

Dynamische Bordnetzsimulation

Die Elektrifizierung im Fahrzeug nimmt stetig zu: Neue Fahrdynamik- und Assistenzsysteme arbeiten mit Aktuatoren, die ihre Energie aus dem Bordnetz beziehen. Solche Hochstromverbraucher können mit ihren Spitzenströmen jedoch enorme und in diesem Ausmaß vollkommen neue Anforderungen an das Bordnetz stellen. Die Konsequenz: Ohne dynamische Bordnetzsimulationen ist eine Absicherung des Fahrzeuges nicht mehr möglich.

Von Niklas Guder

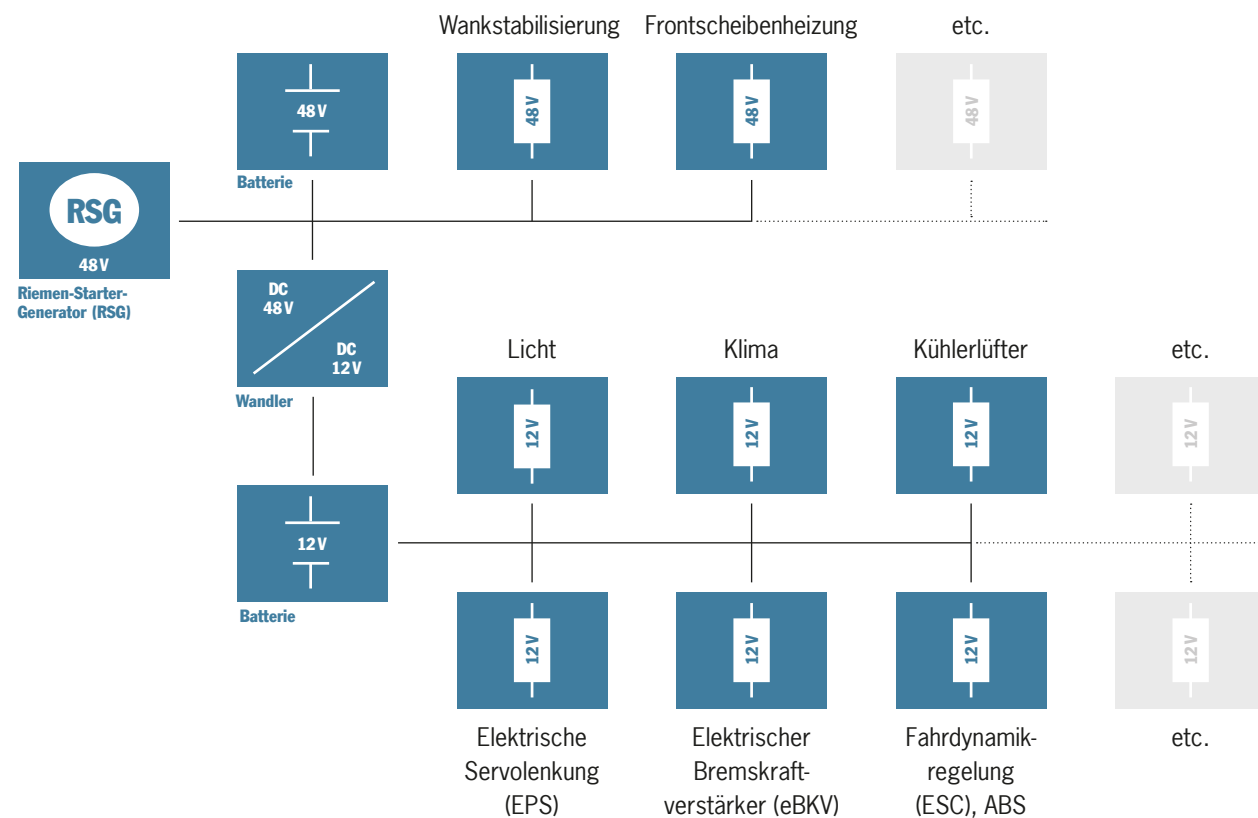


Abbildung 1: Bordnetz mit zwei verschiedenen Spannungsniveaus

Das Niedervolt-Bordnetz – zentrales Nervensystem des Fahrzeugs

Die Entwicklung der vergangenen Jahre zeigt eindeutig, dass dem Niedervolt-Bordnetz (12-Volt-Bordnetz) eine stetig größere Bedeutung zukommt. Mit zunehmender Elektrifizierung steigt der Energie- und Leistungsbedarf permanent an. Die Zeiten, in denen der Generator nur wenige Komponenten wie zum Beispiel den Hauptenergieabnehmer „Licht“ (daher der Name „Lichtmaschine“) versorgen musste, sind schon lange vorbei. Es kommen immer mehr Fahrerassistenzsysteme und Fahrwerkssysteme ins Fahrzeug, welche Komfort, Fahrdynamik und Sicherheit steigern. Dazu zählen beispielsweise Funktionen wie das Stabilitätsprogramm, die automatische Wankstabilisierung oder die elektrische Vorder- und Hinterachslenkung.

Einige dieser Funktionen, genauer ihre Komponenten, benötigen einen enorm hohen Strom in kurzer Zeit, da sie sehr schnell reagieren müssen. Diese Komponenten werden auch Hochstromverbraucher genannt. Der Strom dieser interagierenden Fahrwerkskomponenten kann sich schnell zu Spitzenbelastungen von über 200 A überlagern.

Idealerweise stellt der Generator mehr Leistung bereit als zur Deckung der Grundlast wie Klimatisierung, Heckscheibenheizung oder Licht notwendig ist. Mit diesem Leistungsüberschuss wird die Batterie geladen. Damit ist sichergestellt, dass nach der Fahrt die Batterie genügend Leistung für den nächsten Startvorgang zur Verfügung stellen kann. Man spricht hier von einer positiven Energiebilanz.

Steigt nun der Strombedarf im Bordnetz schneller an als der Generator nachregeln kann (die Regelgeschwindigkeit von Generatoren liegt bei wenigen Hundert Amperesekunden, im Gegensatz dazu fordern die Fahrwerkskom-

ponenten den Strom mit mehreren Tausend Amperesekunden), kommt es zum Leistungsmangel und die Spannung im Bordnetz sinkt. Die Batterie liefert nun die notwendige Differenzleistung, vorausgesetzt, sie ist dazu in der Lage. Bei verschiedenen Randbedingungen, wie beispielsweise tiefen Temperaturen, kann es passieren, dass sie den dynamischen Anforderungen nicht mehr genügt. Ihr Vermögen, Strom zu liefern, wird schlechter, der Innenwiderstand steigt an und damit auch die internen Verluste. Die Bordnetzspannung sinkt folglich unter die erlaubten Grenzwerte. Je nach Spannungswert reagiert die Fahrzeugsteuerung mit verschiedenen Aktionen, wobei diese Grenzen je nach Fahrzeugklasse variieren können. Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Aufteilung der Spannungsgrenzwerte. Schon ab rund 13 V können für den Fahrer

wahrnehmbare Effekte wie Lüftergeräusche oder Lichtflackern auftreten.

Mehrspannungsbordnetze erhöhen die Leistung, aber auch die Komplexität

Mit der Einführung des Hybridantriebes entstanden neue Spannungsnetze mit zwei Spannungsebenen. Bei Fahrzeugen mit Hochvoltbatterie für die Antriebsenergie übernimmt ein DC-DC-Wandler anstelle des Generators die Aufgabe der Stromversorgung für die Niedervoltseite, er transformiert die höhere Spannung im Bordnetz auf die gewünschte Spannung der Niedervoltseite. Im Gegensatz zum Generator kann ein DC-DC-Wandler den Strom mit mehreren Zehntausend Amperesekunden ausregeln und so der Stromanforderung der Hochstromkomponenten gerecht werden. >

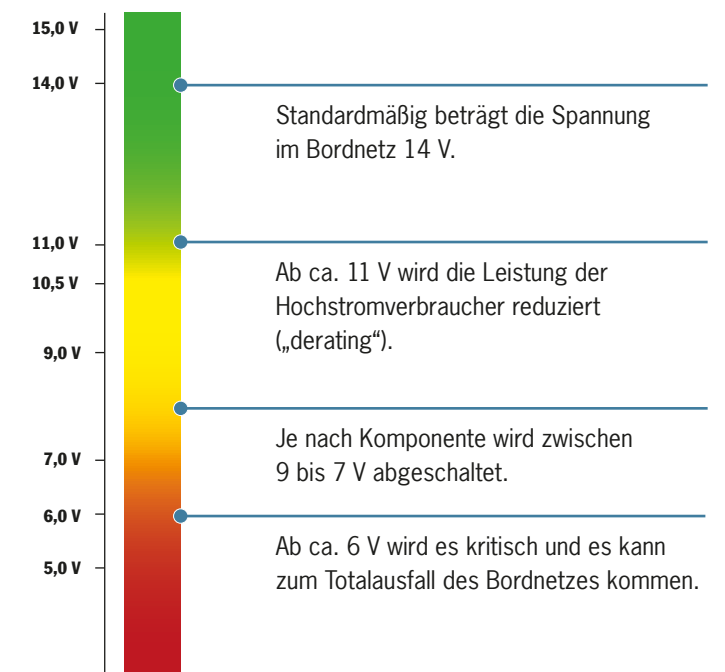


Abbildung 2: Spannungsgrenzen für Hochstromverbraucher

Der steigende Energiebedarf im Bordnetz führt auch zu einem höheren Kraftstoffverbrauch. Hier werden große Anstrengungen unternommen, diesen so weit wie möglich zu verringern. In diesem Zusammenhang werden die von der Hochvoltseite bekannten Speichertechnologien wie Lithium-Ionen-Batterie oder Doppelschicht-Kondensator aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und damit geringerer Verluste für die Niedervoltseite immer interessanter. Diese Speicher können beispielsweise auch auf der Niedervoltseite Bremsenergie aufnehmen (Rekuperation).

Der Wirkungsgrad von Komponenten lässt sich aber auch durch die Variation der elektrischen Größen steigern. Bei

einer geforderten Leistung kann, wenn die Spannung steigt, der Strom gesenkt werden (da der Strom im Gegensatz zur Spannung quadratisch in die Verlustberechnung eingeht, bedeutet eine Verdoppelung des Stroms das Vierfache an Verlusten). Ein weiterer Vorteil ist, dass Kabel mit geringeren Querschnitten verwendet werden können, was wiederum für eine Gewichtseinsparung sorgt. Dies wirkt sich positiv auf den Kraftstoffverbrauch aus. Auch die Verlustleistung, die in Form von Wärme abgeführt werden muss und oft ein Problem darstellt, wäre um einiges geringer.

Aus diesem Grund gibt es das Bestreben, vom 12-V-Bordnetz auf das 48-V-Bord-

netz umzustellen. Da diese Umstellung auch in den Serienprozess überführt werden muss und es aktuell kaum Komponenten gibt, bei denen man auf jahrelange Erfahrungen zurückblicken kann, ist dies mit entsprechendem Entwicklungsaufwand und Kosten verbunden. Deshalb wird es zunächst nur zu einer schrittweisen Einführung des 48-V-Bordnetzes kommen. Es bietet sich an, zunächst Hochstromverbraucher wie die Servolenkung ins 48-V-Bordnetz zu integrieren, da diese am meisten von einem höheren Wirkungsgrad und weniger Abwärme profitieren. Die Bordnetze unterschiedlicher Spannungsniveaus sind dann aber zu koppeln.

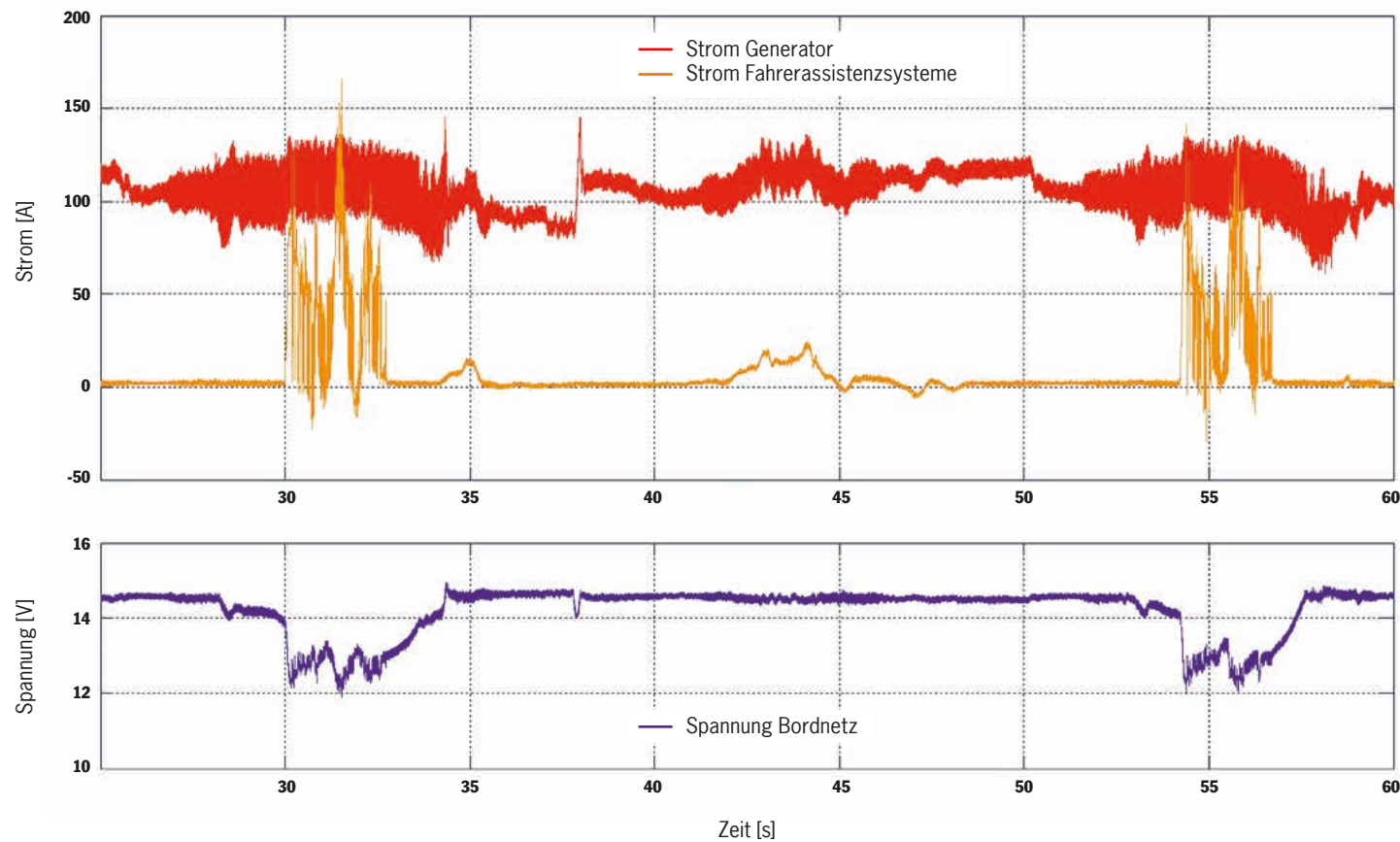


Abbildung 3: Exemplarischer, überlagertes Strombedarf von Hochstromverbrauchern (ESC, EPS etc.) im Manöver „gebremster doppelter Spurwechsel“

Die Variantenvielfalt an Funktionen, Komponenten und Spannungsniveaus hat den Freiheitsgrad bei der Bordnetzauslegung signifikant erhöht. Um schon in der frühen Entwicklungsphase alle kritischen Pfade in Funktionen, Komponenten und unter Umweltbedingungen zu identifizieren, ist es unabdingbar, das entsprechende Zielsystem vorab zu analysieren. Aufgrund der immer weiter anwachsenden Komplexität ist dies ohne entsprechende Simulation der Komponenten, der Umgebung und der Rückwirkung der Komponenten untereinander nicht mehr möglich. Die hohe zeitliche Auflösung, die für die Analyse des Spannungsverhaltens im Bordnetz bei aktiven Fahrerassistenzsystemen notwendig ist, erfordert transiente Modelle (physikalische Modellierung). Anhand dieser Analyse können die Entwicklungszeiten verkürzt und die Kosten gesenkt werden.

Die Arten der Bordnetzsimulation

Wenn das System „Bordnetz“ über die Simulation analysiert werden soll, richtet sich die Art und die Komplexität der Modelle nach den zu untersuchenden Fragestellungen. Modelle können statischer Natur sein. Das bedeutet, Komponenten werden jeweils in ihrem eingeschwungenen Betriebszustand abgebildet wie beispielsweise das Kennfeld eines Generators. Andererseits können Modelle physikalischer Natur sein, wenn sie auch die Dynamik, also den Übergang von einem eingeschwungenen Zustand in den anderen, abbilden. Der Unterschied liegt nicht nur in der Genauigkeit, dem Aufwand der Erstellung und den notwendigen Parametern, sondern auch in der Simulationsleistung. Teilweise bietet es sich an, beide Arten der Modellbildung zu kombinieren. Ob eine Simulation mit Bordnetzumgebung oder eine gekapselte Bordnetzsimulation sinnvoll ist und welche Komponenten in welcher entsprechenden

zeitlichen Auflösung berechnet werden, hängt immer von der jeweiligen Aufgabe ab. Porsche Engineering analysiert das Bordnetz nach Kundenwunsch und verfügt über die Kompetenz, das passende Modell zu jedem Entwicklungsgrad des Fahrzeugs zu generieren.

Verschiedene Wege der Modellerstellung

Je nach Entwicklungsgrad des Fahrzeuges differieren die vorhandenen Informationen zu den Komponenten und Systemen und damit auch die Simulationsmodelle. Trotzdem müssen schon vor dem Bau der ersten Prototypen belastbare Aussagen über das Spannungsverhalten im Bordnetz getroffen werden, da Änderungen im Nachgang hohe Kosten verursachen können. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, mit fehlenden wichtigen Daten umzugehen. Bei bereits verwendeten Komponenten stehen gegebenenfalls bereits existierende Modelle ersatzweise zur Wahl. Ist dies nicht der Fall, können auf der Basis vorhandener oder durch Messung ermittelter Komponentenparameter Modelle erstellt werden.

Handelt es sich um eine neue Komponente und sind die möglichen Zulieferer bekannt, werden von diesen erste Werte angefordert. Eventuell stellt der Zulieferer sogar ein gekapseltes Modell von seiner Komponente zur Verfügung. Liegt beispielsweise der Strombedarf eines elektrischen Bremskraftverstärkers bei verschiedenen Spannungslagen vor, verarbeitet die Simulation diese Parameter bei der Berechnung des Bordnetzmodells. Sind die Zulieferer nicht bekannt, können vergleichbare Komponenten und deren Modelle mit entsprechenden Anpassungen herangezogen werden. Die jeweiligen Komponentenexperten sind in jeder Phase dabei eingebunden. Mit ihrem Know-how lässt sich zugleich der richtige Testzyklus entwickeln, um

die maximale Strombelastung, etwa bei einem gebremsten Spurwechsel, zu bestimmen.

Energiebilanz als Basis der Bordnetz-Absicherung

Der erste Schritt ist eine Energiebilanzierung. Dazu dient die Simulation mit den Zielkomponenten in einem bestimmten Zyklus, zum Beispiel dem Stadtverkehr unter Bedingungen, wie sie auch im realen Fahrzeug herrschen. Es werden hier mehrere Minuten mit Modellen simuliert, die in der Regel eine zeitliche Auflösung von wenigen Millisekunden bis Sekunden haben. Das Ergebnis zeigt, ob nach der Fahrt die Energie in der Batterie noch ausreichend ist, um das Fahrzeug erneut zu starten. Sollte das nicht der Fall sein, werden die Komponenten in ihrer Leistung verändert und es erfolgt eine erneute Simulation.

Diese Art der Betrachtung ist indes nicht ausreichend, um das Bordnetz abzusichern. Die Hochstromverbraucher unter den Fahrerassistenzsystemen benötigen im Mittel einen geringen Strom, weisen in Aktion jedoch oft sehr hohe dynamische Spitzen auf. Bei der dynamischen Analyse liegt der insgesamt betrachtete Zeitraum im Sekundenbereich und die Modelle haben eine zeitliche Auflösung von wenigen Mikrosekunden. Ein exemplarischer Verlauf des überlagerten Stroms verschiedener Hochstromverbraucher ist in der Abb. 3 dargestellt.

Dynamische Analyse am Beispiel eines DC-DC-Wandlers

Neue Sicherheitsanforderungen verlangen, dass das Fahrzeug auch bei alleiniger Versorgung durch Generator, DC-DC-Wandler oder Batterie bis zum Stillstand funktionsfähig bleibt. Ein Simulationsfall ist deshalb die Annahme, dass die Batterie defekt ist und

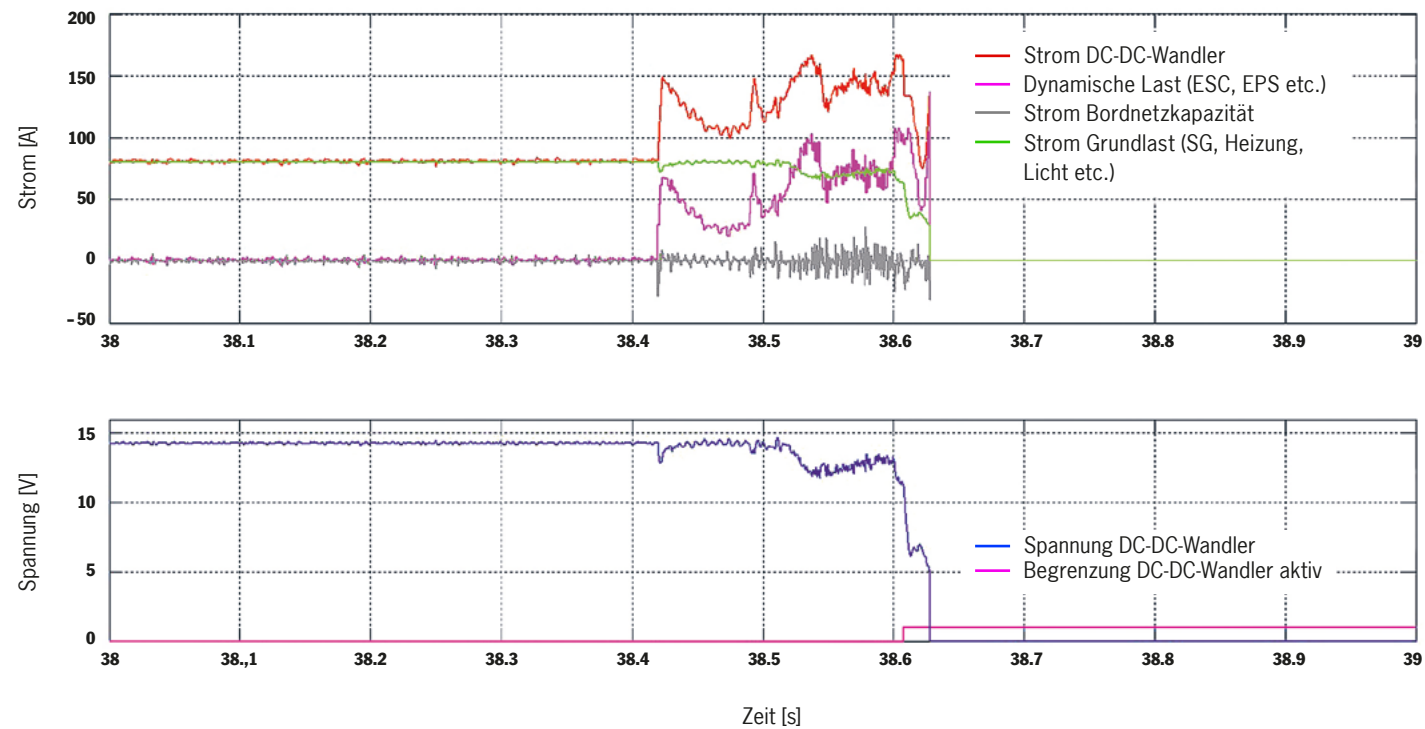


Abbildung 4: Stromverlauf im Bordnetz mit einem 2 kW starken DC-DC-Wandler bei Totalausfall im Manöver „gebremster Spurwechsel (Ausweichmanöver Tier)“

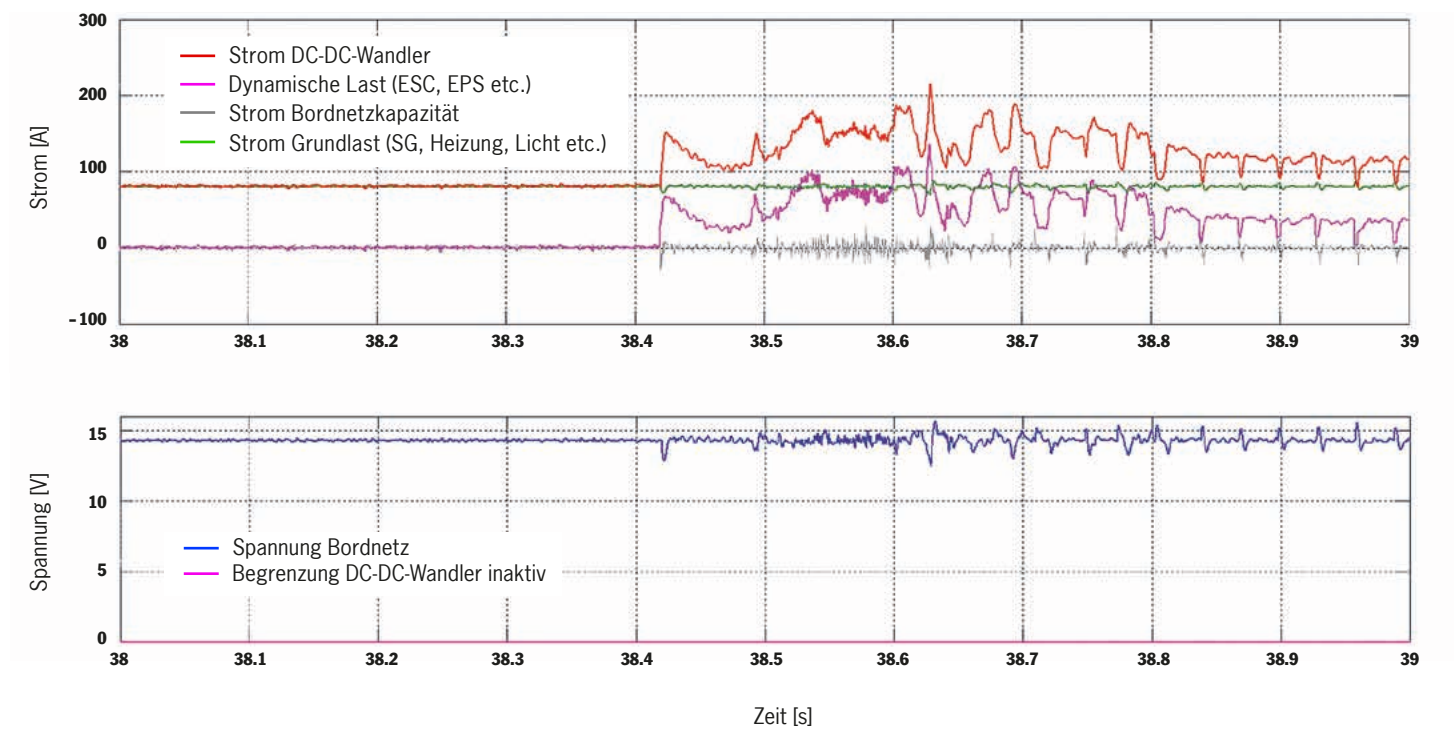


Abbildung 5: Stromverlauf im Bordnetz mit einem 3 kW starken DC-DC-Wandler

nur der DC-DC-Wandler Energie liefert. Im ersten Schritt erfolgt dabei die Simulation mit den Zielkomponenten (Abb. 4). Als Testzyklus dient der gebremste Spurwechsel („Ausweichmanöver Tier“). Die charakteristischen Größen, die einen DC-DC-Wandler beschreiben, sind unter anderem seine Nennleistung (im Beispiel 2 kW), sein Ein- und Ausgangsspannungsbereich, der Temperaturbereich, in dem er betrieben werden darf, und das Verhalten oberhalb des Nennstroms. Die Aufgabe des Wandlers besteht darin, die Spannung konstant auf einem Sollwert (im Beispiel 14,3 V) zu halten.

Weicht die Ist-Spannung (im Beispiel blau) im Bordnetz von der Soll-Spannung ab, passt der Wandler seinen

Ausgangsstrom so an, dass sich die gewünschte Spannung wieder einstellt. Kurzzeitig vermag er bei hohem Strombedarf in Überlast zu gehen, das bedeutet aber, dass er mehr als seinen Nennstrom bereitstellt. Der Betrieb über dem Nennstrom hat jedoch zur Folge, dass der DC-DC-Wandler sich über den erlaubten Bereich hinaus erwärmt. Um keine thermische Zerstörung herbeizuführen, erfolgt nach einer definierten Zeit oder ab einer bestimmten Temperatur die Begrenzung des Stroms auf den Nennwert, bis die Grenztemperatur unterschritten wird.

Der DC-DC-Wandler enthält regulär einen kapazitiven Speicher in Form eines Kondensators, um die Ausgangsspannung zu stabilisieren. Zusammen

mit dem Kabelsatz und den internen Speichern der Steuergeräte steht dem Weiteren ein sehr kleiner Speicher zur Verfügung, der als „Lastpuffer“ dienen kann. Die Spannung im Bordnetz wird aber auch durch parasitäre Größen wie Kabelwiderstand oder Induktivität beeinflusst, weshalb diese auch mit zu berücksichtigen sind.

Der Stromverlauf der Simulation ist grau dargestellt. Die Grundlast (grün), die sich hier durch die Versorgung der Steuergeräte, das eingeschaltete Licht und andere Verbraucher ergibt, beträgt 80 A. Durch die zusätzliche dynamische Stromanforderung der Hochstromverbraucher (Magenta) entsteht ein Leistungsmangel im Bordnetz. Diesem versucht der DC-DC-Wandler mit Er-

höhung des Stroms bis in den Überlastbereich entgegenzuwirken, kann aber nicht genug Strom einspeisen, um die Spannung auf den gewünschten Sollwert zu heben. Unterschreitet nun diese Spannung die Mindestspannung der Steuergeräte, kommt es zum Totalausfall des Bordnetzes. Das Resultat: Der DC-DC-Wandler mit einer Leistung von zwei Kilowatt ist für diese Belastung als singulärer Versorger nicht geeignet.

Im nächsten Schritt erfolgt die Simulation mit einem drei Kilowatt starken DC-DC-Wandler (Abb. 5). Dieser erfüllt die Stromanforderung und die Bordnetzspannung bleibt auf einem akzeptablen Wert. Bei der Versorgung durch einen Generator würde das Ergebnis an-

ders aussehen, da seine Regelgeschwindigkeit viel geringer ist. Dort wird das Problem mit der Erhöhung der Komponentenleistung nicht gelöst. Das Spannungsverhalten beim Abwurf von Verbrauchern oder die Stabilisierung durch zusätzliche Energiespeicher wie Doppelschichtkondensatoren wären weitere mögliche Untersuchungspunkte.

Bei der Analyse der Ergebnisse gilt für diese wie auch für alle anderen Simulationen: Es ist nicht nur wichtig, das Modell in hinreichender Modelltiefe und Genauigkeit entsprechend der Aufgabe zu erstellen, sondern auch die Grenzen der Modelle zu kennen, damit beim Auswerten zwischen physikalischen und modellspezifischen Einflüssen unterschieden werden kann.

Fazit: Die zügige Entwicklung komplexer Bordnetze erfordert Simulationen

Der Leistungsbedarf steigt aufgrund der steigenden Elektrifizierung stetig an. Die alleinige Absicherung des Bordnetzes über die Erhöhung der Leistung von Komponenten wie Generator und Batterie ist durch die hohe dynamische Belastung durch die Hochstromverbraucher nicht mehr möglich. Gleichzeitig halten von der Hochvoltseite her bekannte Komponenten wie Lithium-Ionen-Zellen Einzug ins Niedervolt-Bordnetz. Mehrspannungsbordnetze erhöhen die Komplexität noch einmal signifikant. Für die zuverlässige Auslegung künftiger Bordnetze ist eine entsprechende dynamische Analyse und Absicherung über die Simulation daher unabdingbar. ■