

Das Virtuelle Fahrzeug



Teil 2: Frühzeitige Validierung von Bordnetzen und Energiemanagement

Durch die größere Funktionsvielfalt im Bereich Komfort und Sicherheit ist der Anspruch an die Zuverlässigkeit elektrischer Bordnetze enorm gestiegen. Mehr elektrische Komponenten erfordern aber einen erhöhten elektrischen Energiebedarf, der zu jedem Zeitpunkt sichergestellt werden muss. Um diese Herausforderung elegant zu meistern und die Qualität des Energienetzes schon frühzeitig evaluieren zu können, setzen Fahrzeughersteller mittlerweile auf simulationsbasierte Entwicklungsmethoden.

Von Thorsten Gerke

über den zeitlichen Verlauf aller Spannungen und Ströme im Bordnetz. Der Verlauf des Ladezustands (State of Charge, SOC) des Akkumulators liegt unmittelbar nach der Simulation als Ergebnis vor. So wird ersichtlich, ob noch genügend Energie für einen Neustart des Verbrennungsmotors vorhanden ist. Auch die Auslastung des Generators steht unmittelbar nach der Simulation als Ergebnis zur Verfügung. Ob die Generatorgröße ausreichend ist oder das Energiemanagement zusätzliche Strategien einleiten muss, z.B. eine Anhebung der Leerlaufdrehzahl, kann sofort bewertet werden. Durch die Berücksichtigung des Algorithmus können sehr elegant Qualität und Auswirkungen des Energiemanagements evaluiert werden.

Nach dem Abschalten des Verbrennungsmotors muss ausreichend Energie im Bordnetz-Akku vorhanden sein, um den Startermotor mit Energie zu versorgen. So wird ein erneutes Anlaufen des Verbrennungsmotors ermöglicht. Obwohl der Motor nicht läuft, sind elektrische Verbraucher aktiv. Deren Energieversorgung muss, genauso wie für den aktiven Betrieb des Bordnetzes, gewährleistet sein. Die ausreichende Versorgung im aktiven Betrieb vermeidet ein kritisches Absinken der Bordnetzspannung bzw. regelt Spannungseinbrüche möglichst schnell wieder aus.

Moderne Bordnetze bedienen sich heute so genannter Energiemanagement-Systeme. Sie überwachen das Bordnetz und sind für die Verteilung der elektrischen Leistung zuständig. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass energetische Engpässe entsprechend behandelt werden. Dies beinhaltet zum Teil auch eine Überwachung des Bordnetz-Akkus. Zur Validierung des Bordnetzes eignet sich die Simulation der Energiemanagement-Strategien. Die Erwartungen an die Bordnetzsimulation stellt das Bild 1 dar. Die Si-

mulation ermöglicht virtuelle Testfahrten durchzuführen, so genannte Fahrzyklen, und das Verhalten des elektrischen Bordnetzes akkurat vorauszurechnen. Folgende Eingangsdaten werden für die Simulation berücksichtigt:

- ▶ Fahrprofil, z.B. NEFZ (neuer europäischer Fahrzyklus).
- ▶ Umgebungstemperatur, z.B. Einfluss auf den Generator.
- ▶ Ausstattung des Fahrzeugs, z.B. Verbraucher.
- ▶ Energiespeicher und Wandler, z.B. Akku, DC/DC-Wandler.

Die Simulation liefert zur Bewertung des Bordnetzes Informationen

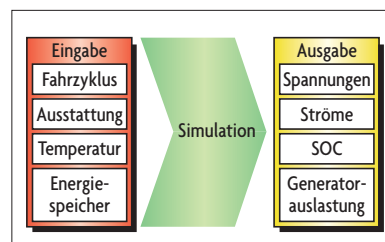


Bild 1. Die Eingabedaten für die Simulation berücksichtigen die Fahrzeugausstattung, die Umgebungsbedingungen und die Teststrecke. (SOC: State of Charge)

Das Gesamtmodell und seine Architektur

Wie ist nun der Aufbau des Simulationsmodells für ein Bordnetz zu gestalten? Konzeptionell besteht das Energienetz gemäß Bild 2 aus folgenden Komponenten:

- ▶ Generator.
- ▶ Akku.
- ▶ Verbraucher.
- ▶ Energiemanagement.

Das gesamte System ist in zwei Anteile aufgeteilt, Software-Algorithmen und physikalische Komponenten, die in der Gesamtsimulation des Bordnetzes miteinander validiert werden. Dabei sind zwei Signalpfade zu unterscheiden. Zum einen die Energieleitung, über die Verbraucher mit elektrischer Energie versorgt werden. Zum anderen die Steuerung der Verbraucher durch das Energiemanagement. Da die Details der Vernetzung wie z.B. CAN für diese energetischen Betrachtungen außer Acht gelassen werden können, sind in Bild 2 die Steuerungen der Lasten über direkt angekoppelte Steuersignale vom Energiemanage-

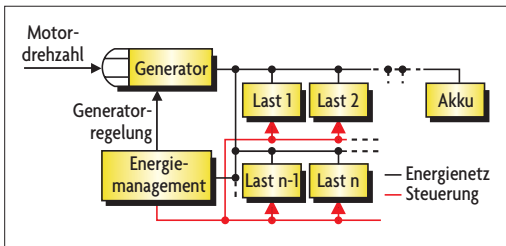


Bild 2. Das Bordnetzmodell für die Simulation besteht aus den parallel geschalteten Verbrauchern (Last 1 bis Last n), dem Energiespeicher (Akku), dem Generator und der Steuereinheit (Energie-management).

ment berücksichtigt. Dies ist für eine frühzeitige Verifizierung des Energiemanagement-Algorithmus vollkommen ausreichend. Diese Tests wurden in der Vergangenheit konventionell durch Fahrzyklen am realen Fahrzeug durchgeführt. Sie sind allerdings sehr aufwendig und kostenintensiv. Durch den simulationsbasierten Ansatz kann nun ein virtueller Prototyp des Bordnetzes für die Evaluierung verwendet werden. Dazu wird die Modellierung der physikalischen Kom-

ponenten als auch der Software benötigt, welche für das Energiemanagement eingesetzt wird. Beide Anteile werden dann in einem Gesamtmodell, wie in **Bild 3** dargestellt, konsolidiert. Die Saber-Entwicklungsumgebung von Synopsys bietet hierzu ein sehr flexibles Konzept an. Das physikalische Bordnetz wird hierzu komplett

in Saber, einem physikalischen Simulator, modelliert. Er beinhaltet unter anderem den Bordnetz-Akku, Generator, Verbraucher, Fahrzyklus etc. Die Software für das Energiemanagement wird als zusätzliches Modul mit dem physikalischen Bordnetz konsolidiert. Der Code für die Software, welcher üblicherweise in Form einer Zustandsmaschine abgebildet ist, kann sowohl handgeschrieben als auch modellbasiert sein – z.B. in Matlab/Simulink.

■ Modellierung des physikalischen Bordnetzes

Für das physikalische Modell des Energienetzes sind Modelle für eine Reihe von Komponenten notwendig. Es werden Modelle benötigt für

- ▶ Akku.
- ▶ Generator.
- ▶ Verbraucher.

Bild 4 zeigt ein Beispiel. Der Detaillierungsgrad bei den Modellen ist unterschiedlich. Die Modellierung und

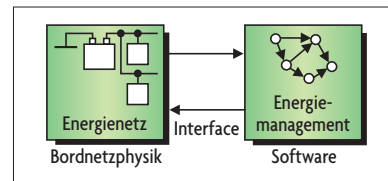


Bild 3. Sowohl der virtuelle Prototyp des Fahrzeugnetzes als auch die Software für das Energiemanagement werden für den Test zu einem Gesamtmodell zusammengefasst.

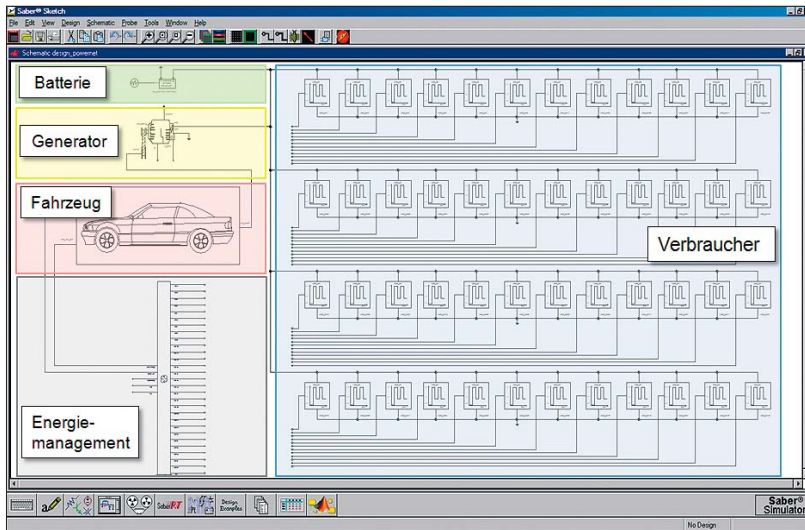


Bild 4. Die einzelnen Modelle für das Bordnetz und das Energiemanagement finden sich in der Saber-Entwicklungsumgebung wieder.

Charakterisierung des Akkumulators stellt für den Entwickler meist die größte Hürde dar. Saber bietet hierzu ein Werkzeug an, welches es erlaubt, z.B. Modelle für Blei-Säure-Akkus automatisch zu erstellen [1]. Hierzu werden Ergebnisse aus Messungen herangezogen, um das Modell automatisch zu parametrieren. Außerdem enthält die Modellbibliothek bereits vorparametrierte Modelle von Akkus. Auf Anfrage können auch kundenspezifische Modelle erstellt werden. Für den Generator werden entweder kennlinienbasierte oder physikalische Modelle eingesetzt. Letztere liefern eine größere Genauigkeit. Sie erfordern aber auch umfangreiche Informationen vom Generatorhersteller.

Für die Verbraucher wird ein stationärer Ansatz gewählt, so dass diese als tabellenbasierte Leistungssenken oder ohmsche Lasten modelliert werden können. Dieser Ansatz ist für die anvisierten Betrachtungen des Energienetzes vollkommen ausreichend.

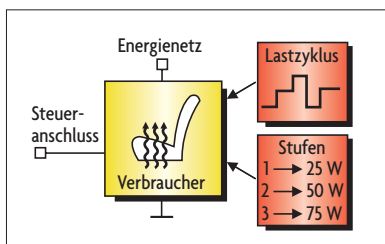


Bild 5. Zur Definition einer Last mit Steueranschluss gehören die einzelnen Zustände mit der jeweiligen Leistungsaufnahme sowie der Lastzyklus.

Dabei können die Lasten über einen externen Steueranschluss betätigt werden – beispielhaft ist eine dreistufige Last in **Bild 5** dargestellt. Dies erlaubt, die Leistungsaufnahme von Verbrauchern durch das Energiemanagement gemäß des aktuellen Zustandes des Bordnetzes zu skalieren.

Modellierung und Konsolidierung

Das Energiemanagement stellt sicher, dass die Versorgung im elektrischen Bordnetz zu jeder Zeit gewährleistet ist. Es überwacht hierzu die Bordnetzspannung, die Auslastung des Generators und den Zustand der Verbraucher. In Abhängigkeit des Bordnetzzustandes steuert das Energiemanagement z.B. eine Änderung der Leerlaufdrehzahl oder die Energieaufnahme von Verbrauchern wie Heizung oder Klimaanlage.

Der Algorithmus des Energiemanagements wird in Form einer digitalen Zustandmaschine in einem Software-Entwicklungswerkzeug aufgebaut. Die geschlossene Verifizierung von Energiemanagement und physikalischem Bordnetz erfordert die Zusammenführung des physikalischen Modells und des Software-Modells. Die Saber-Entwicklungsumgebung bietet hierzu eine flexible Schnittstelle, über die entsprechende Software-Modelle angebunden werden können. Ein üblicher Weg zur Anbindung des Software-Modells erfolgt über eine C-

Schnittstelle. Hierzu wird das Modell des Energiemanagements über einen Code-Generator in C-Code übersetzt, kompiliert und gelinkt. Anschließend wird es über die Schnittstelle in die Gesamtsimulation eingebettet. Saber bietet z.B. eine vollständig automatisierte Anbindung an Matlab/Simulink, die es erlaubt, ein Simulink-Modell per Knopfdruck in ein Saber-Simulationsmodell zu überführen. Der Integrationsprozess ist in **Bild 6** dargestellt. Damit ist ein nahtloser Übergang zwischen der Modellierung des physikalischen Bordnetzes und der Software-Entwicklung für das Energiemanagement geschaffen und dient als Ausgangspunkt für die Simulation des Gesamtsystems.

Simulation des Gesamtsystems

Das konsolidierte Gesamtsystem erlaubt bequem die Untersuchung des Bordnetzverhaltens mittels eines virtuellen Energienetzprototyps. **Bild 7** zeigt die Ergebnisse einer Fahrzeugsimulation für einen NEFZ-Fahrzyklus. Der Verlauf der Bordnetzspannung liegt großteils unterhalb der angestrebten

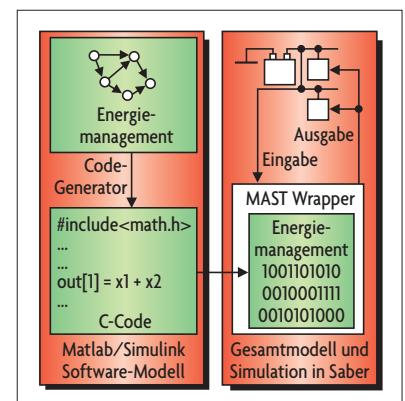
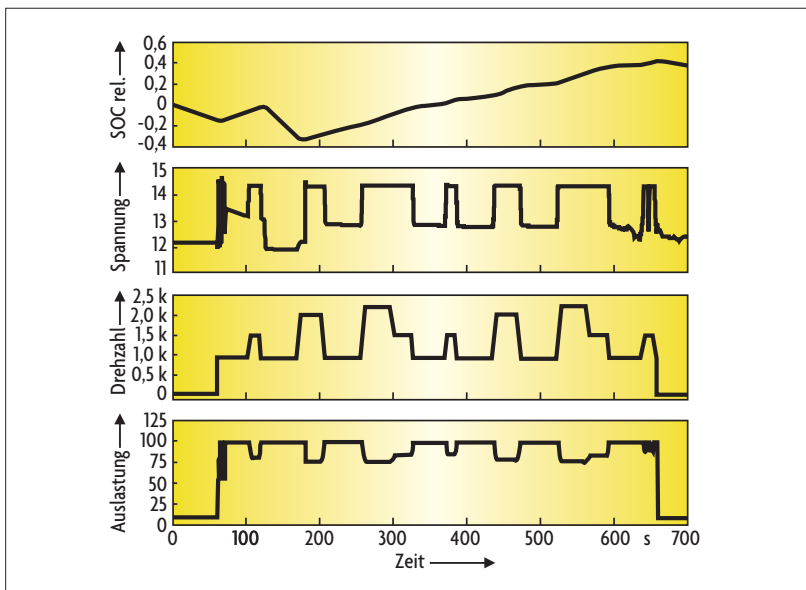


Bild 6. In Saber lassen sich Software-Modelle aus Matlab/Simulink automatisch einbinden, um sie in die Gesamtsimulation zu übernehmen. (MAST Wrapper: Master Wrapper).

14 V und der Generator ist meist zu 100 % ausgelastet. Es kann kein höherer Strom geliefert werden, um die Bordnetzspannung entsprechend anzuheben. Per SOC-Signal ist zu erkennen, dass während der ersten 50 % des Fahrzyklus zusätzlicher Strom aus dem Akku entnommen werden muss, um den Verbrauchsbedarf im Fahrzeug abdecken



I Bild 7. Das Simulationsergebnis zeigt den zeitlichen Verlauf des Bordnetzes während eines neuen europäischen Fahrzyklusses (NEFZ). Die Spannung fällt oft unter den angestrebten Wert von 14 V – der Generator ist dementsprechend häufig zu 100 % ausgelastet. Erst in der zweiten Hälfte des Zyklusses kann der Akku geladen werden. Bis dahin muss der Akku das Bordnetz mit stützen.

zu können. Erst danach steht genügend Energie zur Verfügung, um den Fahrzeug-Akku weiter aufladen zu können.

Diese Übersicht erlaubt es, unmittelbar Rückschlüsse auf die Qualität des Energiemanagements zu schließen. Außerdem kann überprüft werden, ob besser ein größerer Generator oder einer mit höherem Wirkungsgrad zu verwenden ist. Der Vorteil des simulationsbasierten Entwicklungsansatzes ist

es, möglichst schon bei der Konzeptionierung des Bordnetzes erste Informationen über die Güte des Systems zu erhalten, ohne einen Hardware-Prototypen in Form eines Testfahrzeugs zur Verfügung zu haben. So können z.B. Energiemanagementprobleme frühzeitig entdeckt, Adaptionen am Simulationsmodell eingepflegt und erneut am virtuellen Prototypen verifiziert werden.

Der hier dargestellte Ansatz lässt sich noch weiter ausbauen. Es ist möglich, auch die Auswirkungen auf den Kraftstoffverbrauch zu ermitteln [2], da eine Anhebung der Leerlaufdrehzahl durch das Energiemanagement auch eine Erhöhung des Kraftstoffverbrauchs verursacht. Weitergehende Fahrzeugkonzepte wie Start-Stopp, integrierter Starter-Generator oder komplette Hybrid-Architekturen werden momentan mit Hilfe dieses modellbasierten Ansatzes entwickelt. *hs*



Thorsten Gerke

studierte an der Universität Duisburg Maschinenbau/Mechatronik und begann dann als Support- und Applikationsingenieur bei Avanti Systems. Seit 2002 war er bei Synopsys in den Bereichen Applikation und Pre-Sales für Automotive zuständig. Seit 2006 leitet er bei Synopsys das Technische Marketing der Saber-Produktfamilie in Europa, qualifiziert Produktanforderungen und arbeitet an der zukünftigen Strategie des Saber-Produktportfolios.
thorsten.gerke@synopsys.com

Literatur

- [1] Gerke, T; Bolous, A.: Model based Design of Robust Power Networks, SAE Congress 2008, Detroit.
- [2] Lenz, C.: 14V Vehicle Powernet Simulation with Focus on Fuel Consumption. Synopsys User Group Meeting 2007.
- [3] Gerke, T: Das Virtuelle Fahrzeug – Teil 1. *Elektronik automotive*, 2008, H. 5, S. 46 – 49.