

2 Energiebordnetze und Spannungsstabilität

In diesem Kapitel werden die relevanten Grundlagen zu Fahrzeugbordnetzen vorgestellt, sowie deren Spannungsverhalten und Stabilität diskutiert. Dabei stehen insbesondere folgende Fragen im Vordergrund:

- Welche Komponenten gibt es in heutigen Fahrzeugbordnetzen und welche Bedeutung kommt ihnen im Bezug auf die Spannungsstabilität zu?
- Wie stellen sich Spannungen im Bordnetz ein und wie kommt es zu kritischen Zuständen wie Spannungseinbrüchen?
- In welchen Fahrsituationen und Umweltszenarien treten kritische Zustände auf?
- Welche stabilisierenden Maßnahmen stehen zur Verfügung und könnten durch ein Leistungsmanagement eingeleitet werden?

Die in diesem Kapitel beschriebenen Zusammenhänge bilden die Grundlage für die Entwicklung des Leistungsmanagement-Systems und vor allem für die Komplexitätsreduktion im Rahmen der Modellbildung in Abschnitt 6.1.

2.1 Automobile Bordnetze

2.1.1 Architektur, Kabelbaum und Masserückleitung

Graphentheoretisch kann eine Spannungsebene des Bordnetzes als Kombination zweier gewurzelter Bäume betrachtet werden, da im Bordnetz nur Verzweigungen und keine Vermaschungen existieren (vgl. Abb. 6.3). Nimmt man die technische Stromrichtung als Richtung der Kanten, so ergibt sich zunächst ein *Out-Tree* mit der positiven Batterieklemme als Wurzel und den positiven Klemmen der Bordnetzverbraucher als Blätter [73]. Von einem zentralen Batterieverteiler werden über den Kabelbaum einige große Verbraucher sowie mehrere Stromverteiler versorgt.¹ Dort werden die einzelnen Verbraucher gemäß ihrer maximalen Leistungsaufnahme einzeln abgesichert und weiter mit einem thermisch an die Sicherung angepassten Kabel über den Kabelbaum angebunden. Obwohl ein Stromverteiler im Regelfall die umliegenden Verbraucher versorgt, kann es in Ausnahmen vorkommen, dass die Kabellänge zwischen Batterieklemme und Verbraucher die Fahrzeuglänge um mehr als das Doppelte übersteigt. Dies kann etwa durch die Klemmensteuerung – je nach Fahrzeugzustand sind nur bestimmte Schaltkreise mit Strom versorgt – oder Sicherheitsbestimmungen, etwa bei der Versorgung der Leuchten, verursacht sein.

¹ In heutigen Oberklassefahrzeugen gibt es in der Regel einen Stromverteiler im Kofferraum, einen im Fahrgastraum und einen im Motorraum.

Bei den Verbrauchern beginnt der zweite Baum, ein *In-Tree* mit den negativen Klemmen der Verbraucher als Blätter und dem negativen Batteriepol als Wurzel [73]. Zunächst ist die negative Verbraucherklammer über den Kabelbaum mit einem Massekamm verbunden, einer Sammelschiene für die Masseleitungen benachbarter Verbraucher. Der Massekamm ist über einen Masseanschlussbolzen [287] direkt mit der Fahrzeugkarosserie verschraubt, die als Rückleiter zur Batterie fungiert. Die Karosserie wird mit einem einzigen Kabel mit der negativen Batterieklemme verbunden.

Zusätzlich zu den Kabeln zur Energieversorgung besteht der Kabelbaum eines Fahrzeugs aus den für die Kommunikation zwischen Steuergeräten oder mit Sensoren benötigten Kabeln. Insgesamt ist er einige Kilometer lang und mit einem Gewicht von bis zu 80 kg nach Karosserie und Motor eine der schwersten Komponenten eines Personenkraftwagens [21, 45, 68, 134, 148].

Bei Elektrofahrzeugen sowie Mild-, Full- und Plug-in-Hybridfahrzeugen gibt es zusätzlich ein sogenanntes »Hochvolt«-Bordnetz, an dem die Antriebseinheit und einige andere Komponenten angebunden sind [130]. Auch für Micro-Hybridfahrzeuge und konventionelle Fahrzeuge wird gegenwärtig die Einführung einer zweiten Spannungsebene zur Versorgung besonders leistungsintensiver Verbraucher und zur besseren Nutzung von Rekuperationsenergie diskutiert [74]. Die Struktur der zweiten Spannungsebene gleicht prinzipiell der oben beschriebenen. Zur Vermeidung negativer Wechselwirkungen zwischen den Bordnetzen wird der Stromkreis jedoch nicht über die Karosserie sondern über Rückleiter im Kabelbaum geschlossen. Verschiedene Ebenen werden über einen Gleichstromsteller (siehe Abschnitt 2.1.5) gekoppelt.

2.1.2 Elektrische Energieverbraucher

Als Energieverbraucher werden alle Komponenten bezeichnet, die elektrische Energie in andere Energieformen wandeln. Deren Anzahl schwankt bei maximaler Ausstattung eines Oberklassefahrzeugs je nach Quelle zwischen sechzig und hundert [30, 36, 76, 133, 227]. Bei detaillierter Betrachtung erscheinen rund dreißig bis vierzig Verbraucher, vornehmlich Aktoren und leistungsintensivere Steuergeräte, für ein Leistungsmanagement relevant, während es sich bei den restlichen um kleinere Steuergeräte ohne nennenswerte Leistungsaufnahme handelt. Auch innerhalb der als relevant betrachteten Verbraucher ist die Bandbreite in vielerlei Hinsicht sehr groß: Während in einigen Steuergeräten eine eigene Spannungsregelung integriert ist, gibt es Gleichstrommotoren, die direkt auf das Bordnetz aufgeschaltet werden und demzufolge hohe Anlaufströme verursachen. Einige Verbraucher, etwa die Motorelektronik, konsumieren über einen längeren Zeitraum eine nahezu konstante Leistung während extreme Kurzzeitverbraucher wie die elektrisch angetriebene Servolenkung nur sehr selten aktiviert werden, dann aber Leistungsspitzen von 1 bis 2 kW verursachen [119, 209, 215]. Die Verbraucher können nach diesen beiden, aber auch nach vielen anderen physikalischen, funktionalen oder technischen Merkma-

len klassifiziert werden.² Durch die Vielfalt an Kriterien und die große Verschiedenheit der Verbraucher ist es jedoch schwierig, eine eindeutige und für sämtliche Verbraucher gültige Klassifizierung zu finden. Auch die in der Literatur beschriebenen Klassifikationsmethoden bleiben wie in [196] sehr im Methodischen oder erfassen nur Kriterien für die zweite Entscheidungsebene³, zum Beispiel die Priorität oder die Einteilung in Komfort-, Grundlast- und sicherheitsrelevante Verbraucher [57, 87]. Die Klassifikation aus [17] umfasst mit 16 Merkmalen zwar viele relevante Eigenschaften, hilft aber auch nur begrenzt, die Systemkomplexität wirkungsvoll zu reduzieren. Erst durch die strikte Fokussierung auf die Spannungsstabilität konnten zwei Kriterien entwickelt werden, mit denen das Verhalten aller Komponenten vollständig und durchgehend beschrieben werden kann: Der maximale Betrag der Leistung, die bezogen wird, und deren Gradienten, also das Maß, wie schnell die Leistung erhöht wird. Aus der Literatur ist eine vergleichbare Klassifizierungsmethode bekannt, die den Strom (als Äquivalent zur Leistung) jedoch auf die Ladungsmenge der Batterie bezieht [131].

Bevor eine Klassifizierung vorgenommen werden kann, müssen zunächst Fahrzeug und Verbraucherausstattung definiert werden. Durch die in Abschnitt 1.3 angesprochene große Bandbreite im Ausstattungsgrad heutiger Fahrzeuge wurden zur repräsentativen Analyse vier generische Fahrzeugtypen definiert. Diese berücksichtigen mit den Klassen Kleinstwagen, Kleinwagen, Mittel- und Oberklasse ein breites Spektrum und orientieren sich an den am Markt etablierten Produktkategorien [4, 5] sowie an den in [17] definierten Fahrzeugklassen. Für jede Klasse wurden die Konfigurationen von drei bis vier Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller untersucht. Dabei standen neben den Ersatzteilkatalogen und Preislisten der Hersteller Quellen aus der Literatur und dem Internet zur Verfügung. Außerdem wurde die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung berücksichtigt, die einige Verbraucher zwingend vorschreibt.⁴ Wenn ein Ausstattungsmerkmal mehrheitlich Serienausstattung oder überwiegend verbaute Sonderausstattung war, wurde es zum generischen Vertreter des Fahrzeugtyps hinzugefügt. In Abbildung 2.2 auf Seite 15 wird die Anzahl der Verbraucher der vier Klassenvertreter gezeigt. Es ist ein näherungsweise linearer Anstieg von 30 Verbrauchern beim Kleinstwagen auf 84 Verbraucher bei der Oberklasse zu erkennen. In Anhang D ist eine Übersicht über die generischen Fahrzeugtypen und die ihnen zugrundeliegenden Fahrzeuge zu finden.

Die Klassifizierung der Verbraucher eines Oberklassefahrzeugs nach den oben genannten Kriterien wird mit der in Abbildung 2.1 gezeigten Darstellung visualisiert. Auf der Ordinate ist die maximale Leistung, die ein Verbraucher dissipiert, und auf der Abszisse die Zeit, bis diese nach der Aktivierung aufgerufen wird, in doppelt logarithmischer Darstellung

² Eine Liste mit Klassifikationsmerkmalen für Bordnetzverbraucher ist in Anhang G zu finden.

³ Zunächst geht es für das Leistungsmanagement darum, zu erfassen, welche Komponenten für die Bordnetzstabilität kritisch sind und mit welchen Gegenmaßnahmen einem bevorstehenden Spannungseinbruch entgegengewirkt werden kann. Danach wird anhand von Sekundärkriterien, zum Beispiel einer Verbraucherpriorität, über die Betriebsstrategie entschieden, welche Maßnahmen tatsächlich eingeleitet werden.

⁴ Die verwendeten Quellen aus der Literatur waren [22, 36, 48, 50, 57, 64, 87, 118, 141, 142, 169, 186, 187, 194, 207, 209, 230, 231, 233, 234, 237, 251, 262, 297, 303]. Zusätzlich wurde die Internetquelle [65] sowie die Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung [274] verwendet.

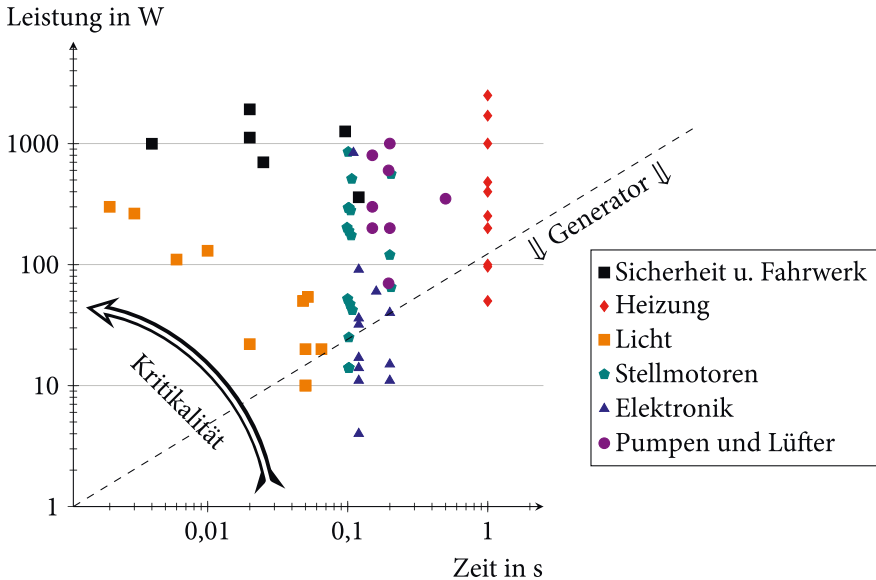


Abbildung 2.1: Klassifizierung der in einem Oberklassefahrzeug verbauten Verbraucher (Quellen siehe Fußnote auf Seite 13). Die Kritikalität eines Verbrauchers ist aus Sicht des Leistungsmanagements umso größer, je größere Leistungen er in kürzerer Zeit benötigt. Alle Verbraucher unter der strichlierten Linie können bei durchschnittlichen Drehzahlen mit der Dynamik des Generators abgedeckt werden und sind daher in der Regel nicht Gegenstand des Leistungsmanagements.

aufgetragen. Jeder Punkt entspricht einem Verbraucher. Je größer die Leistung und je kleiner die Zeit, desto kritischer ist der Verbraucher für die Spannungsstabilität und desto schneller muss die Prädiktion erfolgen.

Während sich die Leistung eindeutig bestimmen lässt, gibt es bei der Zeit einen gewissen Interpretationsspielraum: Verwendet man die minimale Einschaltzeit, scheinen etwa Heizelemente, deren volle Leistung schon nach ein bis zwei Millisekunden abgerufen werden kann, die am meisten kritischen Elemente zu sein. Bis zur Grenze der Wahrnehmung der Insassen können Heizelemente aber durch ein Energie- und Leistungsmanagement verzögert aktiviert oder sanft hochgefahren werden, womit sich die Kritikalität dieser Komponente deutlich verringert. Es wird somit die Zeit eingetragen, bis zu der die maximale Leistung abgerufen werden muss.⁵ Die am meisten kritischen Verbraucher sind nun die Fahrwerksregelsysteme, die aus Sicherheitsgründen nicht verzögert werden dürfen. Leistungsanforderungen von Verbrauchern, deren Gradient langsamer als der des Generators ist (siehe strichlierte Linie in Abbildung 2.1), können ohne Prädiktion durch eine Erhöhung der Generatorleistung bedient werden. Diese Verbraucher fallen deshalb aus der Zuständigkeit des Leistungsmanagements und sind Gegenstand eines Energiemanagements, da sie ausschließlich die langfristige Energiebilanz beeinflussen.

⁵ Wie dieser Punkt bestimmt werden kann, kann Abbildung 6.1 entnommen werden.

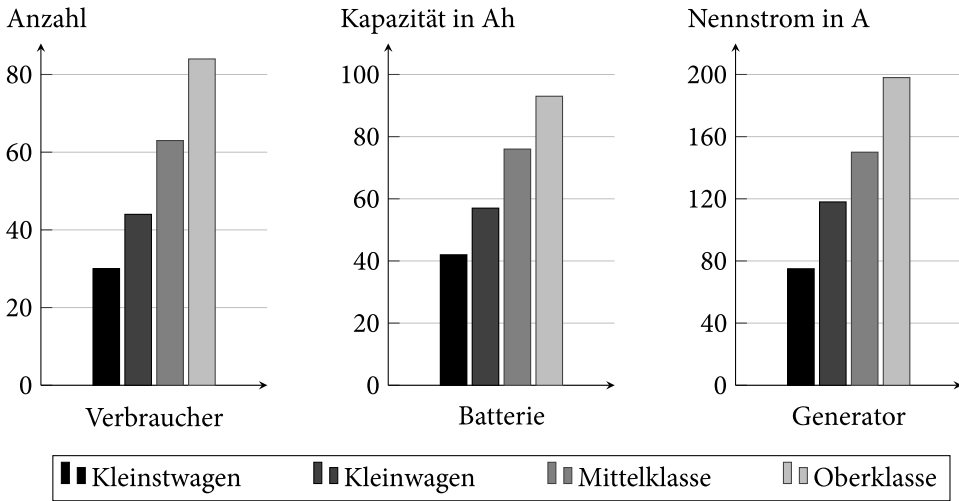


Abbildung 2.2: Anzahl der Verbraucher, Generatornennstrom und Batteriekapazität der vier generischen Fahrzeuge. Jedes steht als Beispiel seiner Fahrzeugklasse. In Anhang D sind weitere Informationen zu den generischen Fahrzeugtypen zu finden.

2.1.3 Elektrische Energieerzeuger

Energieerzeuger werden alle Komponenten genannt, die dem Bordnetz elektrische Energie zur Verfügung stellen. In konventionellen Fahrzeugen ist das, von einigen aktiven, rückspeisenden Lasten abgesehen, vor allem der Generator im Verbund mit Gleichrichter und Generatorregler [125, 244]. Er stellt seinen Strom basierend auf der Regelgröße Batteriespannung und wirkt aus Sicht des Bordnetzes als spannungsgesteuerte Stromquelle [207]. Da über den Riementrieb eine feste Koppelung an die Motordrehzahl besteht, ist folglich auch die elektrische Ausgangsleistung von dieser Größe abhängig. Zudem ist die Dynamik des Generators besonders bei niedrigen Drehzahlen stark reduziert, um negative Rückwirkungen auf den Fahrkomfort bis hin zum »Abwürgen« des Verbrennungsmotors zu verhindern [78, 224]. Beide Effekte führen dazu, dass der Generator bei niedrigen Drehzahlen oft nicht die benötigte Leistung bereitstellen kann.

Die Aufgabe des Generators ist es, den durchschnittlichen Energiebedarf der Verbraucher im Fahrzeug zu decken. Folglich muss die Nennleistung des Generators mit der verbauten Bordnetzlast steigen und unterscheidet sich deshalb auch in verschiedenen ausgestatteten Fahrzeugen desselben Typs. So wurden zur Bestimmung der Generatornennleistung für die generischen Fahrzeugtypen der Median aller kleinsten und der Median aller größten Generatorvarianten der betrachteten Fahrzeuge bestimmt und aus diesen beiden das arithmetische Mittel berechnet. Der Generatornennstrom der vier generischen Fahrzeugtypen ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Er steigt von 75 A beim Kleinstwagen auf knapp 200 A bei der Oberklasse. Die größten heute verbauten Generatoren haben eine Nennleistung von etwa 3 kW [198].

2.1.4 Energiespeicher

Als Energiespeicher kommen Blei-Säure-Batterien zum Einsatz, die üblicherweise als Starterbatterien bezeichnet werden [39, 146]. Die Bleibatterien werden so dimensioniert, dass Funktionen wie ein ausreichend langes Warnblinken erfüllt werden können und die Fahrzeuge auch nach mehrwöchiger Verschiffung noch startfähig sind – Kriterien zur Spitzenleistung spielen bis heute nur eine untergeordnete Bedeutung [299]. In Fahrzeugen mit Motor-Start-Stopp-System muss die Batterie den kompletten Bordnetzverbrauch kurzzeitig allein bewältigen können. Auch bei sehr niedrigen Drehzahlen oder Leistungsspitzen, denen der Generator mit eingeschränkter Dynamik nicht folgen kann, deckt die Batterie die Differenz zwischen Generatorleistung und Bordnetzbedarf. Deshalb müssen Speicherkapazität und Leistung der Batterie analog zum Generator mit der verbauten Bordnetzleistung erhöht oder andere Technologien, die Leistung besser bereitstellen können, eingesetzt werden. Nach dem gleichen Prinzip wie in Abschnitt 2.1.3 wurde für die generischen Fahrzeugtypen ein mittlerer Wert ermittelt.

In Abbildung 2.2 ist die Batteriekapazität der vier generischen Fahrzeuge dargestellt. Auch diese Kennzahl zeigt einen nahezu gleichstufigen Anstieg von 42 Ah beim Kleinstwagen auf 93 Ah bei der Oberklasse. Sowohl die Anzahl der Verbraucher, als auch die Dimensionen von Batterie und Generator zeigen, dass es eine ausreichende Trennschärfe zwischen den vier generischen Fahrzeugtypen gibt.

2.1.5 Elektrische Energiewandler

Für diese Arbeit sind – neben den oben als Verbraucher bezeichneten Wandlern – Energiewandler von Belang, die elektrische Energie in elektrische Energie einer anderen Spannungslage transformieren [212]. Für die Gleichspannungswandlung zwischen der 12 V-Ebene und der Hochvoltebene gibt es zahlreiche Modelle am Markt; Wandler für die Koppelung von 12 auf 48 V werden gegenwärtig entwickelt. Die Betriebsstrategien bisheriger Wandler konzentrieren sich größtenteils auf langzeitige energetische Aspekte statt auf Momentanleistungen und die Spannungsstabilität.

2.2 Spannungsverhalten und Spannungsstabilität

Der Batterie als in der graphentheoretischen Betrachtung wichtigstem Element kommt auch bei der Spannungsanalyse im Bordnetz eine besondere Bedeutung zu, da sie die Spannung am zentralen Batterieverteiler definiert. Die Ruhespannung der Blei-Vlies-Batterie liegt, vor allem abhängig vom Ladezustand, im normalen Ladezustandsbereich zwischen 11,5 V und 13,2 V [116, 204]. Beim Entladen sinkt die Klemmenspannung der Batterie durch den Spannungsabfall an ihrem Innenwiderstand und langfristig auch durch die Verringerung des Ladezustands, wobei alle Größen wiederum von physikalischen Parametern wie etwa der Temperatur abhängen. Dass diese Zusammenhänge einen entscheidenden

Einfluss auf die Spannungsstabilität bei dynamischen Situationen im Bordnetz haben, zeigen umfangreiche Sensitivitätsversuche, die am Bordnetzprüfstand (siehe Kapitel 3) durchgeführt wurden. Dabei lag die Sensitivität des Ladezustands auf die minimale Spannung eines Spannungseinbruchs bei 0,12 V pro 10 Prozent Ladezustand und die der Temperatur bei 0,25 V pro 10 K. Somit kann die Tiefe des Spannungseinbruchs allein durch die real gegebene Schwankung dieser beiden Parameter um ein bis zwei Volt schwanken.⁶ Prägt der Generator umgekehrt einen Stromfluss in die Batterie ein, wird sie geladen und ihre Klemmenspannung erhöht sich; synchron dazu schwankt die Spannung des gesamten angeschlossenen Bordnetzes mit. Im normalen Betriebszustand liegt die Klemmenspannung der Batterie zwischen 13,5 und 14,5 V [57]⁷, sodass die Batterie immer minimal geladen wird. Wenn der Generator zum Beispiel bei ausgeschaltetem Motor nicht in der Lage ist, die benötigte Dauerleistung zur Verfügung zu stellen, wird die Batterie entladen und die Spannung sinkt unter die oben genannte Ruhespannung.

In der langfristigen, energetischen Betrachtung wird die Differenz zwischen Leistungsangebot der Erzeuger P_{Erz} und -nachfrage der Verbraucher P_{Verbr} sowie den Verlusten P_{Verl} in Batterie und Zuleitung immer zu null. Kurzfristig treten jedoch Ungleichgewichte auf, was immer mit einer Erhöhung der Spannung im Fall eines Überschusses oder einer Verringerung im Fall eines Defizits der Leistungsbilanzgleichung

$$\frac{dW_{\text{Sp}}}{dt} = \sum P_{\text{Erz}} - \sum P_{\text{Verbr}} - P_{\text{Verl}} \quad (2.1)$$

sichtbar wird, wobei W_{Sp} die im Speicher enthaltene Energie ist. Über die Stromverteiler, die Sicherungen und die Kabel im Kabelbaum entstehen weitere Spannungsabfälle, die im relevanten Frequenzbereich vor allem von deren ohmschem Widerstandsanteil bestimmt werden [95]. Abbildung 2.3 zeigt eine Analyse der Spannung von der positiven Batterieklemme zur negativen im Augenblick der höchsten Leistungsanforderung ($t = 1,24$ s) des Brems- und Ausweichmanövers von Abbildung 1.2. Auf der Abszisse ist die Länge des Strompfads in Metern aufgetragen. Der Bereich zwischen den Messpunkten ist linear interpoliert.⁸ Während die Gleichgewichtsspannung der Batterie $U_0 = 12,2$ V beträgt, ist die Spannung an den Klemmen des Verbrauchers auf 7,4 V gefallen. Im Diagramm wird offensichtlich, dass sich alle Komponenten eines Verteilerknotens gegenseitig beeinflussen, da der Spannungsabfall bis zum Knoten vom Summenstrom aller untergeordneten Zweige abhängig ist. Das Spannungsverhalten im Bordnetz hängt also maßgeblich von dessen Topologie ab. Diese vielfältigen Zusammenhänge stellen eine wesentliche Herausforderung für ein effektives Leistungsmanagement dar (siehe Abschnitt 4.1), das nämlich dafür sorgen muss, dass die Leistungsbalance im jeweiligen lokalen Toleranzbereich bleibt, dass also die dem Speicher nach (2.1) entnommene Energiemenge dW_{Sp}/dt ausreichend

⁶ Der Versuchsaufbau und die Messergebnisse dieser Untersuchungen sind in Anhang B dargestellt.

⁷ In einer in [57] ausgeführten Studie wurden über 30 000 Fahrten ausgewertet; die maximale Häufigkeit im Generatorspannungshistogramm lag dabei bei 14,3 V.

⁸ Während diese Näherung bei den Leitungen des Kabelbaum physikalisch korrekt ist, bildet sie bei der Karosserie nur grob die Realität ab, da der Spannungsabfall hier nicht linear sondern vor allem an Schweißnähten und Materialübergängen erfolgt.

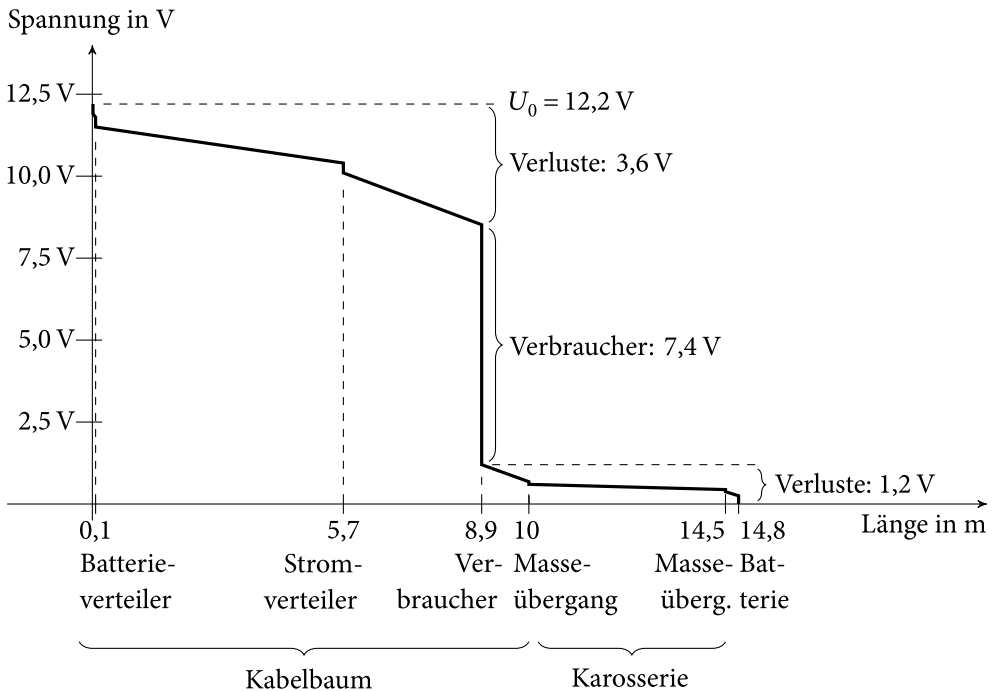


Abbildung 2.3: Analyse des Spannungsabfalls über der Leiterlänge von der positiven zur negativen Elektrode der Batterie im Moment einer Leistungsspitze ($t = 1,24 \text{ s}$ in Abbildung 1.2).

klein bleibt. Dabei hat jeder einzelne Verbraucher eine Mindestspannung, unter der er seine Funktion nicht mehr oder nur noch teilweise erfüllen kann. Diese liegt laut [48] im Fahrbetrieb bei 9 V.⁹

2.3 Leistungskritische Zustände

Im vorherigen Abschnitt wurde beschrieben, dass ein (lokales) Ungleichgewicht der Leistungsbilanz aus Angebot und Nachfrage Instabilitäten der Bordnetzspannung verursacht. Übersteigt dieses Ungleichgewicht global oder lokal ein Maß, das eine wahrnehmbare Funktionseinschränkung oder eine Schädigung von Komponenten nach sich zieht, wird dies als *leistungskritischer Zustand* bezeichnet.

In diesem Abschnitt soll nun dargestellt werden, in welchen Situationen ein *Leistungsdefizit* entstehen kann und welche Faktoren dessen Intensität beeinflussen. Das Gegenteil davon, ein globaler und lokaler *Leistungsüberschuss*, kann ebenfalls auftreten, wenn etwa ein großer Verbraucher deaktiviert wird und der Generator seine Leistung nicht ausreichend

⁹ Weitere Angaben machen die Normen [81, 135] sowie Quelle [268], in denen die tolerierbare Bordnetzbelastung abhängig vom entnommenen Spitzenstrom und der in einem Impuls entnommenen Energie dargestellt wird.

schnell reduzieren kann oder wenn eine aktive Last Energie ins Bordnetz zurückspeist. Da eine kurzzeitige Spannungsüberhöhung im Allgemeinen jedoch weniger kritisch ist als ein Spannungseinbruch, wird dieser Fall hier nicht explizit betrachtet. Alle Methoden und Maßnahmen lassen sich jedoch ohne Einschränkungen auch für den Fall eines Überschusses an Leistung anwenden.

Bei der Entwicklung der Prädiktion in Kapitel 5 ist es Zielsetzung, aus der Sensorik des Fahrzeugs Hinweise zu bekommen, wann diese kritischen Zustände eintreten beziehungsweise wie hoch die Wahrscheinlichkeit des Eintretens sowie deren Intensität ist.

2.3.1 Fahrsituationen

Aus der obigen Definition des Leistungsdefizits lässt sich ableiten, dass es immer dann zu kritischen Situationen für die Spannungsstabilität kommt, wenn der Generator nicht in der Lage ist, dem Leistungsanstieg der Verbraucher zu folgen. Praktisch liegt die Ursache nahezu immer in einem oder mehreren der drei folgenden Faktoren:

1. Es liegt ein *globales Leistungsdefizit* vor, das heißt, der Generator kann die Summe aller Lasten nicht mehr versorgen und die Batterie stellt die verbleibende Leistung zur Verfügung, etwa bei ...
 - Beispiel A: Aktivierung aller Komfortverbraucher
2. Die Generatorleistung ist durch eine *niedrige Motordrehzahl* eingeschränkt. Dies tritt auf bei ...
 - Beispiel B: Fahren nach Kaltstart
 - Beispiel C: Fahren mit niedriger Geschwindigkeit
 - Beispiel D: Stockender Verkehr
 - Beispiel E: Wendemanöver
3. Der *Leistungsgradient der Verbraucher* ist steiler als der des (dynamisch beschränkten) Generators. Dies ist bei transienten Leistungsspitzen von hochdynamischen Verbrauchern der Fall bei ...
 - Beispiel F: Notbremsung
 - Beispiel G: Slalomfahrt
 - Beispiel H: Ausweichmanöver
 - Beispiel I: Ausweichmanöver bei niedriger Geschwindigkeit

Die Beispiele A bis I sind in Anhang E näher spezifiziert.

2.3.2 Umweltszenarien

Neben den von Fahrer und Fahrsituation abhängigen Einflussfaktoren gibt es eine Vielzahl anderer Parameter, die die Intensität leistungskritischer Zustände beeinflussen. Einer der bedeutendsten ist die Temperatur, die sowohl das Strom-Spannungsverhalten der Batterie als auch die Leistungsfähigkeit des Generators beeinflusst. Zudem wirkt sie sich über die Aktivierung der Heiz- und Klimatisierungsfunktionen direkt auf die angeforderte Verbraucherleistung aus. Weitere beeinflussende Parameter sind zum Beispiel Dunkelheit oder Nebel, mit Einfluss auf die Leistung der Beleuchtungssysteme, oder schlechte Fahrbahnverhältnisse, die die Leistung der Fahrwerksregelsysteme genauso erhöhen wie eine große Zuladung.

Die Gesamtheit aller beeinflussenden Parameter wird hier als *Umweltszenario* bezeichnet.¹⁰ Durch die Vielzahl an unabhängigen Einflussgrößen gibt es eine große Menge an Umweltzuständen, die sich wiederum mit allen Fahrsituationen aus dem vorherigen Abschnitt kombinieren.

2.3.3 Beispiele

Da die numerische Menge an möglichen Zuständen durch die Unabhängigkeit der Faktoren weder analytisch reduzierbar noch angemessen darstellbar ist, soll hier nur für die in Abschnitt 2.3.1 genannten Beispiele ein Eindruck über die Leistungsbalance und damit die Intensität der leistungskritischen Zustände vermittelt werden, indem die Spitzenleistung der Verbraucher zur Spitzenleistung des Generators in Bezug gesetzt wird. Dafür werden die Beispiele mit der Jahreszeit und der Tageszeit als Beispiele für Umweltszenarien überlagert.¹¹ Dabei müssen allerdings eine Reihe von Vereinfachungen und Abschätzungen vorgenommen werden:

- Es wird nur der Einfluss der Umweltszenarien auf die Aktivierung der Verbraucher berücksichtigt; andere Wechselwirkungen, etwa zum Generator, werden vernachlässigt.
- Es wird nur die globale Leistungsbilanz aufgestellt, lokale Defizite und damit Spannungseinbrüche sind somit auch bei ausgeglichener globaler Bilanz möglich.
- Es wird angenommen, dass der Generator immer seine maximale Leistung bereitstellen kann.
- Für stromgesteuerte Verbraucher wird der Strom mit einer angenommenen Spannung von 13 V in eine Leistung umgerechnet.

¹⁰ Dabei ist zu beachten, dass sich Umwelt hierbei auf die Systemumwelt des Systems *Bordnetz* bezieht (siehe Abschnitt 4.2). Neben den eigentlichen Umweltgrößen wie beispielsweise der Witterung zählen auch sämtliche Parameter des Fahrzeugs, des Fahrers sowie anderer Insassen dazu, also etwa die Zuladung oder die Fahrweise des Fahrers.

¹¹ Jahreszeit und Tageszeit werden auch in [17] und [57] als energetisch besonders entscheidende Umweltszenarien herausgestellt.

Abbildung 2.4 zeigt im Ergebnis, dass die Spannungsstabilität bei Winterszenarien und Nachtfahrten tendenziell gefährdeter ist als im Sommer oder tags. Komfortverbraucher allein können die Stabilität nicht signifikant beeinträchtigen, die Gefährdung entsteht vor allem durch die Überlagerung leistungsintensiver Umweltszenarien mit hochdynamischen Fahrsituationen. Die Höhe der Leistungsdefizite ist fahrzeugtypenübergreifend ähnlich, nur beim Kleinwagen gibt es eine Tendenz zu größeren Defiziten (siehe dazu auch die Ergebnisse von Abschnitt 7.3.2).

Wie oben diskutiert, ermöglichen die getroffenen Vereinfachungen und Abschätzungen einen Vergleich der dargestellten Fälle. Die sich real einstellenden Defizite können durch die besprochenen Vereinfachungen nur bedingt prognostiziert werden, fallen aber in der Realität (lokal) eher größer aus, da bei den Annahmen immer der bestmögliche Fall zugrunde gelegt wurde.

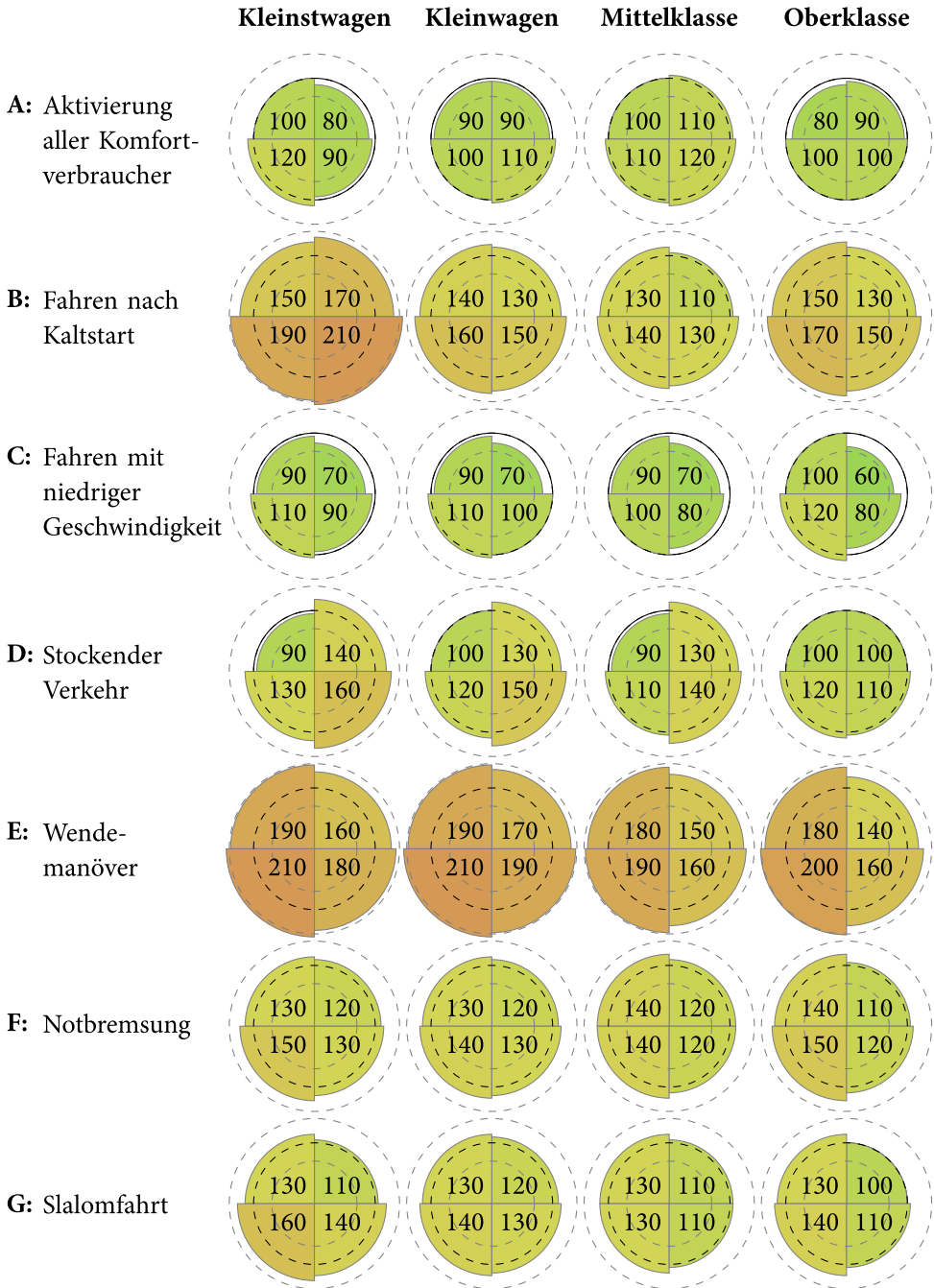
2.4 Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung

Ungleichgewichte der Leistungsbilanz führen zur Instabilität der Spannung. Somit ist es Ziel des Leistungsmanagements, dieses Ungleichgewicht so weit wie nötig und möglich zu reduzieren und in definierten Grenzen zu halten. In diesem Abschnitt werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt, wie dieses Ziel erreicht werden kann, ohne dass negative Einflüsse für Fahrverhalten und -komfort bemerkbar werden.¹²

2.4.1 Leistungserhöhung des Generators

Wie in Abschnitt 2.1.3 beschrieben, ist die Dynamik des Generators beschränkt, um negative Auswirkungen auf den Fahrkomfort zu vermeiden. Dadurch geht die Möglichkeit verloren, auf hochdynamische Leistungsschwankungen reagieren zu können. Würde eine Leistungsspitze jedoch vorab erkannt, kann die Generatorleistung frühzeitig und sanft angepasst werden, um dann im richtigen Moment zur Verfügung zu stehen. Die Spannung würde zunächst erhöht und der Spannungseinbruch nicht mehr so tief ausfallen. Diese Methode erhöht somit das absolute Spannungsminimum, dämpft jedoch nicht die Breite der Schwankung an sich. Ein Risiko besteht bei erhöhter Spannungslage vor allem für die Batterie, bei der, temperaturabhängig eine Gasungsreaktion einsetzen kann. Lang andauernde Phasen mit hoher Spannung müssen deshalb vermieden werden. Dazu kommt das Risiko einer falschen Prädiktion: Folgt nach der Erhöhung der Generatorleistung nicht der erwartete Spannungseinbruch, sondern genau gegenteilig eine Rekuperationsphase, kann es zu unkontrollierten Spannungsüberhöhungen kommen, die neben der Batterie auch andere Komponenten schädigen können.

¹² Wie oben erwähnt, kann die Leistungsbilanz in beide Richtungen gestört werden. Der Fokus liegt hier weiterhin auf dem kritischeren Fall eines Leistungsdefizits. Alle Methoden und Aussagen lassen sich jedoch auf den Fall eines Leistungsüberschusses übertragen.



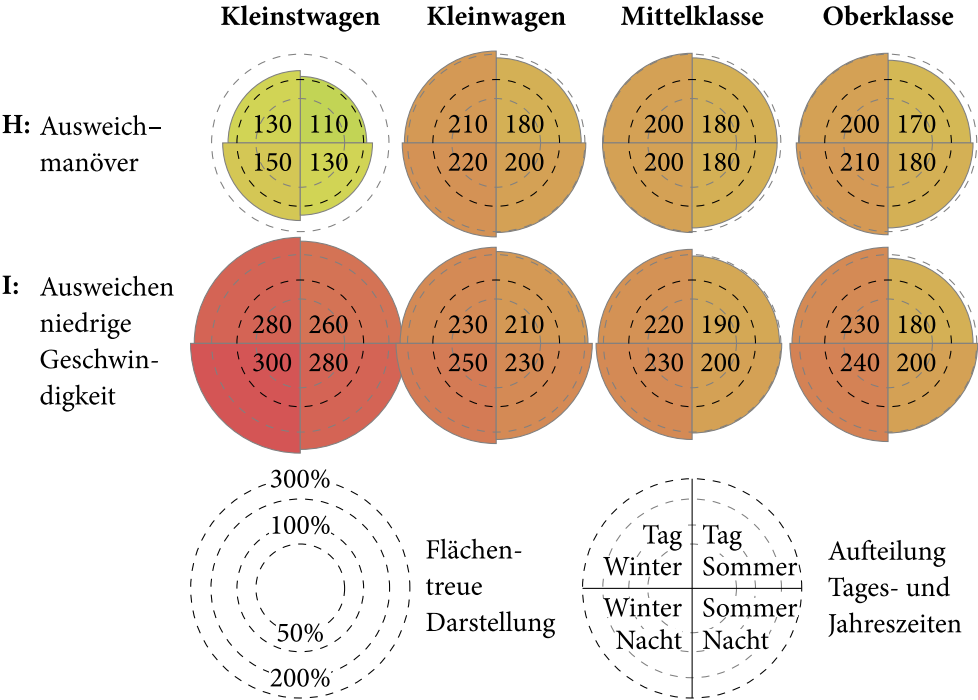


Abbildung 2.4: Verhältnis der Spitzenleistung im Bezug zur verbauten Generatorleistung in ausgewählten Fahrsituationen, die definierten Fahrzeugtypen sowie verschiedene Umweltszenarien (Quellen siehe Fußnote auf Seite 13).

Die Lastpunktanhebung des Generators als Teil eines Energiemanagements wurde in [48, 159, 182] untersucht. Explizit auf die Spannungsstabilität bezogen ist diese Maßnahme in [264] sowie in [278], wo eine prädiktive Lastpunktanhebung vor einem Eingriff der Servolenkung vorgeschlagen wird. Erhöht man die Generatorspannung im Beispiel von Abbildung 1.2 prädiktiv um 1 V, erhöht sich die minimale Spannung auf über 8 V.

2.4.2 Unterstützung aus anderen Bordnetzen

Nach ersten Konzepten in den neunziger Jahren, durch eine zweite, höhere Spannungsebene die Ströme und damit die Spannungsabfälle in Batterie und Kabelbaum zu reduzieren [208, 247], wurde eine 42 V-Ebene intensiv diskutiert [107, 108] und als zukünftige Lösung für Spannungsstabilitätsprobleme betrachtet [83] – jedoch nie großflächig in Serie gebracht. Seit dem Jahr 2011 gibt es eine herstellerübergreifende Spezifikation für eine 48 V-Spannungsebene [74, 92], die möglicherweise in den nächsten Jahren eingeführt werden wird. Zudem stehen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen Bordnetze mit noch höheren Spannungen für die Antriebselektronik zur Verfügung.

Dass das Problem der Spannungsstabilität durch eine Erhöhung der Spannung gelöst werden kann, darf hingegen bezweifelt werden. Schon in [120] wird gewarnt, dass die

Hochvoltebene bei effizienter Dimensionierung wieder nicht auf die auftretenden Leistungsspitzen ausgelegt ist. Tatsächlich ist vielmehr die zunehmende Divergenz zwischen Durchschnitts- und Spitzenleistung die Ursache für schlecht an Spitzenleistungen angepasste Bordnetze. Stattdessen kann die direkte Koppelung der Spannungsebenen jedoch dazu genutzt werden, ein Bordnetz mit Leistungsdefizit kurzzeitig durch ein anderes zu stützen. Diese Maßnahme ist mit der Erhöhung der Generatorleistung vergleichbar, da der Gleichstromsteller als Koppelement im schwächeren Bordnetz als Erzeuger wirkt. Dessen Dynamik ist im Allgemeinen deutlich größer als die des Generators, da die oben genannten Rückwirkungen auf Fahrdynamik und -komfort allenfalls schwach ausgeprägt sind.

2.4.3 Entzerrung von Leistungsspitzen

Viele der sehr dynamischen Verbraucher nehmen ihre Leistung pulsiert auf, wie etwa das Antiblockiersystem. Wenn es nun gelingt zu verhindern, dass sich die Spitzen verschiedener Verbraucher konstruktiv überlagern, würde die Spannung effektiv stabilisiert. In [17] wurden beispielsweise die Stromspitzen zweier Fensterhebermotoren durch eine um 50 ms versetzte Aktivierung von 40 A auf 27 A reduziert. Das Problem ist hierbei, dass die hochdynamischen Verbraucher in der Regel auch sicherheitsrelevant sind und größere Verzögerungen damit nicht erlaubt sind. Dem steht aber gegenüber, dass die Effektivität der einzelnen Verbraucher steigt, wenn das allgemeine Spannungsniveau höher liegt. Zudem benötigen einige sicherheitsrelevante Verbraucher eine Mindestspannung, um überhaupt zuverlässig zu funktionieren [172]. Sie können ihre Leistung dann zwar erst um wenige Millisekunden verzögert, aber dafür in größerem oder vollem Umfang abrufen.

Im weiteren Sinne gehört auch die Synchronisation von pulsweitenmodulierten Verbrauchern zu dieser Maßnahme. So können zum Beispiel zwei aktivierte Sitzheizungen im Gegentakt angesteuert werden, sodass sich ihre Leistungen destruktiv überlagern [17, 167, 278]. Für diese Maßnahmen ist eine Echtzeitkommunikation oder wenigstens ein gemeinsames Triggersignal der dynamischsten Verbraucher notwendig, was zusätzlichen Implementierungsaufwand bedeutet.

2.4.4 Freisetzung von Leistungsreserven der Verbraucher

Eine weitere Maßnahme ist das gezielte Herunterfahren oder Ausschalten von Verbrauchern im Bordnetz. Dazu macht sich das Leistungsmanagement den Umstand zunutze, dass die Zeitkonstanten der verschiedenen Verbraucherfunktionen sehr unterschiedlich sind – sowohl was die Erfüllung ihrer Aufgaben als auch die Wahrnehmung durch die Insassen betrifft. So kann ein Heizelement beispielsweise wenige Sekunden deaktiviert werden, ohne dass dies zu einer wahrnehmbaren Komforteinschränkung der Insassen führt. Allein die in einem Oberklassefahrzeug verbaute elektrische Heizleistung – und damit das

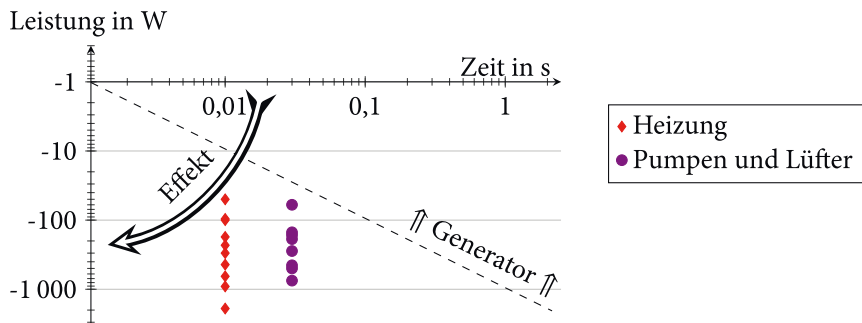


Abbildung 2.5: Überblick über die in einem Oberklassefahrzeug verbauten Verbraucher, die als Reserven dienen können (Quellen siehe Fußnote auf Seite 13). Je größer die reduzierbare Leistung der Verbraucher ist und je schneller sie bereitgestellt werden kann, desto größer ist der erzielbare Effekt des Leistungsmanagements.

Reduktionspotenzial – liegt zwischen 3,3 kW und 4,1 kW [57]¹³. Zusätzliches Potenzial ergibt sich zum Beispiel durch Lüfter, die ebenfalls für kurze Zeit ohne Leistung auskommen können, während lediglich die Drehzahl ein wenig absinkt. Es ist sogar möglich, die Lüfterdrehzahl präventiv zu erhöhen, sodass der Lüfter im Moment der Leistungsspitze kurzzeitig deaktiviert werden kann, ohne dass seine Drehzahl unter die vorgesehene Soll-drehzahl sinkt und die Funktion eingeschränkt wird. In diesem Fall entsteht jedoch ein zusätzlicher Energieverbrauch durch das Leistungsmanagement.

Die Abschaltung einer *Leistungsreserve* ist analog zur Kritikalität einer Leistungsanforderung (siehe Abschnitt 2.1.2) umso wirksamer, je größer die Reserveleistungen und je kürzer deren Bereitstellungszeit ist. Somit bietet sich zur Klassifizierung von Reserveleistung die gleiche Methode wie zur Klassifikation von Verbrauchern (Abbildung 2.1) an. Diese ist in Abbildung 2.5 am Beispiel eines Oberklassefahrzeugs dargestellt. Existieren geeignete Kommunikationssysteme und schnell schaltbare Verbraucher, kann die Abschaltung in Echtzeit erfolgen und die Prädiktion entfallen. Ebenso wäre es denkbar, die Komponenten mit einer eigenen Sensorik auszustatten und sie bei Unterspannung autonom ausschalten zu lassen [123, 296].

Wie in Abschnitt 1.2 erwähnt, gibt es zahlreiche Arbeiten, die sich mit der Abschaltung von Verbrauchern gemäß einer Prioritätstabelle oder mit Schaltstrategien einzelner Verbraucher beschäftigen. Diese können jedoch allenfalls zufällig effizient sein. Erst wenn man die topologischen Zusammenhänge zusätzlich zur Funktion und Priorität berücksichtigt, kann durch die Maßnahme der Verbraucherabschaltung einem Spannungseinbruch signifikant vorgebeugt werden. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme hängt, wie aus Abschnitt 2.2 ab-

¹³ In [57] werden Heizungen für den Komfort der Insassen mit einem Strom von 175 A aufgelistet. Dazu kommt bei Fahrzeugen mit Dieselmotor ein Zuheizung mit einem Strom von 120 A, um das Wärmedefizit zu überbrücken, das entsteht, bis der Motor seine Betriebstemperatur erreicht hat. In Fahrzeugen mit Benzinmotor kann außerdem eine Katalysatorheizung mit einem Strom von 100 A verbaut sein [75]. Umgerechnet mit einer Bordnetzspannung von 12 V respektive 14 V erhält man obige Leistungsangaben.

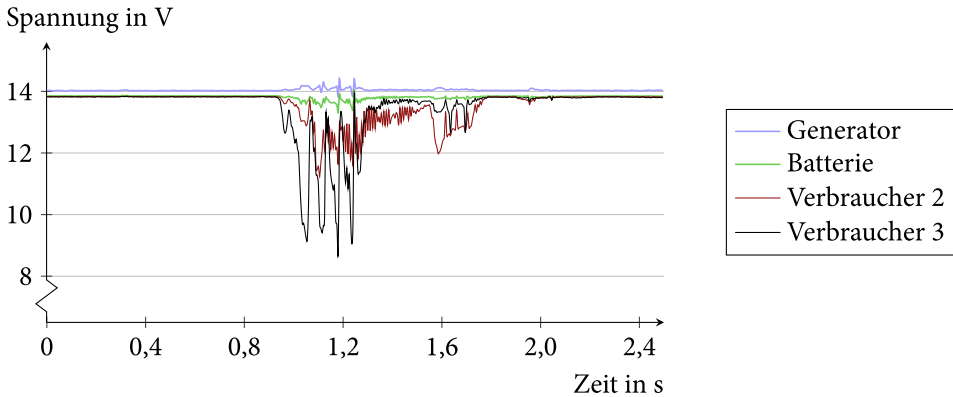


Abbildung 2.6: Das Brems- und Ausweichmanöver aus Abbildung 1.2 mit präventiven Abschaltungen mehrerer Verbraucher in Höhe von insgesamt 90 A. Die Spannung bricht nur noch auf 8,7 V ein.

geleitet werden kann, im Wesentlichen von den Einbauorten der stabilisierenden und der zu stabilisierenden Verbraucher ab. Ebenso wie sich ein Spannungseinbruch am stärksten nahe dem Ort einer Leistungsspitze bemerken lässt, wirkt auch eine Verbraucherabschaltung im nahen Umfeld am stärksten. So kann ein Spannungseinbruch im Motorraum kaum durch die Abschaltung von Verbrauchern im Heck des Fahrzeugs kompensiert werden. Der Verbraucher im Heck des Fahrzeugs kann nur auf den Spannungsabfall bis zum Spannungsverteiler wirken, an dem er abzweigt, wohingegen die Abschaltung eines Verbrauchers, der ebenfalls im Motorraum lokalisiert ist, den Spannungsabfall auf der kompletten Strecke reduziert (siehe Veranschaulichung in Abbildung 2.3).

Für ein effektives Leistungsmanagement ist es somit notwendig, die *Lokalisierung* der Leistungsreserven zur Planung adäquater Maßnahmen zu berücksichtigen. Dadurch wird nicht nur das globale Leistungsdefizit verringert, sondern vielmehr die Leistungsbalance lokal verbessert oder hergestellt – die räumliche Verteilung der Differenz zwischen verfügbarer und benötigter elektrischer Leistung wird also geglättet.

Der Effekt dieser Maßnahme lässt sich in Abbildung 2.6 studieren: Hier wurde wiederum das aus Abschnitt 1.1.2 bekannte Fahrmanöver durchfahren, während ein am gleichen Stromverteiler angeschlossener Verbraucher mit einer Stromaufnahme von 20 A sowie mehrere Verbraucher im restlichen Bordnetz mit einem Strom von insgesamt 70 A kurz vor dem Fahrmanöver präventiv ausgeschaltet wurden. Infolgedessen stellte sich ein Spannungseinbruch auf nur noch 8,7 V statt auf 7,2 V ohne stabilisierende Maßnahmen ein.

2.4.5 Implementierung zusätzlicher Komponenten

Das Ziel dieser Arbeit ist, wie in Kapitel 1 definiert, die Spannung ohne zusätzliche Komponenten zu stabilisieren. Deshalb werden stabilisierende Maßnahmen mit Zusatzkomponenten hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

Zusätzliche Energiespeicher: Die einfachste und in heutigen Fahrzeugen teils angewandte Maßnahme ist, eine zweite Batterie unter Inkaufnahme der Nachteile im Bezug auf Kosten, Gewicht und Platzbedarf an einem den dynamischen Verbrauchern möglichst nahen und der ersten Batterie möglichst fernen Punkt des Kabelbaums zu verbauen. Als weitere Möglichkeit können zwei Bordnetzbereiche über eine Diode [75], ein Relais [182] oder einen Gleichstromsteller [172, 242] gänzlich entkoppelt werden. Durch eine solche Architektur entsteht auch die Möglichkeit, sicherheitsrelevante Verbraucher redundant zu versorgen [265, 267]. Neben Batterien können auch (Doppelschicht-)Kondensatoren eingebaut werden [44, 60, 213]. Diese stabilisieren lokal die Spannung; deshalb sind auch dezentrale Konzepte in der Diskussion, die besonders dynamische oder sensible Verbraucher mit einem eigenen Kondensator stützen [15]. Zur Untersuchung dieser Maßnahme wurde ein Doppelschichtkondensator-Modul für das 12 V-Bordnetz des Bordnetzprüfstands aufgebaut (siehe Abschnitt 3.4).

Zusätzliche Leistungsspeicher: Statt der passiven Einbindung kann ein Energiespeicher auch über einen Gleichstromsteller an einer geeigneten Stelle angekoppelt werden. Somit wird beim Doppelschichtkondensator nicht nur dessen kapazitives Verhalten ausgenutzt, sondern dieser wird auch gezielt entladen, um dem Bordnetz lokal Leistung zur Verfügung zu stellen [149, 176, 216, 221, 270]. Eine umfassende Abhandlung über die Möglichkeiten einer Integration bietet [217]. Neben der direkten Ankoppelung über einen Gleichstromsteller [214, 219] werden zweigeteilte Bordnetze vorgeschlagen, bei denen leistungsintensive Verbraucher und Doppelschichtkondensatoren über einen Gleichstromsteller vom restlichen Bordnetz abgekoppelt werden, sowie eine Reihenschaltung von Batterie- und Doppelschichtkondensator beziehungsweise Gleichstromsteller [152]. Weitere Ideen sind aus dem Energiemanagement von Hybridfahrzeugen bekannt [280, 314]. Auch eine direkte Integration in den Plus- oder Minuspfad der Batterie wird diskutiert [104]. Überlegungen zur Integration eines Drehmassenspeichers sind in [46] zu finden.

Zusätzliche Kabel: Neben dem Einbau weiterer Speicher ist auch eine Verringerung des ohmschen Widerstands durch Kabel mit größerem Leiterquerschnitt möglich, um damit den Spannungsabfall durch den Kabelbaum zu reduzieren. Wie heute schon teils durchgeführt, können besonders leistungsintensive Verbraucher mit zusätzlichen Kabeln direkt an Quelle oder Speicher angebunden werden. Somit sind andere Verbraucher von deren Leistungs- und Spannungsverhalten nur noch indirekt betroffen. In [84] wurde gezeigt, dass die Gesamtenergiebilanz eines verlustärmeren aber schwereren Kabelbaums unter Umständen sogar besser sein kann.

Gleichstromsteller: Kritische Verbraucher des Bordnetzes könnten über einen Gleichstromsteller mit einer stabilisierten Gleichspannung versorgt werden [312]. Damit erhält man im Grunde zwei Bordnetze: eines mit stabilisierter und eines mit fluktuierender Spannung.

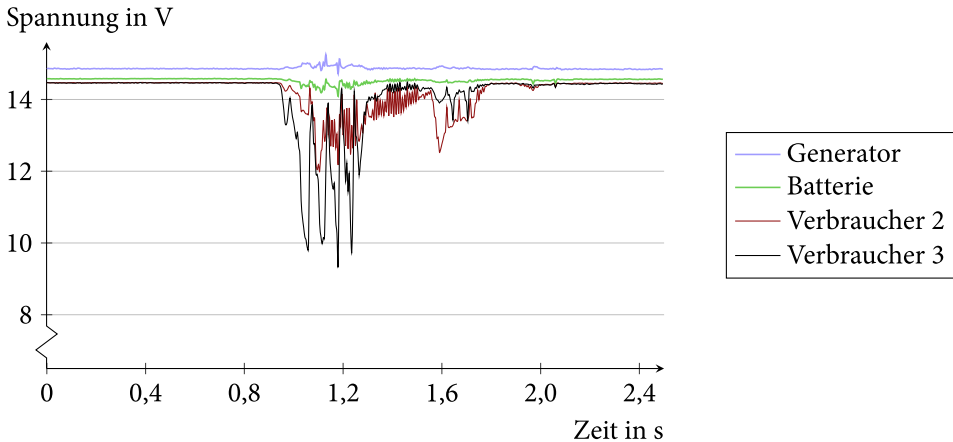


Abbildung 2.7: Das Brems- und Ausweichmanöver aus Abbildung 1.2 mit einer Kombination der drei stabilisierenden Maßnahmen Regelung des Generators, Verschiebung von Leistungsspitzen und Verbraucherabschaltung. Die Spannung kann auf fast 9,4 V stabilisiert werden.

2.4.6 Kombination der Maßnahmen und Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Maßnahmen vorgestellt, die ein Leistungsmanagement zur Spannungsstabilisierung nutzen kann. Eine vergleichende Tabelle der wichtigsten Faktoren aller Maßnahmen ist in Anhang C zu finden. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den ohne Einbau von Zusatzkomponenten durchführbaren Maßnahmen Regelung des Generators, Unterstützung aus anderen Bordnetzen sowie Leistungsreserven der Verbraucher. Oft lassen sich mehrere oder, im günstigsten Fall, sogar alle Maßnahmen gleichzeitig anwenden. Am Beispiel des Brems- und Ausweichmanövers ergibt sich durch Kombination der Generatorregelung, Verschiebung von Leistungsspitzen und Leistungsreserven der Verbraucher eine im Vergleich zum Ausgangsszenario (Abbildung 1.2) um dreißig Prozent erhöhte minimale Spannung von 9,4 V (Abbildung 2.7).

Damit ist nun die Aufgabe des Leistungsmanagement-Systems vollständig definiert: Es soll

1. kritische Situationen für die Spannungsstabilität rechtzeitig erkennen (Abschnitt 2.3.1),
2. deren Auswirkungen auf das Bordnetz einschätzen (Abschnitt 2.2),
3. aus dem Katalog an Gegenmaßnahmen (Abschnitt 2.4) geeignete auswählen und
4. diese so durchführen, dass das Bordnetz präventiv konditioniert wird, damit in kritischen Situationen (Abschnitt 2.3) die Leistungsbilanz (2.1) im gewünschten Rahmen und somit die Stabilität global und lokal erhalten bleibt.

Nach der Vorstellung des Bordnetzprüfstands als Entwicklungs- und Verifikationsplattform in Kapitel 3 wird ab Kapitel 4 ein System vorgestellt, das diese Aufgaben erfüllt.



<http://www.springer.com/978-3-658-05011-5>

Prädiktives Leistungsmanagement in
Fahrzeugbordnetzen

Giovanazzi, T.P.

2014, XXII, 182 S. 44 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-658-05011-5