

# Dynamische Simulation der Spannungsstabilität und des thermischen Verhaltens von Fahrzeugbordnetzen

Maja Diebig, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme

maja.diebig@tu-dortmund.de

Stephan Frei, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme

stephan.frei@tu-dortmund.de

## Zusammenfassung

Aufgrund neuer Entwicklungen in den Bereichen Funktionalität, Sicherheit und Infotainment im Kraftfahrzeug ist die Anzahl der elektronischen Baugruppen in den letzten Jahren stark angestiegen. Um die hohe Komplexität und verschiedenen Anforderungen bereits im frühen Entwicklungsstadium kontrollieren und erfüllen zu können, gewinnt die Simulation des Bordnetzes immer mehr an Bedeutung. Um eine optimale Auslegung gewährleisten zu können, muss die Strombelastbarkeit, der Spannungsabfall und die Temperatur für jede Leitung bestimmt werden. Ein elektrisch-thermisches Leitungsmodell wird hier vorgestellt. Zudem wird eine Methode gezeigt, die es ermöglicht, aus den CAD-Daten ein Simulationsmodell automatisiert zu generieren und verschiedene Szenarien zu berechnen.

## 1 Einleitung

Das Bordnetz hat für alle elektrischen Funktionen aber auch die Herstellungskosten von Fahrzeugen eine große Bedeutung. Durch die steigende Anzahl an elektrischen Komponenten nimmt die zu übertragende Gesamtleistung kontinuierlich zu und die Verbrauchsprofile werden deutlich komplexer. Um die Produktionskosten und das Gewicht bei optimaler Funktionalität möglichst gering zu halten, muss der Kabelbaum optimal ausgelegt werden. Damit diese Forderungen auch bei steigender Komplexität erfüllt werden können, sind neue Prozesse und Methoden erforderlich. Aufgrund der Topologie und der Vielzahl der Möglichkeiten ist die Simulation als Hilfsmittel notwendig. Für die Simulation des Bordnetzes müssen Modelle der verschiedenen Komponenten, wie Batterie, Generator, elektrische Verbraucher, Kontakte, Sicherungen und Leitungen erstellt werden. Um die Strombelastbarkeit, den Spannungsabfall und die Temperatur an einer Leitung berechnen zu können, ist ein thermisch-elektrisches Leitungsmodell notwendig. Mögliche Modellierungsansätze sind die Lö-

sung durch Wärmeleitungsgleichung [1], durch die Netzwerktheorie [2] und über die Leistungsbilanzen [3]. In dieser Veröffentlichung wird ein Modell auf Grundlage der Leistungsbilanzen vorgestellt, das sowohl für thermische als auch elektrische Simulationen geeignet ist.

Für die Gesamt- oder Teilbordnetzsimulation ist eine automatisierte Modellerstellung notwendig. Als Datengrundlage kann die Kabelbaumliste (KBL-Datei) [4] dienen. Das Format ist unter dem Namen STEP AP 212 standardisiert und liegt im XML-Format vor. Die geometrischen Eigenschaften der Leitungen wie auch Topologieinformationen sind enthalten. Mit dieser Datengrundlage kann ein Kabelbaummodell mit Leitungen, Steckern und Sicherungen automatisiert gebildet werden. Erste Untersuchungen zur automatisierten Modellierung wurden bereits in [5] durchgeführt.

## 2 Modellgenerierung

Als Modellierungssprache wird MATLAB Simscape genutzt. Der Vorteil ist hier die einfache Co-Simulation mit Simulink Fahrwerksmodellen und die Möglichkeit der physikalischen Beschreibung.

### 2.1 Leitungsmodell

Die Leitungsverlegung erfolgt im Kabelbaum in Bündeln. Für die thermische Betrachtung sind allerdings einzelne Leitungen in Luft der kritischste Fall. Im Bündel können die umliegenden Kabel die Wärme ableiten und so das betroffene Kabel kühlen, während Luft ein deutlich schlechterer Wärmeleiter ist. Thermisch besonders kritische Stellen befinden sich meist direkt am Stecker. Als Grenze für die Strombelastbarkeit wird die thermische Festigkeit des Isolationsmaterials verwendet.

Für die Modellierung kann der elektrische Leiter als perfekter Wärmeleiter angesehen werden. Ausgehend von der Länge des Kabels im Vergleich zum Radius ist es ausreichend, nur den Wärmefluss in radialer Richtung zu betrachten. Das Prinzip des Modells beruht auf der Wechselbeziehung zwischen dem thermischen und elektrischen Teil. Der Spannungsabfall  $U$  über einer Leitung mit einem Widerstand  $R_{nom}$  und einer Strombelastung  $I$  ergibt sich für stationäre und langsame Vorgänge zu:

$$U = I \cdot R_{nom} (1 + \alpha_T (T - T_{nom})) \quad (1)$$

Dabei ist  $\alpha_T$  der lineare Temperaturkoeffizient und  $T_{nom}$  die Nominaltemperatur. Die Temperatur  $T$  an der Oberfläche des elektrischen Leiters kann über die Leistungsbilanz berechnet werden. Die Wärmeleistung im Leiter wird durch den elektrischen Stromfluss erzeugt. Die Verlustleistung  $P_e$  ist abhängig von der Stromstärke und dem Widerstand des Leiters, welcher sich mit der Temperatur verändert.

$$P_e = I^2 \cdot R_{nom} (1 + \alpha_T (T - T_{nom})) \quad (2)$$

Ein Teil der Wärme wird durch Konvektion  $P_k$  und Strahlung  $P_s$  an die Umgebung abgegeben. Die Leistung, die nicht abgeführt werden kann, wird über die Wärmeka-

pazität des Leiters als Wärme  $Q$  im Leiter aufgenommen und erhöht die Leitertemperatur. Die Gleichung für die Energieerhaltung ergibt sich nach [1] zu

$$P_e = P_k + P_s + \frac{dQ}{dt}. \quad (3)$$

Dabei kann die abgeführte Wärme durch Konvektion für einen zylindrischen Leiter der Länge  $l$  mit dem Radius des Leiters  $r_l$  und dem Radius der Isolierung  $r_i$  folgendermaßen berechnet werden:

$$P_k = \alpha_k 2\pi r_l l (T - T_U), \quad (4)$$

dabei ist  $\alpha_k$  der Wärmeübergangskoeffizient für Konvektion und berechnet sich aus der Nußelt-Zahl  $Nu$ , der Anströmlänge  $l_a$  und der Wärmeleitfähigkeit der Umgebung  $\lambda_{luft}$

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_{luft}}{l_a} \quad [6]. \quad (5)$$

Damit die Strahlungsleistung mit der Leistung durch Konvektion vergleichbar ist, wird sie in eine äquivalente Form zur Gleichung (4) gebracht

$$P_s = \alpha_s 2\pi r_l l (T - T_U). \quad (6)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_s$  für Strahlung berechnet sich nach [6] mit dem Emissionsverhältnis  $\varepsilon$  und der Strahlungskonstante  $\sigma$  zu

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon \sigma_s [T^4 - T_U^4]}{T - T_U}. \quad (7)$$

Mit den spezifischen Wärmekapazitäten für den Leiter  $\beta_l$  und die Isolierung  $\beta_i$  folgt für die verbleibende Wärmemenge in der Leitung

$$Q = (\beta_l \cdot \pi \cdot r_l^2 + \beta_i \cdot \pi \cdot r_i^2) \cdot l \cdot (T - T_U). \quad (8)$$

Damit ergibt sich für die Temperaturänderung der Leitung über der Zeit

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\left( l^2 R_{nom} (1 + \alpha_T (T - T_{nom})) - \frac{2\lambda_i \pi r_i l \left( \frac{Nu \cdot \lambda_{luft}}{l_a} + \frac{\varepsilon \sigma_s [T^4 - T_U^4]}{T - T_U} \right)}{\lambda_i + \left( \frac{Nu \cdot \lambda_{luft}}{l_a} + \frac{\varepsilon \sigma_s [T^4 - T_U^4]}{T - T_U} \right) \cdot r_i \ln(r_i/r_l)} (T - T_U) \right)}{(\beta_l \pi \cdot r_l^2 + \beta_i \pi \cdot r_i^2) l}, \quad (9)$$

dabei ist  $\lambda_i$  die thermische Leitfähigkeit der Isolierung. Mit dem erstellten Modell kann die Erwärmung der Leitung bestimmt werden. In [7] ist der Erwärmungsvorgang für ein  $1,5 \text{ mm}^2$  Kabel mit einer Strombelastung von 35 A gemessen worden. Ein Vergleich mit der nach (9) berechneten Temperatur ist in Abbildung 1 dargestellt.

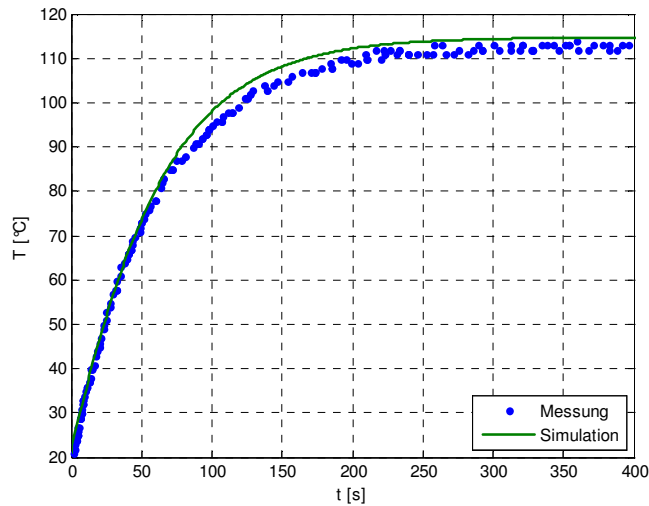


Abbildung 1: Erwärmungsvorgang für ein 1,5 mm<sup>2</sup> Kabel bei 35 A

Um das Simulationsmodell mit weiteren Messungen verifizieren zu können, wird ein 0,5 mm<sup>2</sup> Kabel mit PVC Isolierung mit verschiedene Ströme belastet. Dafür wird das Kabel in einer Klimakammer platziert (siehe Abbildung 2), um so die Umgebungstemperatur konstant auf einer Temperatur zu halten. Der Strom wird mit einer Konstantstromquelle eingepreßt und die Spannung wird gemessen. Die Temperaturmessung wird indirekt durchgeführt, um so die Fehleranfälligkeit zu minimieren. Die Bestimmung der Leitertemperatur erfolgt schließlich über Gleichung (1).

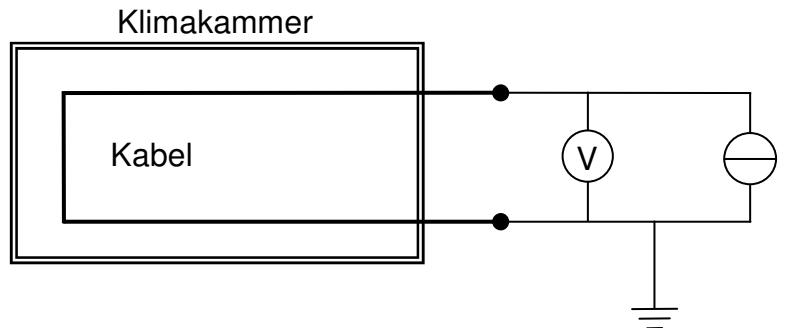


Abbildung 2: Vergleich Messung und Simulation

Mit dem erstellten Modell ergeben sich für das untersuchte Kabel, abhängig von der Stromstärke, die in Abbildung 3 dargestellte Temperatur und der Spannungsabfall.

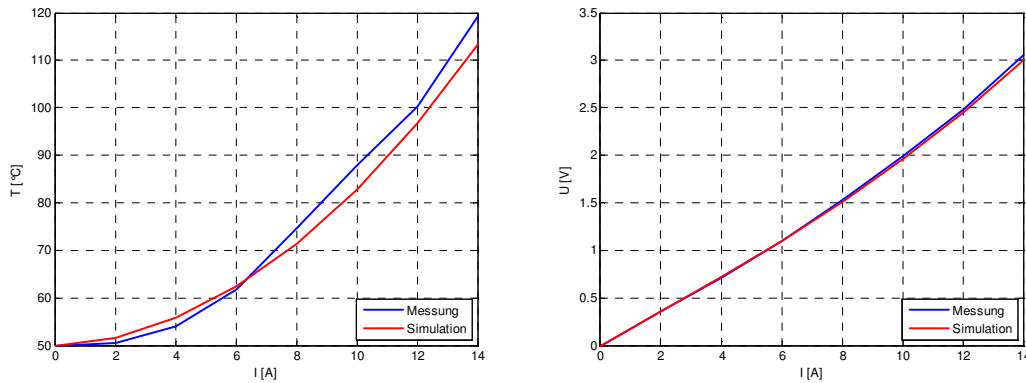


Abbildung 3: Vergleich Messung und Simulation

### 3 Automatisierte Modellerstellung

Für die automatisierte Modellerstellung wird als Datengrundlage die KBL-Datei genutzt. Die KBL-Informationen liegen in einer XML (Extensible Markup Language) Struktur vor, welche die Daten anhand kurzer Marken strukturiert. Durch die Anordnung der Daten können die Informationen in Gruppen dargestellt werden. Die in der KBL-Datei vorhandenen Gruppen müssen für die Simulation angepasst werden. Als Datenbasis werden für die einzelnen Objekte wie Leitungen, Stecker, Komponenten und Sicherungen eigene Gruppen erstellt und die notwendigen Eigenschaften zugeordnet. Damit das Bordnetz richtig abgebildet werden kann, müssen ebenfalls die Schraubpunkte und Kontakte betrachtet werden. Dabei muss besonders darauf geachtet werden, dass die Verbindungsinformationen richtig zugeordnet werden. Die fehlenden Informationen müssen über zusätzliche Quellen hinzugefügt werden. Das Automatisierungsprogramm erstellt mit einem MATLAB Präprozessor ein Datenmodell, aus dem anschließend ein Simulationsmodell generiert wird, wie in Abbildung 4 dargestellt.

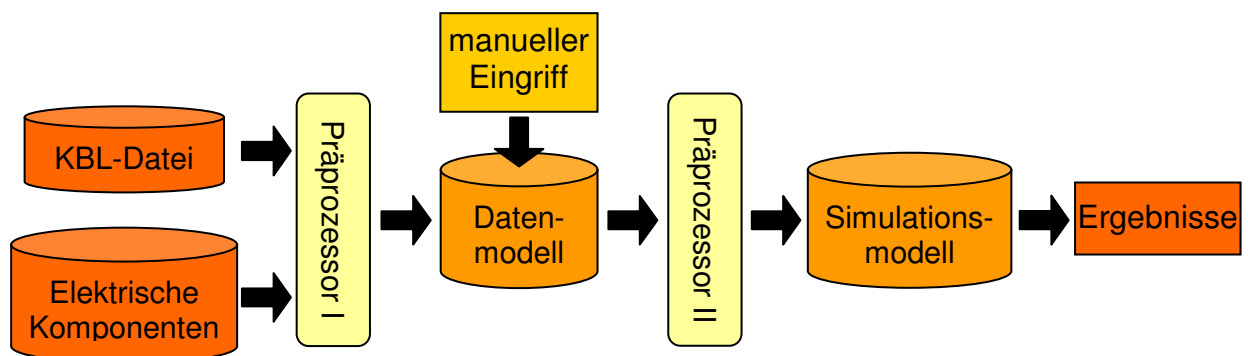


Abbildung 4: Ablaufdiagramm der Automatisierung

Auf das Datenmodell kann manuell zugegriffen werden, um gegebenenfalls Änderungen einzufügen oder die Daten vorab zu überprüfen. Für die Erstellung des Gesamtmodells sind verschiedene Programmmodule notwendig. Im ersten Teil werden alle für das Simulationsmodell nötigen Informationen aus der KBL-Datei eingelesen und in strukturierten Datenbanken für jede Objektklasse hinterlegt. An dieser Stelle

ist eine manuelle Überprüfung und Änderung der Daten möglich. Das Datenmodell enthält alle notwendigen Informationen über die Leitungen, Sicherungen, Kontakte und Komponenten. Zusätzlich wird ein Verweis des jeweiligen Objekts auf ein Simulationsmodell erzeugt, so dass eine direkte Zuordnung der Komponente zu einem Modell möglich ist. Die Modelldateien müssen vorab in einer Bibliothek in Simscape oder Simulink abgelegt werden. Für die Leitungen und Kontakte wird jeweils nur ein allgemeines Modell abgelegt, welches durch die in der KBL-Datei enthaltenen Geometrie- und Materialinformationen parametrisiert wird. Für die Komponenten und Sicherungsboxen kann nur die Pinanzahl aus der KBL-Datei entnommen werden. Weitere Parameter und Funktionsweisen müssen vorab in der Modellbibliothek hinterlegt werden.

Um die verschiedenen Temperaturbereich im Fahrzeug berücksichtigen zu können, kann die Leitung durch die Topologieinformationen in einzelne Segmente aufgeteilt werden. Verläuft eine Leitung in unterschiedlichen Temperaturbereichen, beispielsweise von der Batterie im Kofferraum zum Motorsteuergerät im Motorraum, wird das Kabel in die Anzahl der durchlaufenen Temperaturbereiche aufgeteilt. Eine realistische Abbildung wird dadurch ermöglicht, dass die Kabelsegmente eines Kabels einzeln auf ihre Lage geprüft werden. Die Segmentkoordinaten werden für die Ermittlung der Umgebungstemperatur verwendet, auf diese Weise kann das Kabel im Fahrzeug lokalisiert werden. Über die x-Koordinate des Startpunktes werden die Umgebungstemperaturen den Segmenten zugeordnet.

## 4 Zusammenfassung

Ein elektrisch-thermisches Kabelmodell auf Grundlage der Leistungsbilanzen wurde vorgestellt und durch Messungen verifiziert. Das entwickelte Modell kann zur Dimensionierung und Optimierung des Kabelbaums verwendet werden.

Weiterhin wurde eine Methode zur automatisierten Modellgenerierung und Simulation des Bordnetzes basierend auf CAD-Daten vorgestellt. Auf Grundlage der KBL-Daten kann ein parametrierbares Simulationsmodell erzeugt werden. Der gezeigte Ansatz ermöglicht es, Automobilherstellern schon in der Entwicklungsphase erste Analysen durchzuführen. Auf diese Weise können eventuelle Schwachstellen gefunden und optimale Leitungsquerschnitte ausgewählt werden.

## Literatur

- [1] Anders, G.J.: *Rating of electrical power cables. Ampacity computations for transmission, distribution and industrial applications*, IEEE Press, New York, 1997, McGraw Hill, New York, 1998
- [2] Neher, J.H., McGrath, M.H.: *The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems*, AIEE Transactions, Vol. 76, 1957

- [3] Illgevicus, A.: *Analytical and numerical analysis and simulation of heat transfer in electrical conductors and fuses*, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2004
- [4] VDA Empfehlung 4964: *Kabelbaumliste*, 2005
- [5] Gehring, R., Wanke, C., Herzog, H.-G.: *Automatisierte Modellierung des elektrischen Energiebordnetzes im Kraftfahrzeug mit Hilfe von Kabelbaumkonstruktionsdaten*; ASIM Treffen STS/GMMS 2009 Dresden, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart; 2009
- [6] *VDI-Wärme Atlas*, 5. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, New York, 1988
- [7] Grandvullemin, J., Champagne, D., Glises, R., Tiraby, C., Butel Degrange, F.: *Thermal modelling of enclosed cables in automotive applications*, IEEE VPPC, 2007