

# Simulationsbasierte Optimierung von Mehrspannungsbordnetzen

## Simulation-Based Optimization of Multi-Voltage Vehicle Electrical Systems

Maja Diebig, Prof. Dr. Stephan Frei, TU Dortmund, AG Bordsysteme, Dortmund

### Kurzfassung

In diesem Beitrag wird eine Methode zur simulationsbasierten Optimierung von Mehrspannungsbordnetzen in Kraftfahrzeugen beschrieben. Mit Hilfe eines thermischen Leitungsmodells zur Bestimmung der Strombelastbarkeit und des Spannungsabfalls können Leitungen optimal ausgelegt werden. Kosten- und Gewichtsfunktionen für Leitungen und Wandler erlauben die Bewertung und Optimierung eines Mehrspannungsbordnetzes.

### Abstract

In this paper a simulation-based method to optimize a multi-voltage vehicle electrical system is presented. With an electrical-thermal wire model the ampacity and the voltage drop of the cable can be determined. With these criteria the cables of the vehicle electrical systems can be dimensioned. With functions defining the costs and the weight of the wires and DC/DC-converters the evaluation and optimization of the multi-voltage vehicle electrical systems can be done.

## 1 Einleitung

Das Bordnetz hat einen großen Einfluss auf alle elektrischen Funktionen und auch auf die Herstellungskosten eines Fahrzeugs. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und die Zunahme der elektrischen Komponenten steigt die Komplexität des Bordnetzes stetig an. Um die Produktionskosten, das Gewicht und den Bauraum zu minimieren, sind leistungsfähige Optimierungsverfahren erforderlich. Aufgrund der komplexen Topologie und der hohen Anzahl variabler Konfigurationen, gewinnt die Simulation hier immer mehr an Bedeutung. Die Simulation muss verschiedene Ansprüche erfüllen. Neben den elektrischen Eigenschaften wie dem dynamischen Spannungsabfall über der Leitung müssen auch die thermischen Eigenschaften wie die Leitertemperatur berücksichtigt werden.

Für eine Gesamtbordnetzsimulation sind Modelle aller Komponenten, wie z.B. Batterie, Generator, elektrische Verbraucher, Kontakte, Sicherungen und Leitungen, notwendig. Zur Berücksichtigung des elektrifizierten Antriebsstrangs müssen neben den normalen Fahrzeugleitungen auch geschirmte Hochvoltleitungen betrachtet werden. Neue Spannungsebenen sollen ebenfalls in der Simulation berücksichtigt werden können. Neben dem 12 V Bordnetz, können höhere Spannungen (z.B. 48 V und höher) für Hochleistungsverbraucher und niedrigere Spannungen (z.B. 5 V) für Elektronikkomponenten sinnvoll sein. Um verschiedene Spannungsebenen integrieren zu können, sind DC/DC-Wandler notwendig. In diesem Beitrag werden Untersuchungen zum Entwurf und der Optimierung von Mehrspannungsbordnetzen dargestellt.

## 2 Simulationsmodelle

### 2.1 Leitungsmodelle

Zur Optimierung des Kabelstrangs werden Leitungsmodelle benötigt, die das elektrisch-thermische Verhalten nachbilden. Obwohl die Leitungsverlegung im Fahrzeug in Bündeln erfolgt, ist für die thermische Betrachtung die Einzelleitung (im Steckerbereich wird die Bündelung aufgehoben) meist der kritischste Fall, da bei geringer Konvektion Luft ein deutlich schlechterer Wärmeleiter als ein Isolationskunststoff ist. Aufgrund des Verhältnisses der Leitungslängen zum Querschnitt wird nur der Temperaturverlauf in radialer Richtung betrachtet [1]. Ausgehend von der Fourier-Wärmeleitungsgleichung ergibt sich die transiente Kabeltemperatur  $T$  in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur  $T_U$  als Differenz aus der zugeführten elektrischen Leistung  $P_E$  und der abgeleiteten thermischen Leistung  $P_T$  [2]:

$$C_{th} \frac{dT}{dt} = I^2 \frac{\rho}{A} \left( 1 + \alpha_T (T - T_{ref}) \right) - \frac{2\pi r_i \lambda_i \alpha(T_0)}{\lambda_i + \alpha(T_0) r_i \ln \frac{r_i}{r_l}} (T - T_U) \quad (1)$$

mit

$C_{th}$	Wärmekapazität	[Ws/(mK)]
$\rho$	Spezifischer Widerstand des Leiters	[ $\Omega$ m]
$A$	Querschnittsfläche des Leiters	[m <sup>2</sup> ]

$\alpha_T$	Linearer Temperaturkoeffizient	[1/K]
$r_i$	Radius der Isolierung	[m]
$\lambda_i$	Thermische Leitfähigkeit der Isolierung	[W/(mK)]
$r_l$	Radius des Leiters	[m]
$\alpha(T_o)$	Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung und Konvektion	für [W/(m <sup>2</sup> K)]

Die Lösung der Differentialgleichung erfolgt in Matlab-Simulink/Simscap. Dabei wird der Wärmeübergangskoeffizient für Strahlung und Konvektion in Abhängigkeit der aktuellen Oberflächentemperatur  $T_o$  berechnet.

## 2.2 Verbrauchermodelle

Die verwendeten Verbraucher werden als Stromsenke dargestellt. Zur Überprüfung der Spannung wird ein Spannungssensor parallel geschaltet, der den Spannungsabfall an der Komponente überwacht. Dabei wird die minimale Grenzspannung für jeden Verbraucher vorgegeben, um so die Funktionsweise gewährleisten zu können.

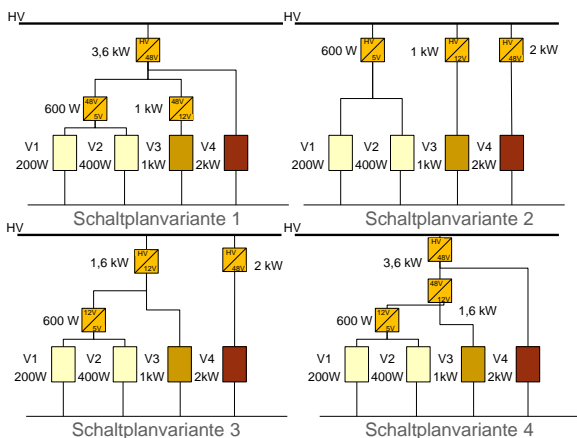
## 2.3 Wandlermodelle

Das Wandlermodell ist ein vereinfachtes Verhaltensmodell, welches mit einem gegebenen Übersetzungsverhältnis die Spannung wandelt. Der Wirkungsgrad des Wandlers wird in diesem Beitrag als ideal angenommen.

## 3 Bordnetztopologien

In diesem Beitrag werden vier Spannungsebenen (5 V, 12 V, 48 V, 250 V) betrachtet. Beispielhaft sind in **Bild 1** vier Verbraucher dargestellt, wobei zwei (V1, V2) an das 5 V-Netz, einer an das 12 V-Netz und einer an das 48 V-Netz angeschlossen sind. Für diese Konfiguration werden verschiedene Bordnetzkonstruktionen, mit zentralen wie auch mit dezentralen Wandlern, miteinander verglichen.

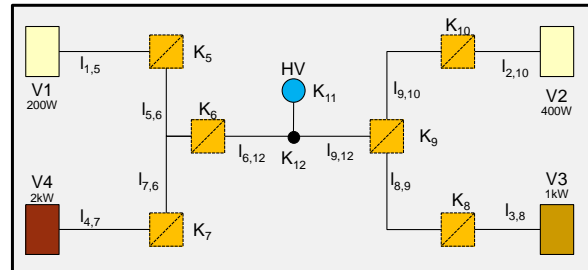
In **Bild 1** sind exemplarisch vier mögliche Schaltplanvarianten (SVar) dargestellt.



**Bild 1:** Verschiedene Schaltplanvarianten

Ausgehend von diesen Schaltplänen, werden für jede Variante die möglichen Topologien verglichen. Die Bewertung erfolgt anhand von Kosten und Gewicht. In den Topologien werden die mögliche Verlegewege und Einbauräume berücksichtigt. Durch definierte Knotenpunkte sind die Leitungslängen vorgegeben und der optimale Querschnitt der Leitungen muss bestimmt werden.

In **Bild 2** sind die verschiedenen möglichen Einbauräume (K5-K10) für die drei Wandler in einer Topologiedarstellung gezeigt.



**Bild 2:** Topologie mit möglichen Einbauräumen für Wandler

Die Leitungslängen zwischen den Einbauräumen sind fest vorgegeben und werden auf 1,5 m gesetzt.

Die Variation der Einbauräume wird automatisiert umgesetzt, dazu werden die verschiedenen möglichen Topologien jeweils als Simulationsmodell aufgebaut und das Gesamtgewicht bzw. die Gesamtkosten berechnet. Beispielhaft sind die in **Tabelle 1** gezeigten Topologievarianten (TVar) für jede Schaltplanvariante gewählt worden.

TVar	W1	W2	W3
1	K9	K8	K10
2	K6	K8	K10
3	K5	K8	K10
4	K7	K8	K10
5	K9	K8	K5
6	K9	K8	K6
7	K9	K8	K7
8	K6	K8	K7

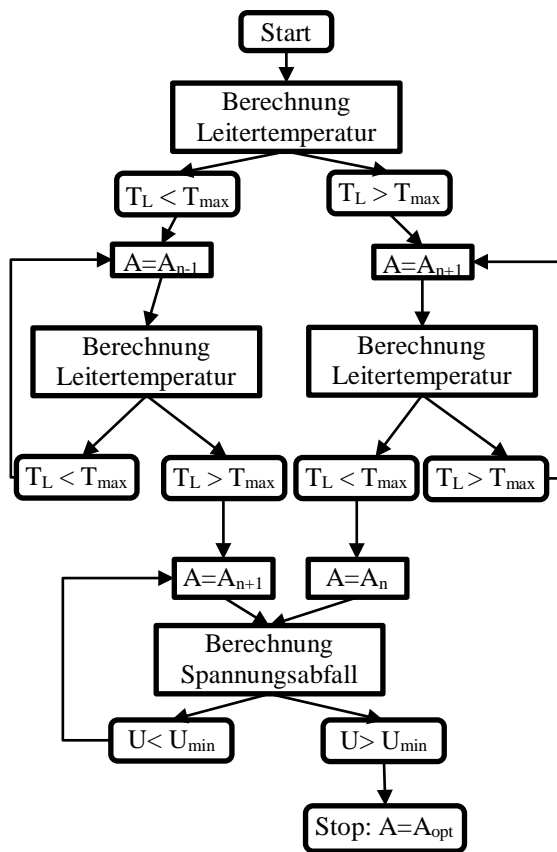
**Tabelle 1:** Mögliche Einbauräume der Varianten

Für den 12 V Wandler wird immer der Einbaureaum K8 verwendet, die beiden anderen Wandler werden hinsichtlich ihres Einbauraums variiert.

## 3.1 Querschnittsoptimierung

Die Optimierung des Leitungsquerschnitts erfolgt unter Berücksichtigung der Stromtragfähigkeit und des Spannungsabfalls über der Leitung bzw. der resultierende Spannung an der Komponente. Für jede Leitung wird der optimale Querschnitt berechnet. Beachtet werden dabei nur die üblicherweise im Kfz- Bereich verwendeten Lei-

terquerschnitte. Das Ablaufdiagramm des Optimierungsalgorithmus ist in **Bild 3** dargestellt.



**Bild 3:** Ablaufdiagramm des Optimierungsalgorithmus

Der entwickelte Algorithmus vergleicht die berechnete Temperatur  $T_L$  mit der maximal erlaubten Grenztemperatur  $T_{max}$  und wählt den nächst höheren  $A_{n+1}$  oder niedrigeren  $A_{n-1}$  Querschnitt aus, um so den optimalen Leiterquerschnitt in Abhängigkeit von der Temperatur zu bestimmen. Ist dieser Querschnitt gefunden, wird abschließend der Spannungsabfall über der Leitung und am Verbraucher berechnet. Wird die minimale Spannung  $U_{min}$  für den angeschlossenen Verbraucher unterschritten, so wird der nächst größere Querschnitt  $A_{n+1}$  gewählt.

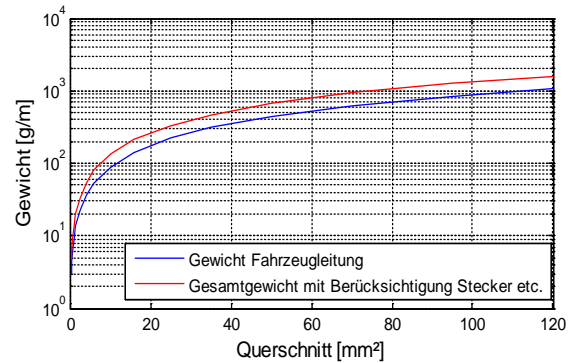
## 4 Optimierung von Bordnetzen

Um die Varianten bewerten zu können, sind Kosten- und Gewichtsfunktionen für die Wandler und Leitungen entwickelt worden, die im Folgenden vorgestellt werden.

### 4.1 Leitungsbewertung

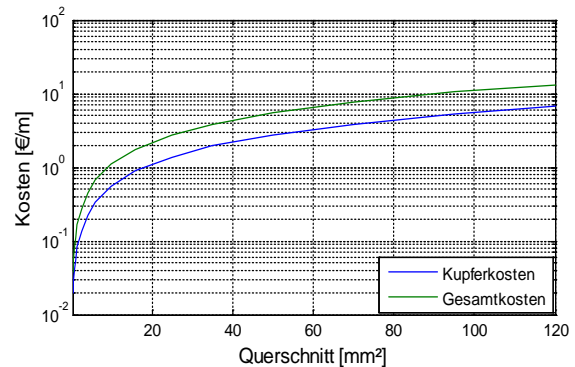
Das Gewicht der Leitungen wird über die Dichte von Kupfer berechnet. Dabei wird die Isolierung zunächst vernachlässigt, da der Kupferanteil das Gewicht dominiert ( $\rho_{Cu}$ : 8,92 g/cm<sup>3</sup>,  $\rho_{PVC}$ : 1,4 g/cm<sup>3</sup> [3]). Um die Isolierung und die Stecker zu berücksichtigen, wird zu dem berechneten Kupfergewicht der Leitung nochmal 50 % des Kup-

fergewichts hinzuaddiert. Die Funktion für das Leitungsgewicht in Abhängigkeit von der Länge ist in **Bild 4** dargestellt.



**Bild 4:** Leitungsgewicht

Die Kosten der Leitung berechnen sich im Wesentlichen aus dem Kupfergewicht. Dabei wird ein Preis von 6,20 €/kg Kupfer angenommen [4]. Die Kosten für PVC und die Verarbeitung werden über einen Korrekturfaktor von 2 in die Kostenberechnung eingefügt. Die Kosten pro Meter Leitung sind in **Bild 5** dargestellt und berechnen sich aus dem Kupferpreis, dem Gewicht der Leitung pro Meter und dem Korrekturfaktor.



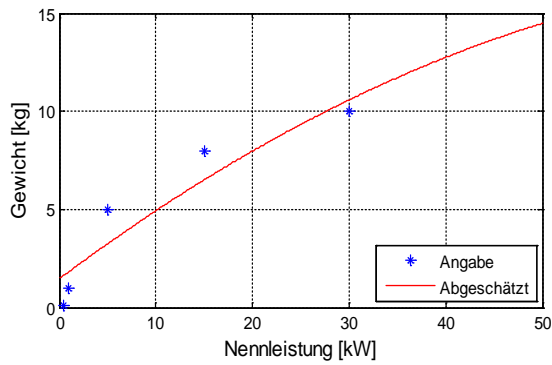
**Bild 5:** Leitungskosten

### 4.2 Wandlerbewertung

Die Abschätzung des Wandlergewichts erfolgt nur leistungsabhängig über Angaben aus verschiedenen Datenblättern von DC/DC-Wandlern und die Approximation der Daten in eine quadratische Funktion, siehe **Bild 6** und Gleichung (2).

$$G(P_{nenn})_W = -2,169 \cdot 10^{-6} \cdot P_{nenn}^2 + 0,369 \cdot P_{nenn} + 1459 \quad (2)$$

Die Bestimmung der Wandlerkosten erfolgt über die Berechnung der Kosten für die einzelnen Bauelemente. Dabei werden die Kosten für Transistoren und Dioden aus Datenblättern entnommen und mittels Fitfunktionen dargestellt.



**Bild 6:** Approximation des Wandlergewichts

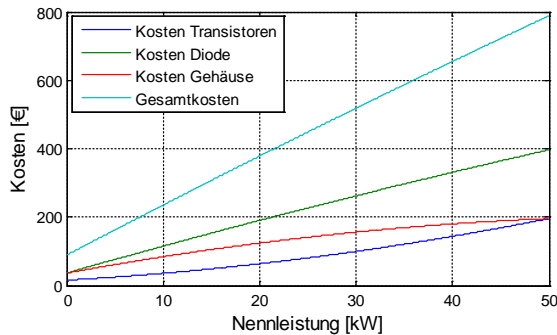
$$K(P_{nenn})_T = 5 \cdot 10^{-9} \cdot P_{nenn}^2 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot P_{nenn} + 1,9841 \quad (3)$$

$$K(P_{nenn})_D = -2 \cdot 10^{-9} \cdot P_{nenn}^2 + 1 \cdot 10^{-3} \cdot P_{nenn} + 4,5861 \quad (4)$$

Um das Gehäuse, die Kühlung und zusätzlichen Elemente zu berücksichtigen, wird ein Gehäusefaktor eingeführt, welcher quadratisch von der Nennleistung abhängt. Es wird ein Zusammenhang zweiter Ordnung angenommen, da der Einfluss der Gehäusekosten für sehr hohe Leistungen sinkt.

$$K(P_{nenn})_G = -4 \cdot 10^{-8} \cdot P_{nenn}^2 + 5,2 \cdot 10^{-3} \cdot P_{nenn} + 36,2375 \quad (5)$$

Die Gesamtwandlertkosten berechnen sich über die Addition der einzelnen Kostenterme, siehe **Bild 7**.



**Bild 7:** Wandlerkosten

Ausgangspunkt für die Berechnung der Kosten ist ein Vollbrücken-Gegentaktwandler, welcher aus 8 Transistoren und 8 Dioden besteht [5].

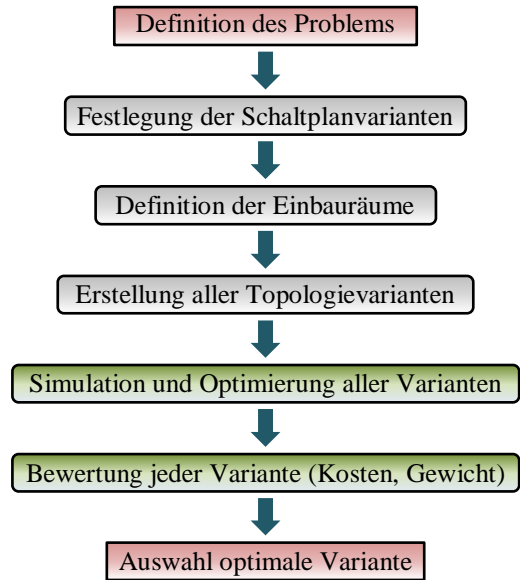
Die angegebenen Wandlerkosten sind nur für Nennleistungen bis 50 kW gültig.

### 4.3 Beschreibung der Methodik

Mit den angegebenen Kosten- und Gewichtsfunktionen und dem Optimierungsalgorithmus für die Leiterquerschnitte, kann eine Optimierung von Mehrspannungsbordnetzen durchgeführt werden. Das Ablaufdiagramm der Optimierung ist in **Bild 8** dargestellt.

Nach der Definition der Verbraucher werden die möglichen Schaltplan- und Topologievarianten festgelegt und erzeugt. Jede Variante wird simuliert und die Leitungen werden mit dem vorgestellten Optimierungsalgorithmus ausgelegt.

Die Kosten und das Gewicht werden für jede Variante berechnet und die Varianten hinterher verglichen. Die optimale Variante kann so für das ausgewählte Bordnetz gefunden werden.



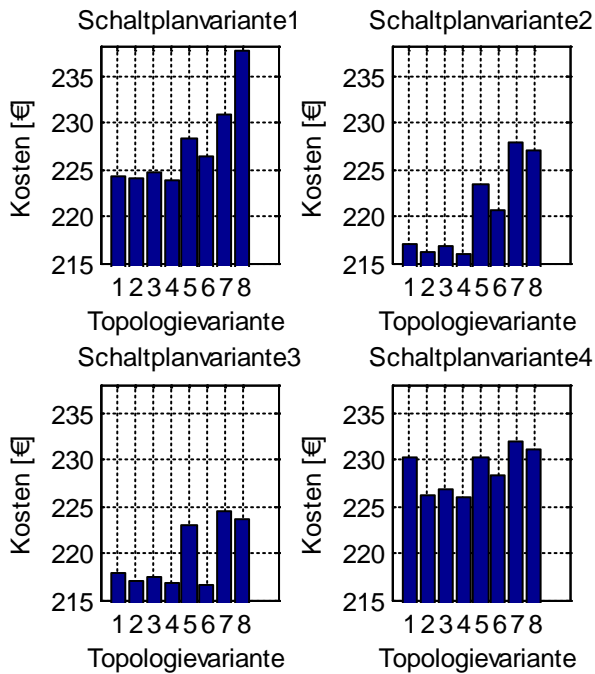
**Bild 8:** Ablaufdiagramm der Methodik

## 5 Ergebnisse

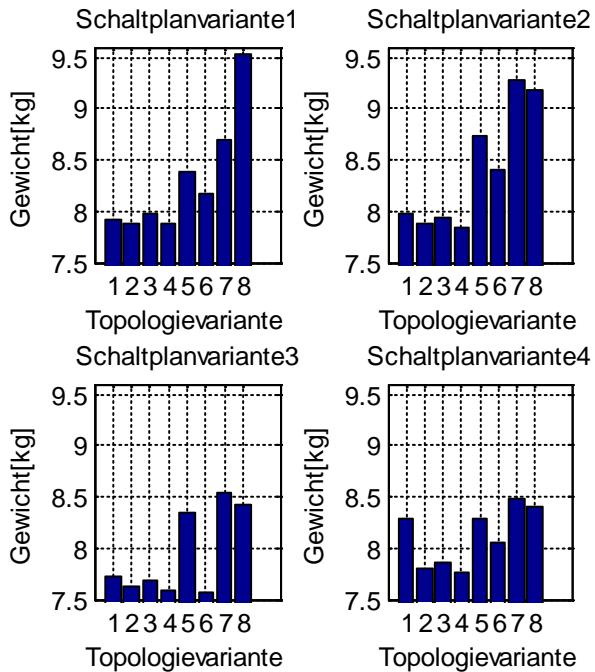
Für die in Bild 1 dargestellten Schaltplanvarianten werden verschiedene Topologien berechnet und bewertet. Das Gesamtgewicht und die Kosten für jede Topologievariante werden dabei bestimmt und sind in **Bild 9** und **Bild 10** dargestellt.

Die Betrachtung der Gesamtkosten zeigt, dass die Schaltplanvarianten 2 und 3 die günstigsten Varianten sind. Dabei ist in Schaltplanvariante 2 die Topologievariante 4 (216 €) und in Schaltplanvariante 3 Topologievariante 6 (217 €) die günstigste.

Der Vergleich des Gesamtgewichts zeigt dass Schaltplanvariante 3 mit Topologievariante 6 (7,6 kg) und Schaltplanvariante 4 mit Topologievariante 4 (7,8 kg) die leichtesten Varianten sind.



**Bild 9:** Variantenvergleich – Gesamtkosten



**Bild 10:** Variantenvergleich – Gesamtgewicht

Da alle Topologievarianten sehr unterschiedlich bewertet sind, wird deutlich, dass die Leitungskosten bzw. das Leitungsgewicht einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten bzw. das Gesamtgewicht haben. Werden die Ergebnisse getrennt nach Leitungen und Wandler untersucht, um die Einflüsse zu analysieren, wird deutlich, dass bei der Schaltplanvariante 4 die Verkabelung am günstigsten ist, während bei Schaltplanvariante 2 und 3 die Wandler am günstigsten sind.

Die Aufteilung der Kosten auf die Leitungen und Wandler in Abhängigkeit der Varianten ist in **Tabelle 2** und **Tabelle 3** dargestellt.

SVar \ TVar	1	2	3	4	5	6	7	8
1	13,71	13,38	14,13	13,29	17,62	15,79	20,19	27,00
2	18,94	18,11	18,61	17,78	25,18	22,52	29,75	28,92
3	15,04	14,21	14,71	13,88	20,11	13,71	21,69	20,86
4	14,87	10,88	11,47	10,64	14,96	13,05	16,53	15,87

**Tabelle 2:** Variantenvergleich – Leitungskosten

Schaltplanvariante	Kosten
1	210 €
2	198 €
3	203 €
4	215 €

**Tabelle 3:** Variantenvergleich – Wandlerkosten

Schaltplanvariante 4 weist die geringsten Leitungskosten auf. Die Wandlerkosten für diese Variante sind allerdings aufgrund der Leistung, die jeder Wandler übertragen bzw. umwandeln muss sehr hoch.

Die Wandlerkosten der Schaltplanvariante 2 liegen bei 198 € und sind damit die günstigsten, da es sich hier um ein dezentrales Konzept handelt. Die Leitungskosten für Topologievariante 4 liegt bei 18 €. Die Leitungsverlegung ist teurer, da für jeden Verbraucher von der HV-Quelle zum Wandler und vom Wandler zum Verbraucher die Leitung verlegt werden muss.

Die Bewertung anhand des Gewichts liefert analoge Ergebnisse, da die Gewichtsfunktionen ebenfalls vom Querschnitt bzw. von der Nennleistung abhängig sind, siehe **Tabelle 4** und **Tabelle 5**.

SVar \ TVar	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1,66	1,62	1,71	1,61	2,13	1,91	2,44	3,26
2	2,29	2,19	2,25	2,15	3,04	2,72	3,59	3,49
3	1,82	1,72	1,78	1,68	2,43	1,66	2,62	2,52
4	1,80	1,31	1,38	1,28	1,81	1,58	2,00	1,92

**Tabelle 4:** Variantenvergleich – Leitungsgewicht

Schaltplanvariante	Gewicht
1	6,26 kg
2	5,69 kg
3	5,91 kg
4	6,48 kg

**Tabelle 5:** Variantenvergleich - Wandlergewicht

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem erstellten Leitungsmodell können verschiedene Mehrspannungsbordnetzkonfigurationen bewertet und die optimale Variante bestimmt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass ausgehend von den berechneten Kosten- und Gewichtsfunktionen die optimale Variante mit der entwickelten Methodik gefunden werden kann. Den größten Einfluss auf die Bewertung haben die Wandlerkosten bzw. das Wandlergewicht. Da der Unterschied zwischen den einzelnen Schaltplanvarianten nicht sehr groß ist, muss ebenfalls die Leitung in der Optimierung betrachtet werden.

Bei weiteren Untersuchungen sollten die Verluste durch Wärme in Wandlern und Leitungen betrachtet und in das Bewertungsschema mit einbezogen werden. Ebenfalls müssen alle möglichen Schaltplan- und Topologievarianten untersucht werden. In dieser Veröffentlichung wird nur ein Auszug aus den möglichen Konfigurationen gezeigt. Zusätzlich sollte der Einfluss der Leitungslängen auf das Ergebnis betrachtet werden.

Die approximierenden Kosten- und Gewichtsfunktionen für die DC-DC-Wandler müssen erweitert und optimiert werden, um genauere Aussage über einzelne Varianten treffen zu können.

## 7 Literatur

- [1] G.J. Anders: Rating of electrical power cables. Ampacity computations for transmission, distribution and industrial applications, IEEE Press, Ed. New York: McGraw Hill, 1997.
- [2] M. Diebig; S. Frei; H. Reitingger; C. Ullrich: Modeling of the automotive power supply network with VHDL-AMS, Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, 2010.
- [3] N. N. Greenwood; A. Earnshaw: Chemie der Elemente, 1. Aufl. Weinheim: VCH, 1988.
- [4] finanzen.net, Februar 2012, <http://www.finanzen.net/rohstoffe/kupferpreis/euro>
- [5] J. Hu: Bewertung von DC-DC-Topologien und Optimierung eines DC-DC-Leistungsmoduls für das 42-V-Kfz-Bordnetz, 1. Aufl, ISEA Dissertation, 2003, Vol. 36.