen robust gegenüber typischen Messfehlern und Zeitverzögerungen im Kommunikationsbus sein. Drittens soll für die sicherheitsrelevanten Systeme ein Spannungslimit definiert werden und dessen Einhaltung mit Hilfe der Prädiktionsfunktion sichergestellt werden. Das vierte Ziel besteht darin, den Leistungsbedarf von Lenk- und Bremssystemen bei der Durchführung von unterschiedlichen dynamischen Fahrmanövern zu analysieren und zu bewerten, sodass eine Prädiktion des Leistungsbedarfs dieser Verbraucher für diese Fälle möglich ist. Fünftens soll mit Hilfe der Prädiktionsfunktion stets ausreichend Leistung vorgehalten werden, sodass eine präzise Vorhersage eines bevorstehenden Fahrmanövers nicht notwendig ist.

1.3. Gliederung

Die Arbeit gliedert sich in fünf Kapitel. In Kapitel 1 wurde die Ausgangssituation des Energiebordnetzes mit dessen Herausforderungen als Einführung in das Thema dargestellt. Daraus ließen sich Ziele für die Arbeit selbst ableiten, um den Herausforderungen begegnen zu können, sowie die Abgrenzung zu bestehenden Arbeiten.

Kapitel 2 bietet einen umfassenden Überblick über den Stand der Technik im Bereich der Energiebordnetze. Dabei werden die verschiedenen Komponenten des Energiebordnetzes, wie Generatoren, Gleichspannungswandler, Batterien, Leistungsverteiler und Kabelbäume, beschrieben. Die Anforderungen an das Energiebordnetz hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Spannungsstabilität, Gewicht, Bauraum und Kosten werden erläutert. Zusätzlich werden Energie-, Leistungsmanagement und Leistungselektronik bewertet und voneinander abgegrenzt. Zuletzt wird eine Energiebordnetzarchitektur skizziert, um die Prädiktionsfunktion umsetzen zu können.

Kapitel 3 befasst sich mit der Modellierung, Simulation und Validierung des Energiebordnetzes. Es wird eine simulationsbasierte Toolkette vorgestellt, die zur Analyse der Wechselwirkung zwischen dem Energiebordnetz und der Fahrdynamik verwendet wird. Die Toolkette umfasst Modelle für das Energiebordnetz, das Lenk- und Bremssystem sowie ein Fahrer- und Fahrzeugmodell. Die einzelnen Modelle werden detailliert beschrieben und die Schnittstellen zwischen den Modellen erläutert. Auch die Betrachtung von dynamischen Fahrmanövern werden miteinbezogen. Die Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt anhand von Messdaten eines realen Versuchsträgers.

In Kapitel 4 wird die neuartige Prädiktionsfunktion zur Zustandsbestimmung des Energiebordnetzes vorgestellt. Die Diagnosefunktionen für den Kabelbaum, die Batterie und das Gesamtenergiebordnetz werden im Detail erläutert. Dabei wird der Fokus auf die Robustheit der Algorithmen gegenüber Messfehlern und Zeitverzögerungen gelegt. Die Diagnosefunktionen werden anhand von Simulationsergebnissen und Messdaten des Versuchsträgers bewertet und validiert. Die Bewertung des Leistungsbedarfs wird anhand von Messdaten aus dem Versuchsträger und dem Simulationsmodell durchgeführt. Abschließend wird eine Maßnahme basierend auf den Diagnosefunktionen und der Leistungsabschätzung erstellt.

Kapitel 5 präsentiert eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der Arbeit. Die entwickelte Prädiktionsfunktion wird nochmals zusammengefasst und ihr Beitrag zur Leistungsabsicherung zukünftiger Energiebordnetze hervorgehoben. Nachfolgend wird überprüft, ob die definierten Ziele aus Kapitel 1 erreicht wurden. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsarbeiten gegeben.

STAND DER TECHNIK DES ENERGIEBORDNETZES

Das Energiebordnetz in Fahrzeugen ist ein essenzielles System, das elektrische Energie bereitstellt. Dieses Netzwerk spielt eine entscheidende Rolle für die Funktionalität moderner Fahrzeuge, da es die Integration und den Betrieb zahlreicher elektrischer Systeme ermöglicht und sicherstellt.

2.1. Anforderungen und Aufgaben

Das Energiebordnetz ist für die Versorgung von allen elektrischen Verbrauchern verantwortlich. Dabei wird im Automotivbereich zwischen der Kleinspannungsebene bis 60 V und der Hochvoltebene unterschieden. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Kleinspannungsebene eingegangen. Die Hochvoltebene kommt hierbei in Hybrid- und Elektrofahrzeugen zum Einsatz und wird hauptsächlich für die Traktion verwendet. [10]

Hierbei muss das Energiebordnetz im Stand der Technik unterschiedliche Ziele erreichen. Die Hauptaufgabe ist das Versorgen von Fahrzeug- und Kundenfunktionen mit elektrischer Energie. Dabei müssen Gewicht, Bauraum und Kosten möglichst minimiert werden. Zusätzlich muss die Verfügbarkeit maximiert, die sichere Versorgung in Abwesenheit eines unzumutbaren Risikos gewährleistet und ein akzeptabler Einfluss von Fehlern erreicht werden. [1, 11, 12, 13]

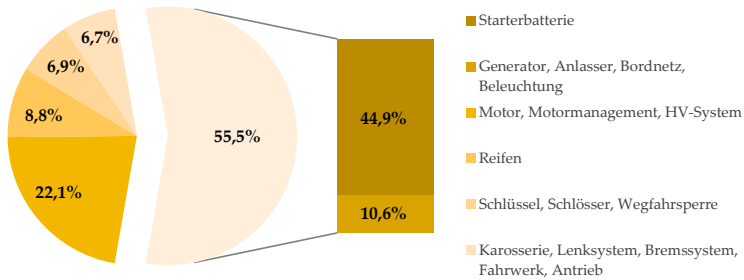


Abbildung 2.1.: Pannenstatistik des ADAC aus dem Jahr 2025. [vgl. 14]

Hierbei ist das Energiebordnetz mit seinen Bestandteilen die wahrscheinlichste Ursache mit 55,5 % für eine Panne. Diese führen zu liegengebliebenen Fahrzeugen und müssen wieder instand gesetzt werden. Die Bestandteile und deren Aufgabe werden im Folgenden beschrieben.

2.2. Bestandteile

Im Stand der Technik setzt sich ein Energiebordnetz aus mindestens einem Wandler, wie einem Gleichspannungswandler oder Generator, mindestens einem Speicher, wie einer Bleibatterie, einer Vielzahl unterschiedlicher Verbraucher sowie einer Leistungsverteilung über einen Kabelbaum und mehrere Leistungsverteiler, wie Schmelzsicherungsboxen oder elektrische Leistungsverteiler zusammen.

2.2.1. Generator und Gleichspannungswandler

Um das Energiebordnetz längerfristig mit Energie zu versorgen, wird die Energie aus dem Traktionssystem verwendet. Dazu wird in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ein Generator verwendet, welcher die mechanische in elektrische Energie umwandelt. Gleichspannungswandler kommen sowohl in Elektrofahrzeugen vor, in welchen von der Hochvoltebene auf die Spannungsebene des Energiebordnetzes gewandelt wird, als auch in Verbrennerfahrzeugen, in welchen die Spannung von einer höheren Spannungsebene, wie 48 V, auf die Spannung des Energiebordnetzes gewandelt wird. Der Leistungsbedarf in heutigen Energiebordnetzen kann über mehrere Minuten zwischen drei und vier Kilowatt betragen. [1]

Dabei können aktuelle Generatoren und Gleichspannungswandler an ihre Leistungsgrenze kommen. Beispielsweise muss bei einer hohen Eigentemperatur entsprechend die Leistungsabgabe reduziert werden, um eine Beschädigung zu vermeiden. Dies steht dem Trend entgegen, einen Speicher im Energiebordnetz so klein wie möglich auszulegen beziehungsweise komplett zu entfernen. [4]

Generatoren und Gleichspannungswandler besitzen hierbei unterschiedliche Eigenschaften. Das Regelverhalten von Gleichspannungswandlern ist wesentlich schneller als das von Generatoren, da diese unabhängig von der Drehzahl des Motors oder der Anregung sind. Somit kann der Gleichspannungswandler sich schneller an den Leistungsbedarf des Energiebordnetzes anpassen. Jedoch schaltet sich ein Gleichspannungswandler zum Selbstschutz ab, falls dieser über dessen maximale Leistungsabgabe gefordert wird, sodass es nicht zu einer thermischen Überbelastung kommt.

Um eine sichere Energieversorgung aus Generator oder Gleichspannungswandler zu gewährleisten, müssen vorgeschaltete Komponenten, wie Verbrennungsmotor oder Hochvoltbatterie, auch eine sichere Versorgung garantieren können. Dies stellt sich jedoch als sehr aufwendig umsetzbar dar, sodass eine sichere Versorgung aus einem Energiespeicher notwendig ist. [15]

2.2.2. Energiespeicher

Die Batterie erfüllt hierbei die Aufgabe, die Energiebordnetzspannung zu stabilisieren, das Starten des Fahrzeuges über einen Starter oder das Vorladen eines Gleichspannungswandler zu garantieren, einen Ruhestrom über mehrere Wochen bereitzustellen und eine sichere Versorgung zu gewährleisten. [16]

Dabei ist die 12 V-Bleibatterie aufgrund ihrer Robustheit und des geringen Preises weiterhin der Stand der Technik im Energiebordnetz. Jedoch unterliegen diese unterschiedlichen Alterungs- und Fehlermechanismen. Beispielsweise kann bei der Batterie Aktivmasse verloren gehen, wenn große Entladezyklen wiederholt auftreten, oder wenn durch unzureichendes Laden die Batterie nicht mehr leistungsfähig genug ist, um die sicherheitsrelevanten Verbraucher sicher zu versorgen. [17, 18, 19]

2.2.3. Leistungsverteiler

Leistungsverteiler verteilen die Energie aus dem Generator beziehungsweise Gleichspannungswandler zu den einzelnen Verbrauchern und dem Energiespeicher. Am weitesten verbreitet sind Sicherungsboxen mit mehreren Schmelzsicherungen. Die einzelnen Sicherungen verhindern hierbei eine Überbelastung von Kabeln und Steuergeräten, wodurch ein Überhitzen beziehungsweise Fahrzeugbrand verhindert werden kann. [20] Jedoch können Schmelzsicherungen die Anforderungen an die Rückwirkungsfreiheit nicht ausreichend sicherstellen. Dadurch setzen sich elektronische Sicherungen durch, welche mittels MOSFETs binnen Mikrosekunden trennen können. [11, 15, 21, 22, 23]

Elektronische Sicherungen haben den Vorteil, dass sie auf Befehl Verbraucher schnell abtrennen können und nicht auf ein selbständiges Abschalten des Verbrauchers gewartet werden muss. Des Weiteren beinhalten diese Messtechnik, welche für Diagnosen des Leistungsverteilers oder des Energiebordnetzes verwendet werden kann. Ein Leistungsverteiler hat hierbei mindestens einen Leistungseingang und -ausgang, welche als Kanäle bezeichnet werden. Die Anzahl und das Design der Kanäle ist dabei von der Energiebordnetzarchitektur sowie den Anforderungen des Automobilherstellers abhängig. [13]

2.2.4. Kabelbaum

Der Kabelbaum hat die Aufgabe, Energiewandler, Energiespeicher und die Verbraucher über die Leistungsverteiler miteinander zu verbinden. Ein verlustarmer Energiefluss zu den elektrischen Verbrauchern muss sichergestellt werden. Dabei besteht ein Kabelbaum aus einigen tausenden Verbindungssystemen, wie beispielsweise Steckersystemen, Crimps und Schraubverbindungen, sowie einige hundert Meter Kabel. [20, 24] Eine beispielhafte Anbindung eines einkanaligen Lenksystems über einen elektrischen Leistungsverteiler ist in der Abbildung 2.2 zu sehen.