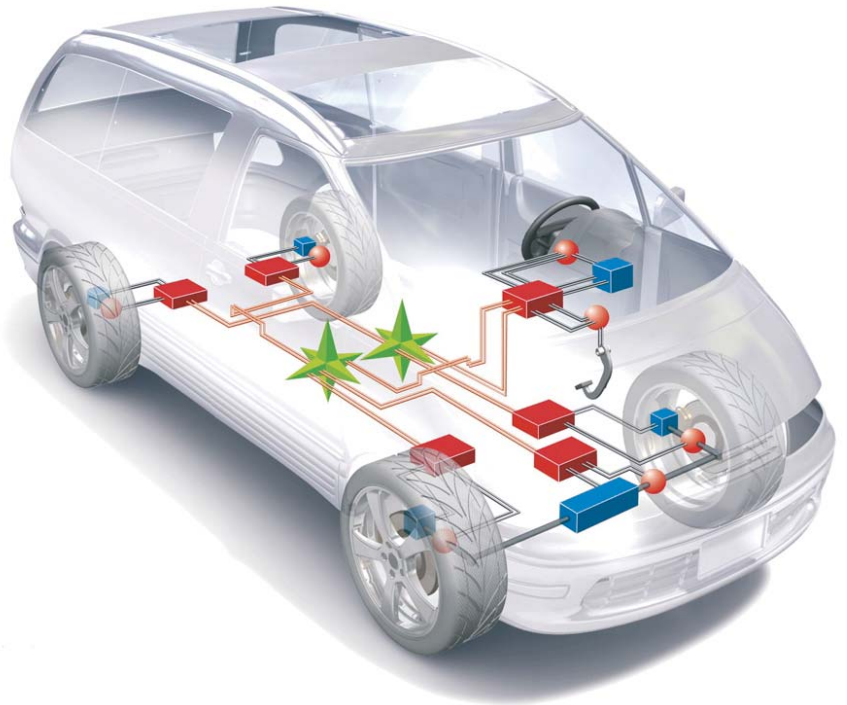


FlexRay frühzeitig im Griff

Teil 1: Grundlagen der physikalischen Schicht und deren Modellbildung

Dieser Artikel beschreibt eine simulationsbasierte Methodik für die Entwicklung von FlexRay-Topologien im Rahmen der physikalischen Schicht. Dieser erste Teil beschäftigt sich mit den Grundlagen der physikalischen Schicht von FlexRay, insbesondere der Signalintegrität. Sie sind die Basis für die Entwicklung entsprechender Modelle und die Auswertung der Gütekriterien von Topologien.

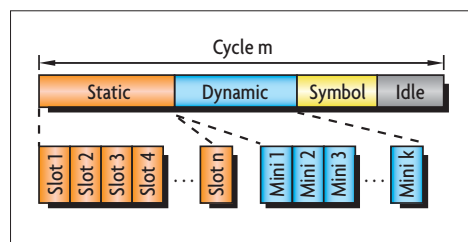
Von Thorsten Gerke und Thomas Suermann



Die Entwicklung und Standardisierung von FlexRay ist mittlerweile so weit fortgeschritten, dass FlexRay auch in Serienfahrzeugen Einzug gehalten hat. Die Praxiserfahrung mit FlexRay befindet sich bei den meisten Automobilfirmen noch in den Anfängen, speziell im Bereich der physikalischen Schicht sind Erfahrungen kaum vorhanden. Obwohl FlexRay und CAN sich an vielen Stellen in der physikalischen Schicht ähneln, gibt es hier gravierende Unterschiede, und Kenntnisse aus dem CAN-Bereich können nicht unmittelbar auf die Entwicklung von FlexRay-Topologien übertragen werden. Hinzu kommt, dass weder die FlexRay-Spezifikation noch die zugehörigen Applikationsschriften eindeutige Grenzen für Topologien definieren, innerhalb derer die Kommunikation einwandfrei funktioniert. Es werden lediglich Kriterien und Randbedingungen formuliert, die vom Systementwickler für jede potentielle Topologie zu prüfen sind.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass in der Konzeptphase die ge-

wünschte Topologie noch nicht in Form eines realen Netzwerkaufbaus vorliegt, an dem die Kriterien überprüft werden könnten. Um frühzeitig zu wissen, wie eine Netzwerktopologie sich später im Fahrzeug verhalten wird, ist es erforderlich, auf simulationsbasierte Entwicklungsmethoden zurückzugreifen. Diese erlauben ein



! Bild 1. FlexRay-Kommunikationszyklus.

Evaluieren der FlexRay-Kriterien in einer frühen Phase der Entwicklung nicht nur unter Nominal-, sondern auch unter Worst-Case-Bedingungen und helfen somit, Schwachpunkte im System frühzeitig aufzudecken und zu beseitigen. Die erhöhten zeitlichen Anforderungen von FlexRay im Vergleich zu CAN durch die höhere Datenübertragungsrate spiegeln sich auch in erhöhten Anforderungen an die Model-

lierung der physikalischen Schicht von FlexRay wider.

■ Grundlagen von FlexRay-Vernetzungssystemen

FlexRay wurde als flexible Vernetzungslösung konzipiert, die eine hohe Übertragungsrate und ein deterministisches Kommunikationsschema unterstützt. Darüber hinaus wird dem Sicherheitsaspekt durch verschiedene Funktionen Rechnung getragen, z.B. durch einen weiteren, redundanten Kommunikationskanal. Der Aufbau eines „FlexRay Communication Cycle“ ist exemplarisch in Bild 1 dargestellt. Dieser besteht aus vier Anteilen:

- ▶ Static Segment.
- ▶ Dynamic Segment.
- ▶ Symbol Segment.
- ▶ Idle Segment.

Die Zeitschlitze (Slots) im statischen Segment sind von definierter Länge, wohingegen die Länge im dynamischen Segment variieren kann – gemäß der benötigten Länge des jeweiligen Nachrichtenrahmens. Der Aufbau eines FlexRay-Rahmens ist in Bild 2 dargestellt. Jeder Nachrichten-

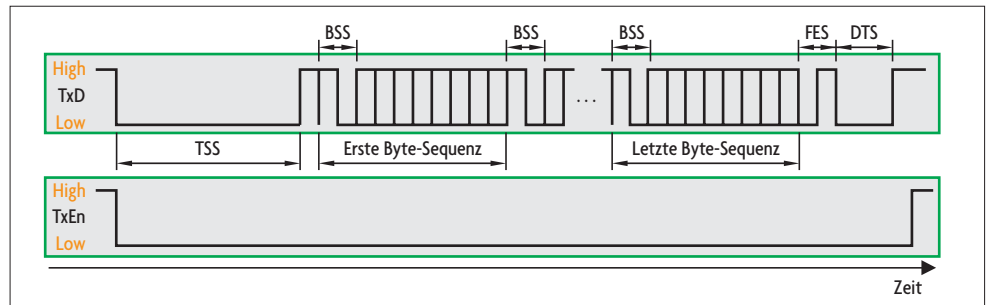
rahmen startet mit der Transmission Start Sequence (TSS), die aus einer vom Nutzer zu definierenden Anzahl von Logical Low Bits (logisch 0) besteht. Durch die TSS wird dem Netzwerk der Start einer Kommunikation signalisiert und es werden beispielsweise die Gates im aktiven Stern für die Kommunikation geöffnet. Die eigentliche Nutzinformation (Payload) wird durch eine konfigurierbare Anzahl von einzelnen Bytes im Nachrichtenrahmen abgebildet. Jedes Byte startet mit der Byte Start Sequence (BSS). Die fallende Flanke der BSS dient zur Synchronisation der lokalen Uhr jedes FlexRay-Knotens mit der globalen Uhr, um Timing-Toleranzen im System auszugleichen. Um das Ende eines FlexRay-Rahmens zu signalisieren, wird dieser mit einer Frame End Sequence (FES) terminiert. Im dynamischen Segment folgt nach der FES noch eine Dynamic Trailing Sequence (DTS), die zum Auffüllen des Zeitraums bis zum nächsten Minislot dient.

Die physikalische Schicht in FlexRay

Um die logischen Daten zwischen den FlexRay-Knoten austauschen zu können, wird neben dem eigentlichen Kommunikationsprotokoll eine Schicht benötigt, welche die physikalischen Signale überträgt. Die „Electrical Physical Layer Spezifikation“ (EPLS) des FlexRay-Konsortiums beschreibt die Anforderungen an die Hardware und mögliche Topologien. Hinsichtlich möglicher Topologien ist FlexRay sehr flexibel definiert worden. Abhängig von der Netzwerkphilosophie des OEM können fünf verschiedene Topologietypen zur Anwendung kommen:

- ▶ Linear.
- ▶ Punkt-zu-Punkt.
- ▶ Passiver Stern.
- ▶ Aktiver Stern.
- ▶ Hybrid (Aktiver Stern kombiniert mit passivem Stern oder linearem Bus; Bild 3).

Des Weiteren geben die zur Spezifikation gehörigen Applikationsschriften Hinweise zur Verwendung von Filterelementen wie Gleichtaktrosseln bzw. ESD-Schutzelementen. Es wer-



den aber keine Vorgaben für bestimmte Komponenten gemacht; weder die Spezifikation noch Applikationsschriften geben vor, wie ein lauffähiges System zusammenzufügen ist. Insbesondere wird offen gelassen, welche konkreten Grenzen für eine Topologie zu berücksichtigen sind. Dies bedeutet, dass zu einem konkreten Topologietyp und einer dedizierten Komponentenauswahl keine Hinweise vorliegen, ob diese Topologie einwandfrei funktionieren wird oder ob Probleme seitens der Signalintegrität zu erwarten sind und wo diese sich bemerkbar machen könnten. Die EPLS definiert aber die einzuhaltenden Randbedingungen der physikalischen Signalparameter, welche vom Systementwickler für jede einzelne Topologie-Implementierung sorgfältig zu prüfen sind (Bild 4). Im Folgenden werden die wichtigsten auszuwertenden Kriterien kurz erläutert.

Das Propagation Delay

Die vom Sender gesendeten Bits benötigen eine gewisse Zeit, bis sie die empfangenden Knoten erreichen. Das Propagation Delay, definiert als Zeitdiffe-

renz einer fallenden Flanke zwischen Sender und Empfänger, ist wichtig, da diese die Präzision der Synchronisation der FlexRay-Knoten untereinander bestimmt. Die FlexRay-Spezifikation definiert hier einen maximal zulässigen Wert von 2500 ns.

Truncation der TSS

Die TSS, welche beim Start der Kommunikation angeführt wird, erfährt eine Verkürzung, wenn sie beim Empfänger ankommt. Dies liegt maßgeblich an der Zeit, die aktive Sterne bzw. Transceiver benötigen, um Aktivität auf dem Bus zu erkennen, bevor das Bussignal an die anderen Zweige weitergeleitet wird. Am Empfänger muss mindestens ein Logical Low Bit im Communication Controller (CC) abge-

Bild 2. Aufbau eines FlexRay-Rahmens.

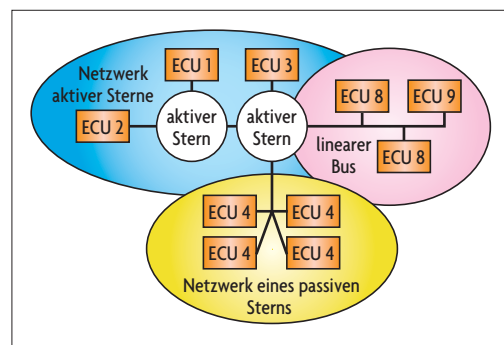
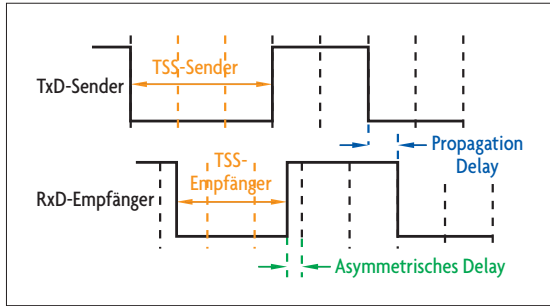


Bild 3. Hybride FlexRay-Topologie.

Bild 4. Signalparameter der EPLS (Electrical Physical Layer Specification).



tastet werden, um noch als gültige TSS erkannt zu werden. Die Spezifikation gibt für das Abschneiden (Truncation) der TSS einen zulässigen Bereich von 100 bis 3500 ns an. Es ist vom Systementwickler somit sicherzustellen, dass die TSS eine ausreichende Länge aufweist.

Das asymmetrische Delay

Jedes Vernetzungssystem ist mit Toleranzen beaufschlagt, welche z.B. durch Fertigung oder Temperatureinflüsse hervorgerufen werden können. So sind die Verzögerungszeiten der Signale durch den FlexRay-Transceiver für steigende und fallende Flanken leicht unterschiedlich beziehungsweise zeigen auch unterschiedliche Werte für die Signalwege durch den Transceiver (TxD → Bus bzw. Bus → RxD). Dies hat zur Folge, dass die vom Sender verschickten Bits mit veränderter Länge am Empfänger ankommen. Ein Bit kann sowohl verlängert als auch verkürzt werden. Mögliche Unsymmetrien in der CC-BD-Schnittstelle gilt es hier ebenfalls zu berücksichtigen. Diese zeitliche Manipulation der Bit-Länge muss innerhalb gewisser Grenzen bleiben, da sonst die Bit-Werte vom CC nicht mehr korrekt abgetastet werden.

Der Übergang Active → Idle

Ein Punkt der physikalischen Schicht, welcher in vergangenen Versionen der EPLS noch nicht ausreichend betrachtet wurde, ist die Phase des Übergangs vom aktiven in den Idle-Zustand. Dieser erfolgt mit dem Abschalten des Senders unmittelbar nach der FES bzw. der DTS. Da die Treiberstufe bei diesem Übergang vom niederohmigen in den hochohmigen Zustand schaltet, kann dies im gesamten Netzwerk je

nach Topologie zu unerwünschten Schwingungen führen, die sich auch in Mehrfachschaltungen am Empfänger äußern können. Der Systementwickler hat in diesem Zusammenhang den Channel Idle Recognition Point

(CHIRP) sorgfältig zu prüfen (Bild 5). Erst wenn dieser mit dem Abtasten von elf hintereinander folgenden High-Bits erreicht ist, kann der Bus für eine Nachricht des nachfolgenden Slots freigegeben werden.

Durch Schwingungen und Mehrfachschaltungen an RxD nach dem Abschalten der Senderstufe kann aber der CHIRP deutlich verzögert werden. Im schlimmsten Fall würde dieser bis in den Zeitschlitz der nächsten Nachricht verschoben, was eine Slot Boundary Violation verursachen würde. In einer künftigen Version der FlexRay-Spezifikation wird ein maximal zulässiger Wert für die Idle Reaction Time berücksichtigt.

Das Augendiagramm

Um neben der Bewertung der diskreten Kriterien auch das analoge Verhalten der Topologie in seiner Qualität zu

tungskriterium eingeführt. Wenn das gemessene Auge die Referenz erfüllt, ist eine ausreichende Signalintegrität sichergestellt.

Bei der Anwendung des Augendiagramms ist aber Vorsicht geboten. Eine Verletzung des Augendiagramms bedeutet nicht unmittelbar, dass die Topologie aus Sicht der Signalintegrität nicht funktioniert. Ausreißer in Form von Reflexionseffekten, die eine Verletzung des Augendiagramms verursachen würden, werden unter Umständen durch das Tiefpassverhalten des FlexRay-Transceivers herausgefiltert. In diesem Fall ist es ratsam, zusätzlich zum konservativen Ansatz des Augendiagramms auch das Signalverhalten am RxD-Ausgang des Transceivers genauer zu betrachten, um die Relevanz der Verletzung bewerten zu können. Das Augendiagramm ist somit kein notwendiges, aber ein hinreichendes Kriterium.

Modellbildung und Simulation der physikalischen Schicht

Um die Signalintegrität für eine FlexRay-Topologie bewerten zu können, ist es notwendig, die obigen Kriterien für alle Knoten einer Topologie zu untersuchen. Hieraus wird ersichtlich, dass dies unter Umständen zu ei-

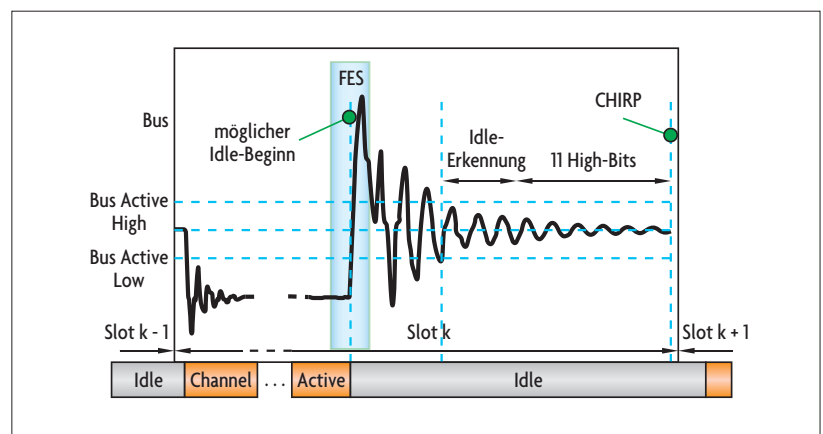


Bild 5. Der „Channel Idle Recognition Point“ (CHIRP).

evaluieren, ist das Augendiagramm ein übliches Werkzeug in Kommunikationssystemen und hier anwendbar für die Untersuchung der physikalischen Schicht von FlexRay. Bei der Bewertung durch das Augendiagramm wird ein Referenzauge als Bewer-

ner sehr umfangreichen Aufgabe werden kann. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass das System neben dem Nominalbetrieb auch für den Worst-Case zu untersuchen ist. Wünschenswert wäre auch, flexibel und zügig Optimierungsstrategien untersuchen

zu können. Sowohl in der frühen Konzeptphase als auch bei bereits bestehender, realer Implementierung der Topologie wäre es eine sehr mühselige Aufgabe, diese Tests und Optimierungen mittels Messungen im Labor durchzuführen. Hinzu kommt, dass gezielte Worst-Case-Szenarien anhand eines realen Topologieaufbaus nicht realisierbar sind.

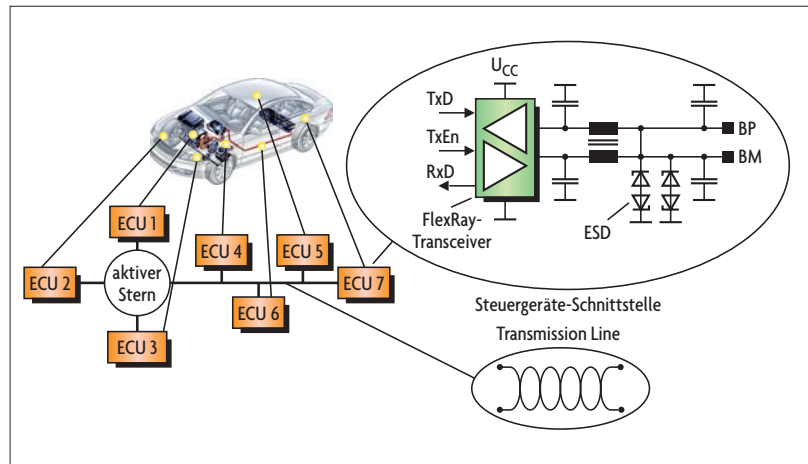
Als Ausweg bietet sich hier der modellbasierte Ansatz an. Für diese Umsetzung sind zwei Punkte notwendig: Simulationsmodelle mit ausreichend guter Qualität und Methodiken, die ein effizientes und zeitoptimiertes Arbeiten mit der virtuell nachgebildeten Topologie ermöglichen. Aus System-sicht ist zunächst der Topologietyp zu berücksichtigen: Liegt ein aktiver Stern vor oder handelt es sich zum Beispiel um einen einfachen linearen Bus?

Einen signifikanten Einfluss auf das analoge Signalverhalten hat das FlexRay-Kabel, welches durch ein entsprechendes „Transmission Line“-Modell abzubilden ist. Aus Sicht der Steuergeräte ist lediglich deren physikalische Bus-Schnittstelle zu berücksichtigen, die sich gemäß Bild 6 aus FlexRay-Transceiver (z.B. TJA1080A), Gleichtaktrossel, ESD-Schutz und Terminierung (hoch- oder niederohmig) zusammensetzt. Sollten weitere Komponenten verbaut sein, welche relevant für die Signalintegrität sind, so sind diese zu berücksichtigen.

FlexRay-Transceiver und aktiver Stern

Der FlexRay-Transceiver bildet eine wichtige Komponente bei der Modellierung der Netzwerk-Topologie. Für die Systemsimulation sind das Verhalten und die Funktion des Transceivers in Form eines Verhaltenmodells abzubilden, welches von den Details der Halbleiterimplementierung abstrahiert. Für die Analyse der Signalintegrität sind folgende Funktionen des Transceivers von Bedeutung:

- ▶ Sender- und Empfängerverhalten (TxD, RxD).
- ▶ Ein- bzw. Abschaltung der Treiberstufe (TxEN).
- ▶ Propagation Delay.



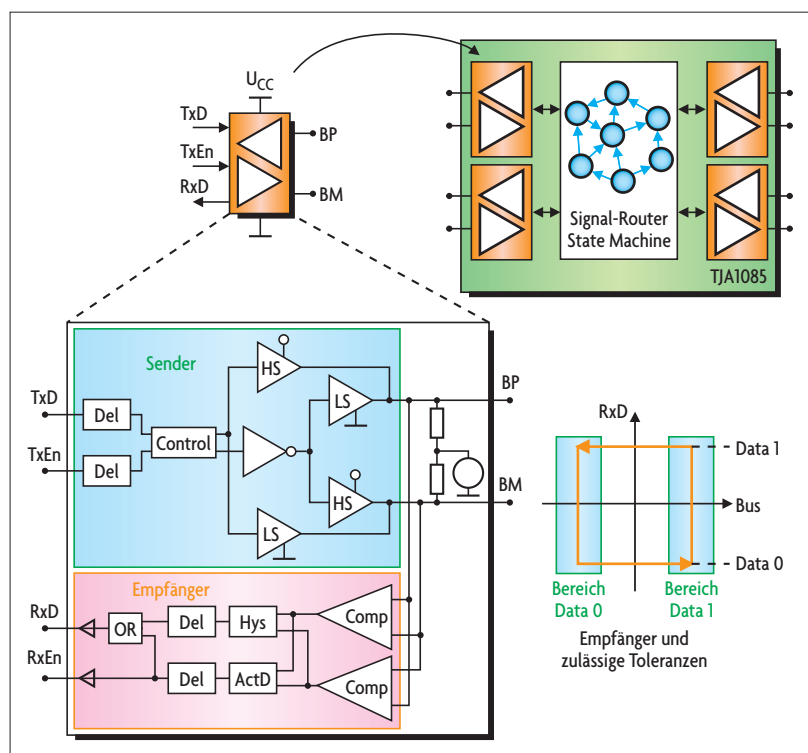
! Bild 6. Abstraktion einer FlexRay-Topologie.

- ▶ Asymmetrien von Schwellen und Delays.
- ▶ Spannungsversorgung (U_{CC}).

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung des Transceivers ist die Empfängerstufe, welche mit einer Hysterese versehen ist. Diese verhindert, dass das digitale RxD-Signal bei Klingeln (Ringing) auf dem Bus nicht permanent den Zustand wechselt. Durch das Tiefpassverhalten der Empfängerstufe werden Glitches mit hohen Frequenzen herausgefiltert und erhöhen damit zusätzlich die Stabilität des RxD-Signals. NXP hat bei der Model-

lierung der FlexRay-konformen Transceiver-Familie TJA108x (TJA1080A, TJA1081, TJA1082) diese Funktionen in das Modell integriert.

Für die Validierung einer Fahrzeugtopologie ist neben Modellierung und Simulation des Nominalverhaltens die Betrachtung von Worst-Case-Szenarien durch Bauteiltoleranzen und Temperatureinflüsse von größerer Bedeutung, denn Schwachpunkte im System zeigen sich dort am ehesten. Bild 7 illustriert diesen Zusammenhang exemplarisch für die Empfängerstufe. Die Schwellwerte der Empfängerstufe liegen im Nominalfall bei ± 225 mV und



! Bild 7. Single-Chip-Transceiver und aktiver Stern.

sind im Idealfall exakt symmetrisch zueinander. Aufgrund von Fertigungstoleranzen und Temperaturschwankungen bewegen sich die Schwellwerte innerhalb eines Toleranzbandes, das einer statistischen Verteilung unterliegt. Zum anderen sind die Schwellwerte im realen Fall auch nicht symmetrisch zueinander, sondern können mit einer Differenz von zehn Prozent betragsmäßig voneinander abweichen. Dies bedeutet, dass das Filterverhalten des Transceivers maßgeblich durch diese statistischen Toleranzen beeinflusst wird und das Signal am RxD-Pin bei gleichem Testmuster der Stimuli ein anderes zeitliches Verhalten aufzeigen kann als im Nominalfall. Für die Signalintegrität stellt sich der Worst-Case bei maximaler Empfängerschwelle und minimaler Ausgangsamplitude ein, wenn also der Signal-Rausch-Abstand am kleinsten ist.

Eine komplette Modellierung des statistischen Verhaltens des Transceivers wäre mit enormem Aufwand verbunden und ist für die Systembetrachtung auch nicht notwendig. In diesem Fall sind die Corner Cases von Interesse, die aus Sicht des Systems den Worst-Case darstellen. NXP hat diese Corner Cases im Modell abgebildet und durch umfangreiche Messungen verifiziert. Das Simulationsmodell des Transceivers ist auf Basis des IEEE-Standards VHDL-AMS von NXP mit dem Simulationswerkzeug Saber entwickelt worden. Kunden, welche eine simulationsbasierte Topologievalidierung durchführen, wird dieses Modell von NXP bereitgestellt. Zum IP-Schutz ist das Modell gemäß dem IEEE-1076-Standard verschlüsselt. Der TJA1085 als aktiver Stern kann als eine Kombination von vier einzelnen Transceivern und zusätzlichem Signal-Router dargestellt werden. Letzterer hat die Aufgabe, das ankommende Signal von einem Netzwerkast an die anderen freigeschalteten Äste weiterzuleiten. Für die Modellierung der internen Transceiver-Blöcke kann dabei auf das bestehende Modell vom TJA1080A zurückgegriffen werden. Die Logik des Signal-Routers wird über eine digitale Zustandsmaschine in dem Werkzeug StateAMS von Saber modelliert, welches automatisch IEEE-konformen VHDL-AMS-Code generiert.

Die Gleichtaktdrossel

Für die Modellierung der Drossel bieten sich mehrere Möglichkeiten an. Eine gängige Methode ist die Abbildung der Drossel mittels eines RLC-Netzwerkes. Dieser Ansatz birgt aber einige Tücken, da der Modellierer das entsprechende Ersatzschaltbild ermitteln muss und dieses auch zu parametrieren hat. Speziell die parasitären Effekte bereiten häufig Schwierigkeiten bei der Modellerstellung. Ein anderer Ansatz ist die direkte Verwendung von Datenblattinformation in Form der Streuparameter. Sie können vom Hersteller bezogen werden und stellen einen werkzeugunabhängigen Standard dar. Dies ermöglicht einen einfachen Modellaustausch zwischen dem Komponentenlieferanten und seinem Kunden. Die Streuparameter stellen gleichzeitig das Modell dar und müssen in Saber nur noch über eine Schnittstelle eingelesen werden.

Die Transmission Line

Die Modellierung des Kabels durch eine Transmission Line ist einer der wichtigsten Punkte und bedarf einer sorgfältigen Analyse der Anforderungen. Zum einen soll das Kabelmodell dem Anwender die Möglichkeit geben, die Kabellänge zu parametrieren, so dass recht einfach verschiedene Topologiekonfigurationen mit dem gleichen Kabelmodell dargestellt werden können. Zum anderen muss das Kabelmodell das physikalische Verhalten in Bereichen von mehreren 100 MHz korrekt abbilden. Aus den Arbeiten im FlexRay-Konsortium hat sich gezeigt, dass der Skin-Effekt, also die frequenzabhängigen Verluste der Transmission Line, nicht zu vernachlässigen ist. Eine Modellierung mit konstantem Verlustfaktor würde bei Simulationen zu falschen Ergebnissen führen, da bei den Oberwellen die Dämpfung zu gering wäre und beim stationären Verhalten zu groß. Saber bietet hierzu eine Implementierung des W-Elementes an, welches als Standard bei der Simulation von Transmission Lines eingesetzt wird. Das W-Element geht auf Arbeiten an der University of Berkley zurück und wurde in den letzten Jahren immer weiter entwickelt und verfeinert.

Die obigen Simulationsmodelle unter Verwendung der Kriterien der FlexRay-EPLS stellen den Ausgangspunkt für die Entwicklung von FlexRay-Systemen mit Hilfe virtueller Topologien dar. Im zweiten Teil der Artikelserie wird dieser Ansatz durch eine Analyse- und Auswertemethodik anhand eines realen FlexRay-Systems aus dem Automobilbereich ergänzt. sj



Thorsten Gerke

studierte an der Universität Duisburg Maschinenbau/Mechatronik und begann dann als Support- und Applikations-Ingenieur bei Avanti Systems. Seit 2002 ist er bei Synopsys, seit 2006 leitet er dort das Technische Marketing der Saber-Produktfamilie in Europa und ist zuständig für die Erarbeitung der Roadmaps und Produktstrategie.
thorsten.gerke@synopsys.com



Thomas Suermann

studierte an der Universität Paderborn Physik und begann im Anschluss als System-Ingenieur bei Philips Semiconductors (heute NXP Semiconductors). Im Automotive Innovation Center in Hamburg war er zunächst für die Produktdefinition von CAN-Transceivern zuständig, bevor er parallel zur Entwicklung der FlexRay-EPLS im Rahmen des FlexRay-Konsortiums die Implementierung und Serieneinführung des FlexRay-Transceivers TJA1080A betreute. Bei NXP Semiconductors ist er als Senior Engineer zentraler Ansprechpartner rund um das Thema Systemsimulation von Fahrzeug-Netzwerken.
thomas.suermann@nxp.com