

Ein ganzheitlicher Ansatz zur Generierung und Optimierung von Fahrzeugbordnetzen

A Comprehensive Approach for Generation and Optimization of Automotive Electric and Electronic Distribution Systems

Dipl.-Ing. **R. Gemmerich**, Dr. **S. Semmelrodt**, FG Fahrzeugsysteme, Universität Kassel;

Prof. Dr. **A. Zündorf**, Dipl.-Inf. **C. Reckord**, FG Software Engineering, Universität Kassel;

Prof. Dr. **J. Lehold**, Dipl.-Ing. **J. Trippler**, Volkswagen AG, Wolfsburg;

Dr. **L. Brabetz**, Dipl.-Ing. **D. Müller**, VW-Bordnetze GmbH, Wolfsburg;

Dr. **U. Schrey**, Dipl.-Ing. **H.-G. Weil**, Siemens VDO Automotive AG, Regensburg

Kurzfassung:

Der vorliegende Beitrag stellt einen neuartigen Ansatz zur Optimierung von Bordnetzarchitekturen vor, welcher im Hinblick auf die stetig zunehmende Komplexität der Fahrzeugelektrik/-elektronik auf einer ganzheitlichen Betrachtung sowohl der Leitungssätze als auch der Steuergerätearchitekturen basiert. Hierfür wird zunächst das zugrunde liegende Prinzip der Bordnetzgenerierung bzw. -optimierung erläutert und anschließend die Struktur und die Eigenschaften des verwendeten Bordnetzmodells einschließlich der Kostenabbildung beschrieben. Untersuchungen anhand von Teilumfängen eines realen Kleinwagenprojektes belegen u. a., dass die Modellansätze und Verfahren zur Abbildung und Generierung von Bordnetz- und Steuergerätearchitekturen geeignet sind.

1. Einleitung

Die Architektur von Fahrzeugbordnetzen entsteht heute weitgehend evolutionär indem neue oder weiterentwickelte Elektrik-/Elektroniksysteme in das Aufbau-, Fertigungs- und Logistikkonzept vorhandener Bordnetzarchitekturen der Vorgängermodelle integriert werden. In diesem Rahmen eingesetzte Optimierungsansätze beschränken sich zumeist auf die Optimierung von Teilbereichen des Bordnetzes, beispielsweise die Steuergerätearchitektur. Aufgrund der engen Kopplung zwischen den Teilsystemen kann diese Vorgehensweise bereits bei heutigen Bordnetzen keine optimale Gesamtlösung mehr zur Verfügung stellen. Unter Berücksichtigung des anwachsenden Kostendrucks auf das Produkt Bordnetz und die gleichzeitig stetige Zunahme des Elektrik/Elektronik-Anteils im Fahrzeug [1] werden zukünftig neue Methoden erforderlich, die das Bordnetz und die Elektrik/Elektronik (E/E) als eine Einheit betrachten und somit einen ganzheitlichen Lösungsansatz zur Verfügung stellen, der den Entwurf von *optimalen* Bordnetzarchitekturen ermöglicht (vgl. mit [2]).

Im Folgenden wird ein neuartiger Ansatz zur automatisierten Generierung einer kostenoptimalen Bordnetzarchitektur vorgestellt, wobei als Bordnetz hier die Gesamtheit aus Leitungssätzen und zugehörigen Steuergeräten zu verstehen ist. Die Generierung berücksichtigt hierbei die wesentlichen Randbedingungen, die sich aufgrund der vorgegebenen Fahrzeugfunktionen und des Fahrzeug-Packages ergeben. Zielstellung des Ansatzes ist die grundlegende Untersuchung von Bordnetzarchitekturen für die Zeit während der frühen Konzept- und Prototypenphase einer Fahrzeugentwicklung. Die integrierte Herangehensweise bildet dabei die Basis für weiterführende (konventionelle) Entwurfs- und Optimierungsmaßnahmen, welche durch eine stärker detaillierte Betrachtung der Teilsysteme den generierten Entwurfsvorschlag weiter konkretisieren und verfeinern sollen.

2. Konzept

2.1. Partitionierung von Fahrzeugfunktionen

Aufgrund des stetig zunehmenden E/E-Anteils in Fahrzeugbordnetzen sowie der ansteigenden Komplexität der zu realisierenden Fahrzeugfunktionalität geht der Trend von ehemals fest verdrahteten Funktionen hin zur mikroprozessorgesteuerten Umsetzung innerhalb von Steuergeräten (SG). Durch die Abhängigkeit der Funktionen untereinander sowie die häufige Mehrfachnutzung von Sensorik bzw. Aktorik ist zumeist eine fahrzeugweite Vernetzung aller intelligenten Baugruppen, d. h. der Steuergeräte, umgesetzt. Unter diesen Voraussetzungen bietet eine ‚funktionsorientierte‘ Partitionierung der Fahrzeugfunktionen gegenüber der heutzutage üblichen ‚systemorientierten‘ Partitionierung Vorteile. Hierbei werden Systeme und zugehörige Funktionen in Module zergliedert und auf potentielle Steuergerätepositionen im Fahrzeug verteilt, wodurch ein E/E-Architekturentwurf mit mehr Freiheitsgraden ermöglicht wird. Es sei angemerkt, dass die funktionsorientierte Partitionierung den systemorientierten Ansatz als Spezialfall beinhaltet und somit auch Untersuchungen mit herkömmlichen Partitionsansätzen¹ möglich ist.

Grundlage für die funktionsbasierte Aufteilung der Fahrzeugfunktionalität ist die Modularisierung von Systemen und übergeordneten Funktionen. Diese werden in ‚Basis-‘ und ‚Systemfunktionen‘ zerlegt, wobei Erstere die physikalische Schnittstelle zwischen der Applikation und den E/E-Komponenten, also der Sensorik und Aktorik, abbilden und Letztere die Umsetzung der logischen Teilfunktionen, d. h. der eigentlichen Applikation, repräsentieren. Diese Aufteilung erlaubt eine separate Partitionierung der Hard- und Software-Ressourcen innerhalb des Fahrzeug-Packages. Weiterhin ergibt sich durch die Verteilung der Funktionen eine Einflussnahme sowohl auf die SG-Architektur als auch auf die Leitungssätze. Beispielsweise

¹ Dies ist insbesondere für die Abbildung nicht modularisierbarer Teilsysteme wie die Motor-, ABS- oder ESP-Steuerung notwendig.

kann durch eine sensor- bzw. aktornahe Platzierung der Basisfunktionen, gleichbedeutend mit der Positionierung der HW-Schnittstellen, der Leitungsaufwand von Energieleitungen gegenüber dem systemorientierten Ansatz reduziert werden. Unabhängig davon können Systemfunktionen innerhalb einiger weniger Bauräume gebündelt und damit beispielsweise eine zentrale Rechereinheit erzwungen werden.

2.2. Generierung einer kostenoptimalen Bordnetz- und Steuergerätearchitektur

Die Generierung des Bordnetzes, d. h. der Leitungssätze und der Steuergeräte, erfolgt auf der Basis einer zunächst manuell² vorgegebenen Verteilung von Basis- und Systemfunktionen (s. Bild 1). Dabei wird für jeden Einbauraum mit zugewiesener Funktionalität ein SG erzeugt, welches gemäß den Anforderungen der zu realisierenden Funktionen und der beteiligten E/E-Komponenten hinsichtlich der benötigten Hardware einschließlich der Mechanikumfänge und den Prozessorressourcen, wie Rechenleistung und Speicheranforderung, ausgelegt wird. Neben der Ein-/Ausgabe-Schnittstelle zur jeweils angeschlossenen Sensorik/Aktorik werden hier auch die Schnittstellen zum Kommunikationsnetz des Fahrzeugs berücksichtigt. Dieses Kommunikationsnetz realisiert den Datenaustausch zwischen den Funktionen bzw. den Steuergeräten und wird im Rahmen der Kommunikationsstrukturierung automatisch generiert. Als Kriterium hierfür dienen wiederum Anforderungen der beteiligten Signale und Funktionen, die Kontrolle der resultierenden Busauslastung sowie die Kosten der hierfür benötigten Hardware. Die Vernetzung sowohl zwischen Steuergerät und den E/E-Komponenten als auch zwischen den SGs untereinander ist durch die Interaktion der System- und Basisfunktionen vorgegeben. Entsprechend kann eine Netzliste erzeugt werden, die als Grundlage für die Verdrahtung zwischen den SGs und den E/E-Komponenten dient.

Um ebenfalls fest verdrahtete, also konventionelle Funktionen im Bordnetz zu berücksichtigen, wird die automatisch erzeugte Netzliste durch eine zweite, manuell definierte Netzliste ergänzt. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen, welche durch das Fahrzeug-Package vorgegeben werden, erfolgt die Generierung der Leitungssätze. Diese umfasst den Topologieentwurf der Energieversorgung einschließlich Absicherungskonzept/Leitungsdimensionierung, die Realisierung der Masseverbindungen und des Kommunikationsnetzes sowie die Leitungsverlegung. Die Konfektion der einzelnen Leitungssätze erfolgt anschließend unter Berücksichtigung des Leitungsschutzes sowie von Montageaspekten, wie z. B. die Integration von Tüllen und Koppelstellen. Die hierfür notwendigen Informationen werden wiederum über das Fahrzeug-Package durch die Karosserie, genauer gesagt durch die Eigenschaften des Trassennetzwerkes vorgegeben.

² Im Rahmen einer Architekturoptimierung erfolgt dieser Verarbeitungsschritt ebenfalls automatisiert.

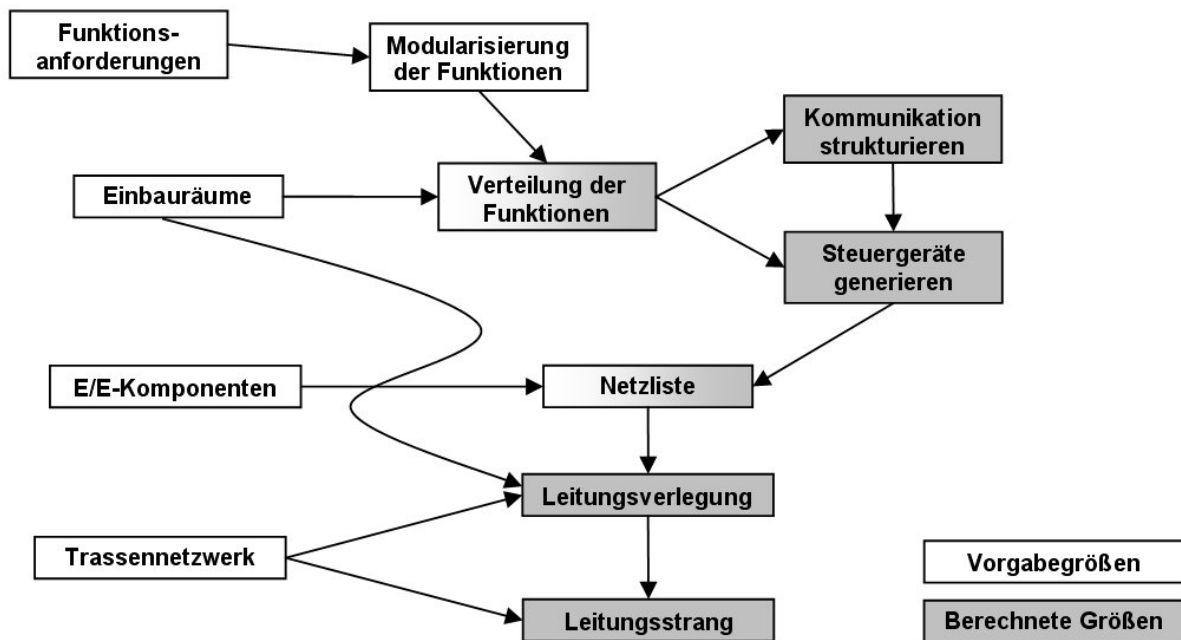


Bild 1: Prinzipieller Ablauf und Abhängigkeiten zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen zur Generierung eines optimalen Bordnetzes

2.3. Architekturoptimierung durch Funktionspartitionierung

Unter Verwendung des zuvor erläuterten Verfahrens zur Generierung *eines* optimalen Bordnetzes ist die Optimierung einer vollständigen Bordnetzarchitektur über die Variation der Funktionsverteilung und den Vergleich der resultierenden Bordnetzstrukturen möglich. Dies kann im Rahmen von Einzelstudien durch eine gezielte Verteilung der Funktionsmodule im Fahrzeug-Package manuell durchgeführt werden oder aber, mit Hilfe von genetischen Algorithmen, automatisiert erfolgen. Zusätzlich können bei der letzteren Vorgehensweise einschränkende Eigenschaften der Funktionen, wie z. B. der Diebstahlschutz, Wake-Up Fähigkeit etc. als Kriterien für die Verteilung berücksichtigt werden, um die Verwendbarkeit der resultierenden Architekturen zu gewährleisten.

3. Modellansätze

3.1. Bordnetzmodellierung

Für die Realisierung des zuvor beschriebenen Konzepts wird ein Modell zur vereinfachten Beschreibung eines Fahrzeugbordnetzes vorgeschlagen, welches die Struktur und die Eigenschaften der Fahrzeugkarosserie inklusive aller E/E-Komponenten als Vorgabe für die Bordnetzgenerierung abbildet, die Definition der funktionalen Eigenschaften des Fahrzeugs gestattet und die Konfektionierung von Leitungssätzen und Steuergeräten erlaubt. Aufgrund der hohen Komplexität der Problemstellung ist das Modell in sieben Teilmodelle untergliedert, welche die wesentlichen Teilaspekte des Bordnetzes kapseln. Bild 2 zeigt die Struktur des Modells und verdeutlicht darüber hinaus den Datenfluss zwischen den Teilmodellen, wobei die Blöcke links im Bild die Eingangsdaten, die mittleren Blöcke die verarbeiteten Da-

ten und die Blöcke auf der rechten Seite die Ausgangsdaten darstellen. Bindeglied zwischen den Teilmodellen bilden die Methoden zur Bordnetzgenerierung bzw. -optimierung, welche die Abhängigkeiten der Daten repräsentieren. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Eigenschaften und Methoden aller Teilmodelle zusammengefasst, welche im Verbund mit den Projektpartnern: Volkswagen AG, VW Bordnetze GmbH und Siemens VDO Automotive AG zusammengetragen bzw. erarbeitet wurden.

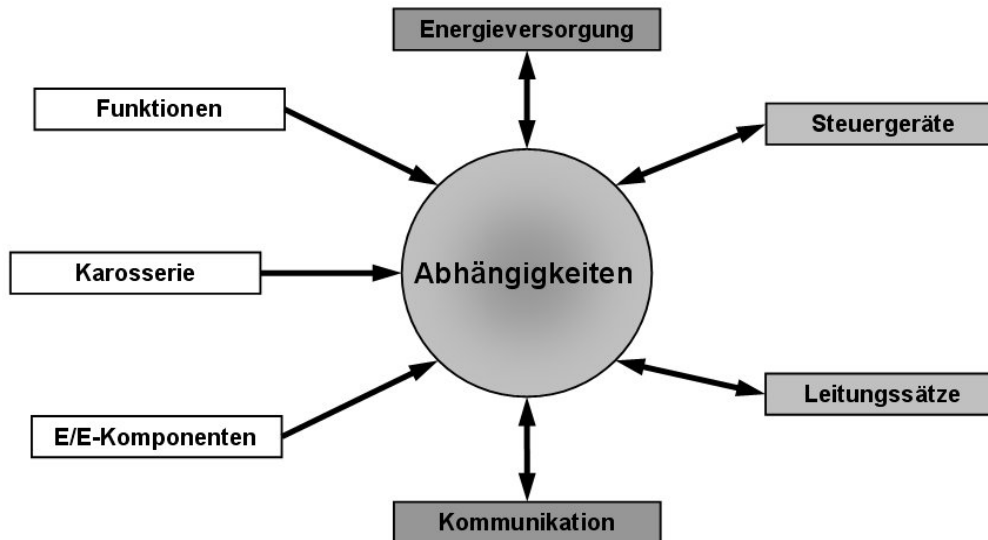


Bild 2: Teilmodelle und Abhängigkeiten zur Abbildung und Generierung eines Fahrzeugbordnetzes

3.2. Kostenmodellierung

Das Kostenmodell ist hierarchisch strukturiert und stellt modulare Berechnungsmethoden sowohl für Objekte der untersten Modellebene wie z. B. Leitungen, Sicherungen, Befestigungen etc. als auch für die übergeordneten Objekte wie das gesamte Fahrzeug, die Leitungssätze und Steuergeräte zur Verfügung. Somit steht nicht nur ein Kriterium für die Lokalisierung des globalen Optimums sondern auch zusätzliche Gütekriterien für die lokale Optimierung von Teilstrukturen zur Verfügung, wie sie z. B. bei der Generierung des Absicherungskonzepts zur Positionierung von Sicherungen und Splicen benötigt werden. Die zur Begrenzung des Berechnungsaufwandes vorliegende Notwendigkeit intrinsischer Optimierungsläufe ist weiterhin ein Grund dafür, dass eine Differenzierung zwischen Material- und Fertigungskosten auf allen Kostenebenen vorgenommen wurde. Gemäß der hier verwendeten Definition berücksichtigen die Materialkosten den Aufwand für Material und Fertigung beim Zulieferer, wohingegen die Montagekosten ausschließlich den Fertigungsaufwand für die Montage des Bordnetzes beim OEM bewerten. Um eine repräsentative Abbildung der Kosten zu gewährleisten, wurden Material- und Montagekosten für Leitungssatz und Elektronikkomponenten exemplarisch anhand von realen Produkten sowie Fallstudien durch die Projektpartner analysiert, die Kostenfunktionen modelliert und eine geeignete Parametrierung des Modells vorgenommen.

Tabelle 1: Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften aller Teilmodelle

<p>Funktionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Benötigte Signale → Sensorik/Aktorik • Charakterisierung anhand von SW-Modulen <ul style="list-style-type: none"> - Rechenleistung - Speicherplatzbedarf (RAM, ROM, EEPROM) • Attribute für die Platzierung <ul style="list-style-type: none"> - Interaktion der Funktionen in einem Prozess - Wake-up-Verhalten (Ruhestrom SG) - Diebstahlrelevanz • Attribute für die Signalübertragung <ul style="list-style-type: none"> - Zeitliche Anforderungen - Buslast 	<p>Karosserie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugbereiche/-übergänge <ul style="list-style-type: none"> - Vorgabe der Umweltbedingungen - Montageaspekte (Koppelstellen/Tüllen) • Trassennetzwerk umfasst <ul style="list-style-type: none"> - E/E-Komponenten (Sensorik/Aktorik) - Einbauräume - Kabeltrassen • Attribute für die Komponentenintegration <ul style="list-style-type: none"> - Vorgabe der Abmessungen - Zugriffsicherheit - Sicherung-/Relais-Integration erlaubt • Attribute für die Leitungsverlegung <ul style="list-style-type: none"> - Trassenlänge und -querschnitt - Splice-Integration erlaubt • Leitungsschutz und -montage <ul style="list-style-type: none"> - Wickelband, Formteile, ... - Anzahl und Art der Befestigungen - Zugänglichkeit hinsichtlich Montage
<p>E/E-Komponenten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integrierte Sensorik/Aktorik → Signale • Definition der benötigten Treiber-HW • Steckverbindungsart und Kontaktgrößen • Attribute für die Energieversorgung <ul style="list-style-type: none"> - Nennstrom - Absicherungsgruppe - Signal- bzw. Masseart (EMV-Richtlinien) 	<p>Steuergeräte</p> <ul style="list-style-type: none"> • Funktionale Beschreibung als Basis • HW-Beschreibung <ul style="list-style-type: none"> - Prozessor und Basis-HW - Treiber-HW und ASICs - Kommunikationsschnittstellen - Steckverbindung und Kontakte - Leiterplatte - Gehäuse • SW-Beschreibung <ul style="list-style-type: none"> - SW-Module für Systemfunktionen - Basis-SW (Betriebssystem, ...) - Benötigte Rechenleistung - Speicheranforderung (RAM, ROM, ...) • Bauvolumenoptimierung <ul style="list-style-type: none"> - Integration von HW-Modulen in ASICs - Auswahl der Leiterplattentechnologie • Einfluss der Umweltbedingungen • Integration von Sicherungen möglich
<p>Energieversorgung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwurf einer optimalen Leitungsstruktur <ul style="list-style-type: none"> - Manuelle Netzlistendefinition - Netzlistengenerator über Funktionsverteilung • Auslegung des Absicherungskonzeptes <ul style="list-style-type: none"> - Variable Anzahl von Absicherungsebenen - Selektive Absicherung - Berücksichtigung von Absicherungsgruppen - Leitungsdimensionierung • Auslegung des Massekonzeptes <ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigung von Massearten - Leitungs- und Kontaktdimensionierung • Leitungsverlegung <ul style="list-style-type: none"> - Platzierung von Sicherungen und Splicen - Beachten von EMV-Richtlinien 	<p>Leitungssätze</p> <ul style="list-style-type: none"> • Optimierung von Koppelstellen • Maschenauflösung • Einhalten technischer Randbedingungen <ul style="list-style-type: none"> - Trassen- und Einbauraumbelegung - Regeln für Splice-Konfiguration - Leiterquerschnitt an Kontakten
<p>Kommunikation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verschiedene Bus-Technologien <ul style="list-style-type: none"> - Nettodatenraten - Übertragungsqualität - Benötigte HW (Leitungsart, Treiber-HW, ...) • Strukturierung der Fahrzeugkommunikation <ul style="list-style-type: none"> - Anforderungen an die Signalübertragung - Kommunikations- und Funktionsdomänen • Entwurf einer optimalen Bus-Topologie 	

4. Realisierung

Aufgrund der Komplexität der zugrunde liegenden Daten und deren Abhängigkeiten (als Datenbasis wurde eine relationale Datenbank eingesetzt) wurde für die Umsetzung der Verfahren ein objektorientierter Ansatz gewählt und ein iterativer Softwareentwicklungsprozess mit kurzen Entwicklungszyklen und quartalsweisen Projekttreffen mit dem Konsortium der Auftraggeber: der Volkswagen AG, der VW Bordnetze GmbH und der Siemens VDO Automotive AG etabliert. Bei der Entwicklung der Modellierungs- und Auswerte-Software war vor allem die Integration der Fahrzeugelektronik-Experten von zentraler Bedeutung. Daher bestand das zentrale Entwicklungsteam zu gleichen Teilen aus Mitarbeitern der Fachbereiche Elektrotechnik und Informatik. Um die Experten für die Fahrzeugelektronik optimal einzubeziehen, wurde die Softwareentwicklung anhand der Analyse von Beispielszenarien organisiert [3]. So wurde z. B. mit Hilfe von UML-Objektdiagrammen modelliert, welche HW-Komponenten bei der Platzierung einer bestimmten Systemfunktion in einem Steuergerät notwendig werden und wie diese Information aus der Datenbeschreibung abgeleitet werden kann. Aus solchen Objektdiagrammen konnten die Softwareentwickler mit wenig Aufwand die benötigten Softwarebausteine ableiten. Des Weiteren können aus solchen Beispielszenarien sehr leicht automatische Softwarefunktionstests erstellt werden, welche die korrekte Funktionsweise der entsprechenden Softwarebausteine prüfen. Durch die Code-Generierung des verwendeten FUJABA³ CASE-Tools konnte der Entwicklungsaufwand nach Einschätzung der Autoren um 80 % reduziert werden. Darüber hinaus integriert dieses Werkzeug ein graphisches Debugging-Werkzeug (DOBS), so dass Testläufe auch von den Mitarbeitern aus dem Fachbereich Elektrotechnik einfach und schnell durchgeführt werden konnten. Die Verwendung von UML-Objektdiagrammen zur Modellierung von Beispielsituationen ermöglichte somit nach einer erstaunlich kurzen Lernphase die Einbeziehung der Fahrzeugelektronik-Experten in alle Phasen der Softwareentwicklung, wodurch eine hohe Effizienz und Qualität bei der Implementierung gewährleistet werden konnte.

5. Validierung an realen Bordnetzstrukturen

5.1. Kostenmodell

Die Validierung der Modellstruktur einschließlich der verwendeten Parameter wurde anhand von Teilmängeln eines realen Kleinwagenprojektes mit hohem Ausstattungsgrad durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde zunächst das Fahrzeug-Package vollständig erfasst und Teilmängel des gegebenen Bordnetzes abgebildet. Hierzu gehören die Steuergeräte des Komfortbereiches, d. h. Bordnetz-, Komfort- und Türsteuergeräte sowie die Leitungssätze für Fahrertür und Innenraum.

³ Für detaillierte Informationen über das CASE-Tool FUJABA siehe www.fujaba.de.

Anhand der gegebenen Strukturen konnte das Kostenmodell hinsichtlich seiner Eignung überprüft werden, wobei zwei unterschiedlich komplexe Leitungssätze ausgewählt wurden, um repräsentative Ergebnisse zu gewährleisten. Die relative Abweichung des Kostenmodells lag für die Materialkosten der Leitungssätze bei ca. 10 %, für die Montagekosten bei etwa 15 % und für die Komponentenkosten der gegebenen Steuergerätearchitekturen bei nicht mehr als 5 %. Die Güte der Berechnungsergebnisse war dabei nicht nur auf die übergeordneten Kostenwerte eingeschränkt sondern wurde auch auf den untergeordneten Ebenen des Kostenmodells erreicht. Berücksichtigt man nun den Aspekt, dass für vergleichende Untersuchungen mehr die relativen und weniger die absoluten Kosten von Bedeutung sind, ist bei der erzielten Genauigkeit von der prinzipiellen Eignung des Kostenmodells auszugehen. Ferner steht mit dem entwickelten Kostenmodell ein vom Gesamtkonzept separierbares Entwicklungswerkzeug zur Verfügung, welches für aussagekräftige Kostenanalysen⁴ vorgegebener Bordnetzstrukturen eingesetzt werden kann bzw. im Rahmen von Konzeptstudien bei den Projektpartnern bereits eingesetzt wird.

5.2. SG-Generierung

Für die gegebenen Funktionsumfänge und deren Partitionierung im vorgegeben Fahrzeug-Package wurden Bordnetz-, Komfort- und Türsteuergeräte automatisch generiert. Entsprechend beinhalten die resultierenden Architekturen ausschließlich die Ausstattungsmerkmale der betrachteten Fahrzeugvariante und weichen aus diesem Grund teilweise vom Umfang der realen, überdimensionierten SG ab. Da der hier vorgestellte Ansatz keine Ausstattungsvarianten berücksichtigt, ist diese Abweichung Prinzip bedingt, kann jedoch durch die sukzessive Untersuchung verschiedener Ausstattungsvarianten einer Fahrzeugplattform kompensiert werden. Generell können mit dem vorliegenden Ansatz die für eine Architekturbewertung essentiellen Parameter, wie z. B. die Kosten, die Prozessoranforderungen, das Bau-raumvolumen und die Verlustleistung von SG mit einer akzeptablen Genauigkeit ermittelt werden. Dies konnte durch eine Gegenüberstellung mit Konzeptstudien verschiedener Zulieferer nachgewiesen werden. Insbesondere in Hinsicht auf den geringen Aufwand der automatischen Architekturbewertung wird damit die Untersuchung von SG-Architekturen im Vergleich zu komplexen Konzeptstudien stark vereinfacht.

5.3. Generierung Energieversorgung

Die große Anzahl an elektrischen Verbrauchern, Schaltelementen und deren Vernetzung sowie die Platzierung der Leitungssatzelemente, d. h. Leitungen, Sicherungen und Splice, im Trassennetzwerk eines Fahrzeuges führen bei der Generierung einer kostenoptimalen Ener-

⁴ Aufgrund der feinen Modellstruktur sind beispielsweise Einflussanalysen hinsichtlich Kostentrends einzelner Bordnetzbestandteile (z. B. Preisvariationen für Kupfer oder Halbleiter) denkbar.

gieversorgungsstruktur einschließlich der Absicherung zu einer Problemstellung von hoher Komplexität. Zusätzlich sind Randbedingungen, wie z. B. der Belegungsgrad von Leitungstrassen und Sicherungsdosen sowie diverse technische Regeln beim Entwurf des Leitungssatzes zu berücksichtigen. Folglich ist eine Optimierung des Gesamtproblems nicht innerhalb einer akzeptablen Zeitdauer realisierbar. Aus diesem Grund wird hier eine Aufteilung in Teilprobleme mit wesentlich geringerer Komplexität vorgeschlagen. Hierzu wird die Netzliste in so genannte ‚Partitionen‘ aufgeteilt (siehe Bild 3). Diese sind in einer Baumstruktur angeordnet und enthalten jeweils eine oder mehrere Verbindungspfade zwischen Kontakten gleichen Potentials. Aufgrund der Abhängigkeiten zwischen den Partitionen der Netzliste (Selektivität der Absicherung, Leiterquerschnitte etc.) kann die Generierung der Energieversorgungsstruktur einer Partition nicht als vollständig separierbares Optimierungsproblem behandelt werden. Jedoch können durch eine strukturierte Abarbeitung der Partitionen, ausgehend von den Partitionen der Verbraucher bis zur Partition der Batterie, die Einflüsse der untergeordneten Partitionen in den Teilloptimierungen berücksichtigt werden. Darüber hinaus zeigt die Analyse der Partitionsstruktur, dass die Einflüsse von übergeordneten Partitionen durch den Leiterquerschnitt der Speiseleitung abgebildet werden können. Daraus ergibt sich der folgende Lösungsansatz. Die Energieversorgungsstruktur einer Partition wird für jeweils alle anwendbaren Leiterquerschnitte der Speiseleitung optimiert. Die resultierenden Strukturen stehen somit für die Optimierung übergeordneter Partitionen als Lösungsvarianten unter Einhaltung der technischen Randbedingungen zur Auswahl, so dass durch die strukturierte Abarbeitung aller Partitionen, das globale Kostenminimum durch den Entwurf der obersten Partition repräsentiert wird.

Für die Optimierung einer einzelnen Partition werden die Verbindungspfade sowohl für die Verbraucher- als auch für die Speiseseite gruppiert. Aus der Gruppierung dieser Pfade wird eine Leitungsstruktur abgeleitet, die unter Ausnutzung der Freiheitsgrade eines Absicherungskonzeptes und aufgrund von Absicherungsgruppen abgesichert werden. Ist die resultierende Leitungsstruktur technisch umsetzbar, werden die Leitungen, Sicherungen und Kontakte für die nachfolgende Leitungsverlegung und Sicherungsplatzierung ausgelegt. Hierfür werden die technischen Randbedingungen, wie z. B. die Trassen- und Einbauraumbelegung überprüft und die Platzierung von Elementen mit Hilfe eines Strafpunktesystems realisiert.

Das Verfahren wurde anhand von Teilstrukturen des bereits erwähnten Kleinwagenprojektes händisch verifiziert und damit seine prinzipielle Eignung nachgewiesen. Hinsichtlich der Berechnungseffizienz wurden darüber hinaus Abschätzungen durchgeführt, die darauf hinweisen, dass das oben geschilderte Verfahren einen Entwurf komplexer Energieversorgungsstrukturen mit einem handhabbaren Rechenaufwand zur Verfügung stellen kann.

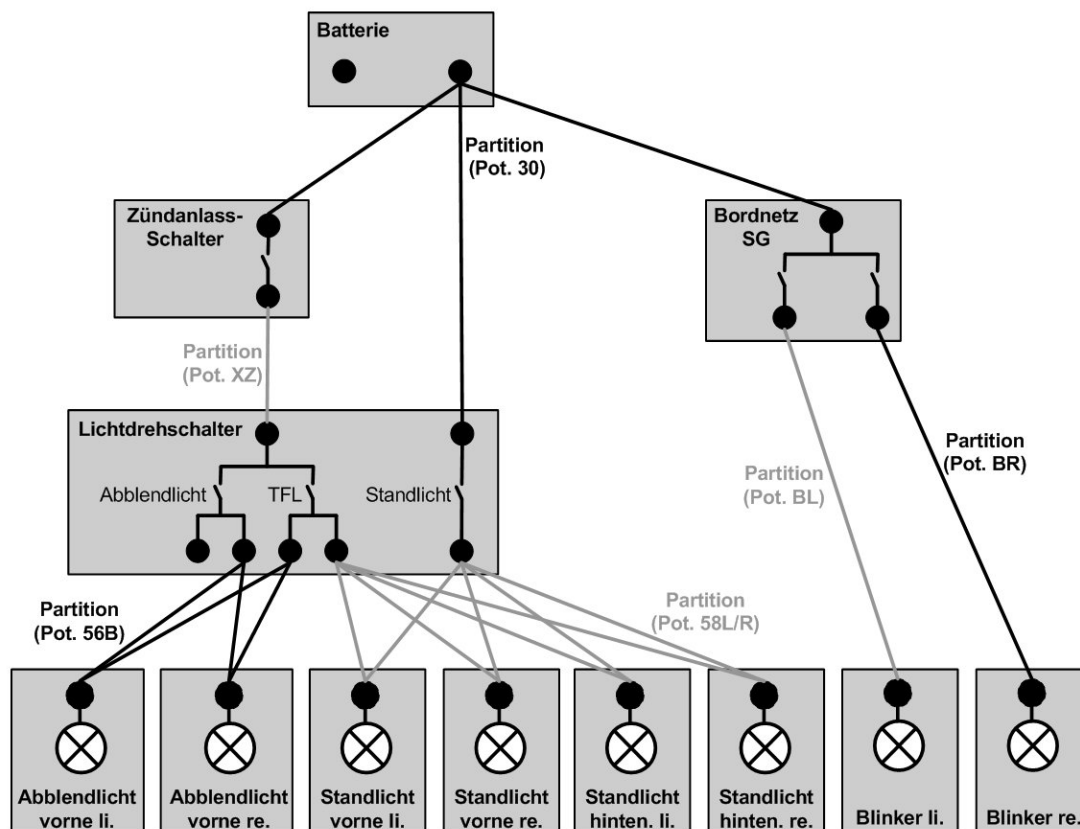


Bild 3: Darstellung der Netzliste mit der Partitionsstruktur

6. Schlussfolgerung und Ausblick

Der hier vorgestellte Ansatz zur Generierung einer kostenoptimalen Bordnetzarchitektur stellt ein ganzheitliches Verfahren für den Konzeptentwurf der Steuergeräte- und Leitungssatzstruktur einer Fahrzeugplattform zur Verfügung, welches die wesentlichen Einflussgrößen und Randbedingungen berücksichtigt. Die zugrunde liegenden Modelle sind wie gezeigt in der Lage die Bordnetzstrukturen abzubilden und hinsichtlich ihrer Kosten mit ausreichender Genauigkeit zu beschreiben. Die hier vorgestellte Herangehensweise zur Generierung von kostenoptimalen Leitungssätzen ermöglicht trotz der sehr komplexen Optimierungsaufgabe das Auffinden geeigneter Lösungen bei gleichzeitig akzeptablem Rechenaufwand. Insgesamt kann mit der vorliegenden Studie nachgewiesen werden, dass trotz der hohen Abhängigkeit der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren die ganzheitliche Betrachtung der Bordnetzoptimierung eine durchaus realisierbare Vorgehensweise darstellt und damit die Notwendigkeit für weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet gegeben ist.

- [1] Phillip Wesselhöft: „Achtung Baustelle“, McKinsey Wissen, No. 6, 2003, pp. 8-9
- [2] Matthias Auer und Oliver Gold: „Integrierter Ansatz für die Bordnetzentwicklung“, ATZ, Vol. 106, No. 10, 2004, pp. 906-911
- [3] I. Diethelm, L. Geiger and A. Zündorf: “Systematic Story Driven Modeling, a Case Study”, SCESM 2004 Workshop on ICSE, Edinburgh, Scotland, 2004